



Программный комплекс по анализу и обеспечению тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры



Электронное издание

Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТР и АНА

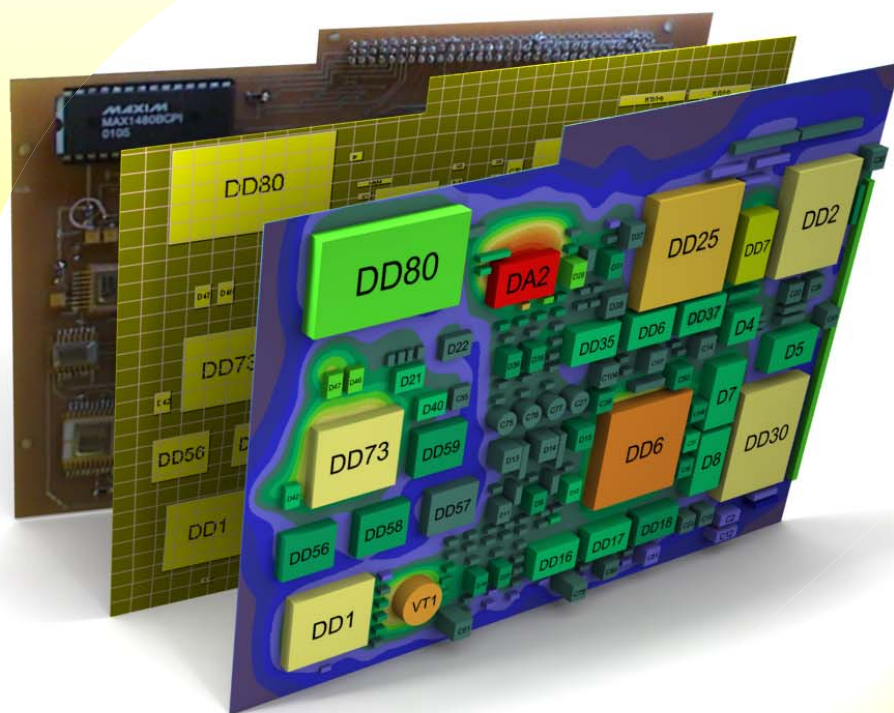
Монография

Создание эффективной программы испытаний аппаратуры на тепловые воздействия

Обоснование необходимости дополнительной защиты РЭА от температурных воздействий

Выбор лучшего варианта конструкции РЭА из нескольких имеющихся с точки зрения тепловых характеристик

Определение тепловых режимов работы всего множества радиокомпонентов и несущих конструкций с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей РЭА различного назначения



УДК 621.396.6.049.75

И 74

Рецензенты:

Кафедра «Информационные технологии и автоматизированные системы» Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;

А. Т. Бекишев, д-р техн. наук, Генеральный директор-Генеральный конструктор ОАО «НПП «САЛЮТ».

Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТРИАНА [Электронный ресурс] : Монография / В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев, Ю. Н. Кофанов, Г. О. Преснякова, А. В. Сарафанов, А. М. Фень. – Версия 1.0. – Электрон. дан. (23 Мб). – М. : Издательство «ДМК Пресс», 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows XP / Vista / 7 / 8* ; *Adobe Reader 9.0* или выше (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

№ гос.регистрации в НТЦ «Информрегистр» 0321401843.

ISBN 978-5-97060-124-2

Авторы:

Валерий Валерьевич Воловиков, Михаил Леонидович Дектерев, Юрий Николаевич Кофанов, Галина Олеговна Преснякова, Альберт Викторович Сарафанов, Александр Михайлович Фень

Под редакцией: Ю. Н. Кофанова, д-ра техн. наук, проф. (НИУ «Высшая школа экономики»),
А. В. Сарафанова, д-ра техн. наук, проф. (ЗАО «Ай-Теко»).

Изложены основные аспекты методического обеспечения проектных задач, связанных с анализом тепловых характеристик конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) средствами математического моделирования, в т. ч. с применением программного комплекса (ПК) ТРИАНА. Приводятся основные разделы программной документации «Руководство пользователя ПК ТРИАНА-2.10.0», набор методик по разработке моделей тепловых процессов, анализа тепловых режимов конструкций РЭА различных уровней иерархии, примеры применения ПК ТРИАНА в практике промышленного проектирования различных образцов РЭА, в т. ч. совместно с подсистемой АСНИКА-К.

Предназначено для специалистов, занимающихся исследованием тепловых характеристик конструкций РЭА методами математического моделирования.

This book describes the practical heat transfer analysis of electronic equipment using different types of mathematical software including the TRIANA. The User's Guide introduces you to the capabilities of the TRIANA software. The set of instructions for thermal design and verification of electronic equipment and model examples and TRIANA application examples for thermal design of the electronic equipments (including ASONIKA-K software for reliability estimation) are also included.

The book is for mechanical engineers who in charge of the heat transfer simulation in electronic equipment.

ISBN 978-5-97060-124-2

© В. В. Воловиков, 2014

© М. Л. Дектерев, 2014

© Ю. Н. Кофанов, 2014

© Г. О. Преснякова, 2014

© А. В. Сарафанов, 2014

© А. М. Фень, 2014



© 1997-2014 Издательство «ДМК Пресс»

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подписано к использованию 29.04.2014



Объем 28 Мб

ООО «ДМК пресс. Электронные книги», www.dmkpress.ru



| | | | | |
|---|---|---|------------|---|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | СОДЕРЖАНИЕ | 3 |
|---|---|---|------------|---|



СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ | 7 |
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 12 |
| 1.1. Модель методики исследования ТХ РЭА..... | 17 |
| 1.2. Основные характеристики ПКТРИАНА-2.10 | 42 |
| 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 50 |
| 2.1. Условия применения комплекса | 50 |
| 2.2. Режимы функционирования комплекса..... | 50 |
| 2.3. Описание задачи..... | 52 |
| 2.4. Исходная информация для моделирования..... | 54 |
| 2.5. Выходная информация..... | 67 |
| 2.6. Методика построения моделей тепловых процессов | 67 |
| 2.6.1. Основные принципы иерархического моделирования тепловых процессов в РЭА..... | 67 |
| 2.6.2. Иерархия конструктивного построения РЭА..... | 68 |
| 2.6.3. Алгоритмы иерархического анализа тепловых характеристик РЭА..... | 76 |
| 2.6.4. Методика построения топологических МТП | 80 |
| 2.6.5. Особенности моделирования в различных | 81 |
| системах координат | 81 |
| 2.6.6. Применение симметрии..... | 107 |
| 2.6.7. Параметризации топологических моделей тепловых процессов..... | 113 |
| 2.7. Подготовка информации средствами текстового редактора..... | 117 |
| 2.7.1. Ключевая информация | 118 |
| 2.7.2. Описание параметров ветвей | 122 |
| 2.7.3. Описание таблиц | 124 |
| 2.7.4. Начальные условия..... | 126 |
| 2.8. Подготовка информации при помощи графического редактора <i>MTPEditor</i> | 129 |
| 2.8.1. Создание и редактирование графов МТП | 132 |
| 2.8.2 Применение базы данных «Материалы» | 143 |
| 2.8.3 Работа с библиотеками фрагментов МТП | 145 |
| 2.8.3.1. Формирование элемента библиотеки фрагментов МТП..... | 147 |
| 2.8.4 Графический пост-процессор <i>MTPViewer</i> | 153 |
| 2.9. Обращение к Комплексу № 1 | 157 |
| 2.10. Методика применения Комплекса № 1 | 157 |
| 2.11. Пример расчета..... | 162 |
| 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСБОРОК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2..... | 176 |
| 3.1. Условия применения Комплекса № 2 | 176 |



| | | | | |
|---|---|---|------------|---|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | СОДЕРЖАНИЕ | 4 |
|---|---|---|------------|---|

| | |
|---|------------|
| 3.2. Режимы функционирования <i>Комплекса № 2</i> | 176 |
| 3.3. Описание задачи..... | 179 |
| 3.4. Исходная информация для моделирования..... | 179 |
| 3.5. Выходная информация..... | 185 |
| 3.6. Подготовка исходных данных для моделирования..... | 186 |
| 3.7. Подготовка данных средствами текстового редактора..... | 186 |
| 3.7.1. Ключевая информация..... | 187 |
| 3.7.2. Геометрические и теплофизические параметры несущей конструкции..... | 189 |
| 3.7.3. Тепловые шины и вырезы..... | 192 |
| 3.7.4. Описание геометрических и теплофизических параметров ЭРЭ..... | 194 |
| 3.7.5. Условия охлаждения (граничные условия)..... | 196 |
| 3.7.6. Начальные условия..... | 197 |
| 3.8. Подготовка данных средствами графического редактора <i>BoardEditor</i> | 200 |
| 3.8.1. Описание управляющей информации и использование конвертора из систем проектирования ПП..... | 200 |
| 3.8.1.1. Особенности конвертации схем размещения ЭРЭ из систем топологического проектирования печатных плат..... | 205 |
| 3.8.2. ГТФП несущей конструкции..... | 210 |
| 3.8.3. Описание ГТФП ЭРЭ..... | 212 |
| 3.8.4. Операции над ЭРЭ в процессе размещения..... | 217 |
| 3.8.5. Применение базы данных «Радиоэлементы»..... | 221 |
| 3.8.6. Описание дополнительных параметров..... | 225 |
| 3.8.7. Формирование шин и вырезов..... | 227 |
| 3.8.8. Граничные и начальные условия..... | 235 |
| 3.8.9. Отображение результатов моделирования в графическом режиме..... | 241 |
| 3.9. Работа с 3D-моделью КУ..... | 246 |
| 3.9.1. Отображение результатов моделирования на 3D-эскизе КУ..... | 248 |
| 3.10. Обращение к комплексу..... | 252 |
| 3.11. Режим «Клиент-сервер»..... | 252 |
| 3.12. Методика применения <i>Комплекса № 2</i> | 254 |
| 3.13. Пример расчета..... | 256 |
| 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... | 268 |
| 4.1. Исследование тепловых характеристик стоечной конструкции гидроакустического комплекса..... | 268 |
| 4.1.1. Постановка задачи на моделирование..... | 270 |
| 4.1.2. Схема иерархического исследования тепловых характеристик стойки..... | 273 |
| 4.1.2.1. Моделирование теплового режима исходного варианта конструкции БНК-3 | 274 |
| 4.1.2.2. Моделирование теплового режима стойки в целом..... | 277 |
| 4.1.2.3. Модель теплового режима модуля в целом..... | 279 |
| 4.1.2.4. Моделирование теплового режима функциональной ячейки..... | 280 |
| 4.1.3. Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при естественном воздушном охлаждении задней панели-радиатора..... | 282 |
| 4.1.3.1. Выбор параметров ребрения панели-радиатора..... | 286 |
| 4.1.3.2. Моделирование теплового режима стойки в целом..... | 288 |

| | | | | |
|--|---|--|-------------------|----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | СОДЕРЖАНИЕ | 5 |
| 4.1.3.3. Моделирование теплового режима модуля в целом..... 290 4.1.3.4. Моделирование теплового режима функциональной ячейки 291 4.1.3.5. Моделирование теплового режима конструкции БНК-3 при принудительном воздушном охлаждении из задней панели-радиатора 292 4.1.3.6. Исследование влияния геометрических и теплофизических параметров на тепловой режим стойки..... 294 4.1.3.7. Моделирование теплового режима стойки 295 4.1.3.8. Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при водяном охлаждении задней панели..... 297 4.1.4. Сводные данные результатов исследования 301 4.2. Моделирование теплового режима работы системы электропитания ЭВМ «Электроника – СС-БИС» 303 4.2.1. Постановка задачи на моделирование 307 4.2.2. Разработка модели тепловых процессов БПН-8..... 307 4.2.3. Проведение исследований 314 4.3. Исследование тепловых характеристик системы электропитания космического аппарата..... 317 4.3.1. Постановка задачи на моделирование 318 4.3.2. Иерархическая схема исследования тепловых характеристик СЭП..... 321 4.3.3. Разработка МТП СЭП в целом 322 4.3.4. Разработка МТП блока 324 4.3.5. Модель тепловых процессов ФЯ РУ ₁ 328 4.3.6. Исследование тепловых характеристик СЭП на основе разработанных моделей 330 4.4. Разработка МТП стойки модуля цифровой обработки сигналов 339 4.4.1. Идеализация конструкции модуля с точки зрения протекающих в нем тепловых процессов 339 4.4.2. Нумерация и обозначения узлов модели тепловых процессов..... 341 4.4.3. Обозначения ветвей модели тепловых процессов 342 4.4.4. Структура модели тепловых процессов 343 4.4.5. Параметризация модели тепловых процессов 346 4.4.6. Результаты расчета МТП модуля М-3КВЖ.32U 347 4.5. Пример обеспечения тепловых характеристик и показателей надежности устройства преобразования телевизионных сигналов 352 4.5.1. Требования по надежности..... 357 4.5.2. Проведение исследований 357 4.5.3. Расчет надежности составных частей УПТС 359 4.5.4. Исследование тепловых характеристик УПТС..... 363 4.5.5. Исследование тепловых характеристик блока УПТС в целом..... 363 4.5.6. Исследования тепловых характеристик печатных узлов..... 375 4.5.7. Расчет надежности УПТС в целом 387 4.5.8. Заключение..... 390 4.6. Исследование тепловых характеристик блока электронного регулирования, входящего в систему электропитания космического аппарата 393 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 477 | | | | |



| | | | | |
|---|---|---|------------|---|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | СОДЕРЖАНИЕ | 6 |
|---|---|---|------------|---|

| | |
|--|------------|
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 480 |
| Приложение 1. Теплофизические параметры конструкционных материалов РЭА | 480 |
| Приложение 2. Геометрические и теплофизические параметры некоторых электрорадиоэлементов | 484 |
| Приложение 3. Компоненты топологических моделей тепловых процессов | 505 |
| Приложение 4. Варианты установки ЭРЭ, поддерживаемые при расчете их ГТФП программой <i>BoardEditor</i> | 519 |
| Приложение 5. Некоторые экранные формы для расчета ГТФП ЭРЭ, поддерживаемые программой <i>BoardEditor</i> | 523 |
| Приложение 6. Интерактивный справочник по основным функциям ПК ТРиАНА | 536 |
| Приложение 7. Программные средства, используемые для моделирования аэродинамических, гидравлических и тепловых процессов в РЭА | 545 |
| Приложение 8. Руководство по инсталляции | 552 |



| | | | | |
|---|---|---|------------------------|---|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ | 7 |
|---|---|---|------------------------|---|

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|-------------|--|
| ГИМ | – гибридно-интегральный модуль /базовая конструкция микро-электронной аппаратуры, представляющая собой корпус, полученный путем фрезерования или литья. На внутренних поверхностях корпуса при помощи клея крепятся бескорпусные МСБ, ПУ, микрокорпусные и корпусные ЭРЭ/ |
| ГТФП | – геометрические и теплофизические параметры |
| КУ | – конструктивный узел |
| КЭ | – конструктивный элемент |
| МСБ | – микросборка /микроэлектронное изделие частного применения типа гибридно-интегральной схемы, состоящее из плоской подложки (несущей конструкции), на которой могут располагаться на любой ее поверхности элементы, компоненты и интегральные микросхемы (микрокорпусные и бескорпусные), различные пленочные элементы. МСБ может иметь собственный корпус (корпусные МСБ) или устанавливаться в РЭА путем непосредственного крепления при помощи клея или пайки подложки к месту установки (бескорпусные МСБ)/ |
| МТП | – модель тепловых процессов (топологическая) /Под топологической моделью тепловых процессов (МТП) понимается модель, представленная в виде ненаправленного графа. Вершины (узлы) такого графа в МТП моделируют соответствующие конструктивные элементы и узлы конструкции РЭА (представляются в виде условно нагретых зон). Ветви (ребра) графа отражают в МТП тепловые потоки. Переменными узлов МТП являются расчетные значения температур (T_i), переменными ветвей будут тепловые потоки (Ψ_{ij}), а параметрами ветвей – тепловые проводимости (X_{ij}). В общем случае при рассмотрении нестационарных тепловых процессов в МТП можно выделить два типа параметрических ветвей: 1-й тип – параметрические диссипативные ветви – ветви, для которых известны значения X_{ij} или аналитические выражения для расчета X_{ij} ; 2-й тип – параметрические консервативные ветви – ветви, для которых известны значения теплоемкостей (C_{ij}) или аналитические выражения для их расчета/ |
| МЭА | – микроэлектронная аппаратура |
| НТР | – нестационарный тепловой режим |
| ПК | – программный комплекс |
| ПП | – печатная плата |

| | | | | |
|---|---|---|---------------------|---|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ | 8 |
|---|---|---|---------------------|---|

| | |
|-------------|---|
| ППП | – пакет прикладных программ |
| ПУ | – печатный узел /ПУ – ПП (является несущей конструкцией) с расположенными на одной или двух ее поверхностях ЭРЭ. Способ крепления ЭРЭ –распайка в отверстиях или монтаж на поверхность. Крепление ПУ в РЭА – произвольное/ |
| ПЭВМ | – персональная ЭВМ |
| РЭА | – радиоэлектронная аппаратура |
| САУ | – система алгебраических уравнений |
| СЛАУ | – система линейных алгебраических уравнений |
| СНАУ | – система нелинейных алгебраических уравнений |
| СОДУ | – система обыкновенных дифференциальных уравнений |
| СТР | – стационарный тепловой режим |
| ТЗ | – техническое задание |
| ТР | – тепловой режим |
| ТУ | – технические условия |
| ТФП | – теплофизические параметры |
| ТХ | – тепловые характеристики (температуры корпусов и активных зон ЭРЭ, тепловые поля НК и тепловых шин, коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ, графики зависимости температур КЭ, КУ и ЭРЭ от времени и т.п.) |
| УР | – узел радиатора /радиатор с размещенными на нем различными элементами (полупроводниковыми приборами, микросборками, интегральными схемами, трансформаторами, гибридно-интегральными модулями и др.). Радиаторы могут быть различного конструктивного исполнения: в виде плоских пластин, лепестковые, петельно-проволочные, с игольчатостыревым и пластинчатым оребрением и др./ |
| ФПЧ | – функция параметрической чувствительности |
| ФЯ | – функциональная ячейка /КУ в виде металлической пластины (основание ФЯ является несущей конструкцией) с приклеенными с одной или двух сторон многослойными ПП (гибкими ПП) с установленными на них ЭРЭ. ЭРЭ также могут устанавливаться непосредственно на металлическое основание через вырезы в ПП. Обычный способ крепления ФЯ в РЭА – установка на термостатирующее основание или в блоки, имеющие панели-теплотоки/ |
| ЭРЭ | – электрорадиоэлемент (используется также термин «ЭРИ») |
| ЭРИ | – электрорадиоизделие (используется также термин «ЭРЭ») |



| | | | | |
|---|---|--|-----------------|----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ВВЕДЕНИЕ | 9 |
|---|---|--|-----------------|----------|

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное усовершенствование РЭА, направленное на расширение спектра решаемых задач, увеличение степени миниатюризации узлов и блоков, ужесточение внешних дестабилизирующих факторов, повышение требований к надежности, приводит к необходимости уделять особое внимание проблеме обеспечения тепловых режимов разрабатываемой РЭА. Это связано с тем, что тепловые процессы, протекающие в современной аппаратуре, для которой характерны высокие удельные показатели, достаточно тесно связаны с другими физическими процессами (электрическими, механическими, электромагнитными, радиационными и т. д.), протекающими в РЭА, и, как следствие, в значительной степени определяют надежность и ряд других показателей технического уровня разрабатываемых образцов РЭА.

Современный подход к исследованию тепловых характеристик (ТХ) РЭА основывается на методах математического моделирования [1–5]. При этом программное обеспечение соответствующих специализированных пакетов прикладных программ, комплексов и подсистем, применяемых для моделирования тепловых режимов работы РЭА (прил. 7) базируется на различных математических подходах к моделированию. Большую роль при реализации исследований ТХ РЭА автоматизированными методами играет математическое [1, 3, 4, 7, 9, 16, 24], информационное [13, 15] и методическое обеспечения [1, 3], которые позволяют реализовать принципы системного подхода к проектированию РЭА в рамках современных интегрированных компьютерных технологий [2, 3, 15, 19], направленных на непрерывную информационную поддержку всех этапов жизненного цикла РЭА [3]. Математическое и информационное обеспечения процесса автоматизированного исследования ТХ РЭА с применением программного комплекса (ПК) *ТРИАНА* подробно рассмотрены в [1, 2]. В данной книге раскрыты методические аспекты исследований ТХ РЭА в т. ч. с применением ПК *ТРИАНА* [1, 2, 8], а также подсистемы АСНИКА-К [2, 22] при совместном исследовании ТХ и показателей надежности РЭА.





ПК *ТРИАНА* [www.triana.su] входит в состав системы АСНИКА (автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры [www.asonika.ru]) и предназначен для моделирования на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкциях РЭА, таких как стоечные конструкции, блоки с регулярной и нерегулярной структурами, печатные узлы, функциональные ячейки, микросборки. ПК рассчитан на инженеров-конструкторов промышленных предприятий, НИИ, КБ, занимающихся разработкой РЭА.



| | | | | |
|---|---|--|-----------------|----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ВВЕДЕНИЕ | 10 |
|---|---|--|-----------------|----|

В целом ПК *TRuANA* позволяет решать следующие задачи:

- определение тепловых режимов работы всего множества радиокомпонентов и несущих конструкций с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей РЭА различного назначения (авиационной, космической, морской, автомобильной и др. РЭА) и внесение изменений в конструкцию с целью обеспечения необходимого (с точки зрения электрических характеристик или показателей надежности и т. п.) теплового режима работы РЭА;
- выбор из нескольких имеющихся лучшего, с точки зрения тепловых характеристик, варианта конструкции РЭА;
- обоснование необходимости дополнительной защиты РЭА от температурных воздействий;
- создание эффективной программы испытаний РЭА на тепловые воздействия (выбор параметров испытательных воздействий, наиболее удобное расположение мест установки регистрирующих датчиков и т. п.).

ПК *TRuANA-2.10* состоит из ряда как автономно функционирующих, так и в составе ПК следующих программных единиц: *MTPEditor*, *MTPViewer*, *BoardEditor*, *Conv2triana*, *Triana*.



-  *графический редактор топологических моделей тепловых процессов (МТП) MTPEditor*, позволяющий: формировать МТП конструкций РЭА с параметрическим описанием их компонентов, использующих геометрические и теплофизические параметры графических образов исследуемых узлов и/или конструкций РЭА в целом; отображать результаты моделирования непосредственно на топологической модели;
-  *графический редактор конструкций РЭА типа «печатный узел», «функциональная ячейка», «гибридно-интегральная схема или микросборка» BoardEditor*, который позволяет создавать геометрические модели конструкций ПУ, ФЯ, МСБ с позиций исследования в них тепловых процессов; вести базу данных по геометрическим и теплофизическим параметрам электрорадиоэлементов (ЭРЭ); отображать результаты моделирования на геометрической модели исследуемого конструктивного узла;
-  *конвертор топологий печатных плат Conv2triana*, реализующий функции автоматического преобразования основных параметров несущей конструкции (НК) ПУ, ФЯ или МСБ, а также схемы размещения ЭРЭ на НК из форматов систем топологического проектирования печатных плат (*OrCAD*, *PROTEL*, *AltiumDesigner* и др.) в формат ПК *TRuANA*;
-  *математическое ядро Triana*, включающее в свой состав: набор специализированных программ, реализующих функции автоматического син-

| | | | | |
|---|---|--|-----------------|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ВВЕДЕНИЕ | 11 |
|---|---|--|-----------------|-----------|

теза моделей тепловых процессов конструктивных узлов РЭА на основе их геометрической модели и температурных условий их эксплуатации (граничные и начальные условия); набор модулей, выполняющих функции: формирования математических моделей для моделирования тепловых процессов исследуемой конструкции в стационарном и нестационарном режимах; анализа математической модели, которая может быть сформирована в виде системы линейных алгебраических уравнений, системы нелинейных алгебраических уравнений или системы обыкновенных дифференциальных уравнений; библиотеку аналитических моделей (набор критериальных уравнений) для анализа различных видов теплообмена и их модификаций (в библиотеке содержится около 70 разделов).

Книга имеет следующую структуру:

- в 1-й главе детально рассмотрены основные методические аспекты исследований ТХ РЭА средствами математического моделирования;
- 2-я и 3-я главы содержат описания методического и информационного обеспечений компонентов ПК *ТРуАНА-2.10*, обеспечивающих моделирование тепловых режимов РЭА различных уровней конструктивной иерархии; описания содержат информацию по составу компонентов, реализуемым ими функциям, методики подготовки данных, методики построения МТП и проведения моделирования ТР РЭА различных уровней конструктивной иерархии, примеры моделирования ТР РЭА;
- 4-я глава книги посвящена описанию применения ПК *ТРуАНА* в практике промышленного проектирования образцов РЭА различного назначения (РЭА стационарного исполнения, авионики, РЭА морского и космического исполнения) [[11–13](#)];
- в приложениях приводится информация справочного характера, а также компоненты информационного обеспечения ПК *ТРуАНА*.

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 12 |
|---|---|--|---|-----------|

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процесс исследования тепловых характеристик РЭА с применением методов математического моделирования [1–5] связан с решением, со стороны разработчика, комплекса задач, среди которых, в качестве примера, можно привести следующие:

1. Анализ технического задания на разработку РЭА и формирование постановки задачи на выполнение исследований тепловых характеристик конструкции проектируемой РЭА. *Детально процесс решения данной задачи приведен в [п. 1.1](#).*

2. Расчет мощностей тепловыделений в конструктивных узлах, отдельных ЭРЭ, коммутационных элементах РЭА (разъемы, жгуты, печатные проводники и т. п.). *Примеры расчета мощностей тепловыделений рассматриваются в [п. п. 1.1](#), [2.7.3](#).*



3. Декомпозиция конструкции РЭА с позиций принципа местного влияния и разработка нисходящего или восходящего алгоритма моделирования тепловых процессов в РЭА. *Описание данного процесса приведено в [п. п. 2.6.1–2.6.3](#).*

4. Идеализация конструкции РЭА и разработка ее модели(ей) тепловых процессов (МТП), в т. ч. с учетом симметрии в МТП РЭА и ее параметризации [2]. *Особенности перечисленных аспектов рассматриваются в [п. п. 2.6.4–2.6.7](#), [п. 2.11](#), [п. 4.4.4](#).*

5. Наложение (учет в МТП РЭА) граничных и начальных условий. *Применительно к ПК ТРИАНА примеры решения данной задачи рассмотрены в [п. п. 3.7.5](#), [3.7.6](#) и в [главе 4](#).*

6. Проведение моделирования тепловых режимов РЭА. Получение в результате моделирования комплекса тепловых характеристик РЭА. *Различные ТХ РЭА, получаемые в результате математического моделирования (при помощи ПК ТРИАНА) приводятся в [п. п. 2.11](#), [3.13](#) и в [главе 4](#).*

7. Выбор способов отвода тепловой энергии от наиболее нагретых ЭРЭ или от конструктивных узлов (тепловые трубы, слоистые конструкции плат, гиперпроводящие поверхности, элементы Пельтье и т. д.) [[11](#), [13](#), www.mp.dpt.ustu.ru, www.hyperheat.ru], в т. ч. выбор способов отвода тепловой энергии по различным параметрам (эффективность, масса, плотность теплового

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 13 |
|---|---|--|---|-----------|

потока и т. д.). *Примеры решения отдельных моментов данной задачи рассматриваются в [главе 4](#).*

В целом этап исследования тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования можно представить ([рис. 1.1](#)) совокупностью процессов (1–5) и подпроцессов (Т1.1, Т1.2, Т1.3, Т2.1, ..., Т5.3), которые отражают последовательность этапов, и решаемых в их рамках задач. Задачи решаются в определенной последовательности, которая определяется методикой проведения исследований ТХ РЭА, которая, в свою очередь, зависит как от конструкторско-технологической реализации конкретной РЭА (см., например, [рис. 1.3](#)), так и от применяемой технологии математического моделирования. Последняя зависит от используемых методов моделирования (автономное исследование ТХ или совместно с другими характеристиками РЭА) [[2, 3, 10, 15, 16, 21](#)], степени интеграции информационных потоков на уровне реализуемого проекта РЭА [[3, 15, 19](#)] и т. п. Обратные связи (отражают изменения, вносимые в проект РЭА) и их количество приведенных на [рис. 2.1](#) подпроцессов, зависят от постановки задачи на проведение исследований ([п. 1.1](#)) и уровней разукрупнения исследуемого варианта конструкции РЭА ([рис. 1.3](#), см. также [рис. 2.2](#)), принимаемых в процессе моделирования.

На [рис. 1.2](#) приведены связанные между собой обратными связями совокупности процессов, отражающие исследования ТХ РЭА на различных уровнях ее конструктивной иерархии (с позиций исследования тепловых характеристик на основе принципа местного влияния [[4, 1](#)]). Распределение входящих в состав анализируемой конструкции конструктивных узлов по различным уровням иерархии носит условный характер и отражает генеральную последовательность поэтапно решаемых задач по анализу и обеспечению ТХ составных узлов конструкции РЭА на основе нисходящего или восходящего алгоритмов моделирования тепловых процессов [[1](#)]. В [табл. 1.1](#) приведено иерархическое описание нескольких наиболее типовых вариантов конструкции РЭА, выполняемое для поэтапного моделирования тепловых процессов в РЭА.

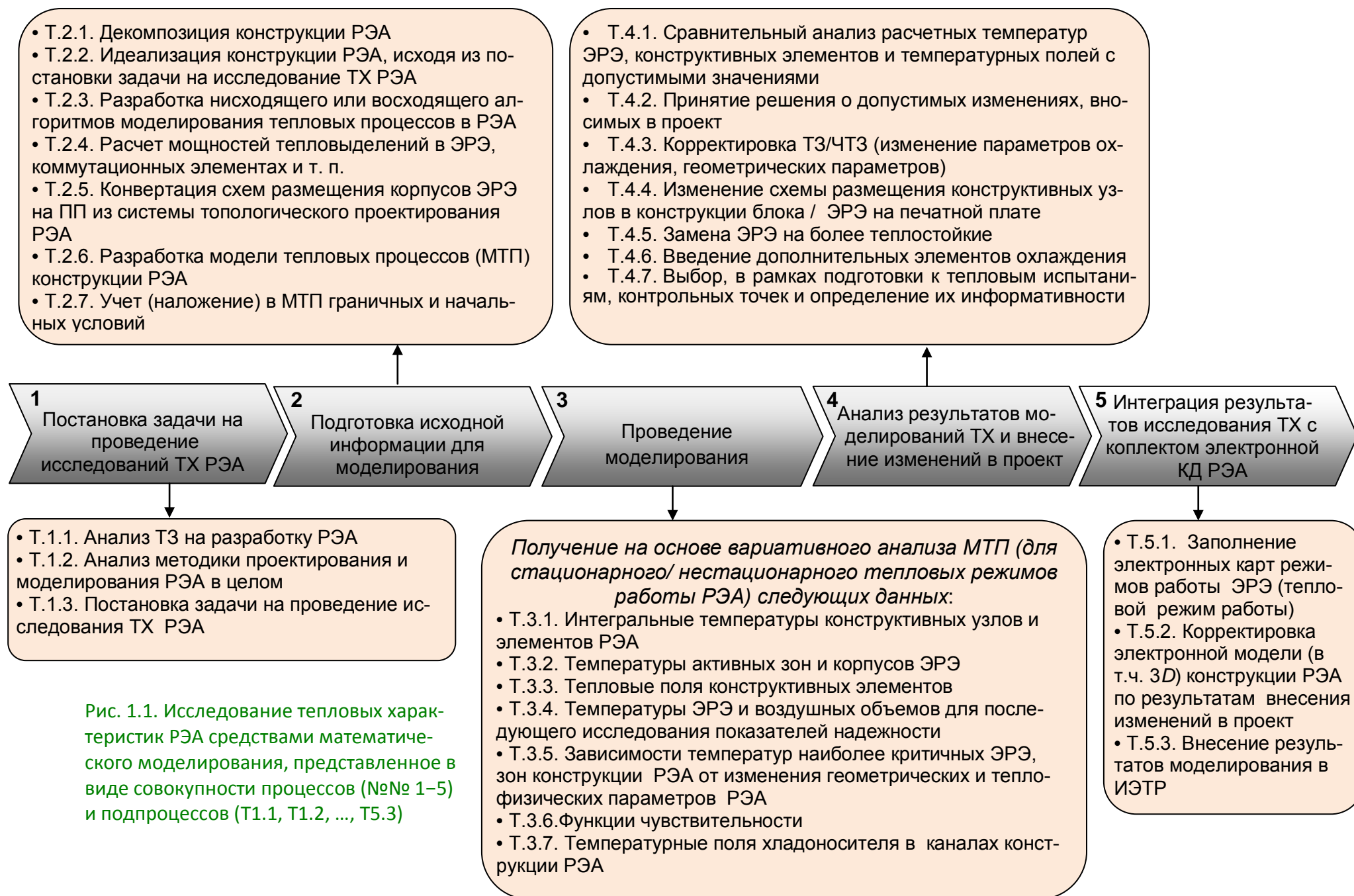


Рис. 1.1. Исследование тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования, представленное в виде совокупности процессов (№№ 1–5) и подпроцессов (Т1.1, Т1.2, ..., Т5.3)

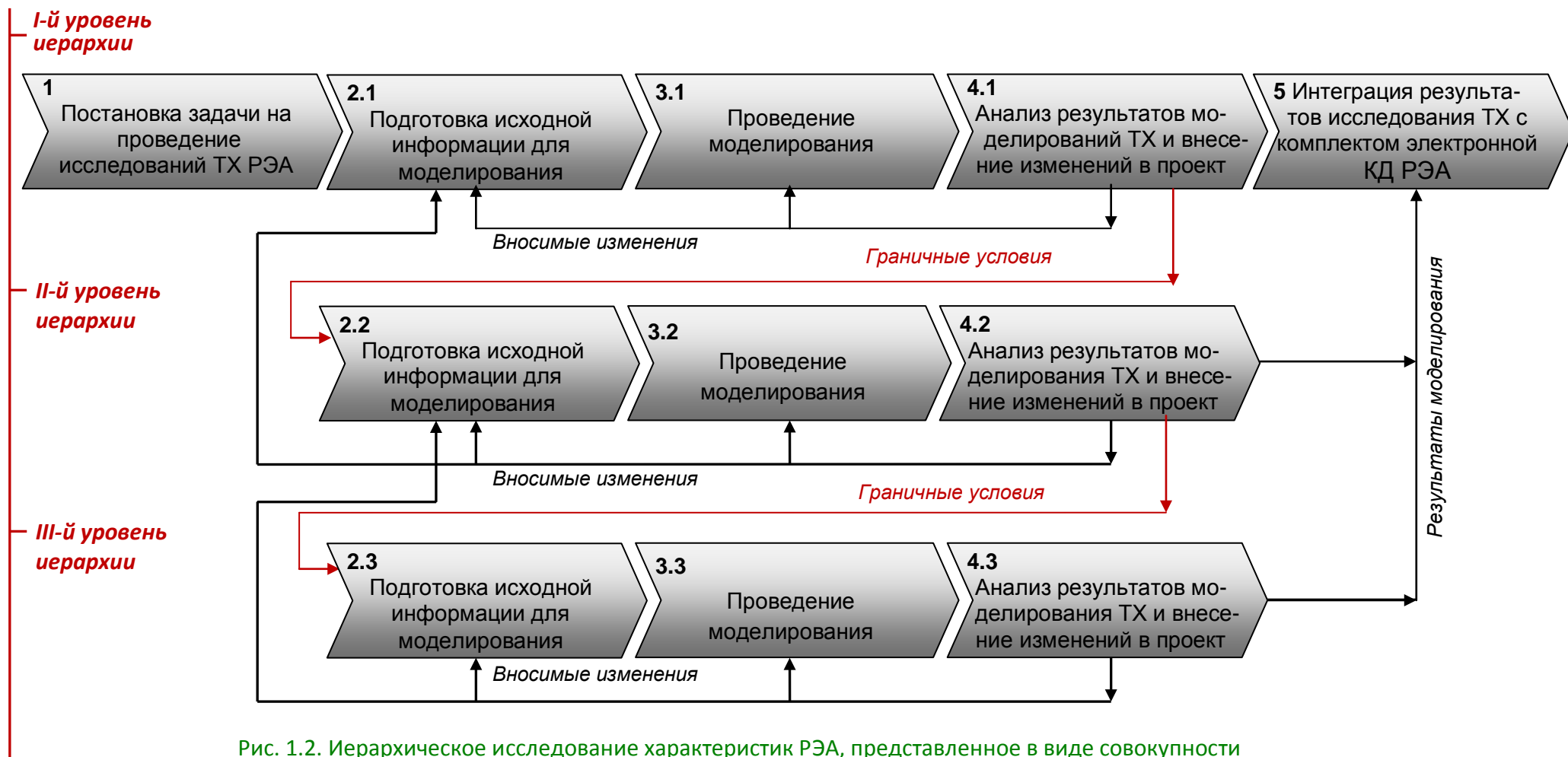




Рис. 1.2. Иерархическое исследование характеристик РЭА, представленное в виде совокупности процессов и условных уровней конструктивной иерархии РЭА

Таблица 1.1

Примеры иерархического описания некоторых конструкции РЭА с позиций поэтапного моделирования в них тепловых процессов

| Вариант конструкции РЭА | Краткая характеристика конструкции РЭА | Уровни конструктивной иерархии РЭА | | |
|-------------------------|---|--|---|---|
| | | I | II | III |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Стойка /рис. 1.3, а/ с установленными на каждом этаже печатными узлами (ПУ) /рис. 1.3, в/ | Используется модель тепловых процессов (МТП) с <u>сосредоточенными</u> параметрами (каждый этаж стоечной конструкции с печатными узлами в МТП стойки представляется в виде изотермического объема) | Используется МТП с <u>сосредоточенными</u> параметрами (каждый ПУ в МТП этажа стойки представляется в виде условно нагретой зоны /изотермического объема/) | Используется МТП с <u>распределенными</u> параметрами (в МТП ПУ учитывается неизотермичность несущей конструкции ПУ – печатной платы; каждый ЭРЭ в МТП ПУ представляется в виде одного или нескольких изотермических объемов) |
| 2 | Крэйт (блок касетной конструкции; компоновка блока печатными узлами – регулярная) /рис. 1.3, б/ | Используется МТП с <u>сосредоточенными</u> параметрами (каждый ПУ в МТП блока представляется в виде изотермического объема) | Используется МТП с <u>распределенными</u> параметрами (в МТП ПУ учитывается неизотермичность несущей конструкции ПУ – печатной платы; каждый ЭРЭ в МТП ПУ представляется в виде одного или нескольких изотермических объемов) | |
| 3 | Блок РЭА нетиповой конструкции (нерегулярная компоновка конструктивными узлами и обособленными ЭРЭ) /рис. 1.3, г/ | Используется МТП с <u>сосредоточенными</u> параметрами (каждый обособленный ЭРЭ или конструктивный узел в МТП блока представляется в виде изотермического объема) | Используется МТП с <u>распределенными</u> параметрами (в МТП ПУ учитывается неизотермичность несущей конструкции ПУ – печатной платы; каждый ЭРЭ в МТП ПУ представляется в виде одного или нескольких изотермических объемов) | |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 17 |
|---|---|--|---|-----------|

Окончание табл. 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 4 | Блок РЭА нетиповой конструкции (нерегулярная компоновка конструктивными узлами и обособленными ЭРЭ) /рис. 1.3, д/ | Используется МТП с <u>сосредоточенными</u> параметрами (каждый обособленный ЭРЭ или конструктивный узел в МТП блока представляется в виде изотермического объема) | | |

1.1. Модель методики исследования ТХ РЭА

На [рис. 1.4](#) приведен один из вариантов методики исследования тепловых характеристик конструкции РЭА верхнего уровня конструктивной иерархии (например, варианты конструкции 1 и 2 в [табл. 1.1](#)) средствами математического моделирования применительно к проектной задаче № 3 (см. [табл. 1.2](#)). Методика представлена в виде функций IDEF₀-диаграммы, отображающей структуру и функции алгоритма, а также потоки информации, ресурсы и материальные объекты, связывающие эти функции. Рассмотрим последовательность действий, выполняемых разработчиком РЭА в соответствии с приведенной методикой.

Функция А1. Выполняется постановка задачи, которая определяет степень детализации используемых моделей и иерархию проводимых исследований ([рис. 1.2](#)). Выполняется на основе анализа технического задания и варианта конструкции РЭА, прорабатываемого в рамках проекта.

С точки зрения постановки задачи ТЗ на разработку РЭА анализируется, как правило, в части разделов «Требования к конструкции» и/или «Требования к тепловому режиму», «Условия эксплуатации» и т. п.

В разделе «Требования к конструкции» перечисляются конструкторско-технологические параметры разрабатываемой РЭА, особенности крепления РЭА к объекту установки и т. п. Данные, характеризующие температурные условия эксплуатации РЭА, обычно приводятся в разделе «Условия эксплуатации». Кроме этого, в данном разделе (в большинстве случаев) приводятся значения тепловыделений в РЭА в целом или в конструктивных узлах, входящих в ее состав (печатных узлах, узлах радиаторов и т. п.), или в ЭРЭ. *Наличие таких данных является принципиальным моментом, так как их отсутствие приводит к очень*

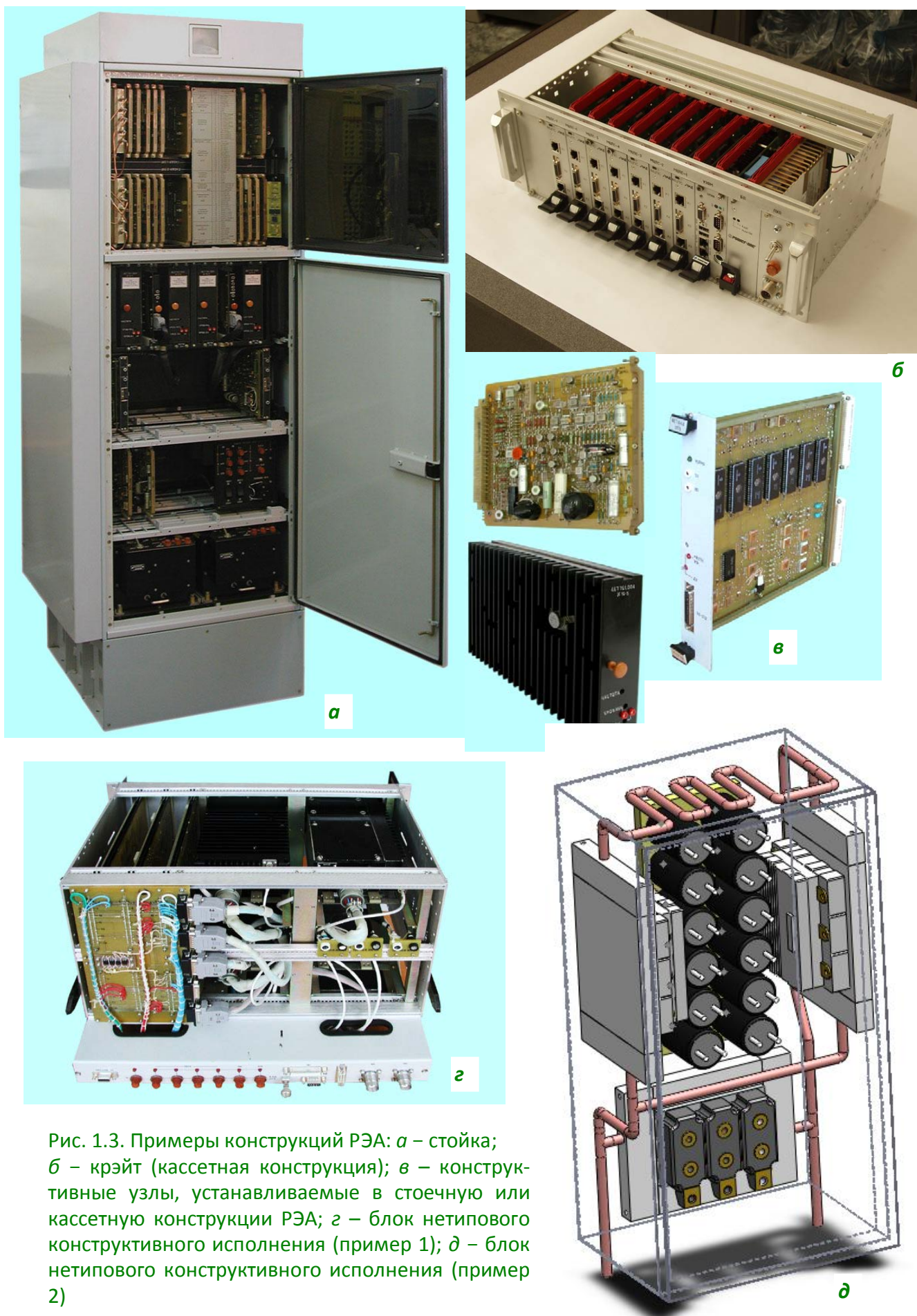




Рис. 1.3. Примеры конструкций РЭА: *а* – стойка; *б* – крайт (кассетная конструкция); *в* – конструктивные узлы, устанавливаемые в стоечную или кассетную конструкции РЭА; *г* – блок нетипового конструктивного исполнения (пример 1); *д* – блок нетипового конструктивного исполнения (пример 2)

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 19 |
|---|---|--|---|-----------|

приближенным результатам моделирования теплового режима конструкции РЭА (на уровне 30–60 %).

В разделе «Требования к тепловому режиму» приводятся требования к тепловому режиму разрабатываемой РЭА, которые могут определять, например:

- перегрев корпуса РЭА относительно окружающей среды;
- абсолютное значение температуры корпуса РЭА (например, *«Температура корпуса блока источника вторичного электропитания не должна превышать +65 °С»...*);
- абсолютные значения температур наиболее критичных (с точки зрения функциональных характеристик РЭА и/или показателей надежности).

Кроме перечисленных требований в данном разделе ТЗ (иногда в разделе «Условия эксплуатации») могут содержаться требования к гидравлическим характеристикам конструкции проектируемой РЭА (например, *«Гидравлическое сопротивление конструкции блока цифровой обработки сигналов не должно превышать значение «.....» или «.....»*).

Исходя из требований перечисленных выше разделов ТЗ, разработчик формирует постановку задачи на проведение моделирования теплового режима конструкции РЭА. Например для приведенных выше примеров требований к тепловому режиму конструкции РЭА варианты постановки задач на моделирование тепловых режимов могут быть сформулированы следующим образом:

- «На основе геометрических и теплофизических параметров конструкции РЭА (раздел у.у ТЗ), значений тепловыделений в РЭА (раздел у.у ТЗ), а также данных, приведенных в разделах ТЗ х.х и х.з, необходимо средствами математического моделирования *получить значение перегрева температуры корпуса РЭА относительно окружающей среды, а также исследовать влияние на перегрев таких конструктивных параметров РЭА, как длина корпуса (в диапазоне 550–580 мм), ширина корпуса (в диапазоне 300–320 мм), ...*»;
- «*...получить значение температуры корпуса РЭА...*»;

«На основе геометрических и теплофизических параметров конструкции РЭА (раздел у.у ТЗ), значений тепловыделений в РЭА (раздел у.у ТЗ), а также данных, приведенных в разделах ТЗ х.х и х.з, необходимо средствами математического моделирования определить тепловой режим работы конструкции блока РЭА на уровне интегральных температур, входящих в ее состав печатных узлов».





| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 20 |
|---|---|--|---|-----------|

Таблица 1.2

Примеры некоторых задач, решаемых в процессе исследований тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования

| № п/п | Проектная задача | Этап проектирования | Тип конструкции или узла РЭА | Аннотация содержательной части исследования ТХ РЭА |
|--------------|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Анализ перегрева корпуса блока РЭА относительно окружающей среды | Проектирование конструкции РЭА (исследование ТХ конструкции РЭА) | Блок РЭА (см., например, рис. 2.3, з) | |
| 2 | Выбор способа охлаждения конструкции РЭА | Проектирование конструкции РЭА (исследование ТХ конструкции РЭА) | Стойка или блок РЭА (см., например, рис. 1.3, а, б, з) | Выполняется анализ интегральных температур конструктивных узлов и обособленных ЭРЭ, входящих в состав конструкции РЭА |
| 3 | Обеспечение тепловых режимов работы ЭРЭ | Проектирование конструкции РЭА (исследование ТХ конструкции РЭА) | Печатный узел, узел радиатора и т. п. (см., например, рис. 1.3, в) | Выполняется анализ теплового режима определенного множества ЭРЭ или всех ЭРЭ, входящих в состав конструкции РЭА |
| 4 | Топологическое проектирование печатных узлов с учетом тепловых полей и температур ЭРЭ | Проектирование конструкции РЭА (топологическое проектирование печатных узлов) | Печатный узел (см., например, рис. 1.3, в) | Выполняется анализ изотерм, термограмм и т. п. печатных узлов |
| 5 | Анализ температурного портрета печатного узла | Диагностическое проектирование | Печатный узел (см., например, рис. 1.3, в) | Выполняется анализ теплового режима печатного узла на уровне термограммы |
| 6 | Исследование показателей надежности ЭРЭ | Проектирование конструкции РЭА (исследование показателей надежности РЭА) | Конструкция РЭА (см., например, рис. 1.3, а-д) | Выполняется анализ теплового режима всех ЭРЭ, входящих в состав конструкции РЭА |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 21 |
|---|---|--|---|-----------|

Окончание табл. 1.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----|---|-------------------------------------|---|---|
| 7 | Исследование электрических характеристик функциональных узлов РЭА с учетом температурного фактора | Схемотехническое проектирование РЭА | Печатный узел или печатные узлы в составе блока РЭА (см., например, рис. 1.3, б-г) | Выполняется анализ теплового режима определенного множества ЭРЭ или всех ЭРЭ, входящих в состав конструкции РЭА |
| ... | ... | ... | ... | ... |

Функции А2–А3. Выполняется иерархическое исследование тепловых характеристик крейта. На первом этапе, например, моделируется тепловой режим крейта в целом, а на втором – тепловые режимы входящих в состав крейта печатных узлов. Алгоритм поэтапного нисходящего моделирования конструкций РЭА подробно описан в [п. 2.6.3](#).

Функция А4. Выполняется разработка отчетной документации по результатам исследований ТХ РЭА в соответствии с ГОСТ 2.106 Требования к пояснительной записке. Пример такого отчета приведен в [п. 4.6](#).

Функция А5. Выполняется интеграция полученных результатов исследования ТХ конструкции РЭА с электронной моделью проектируемого образца РЭА, в т. ч с данными ИЭТР (см., например, [\[25\]](#)). При этом используется комплекс следующих стандартов:

- ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения;
- ГОСТ 2.053-2006 Единая система конструкторской документации; Электронные структуры изделия. Общие положения;
- ГОСТ 2.511-2011 Правила передачи электронных конструкторских документов; ГОСТ 2.611-2011 Единая система конструкторской документации. Электронный каталог;
- ГОСТ 2.612-2011 Единая система конструкторской документации. Электронный формуляр.

Функции А11–А13. Разработчик РЭА последовательно выполняет процедуры подготовки исходной информации (функция А11), проведение моделирования теплового режима блока (функция А12) и внесения изменений в проект (функция А13) на основе полученных результатов моделирования.

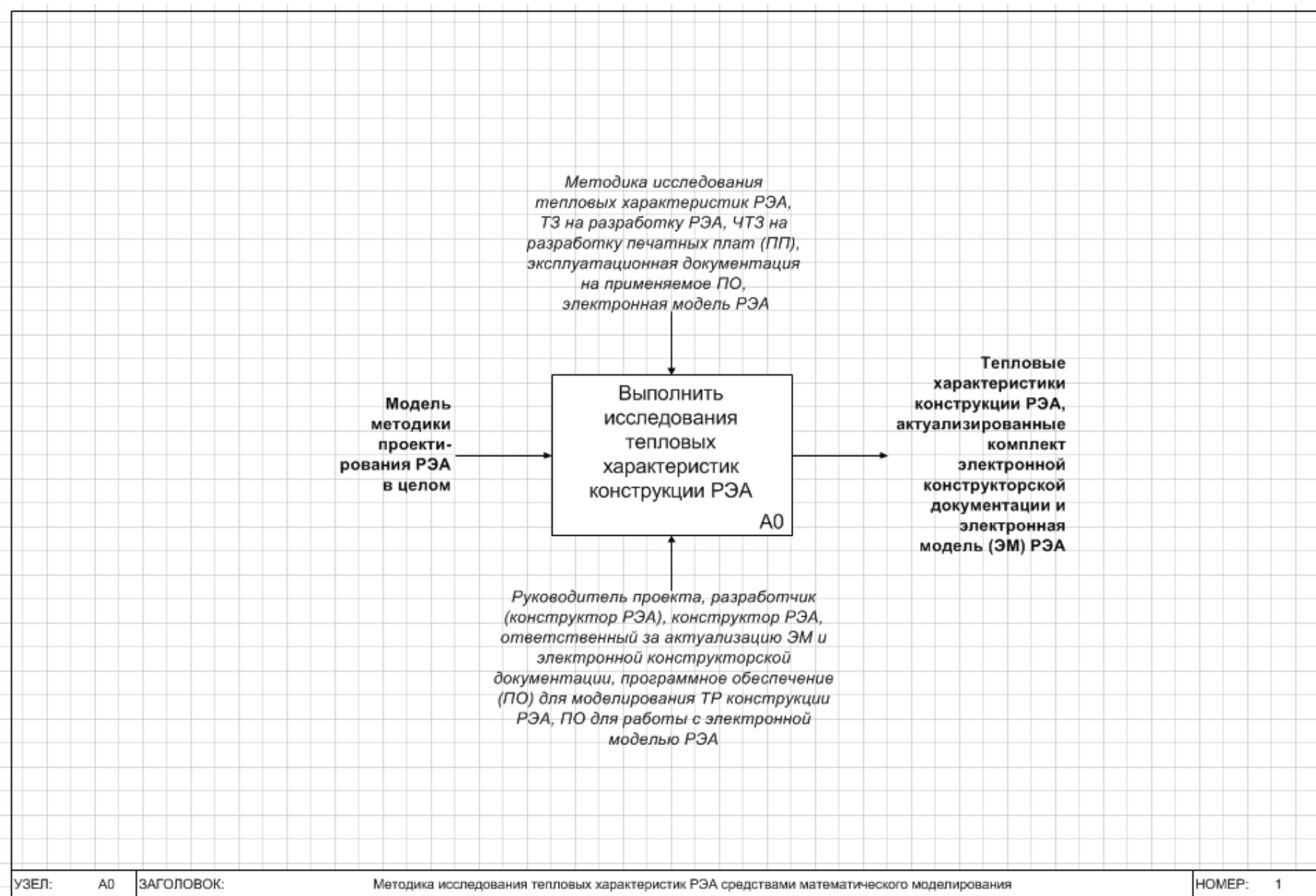


Рис. 1.4. Методика исследования тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования

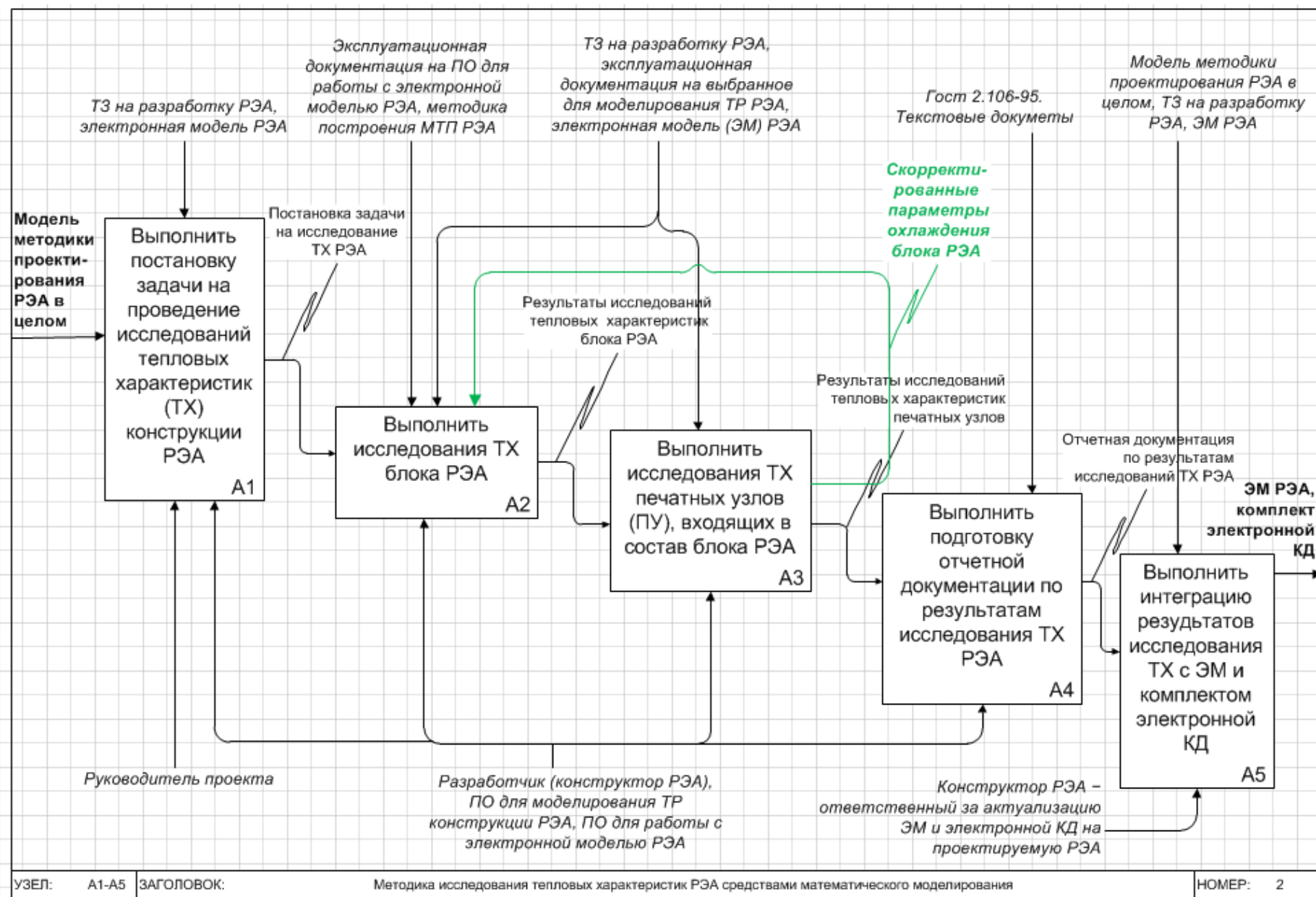


Рис. 1.4. Продолжение

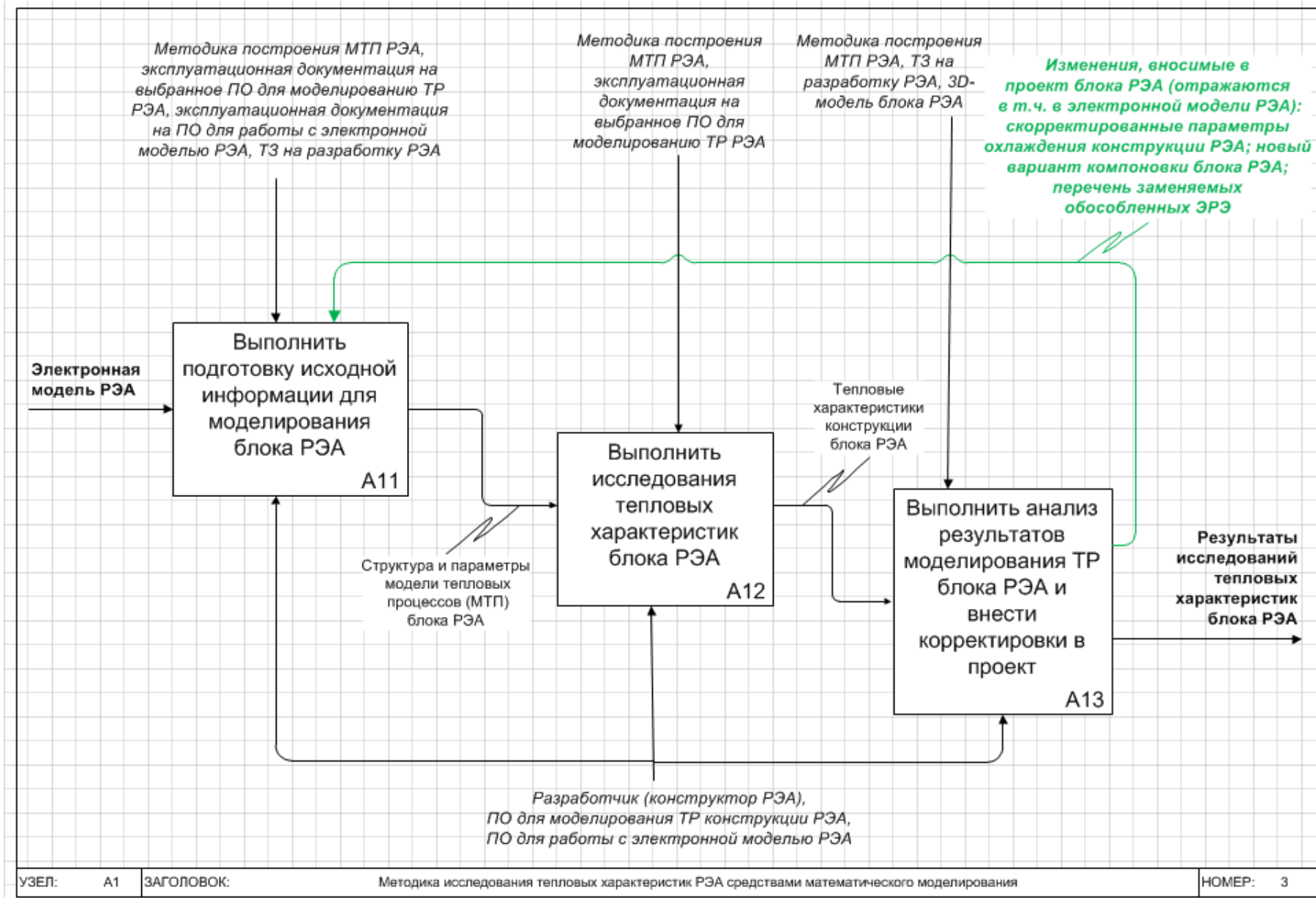


Рис. 1.4. Продолжение

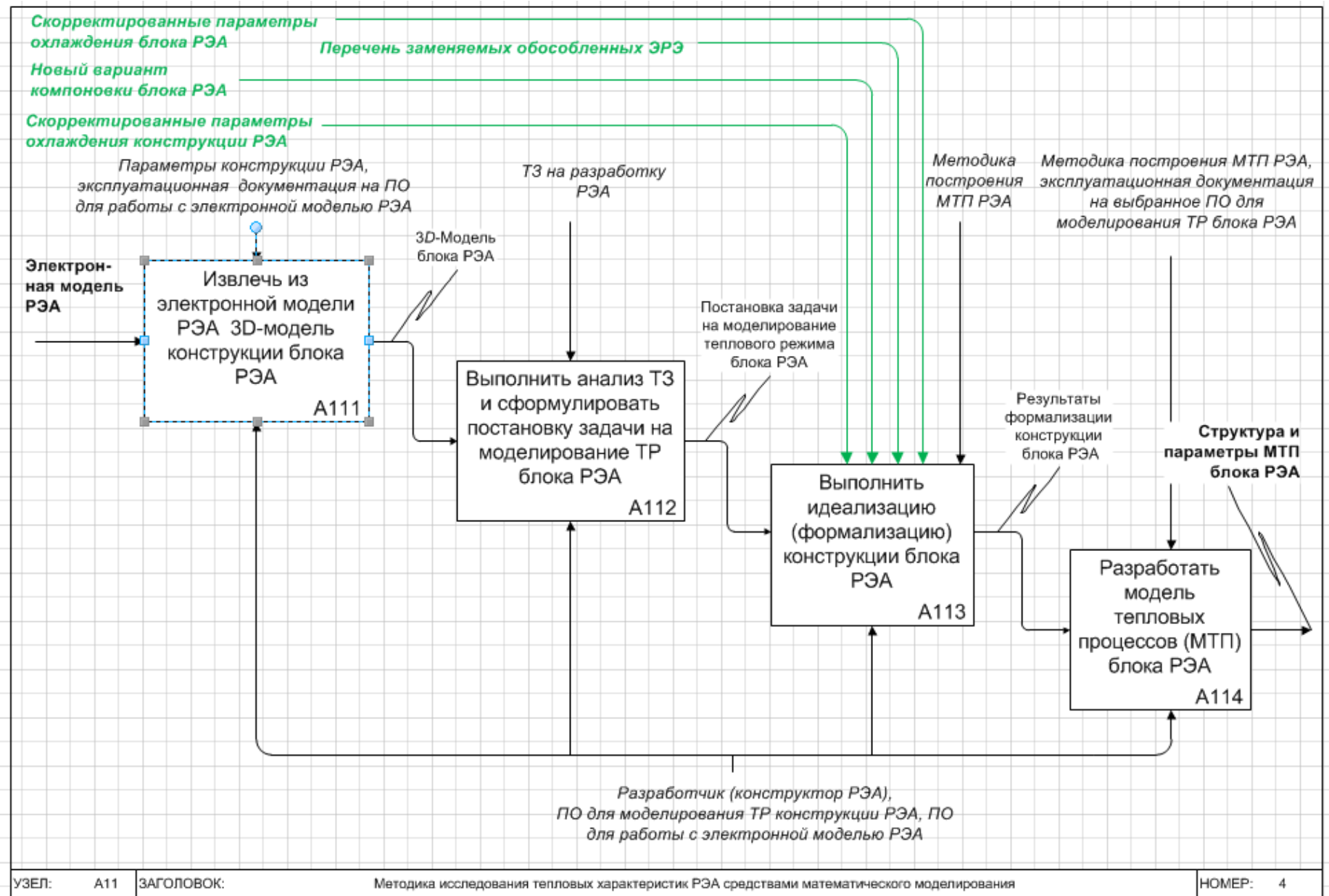


Рис. 1.4. Продолжение

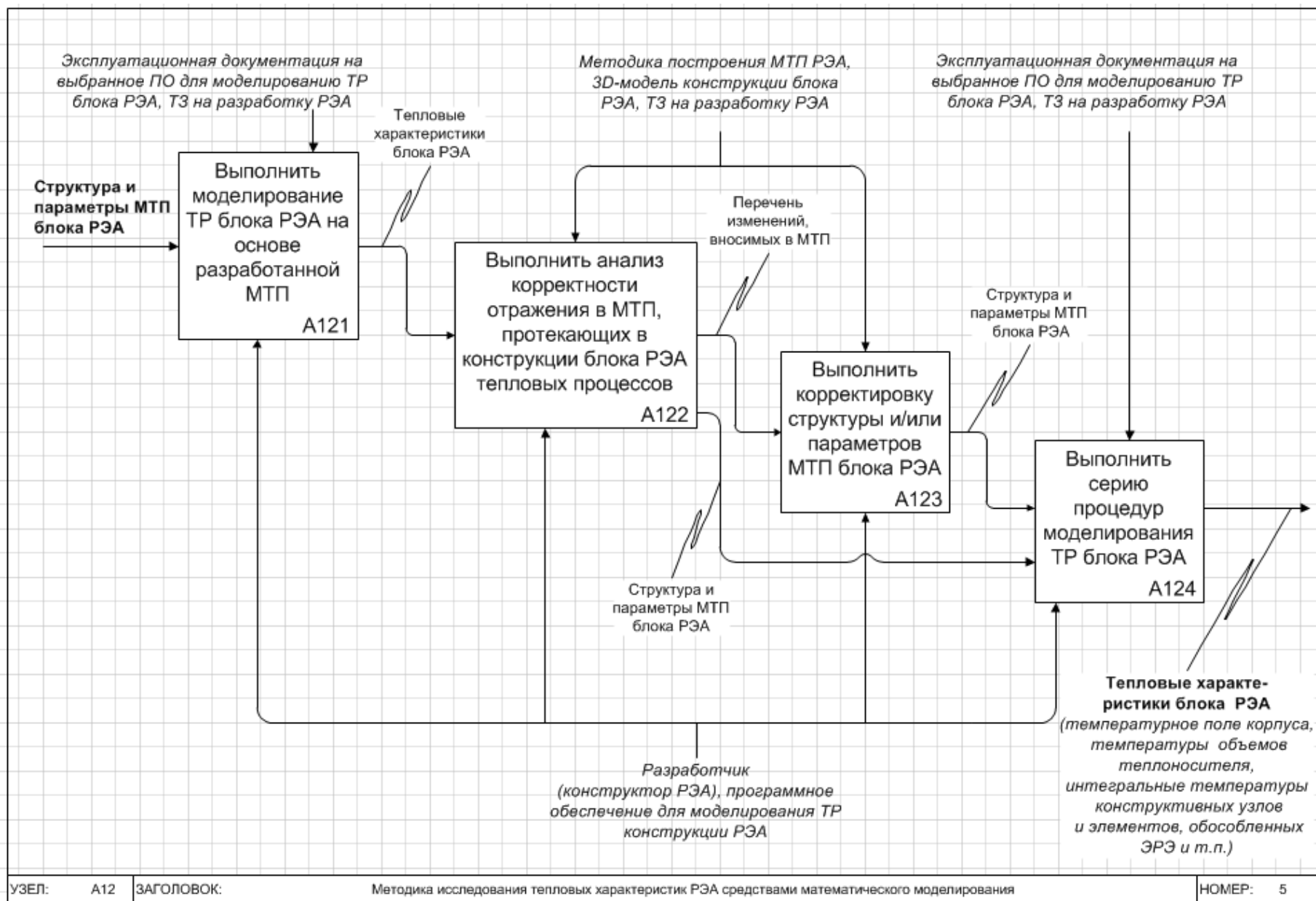


Рис. 1.4. Продолжение

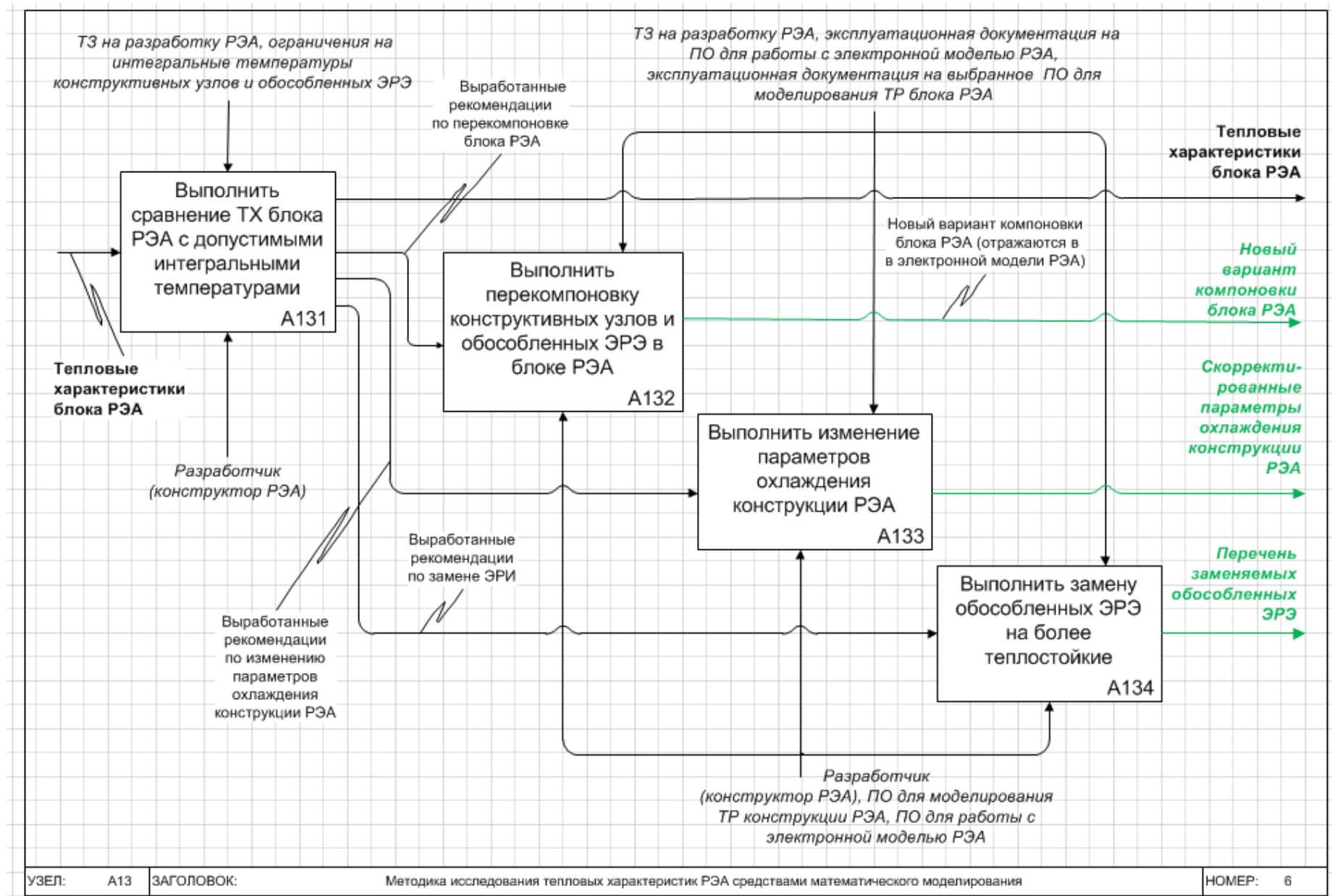


Рис. 1.4. Продолжение

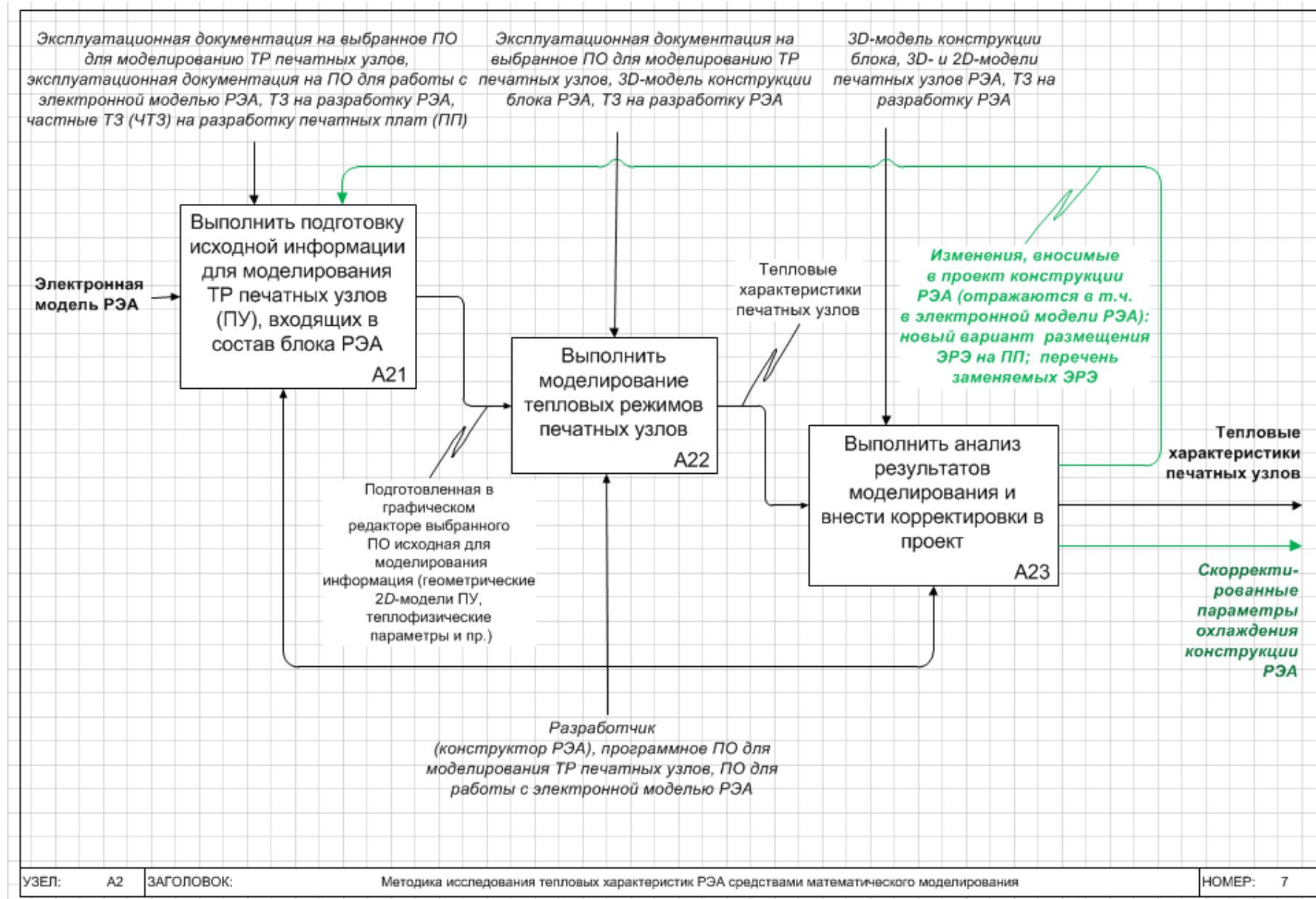


Рис. 1.4. Продолжение

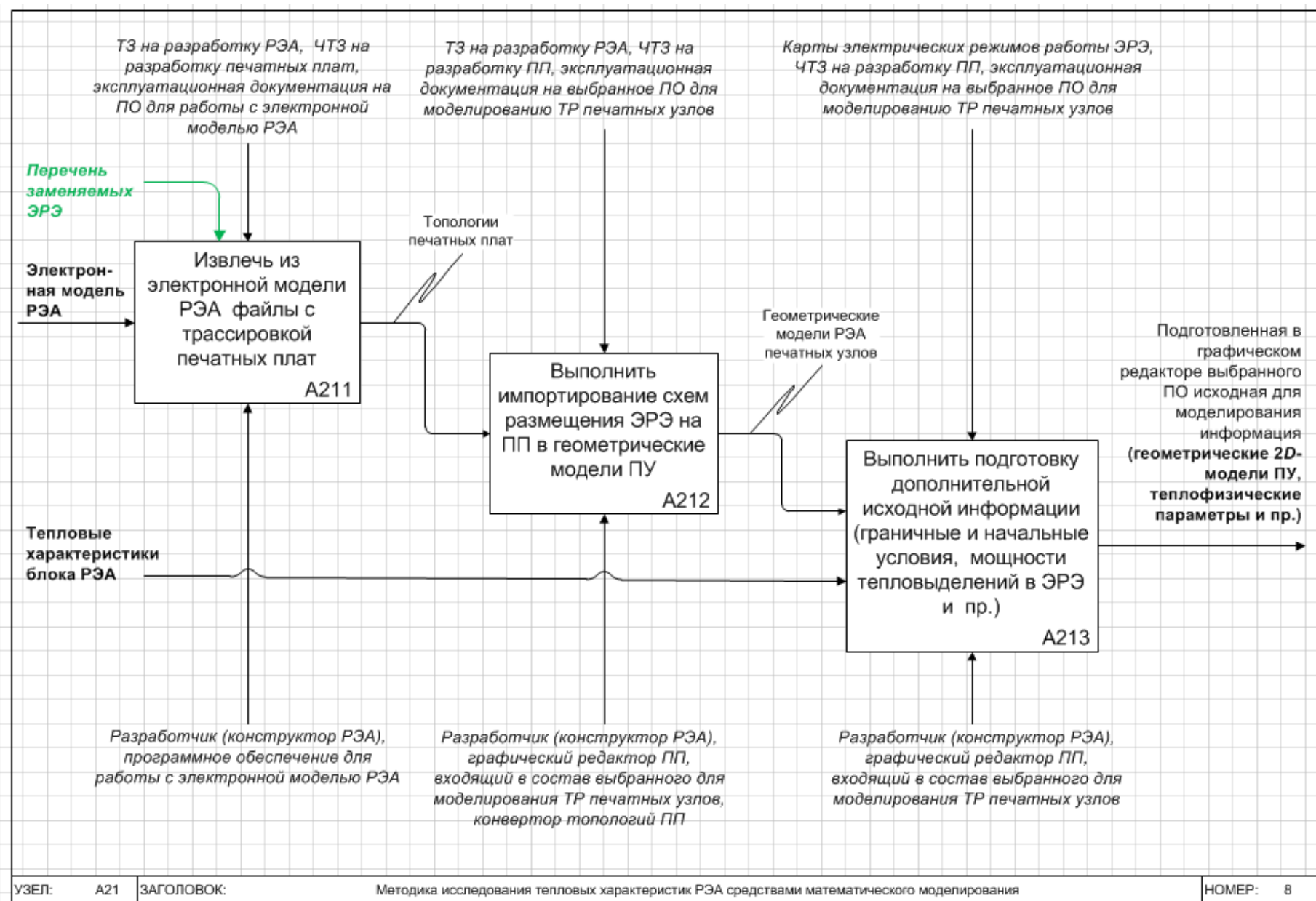


Рис. 1.4. Продолжение

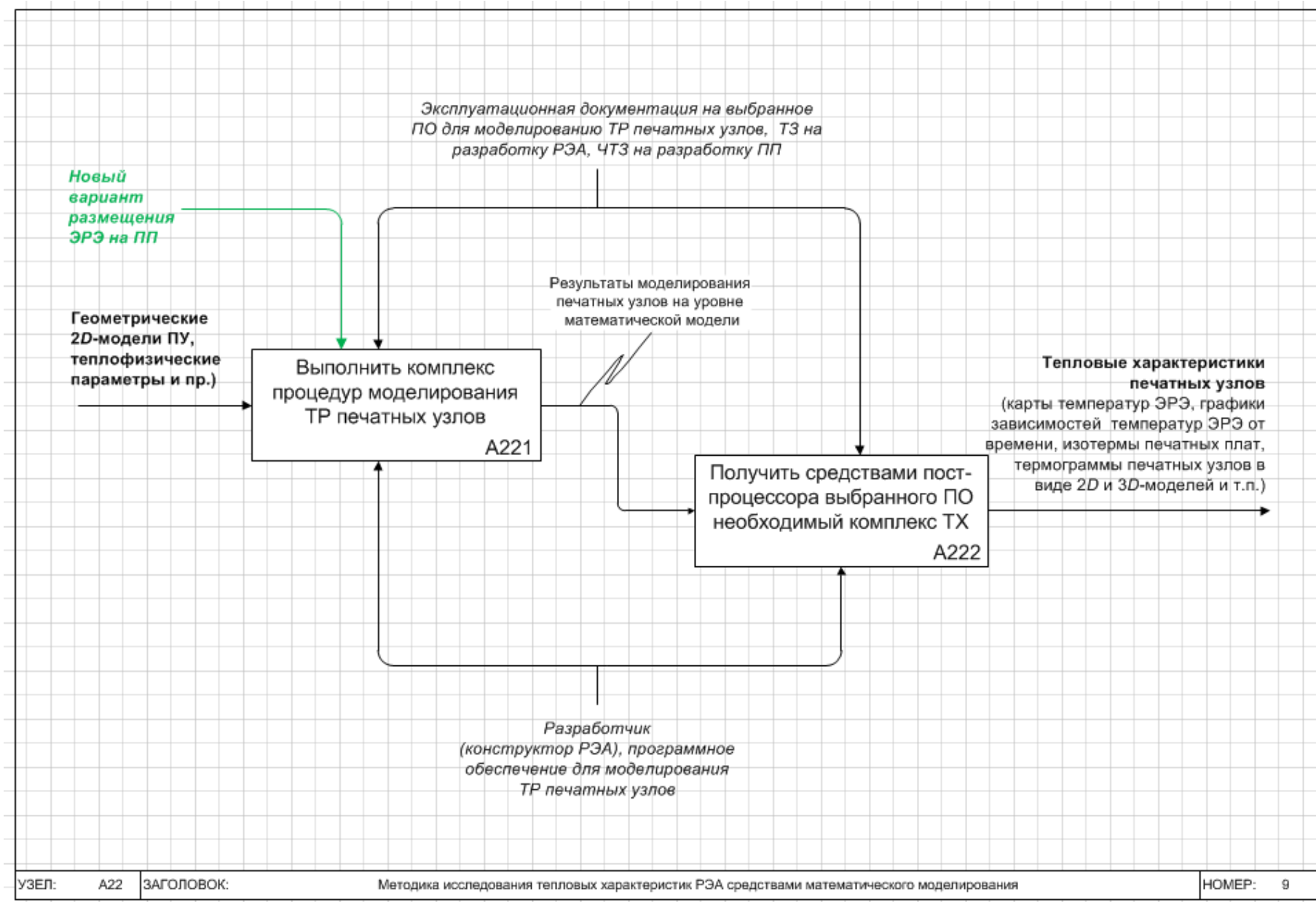


Рис. 1.4. Продолжение

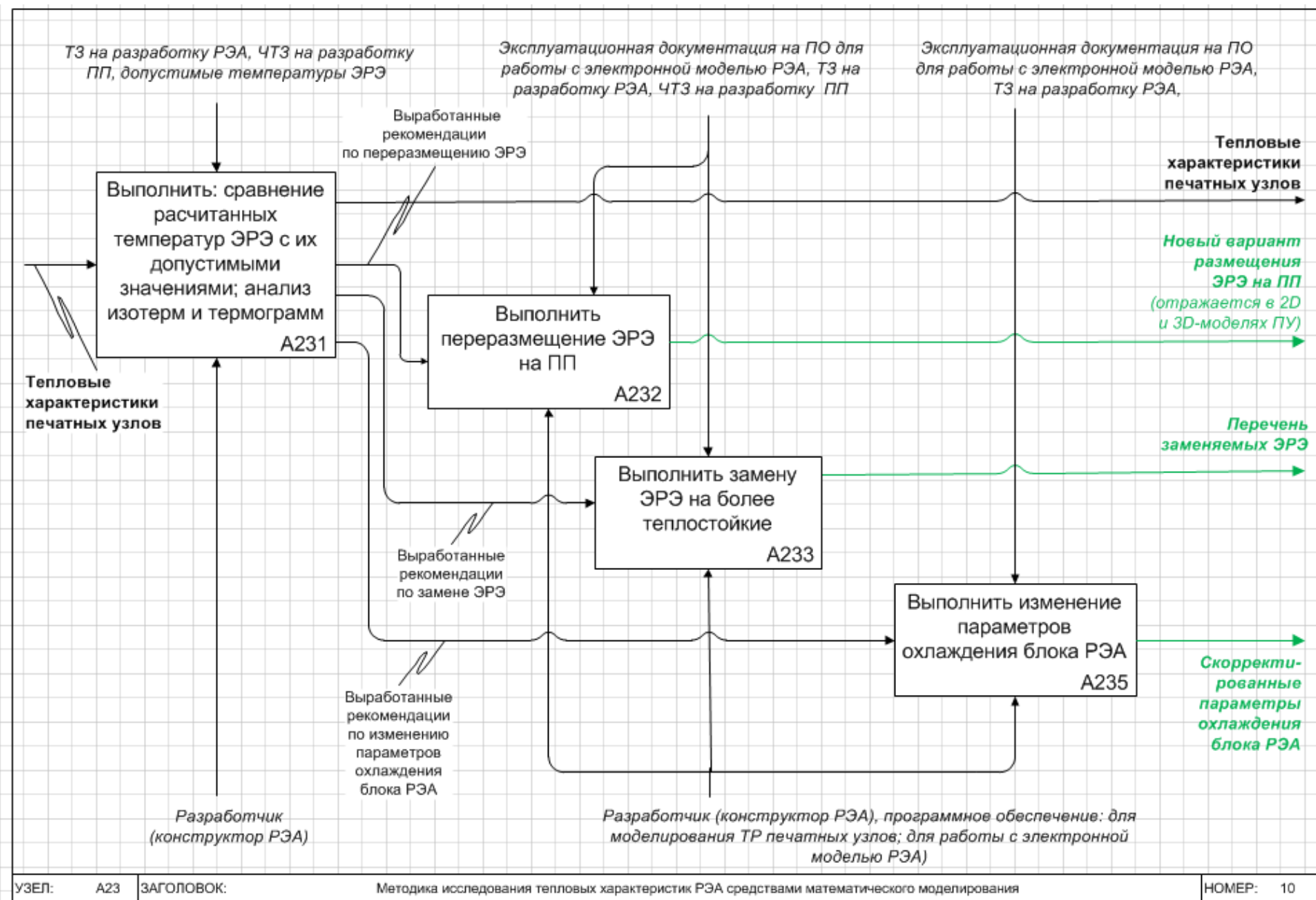




Рис. 1.4. Окончание

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 32 |
|---|---|--|---|-----------|

Функция A111. Разработчик при помощи специальных программных средств (например, PDM/PLM–системы) получает 3D-модель исследуемой конструкции РЭА (параметризованная сборка исследуемого блока РЭА – см., например, [рис. 1.3, д](#) и [рис. 2.75](#)). На основе такой модели выполняется постановка задачи на моделирование ТР блока, формализация его конструкции и разработка модели тепловых процессов (см. функции A112–A114).

Функция A112. Выполняется анализ технического задания (ТЗ) на разработку РЭА и уточняется постановка задачи (см. функцию A1) для первого этапа моделирования. Такая постановка задачи (применительно к рассматриваемой конструкции РЭА, например, блоку /[рис. 1.3, б](#)/) может иметь следующий вид: **«На основе геометрических и теплофизических параметров конструкции блока РЭА, значений тепловыделений в печатных узлах, а также данных по температурным условиям эксплуатации блока, необходимо средствами математического моделирования определить тепловой режим работы конструкции блока РЭА на уровне интегральных температур входящих в ее состав печатных узлов».**

Функция A113. Выполняется идеализация (формализация) проектируемой конструкции РЭА, исходя из постановки задачи на моделирование. Идеализация выполняется на основе методики (см., например, [п. 2.6](#)), входящей в состав выбираемого для исследования ТХ РЭА ПО (см. [прил. 7](#)). Результатом выполнения данного этапа, как правило, является перечень конструктивных узлов, конструктивных элементов и обособленных ЭРЭ, которые должны быть представлены в модели тепловых процессов в виде условно изотермичных объемов. Для объемов, отражающих конструктивные узлы (печатные узлы, функциональные ячейки, микроблоки и т. п.) или обособленные ЭРЭ, необходимо рассчитать мощности тепловыделений. С этой целью в процессе формализации конструкций РЭА для исследования их ТХ в стационарной области значения мощностей тепловыделений в отдельных конструктивных узлах РЭА может вычисляться как среднее значение за время их функционального использования. Для этого целесообразно строить циклограммы тепловыделений в конструктивных узлах, на которых реализуются функциональные узлы устройства, выполненного на базе анализируемой конструкции РЭА. На [рис. 1.5](#) в качестве примера приведена циклограмма работы отдельных устройств, входящих в состав стоечной конструкции, на основе которой реализуется комплекс мобильной связи (КМС).

Значения на циклограмме определяет время, в течение которого полностью реализуется алгоритм работы отдельных устройств системы мобильной связи. Количество интервалов Δt при этом выбирается, исходя из возможности описания шагов алгоритма работы РЭА в целом.

В общем случае средняя мощность тепловыделения $\overline{P_i}$ каждого устройства (состоящего из набора конструктивных узлов) вычисляется по циклограмме как:

$$\overline{P_i} = \left[\sum_{j=1}^m {}^0 P_i(\Delta\tau_j) \right] / m, \quad (1.1)$$

где ${}^0 P_i(\Delta\tau_j) = P_{0i} \pm \frac{\Delta P_i}{(\Delta\tau_j / \Delta\tau_{pi})}$; ${}^0 P_i(\Delta\tau_j)$ – среднее значение мощности

тепловыделения за $\Delta\tau_j$; m – количество интервалов $\Delta\tau$ на циклограмме; ΔP_{0i} – постоянная составляющая мощности тепловыделения i -го устройства (для некоторых устройств $P_{0i} = 0$); ΔP_i – отклонение значения P от ΔP_{0i} на интервале $\Delta\tau_j$; $\Delta\tau_{pi}$ – длительность интервала, на котором ΔP_{0i} изменяет свое значение.

Для приведенной на [рис. 1.5](#) циклограммы значение мощности тепловыделения блока управления антеннами и передатчика (P_1) согласно выражению (1.1) составляет $P_1 = 130 \text{ Вт}$.

Расчет мощностей отдельных ЭРЭ позволяют выполнять ППП, программные комплексы и подсистемы схемотехнического проектирования РЭА. Такие расчеты выполняются средствами пост-процессоров (см., например, [рис. 1.6](#)).

При исследовании тепловых режимов конструкций РЭА в нестационарной области мощности тепловыделений в конструктивных узлах и обособленных ЭРЭ описываются различными функциями, зависящими от времени (см. например, [табл. 2.2](#)).

Кроме этого, в процессе идеализации анализируемой конструкции РЭА выделяются виды теплообмена [\[24\]](#), которые необходимо учесть в модели тепловых процессов (МТП) и которые отражают теплообмен между ранее выделенными условно изотермичными объемами. Пример используемых в ПК ТРИАНА различных видов теплообмена приведен в [прил. 3](#).

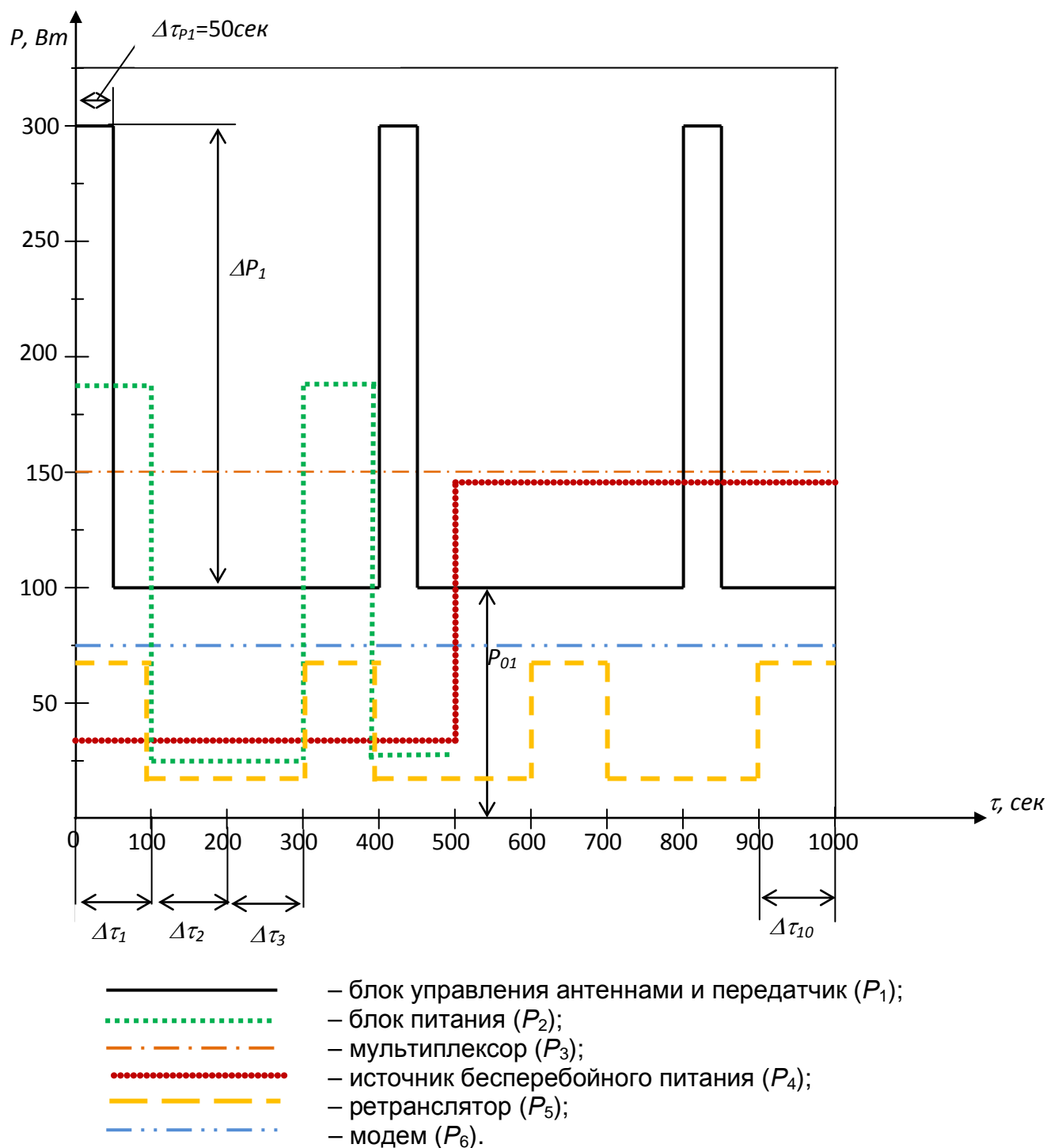


Рис. 1.5. Циклограмма тепловыделений в устройствах стоечной конструкции КМС, построенная в соответствии с алгоритмом их работы

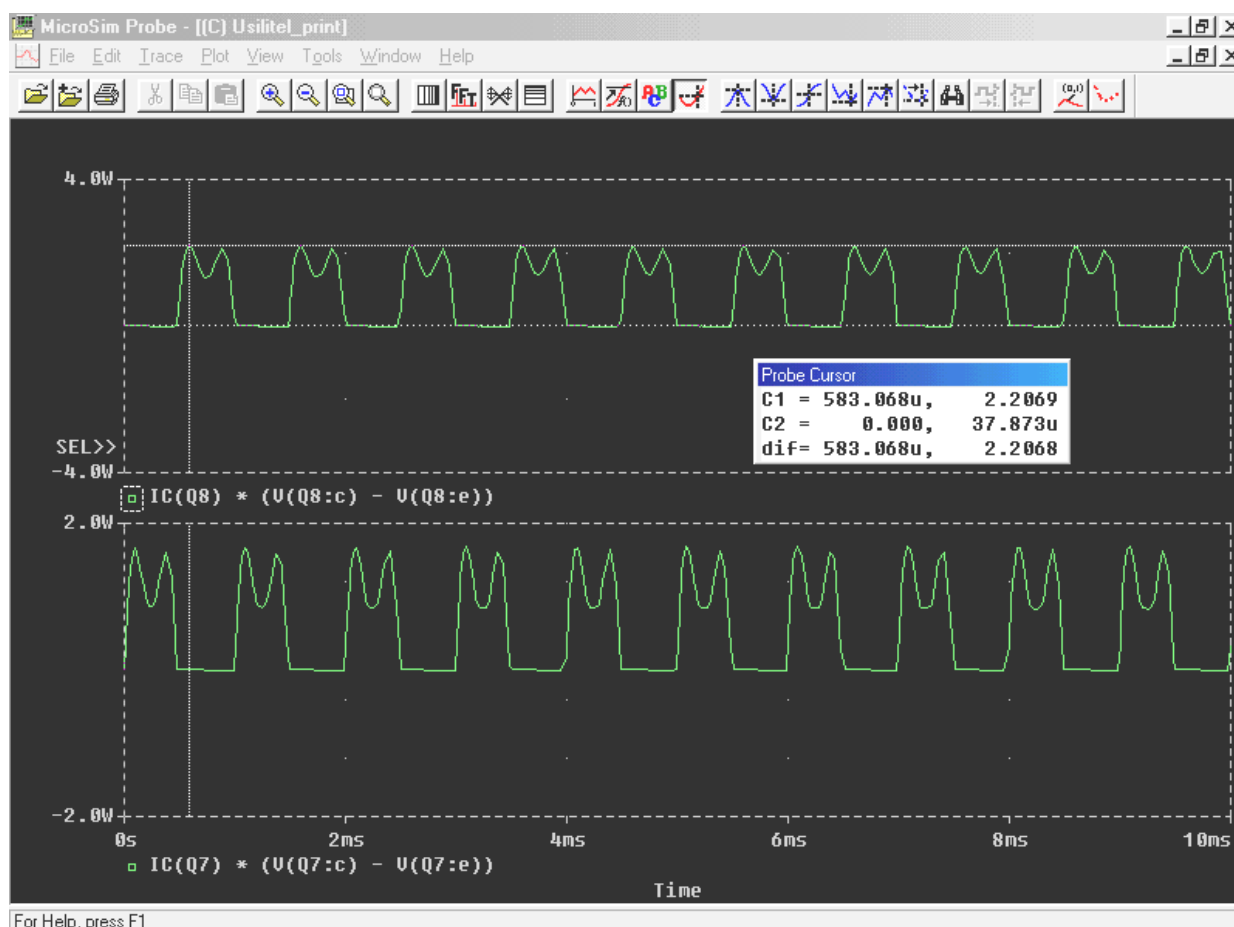


Рис. 1.6. Расчет мощностей выходных транзисторов усилителя мощности

Функция A114. Выполняется разработка модели тепловых процессов (МТП) анализируемой конструкции на основе результатов ее идеализации. МТП в зависимости от выбранной для моделирования программы может формироваться в виде графов ([рис. 3.42](#), [3.67](#)), в виде эквивалентных электрических схем замещения, в виде геометрических моделей, покрываемых специальными видами дискретизационных сеток ([рис. 1.7](#)).

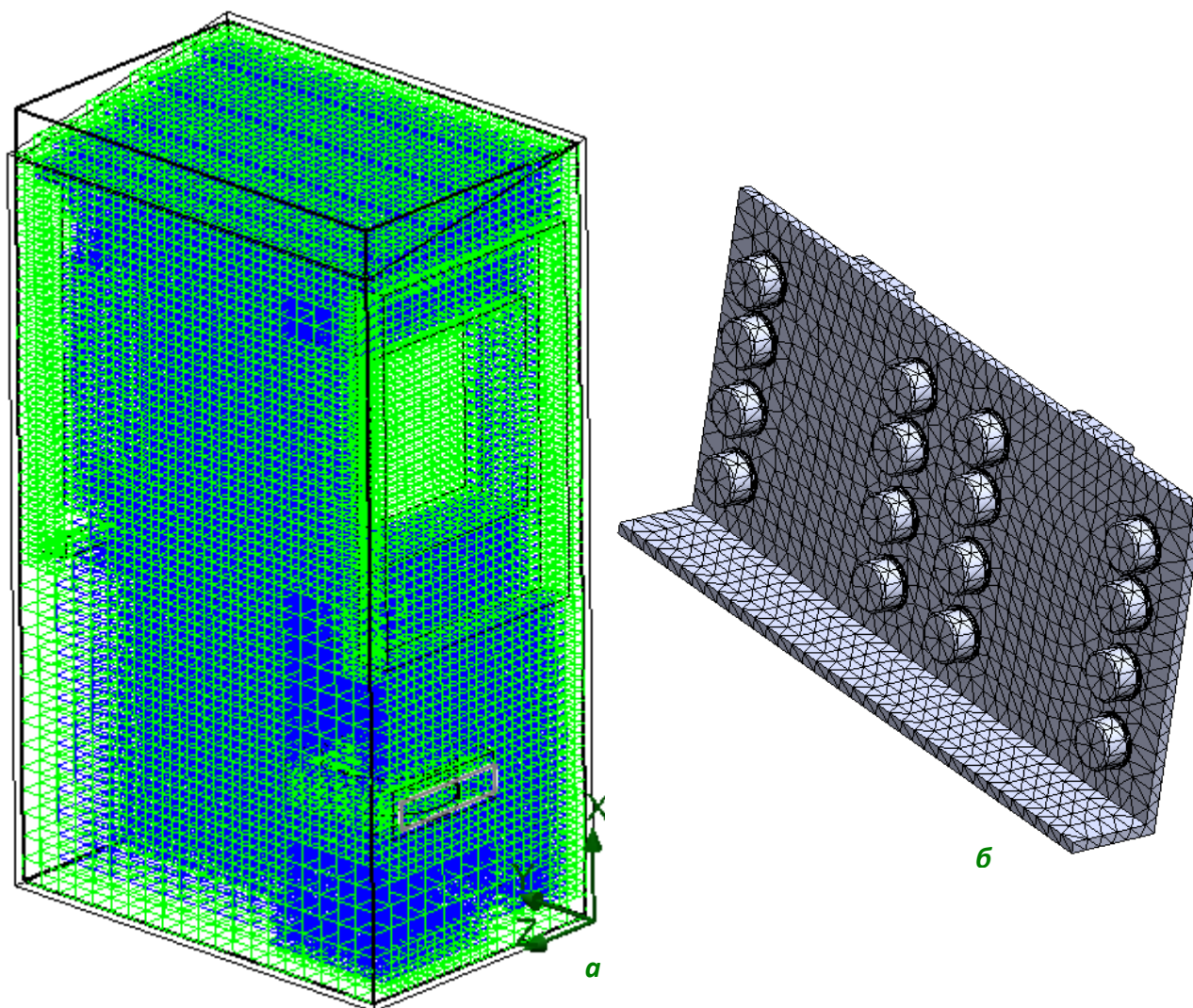




Рис. 1.7. Примеры нанесения дискретизационных сеток на геометрические модели исследуемых конструкций РЭА: *а* – при моделировании аэродинамических и тепловых процессов; *б* – при моделировании тепловых процессов

Разработка МТП выполняется на основе разделов программной документации или отдельного документа, содержащего методику построения МТП (см. например, [п. 2.6](#)). На данном этапе также осуществляется, в дополнение к ТЗ, назначение допустимых температур для выделенных на предыдущем этапе условно изотермичных объемов, моделирующих конструктивные узлы, элементы и обособленные ЭРЭ. Данные температуры назначаются, например, на основе ТУ, регламентирующих допустимые температуры органов управления и панелей приборов, допустимые температуры корпусов и/или активных зон обособленных ЭРЭ с учетом ограничений, учитывающих выходные электрические характеристики РЭА и/или показатели надежности и т. п. [[1](#), [2](#)].

Данным этапом методики предусмотрена также подготовка исходных данных для моделирования. Данные готовятся, как правило, средствами графических редакторов (см. например, [п. 2.8](#)), которые отображают геометрическую

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 37 |
|---|---|--|---|-----------|

модель анализируемой конструкции и /или структуру графа МТП и описывают ее геометрические и теплофизические параметры (коэффициенты теплопроводности, коэффициенты черноты, теплоемкости и т. п.). В ходе подготовки данных применяется входящий в состав эксплуатационной документации комплекс электронных справочников и баз данных по теплофизическим параметрам конструкционных материалов и геометрическим и теплофизическим параметрам (ГТФП) ЭРЭ (см., например, [прил. 1, 2](#)).



Функция A121. Выполняется анализ на ПЭВМ разработанной МТП. Выбираемое для этой цели программное обеспечение (см. [прил. 7](#)) должно в полной мере соответствовать постановке задачи на моделирование. Результатом выполнения данного этапа является комплекс тепловых характеристик анализируемой конструкции РЭА, таких, например, как: температуры составных частей (конструктивных узлов и элементов) конструкции РЭА, температуры обособленных ЭРЭ, температуры воздушных объемов и потоков внутри конструкции РЭА и т. п. (см., например, [главу 4](#)).

Функция A122. Данным этапом методики предусмотрен анализ значений тепловых характеристик, полученных разработчиком РЭА в результате моделирования. Разработчик анализирует результаты моделирования, ориентируясь на требования ТЗ, результаты формализации и сформированную им на предыдущем этапе МТП (см. функцию A114). В результате ошибок в описании структуры и/или ГТФП разработанной МТП анализируемой конструкции РЭА полученные тепловые характеристики могут иметь неадекватные значения, например температуры свыше 1000 °С или неопределенные значения, время выхода в стационарный режим свыше 200 часов и т. п. Некоторые программы по моделированию тепловых режимов РЭА могут осуществлять анализ исходной информации и выдавать список предупреждений о некорректных исходных данных (см. например, [п. 2.7.1](#)).

В случае удовлетворительных результатов анализа разработчик РЭА переходит к детальным исследованиям тепловых характеристик РЭА на основе моделирования (функция A124), а в случае выявления некорректных результатов выполняет корректировку ГТФП и/или структуры МТП с использованием редактора выбранной для моделирования программы (функция A123).

Функция A123. В случае получения некорректных результатов моделирования на основе разработанной МТП (функция A114) на данном шаге методики разработчик анализирует структуру и параметры МТП, а также выполняет в целом оценку исходных данных. Далее на основе анализа вносит, в случае необходимости, соответствующие изменения в МТП.

Функция A124. На данном шаге методики выполняется полный цикл исследований на ПЭВМ тепловых характеристик анализируемой конструкции РЭА в

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 38 |
|---|---|--|---|-----------|

соответствии с выполненной на шаге 1 постановкой задачи (функции $A1$, $A112$). Результатом исследований является комплекс тепловых характеристик, таких как температуры составных частей конструкции РЭА, температуры обособленных ЭРЭ, температуры воздушных объемов и потоков внутри конструкции РЭА, а также зависимости перечисленных температур от времени (для нестационарного теплового режима) и/или от изменения определенных ГТФП анализируемой конструкции РЭА, функции чувствительности полученных температур к изменению ГТФП конструкции РЭА [2, 3] и т. п. На [рис. 1.8](#) приведен пример результатов моделирования стационарного теплового режима блока РЭА на уровне интегральных температур конструктивных узлов и конструктивных элементов. Аналогичный уровень детализации результатов моделирования приведен на [рис. 2.81](#).

Функция A131. Данным этапом методики предусмотрен анализ полученных тепловых характеристик исследуемой конструкции РЭА (см., например, [рис. 1.3, а](#) и [рис. 1.3, в](#)) в рамках проектной задачи (см. [табл. 1.2](#)). При исследовании ТХ блока ([рис. 1.3, в](#)) в соответствии с проектной задачей № 2 (см. [табл. 1.2](#)) выполняется анализ полученных температур отдельных условно изотермичных элементов конструкции блока РЭА (стенки корпуса, органы управления, обособленные ЭРЭ), а также интегральных температур ПУ (см. [п. 2.6.3](#)) с допустимыми значениями, определяемыми постановкой задачи на моделирование ТР блока РЭА.

Функции A132–A134. В случае неудовлетворительного результата, полученного на предыдущем шаге методики, на данных шагах предусмотрена выработка определенного решения, направленного на улучшение тепловых характеристик анализируемой конструкции РЭА. Такие решения, как правило, на этапе проектирования связаны с перекомпоновкой блока РЭА (функция A132), изменениями условий и параметров охлаждения конструкции РЭА (функция A133) /введение принудительного охлаждения, увеличение расхода теплоносителя, снижение общего гидравлического сопротивления конструкции и т. п./, заменой обособленных ЭРЭ на более теплостойкие (функция A134).

Функции A21–A23. Разработчик последовательно выполняет процедуры подготовки исходной информации (функция A21), проведения моделирования тепловых режимов печатных узлов, входящих в состав блока РЭА (функция A22), и внесения изменений в проект (функция A23) на основе полученных результатов моделирования (см., например, [п. 3.13](#)).

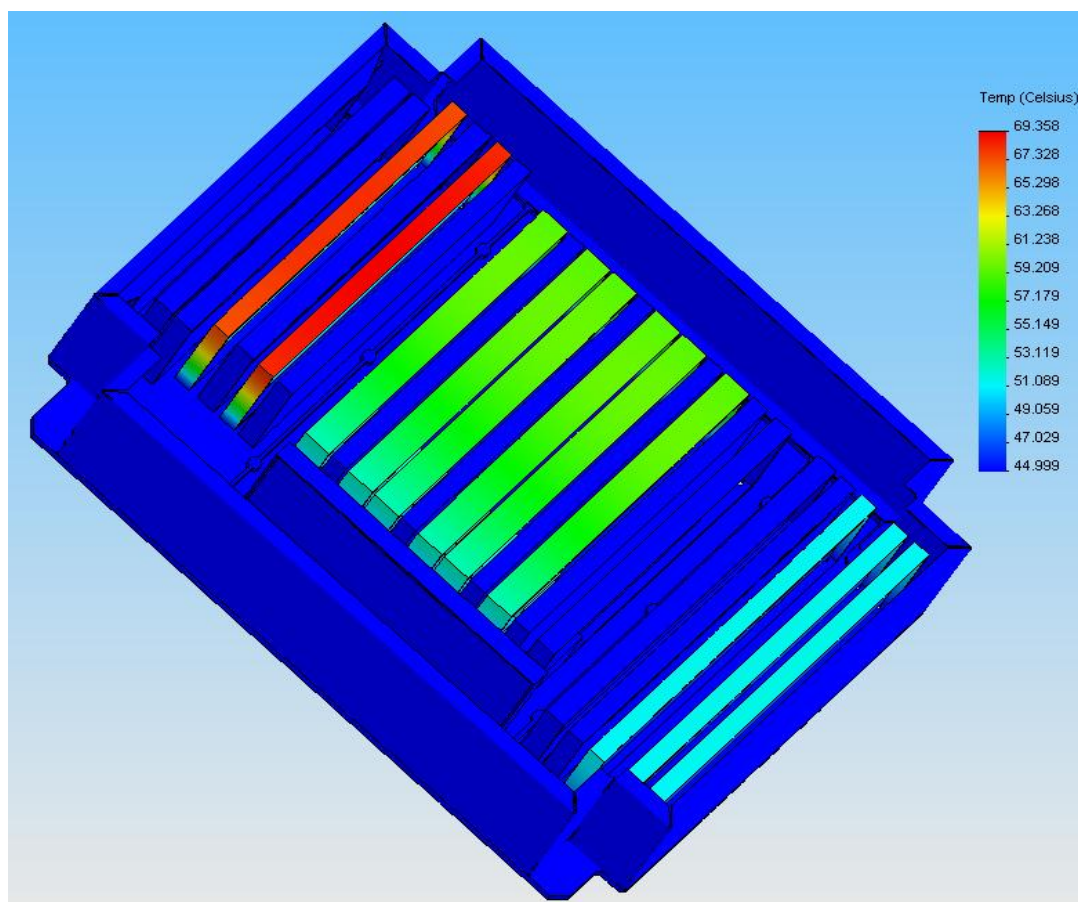




Рис. 1.8. Пример результатов моделирования теплового режима блока РЭА

Функция A211. Разработчик при помощи специальных программных средств, например, *PDM/PLM*–системы, и/или системы топологического проектирования печатных плат, например *AltiumDesigner* или *MentorGraphics* (см. [прил. 7](#)) получает из электронной модели РЭА файлы с результатами предварительной трассировки ПП (в двоичном или текстовом формате).

Функция A212. Средствами конвертора (как правило, входит в состав ПО для моделирования тепловых режимов (ТР) печатных плат) разработчик получает схемы размещения ЭРЭ на печатных платах, которые в дальнейшем отражаются на геометрических 2D- и 3D-моделях печатных плат (ПП) средствами графического редактора, входящего в состав ПО для моделирования ТР ПП.

Функция A213. Выполняется подготовка дополнительной исходной информации для проведения моделирования, например:

- определяются граничные и начальные условия (см., например, [п. 3.8.8](#));
- выполняется дополнительная выборка из базы данных применяемого для моделирования ПО, геометрических и теплофизических параметров (ГТФП) ЭРЭ (см. [прил. 2, 4, 5](#)), размещенных на геометрических 2D- и 3D-моделях ПП;

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 40 |
|---|---|--|---|-----------|

- устанавливаются параметры дискретизационных сеток, на основе которых автоматически формируются МТП;
- определяются режимы моделирования (шаги интегрирования, начальные температуры и т. п.).

Граничные условия 1–4 родов формируются и отображаются на геометрических моделях ПП на основе информации из 3D-модели блока (габаритные размеры печатных узлов, схемы размещения печатных узлов в блоке) и результатов моделирования ТР блока (см., например, [рис. 1.8](#)) /интегральные температуры стенок корпуса, интегральные температуры печатных узлов и т. п./.

Функция A221. Выполняется полный цикл моделирования ТР печатных узлов, входящих в состав конструкции РЭА (например, стойки или блока). Основной целью моделирования в соответствии, например, с проектной задачей № 3 (см. [табл. 1.2](#)) является получение температур определенного множества ЭРЭ, размещенных на ПП, а для задачи №4 – термограммы ПУ и изотермы ПП.

Функция A222. Средствами графического пост-процессора (входит, как правило, в состав ПО для моделирования ТР ПП) разработчик получает в соответствии с проектной задачей (см. [табл. 1.2](#)) необходимую для принятия проектных решений информацию о тепловых режимах печатных узлов:

- температуры корпусов и активных зон ЭРЭ;
- графики зависимости температур ЭРЭ от времени (для нестационарного теплового режима);
- изотермы и термограммы несущих конструкций печатных узлов – печатных плат и т. п.

На [рис. 1.9](#) приведен пример одной из ТХ (термограммы ПУ), полученной в результате моделирования теплового режима ПУ, которая отображена на 2D- и 3D-геометрических моделях.

Функция A231. Выполняется анализ полученных в результате моделирования тепловых характеристик печатных узлов на предмет их соответствия, например:

- допустимым температурам корпусов или активных зон ЭРЭ (согласно ТУ или ТУ с дополнительными ограничениями с точки зрения обеспечения электрических характеристик и/или показателей надежности проектируемой РЭА и т. п.);
- коэффициентам тепловой нагрузки ЭРЭ, требуемым согласно ТЗ и/или ЧТЗ;
- требуемым температурным портретам несущих конструкций (печатных плат) /выполняется, например, анализ взаиморасположения тепловых зон ПП с тепловыделяющими и теплочувствительными ЭРЭ/ и т. п.

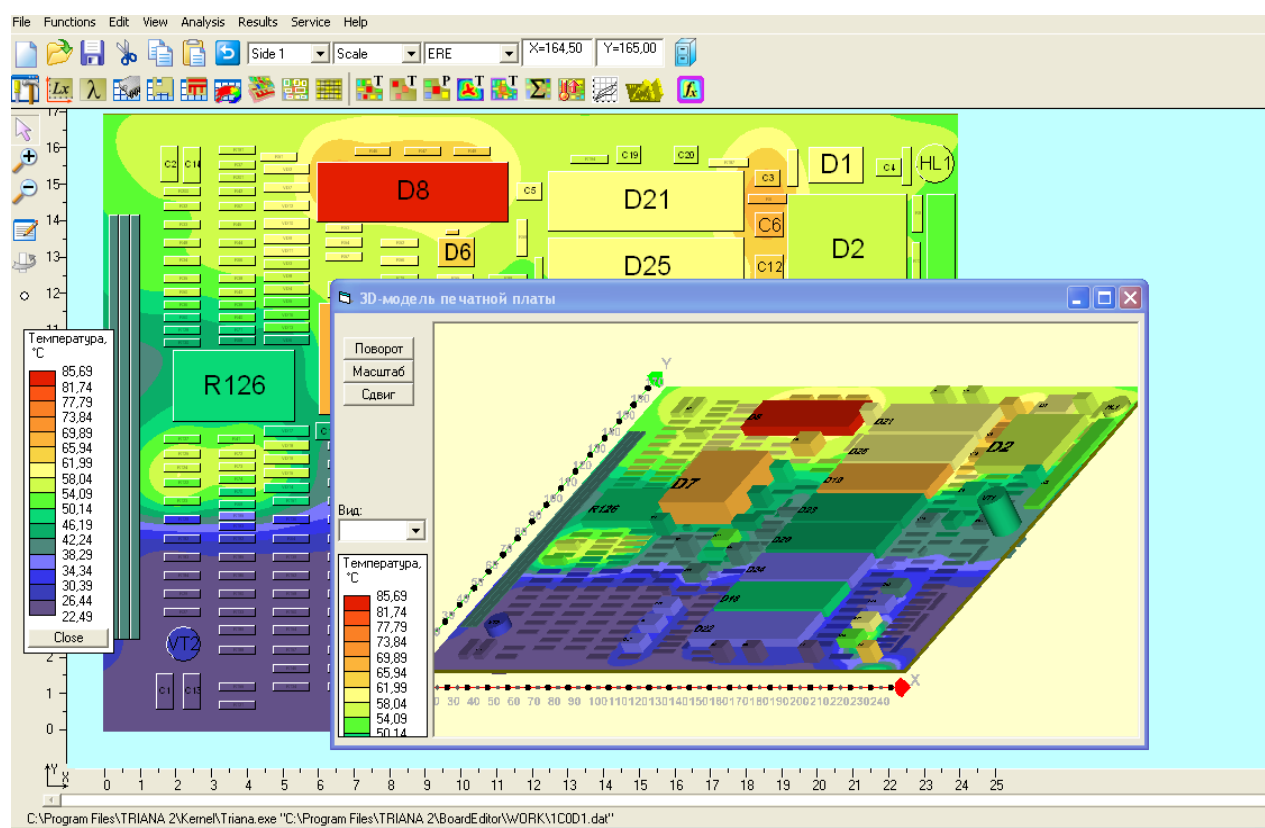




Рис. 1.9. Пример результатов моделирования (термограммы) теплового режима печатного узла, входящего в состав блока РЭА

Функции A232–A235. В случае неудовлетворительного результата, полученного на предыдущем шаге методики (функция A231), осуществляется выработка определенного проектного решения, направленного на улучшение тепловых характеристик исследуемых печатных узлов. Такие решения, как правило, связаны с:

- переразмещением ЭРЭ на ПП (функция A232);
- заменой отдельных ЭРЭ или их групп на более теплостойкие (функция A233);
- изменениями условий и параметров охлаждения конструкции блока РЭА, в котором устанавливаются печатные узлы, или введением локальных способов охлаждения отдельных печатных узлов или ЭРЭ /введение контуров из тепловых шин (см., например, [рис. 2.4](#)), введением дополнительных теплостоков, мини-радиаторов и т. п./ (функция A133).

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 42 |
|---|---|--|---|-----------|

1.2. Основные характеристики ПКТРИАНА-2.10

Структурная схема комплекса

Компоненты ПК могут работать как автономно, так и комплексироваться в различные группы (комплексы программ). Структурная схема комплекса, поясняющая взаимодействие его составных компонентов и файловых структур, приведена на [рис. 1.10](#).

Комплекс программных единиц (№№ 1–4) позволяет формировать в графическом режиме топологические МТП, используя для описания ТФП ветвей модели базу данных «Материалы», ставить в соответствие созданной модели графические образы конструкции, выполнять параметризацию топологических МТП, а также выполнять каталоголизацию моделей посредством организации библиотек. При этом файлы *.mcr содержат компактное описание параметризованных МТП, включая библиотечные фрагменты и модели, а также графические образы МТП исследуемой конструкции РЭА в целом и МТП библиотечных фрагментов МТП. Файлы *.dat⁽¹⁾ содержат развернутое описание всего набора МТП граничных и начальных условий. Файлы с данным расширением соответствуют формату данных, с которыми работает математическое ядро ПК (блок № 10).

Комплекс программных единиц (№№ 1, 6, 7) ориентируется на отображение результатов моделирования непосредственно на графе топологической МТП. Файлы с расширением *.rez являются текстовыми файлами отчетов результатов анализа МТП.

Комплекс программ №№ 8, 9 позволяет формировать геометрическую модель исследуемого КУ с использованием баз данных «Материалы» и «Радиоэлементы». При этом на геометрической модели НК могут быть автоматически размещены ЭРЭ посредством конвертации файловых структур, получаемых системами топологического проектирования ПП (PCAD, ACCEL и др.). ГТФП ЭРЭ в рамках данного комплекса программ могут быть выбраны как из базы данных «Радиоэлементы», так и получены при помощи специальной программы. В любом случае выборка или расчет ГТФП ЭРЭ сопровождаются графическими образами эскизов вариантов установки ЭРЭ на НК. Файловые структуры *.dat⁽²⁾ и *.rez⁽²⁾ содержат формализованное описание объекта моделирования (блок № 12) и файл-отчет (блок № 12), при помощи которого посредством рассматриваемого комплекса программ результаты моделирования могут быть отражены непосредственно на геометрической модели КУ в графическом виде (изотермы, термограммы, отображение в цветовой палитре температур ЭРЭ и т. п.).

При применении комплекса программных единиц №№ 1, 6, 7 МТП исследуемого КУ формируется математическим ядром ПК на основе формализованного описания геометрической модели КУ в автоматическом режиме.

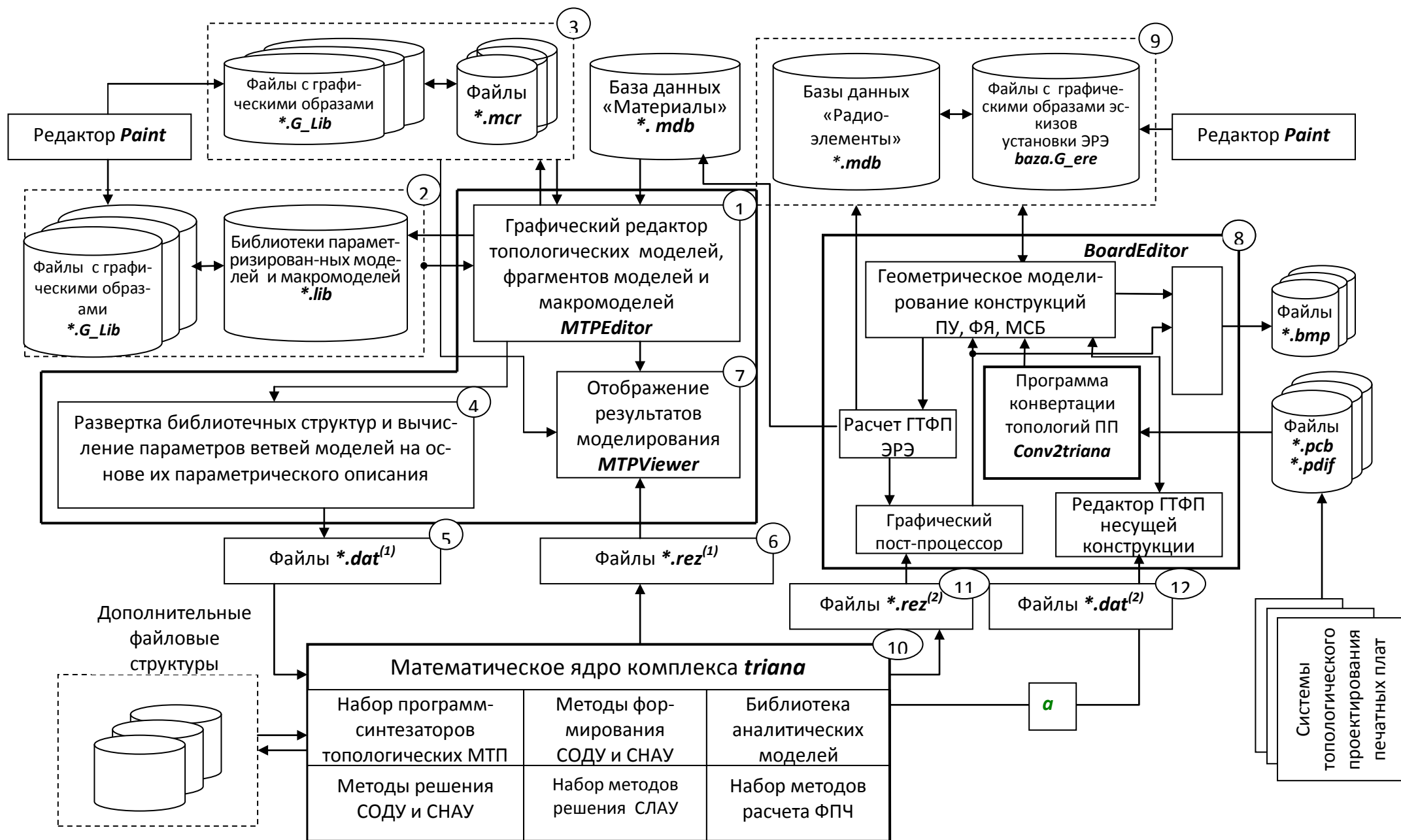


Рис. 1.10. Укрупненная структурная схема программного комплекса TPuANA (а): МТП – модель тепловых процессов; СОДУ – система обыкновенных дифференциальных уравнений; СНАУ – система нелинейных алгебраических уравнений; СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений; ФПЧ – функции чувствительности; взаимодействие компонент ПК при реализации технологии «клиент-сервер» (б)

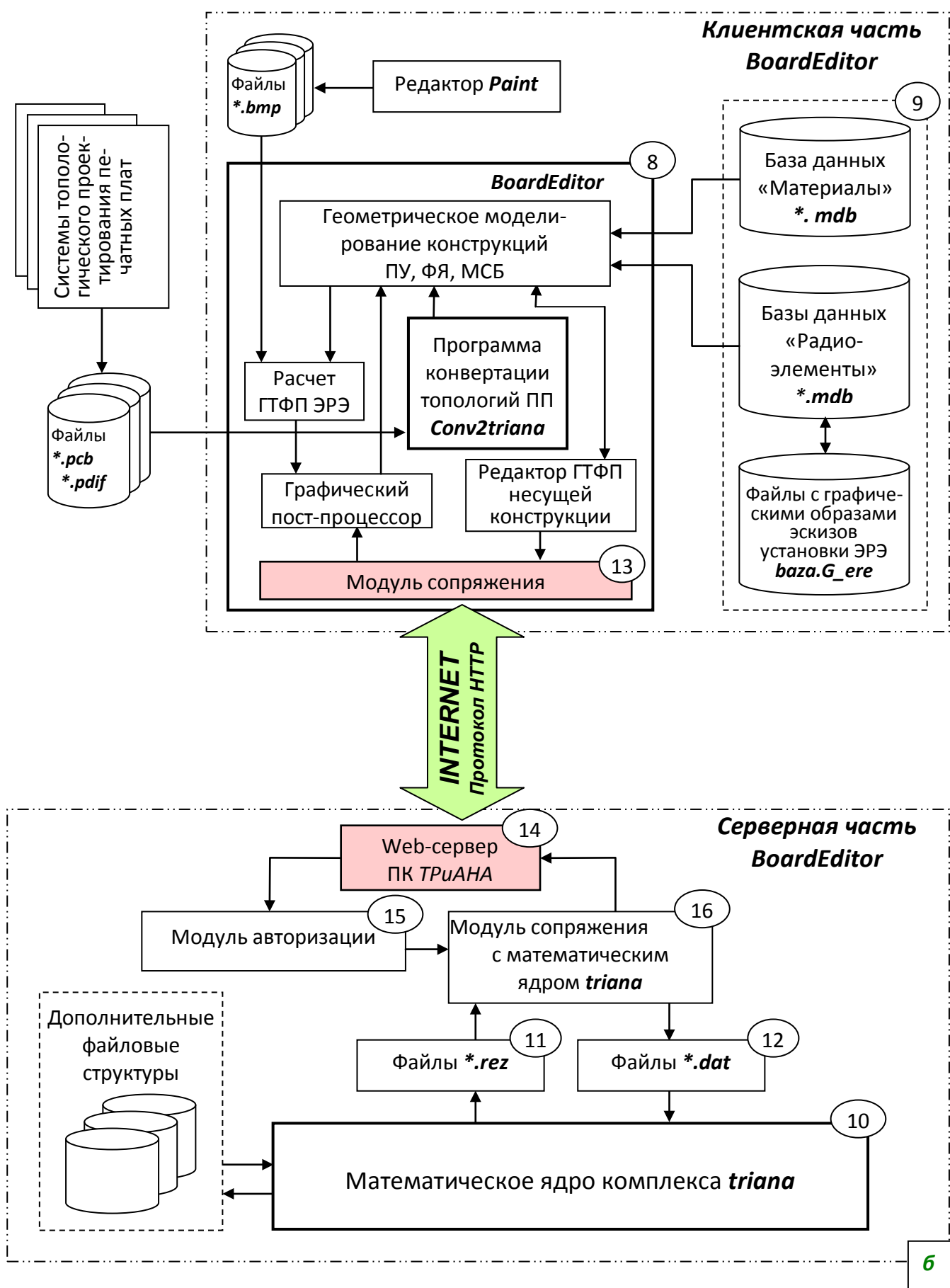






Рис. 1.10. Окончание

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 45 |
|---|---|--|---|-----------|

Моделирование тепловых режимов ПУ, ФЯ и МСБ можно производить по технологии «клиент-сервер». Укрупненная структурная схема ПК *ТРИАНА* в конфигурации «клиент-сервер» приведена на [рис. 1.1, б](#). В режиме «клиент-сервер» математическое ядро *triana* (блок № 10) располагается на удаленном сервере, а комплекс программных единиц №№ 8, 9, 13, в состав которого входит программа *BoardEditor*, выполняет роль клиента.

Клиентская часть (см. [рис. 1.10, б](#)) включает в свой состав графический редактор *BoardEditor* (блоки № 8), справочную систему, базу данных «Радио-элементы» (блок № 9). В процессе моделирования тепловых режимов ПУ, ФЯ и МСБ программа *BoardEditor* выполняет удаленное взаимодействие с математическим ядром *triana*. Исходные данные для моделирования сохраняются в специализированном файле данных, который передается в зашифрованном виде математическому ядру через *INTERNET* по протоколу HTTP. Математическое ядро *triana* выполняет моделирование тепловых режимов и передает клиентской программе *BoardEditor* набор файлов данных с результатами моделирования. Полученные результаты моделирования отображаются в программе *BoardEditor* в удобной для пользователя форме. Для взаимодействия с математическим ядром в состав программы *BoardEditor* входит модуль сопряжения (блок № 13), обеспечивающий передачу исходных данных для моделирования на сервер ПК *ТРИАНА*, а также получение с сервера результатов теплового моделирования.

Серверная часть программного комплекса представлена *Web*-сервером ПК *ТРИАНА*, модулем авторизации, модулем сопряжения с математическим ядром и собственно математическим ядром ПК *ТРИАНА* (см. блоки №№ 10–12, 14–16). *Web*-сервер (блок № 14) производит взаимодействие с удаленным клиентом и обеспечивает прием исходных данных для моделирования и передачу результатов моделирования клиенту. При получении данных от клиента *Web*-сервер вызывает модуль авторизации (блок № 15) и передает ему параметры запроса и данные, полученные от клиента. Модуль авторизации выполняет проверку прав доступа клиента к проведению математических расчетов и, если клиент имеет соответствующие права, передает управление модулю сопряжения с математическим ядром (блок № 16). Модуль сопряжения получает у *Web*-сервера исходные данные для моделирования, переданные клиентом, и сохраняет их во временных файловых структурах (блок № 12). Затем модуль сопряжения вызывает математическое ядро *triana* (блок № 10), которое производит моделирование тепловых режимов. Результаты моделирования записываются во временные файлы (блок № 11), которые модуль сопряжения посредством *Web*-сервера передает клиенту (программа *BoardEditor*) для отображения результатов математического моделирования.

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 46 |
|---|---|--|---|-----------|

Условия применения комплекса в целом

Для эксплуатации ПК *ТРИАНА 2.10* необходимы: ПЭВМ класса *PENTIUM-III* с *SVGA* монитором, не менее 256 Мб оперативной памяти, не менее 50 Мб свободного дискового пространства, операционная система *WINDOWS 98/2000/XP*.

Для проведения сеанса моделирования ТР на ПЭВМ при помощи ПК *ТРИАНА* необходима следующая исходная информация:

Для МТП, разрабатываемых пользователем:



- эскизы или чертежи или 3D-модель исследуемой конструкции РЭА;
- теплофизические параметры материалов конструкции РЭА (коэффициенты теплопроводности, коэффициенты черноты, плотности, удельные теплостойкости);
- мощности тепловыделений в КУ и/или ЭРЭ исследуемой конструкции РЭА;
- условия охлаждения (граничные условия) конструкции РЭА;
- начальные условия /определяют параметры, необходимые при моделировании нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкции РЭА/ (начальное и конечное время работы РЭА, шаги по времени, точность интегрирования, начальное значение температуры).

В результате моделирования будут получены: значения температур конструктивных элементов, конструктивных узлов и электрорадиоэлементов РЭА; значения температур воздушных потоков, охлаждающих РЭА. Значения перечисленных характеристик могут быть получены как для стационарного, так и для нестационарного тепловых режимов.

Для конструктивных узлов типа ПУ, ФЯ или МСБ:

Исходная информация для моделирования теплового режима КУ подготавливается на основе следующих данных:

- линейные размеры и ТФП несущей конструкции КУ и установленных на ней гибких печатных плат /для ФЯ/;
- ориентация КУ в пространстве;
- коэффициент площади и ТФП печатных или пленочных проводников;
- количество линий сетки по осям *ОХ* и *ОУ*, дискретизирующей тепловое поле НК КУ при отображении результатов моделирования;
- информация о геометрических параметрах вырезов в НК;
- информация о ГТФП тепловых шинах;
- информация о ГТФП ЭРЭ, установленных на НК КУ;
- значения тепловых мощностей, рассеиваемых каждым радиоэлементом, установленным на НК КУ (приводятся в карте электрических режимов реализованной на КУ электрической схемы или определяются в результате моде-



| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 47 |
|---|---|--|---|-----------|

лирования электрических процессов, протекающих в схеме, например, при помощи ППП *OrCAD-9.2*, *Protel*, *MicroSim*, *AltiumDesigner* и т. п.);

- условия охлаждения КУ (условия охлаждения, или граничные условия КУ, получают в результате анализа теплового режима блока или стоечной конструкции, в которой он установлен, или берут из ТЗ на проектирование данного КУ);
- начальные условия /определяют параметры, необходимые при моделировании нестационарных тепловых процессов, протекающих в исследуемом КУ (начальное и конечное время работы КУ, шаги по времени, точность интегрирования, начальное значение температуры)/.

Информация, получаемая в результате моделирования и записываемая в файл-отчет при любых режимах функционирования программного комплекса, или выводимая в графическом режиме при помощи постпроцессора, будет включать в свой состав следующие данные:

- исходные данные описания объекта моделирования для контроля;
- данные, характеризующие решение САУ методом *LU*-разложения (размерность матрицы (порядок системы), начальное число ненулевых элементов в матрице, число ненулевых элементов в факторизованной матрице);
- изотермы, термограммы, графики (в цветовой палитре) зависимости температур ЭРЭ от времени, изотермы шин и т. д.;
- стилизованное изображение (при записи в файл-отчет) температурного поля несущей конструкции КУ (печатной платы, подложки, основания ФЯ);
- стилизованное изображение (при записи в файл-отчет) температурных полей тепловых шин;
- карту (для НТР карта записывается в файл или отображается в виде таблицы для каждого момента времени) тепловых режимов работы ЭРЭ, установленных на КУ, и содержащую следующее: обозначения ЭРЭ в схеме; температуры корпусов или активных зон (если задаются в данных тепловые сопротивления «переход–корпус»); температуры НК КУ в месте установки ЭРЭ; максимально допустимые по ТУ температуры ЭРЭ; коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ; значения перегревов ЭРЭ (если они произошли);
- для ПУ и ФЯ интегральные тепловые и геометрические характеристики: интегральную температуру КУ; допустимую интегральную температуру КУ (в случае отсутствия перегревшихся ЭРЭ); суммарную мощность тепловыделения в КУ; общее количество ЭРЭ; количество перегревшихся ЭРЭ; площади поверхностей ЭРЭ, установленных на каждой поверхности КУ; суммарную площадь КУ; эффективные толщины слоев ЭРЭ для каждой поверхности КУ; эффективную толщину КУ в целом.

| | | | | |
|---|---|--|--|----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 48 |
|---|---|--|--|----|

Ограничения комплекса

При моделировании ТР при помощи ПК *ТриАНА-2.10* следует учитывать следующие ограничения:

- **максимальное число узлов в топологической МТП, разрабатываемой пользователем, ≤ 15000 ;**
- **максимальное число ветвей в топологической МТП, разрабатываемой пользователем, ≤ 90000 ;**
- **максимальное число ЭРЭ ≤ 1500 ;**
- **максимальное число тепловых шин ≤ 30 ;**
- **максимальное число контуров из тепловых шин ≤ 30 ;**
- **максимальное число вырезов ≤ 30 ;**
- **максимальное число локальных зон с граничными условиями ≤ 30 .**

Описание задачи

Для МТП, разрабатываемых пользователем



С помощью ПК осуществляется моделирование стационарных и нестационарных тепловых режимов конструкций РЭА при различных условиях охлаждения путем формирования системы нелинейных (в общем случае) уравнений (для СТР) или системы обыкновенных дифференциальных уравнений (для НТР) [1] по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам конструкции РЭА, установленных в РЭА конструктивных узлов, элементов, а также определенных конструктором граничных условий, решение системы уравнений и вывод результатов в удобной для дальнейшего анализа форме.

Система уравнений формируется программой на основе топологической модели тепловых процессов, построенной пользователем для анализируемой конструкции РЭА.

Для конструктивных узлов типа ПУ, ФЯ или МСБ

На основе данных о размещении ЭРЭ и дополнительных данных, подготовленных пользователем, описывающих геометрические и теплофизические параметры НК КУ, а также геометрические, теплофизические параметры и тепловыделения ЭРЭ, установленных на КУ, условий охлаждения и начальных условий, **ПК в автоматическом режиме** синтезирует модель тепловых процессов КУ, по которой проводит моделирование его теплового режима (СТР или НТР).



С помощью ПК осуществляется моделирование теплового режима КУ при различных условиях охлаждения путем **автоматического** (в математиче-

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ | 49 |
|---|---|--|---|-----------|

ском ядре ПК применяются уникальные алгоритмы автоматического синтеза топологических моделей тепловых процессов различных КУ) формирования системы нелинейных алгебраических уравнений (стационарный тепловой режим) или системы обыкновенных дифференциальных уравнений (нестационарный тепловой режим) по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам КУ РЭА, установленных на нем ЭРЭ и краевым условиям, решение этой системы и вывод результатов в удобной для анализа форме.

Для решения указанных задач используются критериальные уравнения теории подобия (см. [прил. 3](#)) и уравнения теплообмена, метод узловых потенциалов для формирования математической модели тепловых процессов в виде системы алгебраических уравнений (СЛАУ или СНАУ).

Для решения СОДУ используется метод формул дифференцирования назад, для решения СНАУ используется метод простых итераций, а для решения СЛАУ, к которым сводятся СОДУ и СНАУ (на каждом шаге по времени и/или на каждой итерации по нелинейностям), – метод *LU*-разложения с символьной факторизацией и учетом разреженности матрицы тепловых проводимостей [[1](#)].

| | | | |
|---|--|--|-----------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ №1 | 50 |
|---|--|--|-----------|

2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1

В состав *Комплекса № 1* входят следующие программные единицы ПК *TPuANA*: *MTPEditor*, *MTPViewer*, *Triana*.

2.1. Условия применения комплекса

Для проведения сеанса моделирования при помощи *Комплекса № 1* необходима следующая исходная информация:

- эскиз или чертеж конструкции РЭА;
- теплофизические параметры материалов конструкции РЭА;
- мощности тепловыделений в элементах РЭА;
- условия охлаждения (граничные условия) конструкции РЭА;
- начальные условия и параметры интегрирования (для исследования нестационарных тепловых процессов).

В результате моделирования при помощи *Комплекса № 1* могут быть получены: значения температур (или зависимости температур от времени) конструктивных элементов, конструктивных узлов и электрорадиоэлементов РЭА; потоков хладоносителей, охлаждающих РЭА.

2.2. Режимы функционирования комплекса

Составные компоненты комплекса (*MTPEditor*, *MTPViewer*, *Triana*) могут функционировать как автономно, так и в комплексе посредством их соответствующей настройки. Автономный режим предусматривает несколько вариантов применения компонентов комплекса:

1. Подготовку файла данных для математического ядра *Triana* средствами любого текстового редактора и просмотр файла-отчета также средствами текстового редактора.
2. Подготовку файла данных в графическом режиме средствами программы *MTPEditor*, автономный запуск математического ядра *Triana* и просмотр результатов моделирования средствами программы визуализации ре-

зультатов анализа МТП *MTPViewer*. Графический режим подготовки данных позволяет:

- наглядно представлять граф модели тепловых процессов;
- применять базу данных «Материалы» при описании ТФП компонентов МТП;
- ставить ей в соответствие эскиз конструкции, которая исследуется;
- применять аппарат параметризации МТП;
- использовать для формирования МТП типовые фрагменты параметризованных МТП, хранящихся в специальных библиотеках.

3. Подготовку файла данных, моделирование и просмотр результатов моделирования выполнять непосредственно в программе *MTPEditor* посредством настройки путей доступа к программам *Triana* и *MTPViewer*.

На [рис. 2.1](#) приведены схема взаимодействия математического ядра ПК *TRuANA* с файловыми структурами ([рис. 2.1, а](#)) и структурная схема взаимодействия компонентов Комплекса № 1 при их совместном применении (в комплексе) /[рис. 2.1, б](#)/.

Помимо автономного режима также существует возможность запуска ПК *TRuANA* в сетевом режиме, обеспечивающем реализацию «плавающей» схемы лицензирования, при которой ограниченное число приложений ПК *TRuANA* подключаются к единому серверу лицензий.

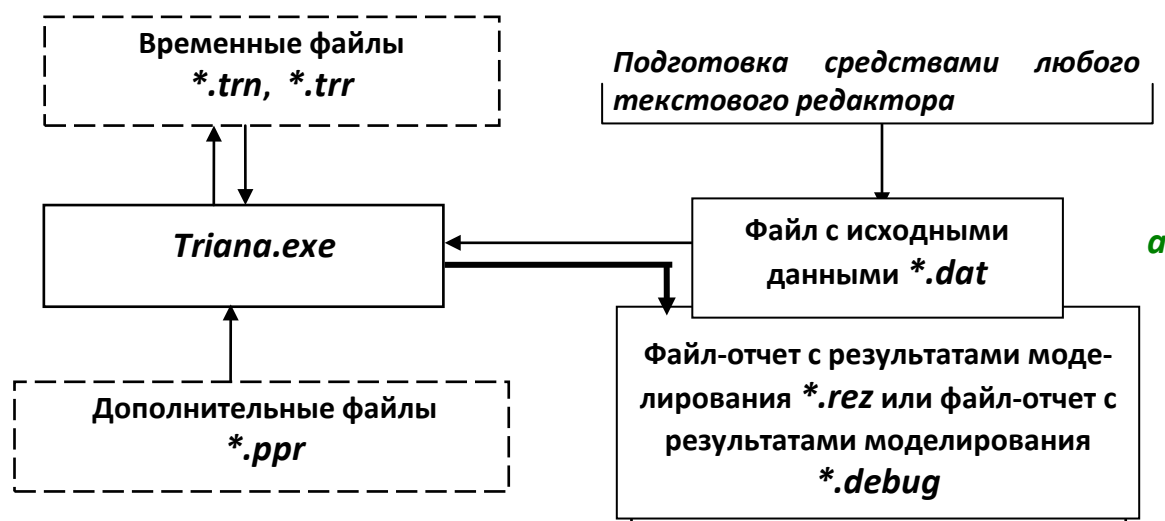


Рис. 2.1. Схема взаимодействия математического ядра с файловыми структурами – а и структурная схема Комплекса № 1 в целом – б

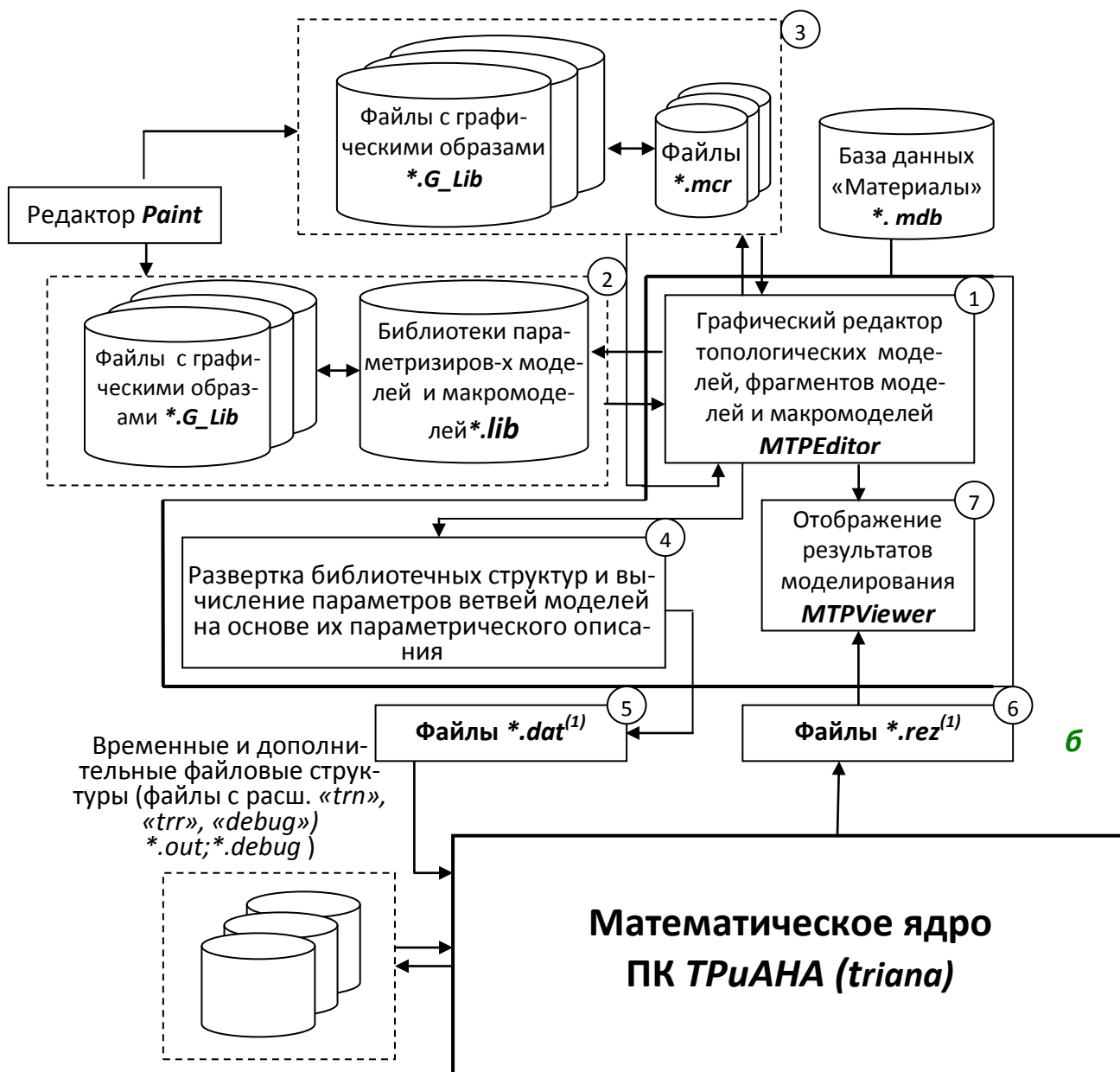




Рис. 2.1. Окончание

2.3. Описание задачи

С помощью Комплекса № 1 осуществляется моделирование стационарных и нестационарных тепловых режимов конструкций РЭА при различных условиях охлаждения путем формирования системы нелинейных (в общем случае) уравнений (для СТР) или системы обыкновенных дифференциальных уравнений (для НТР) по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам конструкции РЭА, установленным в РЭА конструктивных узлов, элементов, а также определенных конструктором граничных условий, решение систе-

| | | | |
|---|--|---|-----------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 53 |
|---|--|---|-----------|

мы уравнений и вывод результатов в удобной для дальнейшего анализа форме.

Система уравнений формируется программой на основе топологической модели, построенной пользователем.

Для решения указанной задачи используются критериальные уравнения теории подобия и уравнения теплообмена, метод узловых потенциалов для формирования математической модели тепловых процессов в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ), системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ).

Для решения СОДУ используется метод формул дифференцирования назад (ФДН), для решения СНАУ используется метод простых итераций, а для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), к которым сводятся СОДУ и СНАУ (на каждом шаге по времени и/или на каждой итерации по нелинейностям), – метод LU -разложения с символьной факторизацией и учетом разреженности матрицы тепловых проводимостей.

Под топологической моделью тепловых процессов (МТП) понимается модель, представленная в виде ненаправленного графа. Вершины (узлы) такого графа в МТП моделируют соответствующие конструктивные элементы и узлы конструкции РЭА (представляются в виде условно нагретых зон). Ветви (ребра) графа отражают в МТП тепловые потоки. Переменными узлов МТП являются расчетные значения температур (T_i), переменными ветвей будут тепловые потоки (Ψ_{ij}), а параметрами ветвей – тепловые проводимости (X_{ij}).

В общем случае при рассмотрении нестационарных тепловых процессов в МТП можно выделить два типа параметрических ветвей: 1-й тип – параметрические диссипативные ветви – ветви, для которых известны значения X_{ij} или аналитические выражения для расчета X_{ij} ; 2-й тип – параметрические консервативные ветви – ветви, для которых известны значения теплоемкостей (C_{ij}) или аналитические выражения для их расчета.

В отличие от других видов моделей топологические модели тепловых процессов позволяют в простой форме задавать граничные условия различных родов и их комбинаций по объемам и поверхностям конструкции РЭА при помощи соответствующих компонентов графа (ветвей, источников заданной температуры и (или) источников с заданной тепловой мощностью). К достоинствам топологических моделей следует отнести: возможность довольно простого перехода, в случае необходимости, к другим унифицированным видам математических моделей РЭА; возможность применения единых методов формирования и решения математических моделей, включая аппарат теории чувствительности.

Топологическую МТП РЭА можно условно разделить на фрагменты 2-х типов:

1. Фрагменты МТП отдельных конструктивных узлов и элементов РЭА, отражающие протекание в них тепловых процессов без учета условий охлаждения (граничных условий).
2. Фрагменты МТП, учитывающие условия охлаждения (граничные условия).

Фрагменты МТП первого типа отражают тепловые модели конструктивных узлов (печатные узлы, функциональные ячейки, микросборки), которые могут быть легко получены на основе конечно-разностной аппроксимации уравнения теплопроводности. При этом следует отметить, что при таком подходе возможно формирование фрагментов МТП различного уровня детализации, что позволяет применять их на различных этапах проектирования, используя иерархический подход. Применение аналитических моделей для вычисления параметров ветвей МТП позволяет вычислять их через геометрические и теплофизические параметры конструкции, что дает возможность учитывать любые особенности конструкций бортовой РЭА.

Фрагменты МТП второго типа представляют собой граничные условия 1–4 родов и их комбинации и выражаются в явном виде через геометрические и теплофизические параметры конструкции РЭА и теплофизические параметры окружающей среды.

2.4. Исходная информация для моделирования

Исходные данные для моделирования на ПЭВМ теплового режима РЭА при помощи *Комплекса № 1* подготавливаются на основе следующей информации:

- сборочный чертеж или детализовка конструкции РЭА (либо соответствующие эскизы);
- теплофизические параметры материалов, элементов конструкции РЭА и хладоносителей;
- значения тепловых мощностей, рассеиваемых элементами схемы РЭА (приводятся в карте электрических режимов работы электрорадиоэлементов принципиальной схемы анализируемой РЭА);
- параметры охлаждения конструкции (температура окружающей среды, температуры и скорости хладоносителей и т. д.);
- **построенная пользователем (разработчиком РЭА) модель тепловых процессов анализируемого объекта.**

На основе вышеперечисленной информации необходимо описать:

1. Ветви (тепловые проводимости) МТП, которые характеризуются следующим набором информации:

- номера узлов подключения ветви в МТП;
- тип ветви (см. [табл. 2.2](#));
- список и значения геометрических и теплофизических параметров, определяющих тепловую проводимость ветви (расшифровка параметров и их размерностей приведена в [табл. 2.1](#) и [2.2](#) (количество параметров для каждого типа ветви колеблется от одного до девяти)).

Для ветвей, описывающих естественную конвекцию, необходимо знать определяющий (характерный) размер и коэффициент ориентации геометрического тела, которые могут определяться по [табл. 2.1](#).

При вынужденной конвекции определяющий размер равен величине проекции на ось координат, совпадающую с направлением обдува.

Коэффициенты черноты поверхностей материалов, необходимые для описания процессов излучения, а также коэффициенты теплопроводности различных материалов (для описания процессов теплопередачи посредством кондукции) приведены в [прил. 1](#).

Некоторые параметры ветвей можно не задавать – их значение принимается по умолчанию: давление окружающего воздуха – 760 мм рт. ст.; коэффициент ориентации – 1,0; коэффициент облученности – 1,0; коэффициент смазки – 1,0 (сухой контакт).

Таблица 2.1

Определяющие размеры и значения коэффициента ориентации некоторых геометрических тел

| Геометрическое тело | Определяющий размер | Коэффициент ориентации |
|--|-----------------------------|------------------------|
| Шары, горизонтальные цилиндры | Диаметр | 1,0 |
| Вертикальные пластины и цилиндры | Высота | 1,0 |
| Горизонтальные пластины, рассеивающие тепловой поток: – вверх – вниз | Минимальный размер пластины | 1,3 0,7 |

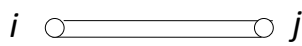
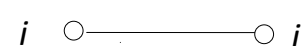
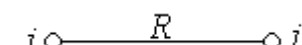
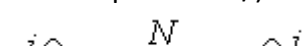
2. Источники тепловыделения в узлах модели тепловых процессов, которые моделируются включением в соответствующий узел МТП источника поточного воздействия (см. [табл. 2.2](#)). Обычно, это мощность тепловыделения в

обособленных ЭРЭ или конструктивных узлах (в печатном узле, узле радиатора, микросборке и т. п.).

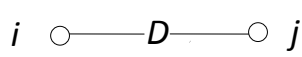
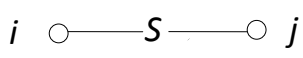
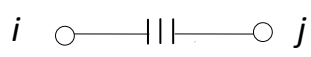

3. Источники заданной температуры в анализируемой конструкции моделируются включением в МТП источников потенциального воздействия (см. [табл. 2.2](#)). Обычно, это температура окружающего воздуха, температуры теплоотводящих элементов конструкции, температуры воздушных потоков и т. п.

Таблица 2.2





Типы и параметры ветвей, используемых при разработке тепловых моделей



| Тип ветви модели (пояснение) и обозначение | Номер параметра | Наименование параметра |
|--|------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 (ветвь с заданным тепловым сопротивлением)  | 1 | Заданное тепловое сопротивление, Вт/К |
| 2 (кондукция в декартовой системе координат)  | 1 2 3 4 | Размер, определяющий площадь сечения теплового потока, мм Размер, определяющий площадь сечения теплового потока, мм Длина пути теплового потока, мм Теплопроводность материала, Вт/м·К |
| 3 (кондукция в цилиндрической системе координат /радиальное направление/)  | 1 2 3 4 | Внешний диаметр, мм Внутренний диаметр, мм Высота цилиндра, мм Теплопроводность материала, Вт/м·К |
| 4 (кондукция в цилиндрической системе координат /нормальное направление/)  | 1 2 3 4 | Внешний диаметр, мм Внутренний диаметр, мм Высота цилиндра, мм Теплопроводность материала, Вт/м·К |

Продолжение табл. 2.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 5 (кондукция в цилиндрической системе координат (рокадное направление))  | 1 2 3 4 5 | Внешний диаметр, мм Внутренний диаметр, мм Высота цилиндра, мм Теплопроводность материала, Вт/м·К Длина пути теплового потока, град. |
| 6 (кондукция в сферической системе координат)  | 1 2 3 | Внешний диаметр, мм Внутренний диаметр, мм Теплопроводность материала, Вт/м·К |
| 9 (кондукция через 3-х или 2-х слойную структуру (декартова система координат)  | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | Толщина 1-го тела, мм Коэф-т теплопроводности 1-го тела, Вт/м·К Толщина 2-го тела, мм Коэф-т теплопроводности 2-го тела, Вт/м·К Толщина 3-го тела, мм Коэф-т теплопроводности 3-го тела, Вт/м·К Направление потока (1-попереч., 2- продол.) Длина потока (для прод-го направления) Высота рассматриваемого дискрета, мм |
| 11 (контактный теплообмен /прямоугольное пятно/)  | 1 2 3 | Длина контактного пятна, мм Ширина контактного пятна, мм Коэффициент смазки, отн.ед |

Продолжение табл. 2.2

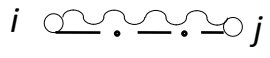
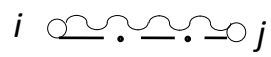
| 1 | 2 | 3 |
|--|--------------------------------------|---|
| 12 (контактный теплообмен /круглое пятно/) <i>i</i> ○  <i>j</i> | 1 2 | Диаметр контактного пятна, мм Коэффициент смазки, отн.ед. |
| 13 (контактный теплообмен /учет давления и шероховатости поверхностей/) <i>i</i> ○  <i>j</i> | 1 2 3 4 5 6 7 8 | Площадь контакта, мм кв. Коэф-т теплопроводности 1-го тела, Вт/м·К Коэф-т теплопроводности 2-го тела, Вт/м·К Коэф-т теплоп-ти межконтактной среды, Вт/м·К Наименьший модуль Юнга, Па•Е10 (по умолчанию 7.1•Е10-дюралюминий) Высота микронеровностей 1-го тела, мкм (по умолчанию 25 мкм) Высота микронеровностей 2-го тела, мкм (по умолчанию 25 мкм) Удельное давление на контакт, Па•Е5 (по умолчанию 1•Е5 Па) |
| 16 (излучение с плоской неразвитой поверхности) <i>i</i> ○  <i>j</i> | 1 2 3 4 | Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Степень черноты поверхности, отн.ед. Коэффициент облученности, отн.ед. |
| 17 (излучение между 2-мя параллельными пластинами) <i>i</i> ○  <i>j</i> | 1 2 3 4 5 6 | 1-й определяющий размер пластины (наибольший), мм 2-й определяющий размер пластины, мм Степень черноты излучающей поверхности, отн.ед. Степень черноты облучаемой поверхности, отн.ед. Расстояние между пластинами, мм Площадь дополнительных элементов, установленных на пластине, мм ² |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 59 |
|---|---|--|---|-----------|

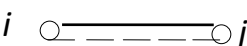
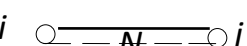

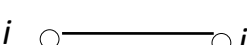
Продолжение табл. 2.2



| 1 | 2 | 3 |
|---|----------------------------------|--|
| <p>26 (естественная конвекция с неразвитой плоской поверхностью в неограниченную среду)</p> <p>$i \bigcirc \text{---} \text{---} \text{---} \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3 4 5</p> | <p>Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Определяющий размер, мм Коэффициент ориентации (см. табл. 1.3) Давление окружающей среды, мм рт. ст.</p> |
| <p>27 (естественная конвекция с неразвитой горизонтальной цилиндрической поверхности в неограниченную среду)</p> <p>$i \bigcirc \text{---} R \text{---} \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3</p> | <p>Диаметр цилиндра, мм Высота цилиндра, мм Давление окружающей среды, мм рт.ст.</p> |
| <p>28 (естественная конвекция с неразвитой вертикальной цилиндрической поверхности в неограниченную среду)</p> <p>$i \bigcirc \text{---} R \text{---} \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3</p> | <p>Диаметр цилиндра, мм Высота цилиндра, мм Давление окружающей среды, мм рт.ст.</p> |
| <p>29 (естественная конвекция с неразвитой сферической поверхности в неограниченную среду)</p> <p>$i \bigcirc \text{---} S \text{---} \bigcirc j$</p> | <p>1 2</p> | <p>Диаметр сферы, мм Давление окружающей воздуха, мм рт.ст.</p> |

Продолжение табл. 2.2


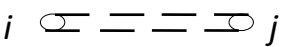
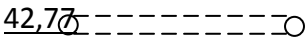
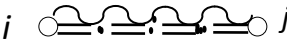
| 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|
| 36 (конвективно-кондуктивно-лучистая теплопередача с развитой поверхности /пластинчатое оребрение/)  | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | Толщина ребра, мм Шаг установки ребер, мм Высота ребра, мм Количество ребер, шт. Длина ребра, мм Теплопроводность материала, (Вт/м·К) Степень черноты поверхности, отн. ед. Давление окружающей среды, мм. рт.ст. Коэффициент ориентации (1 – ребра горизонтальные, 2 – вертикальные) |
| 37 (конвективно-кондуктивно-лучистая теплопередача с развитой поверхности /игольчато-штыревое оребрение/)  | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | Диаметр штырька, мм Шаг установки штырьков, мм Высота штырьков, мм Количество штырьков, шт. Длина оребренной поверхности, мм Теплопроводность материала, (Вт/м·К) Степень черноты поверхности, отн. ед. Давление окружающей среды, мм. рт. ст. Коэффициент ориентации (1 – штырьки горизонтальные, 2 – вертикальные) |



Продолжение табл. 2.2

| 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|---|
| 41 (конвективно-кондуктивная теплопередача через плоские воздушные прослойки)  | 1 2 3 | Длина прослойки, мм Ширина прослойки, мм Толщина прослойки, мм |
| 42 (конвективно-кондуктивная теплопередача через цилиндрические воздушные прослойки)  | 1 2 3 | Внешний диаметр, мм Внутренний диаметр, мм Высота цилиндра, мм |
| 46 (естеств-я конвекция между двумя горизонтальными плоскими неразвитыми поверхностями /верхняя горячая/)  | 1 2 3 | Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Расстояние между поверхностями, мм |
| 47 (естеств-я конвекция между двумя горизонтальными плоскими неразвитыми поверхностями /нижняя горячая/  | 1 2 3 | Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Расстояние между поверхностями, мм |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 62 |
|---|---|--|---|-----------|

Продолжение табл. 2.2

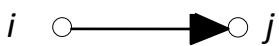
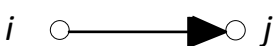

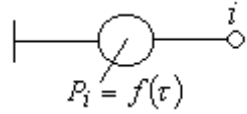
| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| 48 (естественная конвекция между двумя вертикальными плоскими неразвитыми поверхностями /воздушный канал/)  | 1 2 3 | Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Расстояние между поверхностями, мм |
| 51 (обдув неразвитой плоской поверхности)  | 1 2 3 4 5 | Длина поверхности, мм Ширина поверхности, мм Определяющий размер, мм Скорость обдува, м/с Давление окружающей среды, мм рт. ст. |
| 52 (обдув развитой плоской поверхности / пластинчатое оребрение/)  | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | Толщина ребра, мм Шаг установки ребер, мм Высота ребра, мм Количество ребер, шт. Длина ребер, мм Теплопроводность материала ребер, Вт/м·К Скорость воздуха на входе в радиатор, м/с Давление окружающей среды, мм рт. ст. Степень черноты, отн. ед. |
| 53 (обдув развитой поверхности /игольчато-штыревое оребрение/)  | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 | Диаметр штырька, мм Шаг установки штырьков, мм Высота штырька, мм Количество штырьков, шт. Длина оребренной поверхности, мм Теплопроводность материала штырьков, Вт/м·К Скорость воздуха на входе в радиатор, м/с Давление окружающей среды, мм рт. ст. Степень черноты, отн. ед. |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 63 |
|---|---|--|---|-----------|

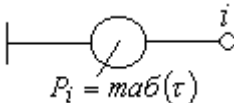
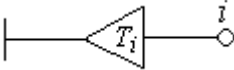
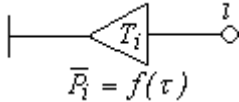
Продолжение табл. 2.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|---|
| <p>61 (конвекция в воздушный канал /канал может разбиваться на части и иметь изгиб/)</p> <p>$i \quad \bigcirc \rightleftharpoons \Rightarrow \rightleftharpoons \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3 4 5 6 7 8</p> | <p>Высота стенок канала, мм Ширина канала, мм Длина рассматриваемой части канала, мм Скорость воздушного потока, м/с Номер участка канала (сквозная нумерация) Радиус изгиба осевой линии канала, мм Площадь элементов, мм² Давление, мм рт. ст.</p> |
| <p>62 (конвекция в воздушном канале /канал образуется 2-я поверхностями или трубой/)</p> <p>$i \quad \bigcirc \rightleftharpoons \Rightarrow \rightleftharpoons \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3 4 5 6 7 8</p> | <p>Высота стенок (диаметр) канала, мм Расст. между стенками (для круглых труб =0), мм Длина рассматриваемой части канала, мм Скорость воздушного потока, м/с Номер участка канала (сквозная нумерация) Радиус изгиба осевой линии канала, мм Площадь элементов, установленных на рассматриваемом участке, мм² Давление, мм рт. ст.</p> |
| <p>65 (конвекция в водяной канал)</p> <p>$i \quad \bigcirc \rightleftharpoons \Rightarrow \rightleftharpoons \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3 4 5 6 7</p> | <p>Высота стенок (диаметр) канала, мм Расстояние между стенками (для круглых труб =0), мм Длина рассматриваемой части канала, мм Скорость воздушного потока, м/с Номер участка канала (сквозная нумерация) Радиус изгиба осевой линии канала, мм Площадь элементов, установленных на рассматриваемом участке, мм²</p> |
| <p>71 (теплоперенос в продуваемом воздушном канале)</p> <p>$i \quad \bigcirc \longrightarrow \Rightarrow \bigcirc j$</p> | <p>1 2 3 4 5</p> | <p>Ширина (диаметр) канала, мм Высота канала (для круглых труб=0), мм Скорость воздушного потока, м/с Коэффициент заполнения канала, отн. ед. Давление воздуха, мм рт. ст.</p> |

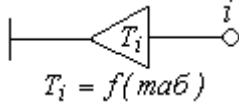
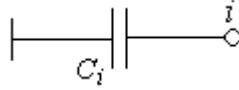
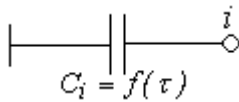
Продолжение табл. 2.2



| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| 72 (теплоперенос внутри перфорированного блока)  | 1 2 3 | Размер, определяющий сечение или диаметр канала, мм Размер, определяющий сечение канала (для круглых труб=0), мм Давление воздуха, мм рт. ст. |
| 75 (теплоперенос в прокачиваемом водяном канале)  | 1 2 3 4 | Ширина (диаметр) канала, мм Высота канала (для круглых труб=0), мм Скорость водяного потока, м/с Коэффициент заполнения канала, отн. ед. |
| 101 (источник постоянной мощности)  | 1 | Значение мощности, Вт |
| 102 (источник мощности, зависящий от времени /зависимость задана в виде функции/)  | (Функция № 1: параметры 1–5; функция № 2: параметры 6–8) 1 2 3 4 5 6 7 8 | Тип функции, которой задана мощность тепловыделения: 1 – последовательность прямоугольных импульсов; 2 – гармоническая функция (sin) Остальные параметры в зависимости от типа функции: Амплитуда импульсов, Вт Длительность импульсов, с Частота повторения импульсов, Гц Начальная задержка импульсов, с Величина мощности вне импульса, Вт Амплитуда гармоника, Вт Частота гармоника, Гц Начальная фаза, рад. |

Продолжение табл. 2.2

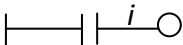
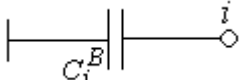
| 1 | 2 | 3 |
|---|---|--|
| 103 (источник мощности, зависящий от времени /зависимость задана в виде таблицы/)  | — | См. параграф 2.7.3 |
| 111 (источник постоянной температуры)  | 1 | Значение температуры, $^{\circ}C$ |
| 112 (источник температуры, зависящий от времени /зависимость задана в виде функции/)  | (Функция № 1: параметры 1–5; функция № 2: параметры 6–8) 1 2 3 4 5 6 7 8 | Тип функции, которой задана температура: 1 – последовательность прямоугольных импульсов 2 – гармоническая функция (sin) остальные параметры в зависимости от типа функции: Амплитуда импульсов, $^{\circ}C$ Длительность импульсов, с Частота повторения импульсов, Гц Начальная задержка импульсов, с Величина темп-ры вне импульса, $^{\circ}C$ Амплитуда гармоника, $^{\circ}C$ Частота гармоника, Гц Начальная фаза, рад. |

Продолжение табл. 2.2

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| 113 (источник температуры, зависящий от времени /зависимость задана в виде таблицы/)  $T_i = f(\text{таб})$ | — | См. параграф 2.7.3 |
| 121 (постоянная теплоемкость)  C_i | 1 | Значение теплоемкости, Дж/К |
| 122 (теплоемкость, зависящая от времени /зависимость задается в виде функции /)  $C_i = f(\tau)$ | (Функция № 1: параметры 1–5; функция № 2: параметры 6–8) 1 2 3 4 5 6 7 8 | Тип функции, которой задана теплоемкость: 1 – последовательность прямоугольных импульсов 2 – гармоническая функция (sin) остальные параметры в зависимости от типа функции: 1 Амплитуда импульсов, Дж/к 2 Длительность импульсов, с 3 Частота повторения импульсов, Гц 4 Начальная задержка импульсов, с 5 Величина теплоемкости вне импульса, Дж/К 6 Амплитуда гармоника, Дж/К 7 Частота гармоника, Гц 8 Начальная фаза, рад. |

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 67 |
|---|---|--|---|-----------|

Окончание табл. 2.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|-----------------------|---|
| 123 (теплоемкость, зависящая от времени /зависимость задается табл./)  $C_i = f(\tau)$ | — | См. параграф 2.7.3 |
| 124 (вычисляемая теплоемкость)  C_i^B | 1 2 3 4 5 | } Размеры (в мм), определяющие объем выделенного дискрета } Плотность материала дискретизации, кг/ m^3 Удельная теплоемкость, Дж/(кг*К) |

2.5. Выходная информация

В результате анализа модели тепловых процессов программой создается файл-отчет, включающий в себя: интегральное описание МТП (ветви, источники воздействий и т. п.); **таблицу температур узлов МТП (для СТР) или таблицу температур узлов МТП для каждого момента времени (для НТР).**

2.6. Методика построения моделей тепловых процессов

2.6.1. Основные принципы иерархического моделирования тепловых процессов в РЭА

При исследовании тепловых режимов РЭА методами математического моделирования на ПЭВМ применяется иерархический подход, который адекватен блочно-иерархическому методу проектирования РЭА. Иерархический подход позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью исследовать температурные поля сложных объектов РЭА.

В основе иерархического подхода лежит принцип местного влияния [4], который в общей форме можно сформулировать следующим образом: **любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на отдельные участки поля.** С учетом данного принципа можно с меньшей степенью детализации описывать тепловые процессы в удаленных от интересующего участка областях исследуемого объекта.

Применение иерархического подхода к исследованию тепловых полей в РЭА предусматривает выполнение следующих процедур:

1. Сложные пространственные распределения источников теплоты заменяются более простыми (упрощаются формы реальных исследуемых областей с сохранением некоторых интегральных характеристик /площадей, объемов, периметров, некоторых определяющих размеров/).

2. Составные объекты (подсистемы) с неоднородной структурой заменяются квазиоднородными областями с эффективными теплофизическими свойствами.

3. Пространственные распределения величин, описывающих теплообмен на границах областей (температур окружающих тел и теплоносителей, коэффициентов теплоотдачи, тепловых потоков), заменяются их средними значениями.

Для практического использования иерархического подхода разработчику РЭА требуется уметь проводить построения приближенных тепловых моделей (макромоделей), описывающих тепловой режим исследуемых объектов с требуемой степенью детализации. Кроме этого, разработчик должен уметь выделять определенные части всего объекта для составления модели, пригодной для последующего более детального анализа тепловых процессов.

В общей теории систем описанные выше операции носят название **агрегирования** (выполняется укрупнение исходной модели) и **декомпозиции** (составление модели для более детального анализа).



Выполнение операций агрегирования и декомпозиции тесно связаны с иерархией конструктивного построения РЭА.

2.6.2. Иерархия конструктивного построения РЭА

Конструктивное построение РЭА может быть представлено в виде схемы, изображенной на [рис. 2.2](#). Представленная схема изображает в общем случае иерархию конструктивного построения бортовых РЭА, которая характерна для этапа теплового проектирования. Показанный на схеме **0-й** уровень иерархии отражает совокупность ЭРЭ, информация о тепловых режимах которых должна быть получена в итоге теплового анализа. *Именно эта информация необходима для детальной проработки проекта на основе комплексных автоматизированных расчетов.*

В общем случае на нулевом уровне иерархии находятся пленочные и навесные элементы (ПЭ, НЭ), входящие в состав микросборок (МСБ). Множество «Корпусированные элементы» образуют ЭРЭ, традиционно устанавливаемые на печатные платы и функциональные ячейки. Это индуктивные элементы малой и средней мощности, реле, устройства функциональной электроники и т. д.

1-й уровень иерархии составляют изделия микроэлектроники – микросборки, для которых, в случае их разработки в рамках создаваемого РЭА, выполняется процедура теплового проектирования. Если же в проектируемой РЭА применяются ранее разработанные МСБ, для которых существуют технические

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 69 |
|---|---|--|---|-----------|

условия (ТУ), то для них не выполняется процедура теплового проектирования, и их в этом случае можно отнести к **0-му** уровню иерархии. При этом в процессе теплового проектирования на таких элементах обеспечивается необходимая температура, исходя из требований ТУ и ряда других ограничений (безотказности, стабильности, электрических характеристик и т. д.) по аналогии с ЭРЭ 0-го уровня иерархии. К первому уровню иерархии можно также отнести гибридно-интегральные модули (ГИМ), на базе которых реализуются, например, стабилизаторы напряжения. В общем случае ГИМ могут входить в состав функциональных ячеек. В ряде случаев ГИМ могут быть отнесены к более высокому уровню иерархии. Такой подход может реализовываться при вновь создаваемых конструкциях ГИМ.

2-й уровень иерархии образуют конструктивные узлы, представляющие собой типовые базовые конструктивы: ФЯ – функциональные ячейки, УР – узлы радиаторов, ПУ – печатные узлы.

3-й уровень иерархии образуют блоки с регулярной внутренней компоновочной структурой (блоки кассетной, этажерочной конструкций). В ряде случаев в РЭА могут также применяться блоки нетипового конструктивного исполнения ([рис. 1.3, з](#)), которые не имеют регулярной структуры. В некоторых случаях, конструктивные узлы 2-го уровня иерархии могут устанавливаться непосредственно в стоечную конструкцию ([рис. 1.3, а](#)). В последнем случае стоечная конструкция рассматривается на 3-м уровне иерархии.

Представленная на [рис. 2.2](#) схема не является достаточно корректной с позиций вопросов иерархического построения несущих конструкций РЭА (хотя и совпадает по основным уровням разукрупнения с иерархией несущих конструкций некоторой бортовой аппаратуры), но по своей структуре позволяет отразить этапы (на схеме – соответственно уровни иерархии) теплового анализа, которые могут выполняться как по нисходящему, так и по восходящему алгоритмам. При этом обозначения элементов схемы следует рассматривать как обобщенные понятия, характеризующие некоторые множества соответствующих моделей тепловых процессов, на основе которых проводится тепловое проектирование. Ввиду того, что в дальнейшем будем использовать термины, приводимые в схеме, дадим некоторым из них определения.

«Микросборка» – изделие микроэлектроники частного применения типа гибридной интегральной схемы, выполняющее определенную функцию и состоящее из различных навесных и пленочных элементов, различных компонентов и интегральных микросхем (корпусированных и бескорпусных), размещенных на любой поверхности плоской подложки. МСБ могут иметь собственный корпус (корпусированные МСБ) или устанавливаться в конструкциях РЭА (как правило, в ФЯ и ГИМ – см. [рис. 2.3](#)), в ряде случаев – на ПУ – см. [рис. 2.4](#)) путем

непосредственного крепления при помощи клея или пайки подложки к месту установки (бескорпусные МСБ).

«Гибридно-интегральный модуль» – базовая конструкция микроэлектронной аппаратуры, представляющая собой корпус из алюминиевого сплава, полученный путем фрезерования или литья. На внутренних поверхностях корпуса при помощи клея или пайки крепятся бескорпусные МСБ, печатные платы, микрокорпусные и корпусные ЭРЭ. Пример конструкции ГИМ приведен на [рис. 2.3](#).



Рис. 2.2. Иерархия конструктивного построения бортовой РЭА с точки зрения теплового проектирования

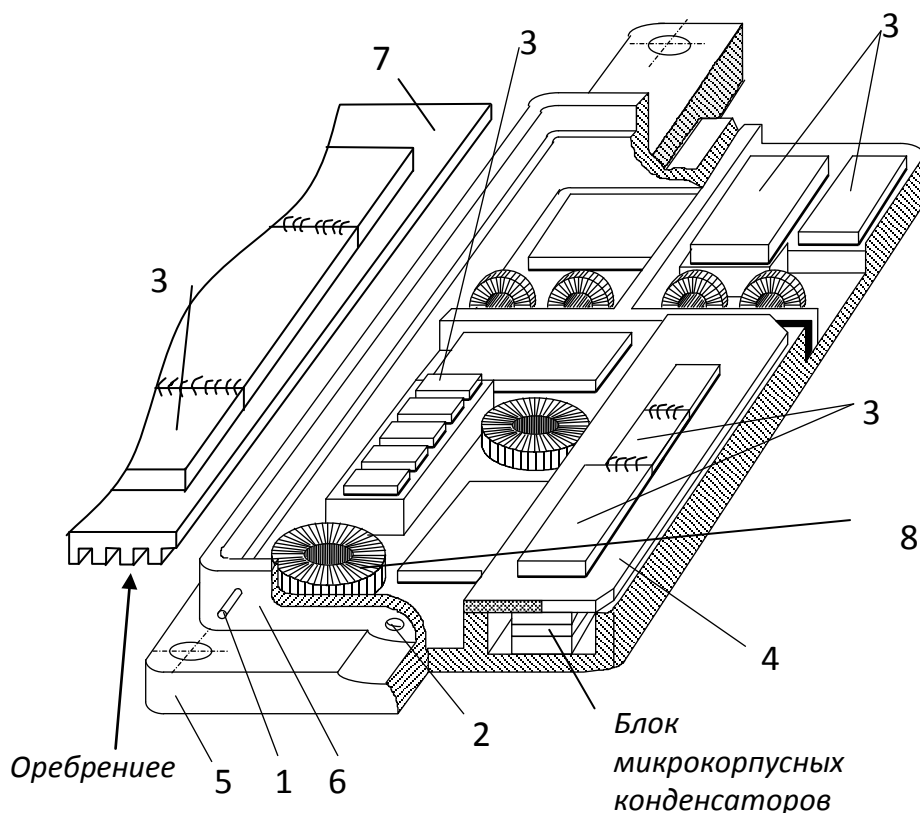
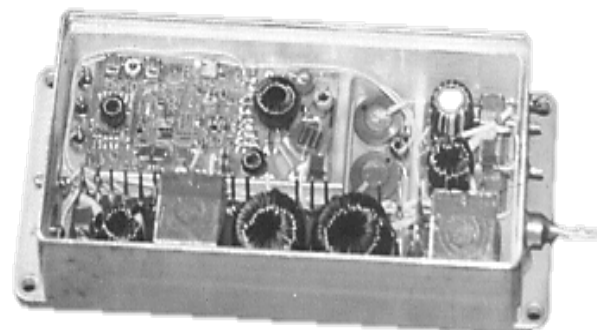


Рис. 2.3. Пример конструкции гибридно-интегрального модуля:

1 – трубка для откачки воздуха; 2 – отверстие для трубки-штангеля; 3 – бескорпусная микросборка; 4 – печатный узел; 5 – основание корпуса; 6 – обечайка; 7 – крышка; 8 – трансформатор

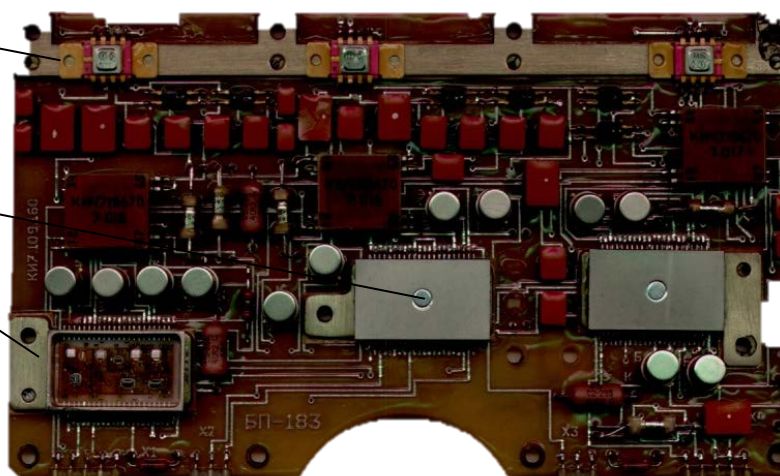


«Печатный узел» – печатная плата с размещенными на ее одной или обеих поверхностях элементами, интегральными микросхемами, микросборками и т. д. ([рис. 2.4](#)). Печатная плата имеет, как правило, 3, 6 и более слоев.

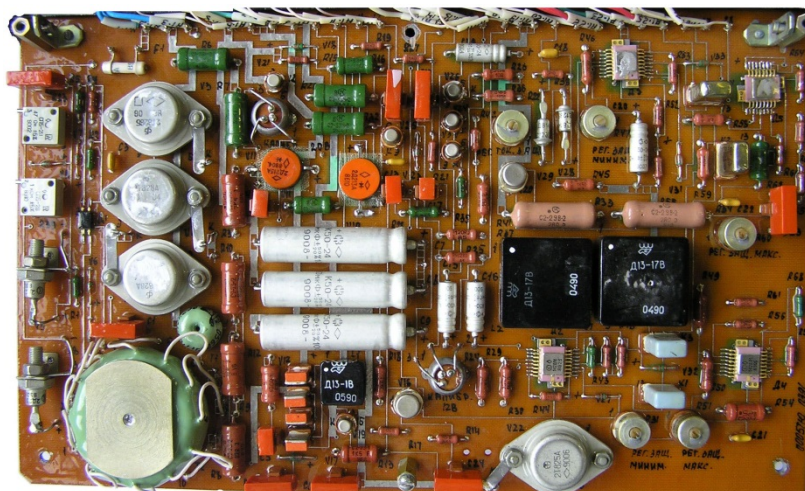
«Функциональная ячейка» (ФЯ) – базовый конструктив бортовой РЭА, представляющий собой, как правило, прямоугольное плоское металлическое основание с размещенными на нем элементами (микросборками корпусированными и бескорпусными, интегральными схемами и прочими ЭРЭ – см. [рис. 2.5](#)).

Тепловая шина

Микросборки



a



б

Рис. 2.4. Примеры конструкций печатных узлов

В большинстве случаев основание устанавливается в рамку, играющую, как правило, роль теплостока. Элементы могут располагаться на любой стороне основания. Коммутация между элементами осуществляется с помощью гибких печатных плат (ГПП). В некоторых случаях в ГПП делают вырезы в местах установки мощных элементов ([рис. 2.5, а](#)). ГПП приклеиваются к основанию ФЯ. В ряде случаев используются сплошные ГПП без вырезов ([рис. 2.5, б](#)), тогда элементы приклеиваются и (или) припаиваются непосредственно к ГПП. Основание может устанавливаться в рамку ([рис. 2.5, в](#)) или иметь специальный теплосток для отвода тепловой энергии ([рис. 2.5, г](#)), ФЯ также может крепиться в РЭА стоечной конструкции путем точечного крепления рамки к элементам конструкции ([рис. 2.6, 2.7](#)). Функциональные ячейки устанавливаются в блоки различной конструкции, как правило, с использованием кондуктивных теплоотводов (теплосток), как это показано на [рис. 4.35](#).

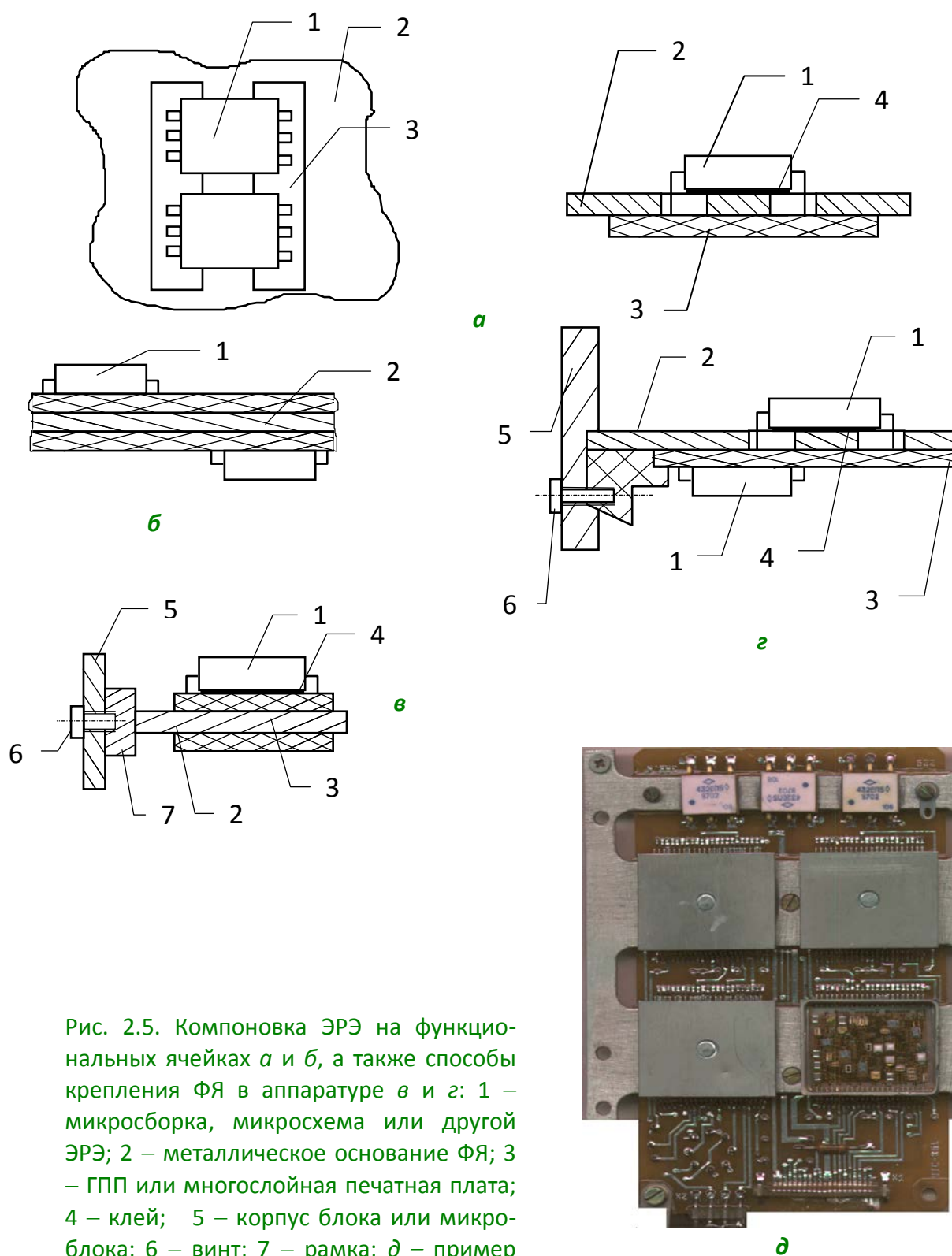


Рис. 2.5. Компоновка ЭРЭ на функциональных ячейках *а* и *б*, а также способы крепления ФЯ в аппаратуре *в* и *г*: 1 – микросборка, микросхема или другой ЭРЭ; 2 – металлическое основание ФЯ; 3 – ГПП или многослойная печатная плата; 4 – клей; 5 – корпус блока или микроблока; 6 – винт; 7 – рамка; *д* – пример конструкции ФЯ

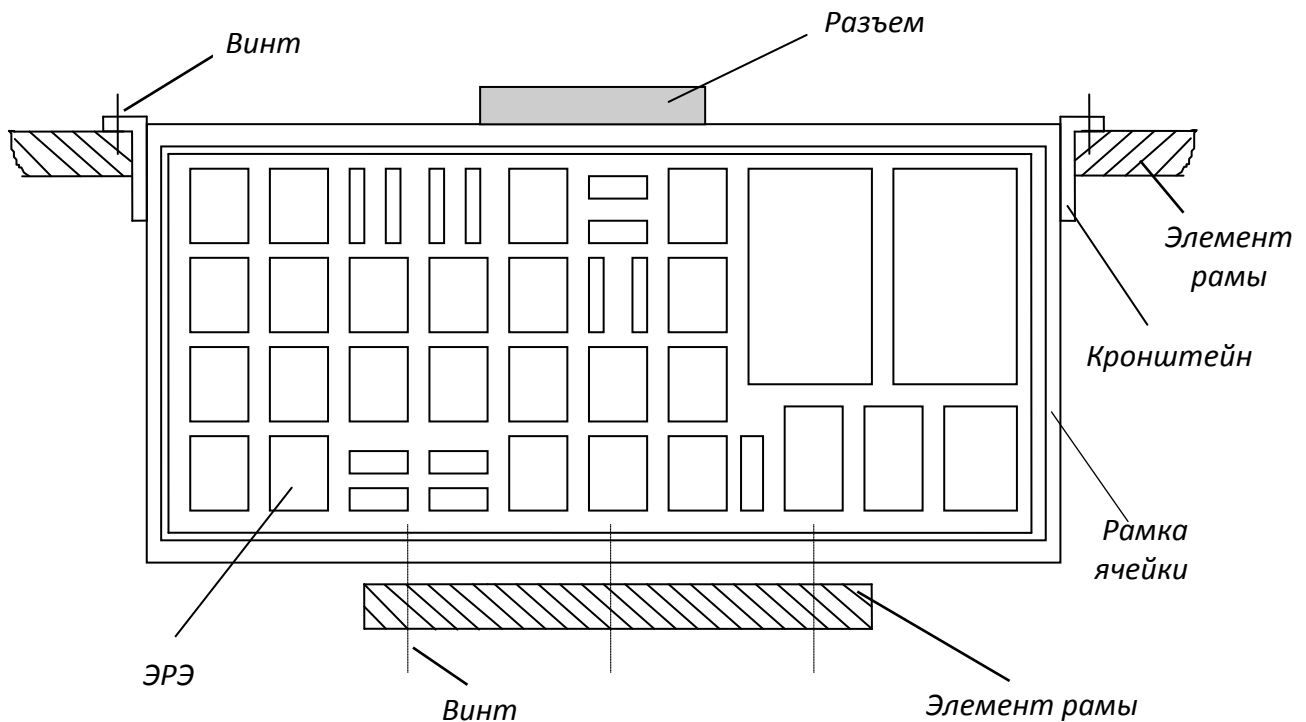


Рис. 2.6. Вариант крепления ФЯ в конструкции РЭА более высокого уровня иерархии

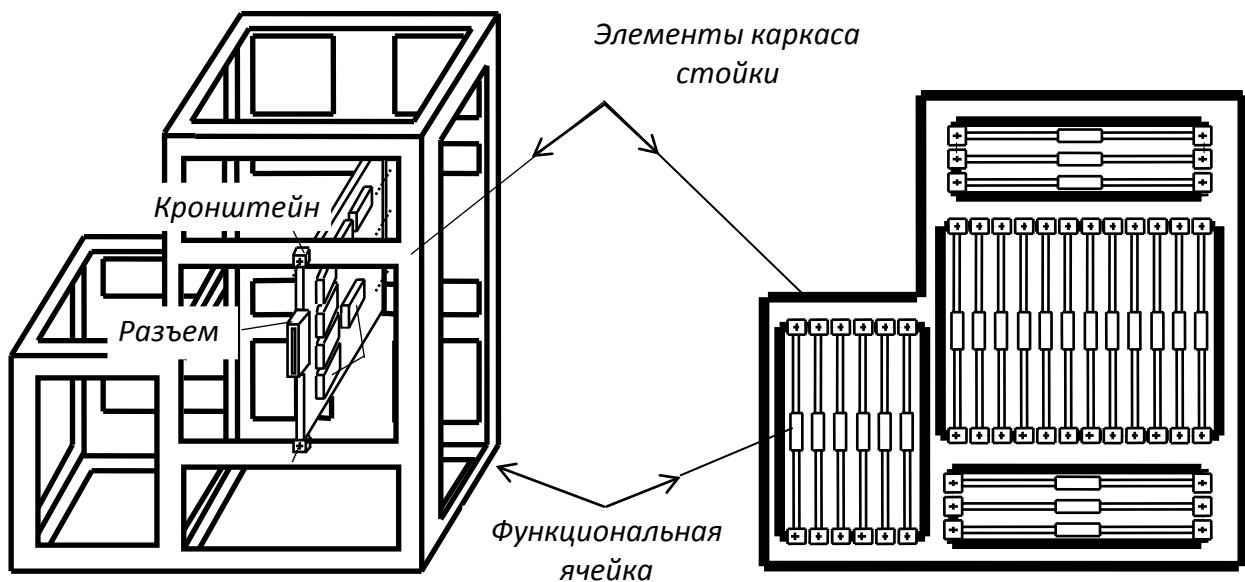




Рис. 2.7. Пример способа установки ячеек в стоечную конструкцию РЭА космического аппарата

| | | | |
|---|--|---|-----------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 76 |
|---|--|---|-----------|

2.6.3. Алгоритмы иерархического анализа тепловых характеристик РЭА

При иерархическом подходе к тепловому проектированию РЭА используется как нисходящий, так и восходящий алгоритмы моделирования тепловых процессов. При рассмотрении данных алгоритмов для простоты будем использовать следующую иерархию структурообразования РЭА: «Блок» (3) → «Конструктивные узлы» (2) → «Микросборки» (1) → «Элементная база» (0).

Нисходящее иерархическое моделирование тепловых процессов в РЭА

Блок-схема алгоритма нисходящего иерархического моделирования тепловых процессов в бортовой РЭА приведена на [рис. 2.9](#). Там же показана информация, получаемая в результате моделирования и передаваемая с одного иерархического уровня на другой. Эта информация, по существу, является граничными условиями теплообмена при моделировании тепловых процессов в каждом элементе нижестоящего иерархического уровня конструктивного структурообразования РЭА (см. [рис. 2.2](#)).

Рассмотрим кратко блоки представленного алгоритма.

Блок 1. В данном блоке путем моделирования тепловых процессов в блоке (применяется модель с сосредоточенными параметрами /макромодель/) определяются следующие интегральные показатели теплового режима: температуры и скорости воздушных потоков между конструктивными узлами в блоке; интегральные температуры конструктивных узлов и обособленных ЭРЭ, установленных в блоке; температура корпуса (или каждой стенки корпуса).

Блок 2. На основе полученных в блоке 1 интегральных показателей, а также набора других данных в данном блоке проводится моделирование тепловых процессов (с использованием моделей с распределенными параметрами) в конструктивных узлах, входящих в состав блока РЭА (печатные узлы или функциональные ячейки). На этом этапе алгоритма определяются температуры активных зон корпусированных ЭРЭ, установленных на КУ, и температуры корпусов размещенных на КУ микросборок /для корпусных микросборок/ или температуры несущих конструкций КУ в местах установки микросборок /для бескорпусных микросборок/. Информация, касающаяся микросборок, передается в качестве исходной в блок № 3 алгоритма.

Блок 3. Путем моделирования тепловых процессов в микросборках (при этом применяются модели с распределенными параметрами) определяются температуры активных зон размещенных в них навесных и пленочных элементов.

Таким образом, разработчик РЭА в **блоках 2 и 3** представленного выше алгоритма получает исчерпывающую информацию относительно теплового режима элементной базы (элементы **0-го** уровня иерархии) исследуемого блока.

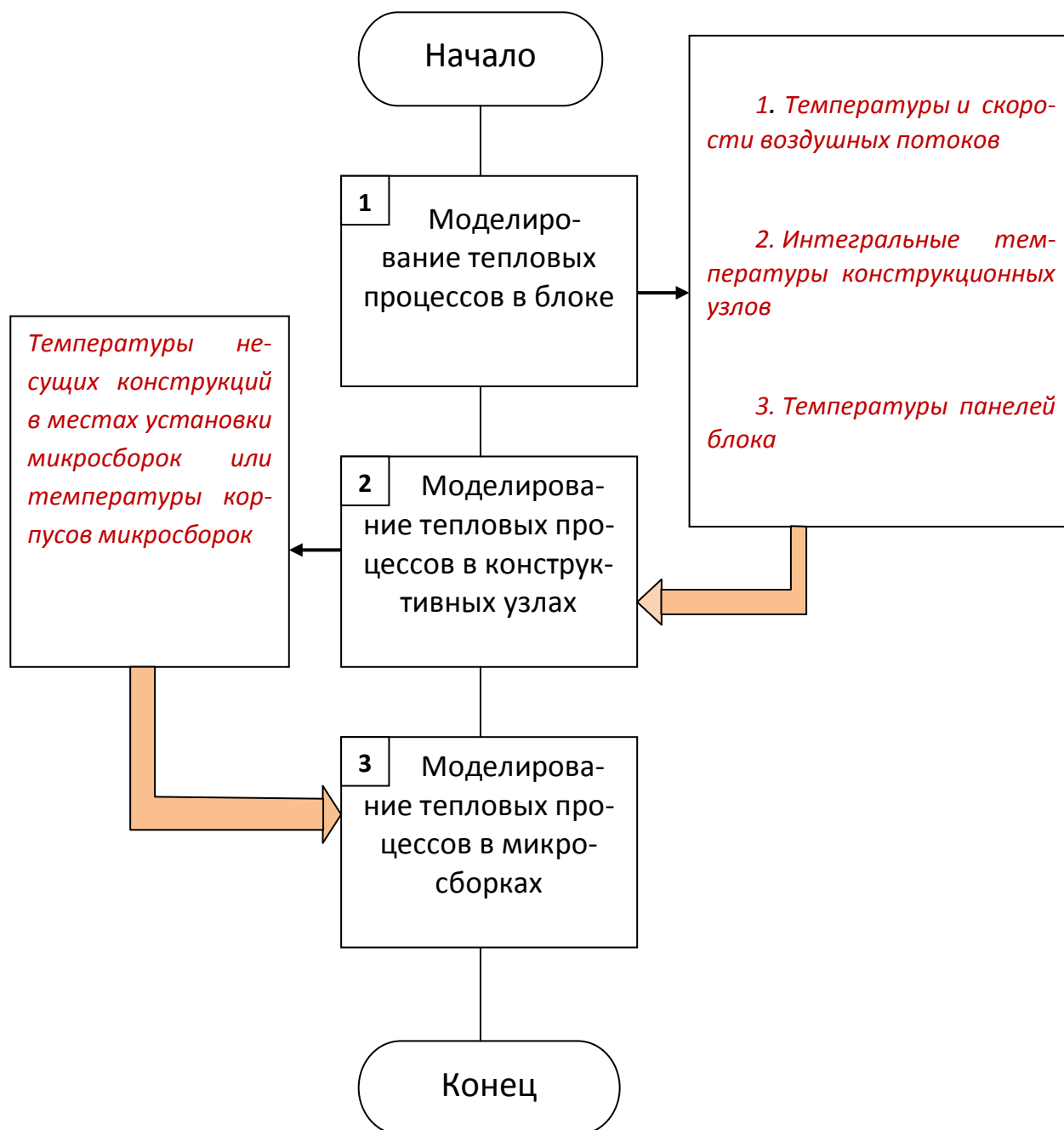


Рис 2.9. Укрупненный алгоритм нисходящего иерархического моделирования тепловых процессов в бортовой РЭА

Восходящее иерархическое моделирование тепловых процессов в РЭА

Алгоритм восходящего иерархического моделирования тепловых процессов представлен на [рис. 2.10](#). Там же приведены краткий перечень и направления передачи информации между различными иерархическими уровнями.



Рис. 2.10. Укрупненный алгоритм восходящего иерархического моделирования тепловых процессов в бортовой РЭА

Согласно представленному алгоритму на первом этапе (**блок 1**) проводится моделирование тепловых процессов в микросборках, входящих в состав проектируемого блока. При этом определяются перегревы элементов МСБ относительно ее корпуса и максимально допустимая температура корпуса МСБ при эксплуатации ее в составе блока. При необходимости на основе анализа полученных результатов принимаются меры по обеспечению теплового режима элементов МСБ (применение других материалов подложки, клея, припоя,

способа установки критичных элементов в МСБ и т. п.). На этом этапе фактически проводится свертка векторного показателя теплового режима МСБ (вектор температур элементов МСБ в определенном режиме ее функционирования в составе изделия) к скалярному показателю – предельно допустимой температуре корпуса МСБ, которая не должна быть превышена при любом режиме функционирования проектируемого РЭА. В дальнейшем каждая микросборка может рассматриваться как элемент РЭА, для которого известна предельно допустимая температура корпуса.

Целью следующего этапа моделирования (**блок 2**) является определение предельно допустимого интегрального показателя теплового режима для каждого конструктивного узла (ПУ, ФЯ), входящего в состав РЭА. *В качестве такого показателя рассматривается максимально допустимая среднеповерхностная температура КУ, которая определяется как максимальное значение интеграла по поверхности температурного поля КУ.*

С учетом дискретности картины температурного поля КУ и справедливости допущения об изотермичности корпусов элементов, установленных на КУ, предельно допустимая интегральная температура КУ может быть определена следующим образом (на основе сеточной модели КУ) /см. [гл. 3](#)/:

$$T_{\max}(КУ) = \max \left(\frac{S_1 + S_2}{S_3 + S_4} \right),$$

при условии: $T_{\min}(A) < T(A) < T_{\max}(A)$, $i=(1, n)$,
 $T_{\min}(ЯЧ) < T(ЯЧ) < T_{\max}(ЯЧ)$, $i=(1, m)$,

т. е. как предельное значение средневзвешенной по поверхности КУ температуры с учетом локальных возмущений температурного поля КУ отдельными элементами. При этом:

$S_1 = \sum(T(K) \cdot S(K))$, /по всем ЭРЭ/;



$S_2 = \sum(T(ЯЧ) \cdot S(ЯЧ))$, /по всем ячейкам (дискретам) КУ/;

$S_3 = \sum(T(K) \cdot S(K))$, /по всем ЭРЭ/;

$S_4 = \sum(T(ЯЧ) \cdot S(ЯЧ))$, /по всем ячейкам КУ/;

$T(K)$, $S(K)$ – температура и площадь поверхности корпуса i -го элемента; $T(ЯЧ)$, $S(ЯЧ)$ – температура и площадь поверхности i -й элементарной ячейки КУ (в сеточной модели); $T(A)$ – температура активной зоны i -го элемента; n – количество элементов, установленных на КУ; m – количество элементарных ячеек КУ (модели КУ).

Таким образом, на данном этапе проводится свертка векторного показателя теплового режима КУ (вектор температур всех установленных на нем элементов в определенном режиме функционирования КУ в составе прибора) к интегральному скалярному показателю $T(КУ)$ и назначение его предельно допустимого значения $T_{\max}(КУ)$. Определение $T_{\max}(КУ)$ может проводиться на ос-

| | | | |
|---|--|---|-----------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 80 |
|---|--|---|-----------|

нове детального моделирования тепловых процессов в КУ в пространстве возможных параметров внешних условий эксплуатации с учетом максимально допустимой температуры каждого элемента (в том числе максимально допустимых температур корпусов МСБ, определенных на предыдущем этапе алгоритма).

Проведя таким образом моделирование тепловых процессов в конструктивных узлах, разработчик получает значения $T(KY)$ для каждого из них. Эти данные передаются на следующий этап алгоритма (**блок 3** на [рис. 2.10](#)), где проводится моделирование тепловых процессов в блоке РЭА. **Моделирование проводится методом многовариантного анализа, на основе которого определяются параметры системы охлаждения блока (температура и скорость воздуха, температура термостатирующих оснований и т. п.), а также может быть проведена перекомпоновка блока.** Конечной целью данного этапа алгоритма является обеспечение условия $T(KY) < T_{max}(KY)$ для каждого конструктивного узла, входящего в состав блока. Как только это условие станет справедливым, можно утверждать, что для данной конструкции блока (прибора) и выбранных параметров системы охлаждения обеспечен нормальный тепловой режим всех элементов.



Поскольку при выборе параметров системы охлаждения и перекомпоновке блока разработчик может принять решение об обеспечении теплового режима с некоторым запасом $T(KY) < k \cdot T_{max}(KY)$, ($0 < k < 1$), в таких случаях часто бывает необходимо по окончании восходящего моделирования провести нисходящий иерархический анализ тепловых процессов в блоке с целью определения реальных тепловых режимов элементной и конструктивной базы проектируемого РЭА в выбранных условиях эксплуатации с учетом всех введенных изменений.

2.6.4. Методика построения топологических МТП

Из определения МТП, данного в [параграфе 2.3](#), видно, что тепловая модель есть идеализированная схема путей распространения в конструкции РЭА тепловых потоков.

В зависимости от степени идеализации процессов теплообмена структура модели может меняться, т. е. может существовать множество вариантов тепловых моделей для одной и той же конструкции. Выбор того или иного варианта модели определяется степенью идеализации тепловых процессов в анализируемой конструкции, которая, в свою очередь, зависит от требуемой точности моделирования. На этапе идеализации конструкции закладывается основная погрешность моделирования картины температурного поля РЭА.

Процесс разработки тепловой модели можно разделить на несколько этапов:

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 81 |
|---|---|--|---|-----------|

1-й этап. Идеализация конструкции.

На данном этапе конструкцию РЭА разбивают на условно изотермичные объемы (условно однородные тела с определенной среднеобъемной или среднеповерхностной температурой), а также пренебрегают определенными видами теплообмена (например исключают из рассмотрения тепловое излучение и конвекцию с торцевых поверхностей печатных плат, пренебрегают передачей тепла через некоторые элементы крепления, например, передачей тепла через пластмассовые направляющие и т. п., исключают из рассмотрения, как мало-значашие, некоторые виды теплоотдачи, например, конвективную передачу тепла внутри герметичной микросборки и т. п.). В качестве условно изотермичных объемов в РЭА можно рассматривать обособленные ЭРЭ (трансформаторы питания, дроссели, конденсаторы фильтров и т. п.), конструктивные элементы (панели корпуса, корпус блока, элементы крепления и т. п.), конструктивные узлы (печатные узлы, узлы радиаторов, функциональные ячейки, микросборки и т. п.), воздушные потоки и объемы, окружающую среду, микроблоки и блоки и т. д. Разбиение анализируемого объекта РЭА на условно нагретые зоны зависит от конструктивных особенностей и условий охлаждения объекта, а также от требуемой точности моделирования, от принятых допущений и т. п.

2-й этап. Выделенным условно изотермичным объемам ставят в соответствие узлы (вершины графа), используя принципы сквозной нумерации для вершин графа. Чем больше количество изотермичных объемов, тем точнее будут моделироваться истинные значения температур в объекте, но с другой стороны, будет увеличиваться размерность модели и время ее анализа на ЭВМ.

3-й этап. Узлы (вершины) графа соединяют между собой ветвями (ребрами), моделирующими соответствующие виды теплообмена (см. [табл. 2.2](#)) между выделенными объемами (вершинами графа). Если в выделенном объеме рассеивается тепловая энергия, то в соответствующую вершину графа подключается источник тепловой мощности (см. [табл. 2.2](#)). Если для выделенного объема известна его температура, то в соответствующую вершину графа подключается источник заданной температуры (см. [табл. 2.2](#)).

Таким образом, по окончании 3-х этапов разработчик получает граф топологической МТП анализируемого объекта. Рассмотрим примеры построения МТП некоторых конструкций РЭА.

2.6.5. Особенности моделирования в различных системах координат

В прямоугольной системе координат (СК) изотермичный объем представляет собой прямоугольный объем, свойства которого сосредоточены в его центре. В цилиндрической СК изотермичный объем ПП круглого тела будет представлять собой круглый пустотелый цилиндр (кольцо) с размерами D_{max} ,

D_{\min} , толщиной z , свойства которого будут сосредоточены в окружности диаметром

$$D = (D_{\min} + D_{\max})/2, \quad (2.1)$$

т. е. «узел» МТП будет представлять собой окружность данного диаметра.

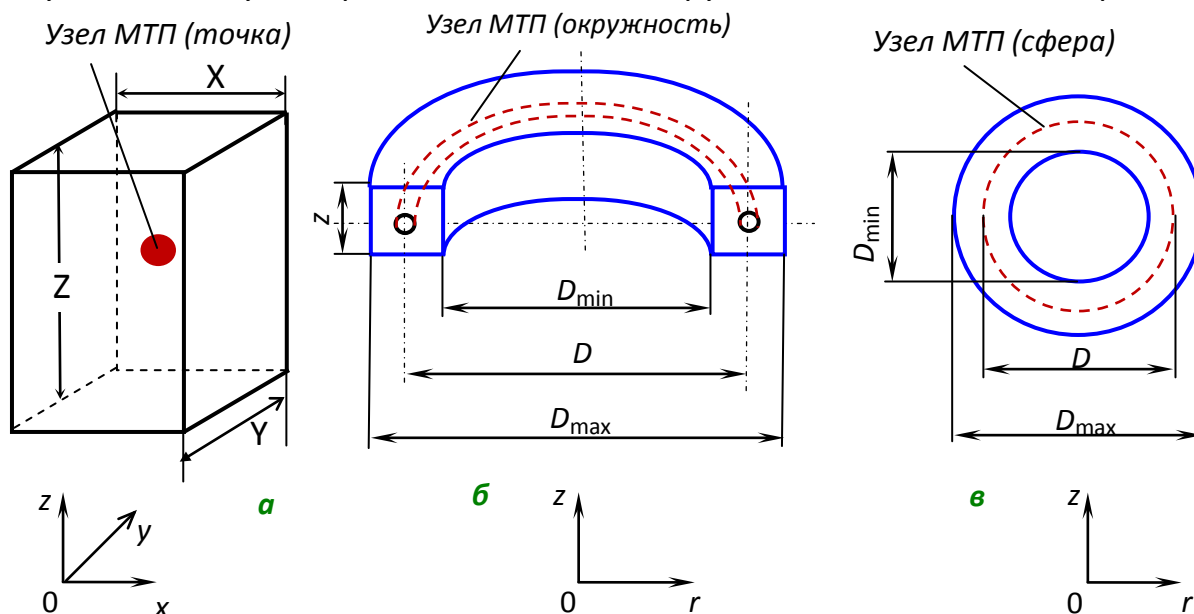


Рис. 2.11. Формы представления изотермических объемов и узлов МТП: а – в прямоугольной СК; б – цилиндрической СК; в – в сферической СК

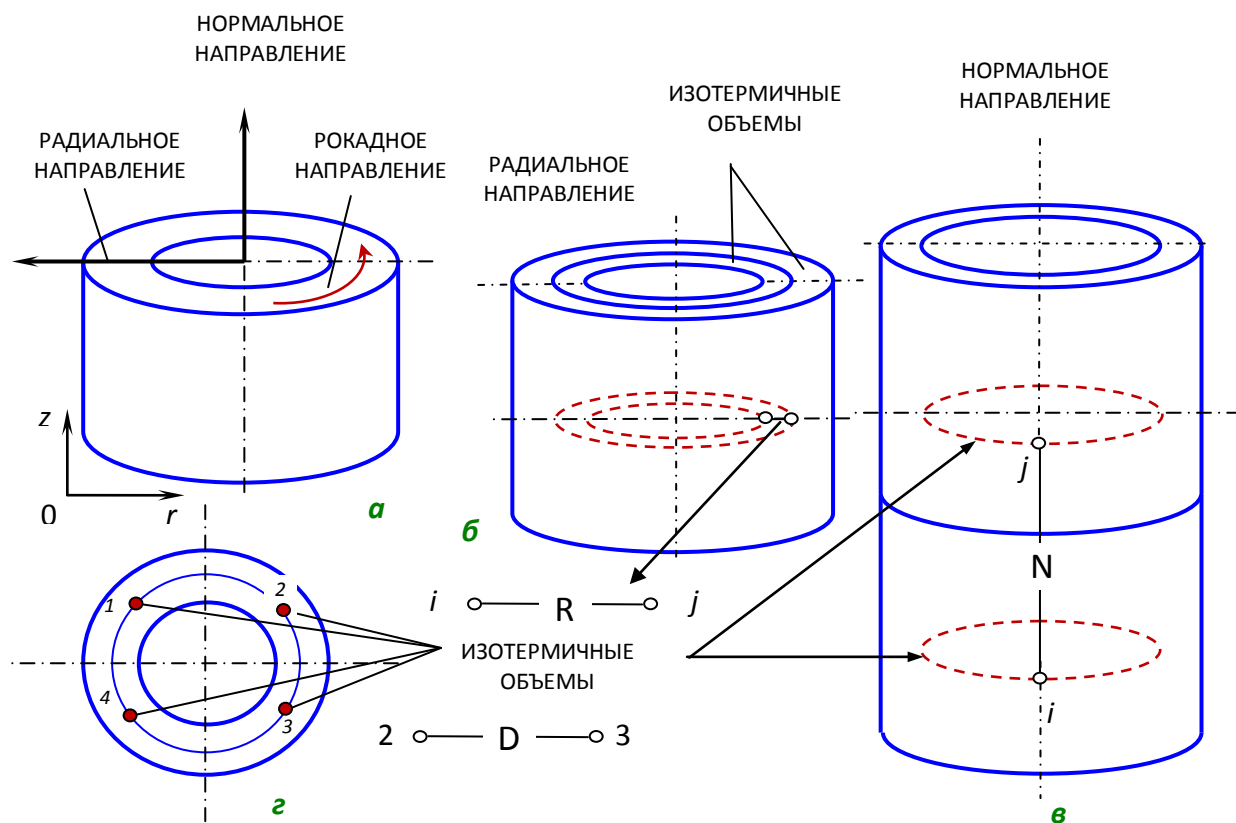


Рис. 2.12. Кондукция в цилиндрической системе координат: а – виды направлений; б – МТП для радиального направления; в – МТП для нормального направления; г – МТП для рокадного направления

В сферической СК изотермичный объем ПП круглого тела будет представлять собой круглый пустотелый шар. Свойства его будут сосредоточены в сфере с диаметром, определяемым по формуле.

Таблица 2.2

Формы представления для МТП в различных СК

| Объект | Прямоугольная СК | Цилиндрическая СК | Сферическая СК |
|------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------|
| Форма моделируемых тел | Прямоугольный параллелепипед | Полый цилиндр | Полый шар |
| Форма изометрического объема | Прямоугольный объем | Полый цилиндр | Полый шар |
| Место сосредоточения свойств | Точка | Окружность | Сфера |

В качестве примеров ниже будут рассмотрены процессы формирования графов топологических моделей следующих конструкций РЭА и БРЭА: печатный узел, установленный в герметичном блоке; корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой; нагретая зона внутри корпуса блока; воздушный канал, образованный стенкой корпуса блока РЭА и печатным узлом; блок этажерочной конструкции, устанавливаемый посредством стоек-панелей к теплоотводящему основанию с заданной температурой; гибридно-интегральный модуль, установленный на теплостоки; конструкция вторичной системы электропитания в микроэлектронном исполнении, установленная на воздухопровод; сточные конструкции с принудительным воздушным и водяным охлаждением.

ПРИМЕРЫ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ МТП

1. Печатный узел, установленный в герметичном блоке.
2. Корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой.
3. Нагретая зона внутри корпуса блока.
4. Воздушный канал, образованный стенкой корпуса блока РЭА и печатным узлом.
5. Блок этажерочной конструкции, устанавливаемый за стойки панели к теплоотводящему основанию с заданной температурой.
6. Гибридно-интегральный модуль, установленный на теплостоки.
7. Конструкция вторичной системы электропитания в микроэлектронном исполнении.
8. Стоечная конструкция с принудительным воздушным охлаждением.
9. Стоечная конструкция усилителей мощности.

ПРИМЕР 1. Печатный узел, установленный в герметичном блоке ([рис. 2.13](#)). Температура корпуса известна и составляет 32 °С.

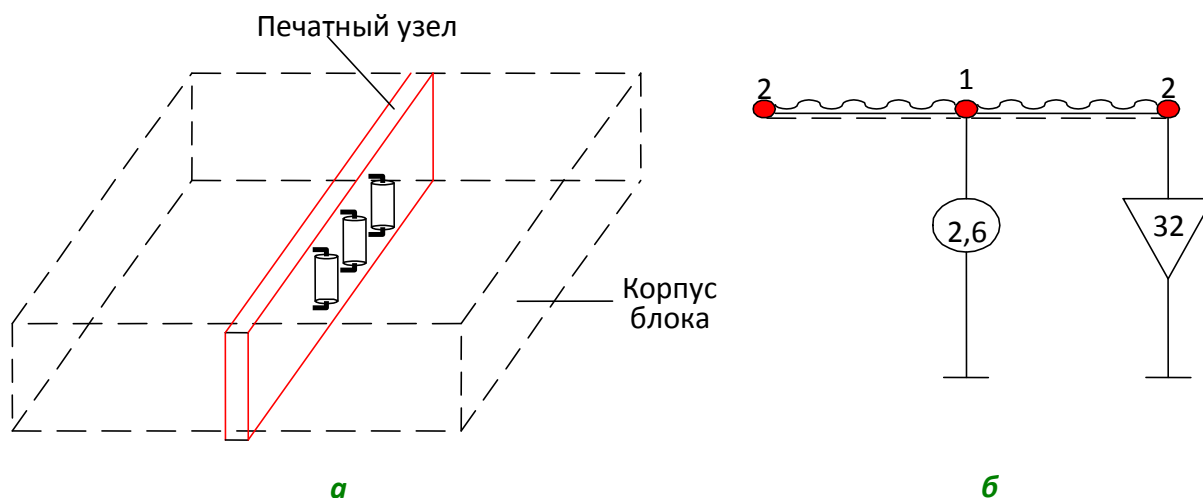


Рис. 2.13. Эскиз конструкции блока с установленным в нем печатным узлом (а) и граф его модели тепловых процессов (б)

Мощность тепловыделения в печатном узле составляет 2,6 Вт.

Идеализируем конструкцию: представим печатный узел в виде условно изотермичного объема (узел № 1); корпус блока примем также в виде условно изотермичного объема с заданной температурой (узел № 2).

На следующем этапе исключаем из рассмотрения несущественные тепловые связи – тепловое излучение и конвекцию с торцевых поверхностей печатного узла, а также пренебрегаем кондуктивной передачей теплового потока через элементы крепления печатного узла к корпусу блока.

На заключительном этапе между условно нагретыми зонами устанавливаем тепловые связи.

Тепловая энергия, выделяемая в печатном узле (узел 1), передается с каждой поверхности печатной платы корпусу посредством теплового излучения и конвекции в воздушных прослойках (ветви 1–2), как это показано на [рис. 2.13, б](#). В случае учета передачи тепловой энергии через элементы крепления печатного узла к корпусу блока (например, через разъем) МТП примет вид, показанный на [рис. 2.14](#).

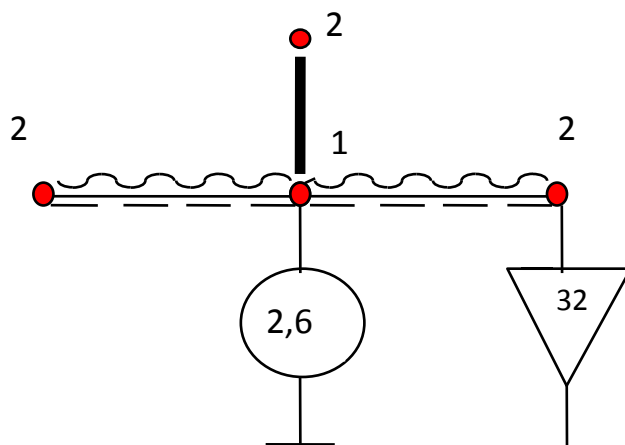


Рис. 2.14. Топологическая тепловая модель системы тел «печатный узел–корпус блока»

ПРИМЕР 2. Корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой-Тос (рис. 2.15, а).

Принимаем допущения:

1. Каждую стенку корпуса (1–6: 1 – лицевая; 2 – задняя; 3 – нижняя; 4 – верхняя; 5 – левая боковая; 6 – правая боковая) будем считать изотермичной.

2. Пренебрегаем перепадом температур по толщине стенок корпуса из-за незначительной толщины стенок корпуса (обычно 1–3 мм) и достаточно высокого коэффициента теплопроводности материала корпуса (обычно 15–200 Вт/м/К).

На [рис. 2.15, б](#) приведена тепловая топологическая модель корпуса блока, в которой отражена кондуктивная передача тепла по стенкам корпуса (ветви: 1–4, 4–2, 2–3, 3–1, 1–5, 5–2, ..., 3–5) и отдача тепловой энергии с поверхностей корпуса в окружающую среду посредством естественной конвекции и излучения (ветви: 3–7, 1–7, ..., 6–7). Представленную модель следует использовать, например, при неравномерных мощностях тепловыделений в конструктивных узлах и элементах, располагающихся внутри корпуса блока. Упрощенная топологическая тепловая модель корпуса блока РЭА приведена на [рис. 2.16, в](#). В упрощенной модели исключены ветви, отражающие кондуктивную передачу тепловой энергии по стенкам корпуса, а сам корпус принимается изотермичным.

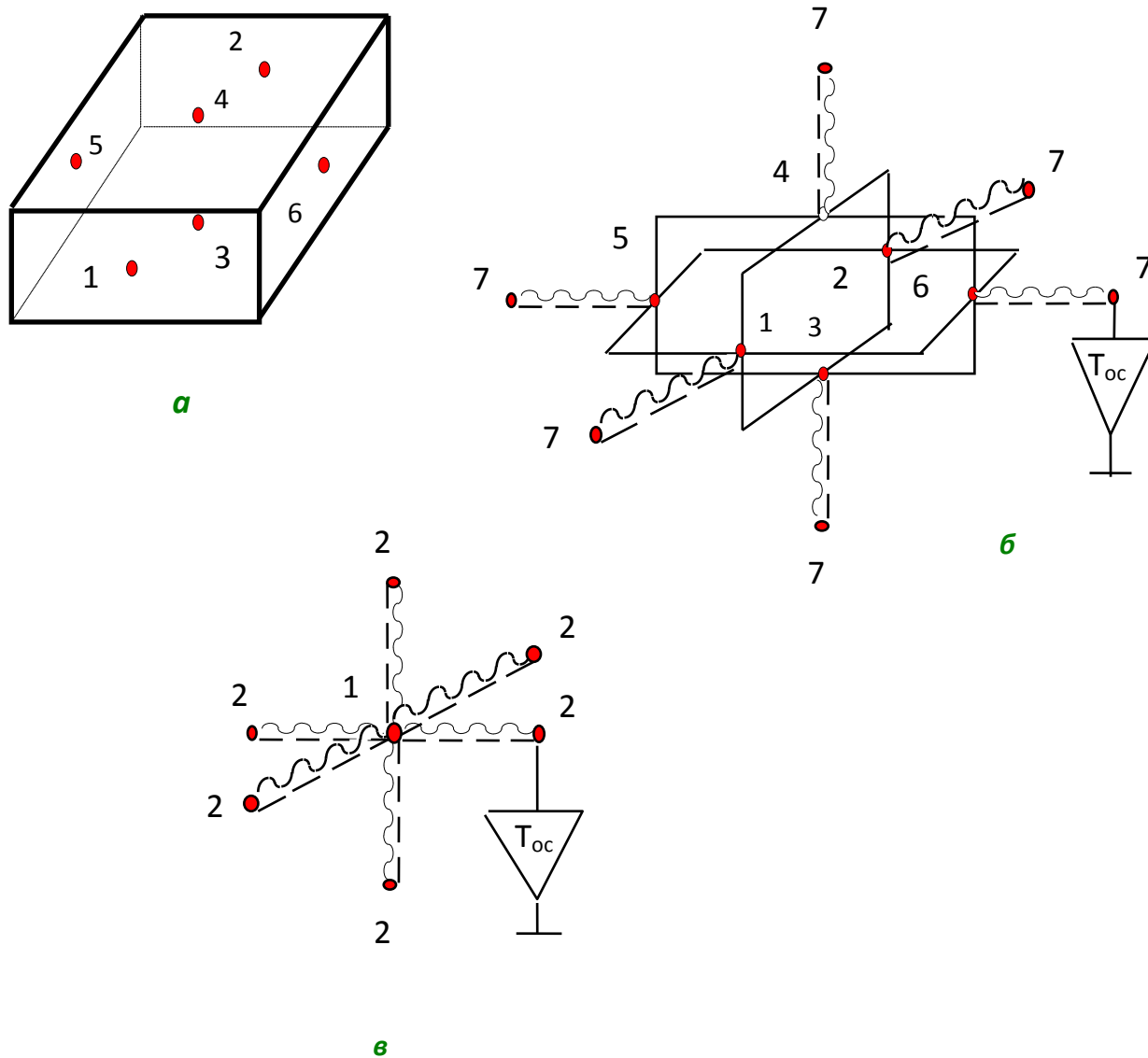


Рис. 2.15. Корпус блока РЭА: *а* – корпус блока РЭА в газовой среде; *б*– тепловая топологическая модель (стенки корпуса блока изотермичны); *в*– упрощенная тепловая топологическая модель (весь корпус блока изотермичный: узел 1 – корпус блока, узел 2 – окружающая среда)

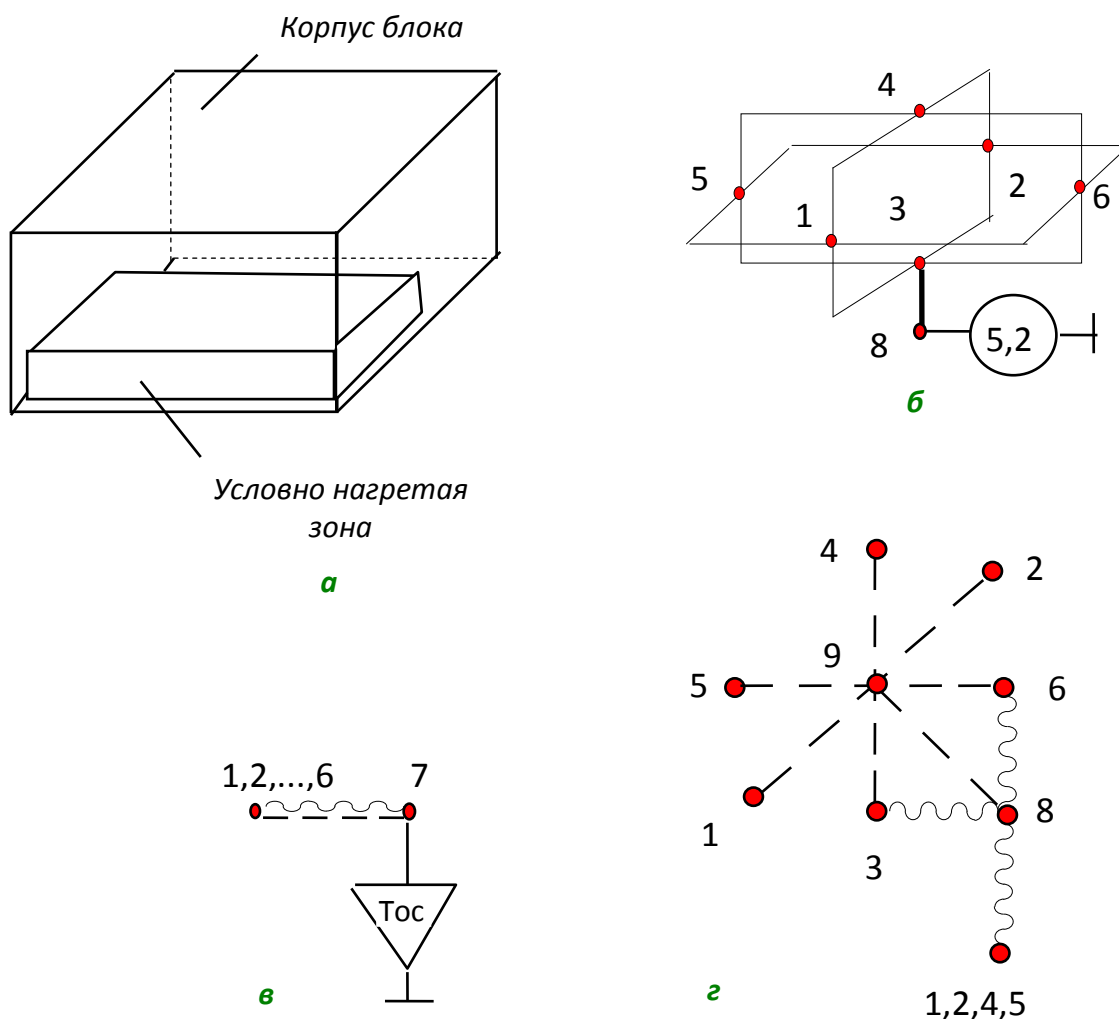


Рис. 2.16. Корпус блока РЭА с нагретой зоной внутри (корпус находится в газовой среде) – (а) и его тепловая модель: б – кондукция по стенкам корпуса; в – конвекция и излучение в окружающую среду; г – конвекция и излучение внутри корпуса

ПРИМЕР 3. Нагретая зона внутри корпуса блока (рис. 2.16, а).

Корпус блока находится в газовой среде с температурой T_{oc} . В условно нагретой зоне выделяется тепловая мощность 5,2 Вт.

В ряде случаев необходимо определить в результате моделирования температуру воздуха внутри корпуса блока. Для этого может быть использована тепловая модель, рассматриваемая в данном примере и дающая удовлетворительный, с точки зрения погрешности моделирования (10–15 %), результат.

В приводимой на [рис. 2.16, б–г](#) тепловой модели выделены следующие условно нагретые зоны: 1–6 – стенки корпуса; 7 – окружающая среда; 8 – нагретая зона, в которой выделяется тепловая мощность; 9 – газовый объем

внутри корпуса РЭА. В случае необходимости фрагменты тепловой модели, представленные на [рис. 2.16, б, в](#), могут быть заменены на модель, приводимую на [рис. 2.15, в](#).

Рассмотрим кратко тепловые процессы, описываемые представленной на [рис. 2.16, б–г](#) моделью.

Тепловая энергия, выделяемая в нагретой зоне (узел № 3), передается посредством контактного теплообмена на нижнюю стенку корпуса (ветвь 8–3), а также в газовый объем внутри корпуса путем конвекции (ветвь 8–9). Затем посредством конвективного теплообмена часть тепловой энергии передается на стенки корпуса (ветви: 9–1, 9–2, ..., 9–6). Кроме этого, с нагретой зоны часть тепловой энергии передается тепловым излучением стенкам корпуса (ветви: 8–1, 8–2, ..., 8–6). Поступившая на корпус тепловая энергия распространяется посредством кондукции по его стенкам (ветви: 1–8, 1–4, 4–2, 2–3, 3–1, 1–5, ..., 4–6 на [рис. 2.16, б](#)), а также передается (с внешних поверхностей) в окружающую среду путем излучения и естественной конвекции (ветви: 1–7, 2–7, ..., 6–7 на [рис. 2.16, в](#)).

ПРИМЕР 4. Воздушный канал ([рис. 2.17, а](#)), образованный стенкой корпуса блока РЭА и печатным узлом ($P=7,5$ Вт). Между стенкой и печатным узлом продувается воздух с температурой $+30^\circ\text{C}$.

На [рис. 2.17, б](#) представлена тепловая топологическая модель воздушного канала. На изображенной модели узлы графа моделируют: 1-й узел – стенку корпуса блока; 2-й узел – печатный узел с тепловыделением 7,5 Вт; 3-й узел – воздушный поток на входе в канал с заданной температурой $+30^\circ\text{C}$; 4-й узел – воздушный поток на выходе из канала. Ветви (ребра) графа отражают вынужденную конвекцию в воздушный канал (ветви: 1–3, 1–4, 2–3, 2–4), теплоперенос (ветвь 3–4), а также излучение между стенками канала (ветвь 1–2). При этом конвекция осуществляется со стенок канала в воздушный поток на входе в канал (конвектирует поверхность стенки канала площадью $S=(a \cdot b)/2$), например ветвь 1–3, а также воздушный поток на выходе из канала (конвектирует поверхность стенки канала площадью $S=(a \cdot b)/2$), например ветвь 1–4.

Представленная модель является фрагментом, так как не учитывает тепловое взаимодействие стенки канала (узел № 1) с окружающей средой и с другими элементами корпуса блока, а также тепловое взаимодействие печатного узла с другими возможными конструктивными узлами и элементами блока, в котором он устанавливается.

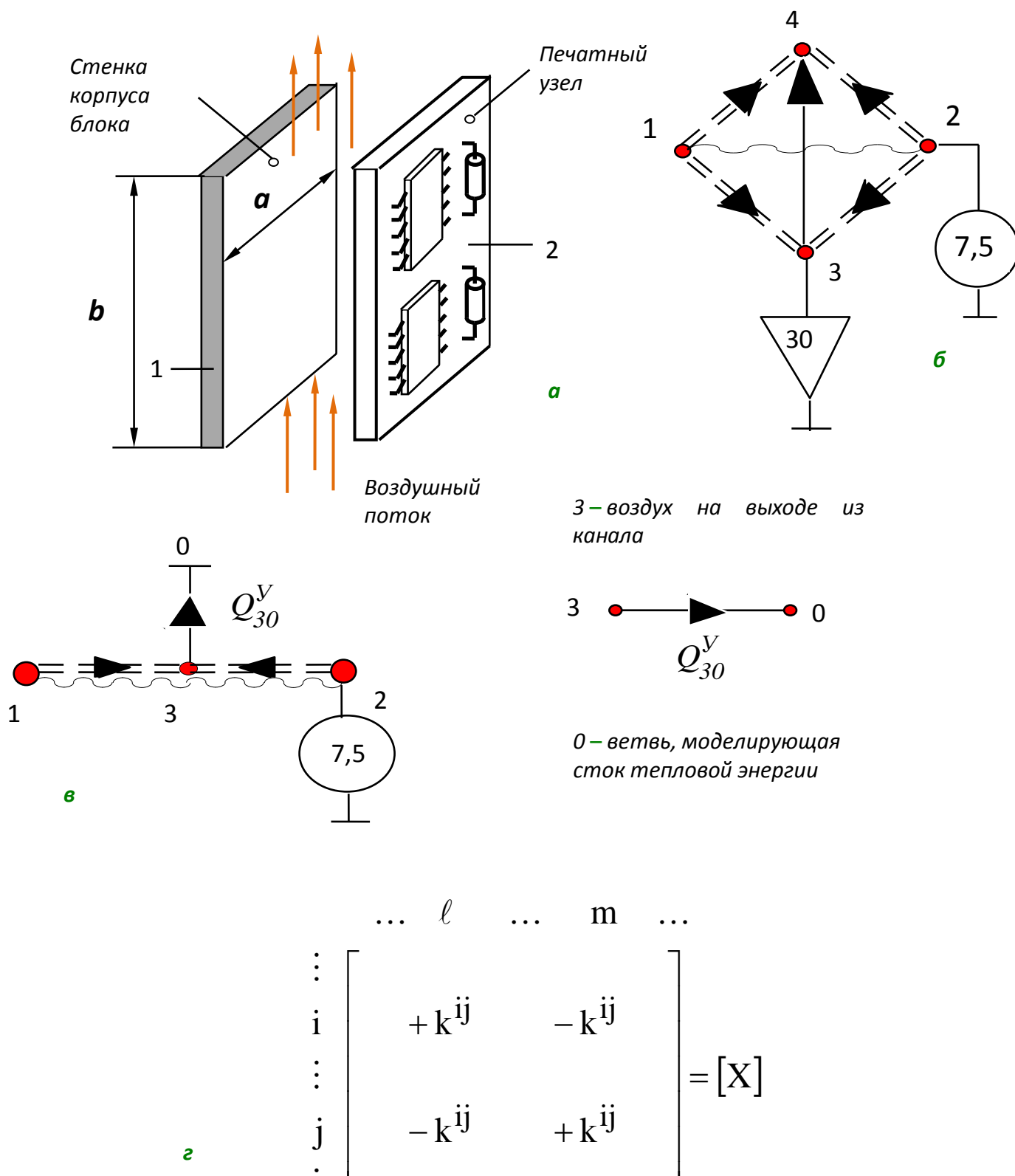


Рис. 2.17. Плоский воздушный канал – а, его тепловая топологическая модель – б и в, матрица тепловых проводимостей – г

На [рис. 2.17, в](#) приведена другая форма представления модели канала, которая вместо ветви 3–4 отражает сток тепловой энергии зависимым источником (источником потокового воздействия /мощности/, управляемого разностью потенциалов /температур/ $Q_{ij}^Y = K^{ij} \times (t_l - t_m)$, где K^{ij} – коэффициент пропорциональности), включенным между узлами 3 и 0 графа тепловой модели. На [рис. 2.17, г](#) показана структура матрицы тепловых проводимостей при включении в модель зависимого источника $Q_{ij}^Y = K^{ij} \times (t_l - t_m)$. В дальнейшем для большей наглядности будем, в основном, использовать первую форму представления модели канала ([рис. 2.17, б](#)).

ПРИМЕР 5. Блок этажерочной конструкции, устанавливаемый при помощи винтов за стойки панели к теплоотводящему основанию ([рис. 2.18](#)) с заданной температурой +40 °С. Блок компонуется функциональными ячейками (ФЯ), которые крепятся при помощи винтов торцевыми поверхностями к двум стойкам–панелям. Тепловыделения ФЯ в блоке показаны на [рис. 2.18](#). Блок располагается в отсеке космического аппарата, в котором находится вакуум.

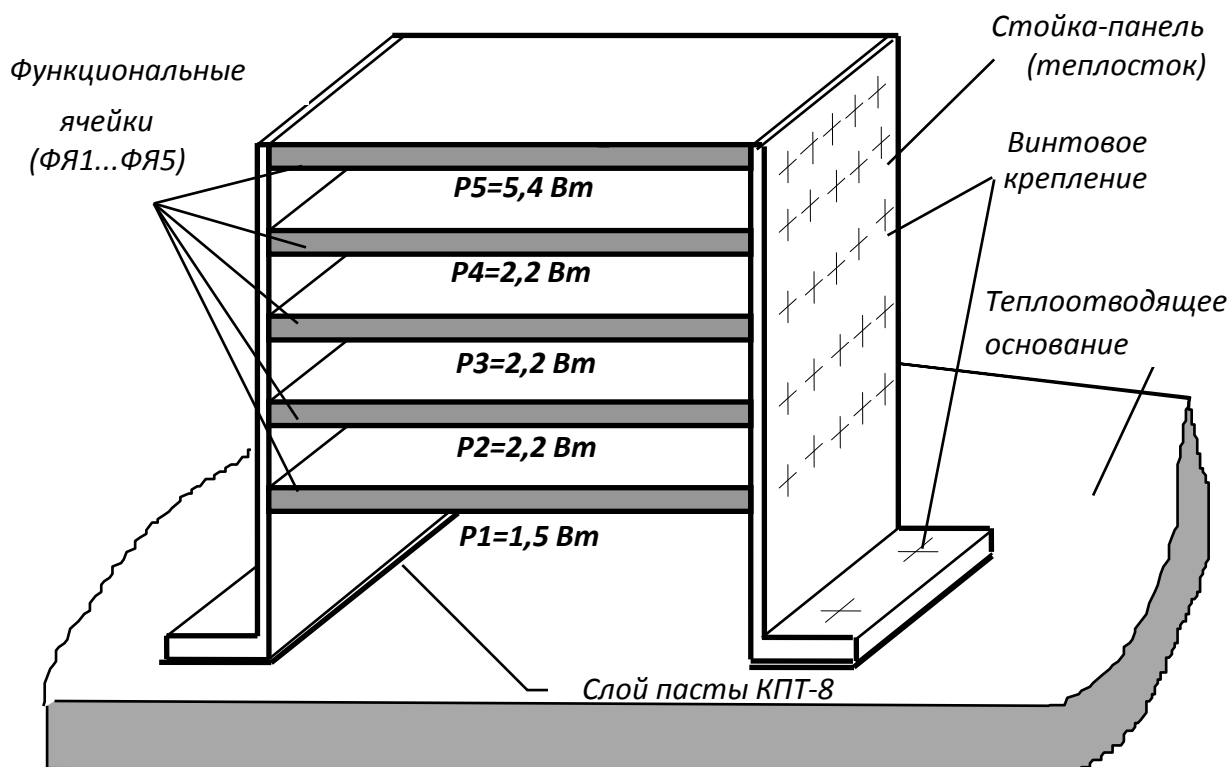


Рис. 2.18. Эскиз блока этажерочной конструкции, установленного на теплоотводящем основании

Перед построением тепловых связей графа модели разобьем конструкцию на условно нагретые зоны. Будем считать в качестве условно нагретых зон ([рис. 2.18](#)) каждую функциональную ячейку (узлы 1–5), стойку–панель (узлы 6–

7), ближайший конструктивный элемент (температура элемента задана равной $+50^{\circ}\text{C}$), с которым происходит лучистый теплообмен пятой ФЯ и теплоотводящее основание (узел № 9).

Учитывая, что блок находится в вакуумном пространстве, исключим из рассмотрения конвективную составляющую. Кроме этого, пренебрегаем отдачей тепловой энергии посредством излучения с ФЯ на стойки–панели, так как

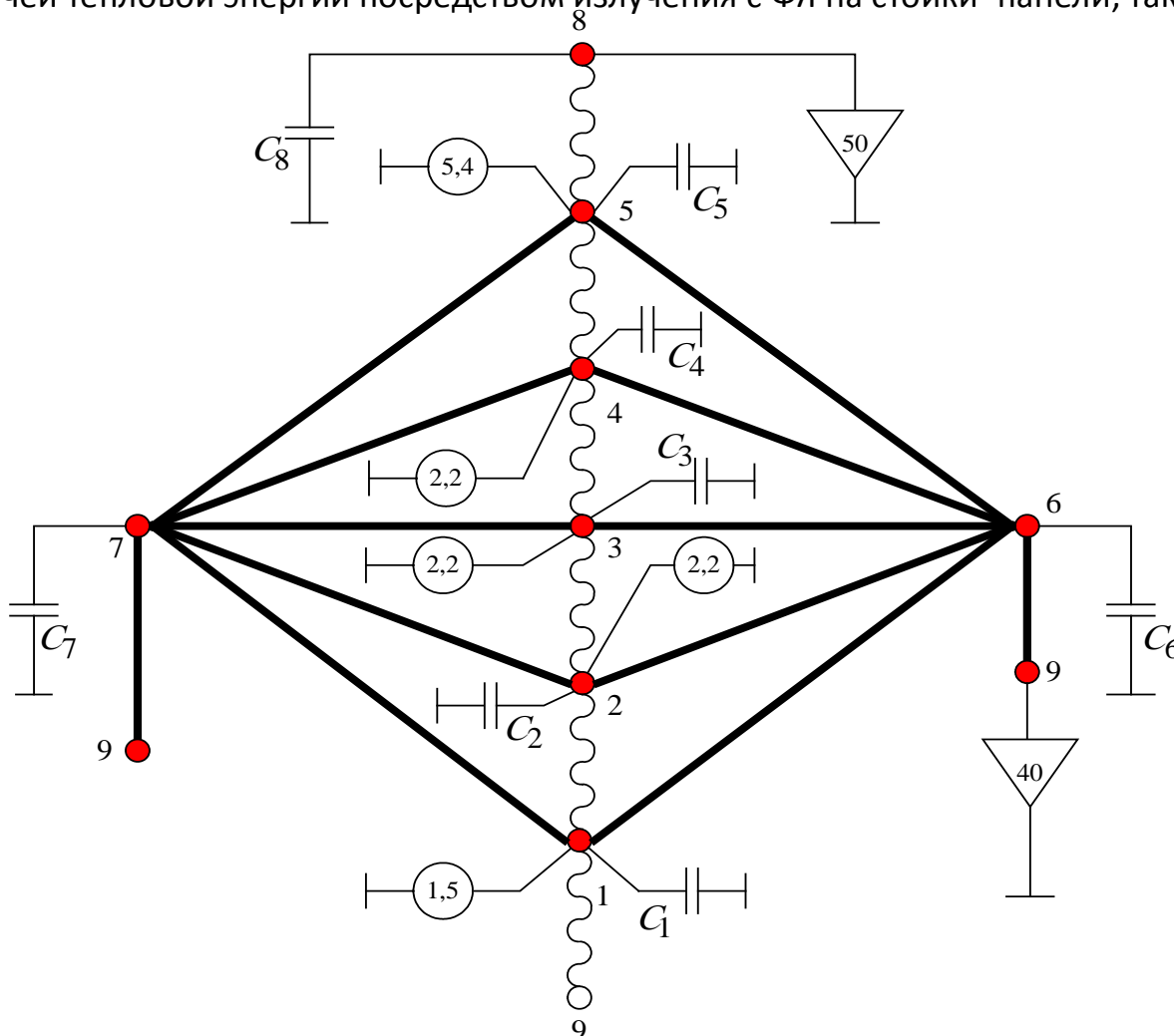


Рис. 2.19. Граф топологической МТП блока кассетной конструкции (см. [рис. 2.18](#))

контактный теплообмен от ФЯ к стойкам–панелям будет играть более значительную роль – роль стока тепловой энергии на теплоотводящее основание. С учетом вышепринятых допущений граф тепловой топологической модели блока этажерочной конструкции будет иметь вид, представленный на [рис. 2.19](#).

Приведенный граф топологической МТП позволяет исследовать тепловые режимы в нестационарной области, что отражено введением в граф модели консервативных составляющих – теплоемкостей функциональных ячеек (C_1 – C_5) и панелей (C_6, C_8) (см. [табл. 2.2](#)).

ПРИМЕР 6. Гибридно-интегральный модуль (рис. 2.20), установленный на теплостоки (рис. 2.21). На дно корпуса гибридно-интегрального модуля (ГИМ) при помощи клея установлены две бескорпусные микросборки А1 и А2 (выделяют тепловые мощности 1,5 Вт и 2,6 Вт соответственно), а также трансформатор Т1 (мощность тепловыделения 0,8 Вт). Корпус ГИМ выполнен из сплава **Амц** ($\lambda=180$ Вт/м·К). ГИМ устанавливается при помощи винтов на два теплостока с заданными температурами (+31°C и +34°C). Окружающий ГИМ воздушный объем имеет температуру +45°C.

Идеализируем рассматриваемую конструкцию.

Примем в качестве условно нагретых зон следующие элементы конструкции: микросборки и трансформатор (узлы 1–3), корпус ГИМ (узел № 4), теплостоки (узлы 6 и 7) и воздушный объем–окружающую среду (узел № 5). Корпус ГИМ принимаем изотермичным ввиду того, что он выполнен из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (сплав Д16).

На [рис. 2.22](#) представлен граф топологической тепловой модели, в которой принято вышеописанное разбиение конструкции на изотермичные объемы. Представленная МТП отражает следующий механизм распространения тепловых процессов. Тепловая энергия, выделяемая в элементах А1, А2, Т1 ГИМ (моделируются включением в узлы 1–3 источников тепловой энергии), передается через клеевой слой на корпус ГИМ (ветви: 1–4, 2–4, 3–4 на [рис. 2.22, а](#)). Часть тепловой энергии передается с элементов А1, А2 и Т1 на корпус ГИМ посредством конвекции и излучения (ветви: 1–4, 2–4, 3–4 на [рис. 2.22, б](#)), затем тепловая энергия с корпуса ГИМ передается контактным теплообменом на теплостоки (ветви: 4–6 и 4–7) и отдается в окружающую среду путем естественной конвекции и излучения (ветви 4–5 на [рис. 2.22, а](#)). Известные температуры теплостоков и окружающей среды моделируются путем включения в соответствующие узлы модели (узлы 5, 6, 7) источников с заданной температурой.

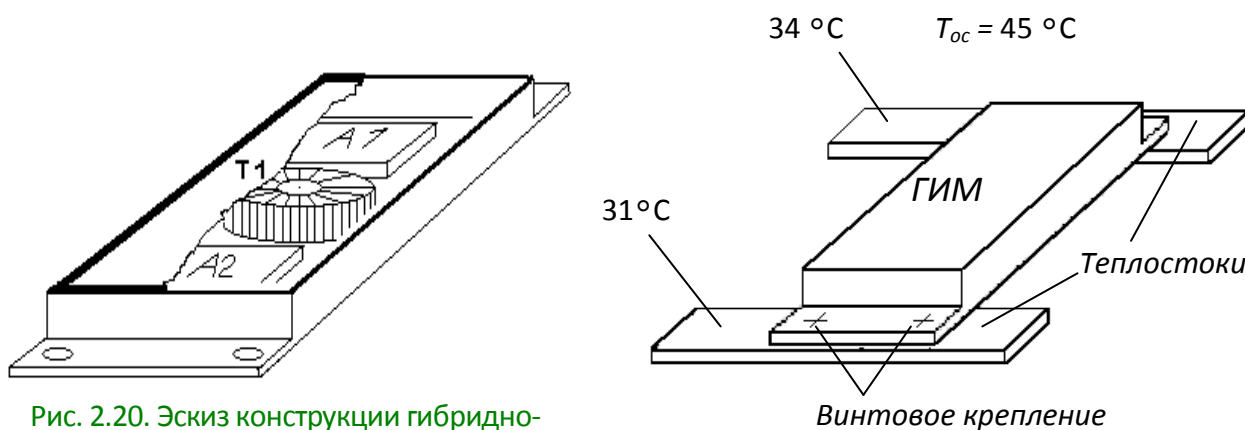


Рис. 2.20. Эскиз конструкции гибридно-интегрального модуля: А1 и А2 – бескорпусные микросборки; Т1 – трансформатор

Рис. 2.21. Способ установки гибридно-интегрального модуля в микроэлектронной аппаратуре

Для моделирования процесса нагрева конструктивных узлов и эле-

ментов ГИМ в соответствующие узлы МТП включены теплоемкости (C_1 – C_4).

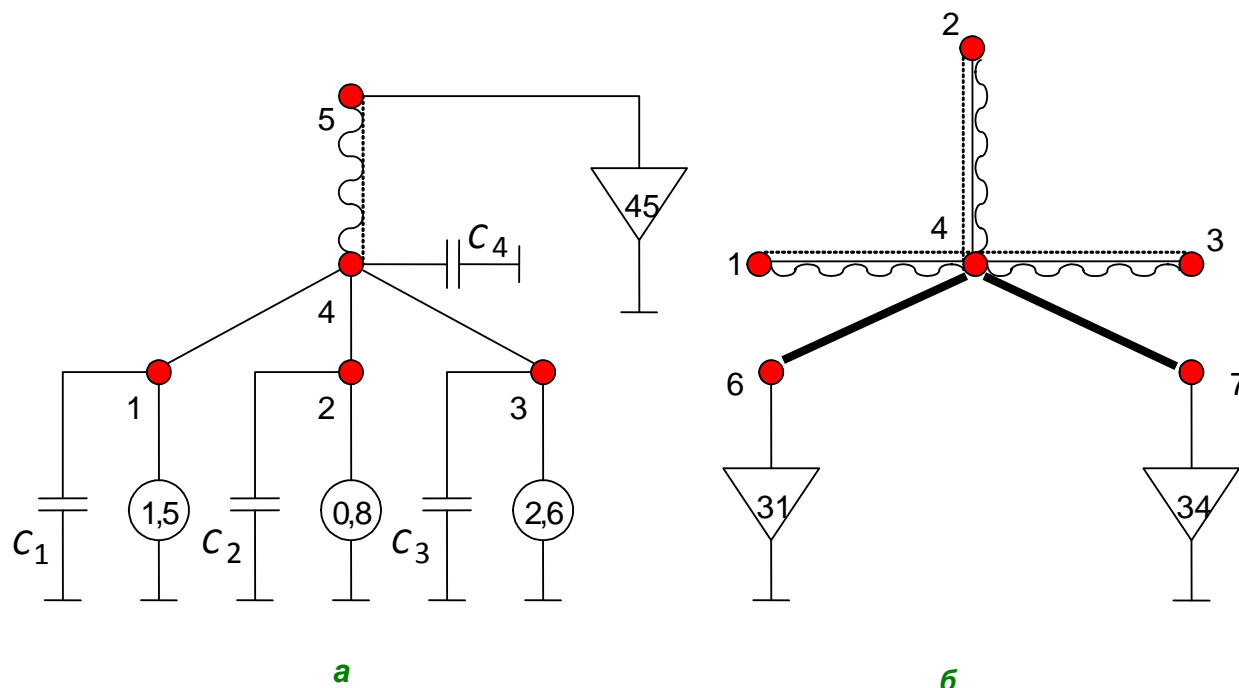


Рис. 2.22. Тепловая топологическая модель гибридно-интегрального модуля

ПРИМЕР 7. Конструкция вторичной системы электропитания в микро-электронном исполнении (рис. 2.23). На воздуховоде (выполнен из алюминиевого сплава) установлены четыре источника вторичного электропитания (ИВЭП), выполненные в виде гибридно-интегральных модулей. Через воздуховод продувается воздух с температурой 30 °С. Вся конструкция находится в окружающей среде с температурой 50 °С.

Идеализируем процессы теплопередачи в рассматриваемой конструкции:

1. Условно разделим воздуховод на две части, на которых попарно установлены ИВЭП. Для каждой части примем изотермичными стенки воздуховода. Первая часть воздуховода будет представлена объемами 1–4, а вторая – объемами 5–8. Стенки воздуховода будем считать изотермичными по толщине.

2. Каждый ИВЭП представим в виде условно нагретых объемов (объемы 9–12).

3. Примем в качестве окружающей среды изотермичный объем с номером 13.4. Воздушный поток представим тремя условно изотермичными

объемами ([см. рис. 2.23](#)): объем № 14 – воздух на входе в воздухопровод; объем № 15 – воздух внутри воздухопровода (центр), объем № 16 – воздух на выходе воздухопровода.

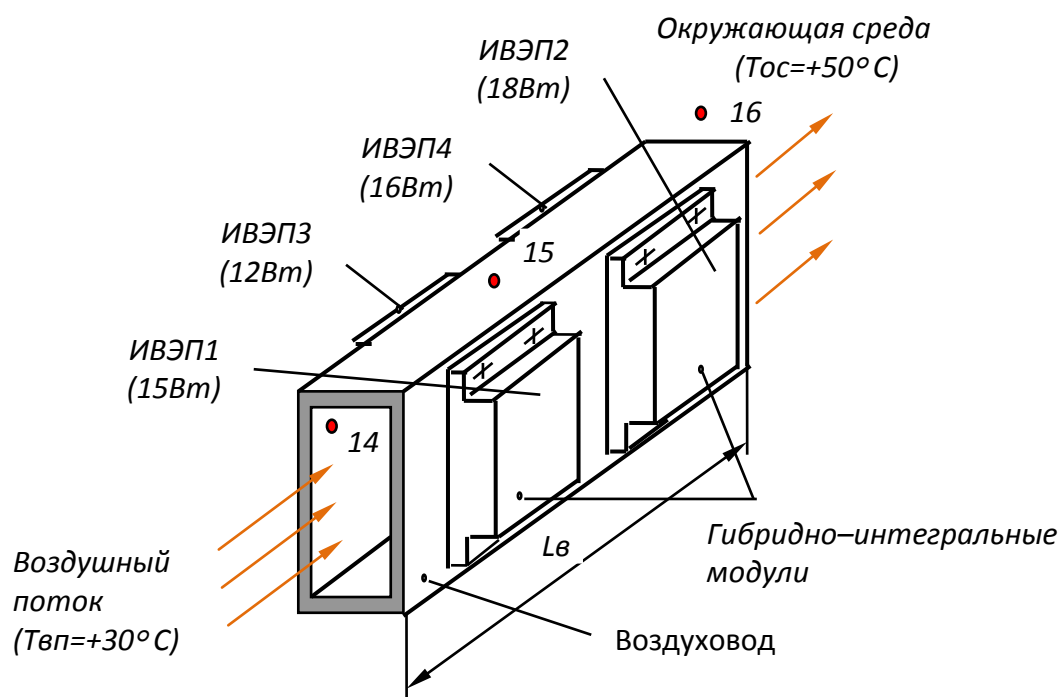


Рис. 2.23. Эскиз конструкции системы вторичного электропитания (в микроэлектронном исполнении), установленной на воздухоотводе

В объемы, моделирующие ИВЭП, подключаем источники тепловыделения (15, 16, 18 и 12 Вт соответственно), а в объемы, моделирующие воздушный поток на входе в воздухопровод и окружающую среду, подключаем источники с заданной температурой (+30 °C и +50 °C соответственно).

С учетом принятой идеализации на [рис. 2.22](#) представлена топологическая МТП. Рассмотрим тепловые процессы, описываемые представленной МТП.

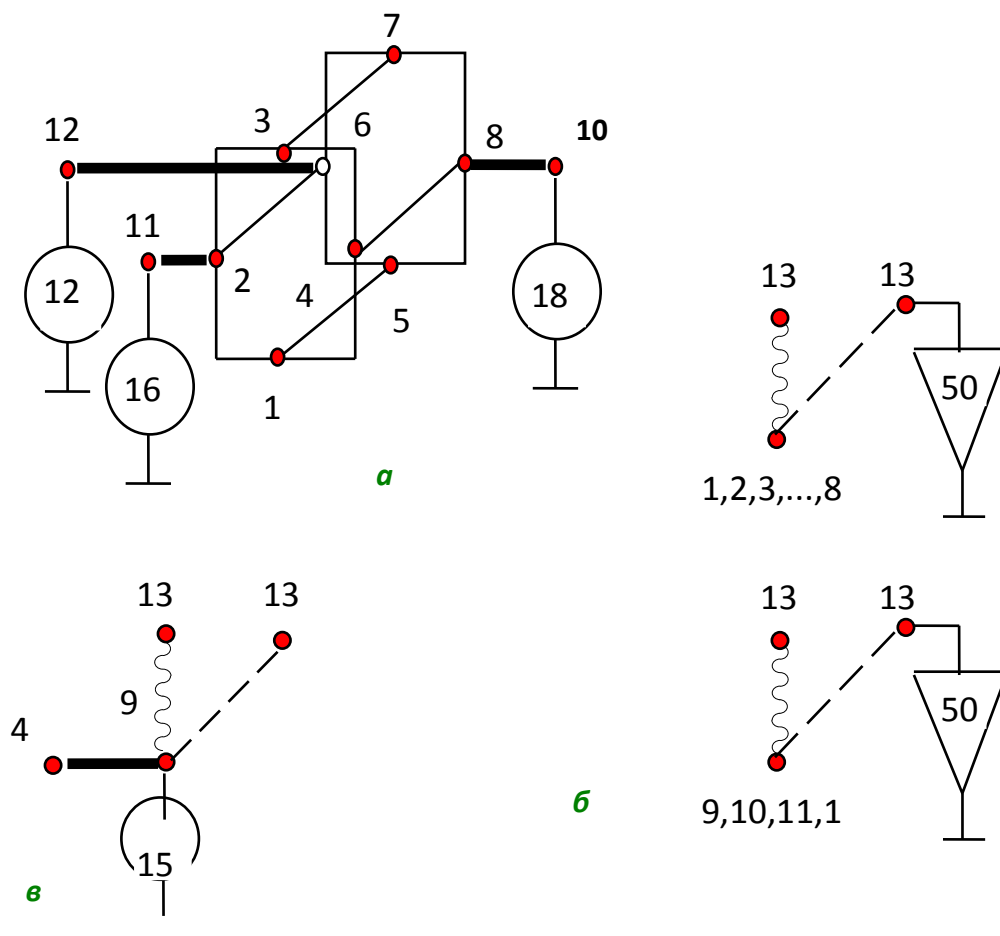


Рис. 2.24. Тепловая топологическая модель конструкции, представленной на [рис. 2.23](#): *а* – кондукция по стенкам воздуховода и контактный теплообмен ГИМов с воздуховодом; *б* – отдача тепла с внешних поверхностей воздуховода и ГИМов в окружающую среду посредством естественной конвекции и излучения; *в* – макромодель ГИМ; *г* – передача тепловой энергии внутри воздуховода путем воздушных каналов и излучения

Тепловая энергия, выделяемая ИВЭП1–ИВЭП4 (узлы 9–12) посредством контактного теплообмена, передается на боковые стенки воздуховода (ветви графа: 9–14, 10–8, 11–2, 12–6 на [рис. 2.24, а, в](#)). Часть тепловой энергии отдается в окружающую среду с поверхностей корпусов ИВЭП и стенок воздуховода путем естественной конвекции и излучения (фрагмент МТП на [рис. 2.24, б](#)). Другая часть тепловой энергии распространяется по стенкам воздуховода путем кондукции ([рис. 2.24, а](#)) и снимается воздушным потоком с внутренних стенок воздуховода ([рис. 2.24, г](#)). В рассматриваемой МТП воздушный канал моделируется двумя участками (ветви 14–15 и 15–16 на [рис. 2.24, г](#)). Длина одного условного канала составляет $L_{\text{в}}/2$ ([см. рис. 2.23](#)). Таким образом, ветви 1–14, 1–15, 2–14, 2–15, ..., 4–14, 4–15 ([рис. 2.24, г](#)) относятся к первому участку воздуховода (каналу в целом), а ветви 5–15, 5–16, 6–15, 6–16, ..., 8–16 – ко второму участку. Данное обстоятельство следует учитывать при задании параметров ветвей 61-го и 62-го типов ([см. табл. 2.2](#)).

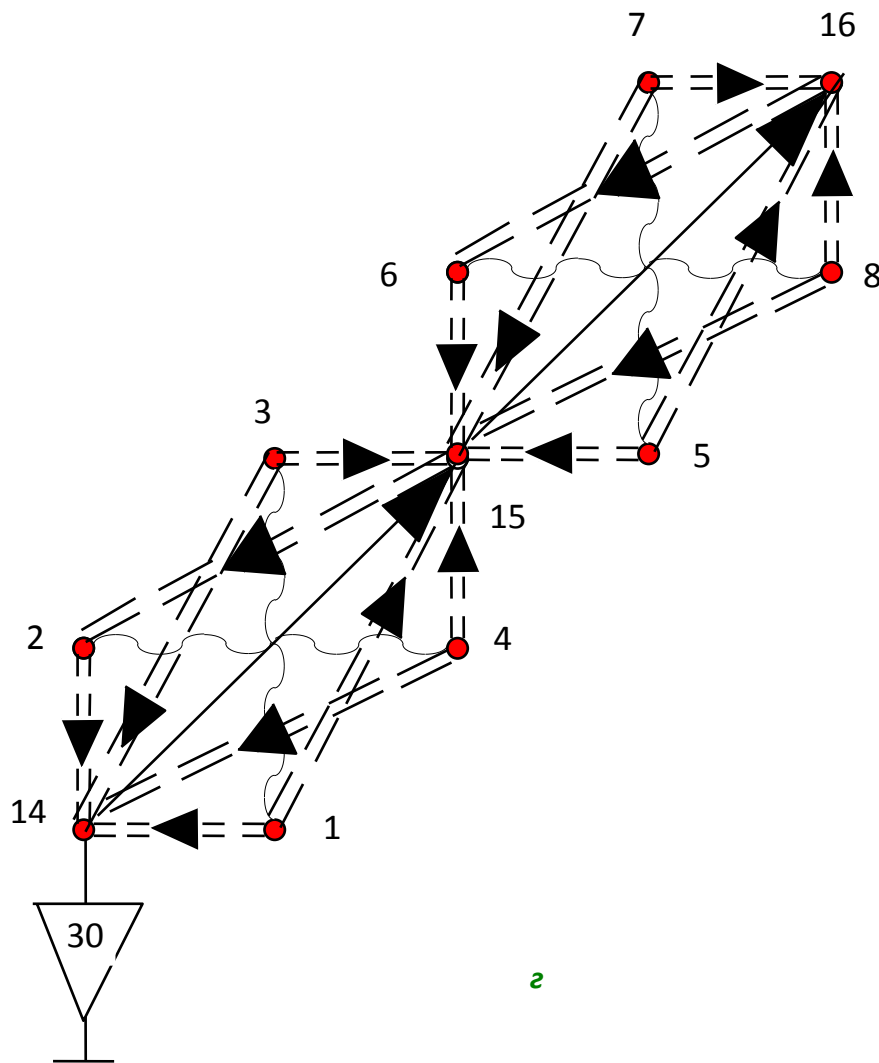


Рис. 2.24. Окончание

На [рис. 2.25](#) изображены упрощенные МТП конструкции системы вторичного электропитания ([рис. 2.23](#)). Приведенные модели идентичны по содержанию, а отличаются лишь представлением в них теплопереноса энергии в канале. Приведенные на [рис. 2.25](#) МТП следует использовать в ориентировочных расчетах, например, для определения необходимого расхода воздуха через воздухопровод. МТП, представленная на [рис. 2.24](#), может использоваться при решении задачи по обеспечению необходимых перегревов корпусов ИВЭП. Если в МТП, приведенной на [рис. 2.24](#), использовать МТП ГИМ, представленную на [рис. 2.22](#), то можно вести тепловое проектирование системы электропитания ([рис. 2.23](#)) на уровне обособленных ЭРЭ и микросборок, которыми компонуются ИВЭП, выполняемые в виде ГИМ.

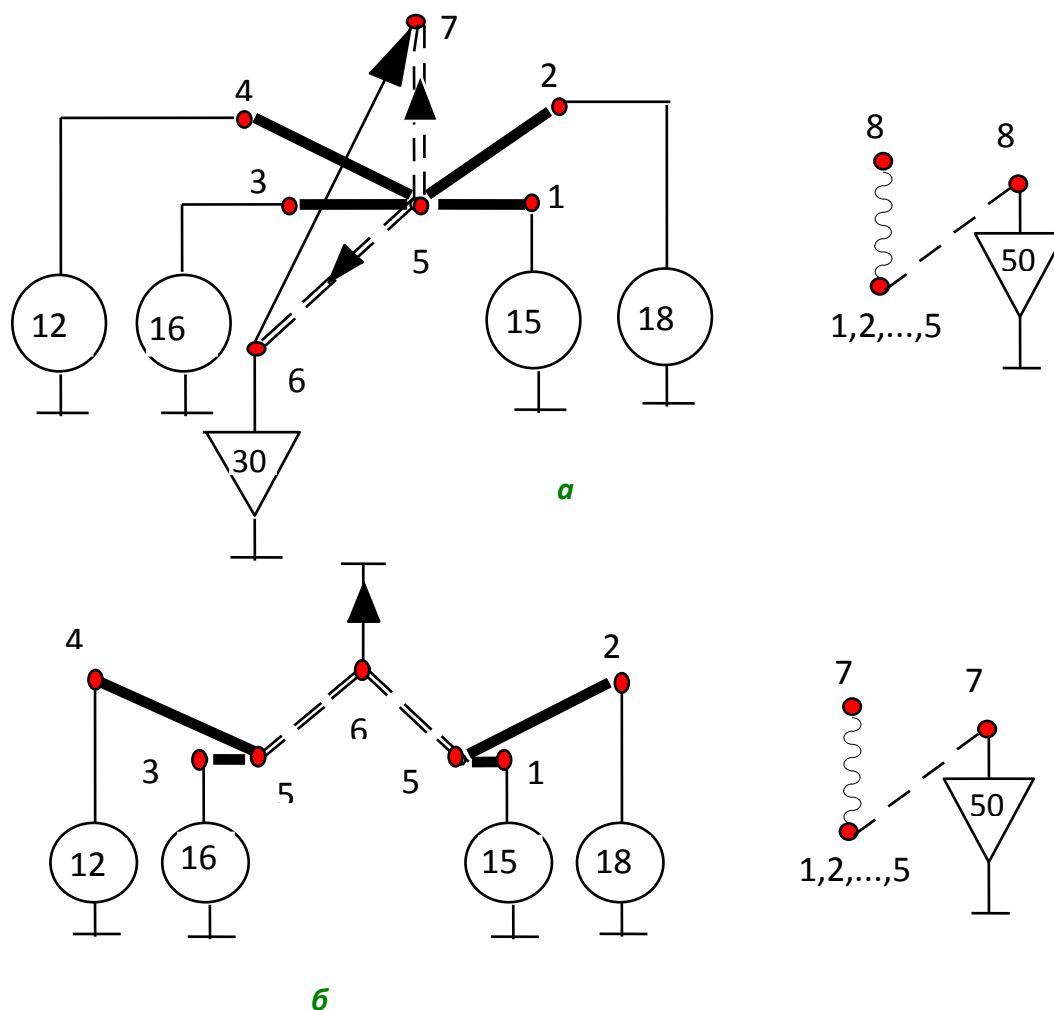


Рис. 2.25. Упрощенная топологическая тепловая модель конструкции системы вторичного электропитания: *а* – узлы 1...4–ИВЭП1 ...ИВЭП4, узел 5 – воздуховод, узел 6 – воздух на входе в воздуховод, узел 7 – воздух на выходе из воздуховода, узел 8 – окружающая среда; *б* – узлы 1...4 – ИВЭП1...ИВЭП4, узел 5 – воздуховод, узел 6 – воздух на выходе из воздуховода, узел 7 – окружающая среда

ПРИМЕР 8. Стоечная конструкция с принудительным воздушным охлаждением (рис. 2.26). Воздух из системы охлаждения с температурой $T_{вп} = +20^{\circ}\text{C}$ продувается снизу-вверх через стойку. Расположение на втором этаже стойки ПУ2 таково, что воздух, проходящий через воздушный канал, образованный печатным узлом № 1 и левой панелью кожуха стойки, весь попадает в воздушный объем второго этажа слева от печатного узла № 2. Туда же попадает часть воздуха, проходящего через первый этаж стойки справа от ПУ1. Другая часть воздушного потока, проходящего через 1-й этаж стойки справа от ПУ1, попадает в воздушный объем 2-го этажа стойки справа от ПУ2.

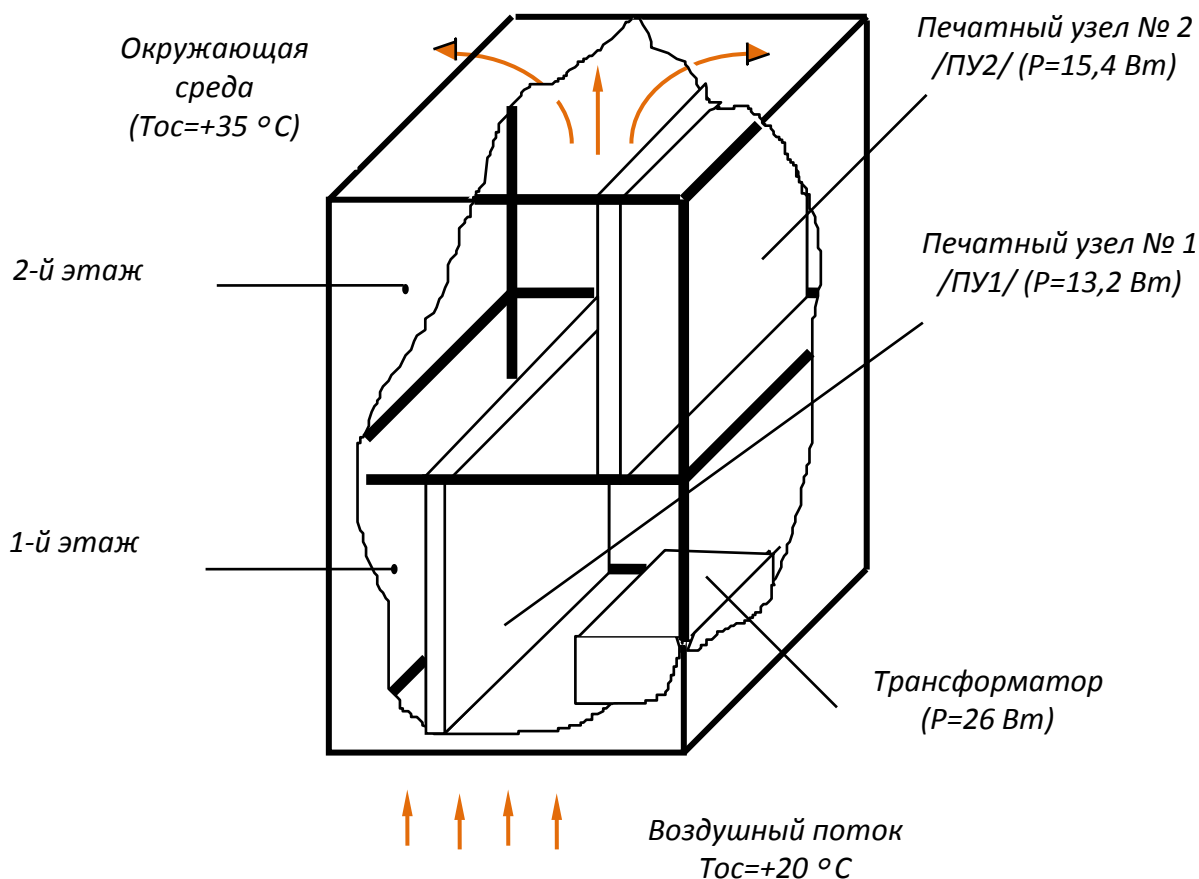




Рис. 2.26. Эскиз стоечной конструкции с принудительным воздушным охлаждением

Идеализируем тепловые процессы, протекающие в стойке:

1. Примем изотермичными каждую грань кожуха стойки в пределах первого и второго этажей стойки (изотермичные объемы 1–10).
2. Окружающий стойку воздушный объем будем считать изотермичным и присвоим ему номер 11.
3. Примем в виде условно нагретых зон ПУ1, ПУ2 и трансформатор (изотермичные объемы 12, 13 и 14 соответственно).
4. Не будем учитывать теплопередачу через элементы крепления печатных узлов и стойки.
5. Воздух, проходящий через нижний этаж стойки справа от ПУ1, примем изотермичным (15-й объем) в пределах нижней половины 1-го этажа с температурой, равной температуре предыдущего объема (воздушного потока на входе в стойку), а также примем изотермичным его в пределах верхней половины 1-го этажа (справа от ПУ1) с температурой, равной температуре воздуха на выходе из канала (16-й условно изотермичный объем). Для канала слева от ПУ1 аналогичным образом примем два изотермичных объема воздушного потока (15-й и 17-й объемы – вход и выход воздушного канала).
6. Воздух, проходящий через верхний этаж стойки слева от ПУ2, примем изотермичным в пределах нижней половины этого этажа (условно изотермичный

| | | | | |
|---|---|--|---|-----------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 99 |
|---|---|--|---|-----------|

объем № 18) с температурой, равной средневзвешенной температуре предыдущих объемов (16-го и 17-го, т. е. смешивание воздушных масс, выходящих из каналов слева и справа от ПУ1) и примем изотермичным в пределах верхней половины 2-го этажа стойки (слева от ПУ2) с температурой, равной температуре воздуха, выходящего из левого канала 2-го этажа стойки (19-й условно изотермичный объем). Для канала, образованного правой поверхностью ПУ2 и кожухом стойки, выделим два изотермичных воздушных объема. Первый объем – в пределах первой половины 2-го этажа стойки справа от ПУ2 (16-й объем), с температурой, равной температуре воздуха на выходе из канала, образованного правой поверхностью ПУ1 и кожухом стойки. Второй изотермичный объем (20-й условно изотермичный объем) выделим во второй половине верхнего этажа стойки справа от ПУ2 с температурой, равной температуре воздушного потока на выходе из канала, образованного правой поверхностью ПУ2 и кожухом стойки.

7. Воздушный поток, выходящий из верхнего (2-го) этажа стойки, примем изотермичным (21-й условно изотермичный объем) с температурой, равной средневзвешенной температуре предыдущих воздушных объемов (воздушные массы, выходящие из каналов слева и справа от ПУ2, которым поставлены в соответствие условно изотермичные объемы № 19 и № 20).

8. В объемы, моделирующие печатные узлы и трансформатор (объемы 12–14), подключаем источники тепловыделений, а в объемы, моделирующие окружающую среду и воздушный поток на входе в стойку (объемы 11 и 15), подключаем источники с заданной температурой.

На следующем этапе между условно изотермичными объемами (вершинами графа) устанавливаем тепловые связи – включаем ветви. На [рис. 2.27](#) приведена топологическая тепловая модель стоечной конструкции, разбитой условно на 21 изотермичный объем. Поясним кратко тепловые процессы, отраженные моделью.

Тепловая энергия, выделяемая печатными узлами (узлы графа 12 и 13 на [рис. 2.27, а](#)), снимается с их поверхностей воздушными потоками (конвекция в продуваемых каналах), что отражается в модели ветвями графа 12–16, 14–18, 14–19, 14–16 и 14–20 ([рис. 2.27, а](#)). С печатных узлов также часть тепловой энергии передается на грани корпуса стойки посредством излучения ([рис. 2.27, б](#)). Часть поступающей на стенки корпуса тепловой энергии снимается воздушными потоками (ветви: 5–15, 5–17, 2–15, 2–17, 3–15, 3–16, 3–17, ..., 7–16, 7–20 на [рис. 2.27, а](#)), а также распространяется кондукцией по стенкам корпуса ([рис. 2.27, в](#)) и отдается с внешних поверхностей корпуса в окружающую среду ([рис. 2.27, г](#)) излучением и конвекцией (ветви: 2–11, 3–11, ..., 10–11). При этом нижняя грань корпуса (узел 1) стойки обдувается воздушным потоком. В сети каналов стойки, в которые конвектирует тепловая энергия с поверхностей печатных узлов и внутренних граней корпуса стойки, перенос воздушных потоков моделируется ветвями 15–17, 15–16, 16–18, 17–18, 18–19, 16–20, 19–21, 20–21 (см. [рис. 2.27, а](#)). На [рис. 2.27, д](#) представлена тепловая модель трансформатора, ус-

тановленного на нижней грани 1-го этажа стойки. В модели отражены следующие тепловые процессы. Часть тепловой энергии, выделяемой в трансформаторе (узел 13), посредством контактного теплообмена передается на нижнюю грань корпуса (1-й узел модели), а другая часть снимается с поверхности трансформатора воздушным потоком в канале (ветви 13–15 и 13–16), а также передается излучением на стенки корпуса стойки и на печатный узел ПУ1 (ветви: 13–1, 13–3, 13–4, 13–5, 13–12).

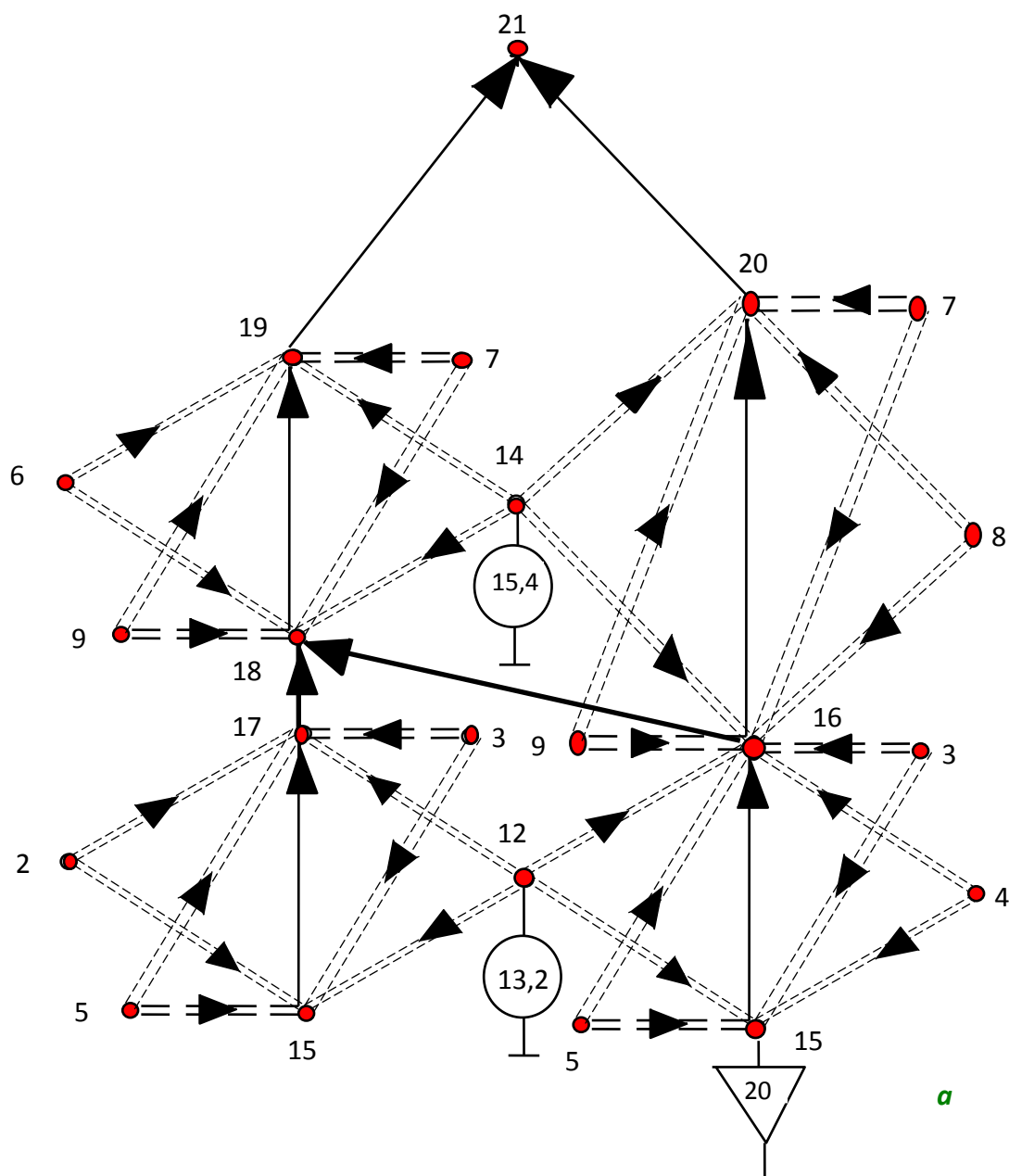


Рис. 2.27. Тепловая топологическая модель стоечной конструкции с принудительным воздушным охлаждением: *а* – фрагмент, отражающий передачу тепловой энергии внутри стойки посредством воздушных каналов и теплопереноса; *б* – отдача тепловой энергии с поверхностей печатных узлов (а также между стенками каналов) на внутренние стенки корпуса тепловым излучением; *в* – кондукция по стенкам корпуса стойки; *г* – отдача тепловой энергии с внешних граней корпуса стойки в окружающую среду путем конвекции и излучения; *д* – модель трансформатора

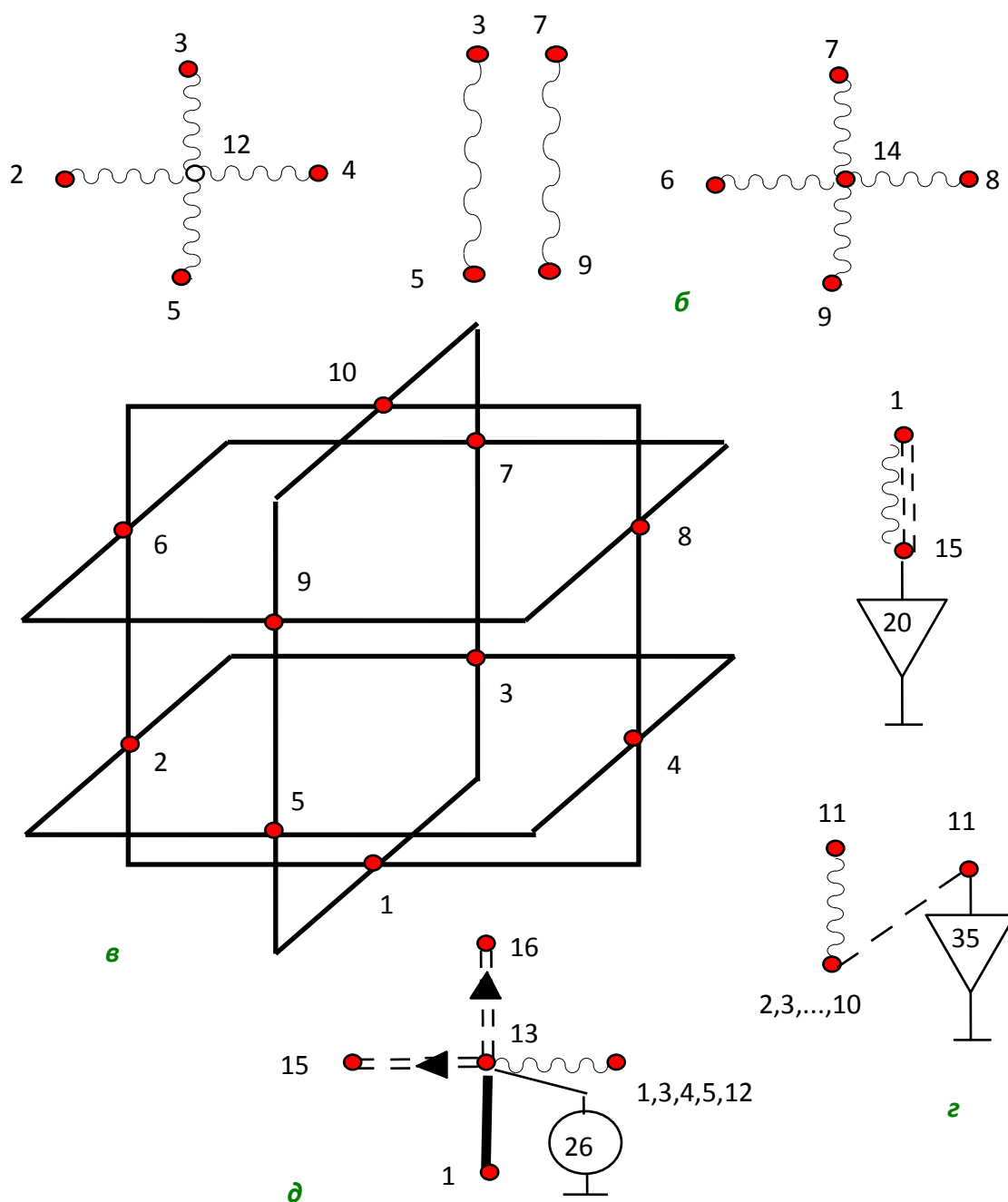


Рис. 2.27. Окончание

ПРИМЕР 9. Стоечная конструкция усилителей мощности (рис. 2.28). Представленная на рис. 2.28 стоечная конструкция входит в комплект стоек, размещаемых в бортовом пространстве передвижного объекта (см. рис. 2.29). Подача охлаждающего воздушного потока осуществляется через общий для всех стоек воздуховод (нижний воздуховод на рис. 2.29). Верхний воздуховод (см. рис. 2.29) соединяется с вытяжным вентилятором, образует таким образом комплекс контуров принудительного воздушного охлаждения стоек. Учитывая значительную мощность тепловыделения на 2-ом этаже стойки

усилителей, в ней используется дополнительный контур охлаждения, охватывающий 2-й этаж (см. [рис. 2.28](#) и [2.29](#)).

На [рис. 2.40](#) приведена схема распространения воздушных потоков внутри стойки.

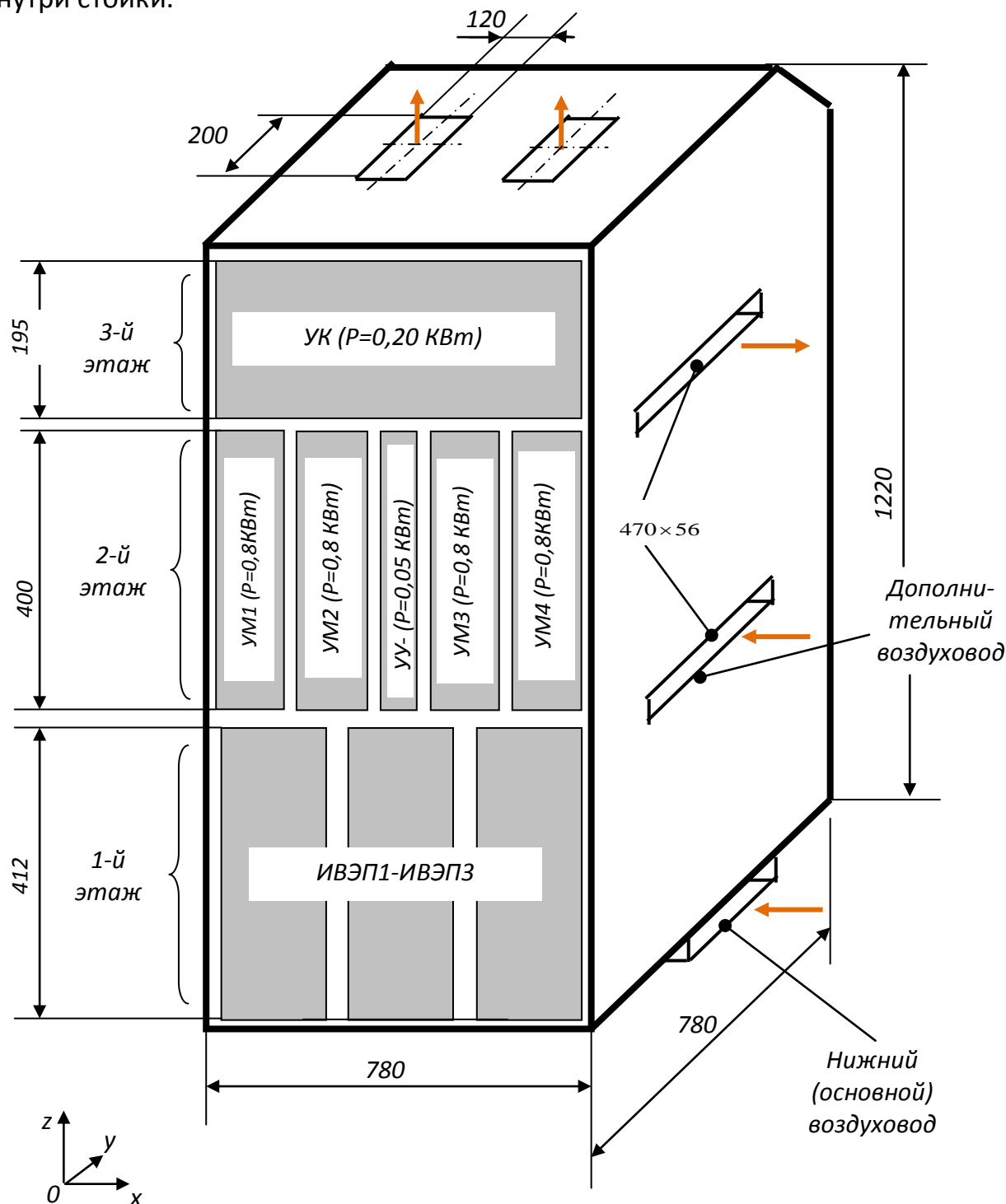


Рис. 2.28. Эскиз стоечной конструкции усилителей мощности: ИВЭП – источник вторичного электропитания; УМ – усилитель мощности; УУ – устройство управления; УК – устройство коммутации

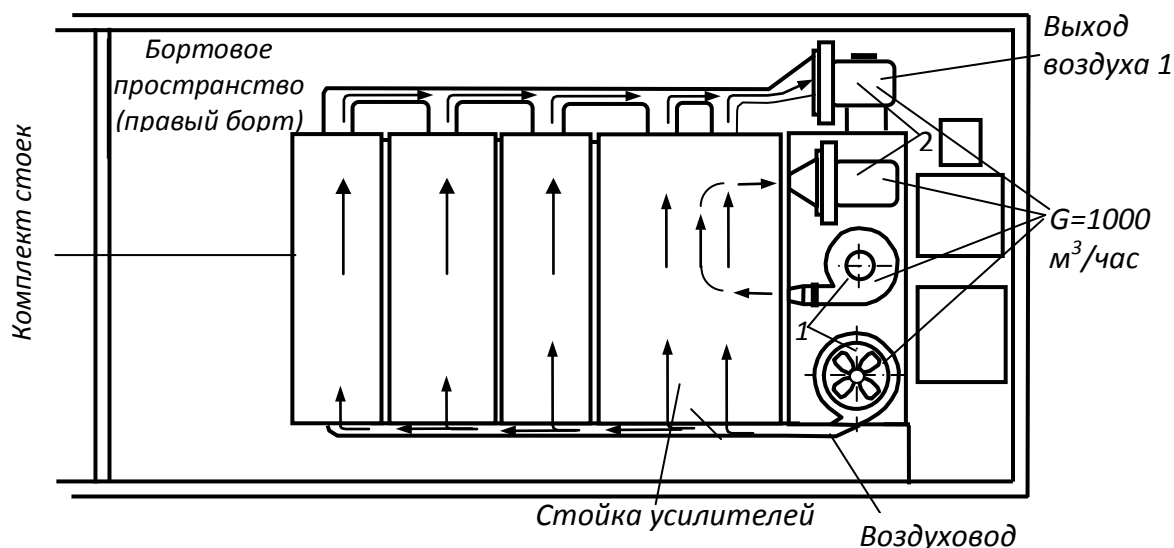


Рис. 2.29. Эскиз установки комплекта стоек в бортовом пространстве объекта:
 1 – нагнетающие вентиляторы; 2 – вытяжные вентиляторы

МТП стойки будем синтезировать исходя из того, что она должна позволять проводить исследования стационарного теплового режима стойки на уровне интегральных температур блоков, входящих в ее состав. Основываясь на этом, идеализируем конструкцию стойки усилителей.

1. Примем каждый блок (ИВЭП1–ИВЭП3, УМ1–УМ4, УУ, УК – см. [рис. 2.28](#)) в виде условно нагретой зоны. При этом каждый блок будет представлен узлом графа МТП с подключенным к нему источником постоянной мощности. Значения мощностей тепловыделений приведены на [рис. 2.28](#).

2. Примем кожух стойки изотермичным ввиду того, что основная часть тепловой энергии переносится воздушными потоками, а не посредством кондукции.

3. Входные воздушные потоки (поток, нагнетаемый в нижний воздуховод, и поток, нагнетаемый в дополнительный боковой воздуховод, – см. [рис. 2.28–2.30](#)) на входе будем моделировать отдельными узлами графа МТП.

4. Выделим систему каналов в конструкции стойки в соответствии с [рис. 2.30](#). При этом каждый канал будем моделировать воздушным объемом на входе и воздушным объемом на выходе из канала.

5. Расчет скоростей воздушных потоков в выделенной системе каналов для прохождения хладоносителя осуществляется исходя из «живого» сечения каждого канала.

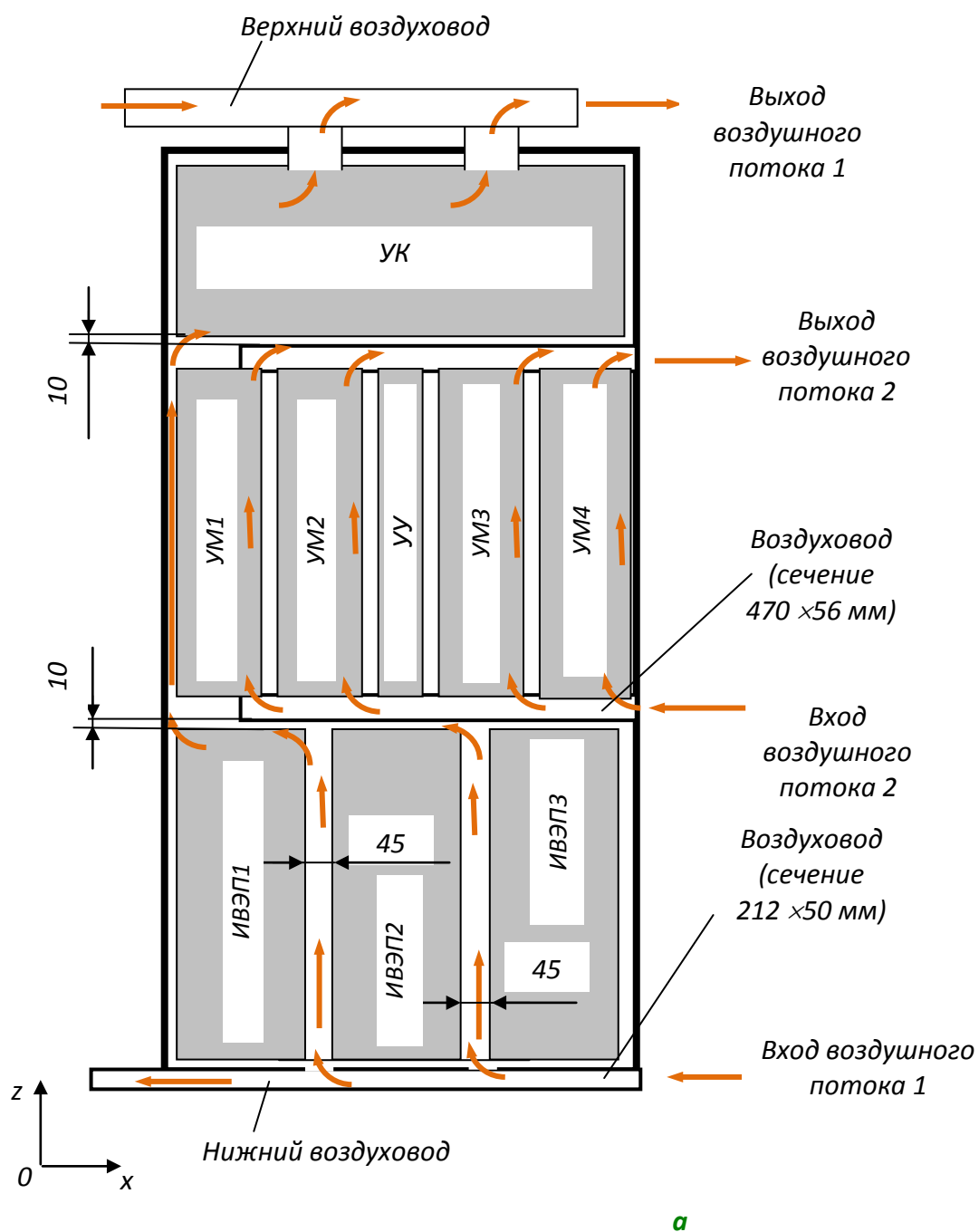
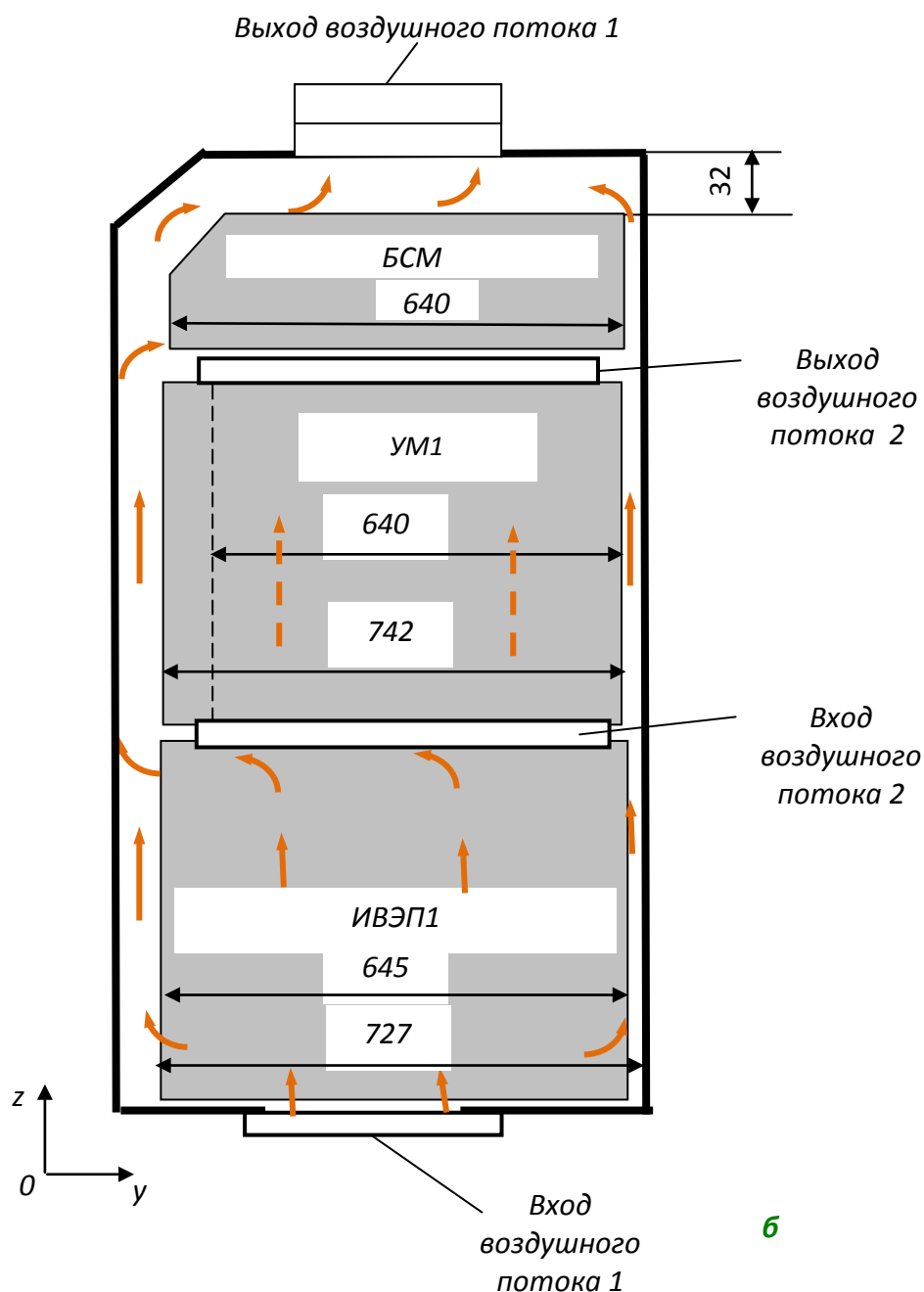


Рис. 2.30. Схема распространения воздушных потоков по каналам стойки: **а** – схема каналов (вид спереди); **б** – схема каналов (вид сбоку)



6

Рис. 2.30. Окончание

С учетом принятой идеализации граф МТП стойки усилителей будет иметь вид в соответствии с [рис. 2.31](#). Рассмотрим кратко приведенную модель.

Узлы графа МТП моделируют: № 2, 11 – заданные температуры на входе первого и второго воздушных потоков; № 1 – кожух стойки; № 3–5 – блоки ИВЭП; № 6–9 – воздушные потоки на выходе из каналов, образованных блоками ИВЭП1–ИВЭП3 и кожухом стойки; № 10 – слияние воздушных потоков после прохождения каналов 1-го этажа стойки; № 12–16 – блоки УМ1–УМ4 и УУ; № 23

– блок УК; № 26 – воздух на выходе из стойки; № 24, 25 – воздушные потоки на выходе из каналов. Ветви 12–10, 12–29, 10–29, 13–10, 13–30, 10–30, ... , 16–10, 16–33, 10–33 отражают охлаждение блоков второго этажа вторым воздушным потоком. Ветви 3–1, 4–1, ..., 5–1, 12–1 и т. п. отражают передачу тепла посредством кондукции от блоков к корпусу стойки через элементы крепления. Ветви 18–34, 34–35, ..., 38–39 отражают воздушный поток в верхнем дополнительном воздуховоде, работающем на вытяжку 2-го воздушного потока, охлаждающего блоки УМ1–УМ4 и УУ. Ветви 1–28 и 1–27 отражают обдув корпуса снаружи стойки воздушным потоком, проходящим через бортовое пространство, и передачу тепла посредством излучения и через воздушную прослойку от корпуса стойки к корпусу борта.

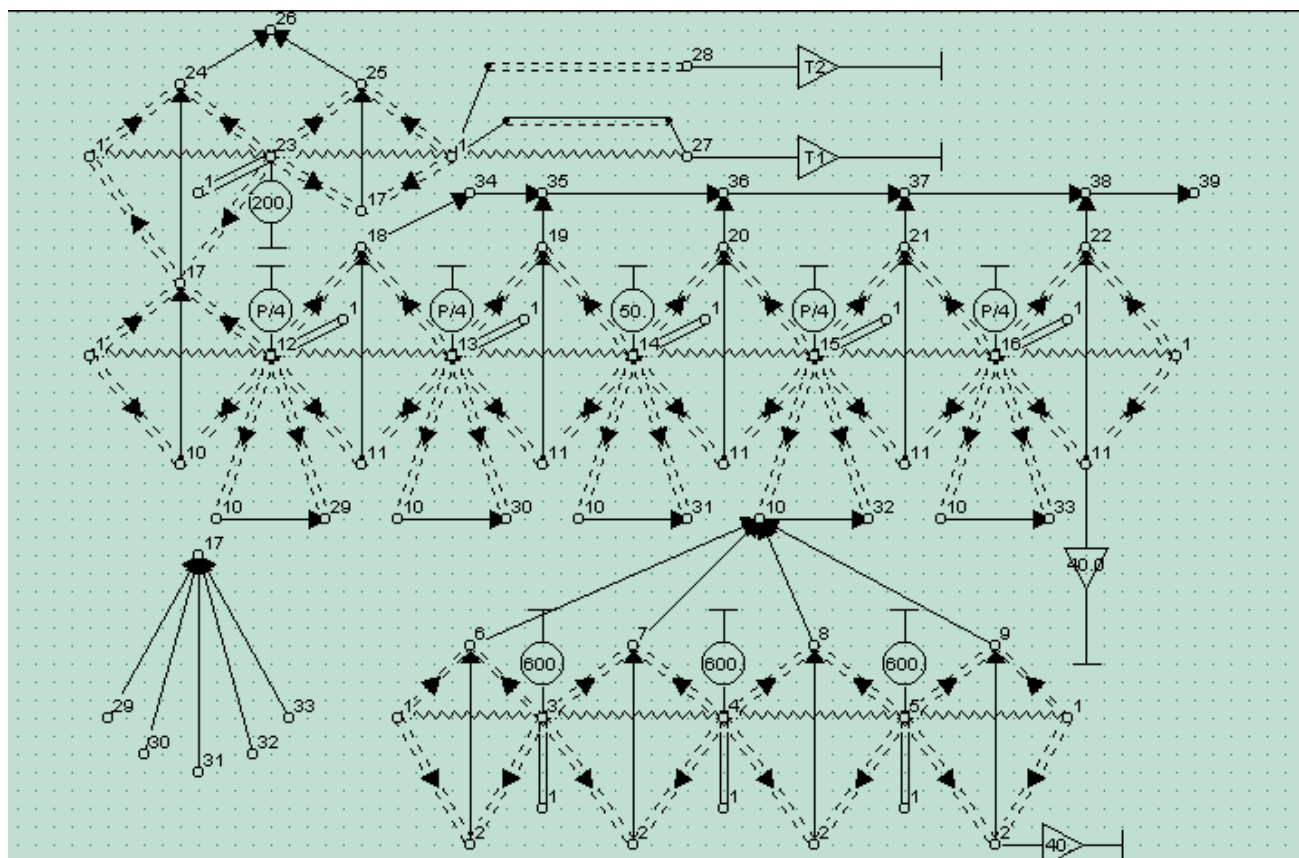


Рис. 2.31. Структура топологической МТП стойки усилителей

Таким образом, приведенная МТП позволяет исследовать тепловые характеристики стойки для стационарного теплового режима на уровне интегральных температур, входящих в ее состав блоков с учетом схемы распространения воздушных потоков внутри корпуса стойки.

2.6.6. Применение симметрии

В процессе разработки и анализа МТП проектировщик может сталкиваться с графами МТП, состоящими из совокупности однотипных фрагментов, имеющих идентичные структуры и параметры. В этом случае в графе МТП присутствуют узлы, имеющие одинаковые значения потенциальных переменных (температур). В эквивалентной электрической цепи (см. [параграфы 2.1, 2.2](#)) такие узлы являются эквипотенциальными. В ветвях МТП, соединяющих такие узлы, значение потоковых переменных (тепловых потоков) будут нулевыми, что будет соответствовать отсутствию тока в аналогичных участках эквивалентной электрической цепи. Указанные ветви могут быть разорваны, а анализ МТП, их содержащей, может сводиться к анализу одного из ее составных фрагментов с учетом некоторых особенностей, которые рассмотрим ниже на ряде примеров.

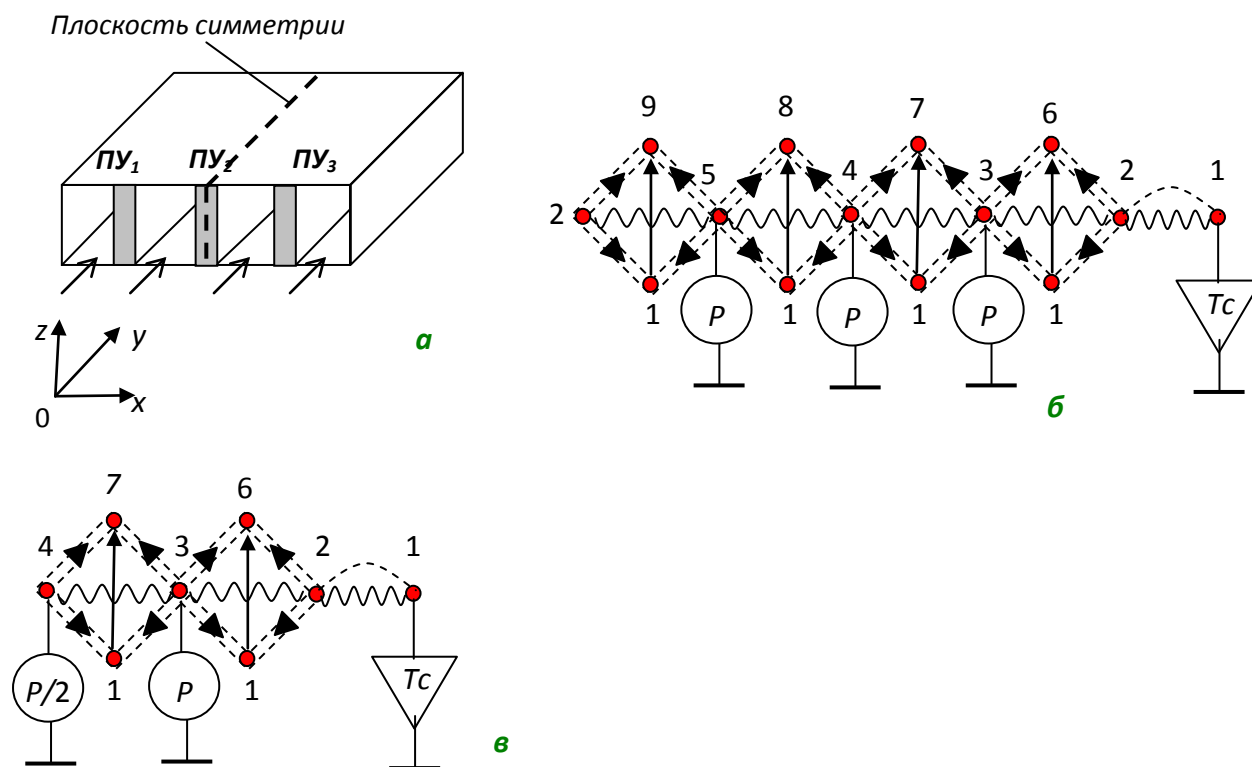


Рис. 2.32. МТП блока кассетной конструкции: а – эскиз конструкции с тремя печатными узлами; б – полная МТП; в – упрощенная МТП; г – эскиз конструкции блока с двумя печатными узлами; д – упрощенная МТП (правый фрагмент)

На [рис. 2.32, а](#) приведен эскиз продуваемого блока кассетной конструкции, в состав которого входит три печатных узла ПУ₁–ПУ₃ с одинаковыми мощностями тепловыделения. Размеры каналов, образованных печатными узлами в блоке, являются одинаковыми, и соответственно, скорости воздушных потоков в них также имеют одинаковые значения. Выполним идеализацию рас-

смаатриваемой конструкции с точки зрения протекания в ней тепловых процессов:

- печатные узлы представим в виде условно нагретых зон;
- исключим из рассмотрения элементы крепления печатных узлов к корпусу блока;
- корпус блока будем считать изотермичным.

С учетом принятых допущений на [рис. 2.32, б](#) приведен граф МТП блока. Узлы (вершины) приведенного графа моделируют: 1 – окружающую среду; 2 – корпус блока; 3–5 – печатные узлы; 6–9 – воздушные потоки на выходе каналов; P – мощность тепловыделения в печатном узле ($P_1 = P_2 = P_3 = P$); T_c – температура окружающей среды (воздуха). Обозначение ветвей в графе МТП выполнено в соответствии с [табл. П2.1](#).

Проведя секущую плоскость симметрии параллельно плоскости yOz посередине печатного узла $ПУ_2$ (см. [рис. 2.32, а](#)), можно МТП блока (см. [рис. 2.32, б](#)) разделить на два одинаковых фрагмента. Рассмотрим правый фрагмент, представляющий собой упрощенную модель блока ([рис. 2.32, в](#)), которая будет иметь следующую нумерацию узлов: 1 – окружающая среда и воздушный поток на входе в каналы конструкции; 2 – корпус блока; 3 – правый ПУ; 4 – средний ПУ ($ПУ_2$); 5, 6 – воздух на выходе каналов, образованных печатными узлами и корпусом блока. Особенность упрощенной МТП блока заключается в том, что плоскость симметрии yOz проходит через средний ПУ, и его мощность тепловыделения делится пополам между правым и левым фрагментами МТП.

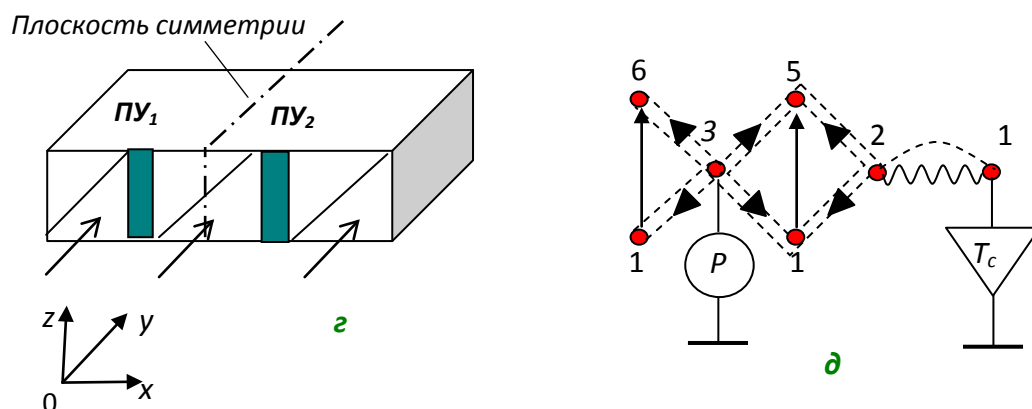


Рис. 2.32. Окончание

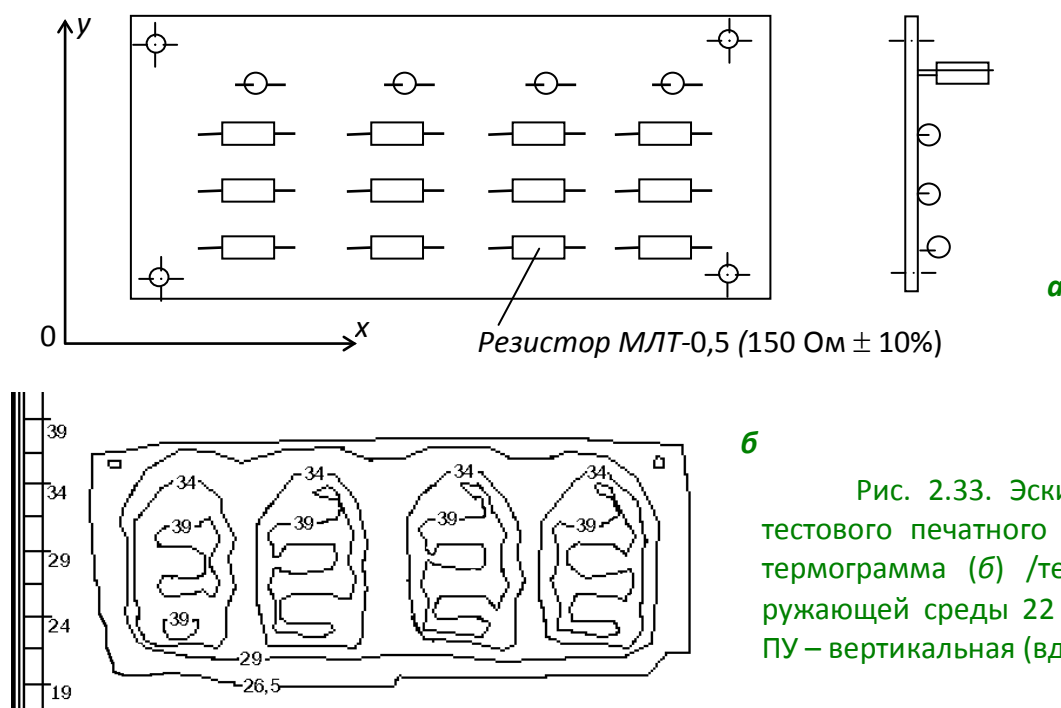
Рассмотрим блок аналогичной конструкции, но с двумя печатными узлами (см. [рис. 2.32, г](#)). Секущую плоскость симметрии, параллельную плоскости yOz , проведем, в данном случае, посередине между печатными узлами. При этом, как и в предыдущем случае, МТП блока можно разделить на два одинаковых фрагмента. Правый фрагмент МТП приведен на [рис. 2.32, д](#). В данном случае, из-за того, что плоскость симметрии разделила канал пополам,

площадь сечения канала изменится и, соответственно, скорректируются параметры ветви 1–6, моделирующей теплоперенос в канале (см. ветвь 71-го типа в табл. П2.1), и ветвей 3–1, 3–6, отражающих конвекцию в воздушный канал (см. ветвь 61-го типа в [табл. П2.1](#)). Кроме этого, в рассматриваемом случае исключаются ветви, отражающие в МТП излучение. Указанная особенность объясняется тем, что другая половина канала относится к другому (левому) фрагменту МТП блока. В рассматриваемом случае исключаются также ветви, отражающие излучение.

Для представленных на [рис. 2.32, в](#) и [2.32, д](#) МТП следует выполнить перенумерацию узлов, используя принцип сквозной нумерации. Так, для фрагмента МТП, приведенного на [рис. 2.32, б](#), следует вместо номеров 5 и 6 ввести номера 4 и 5.



Таким образом, рассмотренные выше преобразования позволяют в 2 раза сократить размерность МТП.

Рассмотрим теперь объект, имеющий две плоскости симметрии. К таким объектам можно отнести плоские конструктивные узлы РЭА типа печатного узла, функциональной ячейки или бескорпусной микросборки. Так, например, ПУ может иметь большие линейные размеры, а ЭРЭ, установленные на нем, могут иметь одинаковый тип, рассеивать одинаковую мощность и находиться в идентичных условиях охлаждения (граничные условия на каждой плоскости печатного узла являются идентичными). Это, в свою очередь, приводит к появлению однотипных участков на температурном портрете ПУ. Так, на [рис. 2.33](#) приведен температурный портрет тестового печатного узла, полученного при помощи тепловизора КРИТ-Т с тепловизионной камерой «Радуга». Как видно из рисунка, температурный портрет имеет 4 однотипных участка, которые определяются схемной локализацией групп ЭРЭ на НК ПУ. В каждой группе ЭРЭ применяются три варианта их установки.



б

Рис. 2.33. Эскиз конструкции тестового печатного узла (а) и его термограмма (б) /температура окружающей среды 22 °С, ориентация ПУ – вертикальная (вдоль оси Oy)/

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 110 |
|---|---|--|---|------------|

Рассмотрим печатный узел, эскиз которого приведен на [рис. 2.34, а](#). Предполагается, что печатный узел устанавливается в блок этажерочной конструкции на место ПУ₁. Процесс формирования МТП печатного конечной структуры МТП (см. [рис. 2.34, в, г](#)) выделенного на [рис. 2.34, а](#) фрагмента ПУ (см. [рис. 2.34, б](#)). Полный граф топологической МТП печатного узла будет состоять из размноженного фрагмента МТП ([рис. 2.34, в, г](#)) по оси Охтроекратно, а по оси Оудвукратно.

Как видно из [рис. 2.34, в, г](#), граф топологической МТП имеет симметричный вид. В качестве осей симметрии можно выделить середины ветвей 1–2, 1–3, 3–4 и 4–2. При этом в эквивалентной приведенному фрагменту МТП электрической цепи (см. [параграфы 2.1, 2.2](#)) узлы 1–4 будут эквипотенциальны (в МТП – изотермичны), т. е. по цепям 1–2, 1–3, 3–4 и 4–2, как отмечалось выше, ток (для МТП – тепловой поток) течь не будет. В связи с этим указанные цепи (в МТП – ветви) можно удалить, и граф топологической МТП распадется на четыре симметричных фрагмента (см. [рис. 2.34, д](#)). В результате такого преобразования можно вести анализ только одного фрагмента, а не четырех. Таким образом, количество узлов графа топологической МТП резко уменьшается (вырождается).

Рассмотренный граф топологической МТП ([рис. 2.34, в, г](#)) может быть также рассмотрен как результат вырождения полной МТП ПУ. Если дискретизационная сетка делит каждый элемент дополнительно на 4 части, как это показано на [рис. 2.34, б](#) для DD₁, то параметры МТП, приведенной на [рис. 2.34, д](#), могут быть дополнительно преобразованы. Так, значение источника мощности принимается равным $\frac{1}{4} P_1$, площади теплоотдачи с узлов 1, 2 уменьшаются в 4 раза, значения тепловых сопротивлений (ветви 1–2 и 2–3) увеличиваются в четыре раза и т. д.

Если в качестве окончательного преобразования полной МТП печатного узла принять фрагмент МТП, приведенный на [рис. 2.34, в, г](#), то МТП сократится в 6 раз, а если фрагмент, приведенный на [рис. 2.34, д](#), то полная МТП сократится в 24 раза. В общем случае синтез структуры МТП КУ, основанный на симметрии, можно представить в виде:

$$M_{KY}^T = \bigcup_{j=1}^{m_y} \left[\bigcup_{i=1}^{m_x} M_F^T(i) \right]_j, \quad (2.2)$$

где m_y , m_x – число разложения (объединения) фрагмента M_F^T МТП КУ (M_{KY}^T) по осям Оу и Ох.

Для рассмотренного выше случая при применении в качестве M_F^T МТП, приведенной на [рис. 2.34, в](#), $m_x = 3$, $m_y = 2$, а для МТП на [рис. 2.34, д](#) – $m_x = 6$, $m_y = 4$.

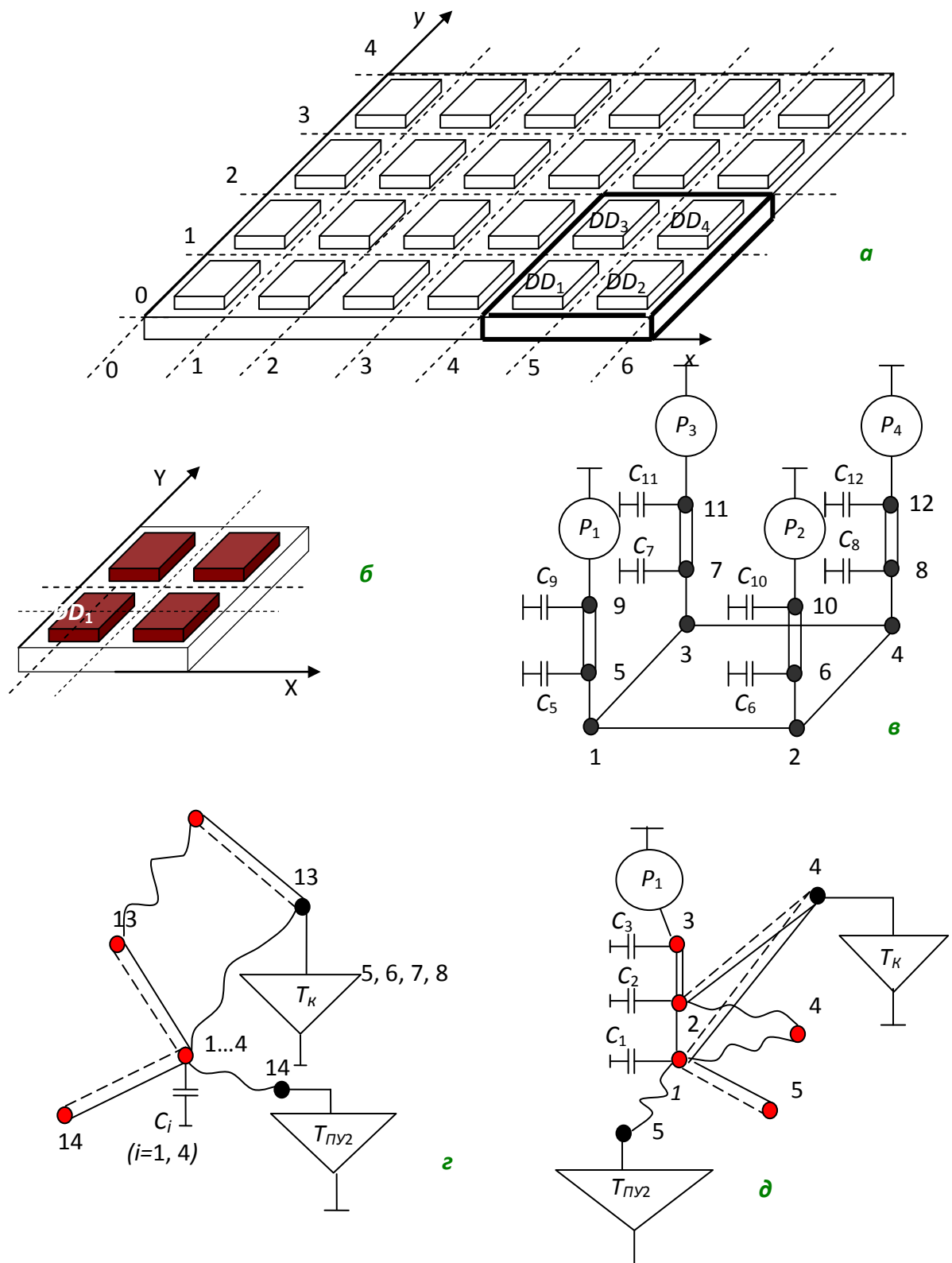


Рис. 2.34. Граф топологической МТП печатного узла, сформированной на основе симметрии: $T_{ПУ2}$ – интегральная температура печатного узла ПУ₂; T_K – температура корпуса блока

При анализе сокращенных (вырожденных) МТП ПУ и ФЯ, в случае наличия в них ветвей 26-го, 51-го и 61-го типов, следует в качестве определяющего размера l_0 брать размер, характеризующий не отдельный дискрет НК, а всю НК целиком. Для ветвей 61-го типа значение параметра l_x вычисляется в зависимости от местоположения рассматриваемого фрагмента на КУ вдоль направления продува хладоносителя. В этой связи следует анализировать полученный в результате вырождения фрагмент МТП для различных участков канала.

Теперь рассмотрим объект, имеющий три плоскости симметрии. Таким объектом может быть куб (см. [рис. 2.35, а](#)), находящийся в окружающей среде T_c и имеющий общую мощность тепловыделения P . Приведенный куб может на практике представлять, например, конструктивный узел или несколько конструктивных узлов, залитых компаундом. Куб имеет три плоскости симметрии xOy , zOx , zOy .

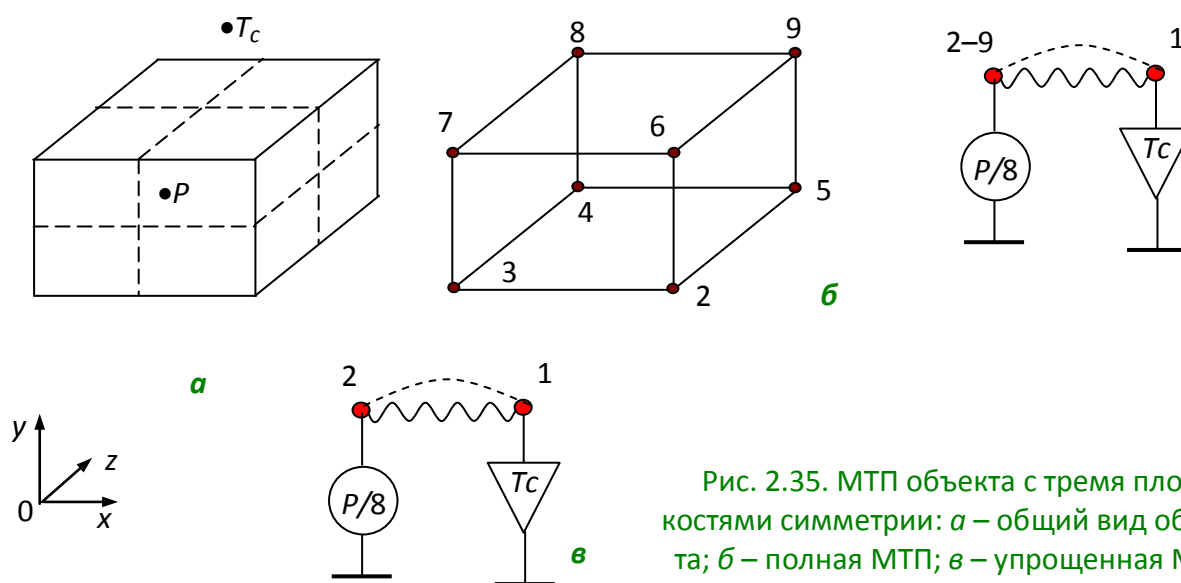


Рис. 2.35. МТП объекта с тремя плоскостями симметрии: а – общий вид объекта; б – полная МТП; в – упрощенная МТП

Для построения полной МТП разобьем куб сеткой $2 \times 2 \times 2$. На [рис. 2.35, а](#) сетка показана пунктирной линией. Далее условно распределим общую мощность тепловыделения P между получившимися в результате разбиения сеткой объемами. Таким образом, в каждом объеме будет выделяться мощность, равная $P/8$. Исходя из разбиения, сформируем МТП объекта, структура которой приведена на [рис. 2.35, б](#). В приведенной МТП 1-й узел моделирует окружающую среду, а узлы 2–9 – объемы, получившиеся в результате разбиения куба сеткой. Используя плоскости симметрии, можно перейти от полной МТП к его упрощенной форме (см. [рис. 2.35, в](#)), что позволяет уменьшить число узлов мо-

дели куба с 8 до 1. В результате получаем кратность, равную 2^3 раз или, в общем виде, 2^n , где n – число плоскостей симметрии.



В целом процесс применения симметрии для формирования МТП можно формализовать и распространить на конструкции РЭА любой сложности с точки зрения их иерархического построения. В обобщенном виде формализация приводит к выполнению следующих процедур:

1. Анализ исследуемой конструкции РЭА с точки зрения особенностей протекания в ней тепловых процессов.
2. Декомпозиция конструкции на ее составные иерархические уровни.
3. Выявление возможностей применения симметрии на каждом уровне иерархии, а также анализ особенностей, которые необходимо учитывать при вырождении структуры графа МТП.
4. Синтез МТП конструктивных узлов и/или конструкции в целом с учетом симметрии для выявленных возможностей и особенностей симметрии.
5. Исследование тепловых характеристик РЭА на основе синтезированных МТП.

Рассмотренный в данном параграфе подход к сокращению МТП целесообразно применять в ходе проектных исследований, в результате которых вырабатываются принципиальные решения в части конструкторско-технологической реализации РЭА. При более детальной проработке проекта необходимо либо автоматизировать описанный выше подход, либо после свертки МТП и ее анализа снова переходить к полной МТП с целью отображения результатов моделирования на геометрической модели исследуемой конструкции РЭА, а также для комплексного исследования характеристик РЭА.

2.6.7. Параметризации топологических моделей тепловых процессов

При описании параметров топологических моделей в ПК ТриАНА первичные параметры тепловых моделей могут описываться не в числовом виде, а в виде функций, аргументами которых являются параметры (буквы, математические выражения и т. п.), на основе которых вычисляются числовые значения. Такие модели рекомендуется хранить в библиотеках в виде типовых структур. Осуществляя сборку таких структур в общую композицию, можно значительно повысить эффективность поискового проектирования, когда исследуются тепловые процессы в сложноформализуемых конструкциях РЭА. В ПК ТриАНА реализован метод параметризации топологических МТП, реализующий описанный выше подход. Обобщенная схема метода приведена на [рис. 2.36](#). Таким обра-

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 114 |
|---|---|--|---|------------|

зом разработанные проектировщиком РЭА топологические модели имеют параметрическое описание. Такое описание, как отмечалось выше, позволяет постоянно хранить созданные структуры, соединять их в различные композиции, а после этапа геометрического моделирования конкретного узла или всей конструкции РЭА (E_s), используя значения ее первичных параметров, переходить к автоматическому вычислению необходимых компонентов топологических моделей на основе используемых функций ($\varphi_i, i=1, n$), выступающих в параметрическом описании структур графовых моделей вместо числовых значений.

Как видно из схемы метода, определенное конструкторско-технологическое решение РЭА с точки зрения обеспечения тепловых характеристик теплового или механического процессов может быть представлено в виде совокупности определенных фрагментов структур моделей (фрагментов моделей, макромоделей и моделей в целом) теплового процесса с их параметрическим описанием (G^T). Структура общей (результатирующей) модели может собираться из различных фрагментов, что позволяет разработчику исследовать характеристики тепловых процессов сложных нетиповых конструкций РЭА, состоящих из множества типовых конструктивных узлов и конструктивных элементов. «Сборка» таких моделей может осуществляться при помощи дополнительных компонентов $(G^T \cup g_{don}^T)$ топологических моделей, имеющих также параметрическое описание.

На [рис. 2.37](#) приведен пример параметризованной модели тепловых процессов функциональной ячейки (ФЯ), устанавливаемой через теплосток на теплоотводящее основание с водяным охлаждением. На [рис. 2.37, а](#) приведены функции, описывающие параметры ветви 2–14 (по аналогии описываются ветви 1–14 и 3–14), моделирующей процесс теплового излучения, а на [рис. 2.37, б](#) – значения аргументов функций, определяющих геометрические и теплофизические параметры исследуемой, с точки зрения тепловых процессов, конструкции. Приведенную на [рис. 2.37](#) модель ФЯ целесообразно представлять в виде библиотечного элемента для дальнейшего многократного использования в процессе моделирования тепловых процессов.

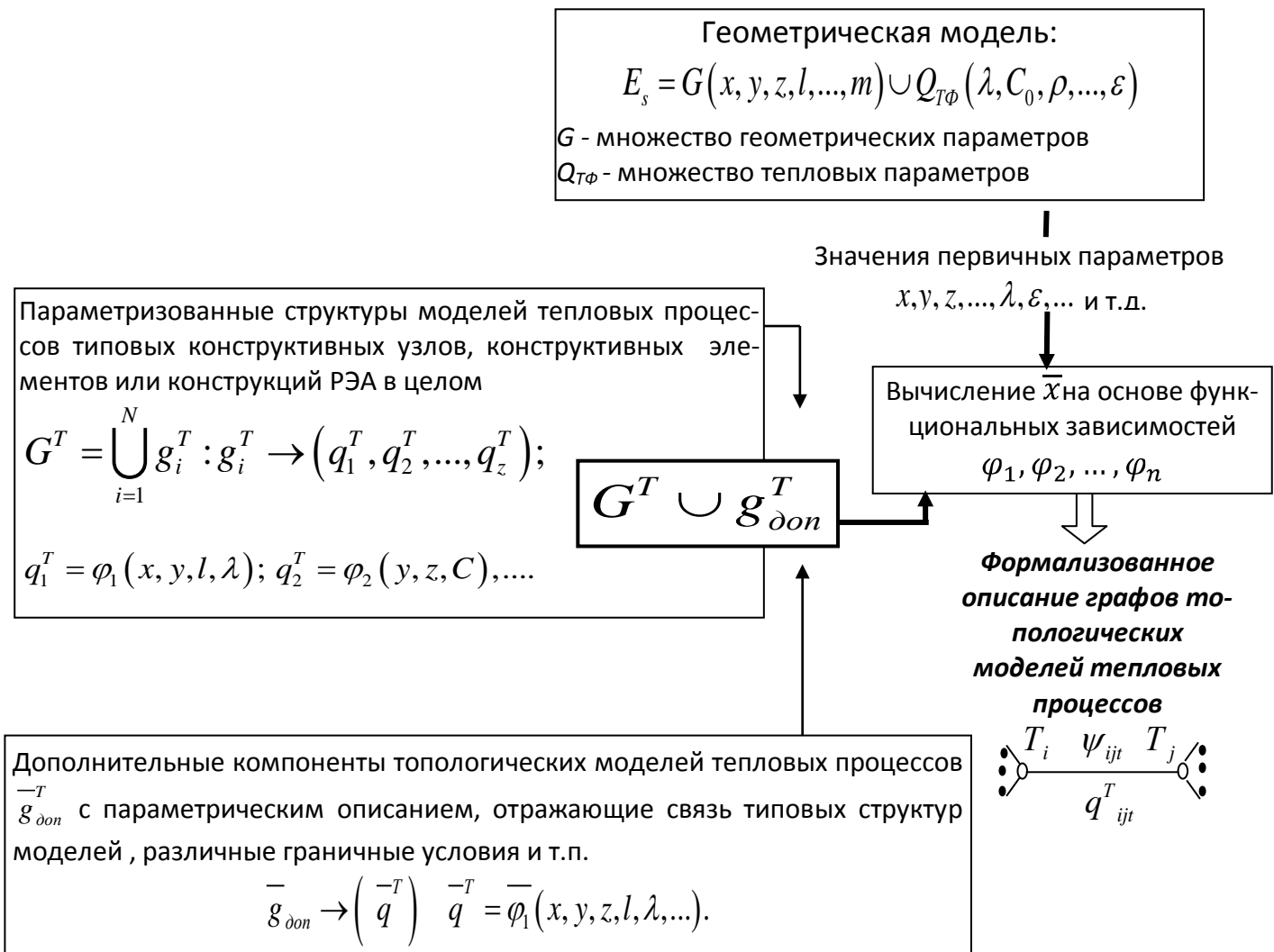


Рис. 2.36. Схема метода параметризации топологических моделей тепловых процессов: $x, y, z, l, \dots, \lambda, C_0, \rho, \dots, \varepsilon$ – первичные параметры, описывающие геометрию и физические свойства конструкции РЭА; G^T – граф топологической модели тепловых процессов; g^T – составные типовые фрагменты графов топологических моделей; \bar{q}^T – параметры ветвей топологических моделей

Таким образом, предложенный подход позволяет синтезировать структуры моделей тепловых процессов, отражающие как локальные конструкторско-технологические решения, так и реализацию конструкций РЭА в целом. При этом описание компонентов таких моделей, число которых может достигать 500–1000 и более, осуществляется в автоматическом режиме по результатам геометрического моделирования. Это, в свою очередь, позволяет автоматически вносить изменения в параметры моделей тепловых процессов через эскиз конструкции (E_s), первичные параметры которого (G и $Q_{ТФ}$) изменяются в процессе обеспечения характеристик определенного теплового процесса средствами математического моделирования. Примеры параметризации приведены в главе 4.

2.7. Подготовка информации средствами текстового редактора

Исходные данные для моделирования (в случае автономного использования математического ядра ПК **triana.exe**) подготавливаются в виде файла с помощью любого текстового редактора. Созданные файлы данных пользователь может в дальнейшем использовать в качестве шаблонов при подготовке новых файлов данных.

Замечание. В данном документе обозначение типа <блок> следует понимать «блок» – символьная или цифровая информация, а скобки <> служат для выделения этой информации из текста данного документа в целях наглядности.

Пример:

<ТАВ> ! обозначение в данном
 <*> ! документе
ТАВ ! **должно быть написано**
***** ! **в исходных данных.**

Исходная информация в файле условно делится на 4 части:

1. Ключевая управляющая информация.
2. Описание ветвей МТП.
3. Описание таблиц.
4. Описание параметров интегрирования и начальных условий.

Первая часть имеет фиксированное количество строк. Остальные состоят из строк параметров, количество которых определяется количеством ветвей МТП.

2.7.1. Ключевая информация

Запись ключевой информации начинается **с информационной строки**. В такой строке Вы можете записать все, что хотите. Часто пользователи записывают здесь цель расчета и название (децимальный номер или обозначение) прибора, тепловой режим которого моделируется.

За информационной строкой следуют четыре строки с ключевыми словами и числами. Числа (целый тип) записываются в специальных зонах, которые располагаются в следующей последовательности:

Типк=<xx>

Типр=<xx>

Фпч =<00>

Тест =<xx>.

В первой строке пользователь должен записать тип анализируемой конструкции:

01 – нетиповая конструкция (пользователем разрабатывается МТП).

Во второй строке указывается тип проводимого анализа. В данной версии программы возможны следующие типы анализа:

01 – анализ **стационарного** теплового режима;

02 – анализ **стационарного** теплового режима;

03 – анализ **нестационарного** теплового режима;

04 – анализ **нестационарного** теплового режима.

В третьей строке указывается необходимость расчета функций параметрической чувствительности (в данной версии программы не реализовано).

В четвертой строке указывается код необходимой тестовой информации или выдачи промежуточных результатов:

ТЕСТ=10 – работа математического ядра *Triana* в комплексе с другими программными единицами ТРИАНА;

ТЕСТ=11 – генерация дополнительного файла с отладочной информацией (файлы с расширением «*debug*») при установке кода Типк=01. Список сокращений, используемых в файлах с расширением «*debug*», приведены в [табл. 2.3](#). Файлы с расширением «*debug*» кроме отладочной информации содержат информацию аналогичную файлам с расширением «*rez*».

ТЕСТ=12 – генерация файла (см. [рис. 2.38](#)), содержащего протокол ошибок (файл с расширением «**.err*»). Такой файл содержит информацию о недопустимых и некорректных значениях параметров в файле данных.

Текстовый файл с расширением «*.err» формируется в результате анализа файла данных математическим ядром и записывается в тот же каталог, в котором находится файл данных (файл с расширением «*.dat»). В случае обнаружения математическим ядром в файле данных критических ошибок пользователю выдается сокращенный анализ ошибок и в конце файла «*.err» – сообщение о прекращении работы математического ядра *triana*. В случае обнаружения в файле данных некорректных параметров в протокол ошибок заносится предупреждающее сообщение, и расчет продолжается. Причем, в зависимости от типа проверяемого параметра, может приниматься значение по умолчанию, либо формироваться уведомление о возможном некорректном значении вводимого параметра, после чего работа математического ядра будет продолжена.

Программа triana. Протокол ошибок начат: MonMay 3 17:38:18 2004

Анализируемый файл данных: C:\11\Data1.dat

КРИТИЧЕСКАЯ ОШИБКА N:0001 !!!

 Номера узлов подключения ветви 00001 должны быть различными

(Уз.1= 00001; Уз.2= 00001; Тип=0005)

ПРОГНОЗИРУЕТСЯ АВАРИЙНОЕ ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ triana

КРИТИЧЕСКАЯ ОШИБКА N:0002 !!!

 Значение внутреннего диаметра цилиндра в ветви 00001 больше внешнего

(Уз.1= 00001; Уз.2= 00001; Тип=0005)

ПРОГНОЗИРУЕТСЯ АВАРИЙНОЕ ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ Triana

Предупреждение N:0001

 Значение степени черноты поверхности в ветви 00012 равно 0.00

(Уз.1= 00003; Уз.2= 00001; Тип=0016)

Ввод значения по умолчанию

... Значение степени черноты поверхности принимается равным 0.8

 Программа triana. Протокол ошибок закончен: MonMay 3 17:38:18 2004.

Обнаружено: критических ошибок– 2; предупреждений– 1

Обнаружены критические ошибки. Работа программы triana прекращена!

Рис. 2.38. Пример структуры файла «*.err»

Таблица 2.3

Сокращения, используемые в файлах с расширением «debug»

| № п/п | Сокращенное обозначение параметров | Пояснение |
|-------|------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. | TIPV | Тип и разновидность ветви (определяет тип теплообмена) |
| 2. | UZ1-UZ2 | 1-й и 2-й узлы подключения ветви в топологической модели тепловых процессов |
| 3. | Provodim | Проводимость ветви, Вт/К |
| 4. | 1-m | Параметр, определяемый чистотой обработки контактирующих поверхностей |
| 5. | S_{сечения} | Площадь сечения теплового потока, м ² |
| 6. | L | Длина теплового потока, м |
| 7. | Lam эффект. | Эффективный коэффициент теплопроводности слоистой структуры, Вт/м/К |
| 8. | b | Аппроксимирующий коэффициент |
| 9. | Lam привед. | Приведенный коэффициент теплопроводности, Вт/м/К |
| 10. | PRf | Проводимость через фактический контакт Вт/К |
| 11. | 1-m | Коэффициент, определяющий чистоту обработки поверхности ($m=0,33$ – точение, $m=0,5$ – шлифование, $m=0,66$ – полирование) |
| 12. | bt | Эквивалентная толщина прослойки, м |
| 13. | PRc | Проводимость через межконтактную среду |
| 14. | Уд. провод. | Удельная проводимость |
| 15. | ALFA | Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² /К |
| 16. | Alfa_K | Коэффициент теплоотдачи конвективный, Вт/м ² /К |
| 17. | Alfa_L | Коэффициент теплоотдачи лучистый, Вт/м ² /К |
| 18. | S | Общая площадь теплоотдающей поверхности, м ² |
| 19. | OBL | Коэффициент облучённости, отн.ед. |
| 20. | K черн. | Коэффициент черноты, отн.ед. |
| 21. | S пазов | Площадь пазов, м ² |
| 22. | S реб. | Площадь ребер, м ² |
| 23. | Tm | Средняя температура, °С |
| 24. | A | Коэффициент температуропроводности хладоносителя, м ² /с |
| 25. | Lamda | Коэффициент теплопроводности хладоносителя, Вт/м/К |
| 26. | Beta | Коэффициент объемного расширения хладоносителя, 1/К |
| 27. | NU | Коэффициент кинематической вязкости хладоносителя, м ² /с |
| 28. | Gr | Критерий Грасгофа |
| 29. | PR | Критерий Прандтля |
| 30. | Gr*Pr | Критерий Рэлея |
| 31. | Nus | Критерий Нуссельта |
| 32. | Эффект. ребра, | Эффективность ребра, отн.ед. |
| 32. | Ширина оребр. пов. | Ширина оребрённой поверхности, м |
| 33. | Re | Критерий Рейнольдса |

Окончание табл. 2.3

| 1 | 2 | 3 |
|-----|---------------|--|
| 34. | W | Скорость хладоносителя, м/с |
| 35. | DI | Текущая длина всего канала (зависит от номера участка канала), м |
| 36. | NUK | Номер участка канала (сквозная нумерация) |
| 37. | Dэкв | Эквивалентный диаметр канала, м |
| 38. | Gам | Поправочный коэффициент для <i>EPSL</i> |
| 39. | EPSL | Поправка на длину канала |
| 40. | EPSR | Поправочный коэффициент, учитывающий радиус изгиба осевой линии канала |
| 41. | Co | Теплоемкость хладоносителя, Дж/кг/К |
| 42. | Dавк | Поправка на давление хладоносителя |
| 43. | RO ср. | Средняя плотность хладоносителя, кг/м ³ |
| 44. | RO вх. | Плотность хладоносителя на входе в канал, кг/м ³ |

После ключевой информации записывается (в виде целого числа) *количество узлов МТП. Под количество узлов отводится три позиции. Число следует прижимать к правой границе.*

Например, МТП, имеющая 18 узлов, будет описана следующим образом:
18

Далее следует описание обозначений узлов. Описание начинается со строки с разметкой:

U111xx111xx

В полях разметочной строки записываются:

- в позиции «U» – пробел или знак «*», обозначающий конец описания обозначений узлов МТП;
- в позициях «111» - номер узла МТП;
- в позициях «xxxxxx xxx» – обозначение узла МТП (до 35 символов) /например «корпус блока», «трансформатор» и т. п./.

Запись обозначений узлов ведется построчно, в два столбца. Описание может выглядеть следующим образом:

.....



9

U111xx111xx

- | | | | |
|---|-----------------------|---|--------------|
| 1 | верхняя грань | 2 | нижняя грань |
| 3 | левая грань | 4 | правая грань |
| 5 | передняя грань | 6 | задняя грань |
| 7 | поверхность установки | 8 | Окр. Среда |
| 9 | печатный узел | | |

*

.....

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 122 |
|---|---|--|---|------------|

2.7.2. Описание параметров ветвей

Замечание. В процессе подготовки данных удобно использовать строки с разметкой полей в виде:

"11122233311111111112222222222333333333344444444445555555555..."

Такая строка позволяет пользователю не ошибаться при вводе числовых значений в последующих строках. «"» – знак комментария.

Каждая ветвь МТП описывается строкой параметров. По позициям параметры распределяются следующим образом:

позиции: **1**– служебная область, обычно содержит пробелы;

2...7 – номера узлов подключения ветви в виде целых 3-х значных чисел (**2–4**– 1-й узел ветви, **5–7**– 2-й узел ветви);

8...10 – тип ветви (целое 3-х значное число выбирается из [табл. 2.2.](#)).

Далее в строке записываются параметры ветвей в виде чисел с фиксированной точкой. На каждый параметр отводится 8 позиций (вид параметра и их число определяется по [табл. 2.2.](#)):

позиции:

11...20 – первый параметр;

21...30 – второй параметр;

31...40 – третий параметр;

41...50 – четвертый параметр;

51...60 – пятый параметр;

61...70 – шестой параметр;

71...80 – седьмой параметр;

81...90 – восьмой параметр;

91...100 – девятый параметр.

Если в первой позиции строки (в служебной области) стоит символ комментария <">, то такая строка игнорируется, но в этой строке не должно быть символов (**могут находиться только цифры**)! Такая строка может использоваться в качестве разметки. Строку с разметкой удобно располагать первой в списке ветвей.

Служебная область может содержать признак описания аналога: начало – <**A**> или конец – <**E**>.

Допустим, необходимо описать строки с ветвями, параметры которых аналогичны параметрам ветви 2-го типа, включенной между 1-м и 2-м узлами

(предполагается, что эта ветвь была описана ранее). Запись аналога в этом случае будет выглядеть следующим образом:

1 2 2 4.0 5.0 6.0 7.0

.....

A 1 2 2

7 8 2 6.0

3 4 2

6 9 2

E

Приведенная запись означает, что ветви **7–8**, **3–4**, **6–9** аналогичны ветви **1–2** 2-го типа. При этом в ветви **7–8** второй параметр отличен от второго параметра ветви **1–2** и равен 6.0, т. е. такой фрагмент будет эквивалентен следующей записи:

1 2 2 4.0 5.0 6.0 7.0

.....

7 8 2 4.0 6.0 6.0 7.0

3 4 2 4.0 5.0 6.0 7.0

6 9 2 4.0 5.0 6.0 7.0

В перечисленных выше зонах описания параметров ветвей записываются числовые значения соответствующих параметров с **фиксированной точкой**. Сдвиг числа вправо или влево в пределах этой зоны несущественен. Исключения из этого правила будут отмечаться особо. Можно также игнорировать поля записи чисел (если пользоваться правилами укороченного формата), если число меньше отводимого под него поля, то можно исключить пробелы, которые необходимо оставлять для соблюдения границ поля. Для этого после числа следует поставить запятую и рядом записывать следующее число. Например, необходимо ввести три числа: **10.52**, **1.50**, **0.85** по формату F10.2 (символ <_> означает пробел).

1-й вариант: 111111111122222222223333333333



__10.52__1.50__0.85

2-й вариант: 111111111122222222223333333333 ! укороченный

10.52, 1.50, 0.85 ! формат

При описании ветвей МТП, моделирующих температуры, мощности или теплоемкости (см. [табл. 2.2](#)), одному из узлов включения ветви присваивается нулевой номер.

Окончание списка описания ветвей отмечается в последней строке (следует за строкой описания последней ветви) символом <*>.

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 124 |
|---|---|--|---|------------|

2.7.3. Описание таблиц

Каждая таблица, применяемая при задании источников мощности (ветвь 103-го типа), источников температуры (ветвь 113-го типа) или теплоемкостей (ветвь 123-го типа) /см. [табл. 2.2/](#), описывается следующим образом. Сначала указывается ключевое слово и номер таблицы, затем располагаются значения функции и аргумента, и завершает описание ключевое слово конца таблицы.

Первая строка:

позиции: **1...4** – ключевое слово 'ТАВ.'

5...6 – номер таблицы.

Далее идут строки описания точек таблицы. Каждая строчка описывается следующим образом:

позиции: **1**– служебная;

2...11 – значение аргумента (времени) по формату E10.3;

12 – разделитель (любой символ);

13...22 – значение функции (значение **T**, **P** или **C**) по формату E10.3.

Последняя строка описания таблицы:

позиции: **1** – признак конца описания таблицы <E>.

Последняя строка описания всех таблиц:

позиции: **1** – признак конца описания всех таблиц <*>.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Требуется описать таблицу с номером 1, в которой содержится пять точек: (0,0), (1,1), (2,2), (3,3), (4,4). Это будет выглядеть следующим образом:

ТАВ.01

+0.000e+00:+0.000e+00

+0.100e+00:+1.000e+00

+0.200e+00:+2.000e+00

+0.300e+00:+3.000e+00

+0.400e+00:+4.000e+00

E

В приведенной выше записи представлены: 'ТАВ.' – ключевое слово, '01' – номер таблицы, 'E' – ключевое слово конца таблицы.

Пример 2.



ТАВ.01

+0.000e+00:-0.100e+00

+0.100e+00:-0.300e+00

+0.400e+00:-0.700e+00

E

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 125 |
|---|---|--|---|------------|

ТАВ.02

+0.000e+00:-0.900e+00
 +0.200e+00:-0.800e+00
 +0.300e+00:-0.700e+00
 +0.400e+00:-0.600e+00
 +0.600e+00:-0.700e+00
 +0.700e+00:-0.800e+00
 +0.800e+00:-0.900e+00

Е
*

В этом примере описаны 2 таблицы – 1 и 2. В первой – 3 точки, а во второй – 7. Левые числа – это значения аргумента (чаще всего это время), а правые – значения функции (чаще всего это значение мощности тепловыделения или температуры).

Ограничения на описания таблиц следующие: максимальное число таблиц – 5; максимальное число точек в таблице – 20.

Замечание.

Если Вы случайно нарушите указанные ограничения, ничего страшного не произойдет: программа проигнорирует лишнюю (для нее!) информацию с выдачей сообщения и произведет расчет. Получив такое сообщение, Вы должны проанализировать ситуацию. Если произошло усечение таблицы, то это не так страшно – Вы должны уменьшить число точек в таблице; если же проигнорирована таблица, то здесь возможны серьезные ошибки, так как программа не будет находить требуемые таблицы.

Если текущее время работы меньше диапазона времени, описываемого таблицей, то принимается значение функции, равное значению функции в первой точке таблицы, а если текущее время работы больше этого диапазона, то значение функции – в последней точке таблицы.

Предположим, что Вы задали начальное время работы, равное 0 с, конечное время работы, равное 100 с, и таблицу, описанную следующим образом:

ТАВ.05

+0.100e+00:+0.100e+01
 +0.200e+02:+0.200e+01
 +0.900e+02:+0.300e+01

Е

Тогда в диапазоне времени от 0 до 1 с значение функции будет равно 1, а от 90 до 100 с – 3.

Если текущее время точно не равно одной из заданных точек, то значение функции в это время определяется путем линейной интерполяции по двум точкам, между которыми находится текущее время.

2.7.4. Начальные условия

Начальные условия можно использовать как при расчете стационарного, так и нестационарного теплового режима. В первом случае они определяют начальное приближение при решении *СНАУ*, а во втором случае являются начальными условиями для решения *СОДУ*.

В программе существует два способа задания начальных условий:

1. Начальные условия задаются для каждого узла в отдельности при помощи ветви типа 0, первым и единственным параметром которой является значение температуры в начальный момент времени (начальное приближение для решения *СНАУ*).

2. Начальные условия задаются в списке параметров интегрирования (когда нужно задать одинаковые начальные условия во всех узлах МТП).

Замечание.

Перечисленные способы задания начальных условий взаимоисключают друг друга, т. е., если Вы задаете начальные условия при помощи ветви типа 0, то должны задать температуры во всех узлах (иначе в узлах, где начальная температура не была задана, берется ее значение по умолчанию – +25 °С). Если же вы не пользуетесь ветвью типа 0 или начальными условиями по умолчанию, то обязательно должны задать начальную температуру в параметрах интегрирования (если ее не задать, начальные условия будут нулевыми).

Пример. Задать начальные условия в узлах МТП №№ 1, 2, 5 – +60 °С, а в узлах 3, 4 – +77 °С. Это будет выглядеть так:

```
1 0 0 60.
2 0 0 60.
3 0 0 77.
4 0 0 77.
5 0 0 60.
```

Параметры интегрирования записываются в файле следующим образом:
первая строка:

позиции: 1...24 – <начальное время работы>;

25..34 – начальное время работы по формату E10.3;

вторая строка:

позиции: 1...24 – <конечное время работы>;

25...34 – конечное время работы по формату E10.3;

третья строка:

позиции: 1...24 – <точность интегрирования>;

25...34 – точность интегрирования по формату E10.3;

четвертая строка:

позиции: 1...24 – <минимальный шаг интегрирования>;

25...34 – минимальный шаг интегрирования по E10.3;

пятая строка:

позиции: 1...24 – <максимальный шаг интегрирования>;

25...34 – максимальный шаг интегрирования по E10.3;

шестая строка:

позиции: 1...24 – <начальная температура>;

25...34 – начальная температура по формату E10.3.

Для стационарного теплового режима параметры интегрирования можно не задавать, а оставить в файле **6** пустых строк.

Полный список параметров интегрирования выглядит следующим образом:



| | |
|--------------------------------|-------------------|
| начальное время работы | +0.000e+00 |
| конечное время работы | +0.100e+03 |
| точность интегрирования | +0.100e-05 |
| минимальный шаг | +0.100e+01 |
| максимальный шаг | +0.100e+02 |
| начальная температура | +0.100e+02 |

Начальное и конечное время (в секундах) работы РЭА определяют интервал, в котором производится определение температуры во всех узлах модели тепловых процессов.

Минимальный и максимальный шаги интегрирования служат для управления процессом интегрирования. Максимальный шаг служит для ограничения на шаг интегрирования сверху (если Вы желаете проинтегрировать интервал быстро, т. е. быстро получить результат, пусть даже не совсем точно). Минимальный шаг служит для ограничения шага интегрирования снизу (если Вы хотите проинтегрировать интервал довольно точно, пусть даже не быстро). Обычно эти шаги назначаются на основе общего анализа тепловых процессов, протекающих в РЭА, и опыта расчетов при помощи данной программы.

Как Вы, наверное, заметили, существует еще такой параметр, как точность расчета. Практически три параметра – точность, минимальный и максимальный шаги – тесно связаны между собой. Очень трудно дать какие-либо числовые рекомендации по выбору этих параметров. Мы советуем Вам всегда пользоваться точностью, равной 1.e-5. С шагами Вы тоже можете поступить очень просто – задать их равными (т. е. интегрирование будет идти с постоянным шагом). При этом Вы вряд ли ошибетесь, так как тепловые процессы не являются быстроизменяющимися.

Пример фрагмента файла данных, подготовленного по вышеописанной методике, приведен на [рис. 2.39](#).

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 129 |
|---|--|---|------------|

2.8. Подготовка информации при помощи графического редактора *MTPEditor*

При использовании графического редактора программа *MTPEditor.exe* пользователю предоставляется возможность сформировать граф топологической МТП в графическом режиме. Программа *MTPEditor* в конечном итоге создает файл данных, аналогичный по структуре файлу, приведенному на [рис. 2.39](#), но при этом предоставляет пользователю дополнительные возможности:

- **выполнять привязку изображения объекта к графу топологической МТП;**
- **выполнять параметрическое описание компонентов МТП;**
- **формировать фрагменты МТП или целые МТП с параметрическим описанием и библиотечной организацией хранения.**

После запуска ПК *TRuANA* появляется папка, содержащая компоненты ПК, включенные в его состав в процессе инсталляции ([рис. 2.40](#)). Запуск программы *MTPEditor* сопровождается появлением стилизованной заставки ([рис. 2.41](#)), после чего на экране разворачивается основное и вспомогательное меню, состоящее из компонентов визуального интерфейса. Основные элементы визуального интерфейса представлены на [рис. 2.42](#).

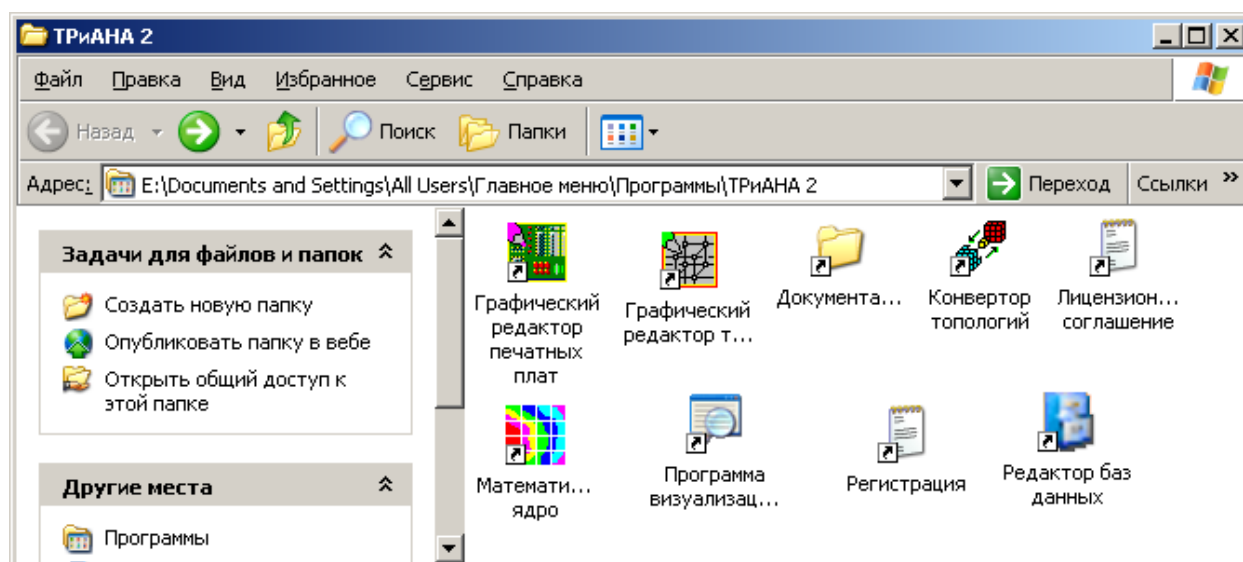


Рис. 2.40. Компоненты, находящиеся в папке *TRuANA*

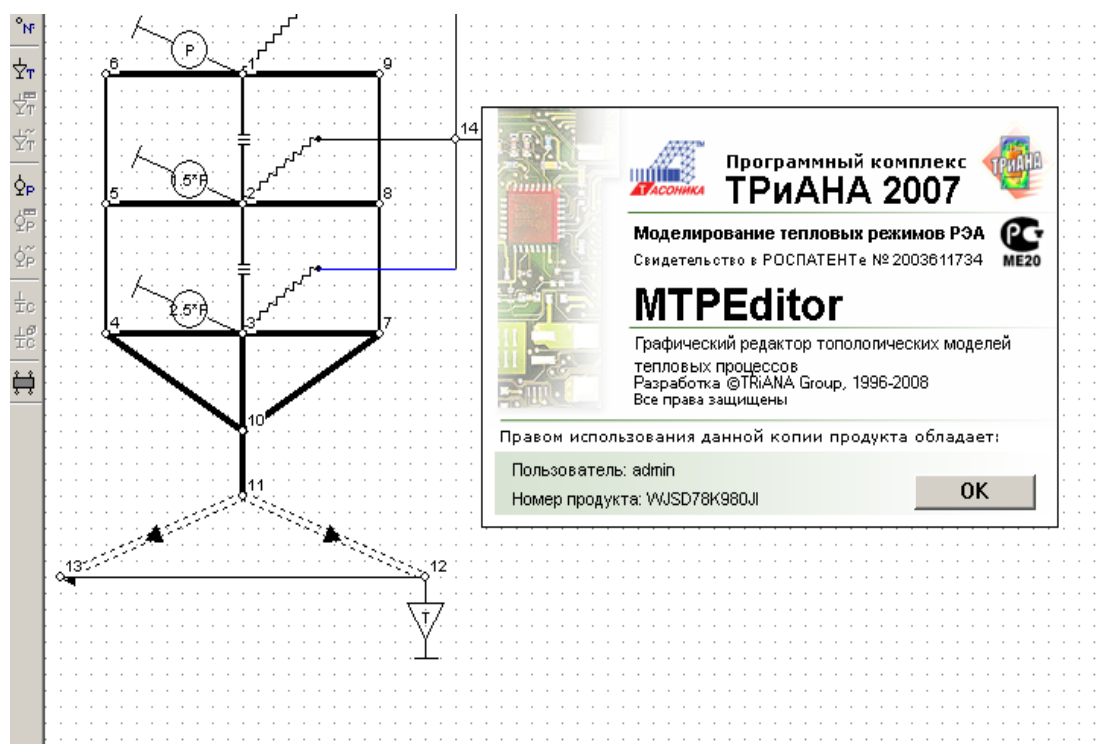


Рис. 2.41. Заставка программы *MTPEditor*

После запуска необходимо выполнить настройки программы – установить пути к необходимым компонентам ПК: к библиотекам, математическому ядру, программе просмотра и к базе данных «МАТЕРИАЛЫ» (см. [рис. 2.43](#)). Кроме этого необходимо выбрать язык, на котором будут отражаться пункты меню. После смены языка необходимо перезапустить программу.

После настройки программы пользователь, используя пункты меню «Файл» (см. [рис. 2.44](#) и [2.45](#)), пользователь может загрузить файл: с расширением «*dat*» (готовятся по вышеописанной методике или получаются в конечном итоге посредством программы *MTPEditor*); с расширением «*mcr*» (файл содержит внедренный графический материал с изображением исследуемого объекта и обрабатывается только программой *MTPEditor*); файл с расширением «*lib*» (файл содержит внедренный графический материал с изображением исследуемого объекта, который моделирует библиотечный элемент; библиотечный элемент отображается на общей схеме МТП в виде многополюсника).

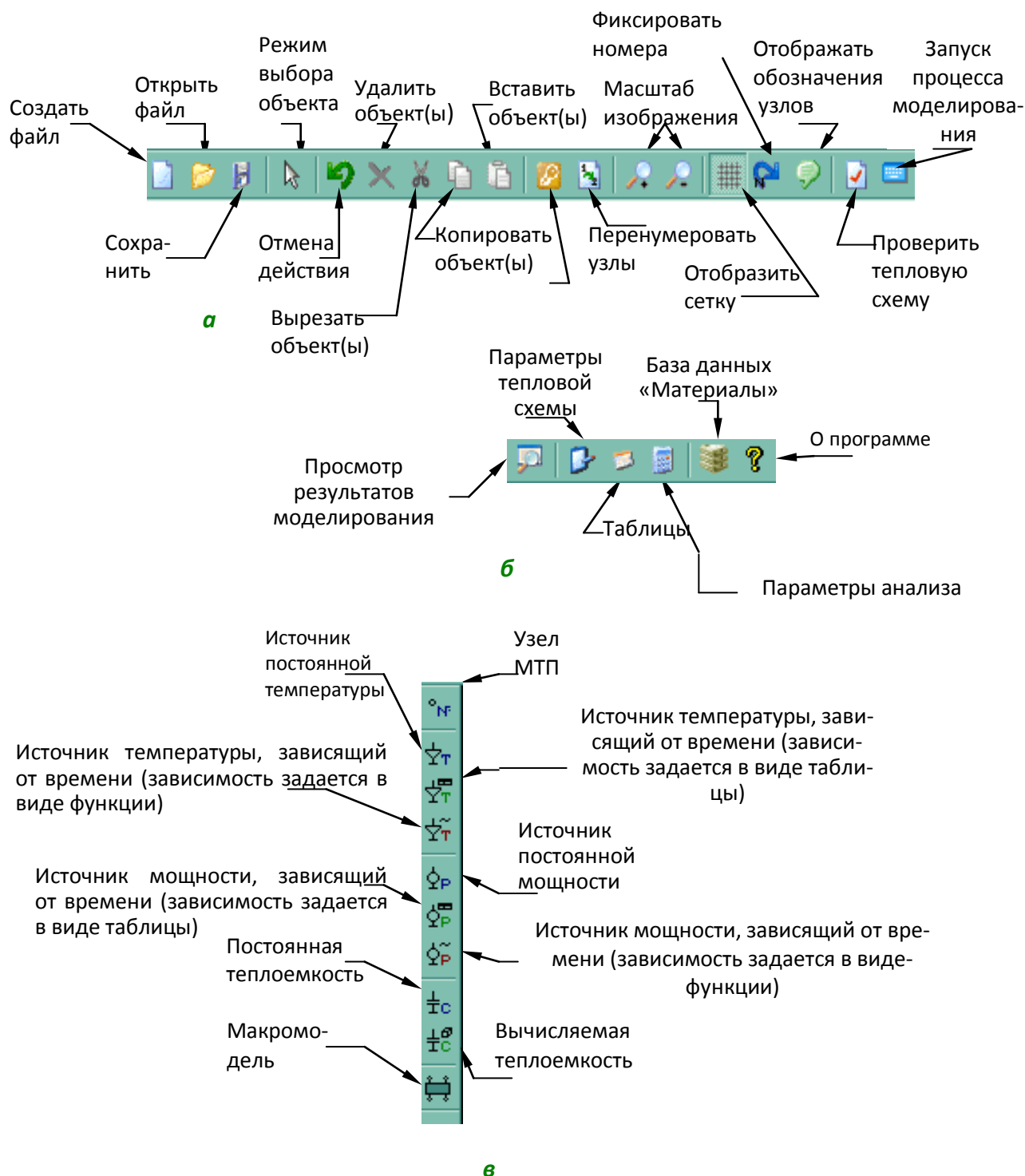


Рис.2.42. Основные компоненты визуального интерфейса программы MTPEditor

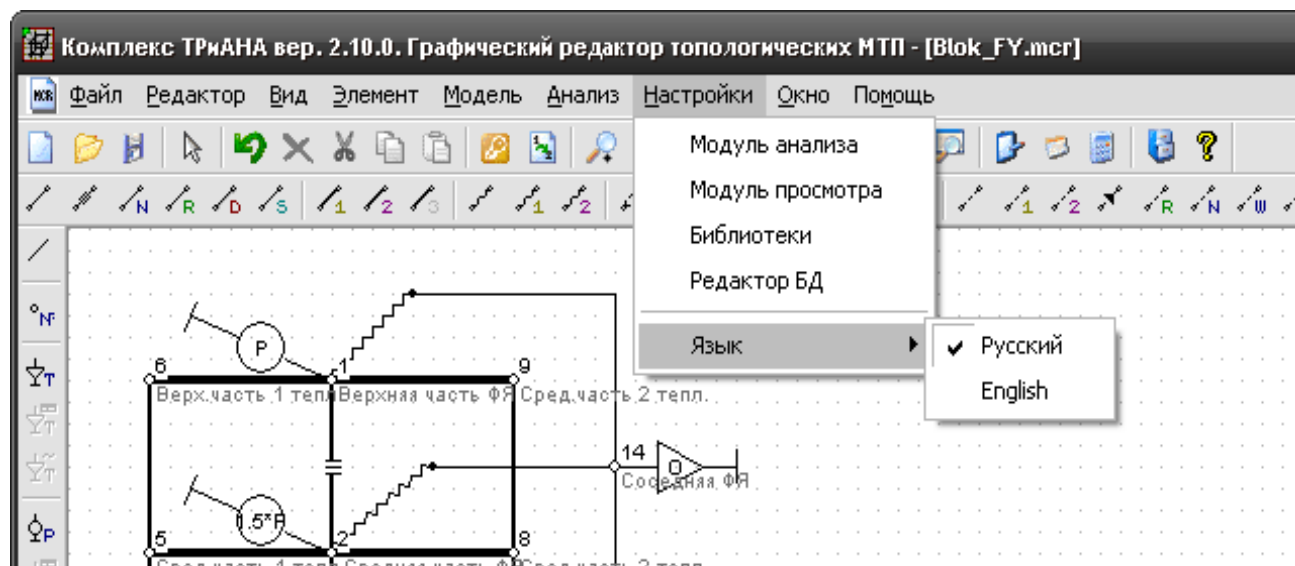


Рис. 2.43. Подпункты пункта меню «Настройки»

После определения типа файла (если используется опция «Новый») необходимо определить параметры анализа (см. [рис. 2.45](#)).

2.8.1. Создание и редактирование графов МТП

Пользователь, используя компоненты топологических моделей, которые находятся в пункте основного меню «Элемент» (см. [рис. 2.47](#)), формирует граф топологической МТП. Компоненты топологических моделей отображаются также в виде «иконок» по горизонтали, отражающих диссипативные компоненты, а по вертикали – консервативные и активные компоненты (теплоемкости, заданные источники температуры и тепловой мощности).

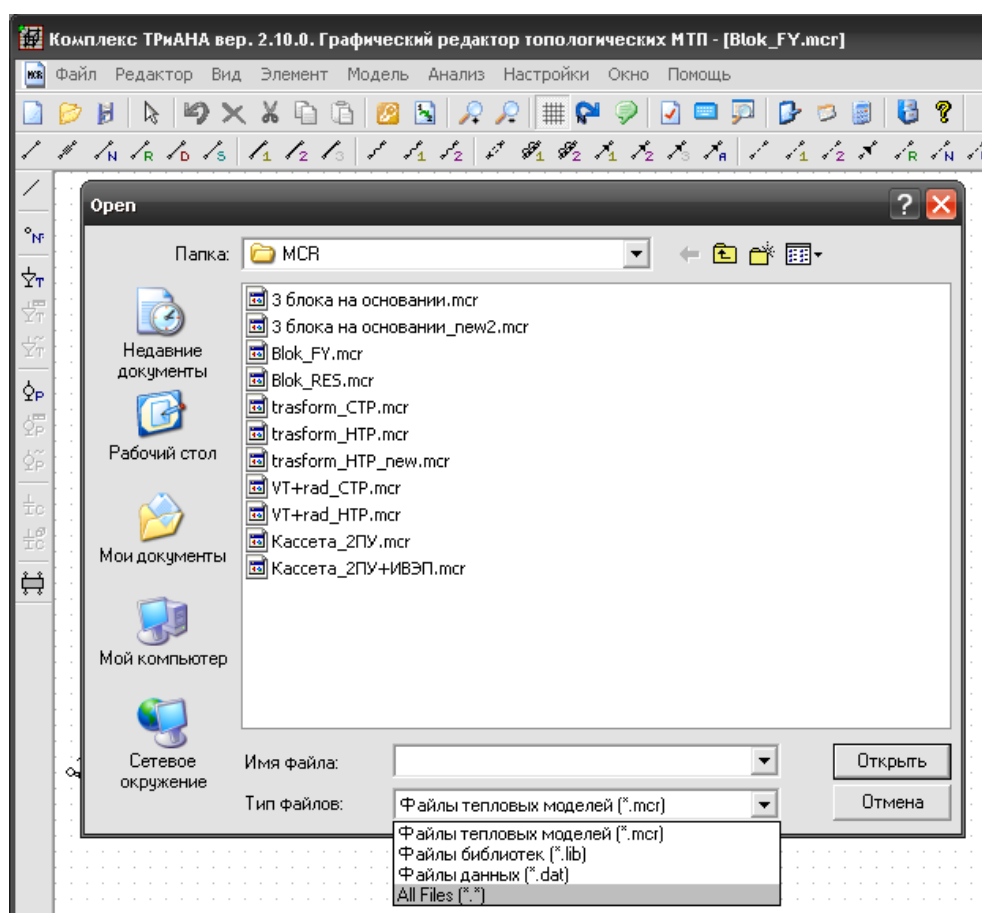


Рис. 2.44. Экранные формы операций с файлами «Открыть...» или «Сохранить как...»

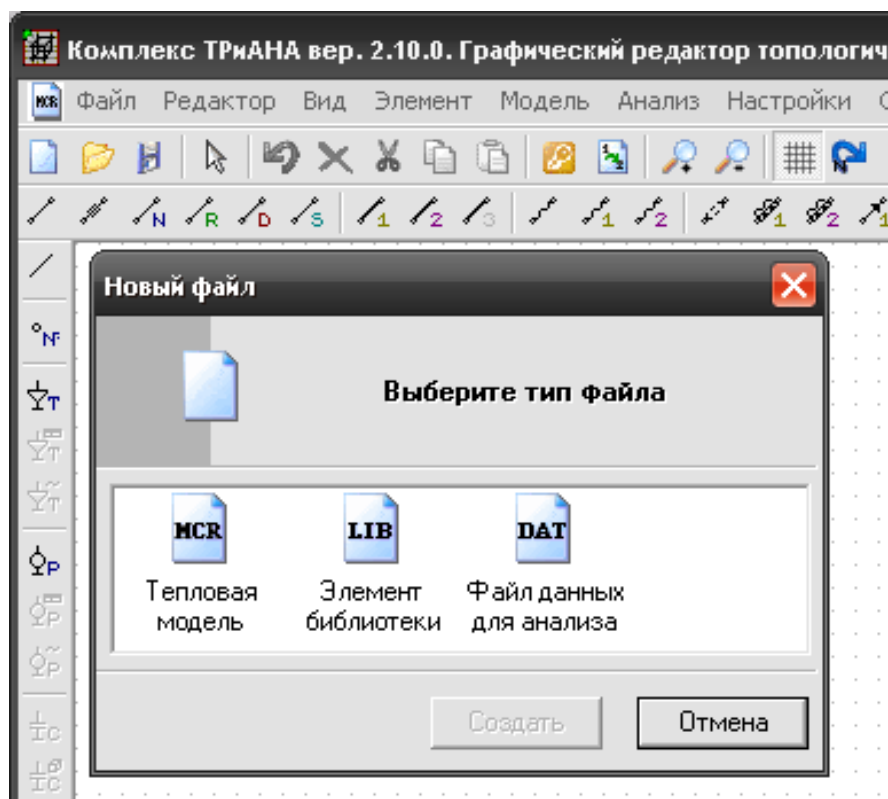


Рис. 2.45. Функция «Новый файл»

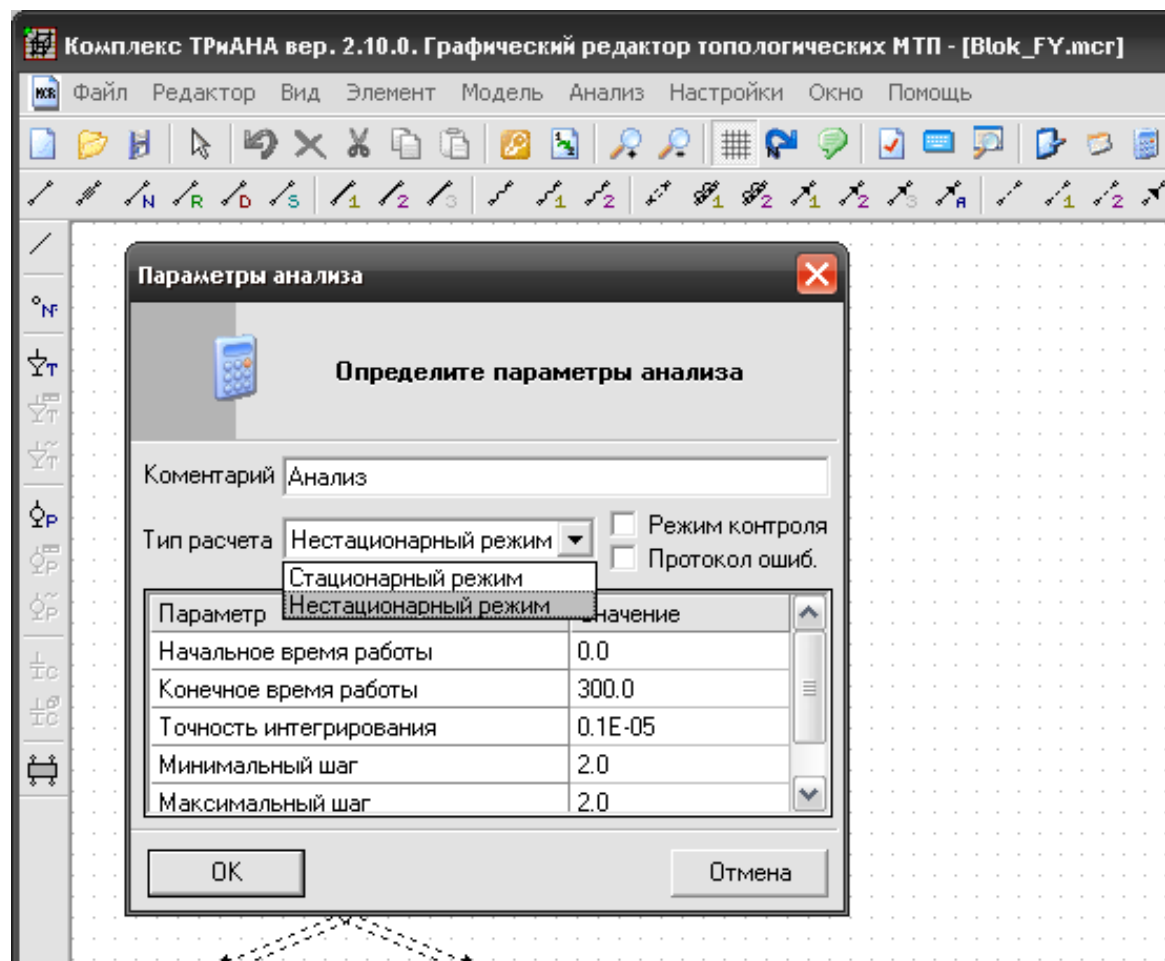


Рис. 2.46. Параметры анализа

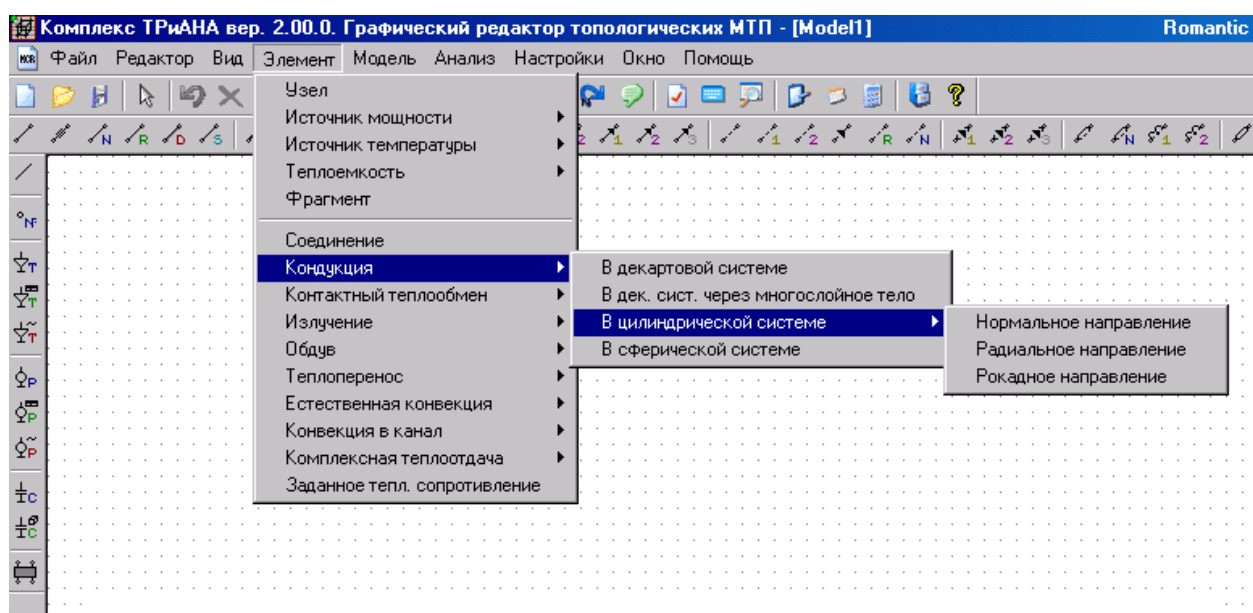




Рис. 2.47. Диссипативные компоненты (тепловые проводимости), используемые для создания топологических МТП

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 135 |
|---|---|--|---|------------|

Формирование топологической модели

Формирование модели начинается с простановки узлов. Используя функцию <Узел>, пользователь размещает на поле экрана узел при помощи манипулятора «мышь». При вызове функции <Узел> на экране автоматически появляется таблица, в которой проставляется номер узла и его обозначение. Пользователь может скорректировать обозначение узла (программой автоматически вводится обозначение «узел»). Обычно обозначение узла отражает название моделируемого им конструктива РЭА. Далее пользователь выбирает манипулятором «мышь» необходимый компонент топологической модели, и, удерживая левую кнопку «мыши», протягивает от размещенного узла выбранный компонент. После отключения левой кнопки «мыши» на экране появляется таблица с параметрами компонента. Таблицу необходимо заполнить. После заполнения таблицы на экране появляется графическое изображение компонента МТП. После этого пользователь может размещать второй узел, к которому подключается компонент МТП. **При создании параллельных ветвей графа необходимо использовать элемент «Соединение», который представляет собой выноску («кусочек провода»).**

Замечание. Ранее созданный компонент при помощи функции <Выбор объекта> может быть выделен левой кнопкой «мыши», а при помощи правой кнопки может быть вызвана таблица параметров для корректировки.

Как отмечалось ранее, процесс создания МТП целесообразно начинать с описания управляющей информации (см. [рис. 2.46](#)), так как вид анализа (стационарный или нестационарный режим) определяет набор доступных для работы компонентов визуального интерфейса.

Работа с объектами

В процессе формирования графического изображения МТП пользователь может выделять объекты (функция <Выбор объекта> при нажатой левой кнопке манипулятора «мышь»), поместив их в контур (см. [рис. 2.48](#)). После помещения в контур объект прорисовывается синим цветом.

Далее, наведя стрелку на один из элементов объекта, пользователь может перемещать объект по экрану. Кроме этого выделенный объект может быть скопирован или удален. После копирования фрагмент может быть вставлен (см. [рис. 2.49](#)). По команде <Вставить> немного правее ранее выделенного и скопированного объекта появляется его копия, которая может быть перемещена.

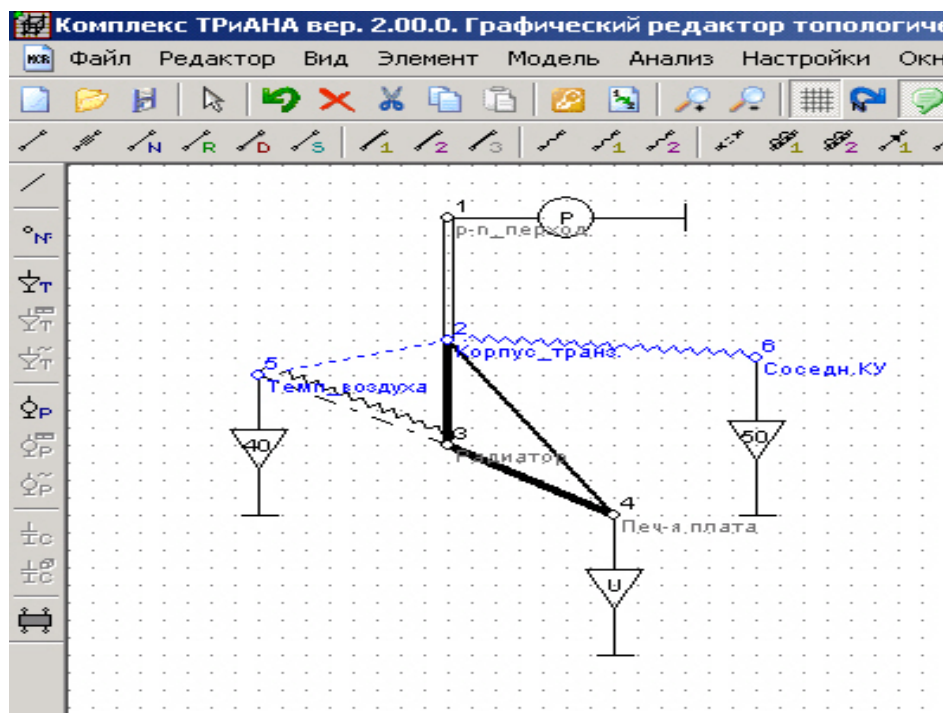


Рис. 2.48. Выделение объекта для копирования, вставки, переноса или удаления

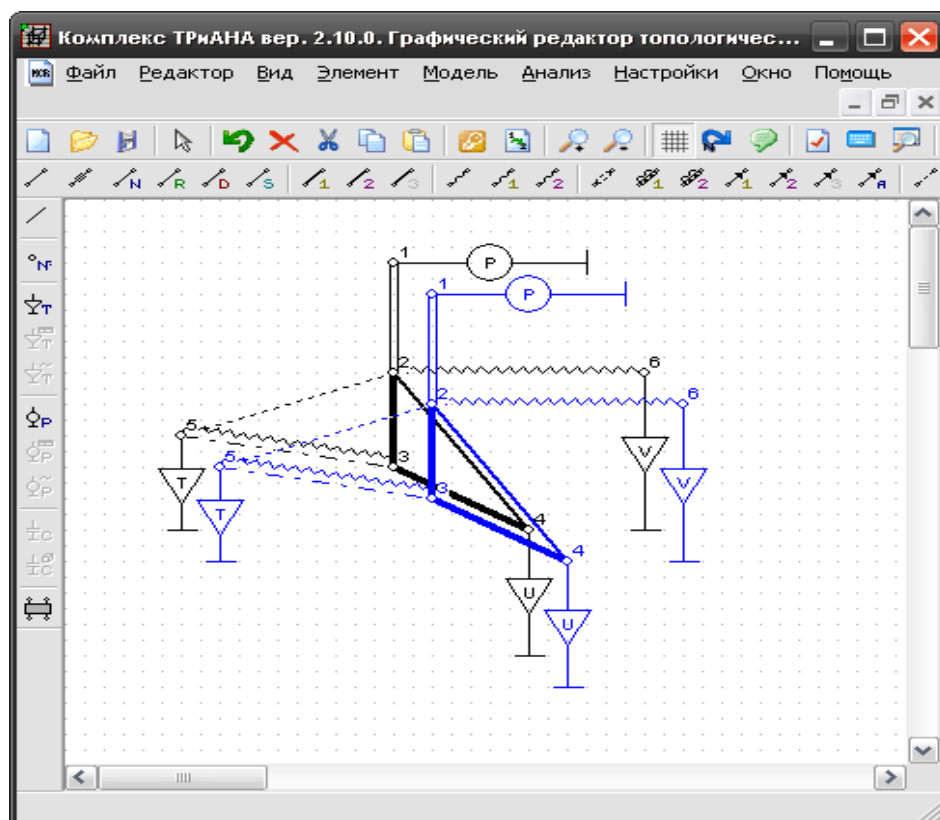


Рис. 2.49. Вставка объекта

Описание активных и консервативных компонентов

При описании активных и консервативных компонентов на экране автоматически высвечивается соответствующая табличная форма. На [рис. 2.50](#) приведена таблица для вычисляемой теплоемкости, а на [рис. 2.51](#) представлена табличная форма, заполняемая при описании источника мощности, описываемого функцией «меандр».

При описании компонентов, значения которых определяются в табличном виде, выполняется две операции:

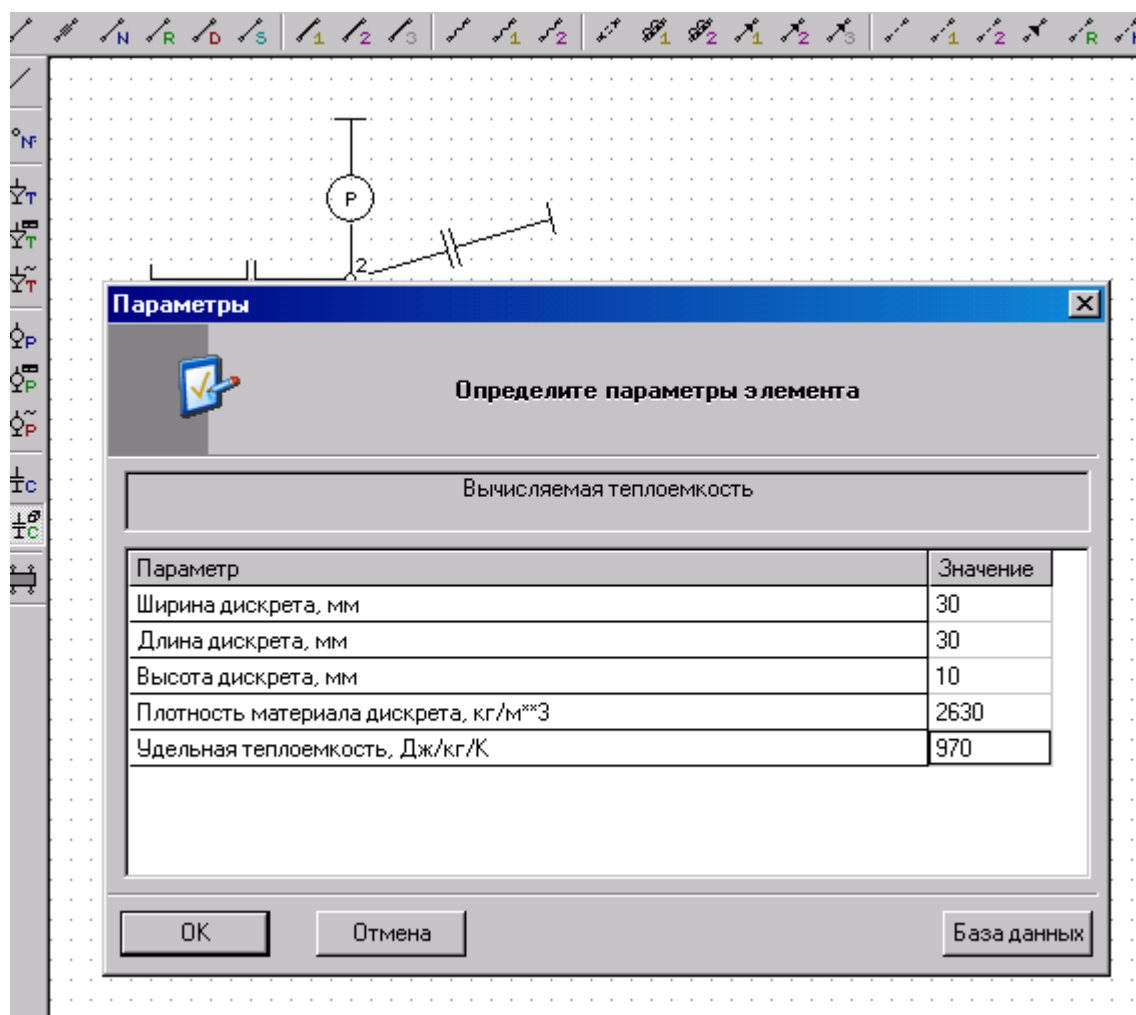


Рис. 2.50. Описание вычисляемых теплоемкостей

1. При выборе такого компонента автоматически запрашивается номер таблицы, согласно которой будет описан компонент (см., например, [рис. 2.52, а](#)).
2. Используя элемент визуального интерфейса «Табличные данные», пользователь вызывает, определяет номер и заполняет таблицу, как это показано, например, на [рис. 2.52, б](#).

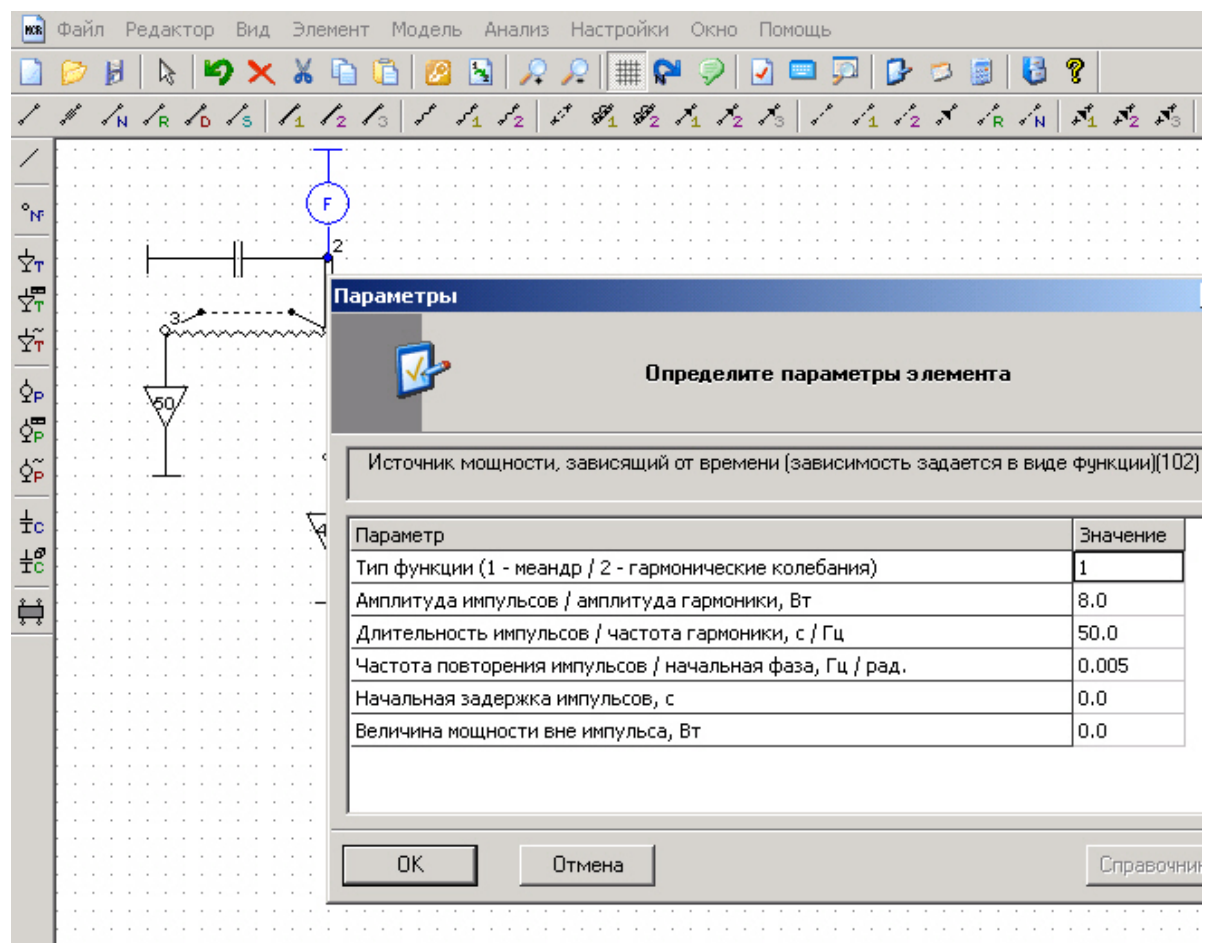
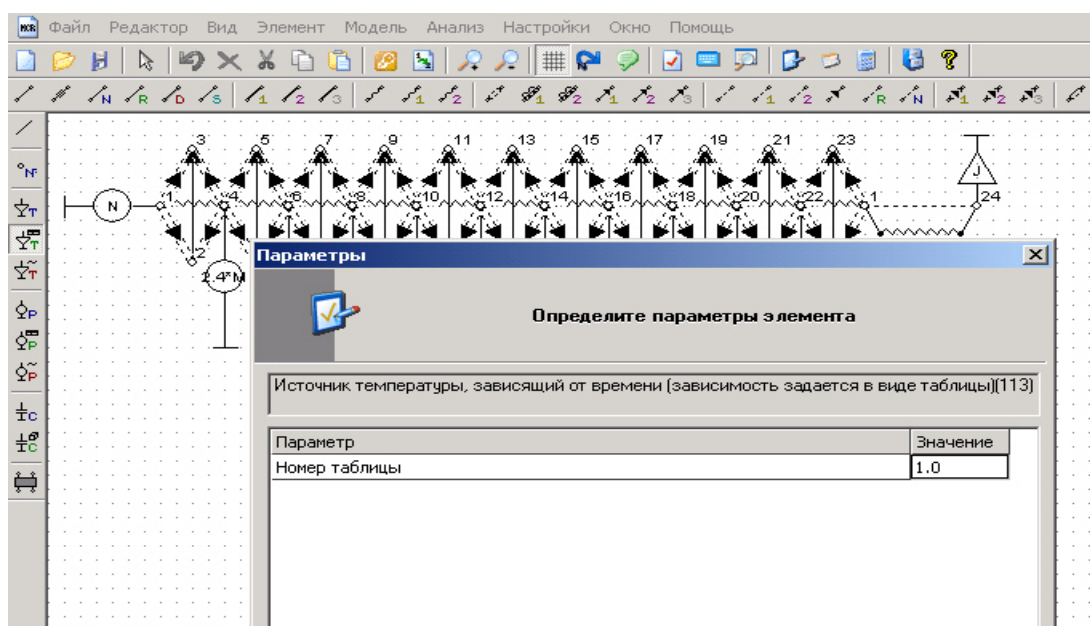


Рис. 2.51. Функционально описываемый источник мощности

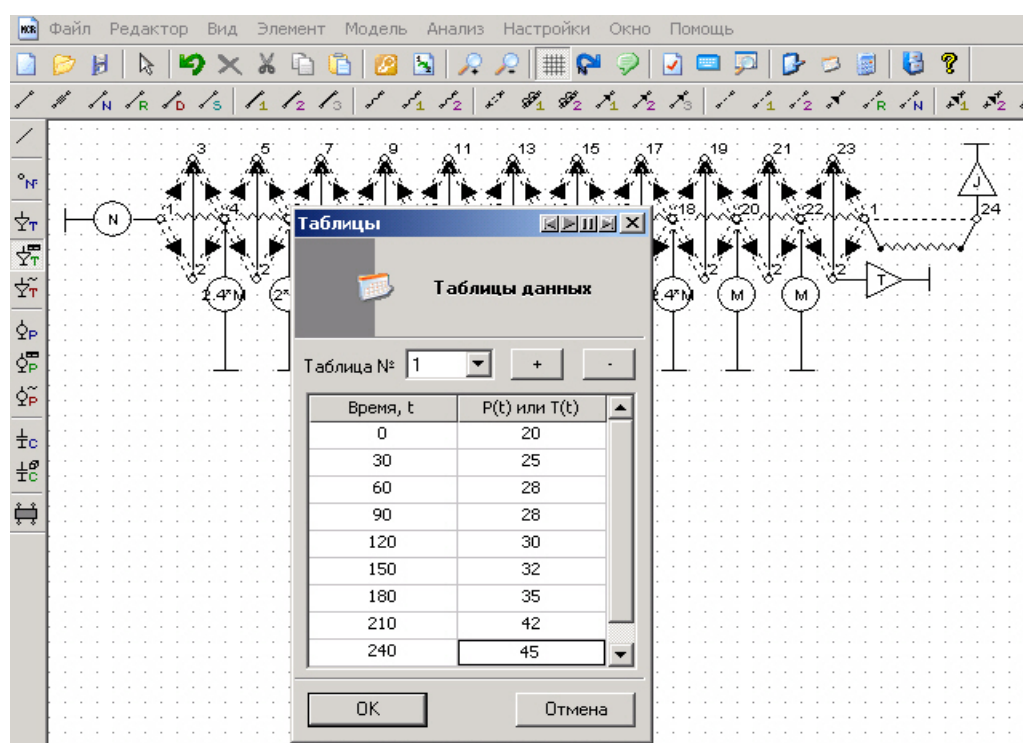
Использование функции <Окно> позволяет пользователю работать сразу с несколькими топологическими моделями (см. [рис. 2.53](#)), которые относятся к различным файлам данных.

Функции проверки позволяют выявить неподсоединенные элементы в графе МТП.

Функции масштабирования позволяют уменьшать или увеличивать изображение графа МТП.



a



б

Рис. 2.52. Таблично задаваемый источник температуры: **a** –определение номера таблицы; **б**– форма заполняемой таблицы

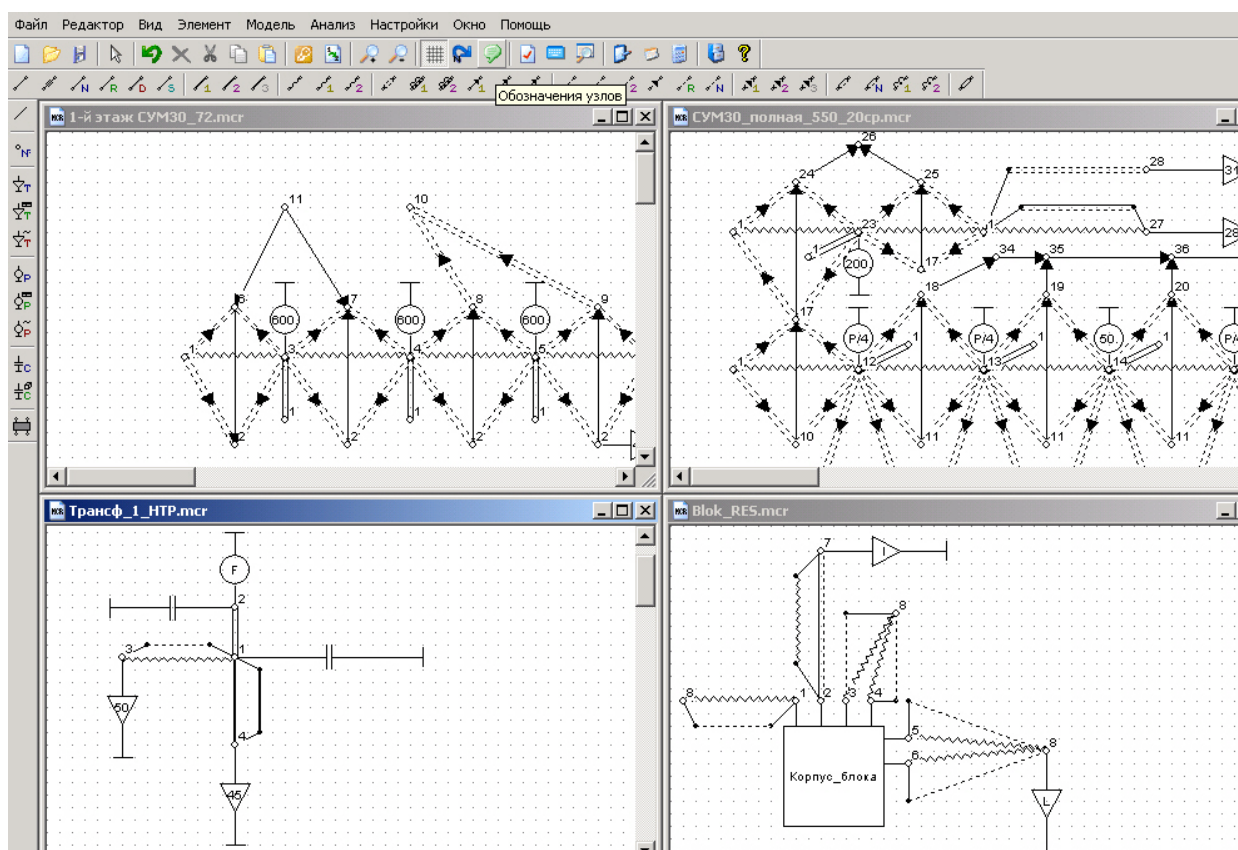


Рис. 2.53. Работа с несколькими окнами

В процессе описания компонентов топологических МТП вместо числовых значений (см. [рис. 2.50](#) и [2.52](#)) допускается использование вместо чисел арифметических и тригонометрических функций (см. [рис. 2.54](#)).

Как видно из [рис. 2.54](#), вместо числовых значений задаются функции, аргументы которых могут каждый раз задаваться другими, но структура такой модели не изменяется и может использоваться многократно. В этом случае, используя элемент визуального интерфейса «Параметры тепловой схемы», по команде «Загрузить» к графу МТП прикрепляется изображение объекта (см. [рис. 2.55](#)), который создается, например, в редакторе «Paint», размером 300x240 точек. На изображении объекта проставляется обозначение аргументов функций, используемых при параметризации МТП. Значения этих аргументов каждый раз могут задаваться новыми (см. колонки «Параметр» и «Значение» [рис. 2.56](#)). Для повышения эффективности работы с аппаратом параметризации тепловых схем в таблице параметров присутствует колонка «Обозначение», позволяющая дать подробное описание параметра, описывающее его функциональное содержание. В конечном итоге в файлах с расширением «mcr» и «lib» хранятся внедренные рисунки, а числовые значения компонентов МТП получаются автоматически при расчете применяемых функций. Числовые значения заносятся в файл с расширением «dat» для его дальнейшего использова-

ния математическим ядром. Ниже приведены основные правила и функции, используемые при параметризации.

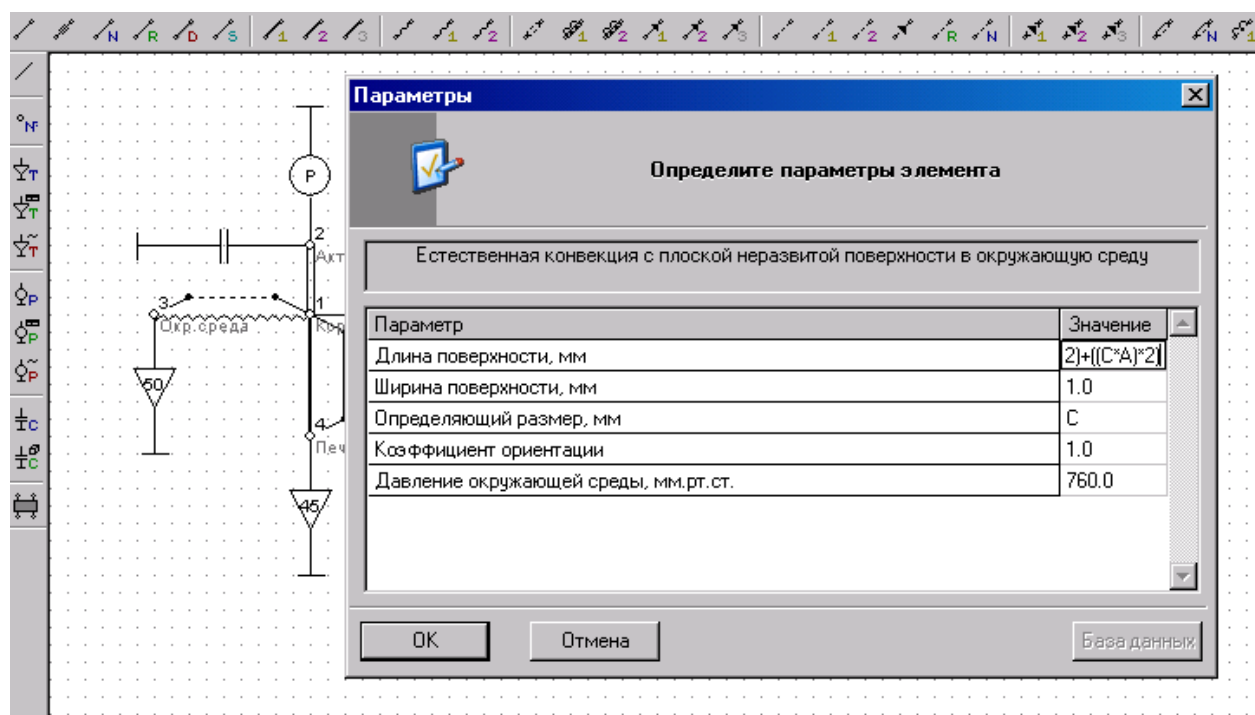


Рис.2.54. Параметрическое описание компонентов топологических МТП

Вместо числовых значений при описании параметров ветвей топологических МТП могут быть использованы операции: сложения («+»), умножения («*»), вычитания («-»), деления («/»), возведения в степень («**»), открывающие и закрывающие скобки («(», «)»). Приоритет операций соответствует традиционному. В качестве составляющих математических выражений (операндов) могут быть использованы имена других параметров схемы, присутствующих в таблице параметров данного окна «Параметры тепловой схемы». В математических выражениях, описывающих параметры ветвей, могут быть использованы следующие функции:

| | |
|-------------|--|
| $ABS(x)$ | - абсолютная величина аргумента x ; |
| $SQR(x)$ | - корень квадратный из аргумента x ; |
| $SINH(x)$ | - гиперболический синус угла x ; |
| $COSH(x)$ | - гиперболический косинус угла x ; |
| $TANH(x)$ | - гиперболический тангенс угла x ; |
| $ARCTAN(x)$ | - арктангенс угла x ; |
| $LN(x)$ | - натуральный логарифм аргумента x ; |
| $LOG(x)$ | - десятичный логарифм аргумента x ; |
| $EXP(x)$ | - экспонента в степени x ; |
| $SIN(x)$ | - синус угла x ; |
| $COS(x)$ | - косинус угла x ; |
| $TAN(x)$ | - тангенс угла x ; |

| | |
|-------------|---|
| $ARCSIN(x)$ | - арксинус угла x ; |
| $ARCCOS(x)$ | - арккосинус угла x ; |
| $INT(x)$ | - округление аргумента x до ближайшего меньшего целого; |
| $RAD(x)$ | - перевод x градусов в радианы; |
| $DEG(x)$ | - перевод радиан в градусы; |
| $ARSINH(x)$ | - гиперболический арксинус угла x ; |
| $ARCOSH(x)$ | - гиперболический арккосинус угла x ; |
| $ARTANH(x)$ | - гиперболический арктангенс угла x . |

Примечания:

1. В тригонометрических функциях углы указываются в радианах.
2. Название параметра должно начинаться с латинской буквы. Название может состоять только из **букв латинского алфавита (a–z, A–Z), цифр (0–9) и знака подчеркивания (_)**. Длина названия параметра должна быть **не более трех знаков** (например, A_1 , PKU , Tob).
3. Максимальное число символов в выражении, описывающем параметр ветви топологической МТП, **не должно превышать 33**.

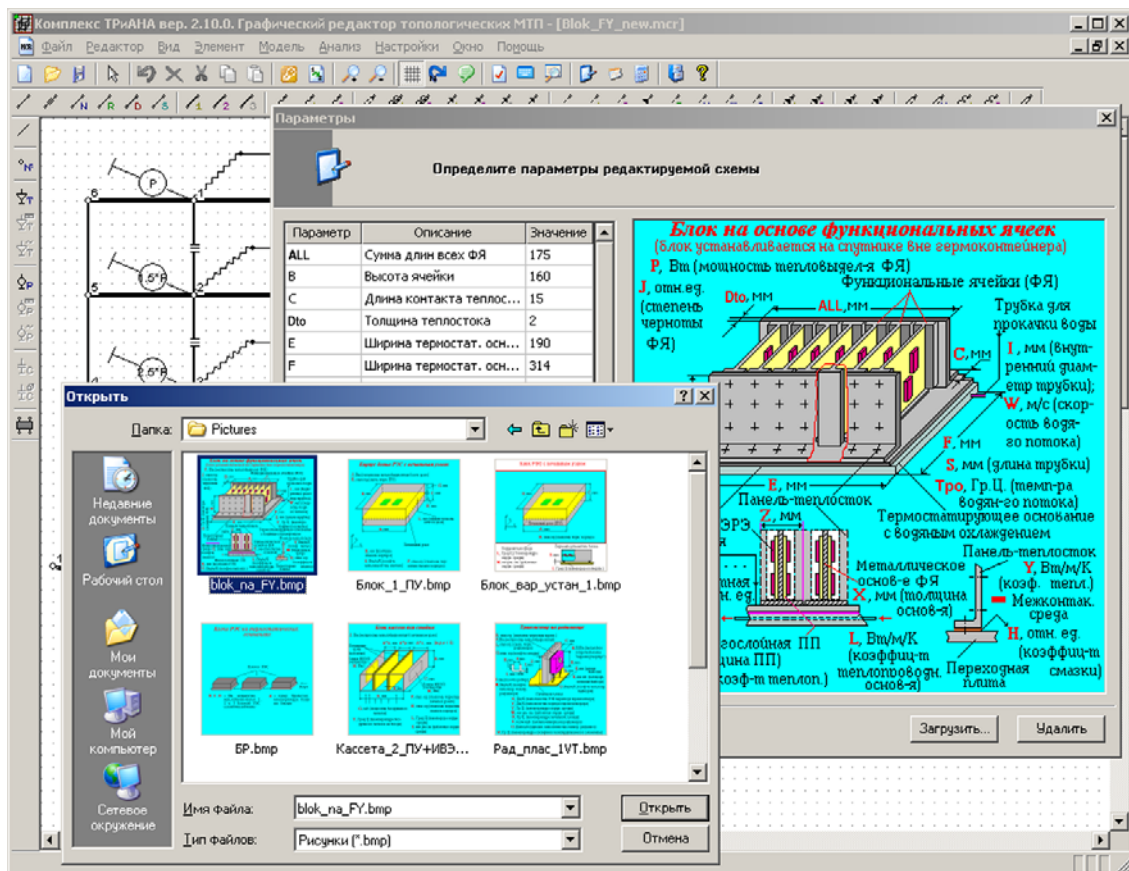


Рис. 2.55. Загрузка файла с эскизом исследуемого объекта

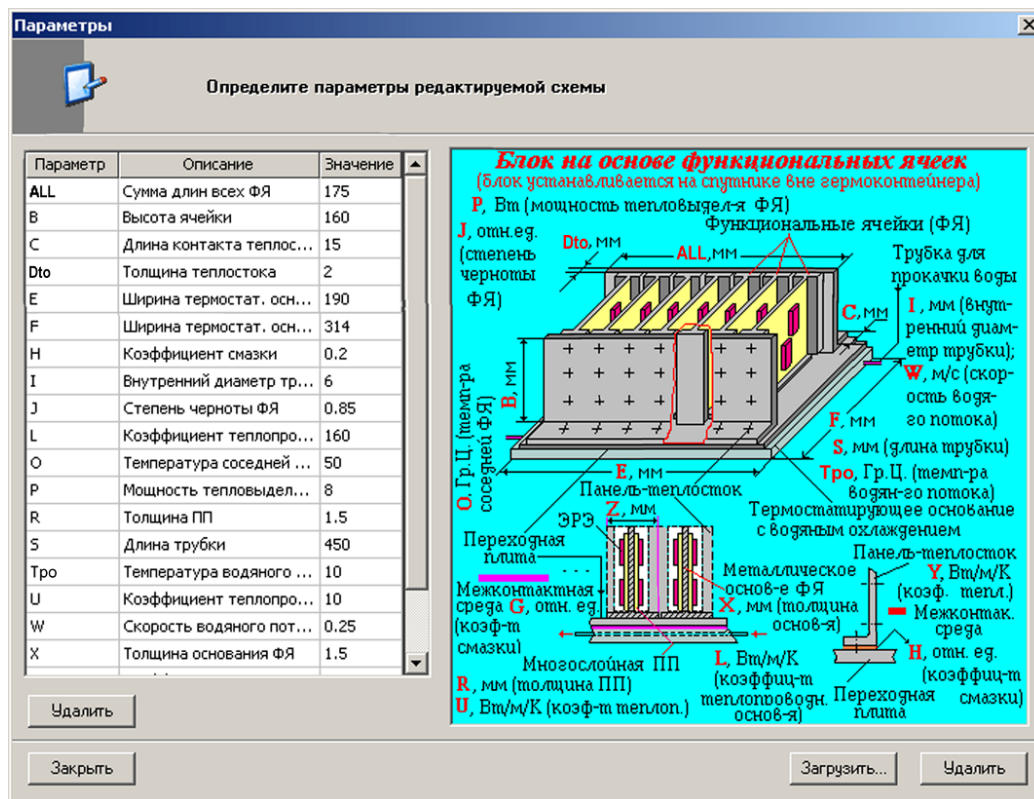


Рис. 2.56. Определение значений параметров, определяющих геометрические и физические свойства исследуемого объекта

2.8.2 Применение базы данных «Материалы»

В состав программы *MTPEditor* входит специализированный редактор базы данных по конструкционным материалам РЭА, позволяющий добавлять, удалять и изменять существующие материалы, а также их теплофизические параметры. Вид основного окна редактора показан на [рис. 2.57](#).

Для каждого материала в табличном виде отображаются и могут быть определены следующие теплофизические параметры:

- коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К);
- плотность, кг/м³;
- удельная теплоемкость, Дж/(кг*К);
- состояние поверхности материала и соответствующая ей степень черноты поверхности, уд. ед.

Редактор позволяет отфильтровать список материалов, отображаемый в таблице основного окна. Если в строке «Материал» набрать некоторый текст и нажать кнопку «Фильтр», то в таблице будут отображаться только материалы, названия которых содержат введенное словосочетание. Текст фильтра также может содержать маску: * – группа произвольных символов любой длины, ? –

любой одиночный символ. Для получения полного списка материалов необходимо нажать кнопку «Весь список» или набрать в строке «Материал: *» и нажать кнопку «Фильтр».

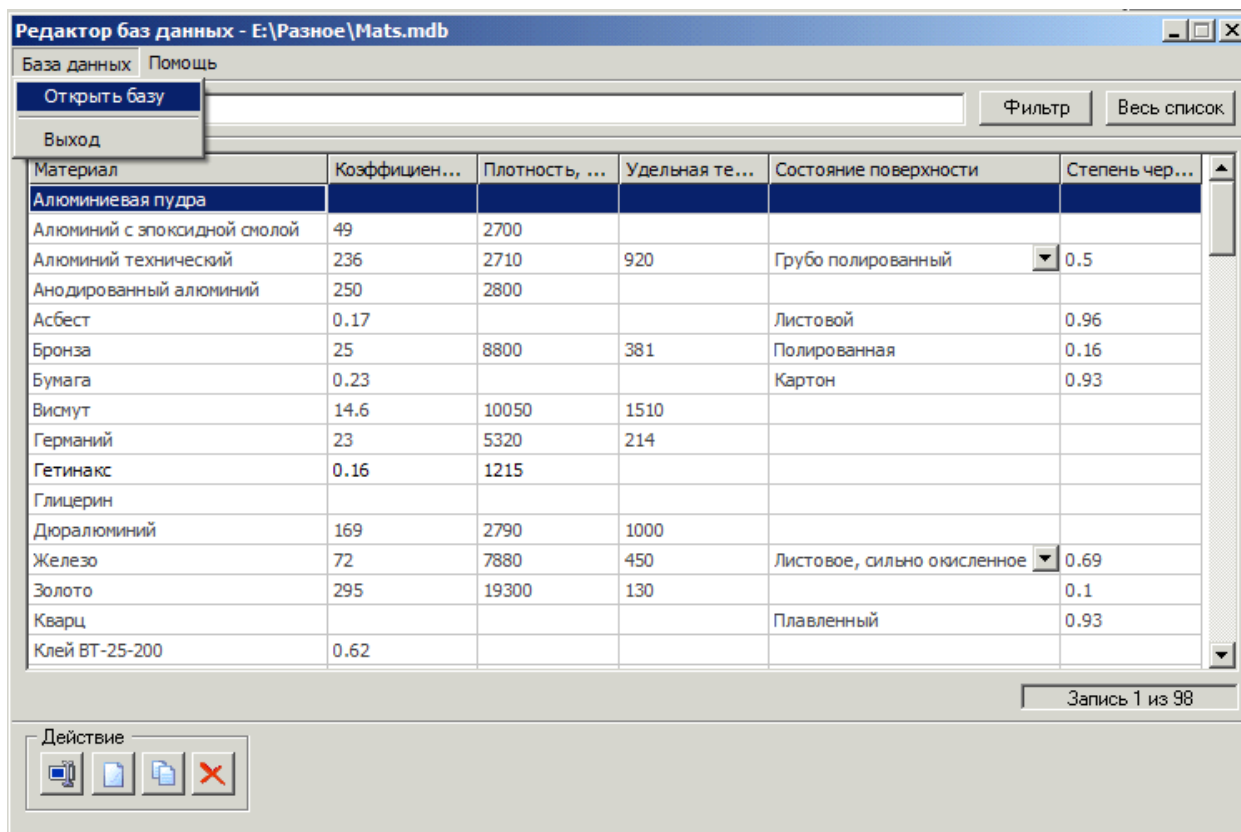



Рис.2.57. Основное окно редактора БД «Материалы»

Редактирование выбранного элемента производится нажатием на кнопку . При этом на экране отобразится окно параметров материала, показанное на [рис. 2.58](#).

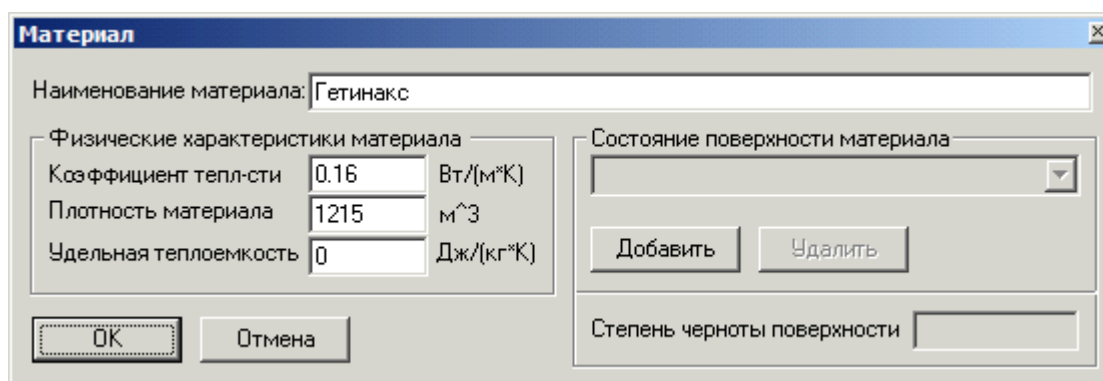







Рис.2.58. Окно теплофизических параметров материала

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 145 |
|---|---|--|---|------------|

Это же окно будет выведено при попытке создания нового элемента в таблице материалов, для чего необходимо нажать кнопку .

Редактор также позволяет создавать копии и удалять имеющиеся материалы с помощью кнопок  и .

***Внимание.** База конструкционных материалов, поставляемая с программным комплексом ТРИАНА имеет защиту – данные по материалам, содержащимся в ней, недоступны для удаления и изменения. В случае необходимости корректировки параметров таких материалов пользователь должен будет сделать копию материала и работать уже с ней.*

Выборка параметров из базы данных осуществляется при описании компонентов МТП посредством активизации кнопки «База данных».

2.8.3 Работа с библиотеками фрагментов МТП

Формирование элемента библиотеки (фрагмента)

Формирование элемента библиотеки аналогично формированию топологической модели тепловых процессов, с той разницей, что узел схемы имеет дополнительный параметр – «Номер подключения». Фрагмент может иметь *внутренние* узлы – узлы, скрытые от пользователя при работе с фрагментом в файле топологической модели, и узлы *подключения*, которые, соответственно, доступны пользователю. К узлам подключения в файле топологической модели можно подключать другие элементы тепловой модели (тепловые сопротивления, фрагменты). Необходимо отметить, что номера узлов подключения и номера узлов топологической модели фрагмента могут не совпадать. Аналогично, при добавлении фрагмента в файл топологической модели номера узлов подключения могут не соответствовать нумерации этих же узлов в файле топологической модели. Номер узла подключения просто определяет **порядок**, согласно которому узлы фрагмента будут добавлены в файл топологической модели тепловых процессов, и узел подключения № 1 фрагмента не обязательно будет узлом № 1 топологической модели, т. е. внутренняя нумерация узлов фрагмента и номеров их подключения не идентична нумерации узлов в файле топологической модели.

Фрагмент так же, как и топологическая модель, может быть описан параметрически. Определение значений переменных и изображения конструктива может быть выполнено в меню <Фрагмент>—<Параметры схемы>. Переменные, используемые для описания параметров компонентов, могут быть двух типов – *внутренние* и *экспортируемые*. Внутренние переменные могут быть изменены только при редактировании элемента библиотеки, значения экспортируемых можно изменять в процессе работы с файлом топологической модели, в которой находится фрагмент.

Каждый фрагмент в библиотеке имеет уникальное обозначение, которое пользователь определяет, используя функцию меню <Фрагмент>—<Параметры фрагмента>. Там же определяется, какие переменные фрагмент будет экспортировать. На [рис. 2.59](#) приведен граф МТП, в который вставлен фрагмент МТП, описание которого также имеет параметрический вид (см. [рис. 2.60](#)). Например, параметры кондуктивных ветвей 1–5 и 2–3 фрагмента на [рис. 2.60](#) описаны следующим образом:

Ветвь 1-5:

1. Размер 1, определяющий площадь сечения теплового потока, – A .
2. Размер 2, определяющий площадь сечения теплового потока, – D .
3. Длина пути теплового потока – $(B/2)+(C/2)$.
4. Теплопроводность материала – E .

Ветвь 2-3:

1. Размер 1, определяющий площадь сечения теплового потока, – D .
2. Размер 2, определяющий площадь сечения теплового потока, – B .
3. Длина пути теплового потока – $(A/2)+(C/2)$.
4. Теплопроводность материала – E .

Значения параметров A , B , C для фрагмента определены как $A = 200$, $B = 180$, $C = 80$ (см. [рис. 2.59](#)). При внедрении фрагмента в МТП параметр A был переопределен (см. [рис. 2.60](#)) как $A = 280$ и заданы значения параметров $D = 1,5$ и $E = 160$.

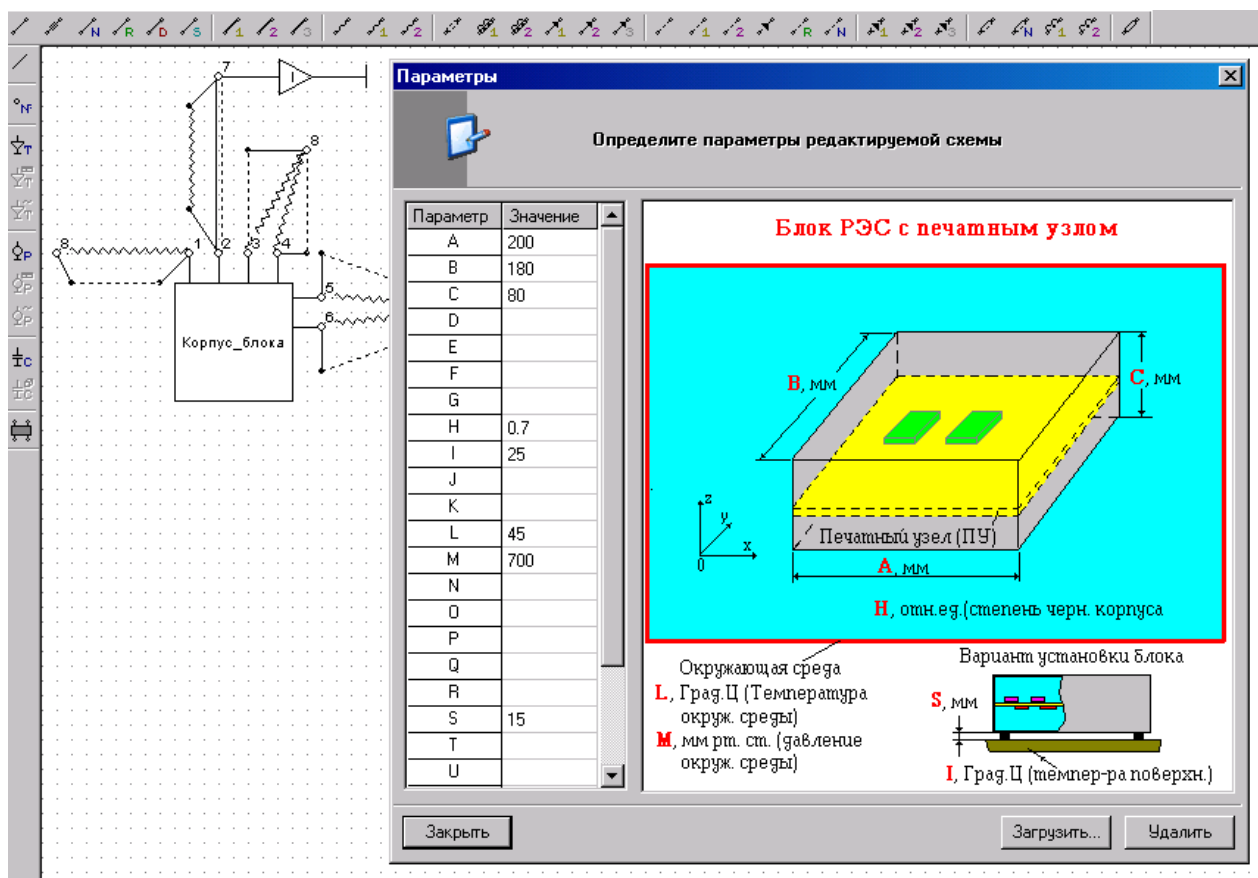


Рис. 2.59. Граф топологической МТП с внедренным в него фрагментом

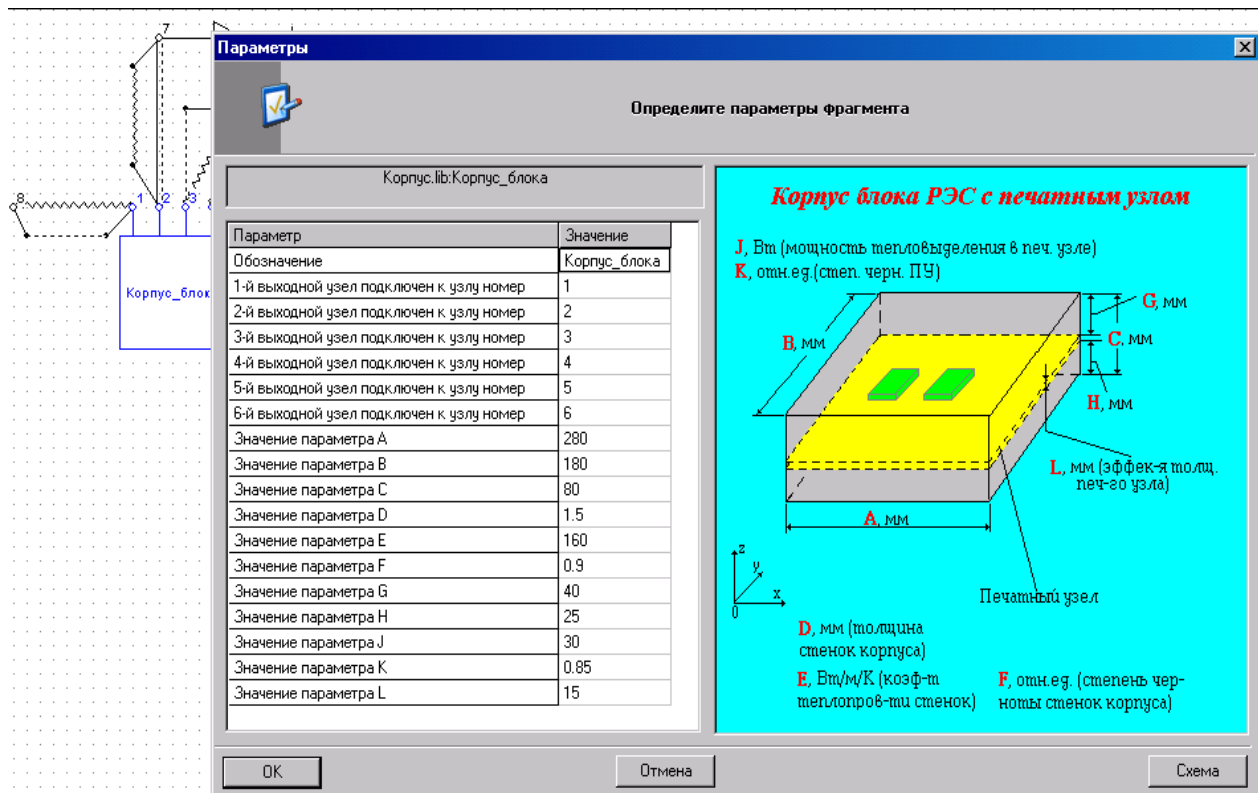


Рис. 2.60. Фрагмент топологической МТП с параметрическим описанием

2.8.3.1. Формирование элемента библиотеки фрагментов МТП

Процесс формирования элемента библиотеки фрагментов МТП рассмотрим на базе графа МТП, приведенного на [рис. 2.61](#). Анализ структуры приведенного графа показывает, что в его структуре можно выделить однотипные фрагменты, которые на рисунке обведены пунктирными линиями. Выделенные фрагменты можно оформить в виде самостоятельных элементов схемы с их последующим хранением в библиотечных структурах для многократного использования. Такая процедура необходима для упрощения схемы графа, а также для ускорения процесса формирования последующих графов МТП приборов аналогичной конструкции.

Процесс дефрагментации графа МТП целесообразно начинать с определения критериев, на основе которых будут выделяться фрагменты из общего графа МТП. Критерии выделения фрагментов могут быть разные, например, наличие повторяющихся групп компонентов МТП, их функциональная (фрагмент может объединять МТП несколько конструктивных узлов и элементов РЭА) или конструктивная завершенность (в общей модели РЭА выделяются МТП конструктивных узлов или элементов). На [рис. 2.61](#) основным критерием будет являться наличие повторяющихся групп компонентов МТП.

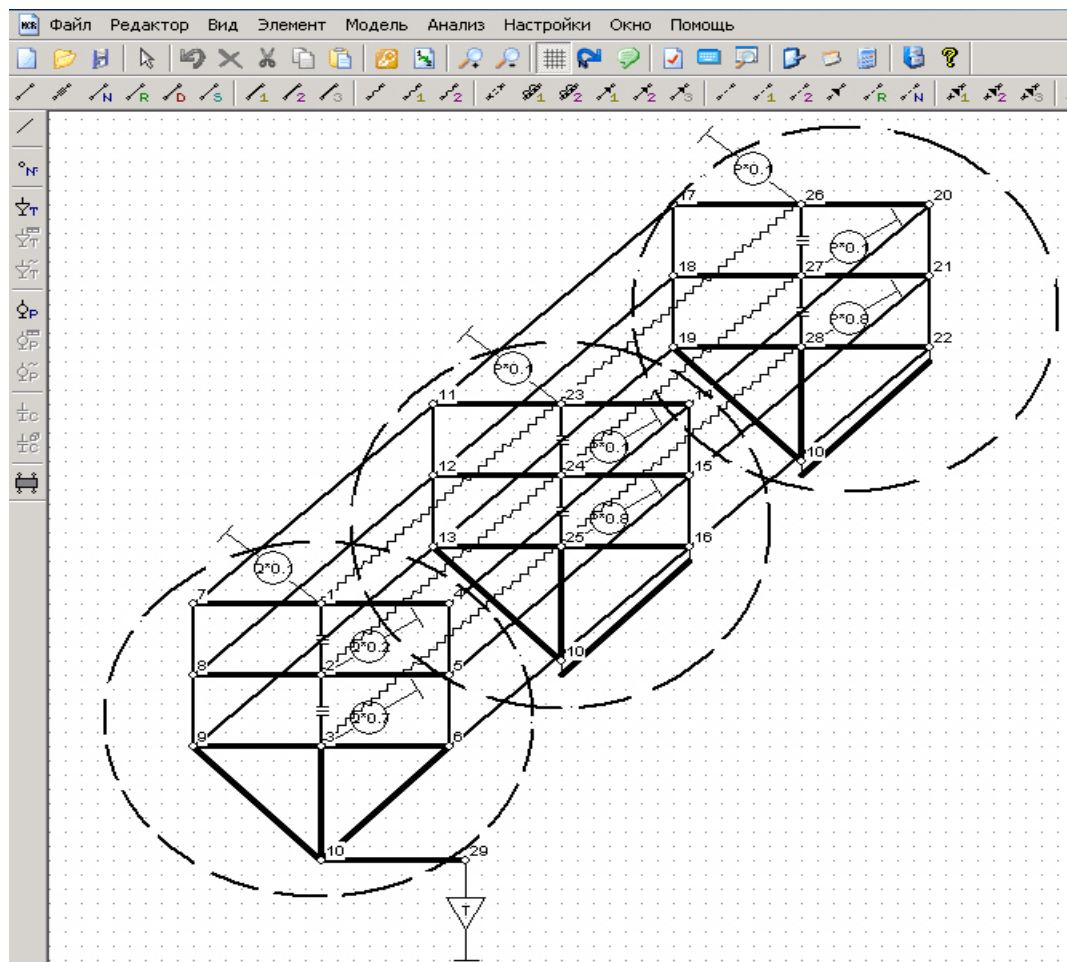


Рис. 2.61. Однотипные участки в графе топологической МТП

Для 1-го фрагмента это будут: кондуктивные ветви: 1–2, 2–3, 7–8, 8–9, 4–5, 5–6; ветви отражающие контактный теплообмен: 1–7, 1–4,..., 3–6; источники мощности, подключенные к узлам 1–3. Остальные два фрагмента имеют аналогичную структуру.

На следующем этапе необходимо определить, какие узлы выделенного фрагмента будут *внешними*, а какие *внутренними*. Внутренним узлом фрагмента, как отмечалось ранее, будет являться узел, к которому подключены только ветви, находящиеся внутри фрагмента. Соответственно, *внешним узлом* будет тот узел, с которым соединена хотя бы одна ветвь, находящаяся вне фрагмента (например, для 1-го и 2-го фрагмента на [рис. 2.61](#) ветви 1–23, 23–26 и им аналогичные). Внешние узлы также называются *узлами подключения* фрагмента. В рассматриваемом примере ([рис. 2.61](#)) все узлы фрагментов будут внешними.

Несмотря на то, что фрагменты, выделенные на [рис. 2.61](#), являются структурно идентичными, они имеют в своем составе разные по величине источники мощности. В этой связи при описании их параметров целесообразно

использовать аппарат параметризации. *Применение аппарата параметризации для описания всех компонент фрагмента МТП позволяет максимально повысить его универсальность при последующем его применении, так как в этом случае в библиотечных структурах можно хранить структуры типовых фрагментов МТП, не привязанные ни к каким числовым значениям геометрических и теплофизических параметров.* Такие параметры (геометрические размеры, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и т. п.) определяются при исследовании конкретных конструкций РЭА (см. [рис. 2.59](#) и [2.60](#)).

Следующим шагом является определение параметров, которые фрагмент будет экспортировать. *Экспортируемые параметры фрагмента, как отмечалось ранее, – это параметры, значения которых могут быть переопределены без изменения структуры фрагмента МТП.* Обычно в роли экспортируемых параметров выступают геометрические размеры, теплофизические параметры, параметры выделяемых мощностей, температур, теплоемкостей и т. п. Для фрагментов, изображенных на [рис. 2.58](#), прежде всего необходимо экспортировать параметры источников мощности.

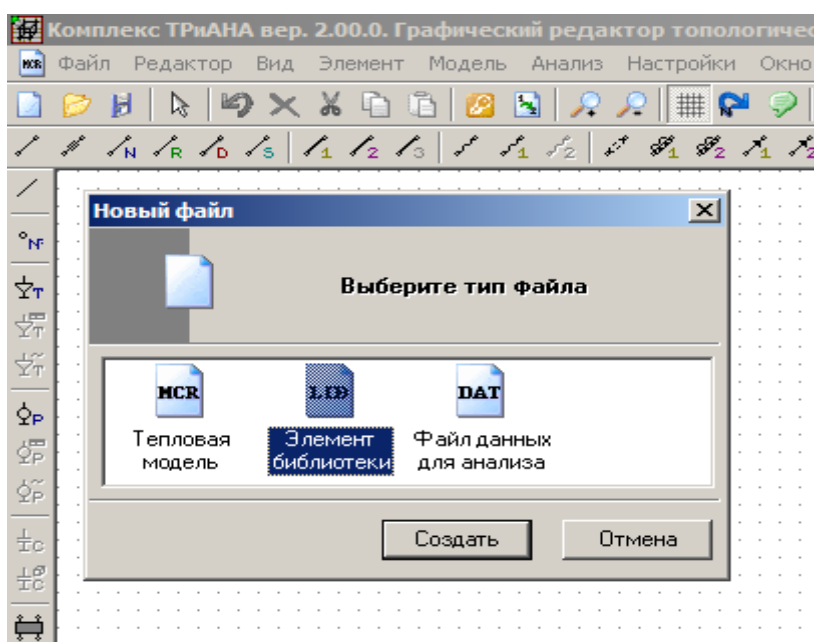


Рис. 2.62. Создание нового элемента библиотеки

На следующем этапе следует собственно формирование схемы фрагмента МТП. Для этого после запуска программы *MTPEditor* необходимо выбрать команду <Новый> в меню <Файл>, а затем в появившемся окне диалога указать тип создаваемого файла. В данном случае это будет «Элемент библиотеки» (см. [рис. 2.62](#)).

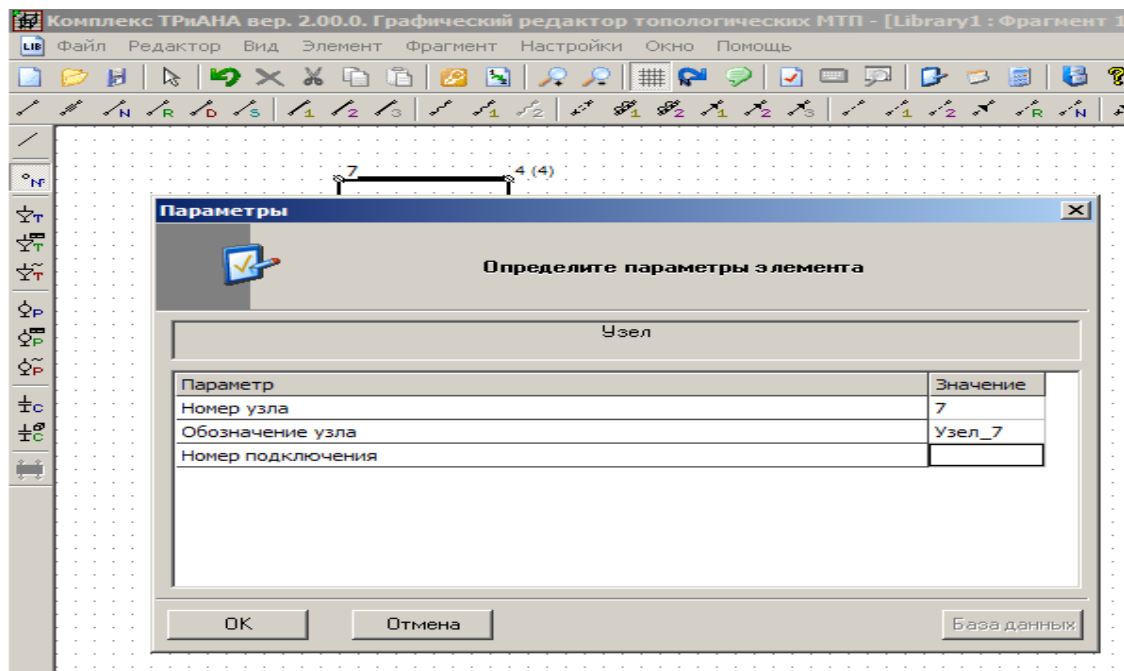


Рис. 2.63. Параметры узла фрагмента

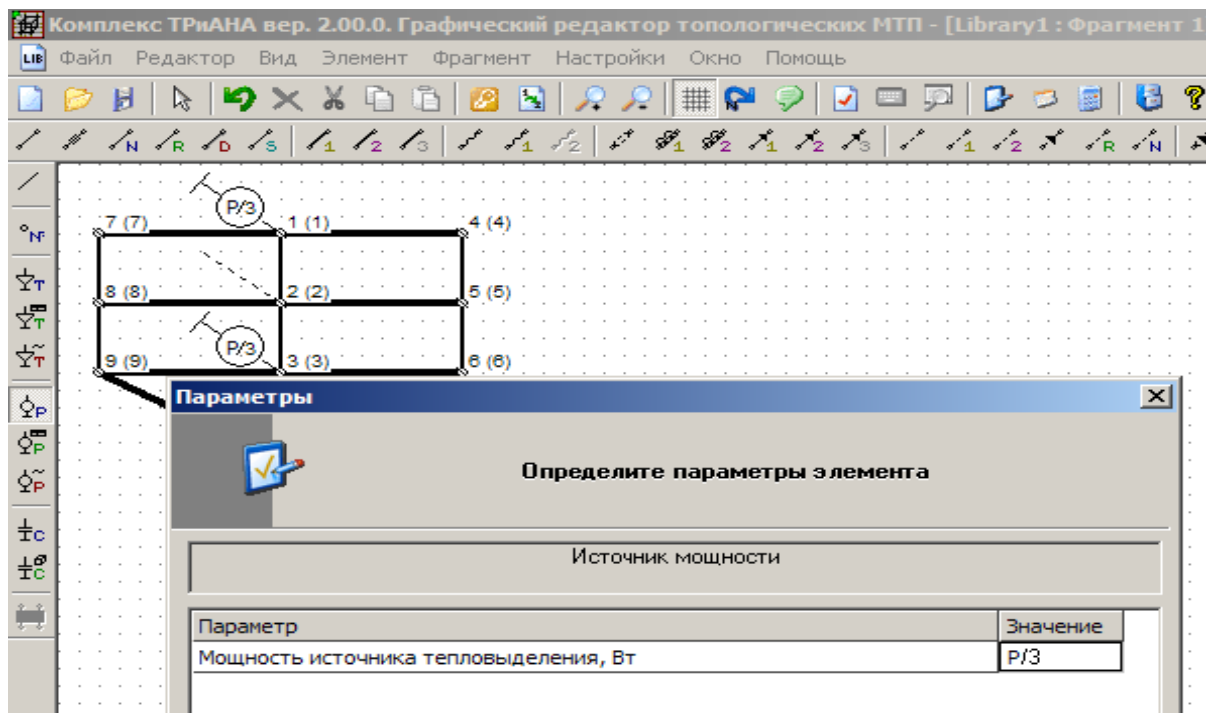


Рис. 2.64. Параметризованное описание источника мощности

Затем следует процесс формирования схемы фрагмента графа МТП. Процесс формирования графа фрагмента МТП практически не отличается от процесса создания обычного графа МТП, описанного в [параграфе 2.7.1](#), за исключением того, что каждый вводимый в схему узел описывается не двумя, а тремя параметрами – добавляется номер узла подключения, как это показано на

[рис. 2.53](#). Если параметр «Номер узла подключения» не определен, узел по умолчанию будет считаться внутренним, в противном случае узел будет внешним. Изображение узла также изменяется в зависимости от типа узла – внешние узлы отображаются перечеркнутыми кружками, и рядом с их номерами в схеме в скобках указывается номер узла подключения.

На [рис. 2.64](#) приведен процесс добавления в схему графа источников мощности на основе аппарата параметризации.

После завершения построения графа фрагмента следует процедура определения списка экспортируемых параметров и названия создаваемого фрагмента МТП ([рис. 2.65](#)).

После выполнения рассмотренных выше действий необходимо определить (подключить) изображение конструкции, конструктивного узла или конструктивного элемента моделируемого фрагментом МТП посредством команды <Параметры схемы>. Затем сохранить его в файле библиотеки, используя команду <Файл>—<Сохранить> или <Файл>—<Сохранить как>.

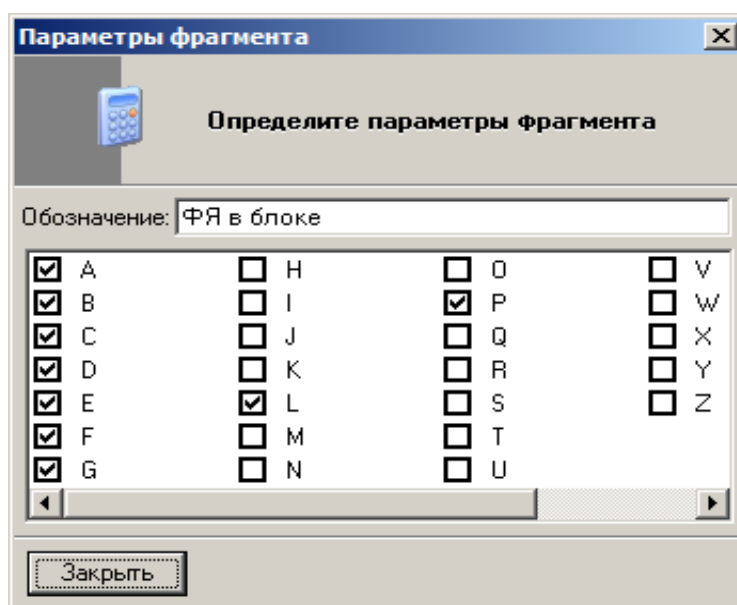


Рис. 2.65. Определение экспортируемых параметров фрагмента и его обозначения

Пример использования библиотечной структуры

В качестве примера рассмотрим процесс построения схемы графа МТП, изображенного на [рис. 2.61](#), с использованием выделенных в нем фрагментов.

Прежде всего, в программе *MTPEditor* необходимо подключить библиотеку, в которой хранятся необходимые для формирования МТП фрагменты.

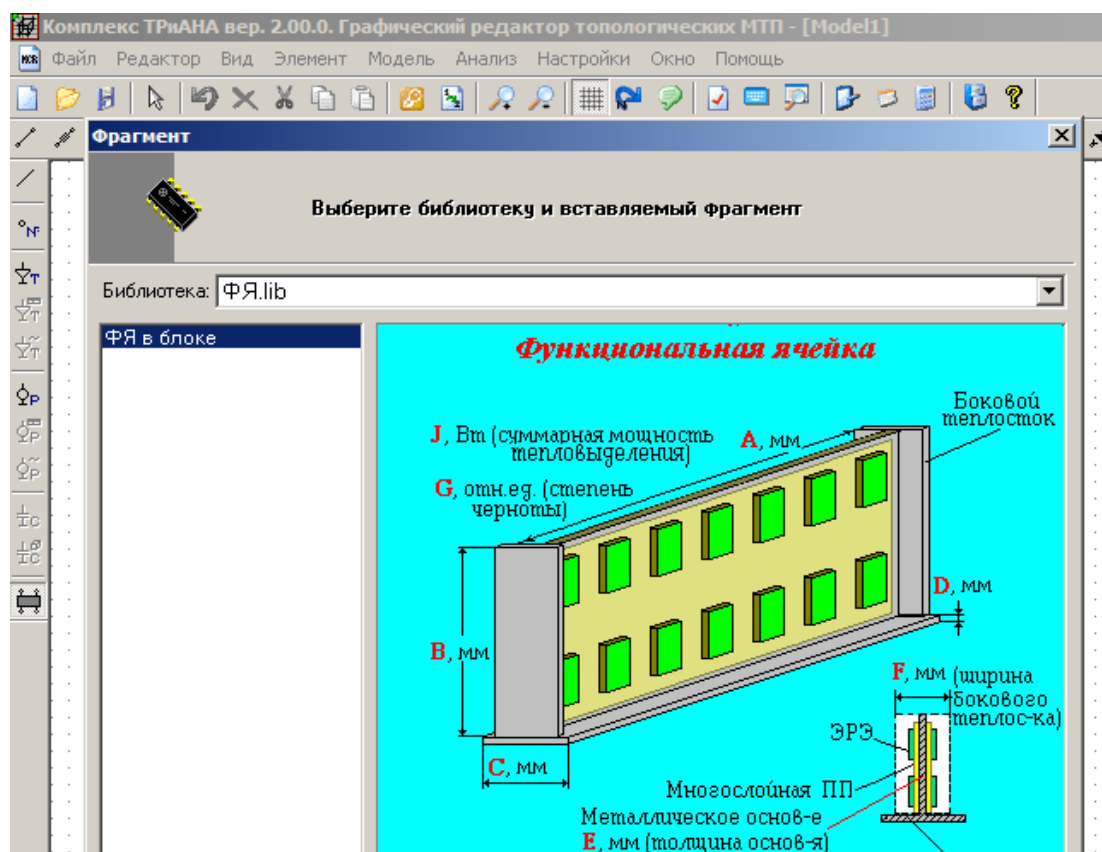


Рис. 2.66. Диалог вставки фрагмента МТП

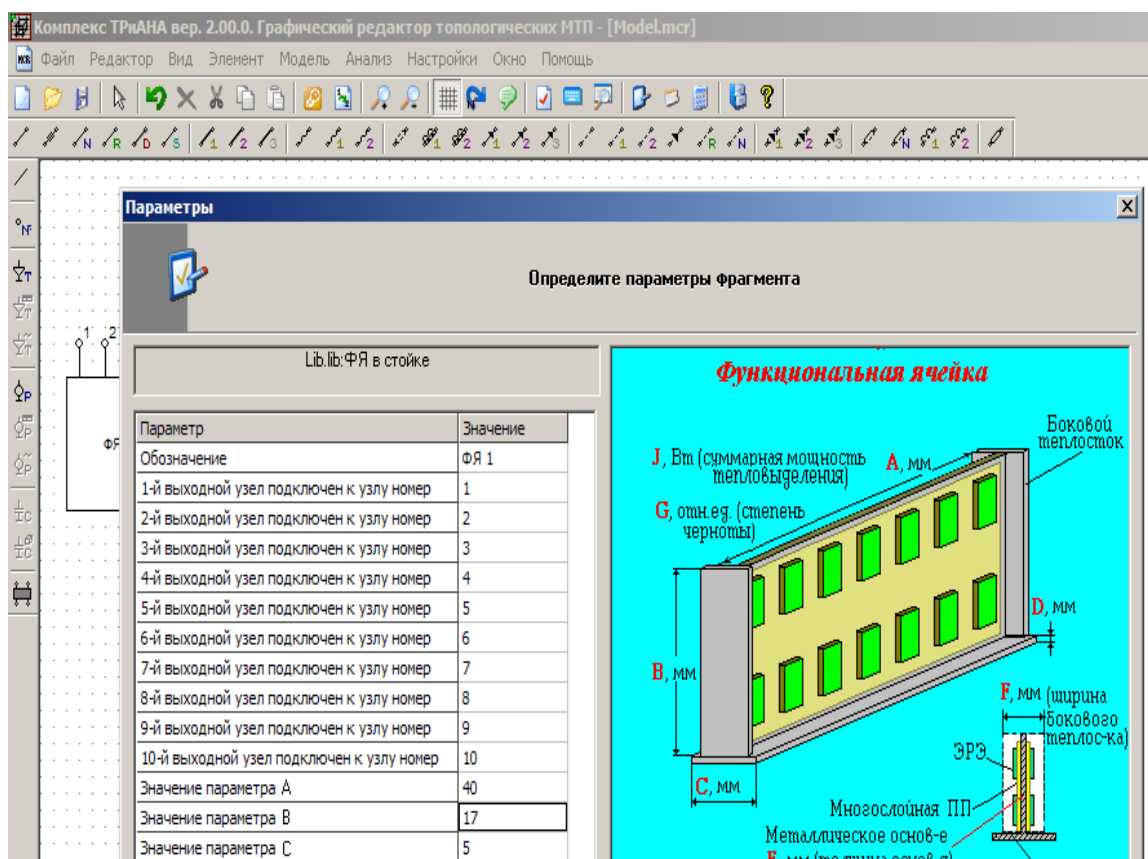


Рис. 2.67. Ввод значений экспортируемых параметров

Подключение библиотеки осуществляется посредством активизации подпункта <Библиотеки> пункта меню <Настройки>, как это показано на [рис. 2.56](#).

Затем, посредством активизации пункта <Элемент><Фрагмент>, программа *MTPEditor* переводится в режим вставки фрагментов. Указателем манипулятора «мышь» выбирается желаемое местоположение вставляемого фрагмента на экране и фиксируется нажатием левой кнопки манипулятора. При этом отображается диалог, показанный на [рис. 2.57](#), в котором предлагается выбрать библиотеку и вставляемый фрагмент.

После выбора и размещения фрагмента МТП на экране появляется диалог, в ходе которого определяется обозначение фрагмента МТП (в составе общей схемы МТП) и устанавливаются значения экспортируемых параметров ([рис. 2.58](#)). Таким образом вводятся все необходимые фрагменты МТП. Далее фрагменты могут соединяться и дополняться другими компонентами МТП (см., например, [рис. 2.59](#)). Пример МТП (см. [рис. 2.61](#)), сформированной при помощи фрагментов приведен на [рис. 2.59](#).

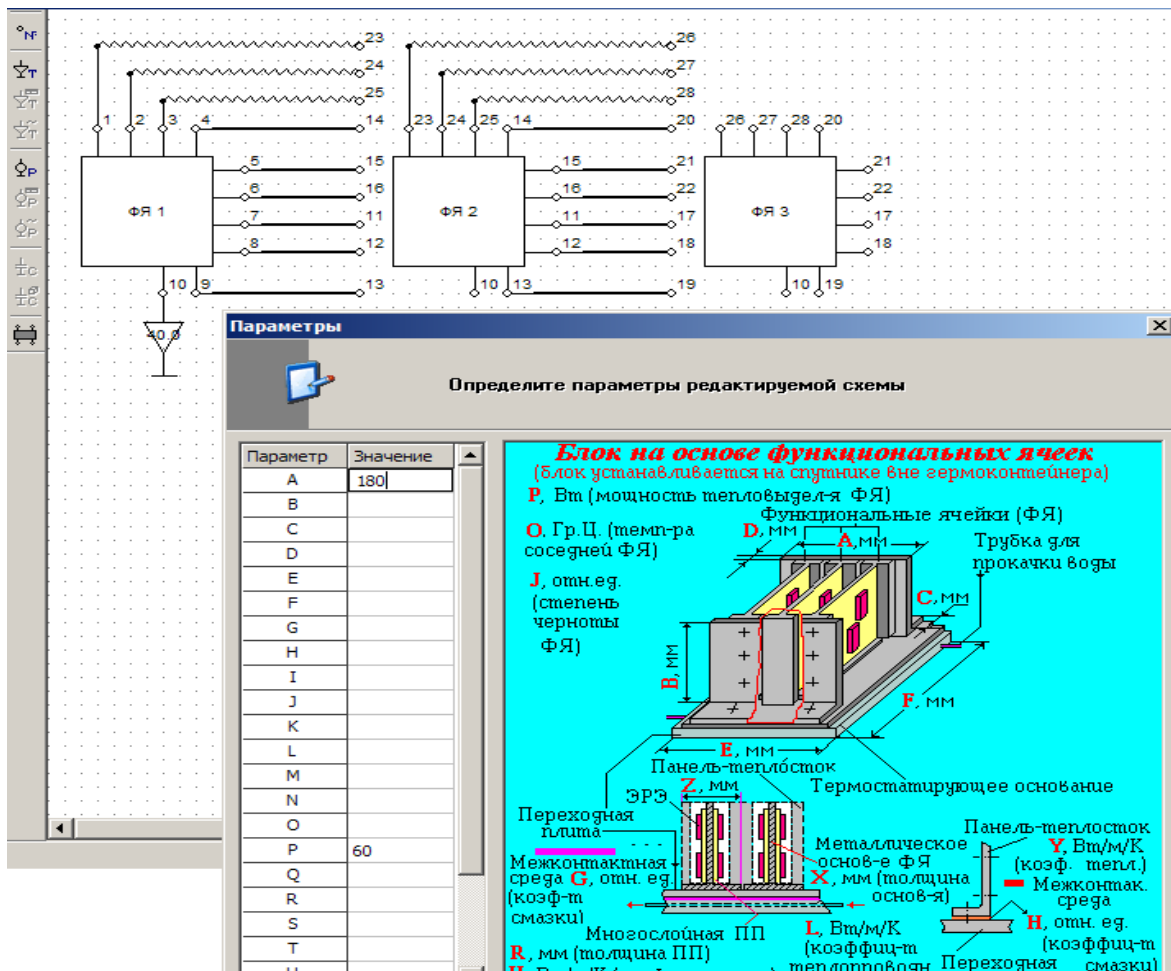


Рис. 2.68. Сформированный граф МТП

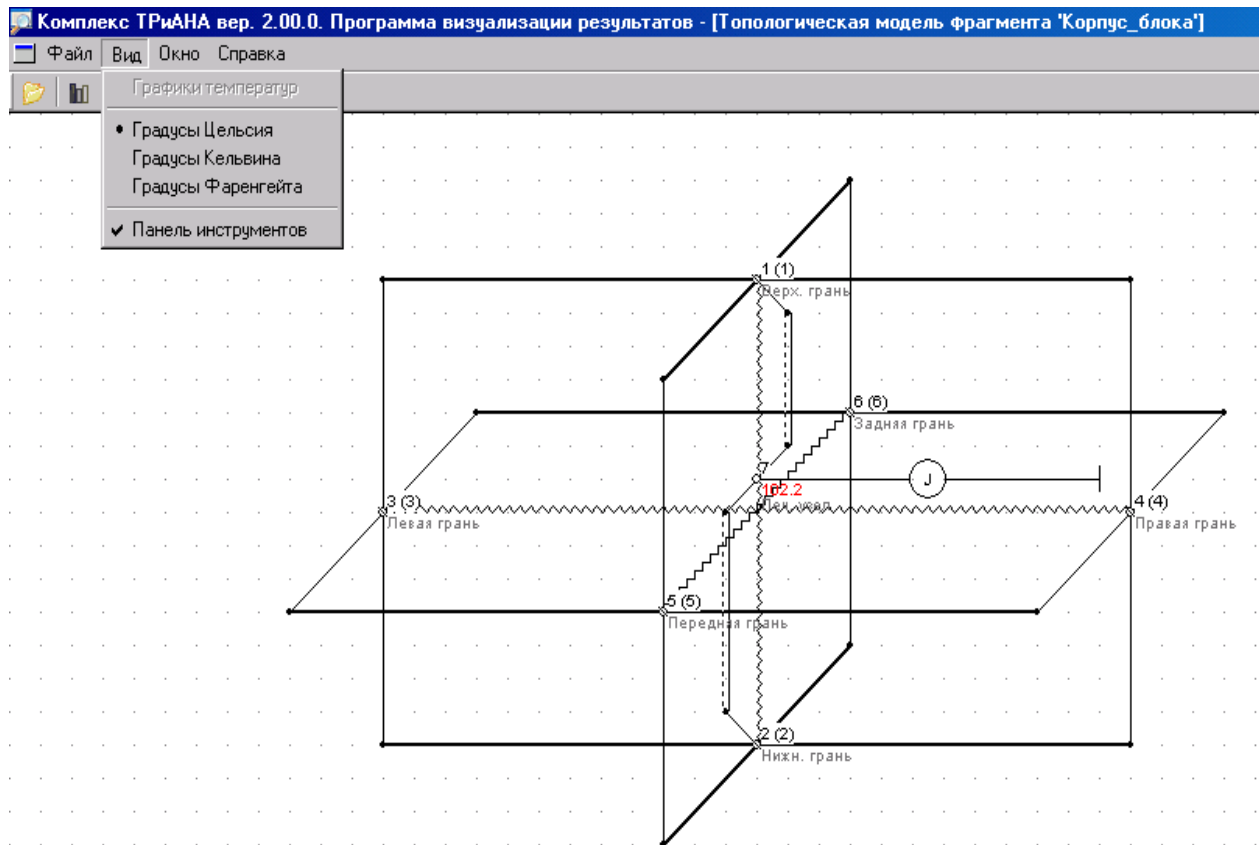


Рис. 2.70. Результаты, отображенные на графе библиотечного фрагмента МТП

При исследовании нестационарных тепловых процессов графики могут строиться как для конкретного узла (двойное нажатие левой кнопкой манипулятора «мышь» на изображении узла), так и для списка узлов ([рис. 2.72](#)) посредством активизации пункта меню «Вид»–«Графики температур». При выполнении данной команды пользователь выбирает интересующие узлы, для которых строятся графики (см. [рис. 2.72](#)). В случае необходимости пользователь может изменить масштаб отображения графиков посредством команд всплывающего контекстного меню при нажатии правой кнопки манипулятора «мышь» в окне изображения графиков.

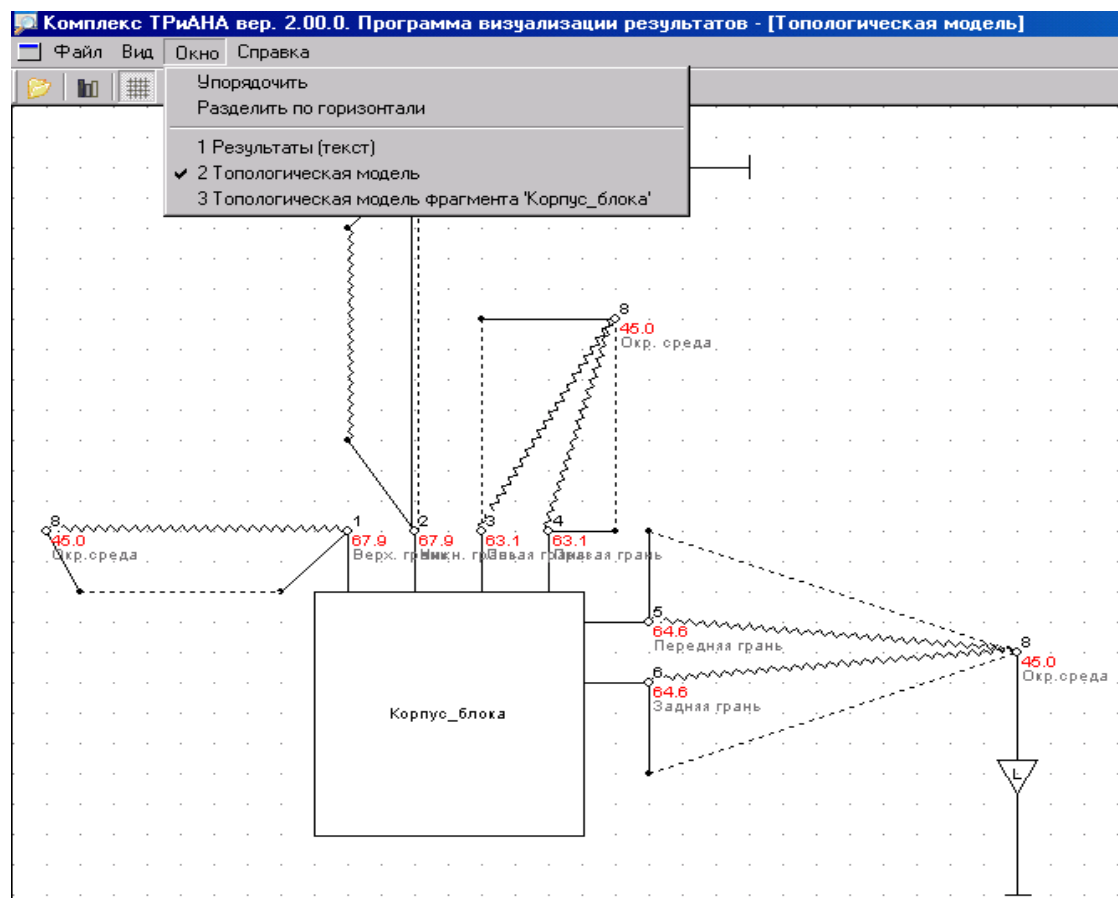


Рис. 2.71. Отображение результатов на топологической МТП с фрагментом

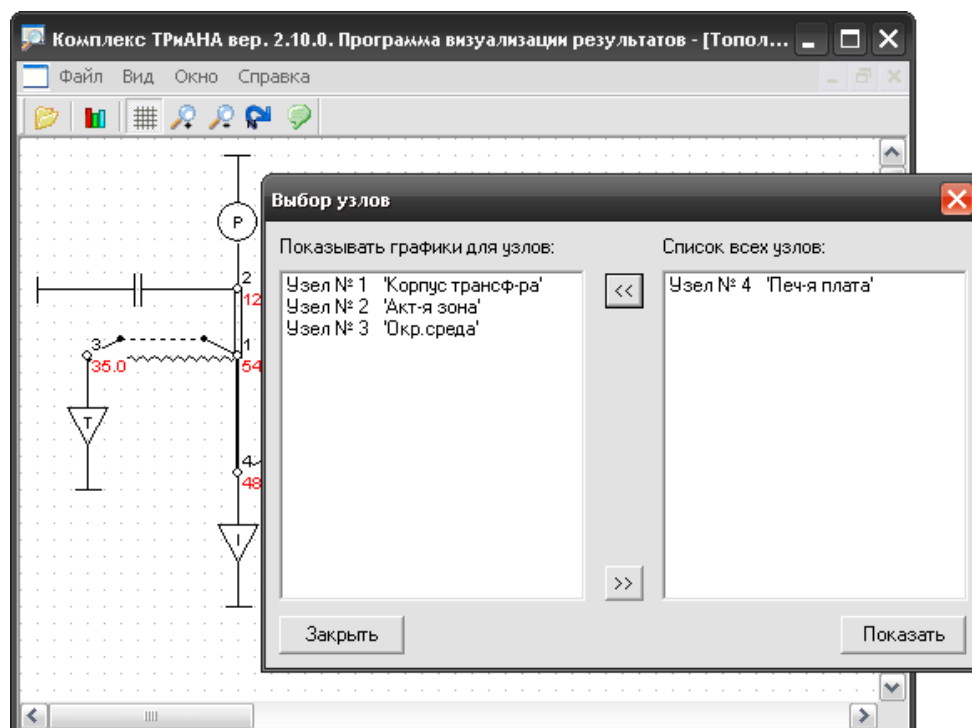


Рис. 2.72. Выбор узлов МТП для построения графиков

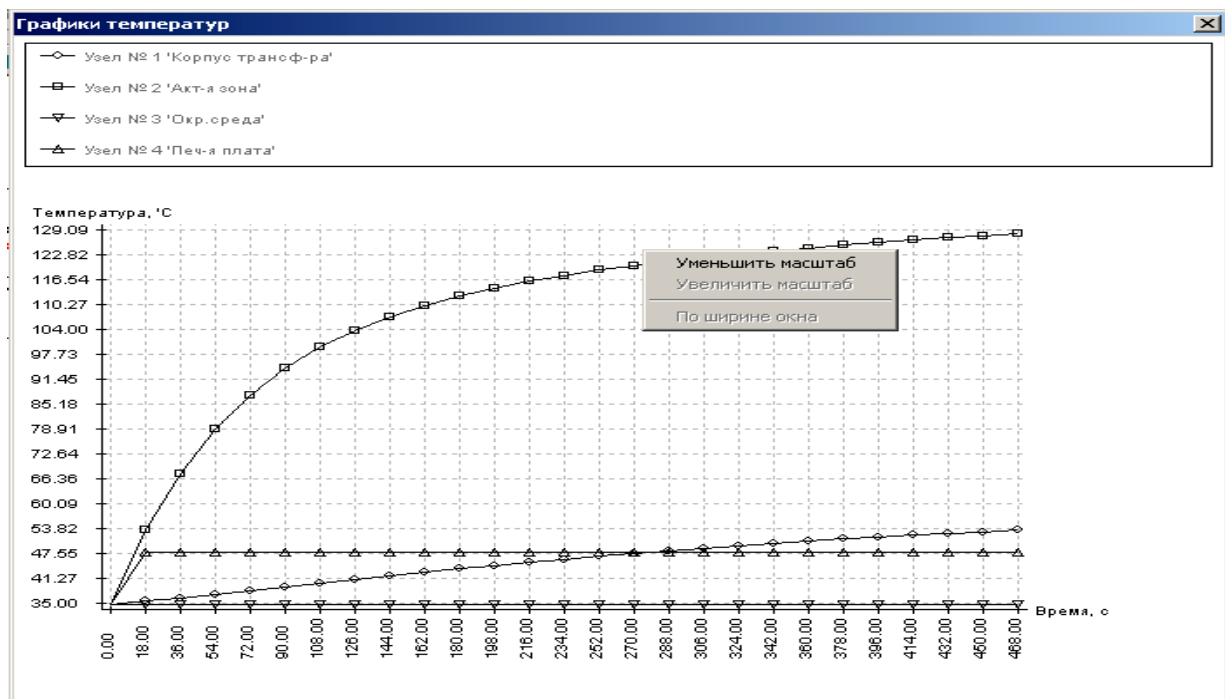


Рис. 2.73. Результат построения графиков

2.9. Обращение к Комплексу № 1



Обращение к программе *MTPEditor* осуществляется посредством вызова папки *ТРИАНА* и активизации в ней необходимых компонентов.

2.10. Методика применения Комплекса № 1

Как было указано раньше, программа по анализу блоков ориентирована на моделировании СТР и НТР конструкций РЭА высших уровней иерархии. Исходя из этого, рассмотрим алгоритм методики применения программы в общем цикле теплового проектирования РЭА ([рис. 2.73](#)). Дадим пояснение блоков представленного алгоритма.

Блок 1. Анализируются требования ТЗ в части «условия эксплуатации» и(или) «требования к конструкции», «требования к охлаждению конструкции» и т. п. Кроме этого, проектировщиком анализируется карта электрических режимов работы ЭРЭ схемы, которая реализуется в разрабатываемой конструкции. После этого намечаются пути решения задач по обеспечению необходимых тепловых характеристик проектируемого РЭА.

Блок 2. На основе результатов предыдущего блока алгоритма методики проектировщиком разрабатывается эскиз конструкции или моделируется ранее используемая на данном предприятии конструкция блока РЭА.

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 158 |
|---|--|---|------------|

Блок 3. На данном этапе методики осуществляется условная декомпозиция конструкции на иерархические уровни с позиций теплового проектирования и строится схема иерархического моделирования конструкции. Схему моделирования определяет разработчик, который может разработать наиболее оптимальный (исходя из собственного опыта) по степени детализации и уровням разукрупнения алгоритм моделирования РЭА.

Блок 4. С учетом уровней разукрупнения конструкции проектировщиком производится идеализация конструкции и разработка ее модели тепловых процессов (см. [параграф 2.6](#)). В модели выделяются условно изотермичные объемы (обособленные ЭРЭ, печатные узлы, функциональные ячейки, узлы радиаторов, микросборки), для которых определяются проектировщиком допустимые температуры. Допустимые интегральные температуры определяются разработчиком, исходя из: нормального теплового режима ЭРЭ; необходимых режимов работы схемы устройства (учет температурозависимых параметров в моделях элементной базы, применяемой в системе *OrCAD-9.1*); требований надежности проектируемого устройства (зависимость интенсивности отказов ЭРЭ от температуры); требований к механическим характеристикам проектируемой конструкции (учет зависимости физико-механических характеристик материалов конструкции от температуры); требований к топологическому проектированию (стремление к обеспечению равномерного теплового поля конструкции) и т. п.

Блок 5. При помощи программ *Triana.EXE* и *MTPEdit.EXE* производится моделирование теплового режима конструкции на основе разработанной проектировщиком МТП.

Блоки 6–10. Осуществляется сравнение полученных в результате моделирования интегральных температур с допустимыми температурами, которые определялись разработчиком в блоке № 4 алгоритма. В случае неудовлетворительного результата разработчиком вносятся изменения в проект (блоки №№ 8–10) с целью обеспечения необходимого теплового режима конструкции прибора в целом. После этого повторяются отдельные этапы алгоритма методики, что отражено в блок-схеме алгоритма возвратами на предыдущие блоки алгоритма.

Блок 11. В данном блоке подготавливаются граничные условия (температуры воздушных объемов и потоков, температуры конструктивных элементов, геометрические параметры воздушных прослоек и т. п.) на основе полученных в блоке № 5 результатов моделирования.

Блок 12. После подготовки граничных условий, а также данных, полученных от систем *OrCAD* и *P-CAD*, осуществляется детальное моделирование (до уровня отдельного ЭРЭ) тепловых процессов в конструктивных узлах (ПУ, ФЯ), входящих в состав блока (прибора). Моделирование производится при помощи программ *Triana.EXE* и *BoardEditor.EXE*.

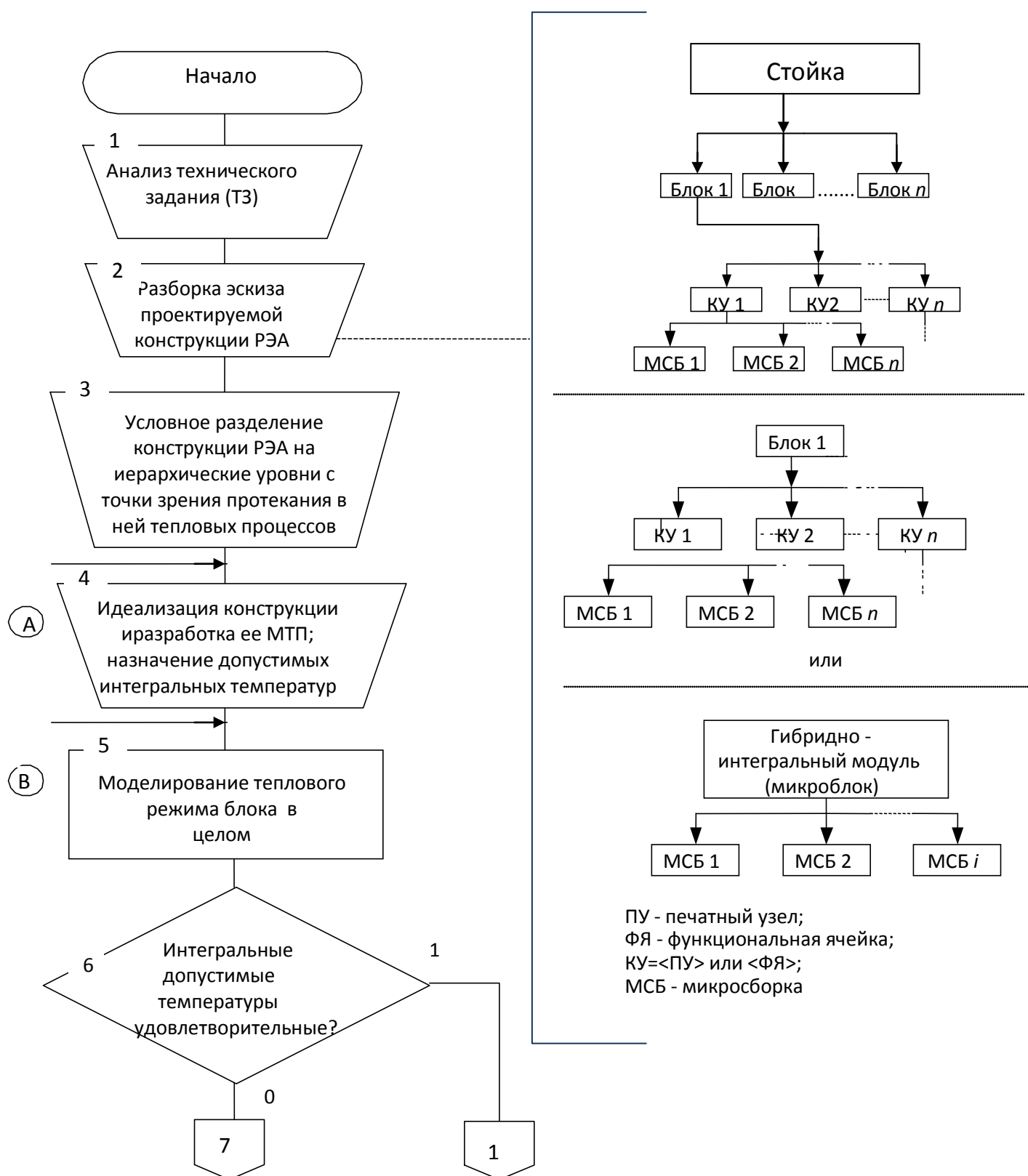


Рис. 2.74. Блок-схема алгоритма обобщенной методики применения ППП в процессе теплового проектирования

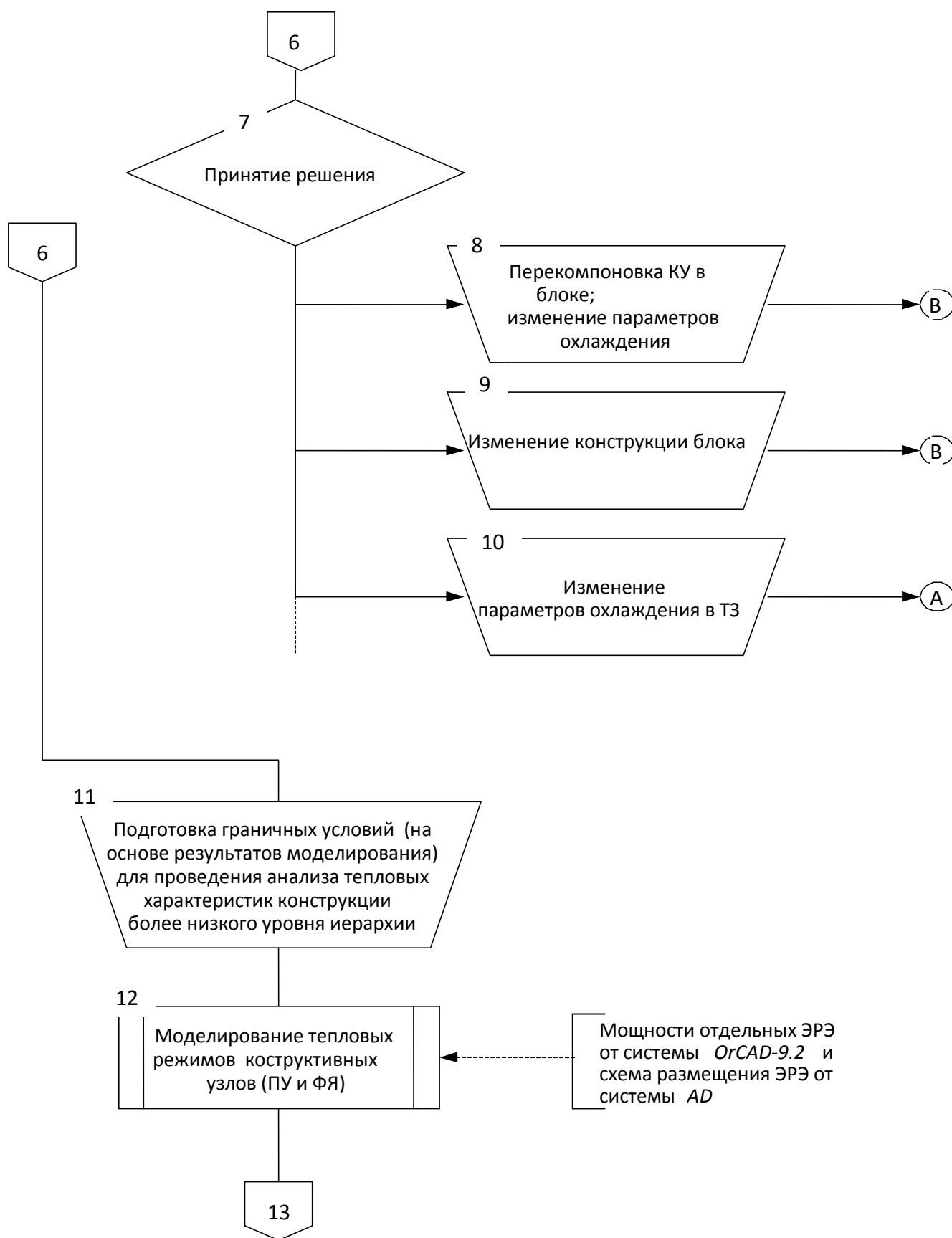


Рис. 2.74. Продолжение

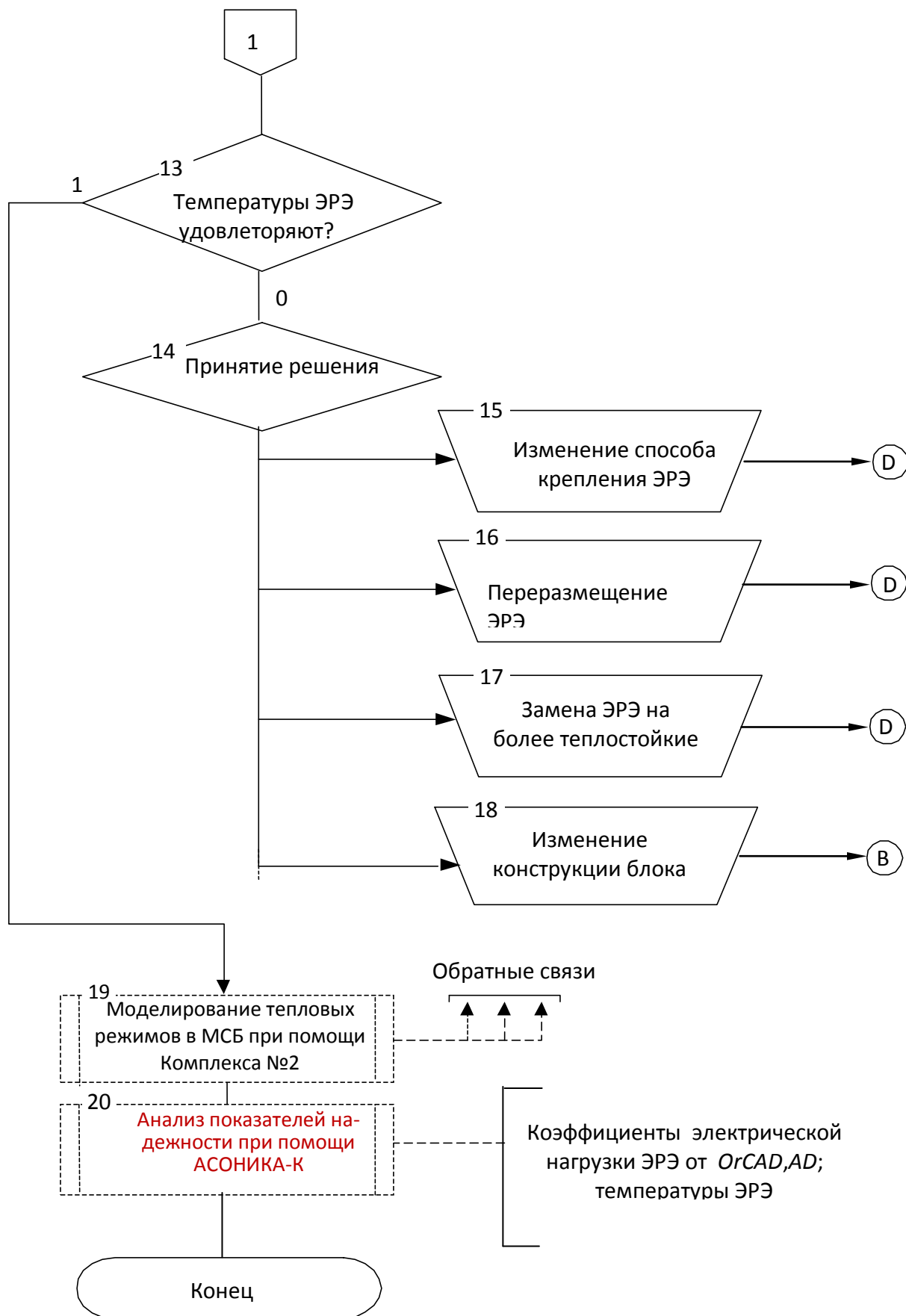




Рис. 2.74. Окончание

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 162 |
|---|--|---|------------|

Блок 13-18. На данном этапе проектировщиком выполняется анализ результатов моделирования. Анализ осуществляется на уровне отдельных элементов. В случае неудовлетворительных результатов проектировщиком вносятся изменения в конструкцию конструктивного узла (блоки № 15–17) или блоки (прибора) (блок № 18) или другие изменения.

Блок 19. В случае установки на конструктивных узлах микросборок, тепловой режим которых необходимо исследовать, на данном этапе выполняется цикл исследований, аналогичный процедурам, выполняемым в блоках 11–18. В качестве граничных условий выступают температуры несущей конструкции ПУ и ФЯ в месте крепления МСБ.

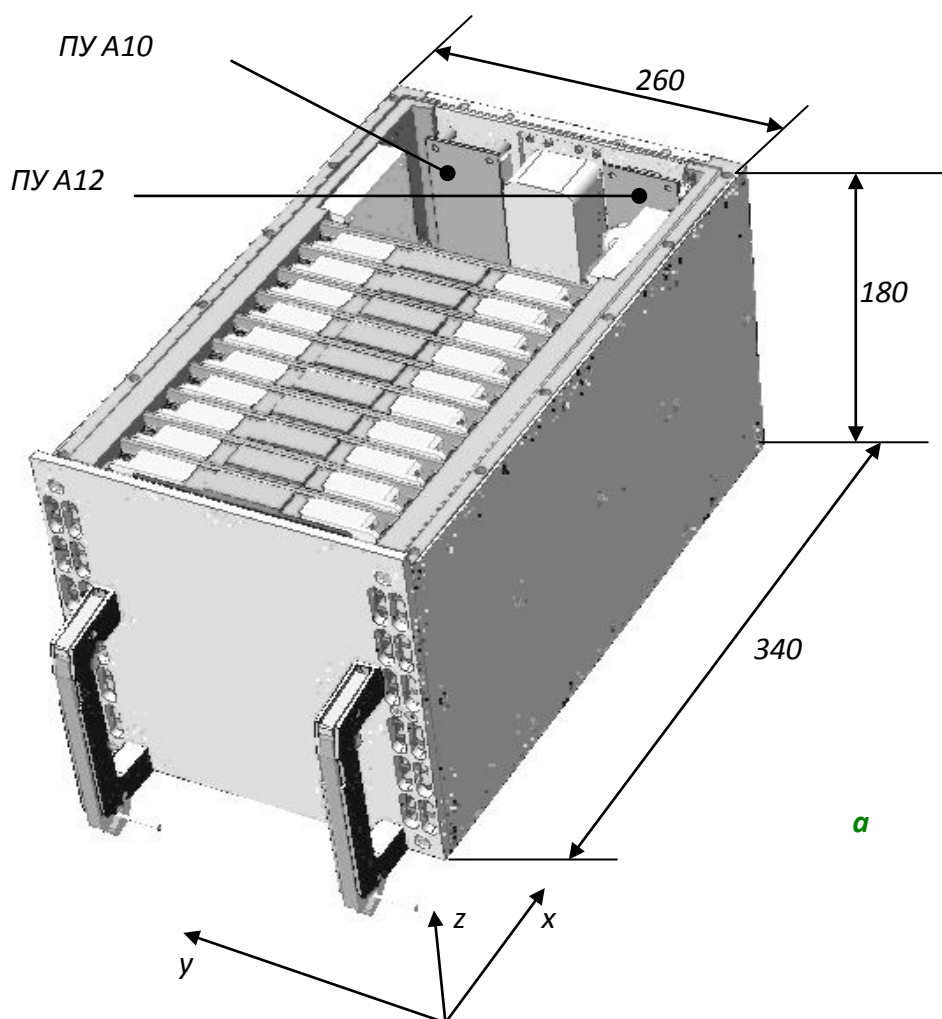
Блок 20. Полученные в результате полного исследования тепловых процессов блока (прибора) температуры ЭРЭ могут использоваться при исследовании показателей надежности как отдельных КУ, входящих в прибор, так и всего прибора в целом.

2.11. Пример расчета

В качестве примера рассмотрим процедуру анализа стационарного теплового режима бортового устройства преобразования телевизионных сигналов (УПТС), выполненного в виде кассетной конструкции, общий вид которой приведен на [рис. 2.75](#). Целью анализа является определение теплового поля блока и интегральных температур, входящих в его состав конструктивных узлов. При этом в качестве требований к тепловому режиму работы блока в целом, с точки зрения его надежностных характеристик, выдвигаются следующие требования: *интегральные температуры конструктивных узлов, входящих в состав блока, не должны превышать 65–68 °С.*

Охлаждение конструкции блока УПТС на объекте установки осуществляется посредством принудительной вентиляции. Воздушный поток (температура 20,3 °С, расход 20 м³/час) направлен вдоль оси Oz. Температура окружающей среды (внутри объекта) 40 °С. Эскиз компоновки блока конструктивными узлами представлен на [рис. 2.75](#). Блок комплектуется печатными узлами А1–А12. Линейные размеры печатных узлов ($l_x \times l_y \times l_z$, где l_z – эффективная толщина ПУ /приближенное значение/) следующие: А1–А9, А11 – 240×170×15 мм; А10 – 160×70×12 мм; А12 – 120×70×8 мм.

Монтаж ЭРЭ на ПУ, за исключением ПУ А12, двусторонний. Мощности тепловыделений в печатных узлах распределены следующим образом: А1 – 10 Вт; А2 – 12,5 Вт; А3 – 10,5 Вт; А4 – 12 Вт; А5–А7 – 11,5 Вт; А8 – 9,5 Вт; А9 – 6 Вт; А10 – 6 Вт; А11 – 14 Вт; А12 – 5 Вт.



Модули
источников
питания В1, В2

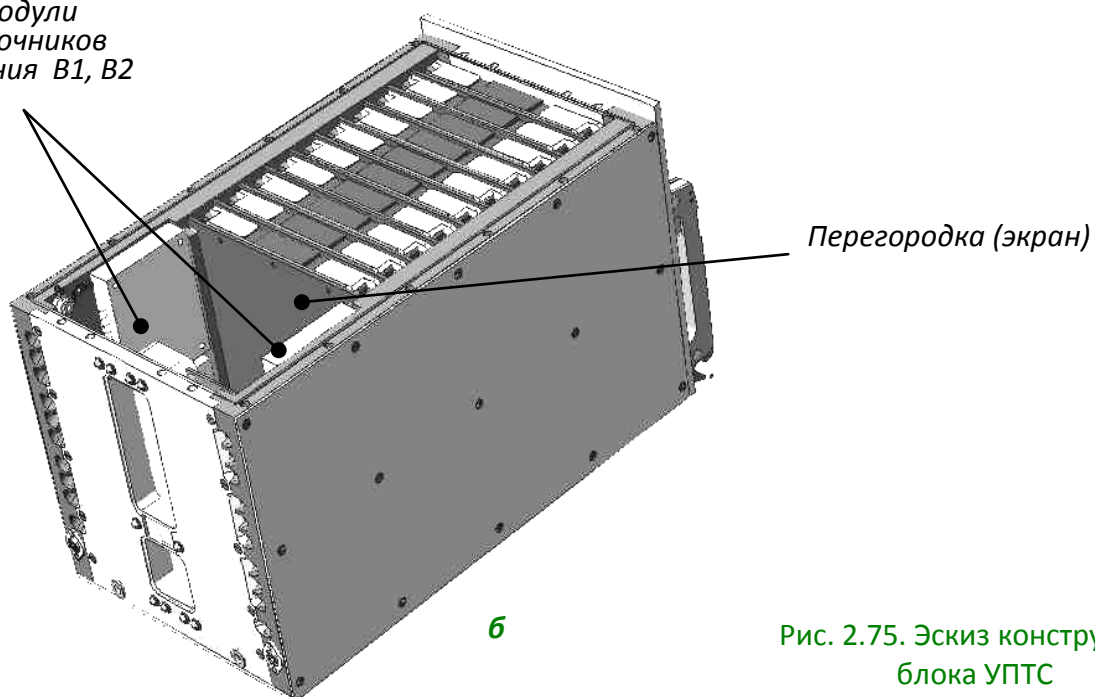


Рис. 2.75. Эскиз конструкции блока УПТС

На внутренних поверхностях боковых стенок блока устанавливаются модули источников питания *B1* и *B2* с мощностью тепловыделения 6 Вт каждый. Линейные размеры каждого модуля по аналогии с размерами печатных узлов 140×75×12 мм. Схема каналов, образованная печатными узлами и другими конструктивными элементами блока, приведена на [рис. 2.77](#). Расчетная средняя скорость воздуха в каналах конструкции (*k1–k12*), полученная на основе выражения (2.1), составляет $V = 0,13$ м/с.

$$V = G / S_k, \quad (2.3)$$

где G – расход хладоносителя, м³/с; S_k – площадь сечения канала, по которому прокачивается хладоноситель, м².

Площади теплоотдающих поверхностей ЭРЭ, установленных на печатных платах, в первом приближении могут приниматься равными $(l_x \times l_y) \times 0,5$. Относительные степени черноты ε внутренних поверхностей блока, ПУ и источников питания составляют 0,8. Наружные поверхности блока покрыты черным лаком ($\varepsilon = 0,97$). Материал корпуса блока – алюминиевый сплав АМЦ ($\lambda = 180$ Вт/м/К).

На основе приведенных выше данных разработаем МТП блока УПТС с параметрическим описанием ее компонентов.

На первом этапе выполним идеализацию конструкции с точки зрения протекания в ней тепловых процессов.

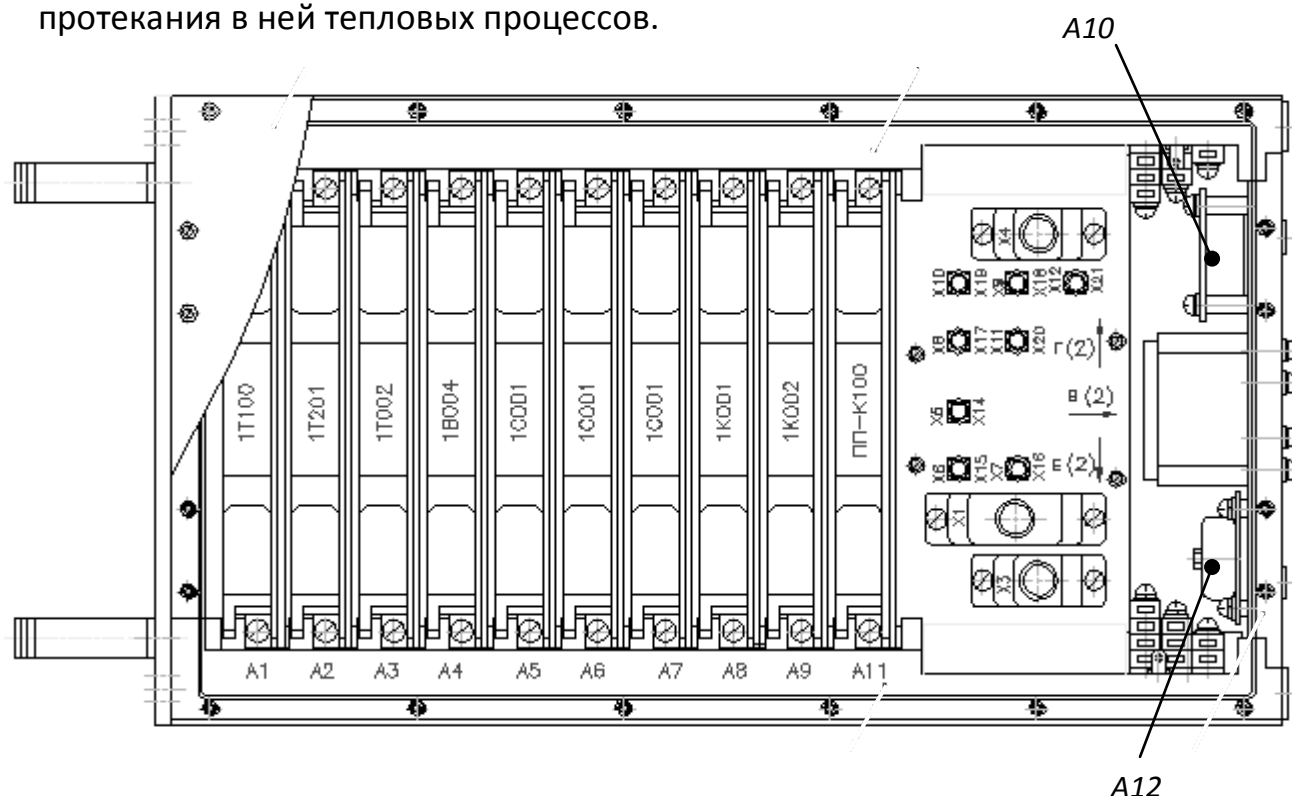


Рис. 2.76. Эскиз компоновки блока печатными узлами

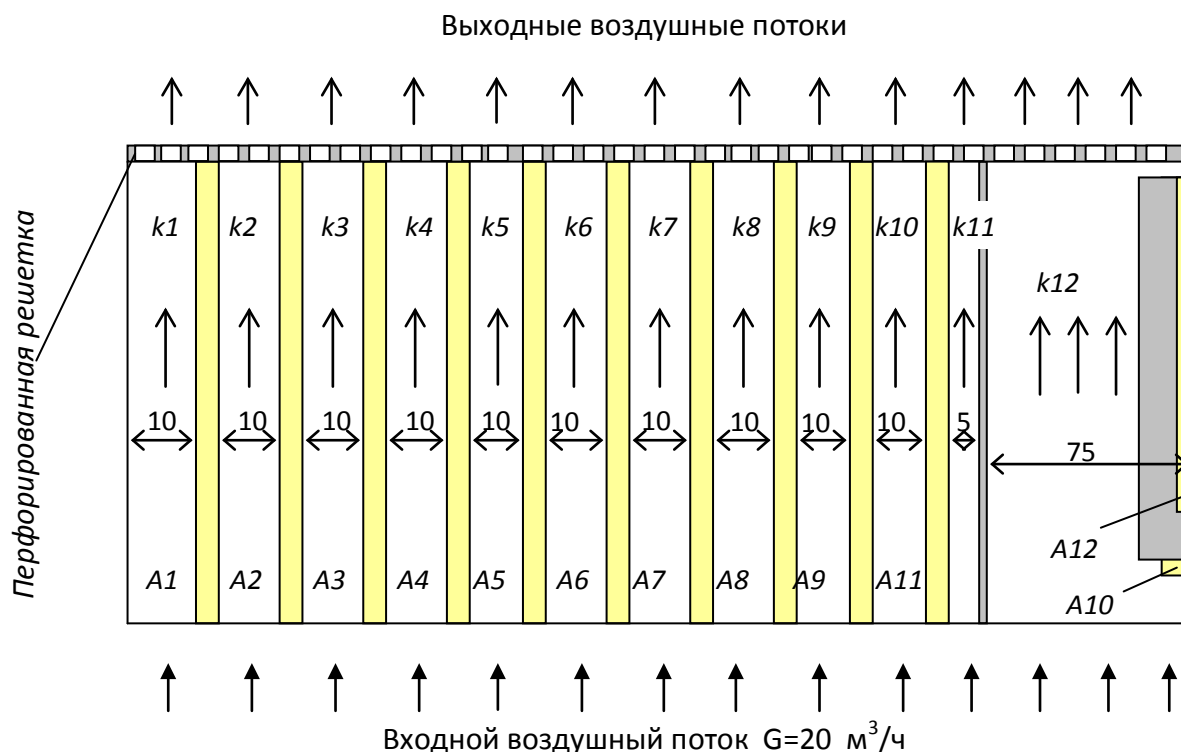


Рис. 2.77. Схема расположения каналов в конструкции УПТС

1. Ввиду большого значения коэффициента теплопроводности материала стенок корпуса, а также ввиду применения принудительного воздушного охлаждения примем изотермичным корпус блока

2. Печатные узлы, модули источников питания и перегородку (экран) представим в виде условно нагретых зон с ранее приведенными размерами ($l_x \times l_y \times l_z$). При этом для ПУ A1–A9, A11 пренебрегаем их тепловыми сопротивлениями крепления к корпусу.

3. Сеть каналов в МТП будем формировать в соответствии со схемой, приведенной на [рис. 2.79](#). При этом для всех каналов входной поток хладоносителя будем моделировать одним узлом МТП (так как температура хладоносителя на входе в каждый канал является величиной постоянной $+20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), а выходные потоки хладоносителя на выходе каждого канала отдельными узлами МТП.

С учетом перечисленных допущений граф МТП блока УПТС будет иметь структуру, приведенную на [рис. 2.78](#).

Рассмотрим кратко структуру приведенной МТП. Узлами № 1–10 моделируются ПУ A –A9, A11, а узлом № 11 – перегородка (экран). Корпус блока в МТП моделируется узлом № 12. Печатные узлы A10 и A12 в МТП моделируются узлами № 27 и № 28. Модули B1 и B2 – соответственно узлами № 29 и № 30. Узлами № 14–25 в МТП моделируются воздушные потоки на выходе из каналов k1–k12 (см. [рис. 2.79](#)). Каждый канал в конструкции блоков в МТП представлен совокуп-

ностью ветвей 62-го типа (для 1-го канала ветви 1–13, 1–14, 12–13, 12–14) и 71-го типа (для 1-го канала ветвь 13–14) и 17-го или 16-го типа (для 1-го канала ветвь 1–12). Теплообмен внешней поверхности корпуса с окружающей средой в МТП отражен ветвями 26-го и 16-го типа (ветви 12–26). Для ПУ А10 и А12 элементы крепления к корпусу моделируются ветвью 1-го типа (тепловое сопротивление крепления между ПУ и корпусов составляет 1,5 К/Вт) /ветви: 27–12 и 28–12/. Крепление модулей источников питания к корпусу моделируются ветвями контактного теплообмена (сухой контакт) /ветви 11-го типа: 29–12 и 30–12/.

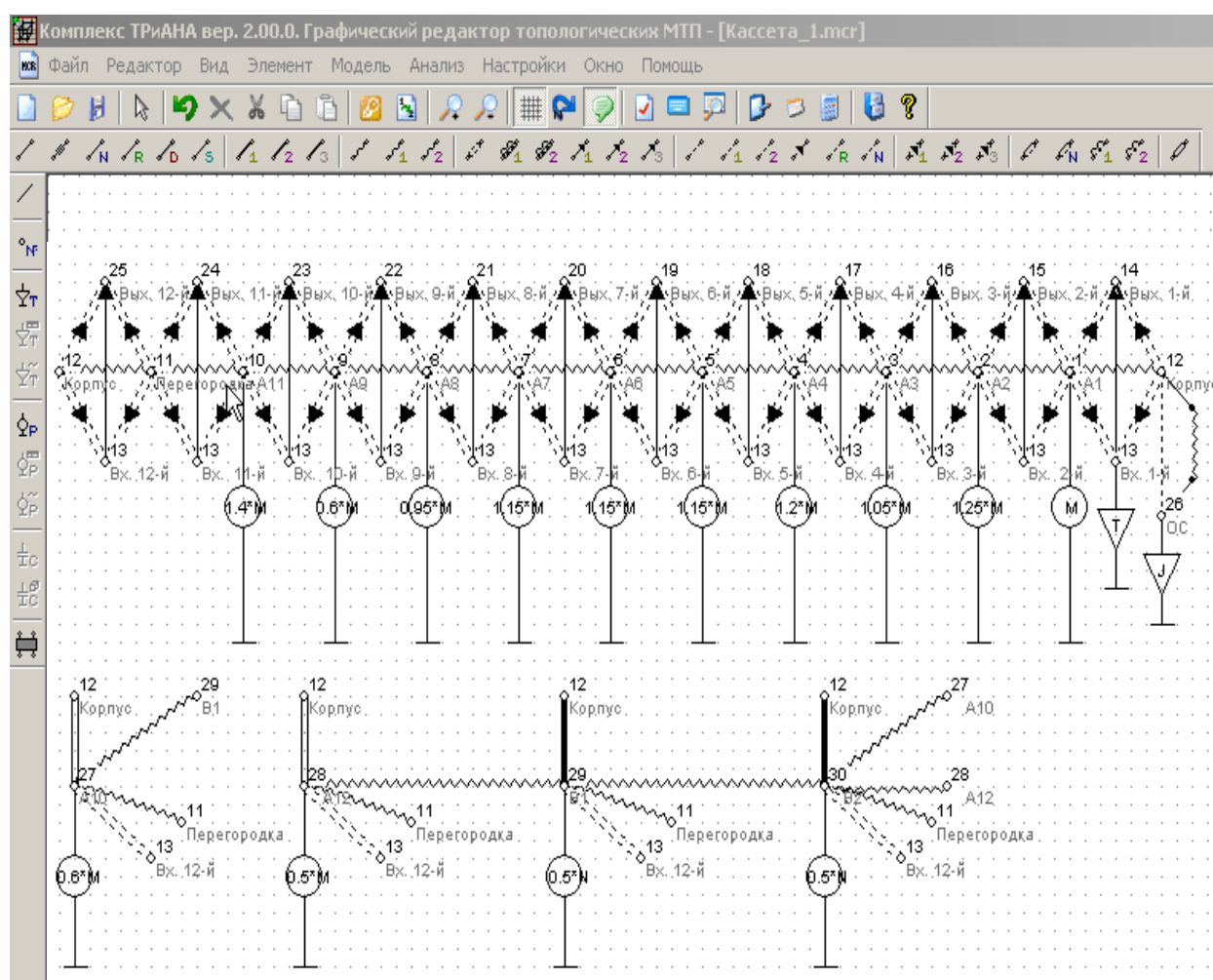


Рис. 2.78. Структура графа МТП блока УПТС

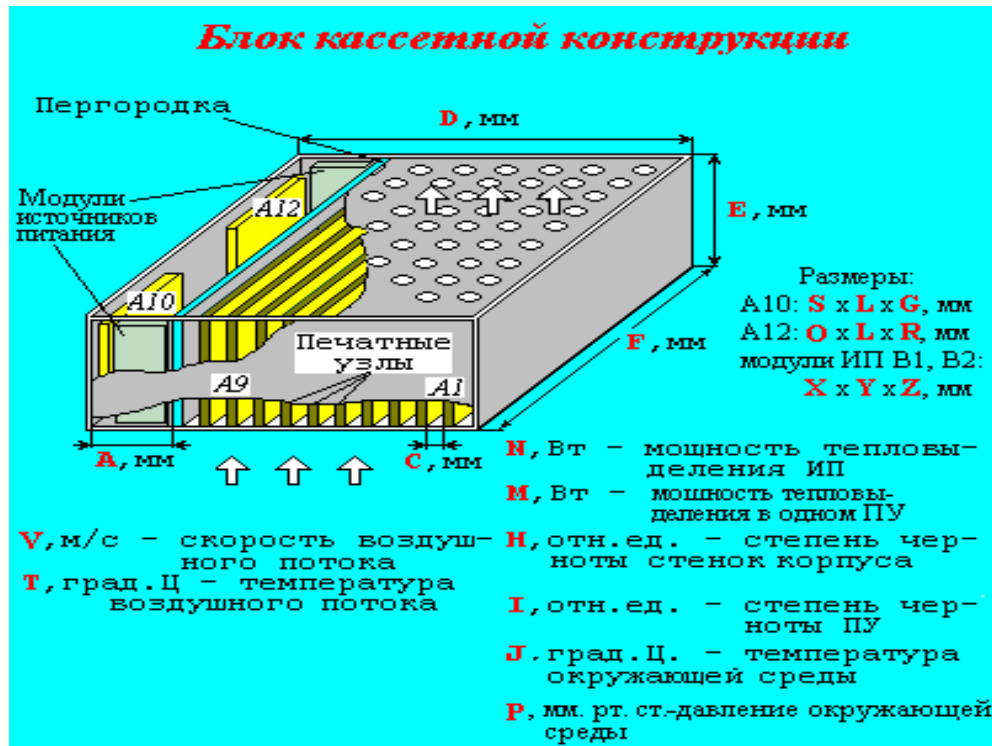


Рис. 2.79. Эскиз конструкции блока УПТС (с перечнем параметров), внедряемый в файл данных *.msr

Для дальнейшей параметризации компонентов приведенного на [рис. 2.78](#) графа МТП создадим рисунок эскиза блока, который в дальнейшем будет сохранен в файле *.msr вместе с МТП. Созданный эскиз блока приведен на [рис. 2.69](#). На рисунке также приведены обозначения параметров, с помощью которых будет осуществлена параметризация компонентов МТП блока. Пример ввода параметризованных параметров МТП представлен на [рис. 2.74](#).

Для параметрического описания источников мощности, моделирующих тепловыделения в печатных узлах A1–A12 (узлы МТП № 1–10, 27, 28), в качестве мощности тепловыделения, обозначенной на [рис. 2.71](#) как параметр «M», примем мощность тепловыделения в ПУ A1. Тогда значение мощности тепловыделения в ПУ A2 может быть описано как $1,25 \cdot M$. По аналогии в графе МТП описаны остальные источники мощности для указанных выше печатных узлов. Значения мощностей тепловыделения в модулях B1 и B2 описываются через параметр «N», представляющий суммарное тепловыделение в модулях B1 и B2. По аналогии в МТП описываются источники заданной температуры (см. [рис. 2.78](#) и [рис. 2.79](#)).

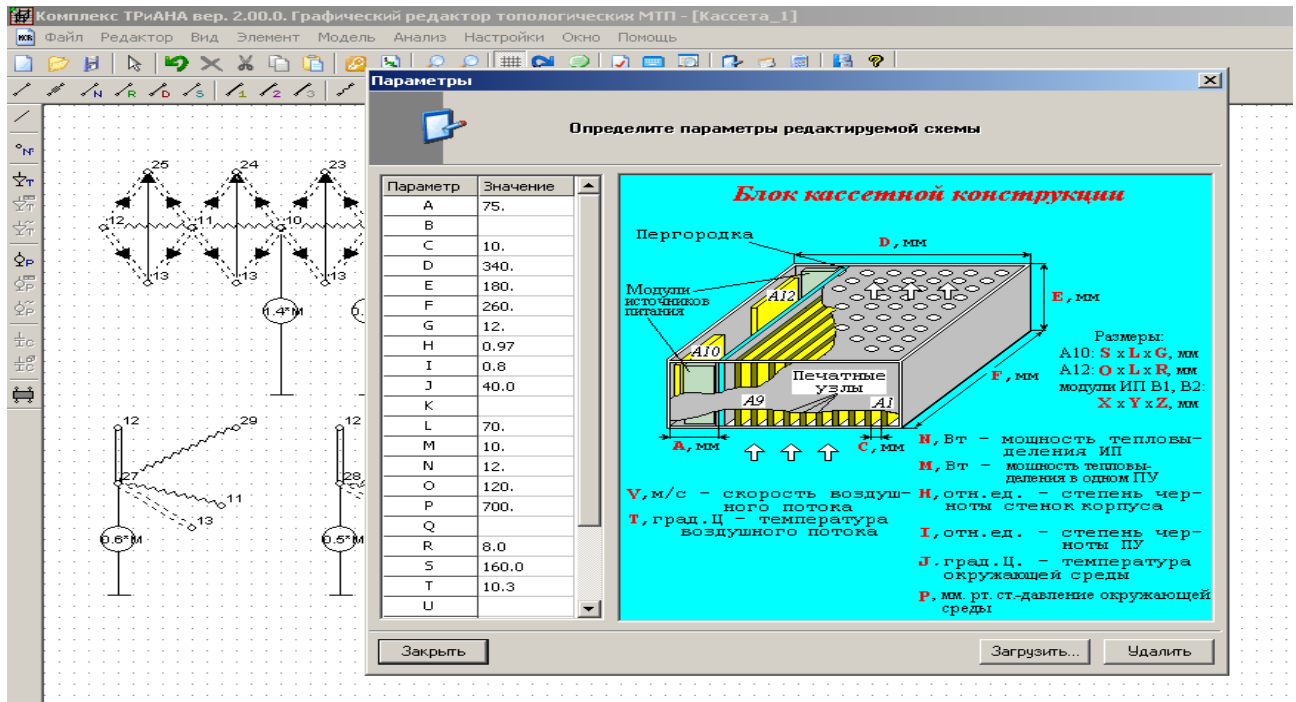


Рис.2.80. Пример ввода параметризованных параметров МТП

Описание ветвей МТП, отражающих теплообмен корпуса с окружающей средой (ветви 12–26), опирается, в первую очередь, на описание площади теплоотдающей поверхности блока. Площадь внешней поверхности блока можно описать в ветвях 16-го и 26-го типов как $(F \cdot E \cdot 2) + (D \cdot E \cdot 2) + (D \cdot F \cdot 2)$.

При этом значение первого параметра в ветвях 16-го и 26-го типов можно определить равным единице, а второй параметр записать в виде вышеприведенной формулы. Степень черноты поверхности блока определяется как параметр «H», а определяющий размер для ветви 26-го типа как «E». Коэффициент облученности (для ветви 16-го типа) и ориентации (для ветви 26-го типа) можно определить равными единице, т. е. без параметрического описания. Давление окружающей среды определяется как параметр «P». В некоторых случаях, когда параметризованную МТП необходимо занести в библиотеку фрагментов, целесообразно размер блока, определяемый количеством плат, выразить через шаг установки, эффективную толщину и количество ПУ, устанавливаемых в блоке и т. п.

Рассмотрим далее параметризацию компонентов ветвей, описывающих каналы. Рассмотрим в качестве примера 2-й канал, образованный ПУ A1 и A2 (см. [рис. 2.77](#)). В ветвях 62-го типа в качестве размеров «Высота канала» записывается параметр «F-20», размера «Ширина канала» – параметр «C», а размера «Длина рассматриваемой части канала» – параметр «E-10». В качестве зна-

чения скорости воздуха в канале записывается параметр «V», определенный как средняя скорость хладоносителя в каналах конструкции.

В более общем случае значения скоростей в каналах конструкции блока могут быть определены индивидуально через заданный расход воздуха и площади сечений каналов. Значение параметра «Номер участка канала» для приведенной на [рис. 2.78](#) МТП определяется равным единице, а значение «Радиус изгиба осевой линии» – 0. Параметр «Площадь дополнительных элементов», как было описано ранее, выражается как $(F-20)*(E-10)*0.5$. Давление окружающей среды описывается по аналогии с ветвью 26-го типа. Параметры ветви 71-го типа описываются аналогичным образом, за исключением параметра «Коэффициент заполнения канала», который может быть определен без параметрического описания в виде числа из диапазона 0,1–0,2. Для ветви данного типа, описывающей теплоперенос в 12-м канале (k_{12} на [рис. 2.77](#)) значение параметра «Коэффициент заполнения канала» записывается приблизительно как $((X*Y*Z*2)+(O*L*R*2))/(F*E*A)$. При задании значений параметров ветвей 17-го

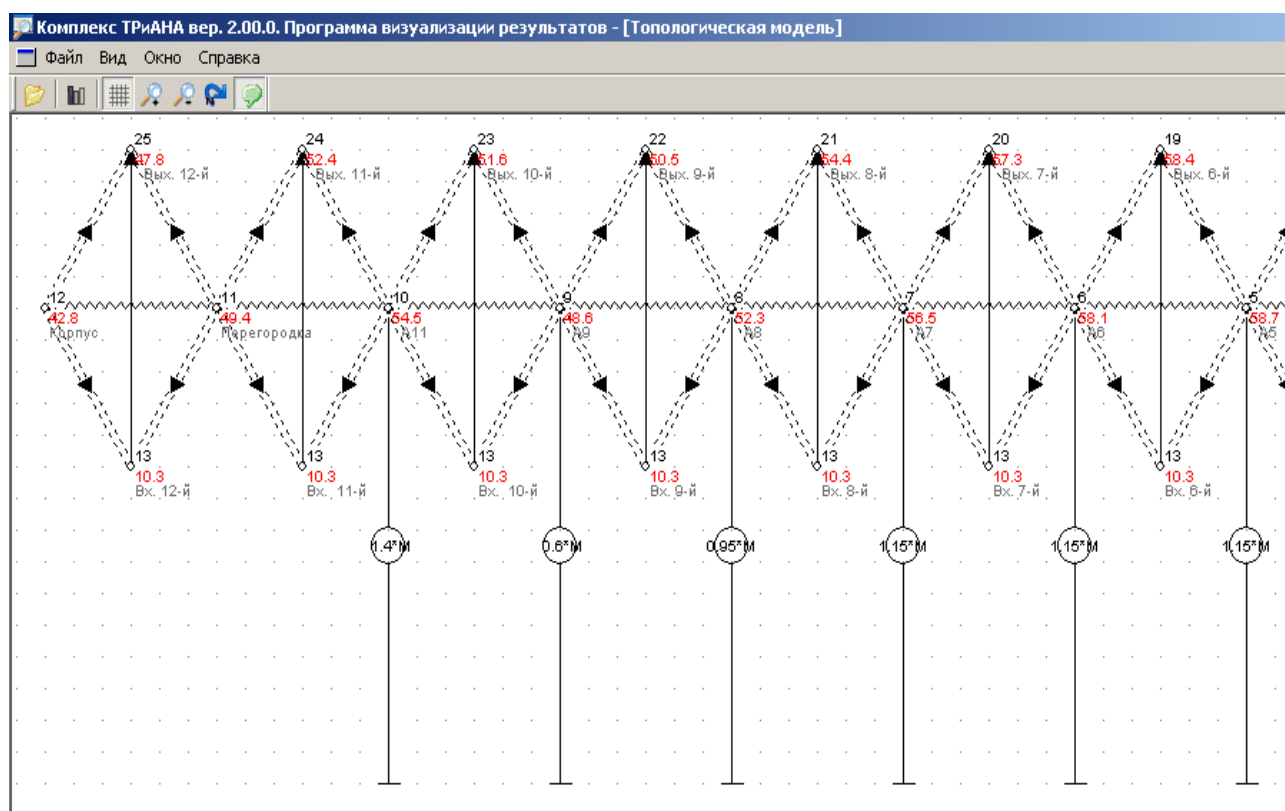




Рис. 2.81. Фрагмент графа МТП, полученный при просмотре результатов анализа программой *MTPViewer*

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1 | 170 |
|---|---|--|---|------------|

типа, описывающих лучистый теплообмен (ветвь 2–1 и ей аналогичные), используются выражения с применением выше рассмотренных обозначений параметров «F», «E», «C» и т. п.

Описание ветвей, моделирующих контактный теплообмен (ветви 12–29 и 12–30), осуществляется через размеры модулей *B1* и *B2*, а именно в ветвях 11-го типа значение размера «Длина контактного пятна» выражается через «X», а размера «Ширина контактного пятна» – через «Y». При описании параметров ветвей 51-го и 16-го типов (ветви 27–13, 28–13, 29–13, 30–13, 27–29, 28–29 и т. п.) площади теплоотдачи ПУ и модулей записывались через параметры «S», «L», «O», «X», «Y», «Z». Например, в ветвях 27–13 и 27–11 как $S*L*1.5$, в ветви 28–13 и 28–11 как $O*L*1.5$, а в ветвях 29–13, 30–13, 29–11 и т. п. как $(X*Z*2)+(Y*Z*2)+(X*Y)$.

Таким образом, на основе вышеизложенного подхода были описаны компоненты приведенного на [рис. 2.78](#) графа МТП.

Перед процессом моделирования, используя пункт меню «Параметры схемы» и функцию «Загрузить» программы *MTPEditor*, выполнялась привязка к файлу данных рисунка эскиза конструкции (см. [рис. 2.77](#)) и определялись числовые значения применяемых в описании компонентов графа МТП параметров («A», «C», «D», «E» и т. п.).

На [рис. 2.78](#) приведен фрагмент графа МТП блока УПТС, обработанный программой *MTPViewer* после анализа МТП математическим ядром *Triana*. На [рис. 2.82](#) представлен фрагмент файла отчета, а на [рис. 2.83](#) – фрагмент файла отчета, полученного в отладочном режиме. На [рис. 2.84](#) приведено тепловое поле блока, построенное на основе результатов моделирования, которое соответствует выдвинутому требованию к нормальному тепловому режиму блока на уровне интегральных характеристик. Анализ результатов расчета также показывает, что в каналах конструкции присутствует переходной режим теплообмена (см. значение критерия *Re* на [рис. 2.83](#)), который, в случае необходимости, может быть доведен до турбулентного путем перераспределения ПУ и/или сети каналов в блоке или посредством увеличения расхода хладагента.



```
=====
ТИПК=01
ТИПР=01
ФЧУВ=00
ТЕСТ=11
    30 - количество узлов модели
ОПИСАНИЕ УЗЛОВ
U111xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx111xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
12      Корпус                                13      Возд.поток(вх. 12)
25      Вых. 12-й                             11      Перегородка
24      Вых. 11-й                             10      A11
23      Вых. 10-й                             9       A9
22      Вых. 9-й                              8       A8
21      Вых. 8-й                              7       A7
20      Вых. 7-й                              6       A6
19      Вых. 6-й                              5       A5
18      Вых. 5-й                              4       A4
17      Вых. 4-й                              3       A3
16      Вых. 3-й                              26      ОС
1       А1                                    14      Вых. 1-й
2       А2                                    15      Вых. 2-й
27      А10                                   28      А12
29      В1                                    30      В2
*
" ----- Описание ветвей схемы -----
12 13 62   240.0   75.0   170.0   0.13     1.0     0.0     0.0     700.0
12 26 26    1.0392800.0   180.0   1.0     700.0
12 26 16392800.0     1.0     0.97     1.0     0.0
12 11 17    240.0   170.0   0.97     0.8     75.0     0.0
13 14 71    240.0    10.0   0.13     0.1     700.0
 1 12 17    240.0   170.0     0.8     0.8     10.0 20400.0
27 12 1     1.5
28 12 1     1.5
29 30 17    140.0    75.0     0.8     0.8     236.0     0.0
12 29 11    140.0    75.0     1.0
27 13 51     1.0 16800.0   160.0   0.13     700.0
13 25 71    240.0    75.0   0.13     0.1     700.0
```

Рис. 2.82. Фрагмент файла-отчета

Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры
"АСОНИКА-Т"
Программный комплекс ТРИАНА v.2.10.00

Copyright ©С 2006-2014,
А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
Тел:8-(913)-571-54-71,
E-mail: [triana@triana.su](mailto: triana@triana.su),
WWW: <http://www.triana.su>

Управляющая информация :

Тип конструкции : 1-0 нетиповая конструкция
Тип анализа : 1 стационарный режим
Расчет ФПЧ : 0 не производится
Тестовая информация : 11 работа в составе ИС

О П И С А Н И Е М О Д Е Л И Т Е П Л О В Ы Х П Р О Ц Е С С О В

Количество узлов модели - 30

Параметры ветвей модели

Таблица N1

| уз1-уз2 | ТИП | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | Q9 |
|---------|-----|-----------|----------|--------|------|---------|----------|----------|--------|----|
| 12- 13 | 62 | 240.00 | 75.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 11- 24 | 62 | 240.00 | 5.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 12- 26 | 26 | 1.00 | 392800.0 | 180.00 | 1.00 | 700.00 | | | | |
| 12- 26 | 16 | 392800.00 | 1.0 | 0.97 | 1.00 | 0.00 | | | | |
| 12- 11 | 17 | 240.00 | 170.0 | 0.97 | 0.80 | 75.00 | 0.00 | | | |
| 1- 14 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 20400.00 | 700.00 | |
| 13- 14 | 71 | 240.00 | 10.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 12- 14 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 12- 13 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 1- 12 | 17 | 240.00 | 170.0 | 0.80 | 0.80 | 10.00 | 20400.00 | | | |
| 27- 12 | 1 | 1.50 | | | | | | | | |
| 28- 12 | 1 | 1.50 | | | | | | | | |
| 29- 30 | 17 | 140.00 | 75.0 | 0.80 | 0.80 | 236.00 | 0.00 | | | |
| 12- 29 | 11 | 140.00 | 75.0 | 1.00 | | | | | | |
| 12- 30 | 11 | 140.00 | 75.0 | 1.00 | | | | | | |
| 27- 13 | 51 | 1.00 | 16800.0 | 160.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 28- 11 | 16 | 120.00 | 70.0 | 0.80 | 1.00 | 4200.00 | | | | |
| 28- 29 | 16 | 120.00 | 70.0 | 0.80 | 0.25 | 4200.00 | | | | |
| 28- 13 | 51 | 1.00 | 12600.0 | 120.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 29- 13 | 51 | 1.00 | 15660.0 | 140.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 30- 13 | 51 | 1.00 | 15660.0 | 140.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |

.....

Рис. 2.82. Продолжение

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:

| | |
|---|-----|
| Размерность матрицы | 30 |
| Начальное число ненулевых элементов | 186 |
| Число ненулевых элементов в факторизованной матрице.. | 204 |
| Количество итераций при решении СНАУ..... | 6 |

* ТАБЛИЦА ТЕМПЕРАТУР В УЗЛАХ М Т П *

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение Темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|-------------|-----------------------------|
| 1 | МТП | A1 | 49.31 |
| 2 | МТП | A2 | 53.87 |
| 3 | МТП | A3 | 53.64 |
| 4 | МТП | A4 | 55.04 |
| 5 | МТП | A5 | 54.84 |
| 6 | МТП | A6 | 54.42 |
| 7 | МТП | A7 | 53.28 |
| 8 | МТП | A8 | 49.96 |
| 9 | МТП | A9 | 47.10 |
| 10 | МТП | A11 | 53.30 |
| 11 | МТП | Перегородка | 49.27 |
| 12 | МТП | Корпус | 42.77 |
| 13 | МТП | Вх. 12-й | 20.31 |
| 14 | МТП | Вых. 1-й | 28.97 |
| 15 | МТП | Вых. 2-й | 32.00 |
| 16 | МТП | Вых. 3-й | 32.88 |
| 17 | МТП | Вых. 4-й | 33.12 |
| 18 | МТП | Вых. 5-й | 33.37 |
| 19 | МТП | Вых. 6-й | 33.24 |
| 20 | МТП | Вых. 7-й | 32.92 |
| 21 | МТП | Вых. 8-й | 32.01 |
| 22 | МТП | Вых. 9-й | 30.75 |
| 23 | МТП | Вых. 10-й | 31.44 |
| 24 | МТП | Вых. 11-й | 36.78 |
| 25 | МТП | Вых. 12-й | 21.22 |
| 26 | МТП | ОС | 40.00 |
| 27 | МТП | A10 | 48.98 |
| 28 | МТП | A12 | 47.79 |
| 29 | МТП | B1 | 42.88 |
| 30 | МТП | B2 | 42.89 |

Рис. 2.82. Окончание

Тип ветви 62

Подключение к узлам 12 - 13

$T_m = 31.54098$ $\lambda = 2.6907869E-02$ $Nu = 1.6186817E-05$

$W, \text{м/с} = 0.1300000$ $Re = 980.5676$ $DI, \text{м} = 0.1700000$

$S, \text{мкв.} = 2.0400001E-02$ $D_{\text{экв.}, \text{м}} = 0.1142857$ $Nus = 9.791341$

$NUK = 1$ $\Gamma = 0.8117579$ $\epsilon_{sl} = 1.675855$

$\epsilon_{spr} = 1.000000$ $\alpha = 2.212441$ $PROVODIM = 4.5133796E-02$

MODBK2: ВХОД

Тип ветви= 26

Подключение к узлам 12 - 26

$T_m = 41.38755$ $A = 2.4594256E-05$ $\lambda = 2.7597127E-02$

$Nu = 1.7094277E-05$ $\beta = 3.1807874E-03$ $Gr \cdot Pr = 1199087.$

$Gr = 1725177.$ $Pr = 0.6950516$ $Nus = 17.86926$

$\alpha = 2.629299$ $PROVODIM = 1.032789$

MODIZL: ВХОД

Тип ветви 16

Подключение к узлам 12 - 26

$S, \text{м кв.} = 0.3928000$ $OBL = 1.000000$ $K_{\text{черн}} = 0.9700000$

$\alpha_l = 6.836271$ $PROVODIM = 2.685287$

MODIZL: ВХОД

Типветви= 17

Подключение к узлам 12 - 11

$S, \text{м кв.} = 4.0800001E-02$ $OBL = -3.544850$ $K_{\text{черн}} = 0.7806841$

$\alpha_l = -20.38119$ $PROVODIM = -0.8315525$

MODBK2: ВХОД

Типветви= 71

Подключение к узлам 13 - 14

$T_m = 24.63902$ $C_0 = 1004.070$ $D_{\text{авк}}(\text{поправ.на давл.}) = 1.092666$

$S, \text{м кв.} = 2.4000003E-03$ $RO_{\text{ср.}} = 1.297923$ $PROVODIM = 0.3254727$

MODBK2: ВХОД

Рис. 2.83. Фрагмент файла *current.debug* на одной из итераций анализа МТП

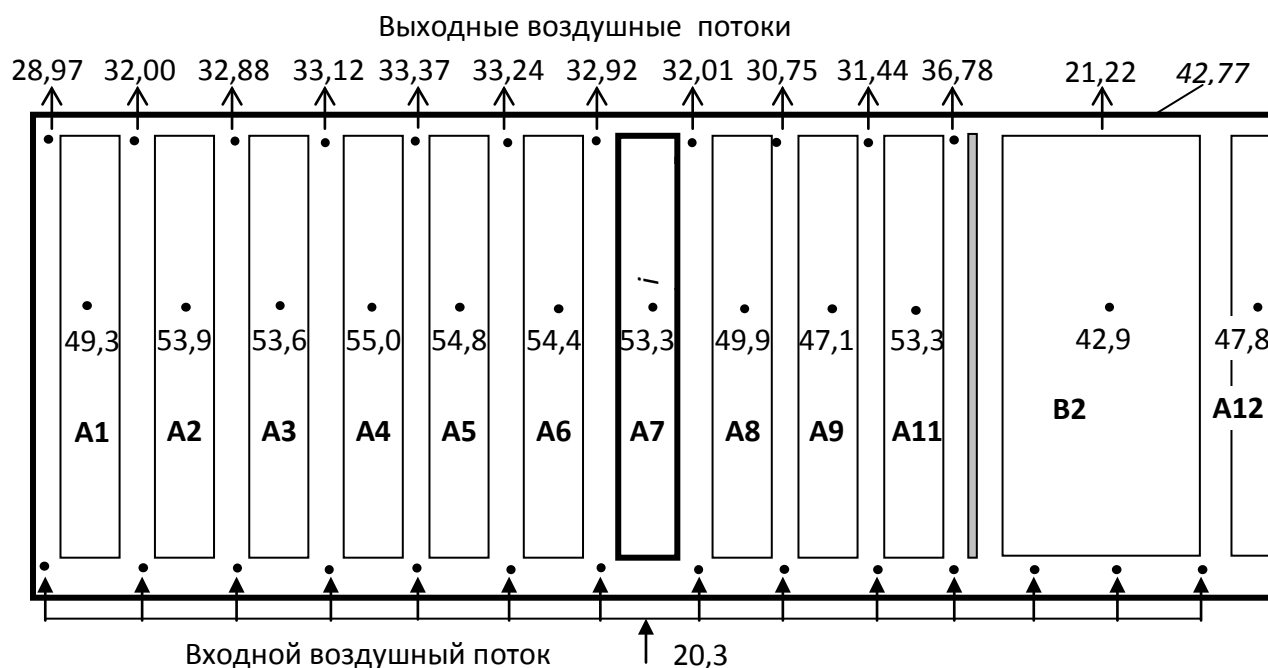


Рис. 2.84. Температурное поле блока УПТС (температура приведена в °C)

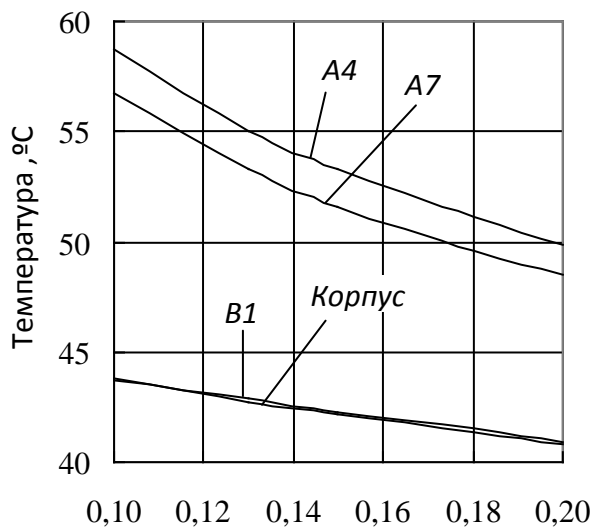


Рис. 2.85. Графики зависимостей температур конструктивных узлов и корпуса блока УПТС от скорости хладоносителя

На [рис. 2.84](#) выделен контур ПУ А7, анализ тепловых характеристик которого на уровне всех ЭРЭ будет рассмотрен в [параграфе 3. 11](#).

В заключении следует отметить, что рассмотренная в данном параграфе структура МТП блока может быть модифицирована в следующих направлениях:

1. В случае применения специальных теплостоков, обеспечивающих отток тепла с несущих конструкций ПУ к стенкам корпуса, в структуру МТП блока (см. [рис. 2.78](#) и [2.81](#)) могут быть добавлены ветви 1–12, 2–12, ..., 10–12, отражающие контактный теплообмен.

2. В случае значительного тепловыделения в конструктивных узлах и элементах, устанавливаемых непосредственно на стенках корпуса блока, в качестве МТП, отражающей кондуктивное распространение тепла по стенкам корпуса и его отдачу в окружающую среду, может быть применена МТП, описанная в [параграфе 2.6.5](#) и приведенная на [рис. 2.15](#). В этом случае в указанной МТП ветви, отражающие теплообмен внутри корпуса, заменяются моделью, приведенной на [рис. 2.78](#).

3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСБОРОК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2

В состав *Комплекса № 2* входят следующие программные единицы ПК ТРiАНА: *BoardEditor*, *Conv2triana*, *Triana*.

3.1. Условия применения *Комплекса № 2*

На основе данных о размещении ЭРЭ, подготовленных пользователем или полученных в системе *P-CAD* (ПК комплектуется конвертором *Conv2triana*, позволяющим автоматически получать информацию о размещении ЭРЭ из файлов **.PCB* и **.PDIF* системы *P-CAD* /подробней см. [параграф 3.7.4/](#)), дополнительных данных, подготовленных пользователем, описывающих геометрические и теплофизические параметры НК КУ, а также геометрические, теплофизические параметры и тепловыделения ЭРЭ, установленных на КУ, и условий охлаждения (получают в результате анализа теплового режима блока, в котором установлен данный КУ), программа в автоматическом режиме синтезирует модель тепловых процессов КУ, по которой проводит моделирование его теплового режима.

При помощи *Комплекса № 2* возможно моделирование тепловых режимов КУ, установленных как автономно, так и в составе блоков РЭА на различных стадиях проектирования.

Комплекс № 2 позволяет проводить моделирование стационарных и нестационарных тепловых режимов КУ с односторонним и двухсторонним монтажом ЭРЭ с различными условиями охлаждения: при давлении окружающего воздуха до 760 мм. рт. ст. в условиях естественного, вынужденного (обдув) воздушного и кондуктивного охлаждения.

3.2. Режимы функционирования *Комплекса № 2*

Составные компоненты *Комплекса № 2* (*BoardEditor*, *Conv2triana*, *Triana*) могут функционировать как автономно, так и в комплексе посредством их соответствующей настройки.

Автономный режим предусматривает несколько вариантов применения компонентов комплекса:

1. Подготовку файла данных для математического ядра *Triana* средствами любого текстового редактора и просмотр файла-отчета также средствами текстового редактора.

2. Подготовку файла данных в графическом режиме средствами программы *BoardEditor*, запуск математического ядра *Triana* из *BoardEditor* и просмотр результатов моделирования средствами постпроцессора программы *BoardEditor*.

Применение составных компонентов *BoardEditor*, *Conv2triana* и *Triana* в комплексе позволяет осуществить:

- подготовку данных в графическом режиме, в частности, при помощи набора специальных функций формировать геометрическую модель исследуемого КУ;
- применять базу данных «Материалы» и «Радиоэлементы» при описании ГТФП НК и ЭРЭ КУ;
- гибко и наглядно выполнять модификацию исследуемой конструкции КУ;
- выполнять отображение результатов моделирования на геометрической модели КУ с использованием цветовой палитры (коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ, температуры корпусов и активных зон ЭРЭ, изотермы НК, термограммы КУ и т. п.), что дает разработчику возможность получить достаточно полную информацию о тепловых процессах, протекающих в КУ.

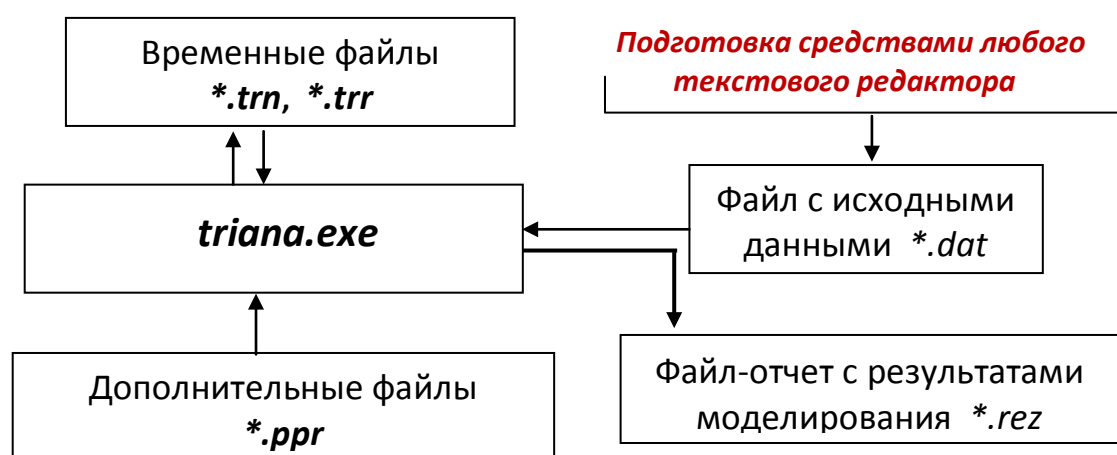


Рис. 3.1. Схема взаимодействия математического ядра с файловыми структурами

На [рис. 3.1](#) приведена схема взаимодействия математического ядра ПК ТРИАНА с файловыми структурами, а на [рис. 3.2](#) – структурная схема взаимодействия компонентов Комплекса № 2 при их совместном применении (в комплексе).

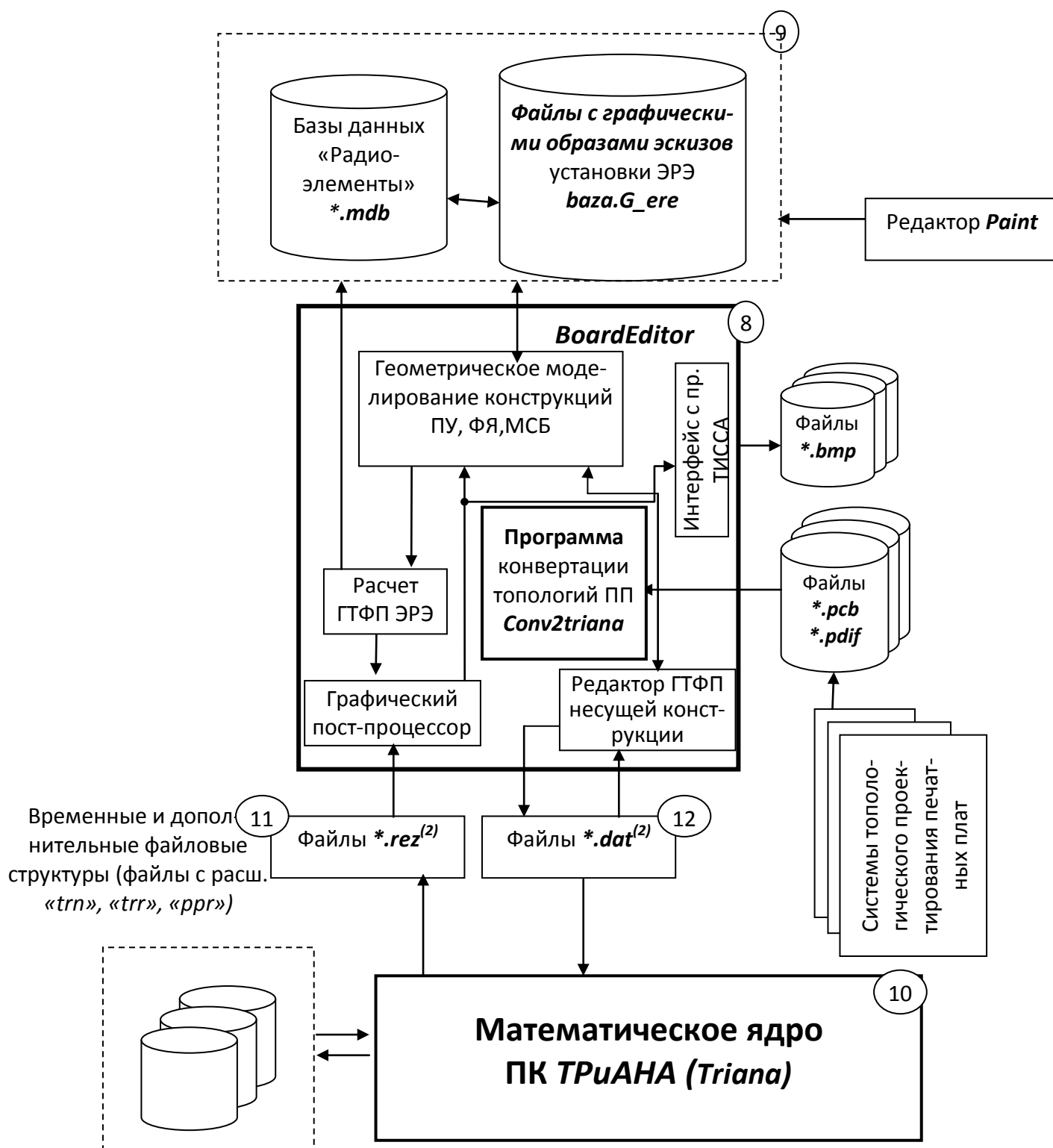




Рис. 3.2. Структурная схема Комплекса № 2 в целом

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 179 |
|---|--|---|------------|

3.3. Описание задачи

С помощью *Комплекса № 2* осуществляется моделирование теплового режима КУ при различных условиях охлаждения путем **автоматического** (в программе применяется уникальный алгоритм автоматического синтеза топологической модели тепловых процессов) формирования системы нелинейных алгебраических уравнений (стационарный тепловой режим) или системы обыкновенных дифференциальных уравнений (нестационарный тепловой режим) по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам КУ РЭА установленных на нем ЭРЭ и условий охлаждения КУ, решение этой системы и вывод результатов в удобной для анализа форме.

Для решения указанной задачи используются критериальные уравнения теории подобия и уравнения теплообмена, метод узловых потенциалов для формирования математической модели тепловых процессов в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ), системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ).

Для решения СОДУ используется метод формул дифференцирования назад (ФДН), для решения СНАУ используется метод простых итераций, а для решения систем линейных алгебраических уравнений, к которым сводятся СОДУ и СНАУ (на каждом шаге по времени и/или на каждой итерации по нелинейностям), – метод LU-разложения с символьной факторизацией и учетом разреженности матрицы тепловых проводимостей.

3.4. Исходная информация для моделирования

Исходная информация для моделирования теплового режима КУ подготавливается на основе следующих данных:

1. Данные о КУ (см. [параграфы 3.7.2–3.7.4](#)):

- линейные размеры несущей конструкции (НК) КУ и установленных на ней гибких печатных плат /для ФЯ/, коэффициент теплопроводности материала НК или материалов НК и ГПП (для ФЯ), степень черноты поверхности материала НК КУ или материалов НК и ГПП (для ФЯ);
- плотность и удельная теплоемкость материала НК КУ или материалов НК и ГПП /для ФЯ/ (для НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА);
- ориентация КУ в пространстве: определяется по [табл. 3.1](#) (в первой колонке даны варианты ориентации, во второй – их стилизованное изображение с нумерацией поверхностей /для ФЯ см. также [рис. 3.5](#)/ и направлением осей координат; вдоль короткой стороны КУ рекомендуется направлять ось ОХ);
- коэффициент площади проводников, толщина и коэффициент теплопроводности материала проводников.

Коэффициент площади проводников (*КЗПП*) определяется по формуле:

$$КЗПП = S_1 / S_2, \quad (3.1)$$

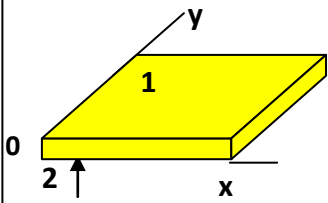
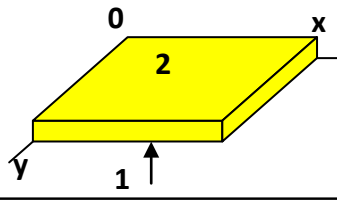
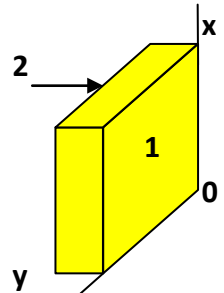
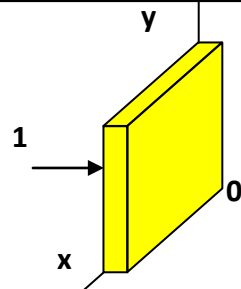
где S_1 – суммарная площадь печатных проводников, расположенных на обеих сторонах одно- или двухсторонней печатной платы, мм²; S_2 – площадь одной поверхности печатной платы, мм²;



• плотность и удельная теплоемкость материала проводников (ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА).

2. Количество линий сетки по осям *ОХ* и *ОУ*, дискретизирующей тепловое поле несущей конструкции КУ при отображении результатов моделирования.

Таблица 3.1

Варианты ориентации КУ в пространстве

| Вариант ориентации КУ | Стилизованное изображение КУ | Глобальная ориентация КУ (ориентация КУ в пространстве) | Примечание | |
|-----------------------|---|---|-------------------------------|--|
| 1 |  | Горизонтальная | 1, 2 – номера поверхностей КУ | |
| 2 |  | | | |
| 3 |  | Вертикальная | | |
| 4 |  | | | |

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 181 |
|---|--|---|------------|

Шаги дискретизации dx и dy температурного поля несущей конструкции КУ по осям OX и OY . Если шаги dx и dy задать равными 0, то шаг сетки по осям OX и OY выбирается **автоматически** (включается специальный алгоритм генерации параметров сетки), если один из этих шагов равен 0, то он выбирается **автоматически** (для МСБ – 2 мм; для ПУ – 5 мм; для ФЯ – 7 мм), если оба не равны 0, то шаги берутся равными заданным. Автоматический шаг выбирается, исходя из максимального количества узлов модели (≤ 15000), количества узлов, занятых под модели элементов, количества узлов, занятых под модели тепловых шин, а также количества узлов, занятых под модели граничных условий. Если заданные Вами шаги dx , dy таковы, что при этом количество узлов модели превышает максимально допустимое, то они уменьшаются (автоматически) до тех пор, пока общее количество узлов модели не будет меньше максимально допустимого числа узлов (числа уравнений). **Задавать шаги dx и dy рекомендуется равными 0.**

3. Информация о тепловых шинах и вырезах в НК КУ (подробней см. параграфы [3.7.3](#) и [3.8.7](#)):

- координаты расположения и ГТФП.

4. Информация об ЭРЭ, установленных на КУ (подробней см. параграфы [3.7.4](#) и [3.8.3](#)):

- координаты установки, высота и площадь поверхности ЭРЭ, омываемая воздухом. Координаты установки ЭРЭ определяются по эскизу сборочного чертежа КУ ([рис. 3.3](#), где X_H , X_K и Y_H , Y_K – координаты начала и конца проекции ЭРЭ на оси координат). Оси координат КУ жестко «привязаны» к нему, поэтому при изменении ориентации КУ в пространстве координаты и номера поверхностей установки ЭРЭ не меняются, а меняются только условия охлаждения. Под высотой ЭРЭ подразумевается длина его проекции на плоскость, перпендикулярную поверхности, на которой он установлен. Высота и площадь поверхности, омываемая воздухом, определяется согласно информации, полученной из ТУ на элементы и ТУ на установку ЭРЭ на НК КУ;

- значения внутренних тепловых сопротивлений радиоэлементов (R_{me}), установленных на НК, которые приводятся в справочной литературе, например, для мощных полупроводниковых элементов – это значение теплового сопротивления « p - n переход–корпус элемента»;

- значения теплового сопротивления «радиоэлемент–НК КУ». Оно состоит из теплового сопротивления выводов элемента (R_1) и слоя клея (лака) между элементом и печатной платой (R_2), если он присутствует.

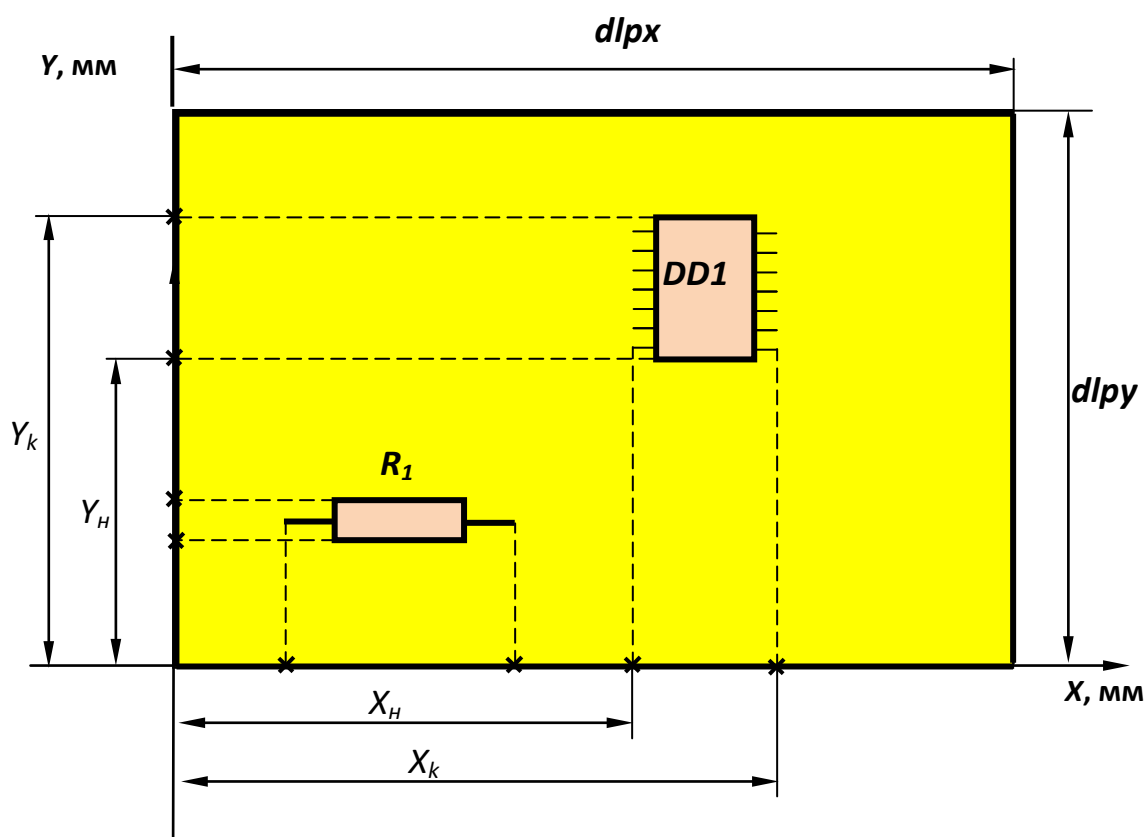


Рис. 3.3. Задание координат установки ЭРЭ на НК КУ

Тепловое сопротивление выводов элементов – R_1 , К/Вт – определяется в соответствии с формулами (3.2)–(3.4).

$$R_1 = l_1 / (\lambda_1 \cdot S_1) / n, \quad (3.2)$$

где l_1 – длина вывода от корпуса элемента до печатной платы, м; S_1 – площадь поперечного сечения вывода элемента, м^2 ; n – число выводов у элемента; λ_1 – коэффициент теплопроводности материала вывода.

Тепловое сопротивление слоя крепления – R_2 , К/Вт – определяется по формуле:

$$R_2 = l_2 / (\lambda_2 \cdot S_2), \quad (3.3)$$

где l_2 – толщина слоя клея (лака), м; λ_2 – коэффициент теплопроводности клея, Вт/м·К; S_2 – площадь клеевого соединения элемента с печатной платой, или шиной, или основанием ФЯ, м².

Суммарное тепловое сопротивление «радиоэлемент – НК КУ» – R_{mk} , К/Вт – определяется как:

$$R_{mk} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2); \quad (3.4)$$

- значения тепловых мощностей, рассеиваемых каждым радиоэлементом, установленным на КУ (приводятся в карте электрических режимов реализованной на КУ электрической схемы или определяются в результате моделирования электрических процессов, протекающих в схеме, например, при помощи ППП *OrCAD-9.2*, *MicroCAP*, *Protel* и т. п.);

- для моделирования нестационарного теплового режима требуется также задание теплоемкостей ЭРЭ. Теплоемкость ЭРЭ ($C_э$) можно рассчитать по следующим формулам:

$$C_э = \sum_{i=1}^n c_{p_i} m_i = \sum_{i=1}^n c_{p_i} \rho_i v_i, \quad (3.5)$$

где c_{p_i} – удельная теплоемкость однородной части ЭРЭ; v_i – объем i -ой однородной части ЭРЭ; m_i – масса i -ой однородной части ЭРЭ; ρ_i – плотность i -ой однородной части ЭРЭ; n – число однородных частей, из которых состоит элемент;

$$\text{или } C_э = c_{p_э} \cdot m_э,$$

где $c_{p_э}$ – удельная теплоемкость элемента, Дж/(К·г); $m_э$ – масса элемента, г.



5. Условия охлаждения КУ (см. [параграф 3.7.5](#)). Условия охлаждения (УОХ), или граничные условия КУ, получают в результате анализа теплового режима блока, в котором он установлен, или берут из ТЗ на проектирование данного КУ.

Таблица 3.2

Условия охлаждения (граничные условия)

| Тип УОХ | Пояснение к данному типу УОХ | Параметры условий охлаждения | | | | |
|---------|---|--|--|--|-----------------------------------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Поверхность с заданной температурой | Температура поверхности, °C | — | — | — | — |
| 2 | Теплопередача через заданное тепловое сопротивление к поверхности с заданной температурой | | Тепловое сопротивление, К/Вт | — | — | — |
| 3 | Контактный теплообмен к поверхности с заданной температурой | | — | — | — | — |
| 4 | Теплопередача через воздушную прослойку к поверхности с заданной температурой | | Толщина воздушной прослойки, мм | — | — | — |
| 6 | Излучение с плоской неразвитой поверхности на соседний конструктивный элемент (КЭ) | Температура соседнего КЭ, °C | — | — | — | — |
| 7 | Естественная конвекция в окружающий воздух и излучение на соседний КЭ с заданной температурой | Средняя температура окружающего воздуха, °C | Средняя температура соседнего КЭ, °C, если его нет, то $t = 0,0$ | Давление воздуха, мм. рт. ст. (по умолчанию равно 760) | — | — |
| 9 | Вынужденная конвекция в окружающий воздух и излучение на соседний КЭ с заданной температурой | Температура воздушного потока, °C | | | Скорость обдувающего воздуха, м/с | Направление обдува, 1- вдоль Ох, 2 – вдоль Оу |
| 10 | Конвекция в воздушный канал и излучение на соседний КЭ с заданной температурой* | Температура воздушного потока на входе в канал, °C | Расстояние между стенками канала, мм | Скорость воздушного потока, м/с | Температура соседнего КЭ, °C | Давление воздушного потока, мм. рт. ст. |
| 11 | Локальное водяное охлаждение * | Длина трубки для прокачки воды, мм | Внутренний диаметр трубки, мм | Скорость водяного потока, м/с | — | — |

Примечание. Значком «*» отмечены незадействованные в текущей версии ПК условия охлаждения

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 185 |
|---|---|--|---|------------|

В [табл. 3.2](#) представлены УОХ, включающие в себя как отдельные виды теплообмена: кондукция, естественная и вынужденная конвекция и излучение, так и их комбинации. Условия охлаждения задаются в виде прямоугольных зон охлаждения, т. е. зон, в пределах которых условия данного типа охлаждения можно считать постоянными. Для описания зоны охлаждения вводятся координаты ее локализации на данной поверхности КУ и некоторые теплофизические параметры согласно [табл. 3.2](#).

Зона охлаждения может охватывать как всю поверхность КУ, так и ее часть, что позволяет отразить реальные способы установки КУ в РЭА. Отсутствие описания зоны охлаждения для какой-либо поверхности означает, что теплоотдачей от нее пренебрегают (обычно, это торцевые поверхности НК КУ).

Условия охлаждения задаются для реального положения КУ в пространстве. В случае изменения его ориентации необходимо соответственно скорректировать условия охлаждения. Например, при изменении типа ориентации с первого на второй (см. [табл. 3.1](#)) условия охлаждения для первой поверхности станут условиями охлаждения для второй поверхности КУ и наоборот.



УОХ можно разделить на две группы: первая включает в себя **1, 2, 3, 4** тип УОХ, вторая – **6, 7, 9** типы. Если границы УОХ разных групп расположены рядом, то между ними необходимо оставить «ничейную» полосу не менее 4–8 мм соответствующим заданием границ зон УОХ.

6. Начальные условия (см. параграфы [3.7.6](#) и [3.8.8](#)). Определяют параметры, необходимые при моделировании нестационарных тепловых процессов, протекающих в КУ (начальное и конечное время работы КУ, шаги по времени, точность интегрирования, начальное значение температуры).

3.5. Выходная информация

Информация, получаемая в результате моделирования и записываемая в файл-отчет при любых режимах функционирования программы, будет включать в свой состав следующие данные:

- исходные данные описания объекта моделирования для контроля;
- данные, характеризующие решение системы алгебраических уравнений методом LU -разложения (размерность матрицы, порядок системы, начальное число ненулевых элементов в матрице, число ненулевых элементов в факторизованной матрице);
- стилизованное изображение температурного поля несущей конструкции КУ (печатной платы, подложки, основания ФЯ);
- стилизованное изображение температурных полей тепловых шин;

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 186 |
|---|--|---|------------|

- карту (для НТР карта записывается в файл для каждого момента времени) тепловых режимов работы ЭРЭ, установленных на КУ, и содержащую следующее: обозначения ЭРЭ в схеме; температуры корпусов или активных зон (если задаются в данных тепловые сопротивления «переход–корпус»); температуры НК КУ в месте установки ЭРЭ; максимально допустимые по ТУ температуры ЭРЭ; коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ; значения перегревов ЭРЭ (если они произошли);

- для ПУ и ФЯ интегральные тепловые и геометрические характеристики: интегральную температуру КУ; допустимую интегральную температуру КУ (в случае отсутствия перегревшихся ЭРЭ); суммарную мощность тепловыделения в КУ; общее количество ЭРЭ; количество перегревшихся ЭРЭ; площади поверхностей ЭРЭ, установленных на каждой поверхности КУ; суммарную площадь КУ; эффективные толщины слоев ЭРЭ для каждой поверхности КУ; эффективную толщину КУ в целом.



При применении программы *BoardEditor* (см. [рис. 3.2](#)) результаты моделирования также могут отображаться на геометрической модели КУ в графическом режиме с использованием цветовой палитры (изотермы НК, термограммы КУ, графики зависимости температур ЭРЭ от времени, изотермы шин и т. д. /см. [параграф 3.8.9](#)/).

3.6. Подготовка исходных данных для моделирования

Применение компонентов *Комплекса № 2* в автономном режиме, в ряде случаев, предусматривает подготовку файла с исходными данными средствами текстового редактора (не используется программа *BoardEditor*). Более удобным способом является подготовка файла с исходной информацией при помощи программы *BoardEditor* (графический режим), при помощи которой также можно вызвать математическое ядро *Triana*. Ниже будут рассмотрены два варианта подготовки данных.

3.7. Подготовка данных средствами текстового редактора

Для данного режима исходные данные подготавливаются на дисплее ПЭВМ с помощью любого экранного текстового редактора в виде *txt-файла*. **Для каждого типа исходных данных есть специальная строка, делающая ее разметку по позициям.** С помощью этой разметки Вы не «промахнетесь» при подстановке числа в ту или иную позицию, что часто бывает при форматном вводе данных. Рекомендуется файлы тестовых примеров использовать в качестве заготовок для подготовки исходных данных. Можно также игнорировать разметку, если пользоваться укороченным форматом.

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 187 |
|---|--|---|------------|

З а м е ч а н и е: в данном документе обозначение типа <блок> следует понимать «блок» – символная или цифровая информация, а скобки <> служат для выделения этой информации из текста данного документа в целях наглядности.

Пример:

<элементы>! обозначение в данном
 <*> ! документе
 элементы ! *должно быть написано*
 * ! *в исходных данных*

В зонах, которые обозначаются знаками, или для которых в предыдущей строке сделана разметка, записываются числовые значения соответствующих параметров с фиксированной десятичной точкой. Сдвиг числа вправо или влево в пределах этой зоны несущественен. Исключения из этого правила распространяются на целые числа и будут отмечаться особо.

Входные данные условно делятся на **6 основных частей**:

1. [Информационная строка и ключевая управляющая информация.](#)
2. [Геометрические и теплофизические параметры несущей НК КУ и ГПП \(для ФЯ\).](#)
3. [ГТП тепловых шин и вырезов в НК КУ.](#)
4. [ГТП ЭРЭ, установленных на НК КУ.](#)
5. [Параметры условий охлаждения \(граничных условий\) КУ.](#)
6. [Начальные условия.](#)

Часть 1 имеет фиксированное количество строк. Каждая из остальных частей состоит из строк параметров, количество которых определяется количеством шин, вырезов, ЭРЭ или зон, описывающих условия охлаждения.

3.7.1. Ключевая информация

Четыре строки с ключевыми словами, записанными в виде целых чисел в специальных зонах, должны быть расположены в следующей последовательности:



типк=<xx-x>
 типр=<xx>
 фпч =00
 тест=<xx>

В первой строке записывается тип анализируемой конструкции:

- 02-0 – **микросборка**;
 02-1 – **печатный узел**;
 02-3 – **функциональная ячейка**.

Во второй строке указывается тип проводимого расчета. В данной версии программы возможны следующие типы расчета:

- 01 – расчет **стационарного** теплового режима;
 02 – расчет **стационарного** теплового режима;
 03 – расчет **нестационарного** теплового режима;
 04 – расчет **нестационарного** теплового режима.

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 188 |
|---|---|--|---|------------|

В третьей строке указывается необходимость расчета функций параметрической чувствительности (в данной версии ПК режим отключен).

В четвертой строке указывается код генерации различной тестовой информации или выдачи промежуточных результатов.

ТЕСТ=10 – работа математического ядра *Triana* в комплексе с другими программными единицами ТРиАНА;

ТЕСТ=12 – генерация файла (см. [рис. 3.3, а](#)), содержащего протокол ошибок (файл с расширением «*.err»). Такой файл содержит информацию о недопустимых и некорректных значениях параметров в файле данных.

Текстовый файл с расширением «*.err» формируется в результате анализа файла данных математическим ядром и записывается в тот же каталог, в котором находится файл данных (файл с расширением «*.dat»). В случае обнаружения математическим ядром в файле данных критических ошибок пользователю выдается сокращенный анализ ошибок и в конце файла «*.err» сообщение о прекращении работы математического ядра *triana*. В случае обнаружения в файле данных некорректных параметров в протокол ошибок заносится предупреждающее сообщение, и расчет продолжается. Причем, в зависимости от типа проверяемого параметра может приниматься значение по умолчанию, либо формироваться уведомление о возможном некорректном значении вводимого параметра, после чего работа математического ядра будет продолжена.

```

-----
Программа triana. Протокол ошибок начат :MonMay  3 17:38:17 2004.
-----
Анализируемый файл данных : C:\11\rr.dat

КРИТИЧЕСКАЯ ОШИБКА N:00001 !!!
-----
Размер основания ФЯ по оси OX равен 0.0 мм
ПРОГНОЗИРУЕТСЯ АВАРИЙНОЕ ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ  triana

Предупреждение N:00001
-----
Значение коэфф. теплопроводности материала основания ФЯ равно 0.00 ВТ/(м*К)
Ввод значения по умолчанию
... Значение коэфф.теплопроводности материала основания ФЯ принимается равным
180 ВТ/(м*К) / сплав АМЦ /



Предупреждение N:00002
-----
Значение коэфф. черноты основания ФЯ равно  0.0000000E+00
Ввод значения по умолчанию
... Значение коэфф. черноты ФЯ принимается равным 0.8

Предупреждение N:00003
-----
Значение плотности материала основания  ФЯ равно  0.0000000E+00
Ввод значения по умолчанию
... Значение плотности материала основания ФЯ КУ принимается равным 2730
кг/м**3/ сплав АМЦ /

-----
Программа triana. Протокол ошибок закончен: MonMay  3 17:38:18 2004.
Обнаружено: критических ошибок- 1; предупреждений- 3
Обнаружены критические ошибки. Работа программы triana прекращена.
-----

```

Рис. 3.3а. Пример структуры файла «*.err»

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 189 |
|---|--|---|------------|

3.7.2. Геометрические и теплофизические параметры несущей конструкции

Ниже, на [рис. 3.4](#), приведен пример описания геометрических и теплофизических параметров НК КУ типа «Печатный узел» или «Микросборка». В описании параметров первая строка служит для разметки (т. е. показывает, в каких позициях необходимо ставить численные и символьные значения параметров).

плата



```

dlpx=xxxxxdlpy=xxxxxdlpz=xxxxx ммммммммммммммммммммм
dlpx= 120.    dlpy= 80.    dlpz= 2.    сф-2-50
lamp=xxxxx    черн=xxxxx    ori =xрокU=xxxxxxUткU=xxxxxx
lamp=0.23    черн=0.4    ori =4    рокU=420.    UткU=1500.
кзпп=xxxxxdppr=xxxxxlamp=xxxxx ммммммммммммммммммммм gor=xxxxxxUтр=xxxxxx
кзпп=0.4    dppr=50.    lamp=386.    медь    gor=8940.    Uтр= 380.
klx =xxxxx    kly =xxxxdx =xxxxxdy =xxxxxSETK=xxxxx
klx = 20    kly = 20    dx =0.    dy =0.    SETK=1.

```

Рис. 3.4. Фрагмент файла с исходной информацией, описывающей геометрические и теплофизические параметры несущей конструкции ПУ

На [рис. 3.4](#) использованы следующие обозначения: «**dlpx**» – размер НК КУ по оси *OX*, мм (см. [рис. 3.3](#)); «**dlpy**» – размер НК КУ по оси *OY*, мм (см. [рис. 3.3](#)); «**dlpz**» – размер НК КУ по оси *OZ*, мм; «**мммм**» – марка материала НК КУ; «**lamp**» – коэффициент теплопроводности материала НК КУ, Вт/м·К; «**черн**» – относительный коэффициент черноты поверхности КУ, отн.ед; «**ori**» – коэффициент ориентации КУ в пространстве (определяется по табл. 3.1); «**рокU**» – плотность материала НК КУ, кг/м³ (задается только для нестационарного теплового режима); «**UткU**» – удельная теплоемкость материала КУ, Дж/кг/К (задается только для НТР); «**кзпп**» – коэффициент заполнения КУ проводниками, отн.ед (см. [выраж. \(3.1\)](#)); «**dppr**» – толщина проводников, мкм; «**lamp**» – коэффициент теплопроводности проводников, Вт/м·К; «**мммм**» – марка материала проводников; «**gor**» – плотность материала проводников, кг/м³ (только для НТР); «**Uтр**» – удельная теплоемкость материала проводников, Дж/кг/К (только для НТР); «**klx**» – количество линий сетки по оси *OX*, шт.; «**kly**» – количество линий сетки по оси *OY*, шт.; «**dx**» – шаг дискретизации температурного поля НК КУ по оси *OX*, мм; «**dy**» – шаг аналогично по оси *OY*, мм (целесообразно устанавливать 0); «**SETK**» – значение шага сетки в мм для гра-

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 190 |
|---|--|---|------------|

фического режима задания исходных данных (для автономного применения ППП может не записываться).

На [рис. 3.5](#) приведен эскиз несущей конструкции функциональной ячейки с дополнительными элементами – теплостоками, а на [рис. 3.6](#) представлен фрагмент файла с описанием геометрических и теплофизических параметров такой конструкции.

В приведенном на [рис. 3.6](#) фрагменте файла используются следующие обозначения: «**dlpx**», «**dlpy**», «**dlpz**» – размеры основания ФЯ в мм по осям OX , OY , OZ ; «**HOS₁**» – ширина 1-го теплостока, мм; «**HOS₂**» – ширина 2-го теплостока, мм; «**мммм**» – марка материала основания ФЯ; «**l_{amp}**» – коэффициент теплопроводности материала основания ФЯ; «**черн**» – относительный коэффициент черноты поверхности ФЯ, отн. ед.; «**ori**» – вариант ориентации ФЯ в пространстве (определяется по табл. 3.1); «**року**» – плотность материала основания ФЯ, кг/м³ (**только для НТР**); «**утку**» – удельная теплоемкость материала основания ФЯ, Дж/кг/К (**только для НТР**); «**klx**», «**kly**» – количество линий сетки по осям OX и OY , используемых для дискретизации температурного поля основания ФЯ при выводе результатов моделирования; «**dx**», «**dy**» – шаги дискретизации температурного поля основания ФЯ (целесообразно устанавливать 0); «**SETK**» – значение шага сетки в мм для графического режима задания исходных данных (см. [параграф 3.8](#)). «**ГПП₁**» – гибкая печатная плата № 1. Параметры «**dlpx**», «**dlpy**», «**dlpz**», ..., «**klx**», «**kly**», «**dx**», «**dy**», «**SETK**» аналогичны параметрам, которыми описывается НК печатного узла (см. [рис. 3.4](#)). «**ГПП₂**» – гибкая печатная плата № 2. Параметры, которыми описывается ГПП₂, также аналогичны параметрам, которыми описывается НК печатного узла.

В общем случае у основания ФЯ может отсутствовать: один теплосток ($HOS_1=0.0$ или $HOS_2=0.0$) или оба теплостока ($HOS_1=0.0$ и $HOS_2=0.0$). Также ФЯ может комплектоваться одной ГПП (ГПП₁ или ГПП₂) или вообще не комплектоваться ГПП. В этом случае отсутствующие ГПП описываются (в файле данных) нулевыми параметрами.

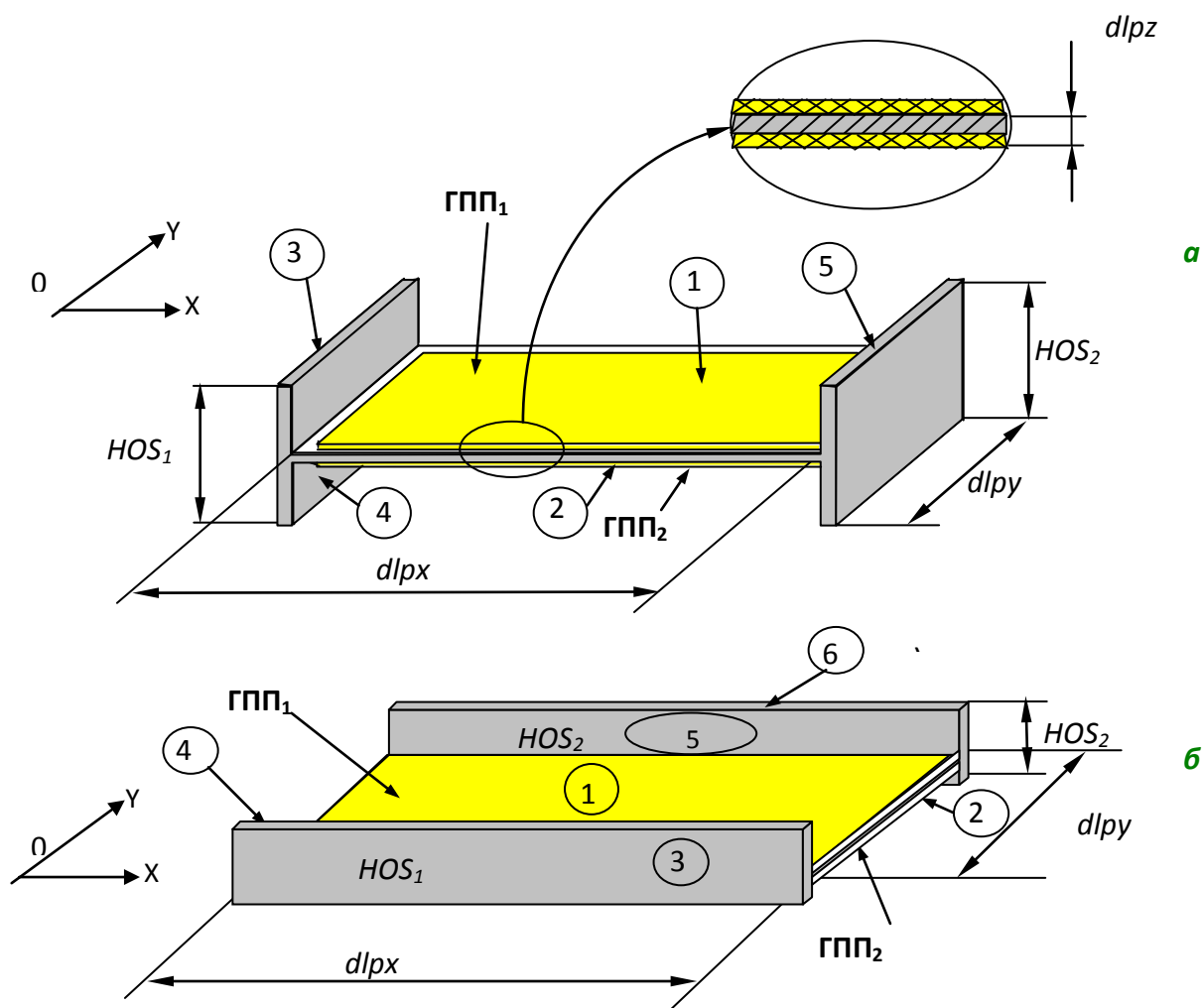


Рис. 3.5. Эскиз несущей конструкции ФЯ с дополнительными элементами теплостоками:
а– ориентация теплостоков вдоль оси ОУ;б– ориентация теплостоков вдоль оси ОХ:
1–6 – номера поверхностей

Тепловой анализ НТР функциональной ячейки

ТИПК=02-3

ТИПР=03

ФПЧ =00

ТЕСТ=10

ОСНОВАНИЕ ФЯ

DLPX=xxxxx DLPY=xxxxx DLPZ=xxxxx mmmmmmmmmmmmmmmmmmm HOS1=xxxxx HOS2=xxxxx OR=x

DLPX=280. DLPY=160. DLPZ=2. AmrHOS1=40. HOS2=20. OR=1

LAMP=xxxxxЧЕРН=xxxxxORI =xROKU=xxxxxxUTKU=xxxxxx

Рис. 3.6. Фрагмент файла с исходной информацией, описывающей геометрические и тепло-физические параметры НК ФЯ

«222»–Хк; «333»–Ун; «444»–Ук); обозначение материала шины (поле с символами «mmm»); коэффициент теплопроводности материала шины /см. [прил. 1/](#) (поле с символами «XXX»); плотность материала шины /для НТР – см. [прил. 1/](#) (поле с символами «YYY»); удельная теплоемкость материала шины /для НТР – см. [прил. 1/](#) (поле с символами «ZZZ»); температура теплостока, на который снимается тепловой поток с шины /записывается 0.0, если сток отсутствует/ (поле с символами «TTT»); тепловое сопротивление между шиной и теплостоком в К/Вт /для вычисления сопротивления (если присутствует сток) может быть применено выражение ([3.3](#))/ (поле с символами «RRR»).

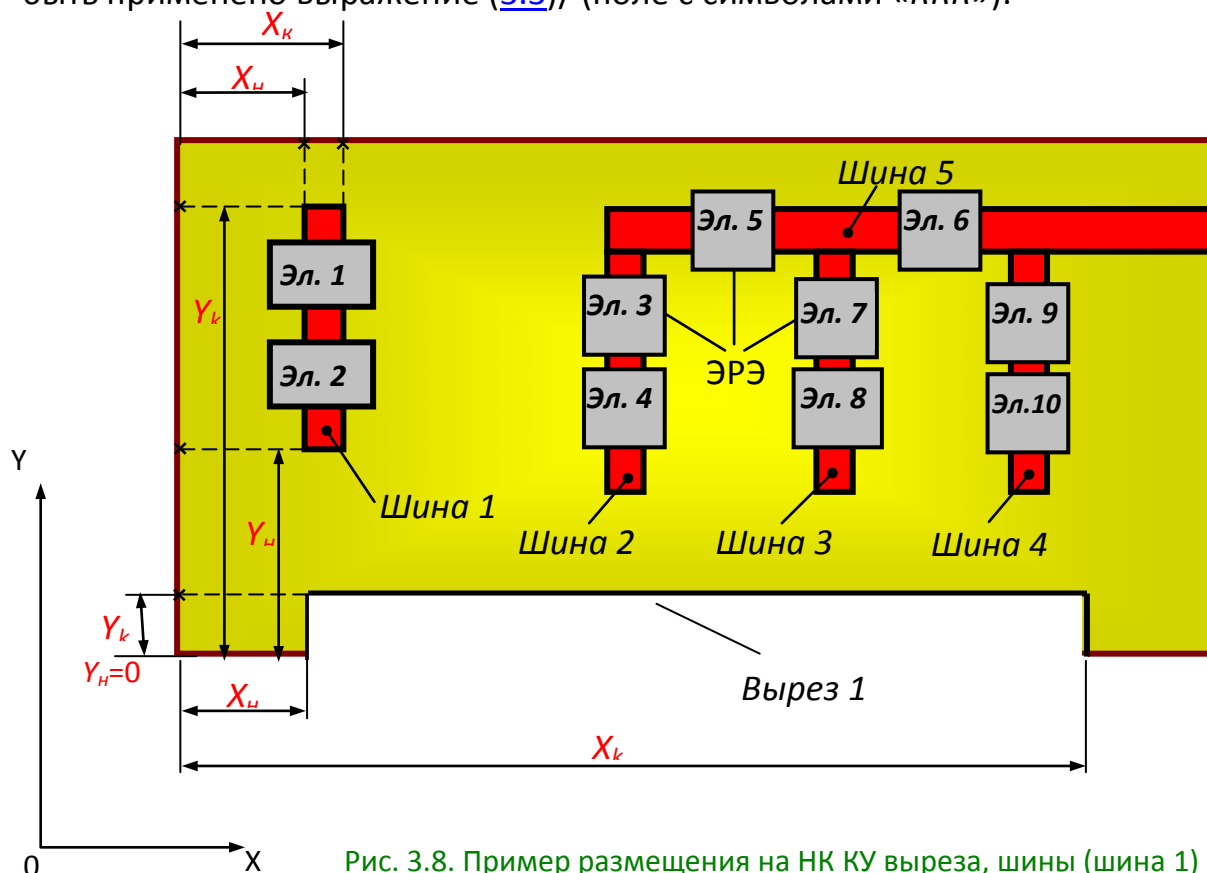


Рис. 3.8. Пример размещения на НК КУ выреза, шины (шина 1) и контура S_1 , состоящего из нескольких шин (шина 2 – шина 5)

В ряде случаев тепловые шины объединяются в контур (см. [рис. 3.8](#)), с которого тепловая энергия снимается на теплосток. Для моделирования этой ситуации в исходных данных предусмотрен 2-й блок информации, описывающий контуры из шин (см. [рис. 3.9](#)). В блоке данных по определенной разметке в каждой строке описывается соответствующий контур из шин.



Контуры из шин

UOOOOO0111112222233333444445555566666777778888899999111112222233333

KS1 шина2 шина3 шина4 шина5

*

Рис. 3.9. Фрагмент файла с исходной информацией, описывающей контур из шин



| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 195 |
|---|--|---|------------|

- + 9...13 – начало проекции ЭРЭ на НК КУ по оси OX , мм (X_H на [рис. 3.3](#));
- + 15...19 – конец проекции ЭРЭ на НК КУ по оси OX , мм (X_K на [рис. 3.3](#));
- + 21...25 – начало проекции ЭРЭ на НК КУ по оси OY , мм (Y_H на [рис. 3.3](#));
- + 27...31 – конец проекции ЭРЭ на НК КУ по оси OY , мм (Y_K на [рис. 3.3](#));
- + 33...37 – мощность тепловыделения в ЭРЭ, мВт;
- + 39...43 – тепловое сопротивление крепления (R_{tk}) ЭРЭ к КУ, К/Вт (см. выражения (3.2)–(3.4));
- + 45...49 – внутреннее тепловое сопротивление (R_{te}) ЭРЭ, К/Вт (может быть не задано);
- + 51...55 – максимально допустимая по ТУ температура активной зоны ЭРЭ, °С (если тепловое внутреннее сопротивление равно нулю, то задается максимально допустимая температура корпуса ЭРЭ). По умолчанию данная температура равна 100 °С);
- 57...61 – относительный коэффициент черноты поверхности ЭРЭ, отн. ед. (по умолчанию 0.80);
- 63...66 – высота ЭРЭ, мм;
- 68...73 – площадь ЭРЭ, омываемая воздухом, мм²;
- +75...79 – теплоемкость ЭРЭ, Дж/К (только для НТР; см. выраж. (3.5));
- +81...105 – типонаименование ЭРЭ и через слэш номер варианта установки ЭРЭ на НК КУ (см. [прил. 4](#));
- 107...122 – обозначение шины, на которую устанавливается ЭРЭ;
- 124...128 – тепловое сопротивление крепления (R_{tw}) ЭРЭ к шине (если ЭРЭ устанавливается на шину), К/Вт (см. выражения (3.3));
- 130...131 – номер кода модели (по умолчанию – 1).

Параметры, отмеченные знаком «+», задаются при описании ЭРЭ, устанавливаемых на подложке, т. е. при моделировании СТР и НТР в микросборках (МСБ). Причем, при описании пленочных элементов не задают R_{tk} и R_{te} , так как в модели МСБ, заложенной в математическом ядре, принимается, что между подложкой и пленочными элементами существует идеальный контакт.

Позиции 81...122 заполняются графическим редактором программы BoardEditor (см. [параграф 3.8](#)). ЭРЭ устанавливать на тепловые шины целесообразно в графическом режиме (см. [параграф 3.8.7](#)). Номер кода модели ЭРЭ в данной версии математического ядра ПК принимается равным 1.

Далее следует строка окончания описания ЭРЭ, содержащая в первой позиции звездочку (<*>). Примеры записи информации об ЭРЭ приведены на [рис. 3.11](#) и [3.12](#).

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 196 |
|---|---|--|---|------------|

3.7.5. Условия охлаждения (граничные условия)

Следующий блок информации описывает граничные условия (условия охлаждения – см. [табл. 3.2](#)). Блок информации начинается со строки с разметкой (см. [рис. 3.11](#) и [3.12](#)). В последующих строках приводится следующая информация: данные о размещении зон условий охлаждения на КУ; данные о типах УОХ; теплофизические параметры УОХ (см. [табл. 3.2](#)).

Каждая строка описывает зону условия охлаждения и содержит следующее (в позициях):


- 1 – управляющая переменная (например, «*»);
- 2...3 – номер поверхности КУ, для которой описывается условие охлаждения (целое число выбирается из [табл. 3.1](#) и [рис. 3.5](#));
- 4...5 – тип условия охлаждения (целое число по формату /2, выбирается из [табл. 3.2](#));
- 7...11 – начало зоны охлаждения по оси ОХ, мм;
- 13...17 – конец зоны охлаждения по оси ОХ, мм;
- 19...23 – начало зоны охлаждения по оси ОУ, мм;
- 25...29 – конец зоны охлаждения по оси ОУ, мм;
- 31...35 – начало зоны охлаждения по оси ОZ; **! Для ПУ, ФЯ, МСБ**
- 37...41 – конец зоны охлаждения по оси ОZ. **! не заполняется.**

Для поверхностей №№ 3–6 координаты локализации УОХ не указываются. В математическом ядре данные поверхности в УОХ учитываются полностью.

Далее записываются параметры УОХ в соответствии [табл. 3.2](#):

- 43...47 – первый параметр условия охлаждения;
- 49...53 – второй параметр условия охлаждения;
- 55...59 – третий параметр условия охлаждения;
- 61...65 – четвертый параметр условия охлаждения;
- 67...71 – пятый параметр условия охлаждения;
- 71...75 – шестой параметр условия охлаждения.

Далее следует строка окончания описания условий охлаждения, содержащая в первой позиции звездочку (<*>). Примеры записи информации о граничных условиях приведены на [рис. 3.11](#) и [3.12](#). Вслед за строкой окончания описания УОХ следует аналогичная строка (в первой позиции строки записывается символ <*>), означающая конец описания объекта.

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 197 |
|---|---|--|---|------------|

3.7.6. Начальные условия

Начальные условия можно использовать как при расчете стационарного, так и нестационарного теплового режима. В первом случае они определяют начальное приближение при решении *СНАУ*, а во втором случае являются начальными условиями для решения *СОДУ*. В процессе описания начальных условий необходимо задать начальную температуру в параметрах интегрирования (если ее не задать, начальные условия будут нулевыми).

Параметры интегрирования записываются с 27-й позиции. Список параметров интегрирования выглядит следующим образом:

```

начальное время работы  +0.000e+00
конечное время работы   +0.100e+03
точность интегрирования +0.100e-05
минимальный шаг         +0.100e+01
максимальный шаг        +0.100e+02
начальная температура    +0.100e+02

```

Начальное и конечное время (в секундах) работы КУ определяют интервал, в котором производится определение температуры во всех точках конструкции КУ (во всех узлах модели тепловых процессов).

Минимальный и максимальный шаги интегрирования служат для управления процессом интегрирования. Максимальный шаг служит для ограничения на шаг интегрирования сверху (если Вы желаете проинтегрировать интервал быстро, т. е. быстро получить результат, пусть даже не совсем точно). Минимальный шаг служит для ограничения шага интегрирования снизу (если Вы хотите проинтегрировать интервал довольно точно, пусть даже не быстро). Обычно эти шаги назначаются на основе общего анализа тепловых процессов, протекающих в РЭА, и опыта расчетов при помощи данной программы.

Как Вы, наверное, заметили, существует еще такой параметр, как точность расчета. Практически три параметра – точность, минимальный и максимальный шаги – тесно связаны между собой. Очень трудно дать какие-либо числовые рекомендации по выбору этих параметров. Мы советуем Вам всегда пользоваться точностью, равной $1.e-5$. С шагами Вы тоже можете поступить очень просто – задать их равными (т. е. интегрирование будет идти с постоянным шагом). При этом Вы вряд ли ошибетесь, так как тепловые процессы не являются быстроизменяющимися.

Примеры записи шаблонов о начальных условиях приведены на [рис. 3.11](#) и [3.12](#).

Анализ НТР печатного узла стойки гидроакустической системы

ТИПК=02-1

ТИПП=03

ФПЧ =00

ТЕСТ=10

ПЛАТА

DLPX=xxxxx DLPY=xxxxx DLPZ=xxxxx mmmmmmmmmmmmmmmmm

DLPX=280. DLPY=190. DLPZ=1.8 Сплав АМг+ МПП

LAMP=xxxxx ЧЕРН=xxxxx ORI =x ROKU=xxxxxx UTKU=xxxxxx

LAMP=10. ЧЕРН=0.85 ORI =1 ROKU=2730. UTKU=1180.

КЗПП=xxxxx DPPR=xxxxx LAMP=xxxxx mmmmmmmmmmmmmmmmm ROP =xxxxxx UTP=xxxxxx

КЗПП=0.01 DPPR=35. LAMP=386. медь ROP =8930. UTP=391.

KLX =xxxx KLY =xxxx DX =xxxxx DY =xxxxx SETK=xxxxx

KLX = 15 KLY = 10 DX =8. DY =8. SETK=1.

ШИНЫ

UOOOOOOP!11111-22222!33333-4444!DDDD!MMMMMMMMMMMMMMMMMMMM!XXXXX!

*

КОНТУРЫ ИЗ ШИН

UOOOOOOO111111222222333333444444555555666666777777888888999999000000111111

*

ВЫРЕЗЫ

UOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOOP!11111-22222!33333-44444

*

ЭЛЕМЕНТЫ

UOOOOOOOP11111-22222!33333-

44444!55555!66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!4444444444444444

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----------|
| DD1 | 1 | 25. | 40. | 40. | 52. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD2 | 1 | 25. | 40. | 70. | 82. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD3 | 1 | 25. | 40. | 105. | 117. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD4 | 1 | 25. | 40. | 140. | 152. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD5 | 1 | 55. | 70. | 40. | 52. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD6 | 1 | 55. | 70. | 70. | 82. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD7 | 1 | 55. | 70. | 105. | 117. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |
| DD8 | 1 | 55. | 70. | 140. | 152. | 200. | 17.4 | 10. | 125. | 0.8 | 2.8 | 432. | 0.3 | 1533КП7/4 |

.....

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|------|------|------|----|-----|----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| C22 | 1 | 193. | 203. | 113. | 117. | 0. | 7.2 | 0. | 125. | 0.8 | 3.2 | 96. | 0.1 | км/3 |
| C23 | 1 | 223. | 233. | 113. | 117. | 0. | 7.2 | 0. | 125. | 0.8 | 3.2 | 96. | 0.1 | км/3 |
| C24 | 1 | 253. | 263. | 113. | 117. | 0. | 7.2 | 0. | 125. | 0.8 | 3.2 | 96. | 0.1 | км/3 |
| C25 | 1 | 43. | 53. | 148. | 152. | 0. | 7.2 | 0. | 125. | 0.8 | 3.2 | 96. | 0.1 | км/3 |

*

UPPXX!11111-22222!33333-44444!55555-66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!

| | | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|-----|
| 2 | 2 | 0. | 87. | 0. | 4. | 49.9 | 0.1 |
| 2 | 2 | 2. | 90. | 185. | 190. | 49.9 | 0.1 |
| 2 | 4 | 0. | 280. | 12. | 179. | 46.5 | 5. |
| 2 | 2 | 178. | 280. | 186. | 190. | 43.6 | 0.1 |
| 2 | 2 | 89. | 178. | 0. | 4. | 46.8 | 0.1 |
| 2 | 2 | 92. | 175. | 186. | 190. | 46.8 | 0.1 |
| 1 | 4 | 0. | 280. | 8. | 181. | 46.5 | 5. |

*

НАЧАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 0.000E+00

КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 0.250E+03

ТОЧНОСТЬ ИНТЕГРИРОВАНИЯ. 0.100E-05



МИНИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГП 0.200E+01

МАКСИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГ. 0.200E+01

НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА 0.400E+02

*

Рис. 3.11. Пример файла с данными, описывающими печатный узел

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 199 |
|---|---|--|---|------------|

Анализ стационарного теплового режима МСБ регулятора импульсного ИВЭП

ТИПК=02-0

ТИПП=01

ФПЧ =00

ТЕСТ=10

ПОДЛОЖКА

DLPX=xxxxx DLPY=xxxxx DLPZ=xxxxx ммммммммммммммммм

DLPX=30. DLPY=16. DLPZ=0.5 ВК-98-1(сапфир)

LAMP=xxxxx ЧЕРН=xxxxx ORI =x

LAMP=25. ЧЕРН=0.85 ORI =1

КЗПП=xxxxx DPPR=xxxxx LAMP=xxxxx ммммммммммммммммм

КЗПП=0.15 DPPR=10. LAMP=295. Золото

KLX =xxxxx KLY =xxxxx DX =xxxxx DY =xxxxx

KLX = 15 KLY = 9 DX =2. DY =2.

ЭЛЕМЕНТЫ

UOOOOOOR11111-22222!33333-44444!55555!66666!77777!88888!99999!1111!22222!33333

C1 1 19.5 22.5 12.5 15.5 0. 50. 0. 125.

T1 1 19. 29. 1.5 11.5 350. 12.5 0. 150.

VD1 1 12. 18. 7.5 13.5 150. 10. 0. 150.

VD2 1 12. 18. 1.0 7.0 150. 10. 0. 150.

VT1 1 1. 11. 3.50 13.5 8250. 1.5 1.5 150.

R1 1 1.5 2.5 0.50 2.5 80. 0. 0. 150.

*

UPRXX!11111-22222!33333-44444!55555-66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!

2 2 0. 30. 0. 16. 65. 0.4

*

НАЧАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 0.000E+00

КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 1.000E+02

ТОЧНОСТЬ ИНТЕГРИРОВАНИЯ. 1.000E-05

МИНИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГП 1.000E-03


МАКСИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГР. 1.000E-03

НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА 2.500E+01

*

Рис. 3.12. Пример файла с данными, описывающими бескорпусную микросборку

В первом файле (см. [рис. 3.11](#)) приведен пример описания исходных данных для моделирования НТР печатного узла с односторонним монтажом ЭРЭ. ПУ устанавливается в модуль РЭА посредством крепления в рамке по контуру. Во втором файле (см. [рис. 3.12](#)) приведены данные для моделирования СТР бескорпусной микросборки, которая крепится путем приклейки подложки к основанию ФЯ (температура основания ФЯ в месте приклейки МСБ составляет 65 °С, тепловое сопротивление клея между подложкой и основанием ФЯ (см. выраж. (3.3)) – 0,4 К/Вт).

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 200 |
|---|---|--|---|------------|

3.8. Подготовка данных средствами графического редактора *BoardEditor*

При эксплуатации компонентов *BoardEditor*, *triana*, *Conv2Triana* в комплексе (см. [рис. 3.2](#)) пользователю предоставляются следующие возможности:

1. Создавать геометрическую модель исследуемого КУ и на ее основе автоматически формировать файлы с исходными данными (см. [рис. 3.11](#), [3.12](#)) средствами программы *BoardEditor*. При этом схема размещения ЭРЭ на НК конструктивного узла может конвертироваться из систем *P-CAD*, *ACCEL* и т. п. при помощи автоматически вызываемого из программы *BoardEditor* конвертора *Conv2Triana*.

2. Вызывать математическое ядро (программа *triana*) непосредственно из программы *BoardEditor*.

3. Отображать результаты моделирования на эскизе (геометрической модели) конструктивного узла, созданного в процессе подготовки исходных данных средствами программы *BoardEditor*.

Программа *BoardEditor* позволяет как формировать файлы с данными, так и интерпретировать уже имеющиеся файлы в геометрическую модель, представляемую в графическом режиме.

После открытия папки *ТРиАНА* (см. [рис. 3.13](#)) и запуска программы *BoardEditor* на экране ПЭВМ появляется заставка, вид которой приведен на [рис. 3.14](#). После автоматической ее свертки (по прошествии 3–5 секунд) происходит вход в основное меню программы. Далее возможны два варианта работы: загрузить уже созданный ранее файл с данными (функции <Файл>, <Открыть>) для его графической интерпретации и корректировки или создать файл заново.

В дальнейшем будем рассматривать более подробно процесс работы программы *BoardEditor* для второго варианта.

3.8.1. Описание управляющей информации и использование конвертора из систем проектирования ПП

На самом первом шаге необходимо воспользоваться функциями <Файл>, <Создать>. После выполнения указанных функций на экране появится таблица с управляющей информацией (см. [рис. 3.15](#)), которую необходимо заполнить в соответствии с инструкцией, приведенной в [параграфе 3.7.1](#). После этого, используя визуальный интерфейс (см. [рис. 3.16](#)), пользователь осуществляет подготовку данных для выбранного типа КУ.

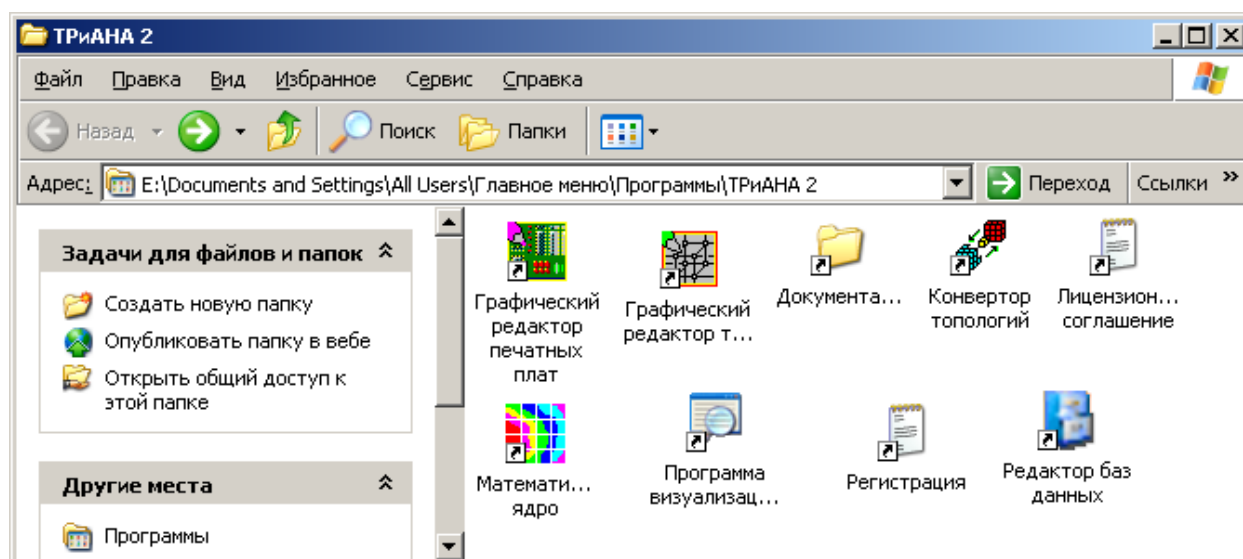


Рис. 3.13. Компоненты, находящиеся в папке *ТРиАНА*

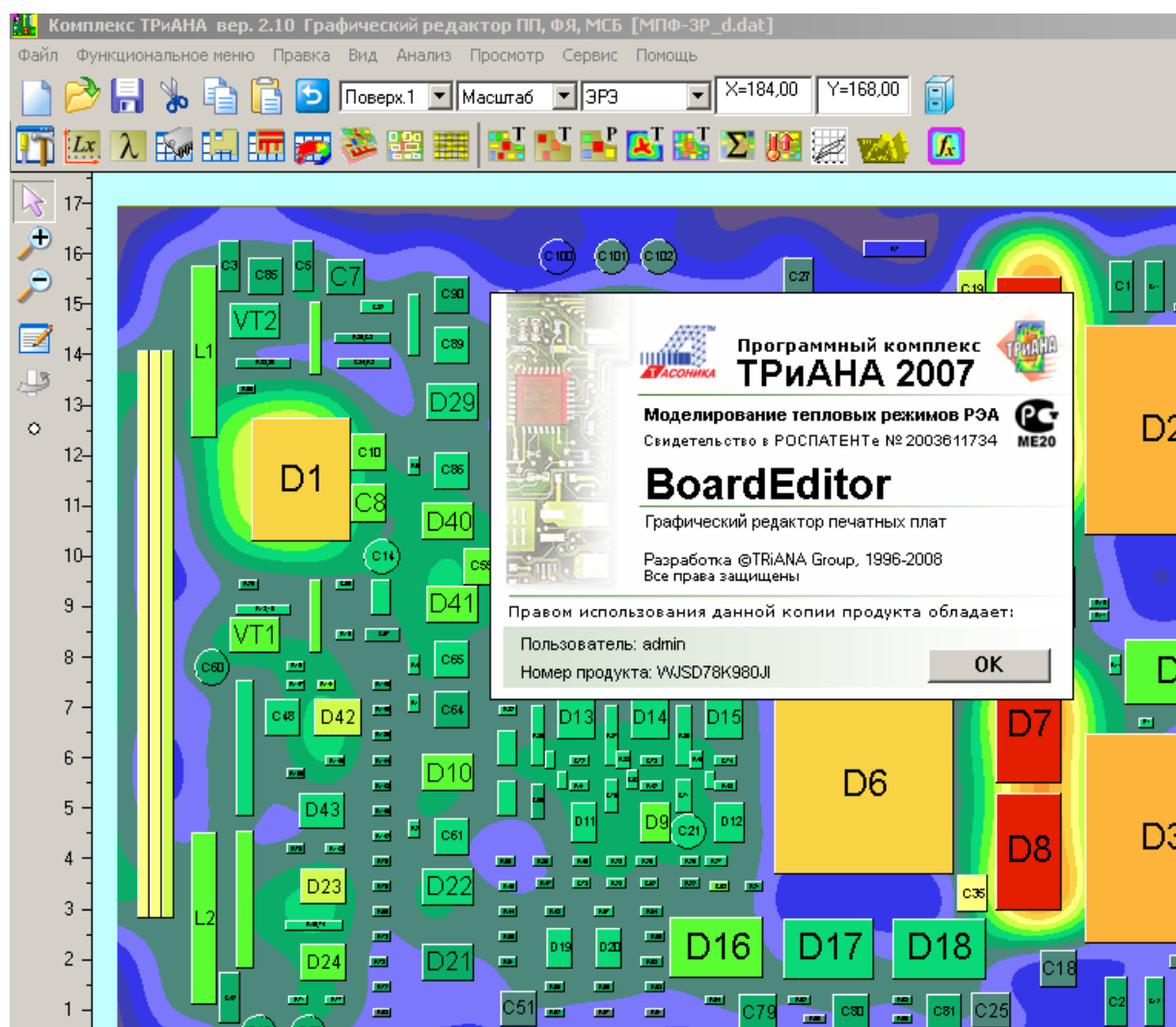


Рис. 3.14. Заставка программы *BoardEditor*

На начальной стадии процесс создания нового файла с данными может также осуществляться при помощи специального конвертора *Conv2Triana* (см. [рис. 3.17](#)), позволяющего считывать размеры КУ (параметры «dlpx» и «dlpy») и схему размещения ЭРЭ на КУ из форматов **.PCB* и **.PDIF* систем *P-CAD*, *ACCEL*. При этом все ЭРЭ аппроксимируются прямоугольниками (см. [рис. 3.3](#)) или окружностями. Далее необходимо дополнительно задать параметр «dlpz» (см. [параграф 3.7.2](#)). В этом случае после запуска *BoardEditor* необходимо использовать функции <Файл>→<Импорт>→<Импорт топологии из>→<PCAD>, как это показано на [рис. 3.18](#).

Далее осуществляется настройка конвертора на конвертирование данных из одного файла **.PCB* или двух файлов. Данная ситуация возникает, когда на основание ФЯ крепятся две (или одна) гибких печатных платы.

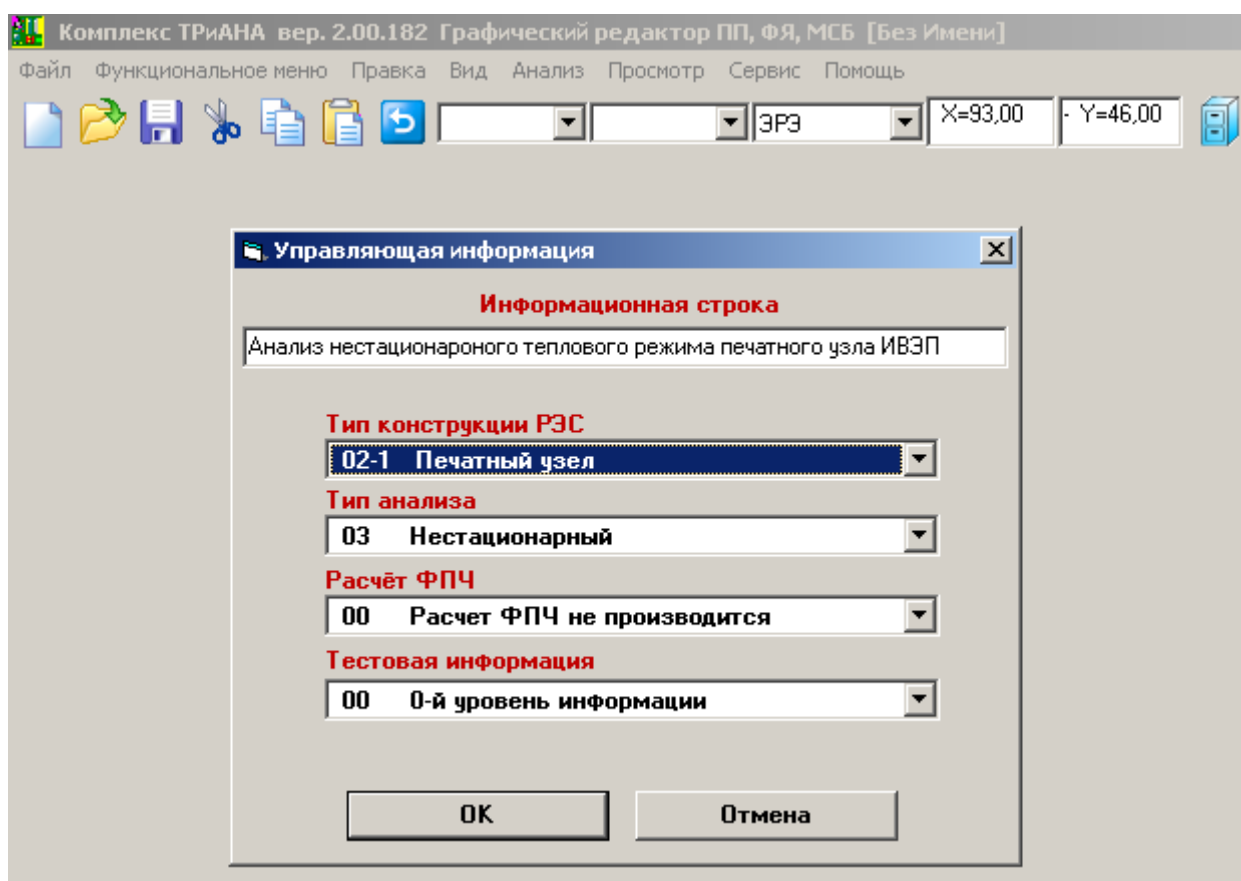


Рис. 3.15. Экранная форма с управляющей информацией

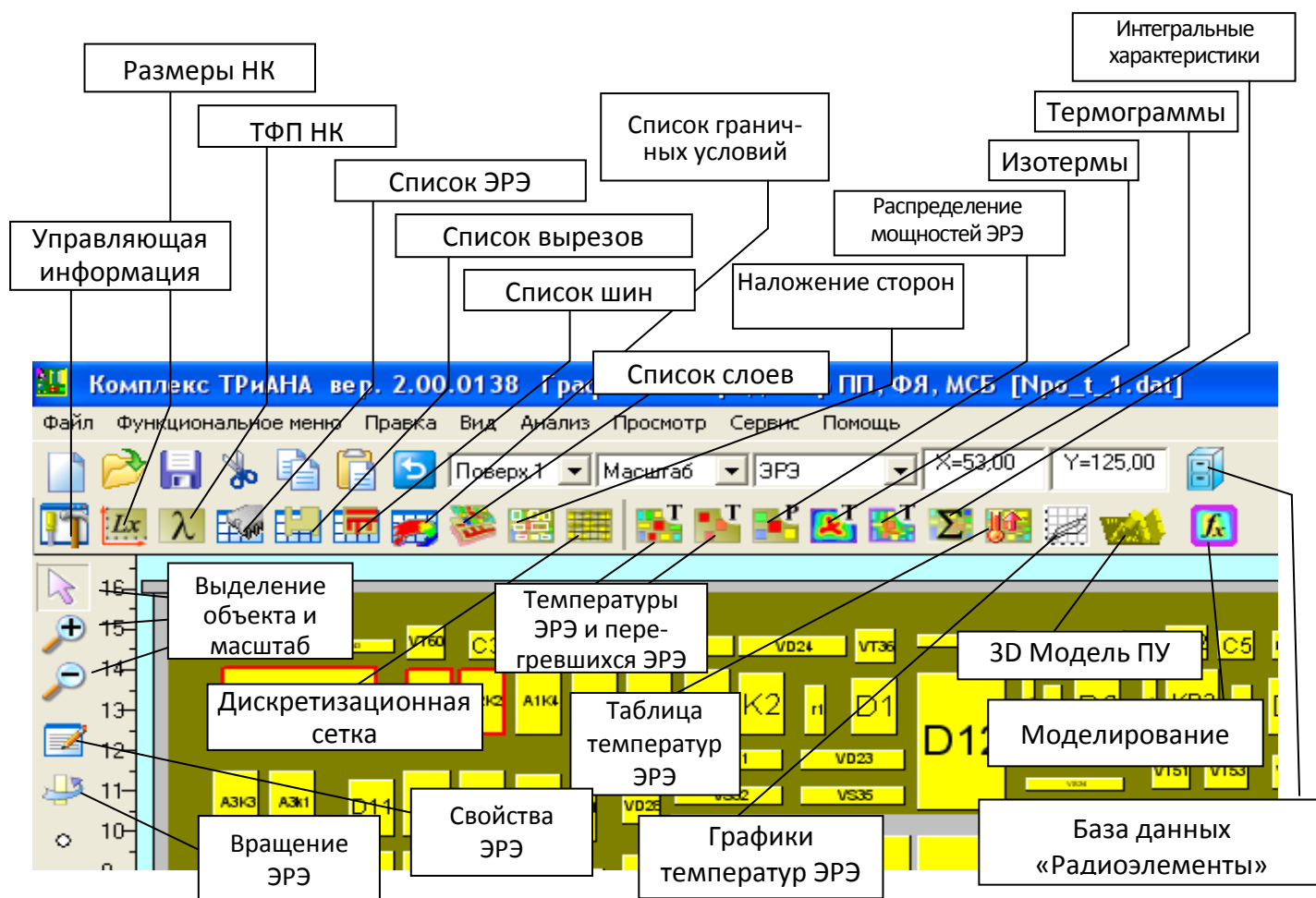


Рис. 3.16. Основные элементы визуального интерфейса программы *BoardEditor*

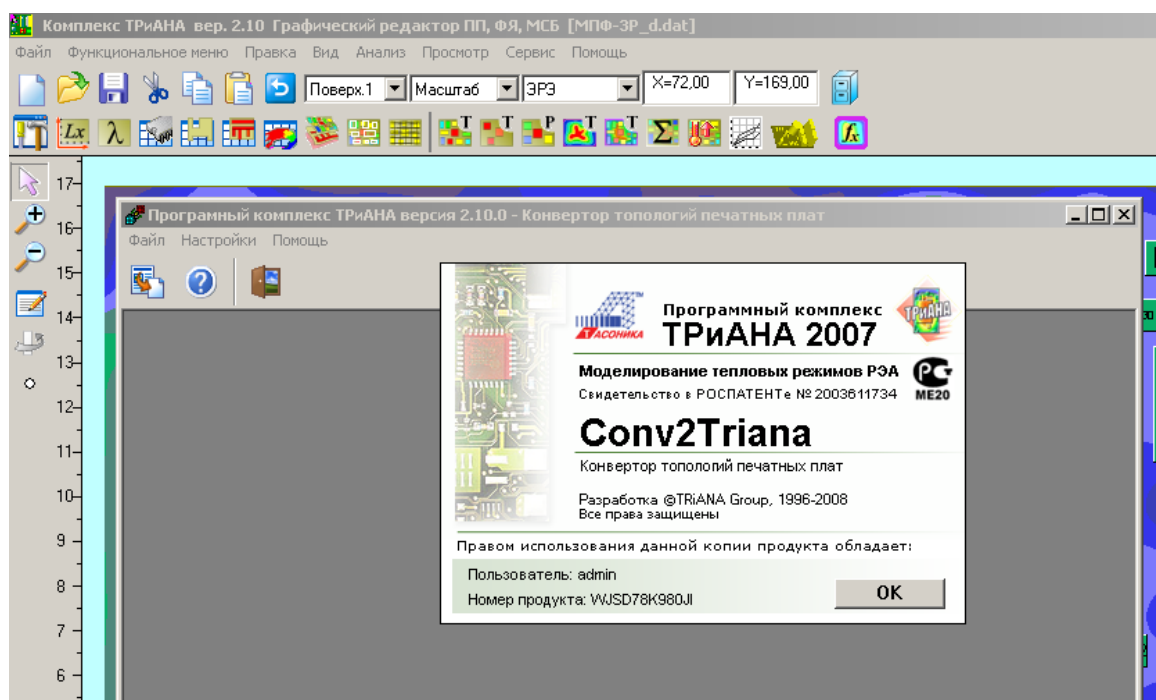


Рис. 3.17. Заставка программы (конвертора) *Conv2 triana*

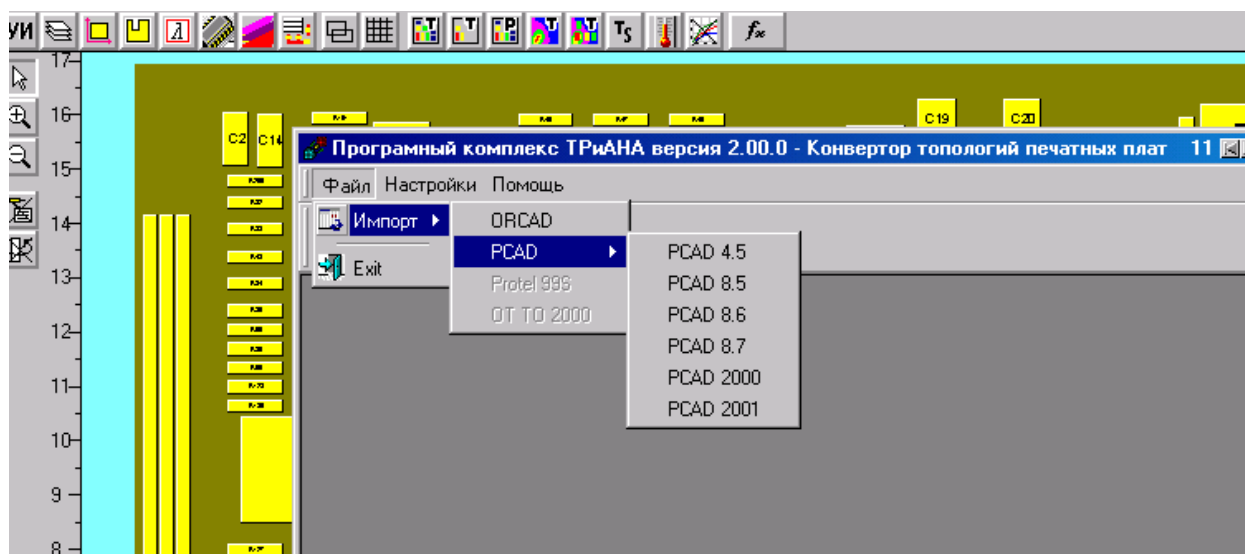


Рис. 3.18. Функция «файл», настроенная на конвертацию данных из системы P-CAD

После успешной конвертации данных конвертором *Conv2Triana* создается файл, имеющий имя файла, аналогичное имени файла в системе P-CAD, но с расширением «*DAT*». Данный файл необходимо загрузить посредством функций <Файл> и <Открыть>. В результате выполнения указанных функций на экран ПЭВМ выводится формализованная схема размещения ЭРЭ на НК (рис. 3.19). После считывания файла необходимо задать параметр «dlpz». Далее необходимо заполнить таблицу с управляющей информацией (рис. 3.15).

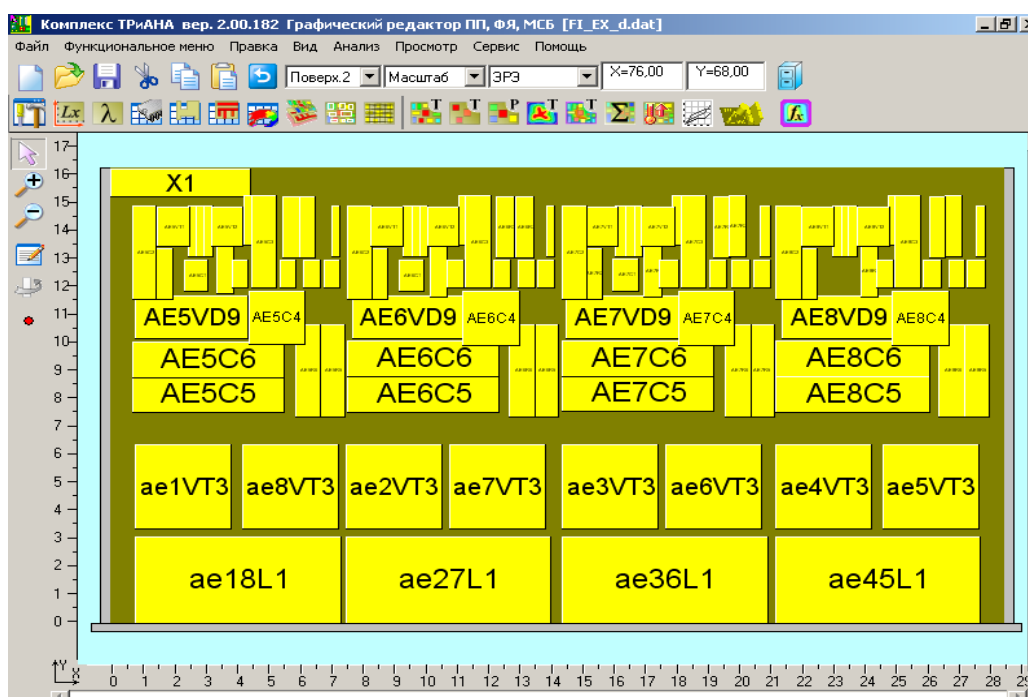


Рис. 3.19. Пример схемы размещения ЭРЭ, полученной в результате конвертации данных из системы P-CAD

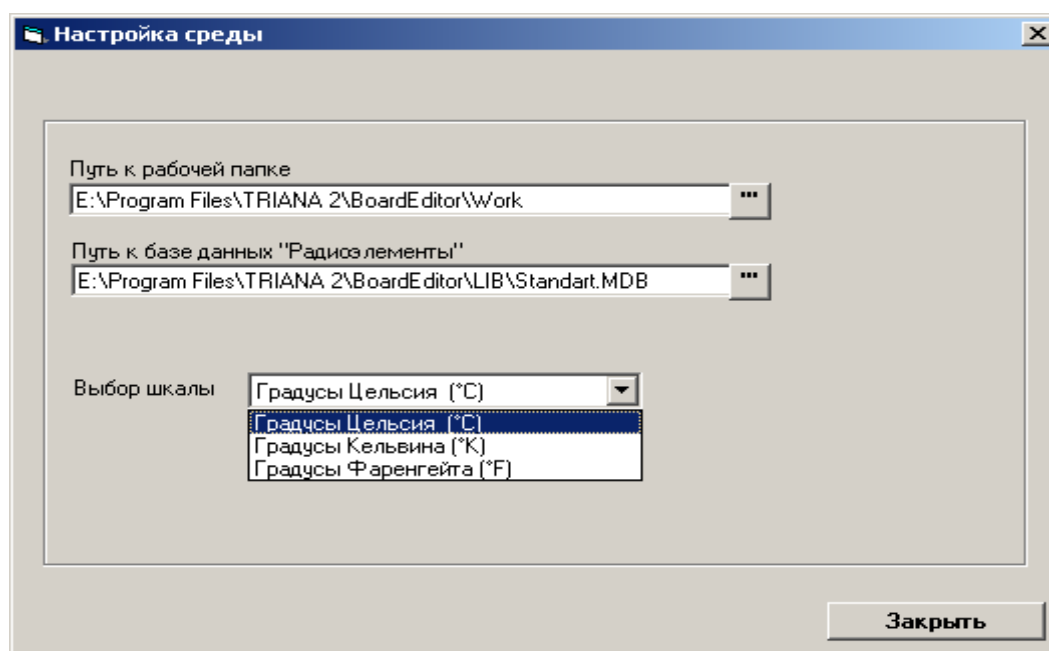


Рис. 3.20. Настройка программы *BoardEditor*
(пункт меню «Настройка среды»)

На следующем шаге необходимо выполнить функцию «Настройка среды» (см. [рис. 3.20](#)), с помощью которой прописываются пути к рабочему каталогу (обычно папка *WORK*), к текущей базе данных «Радиоэлементы», а также устанавливается шкала температур (Цельсия, Кельвина или Фаренгейта).

3.8.1.1. Особенности конвертации схем размещения ЭРЭ из систем топологического проектирования печатных плат

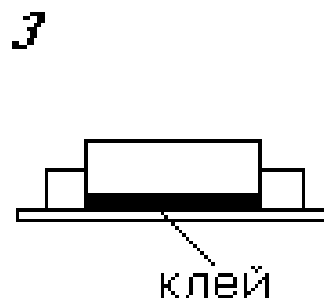
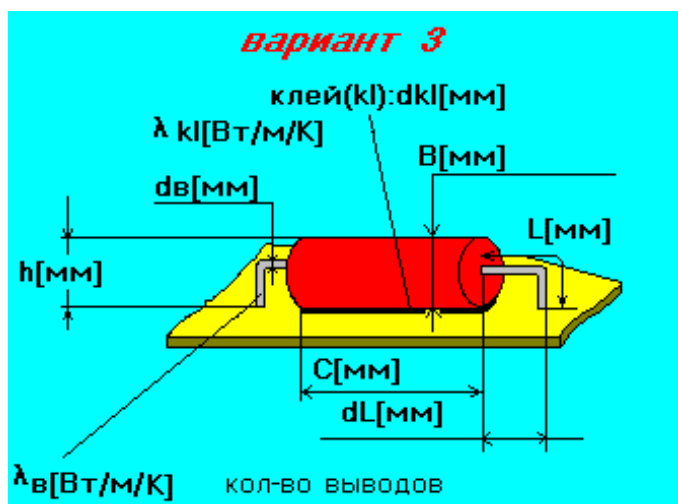
Для корректной работы компонентов ПК *TRIANA*, связанных с использованием данных из систем топологического проектирования, следует учитывать ряд ниже приведенных рекомендаций.

Организация библиотеки.

При организации библиотек, описывающих технологические корпуса ЭРЭ в системах топологического проектирования (*Protel*, *OrCAD* и т. п.), следует в названии каждого корпуса использовать обозначения, идентичные элементам базы данных «Радиоэлементы», программы *BoardEditor*.

Пример 1.

«ОМЛТ-1/3» – обозначение в базе данных «Радиоэлементы» резистора ОМЛТ-1, установленного согласно варианту № 3 ([рис. 3.21](#)).



Параметры ЭРЭ

Обозначение ЭРЭ: База данных "Радиоэлементы"

Типономинал ЭРЭ: Расчет теплофизических пар. ЭРЭ

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм:

Размер по оси OY, мм:

Размер по оси OZ, мм:

Мощность, мВт:

Ртк, К/Вт:

Ртв, К/Вт:

Тmax, °C:

Кчерн, отн.ед.:

Площадь ЭРЭ, мм.кв.:

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К:

Расчёт параметров

Координата по X, мм:

Координата по Y, мм:

ОК **Отмена**

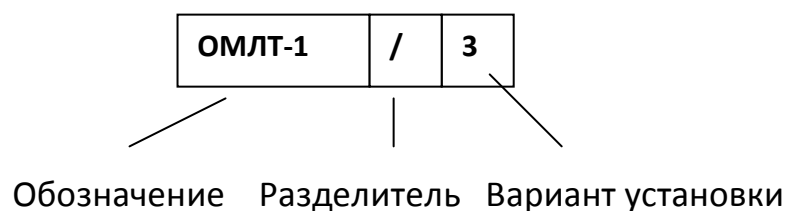
вариант 3

клей(kl): dkl[мм]
 λ_{kl} [Вт/м/К]
 dV [мм]
 B [мм]
 L [мм]
 h [мм]
 C [мм]
 dL [мм]
 $\lambda_{в}$ [Вт/м/К] кол-во выводов

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Высота (h), мм | 6,6 |
| Диаметр (B), мм | 6,6 |
| Длина корпуса (C), мм | 13 |
| Длина выводов (L), мм | 5,5 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 2,25 |
| Диаметр выводов (dV), мм | 0,8 |
| Коз ф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

Рис. 3.21. Резистор ОМЛТ, устанавливаемый по варианту № 3

Поля описания резистора ОМЛТ в базе данных «Радиоэлементы»:



Пример 2.

«533ТБ6/4» – обозначение в базе данных «Радиоэлементы» микросхемы 533ТБ6, установленной согласно варианту № 4 (см. [рис. 3.22](#)).

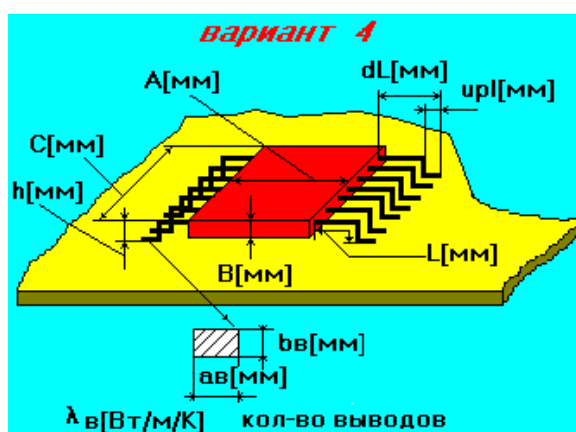


Рис. 3.22. Микросхема 533ТБ6, устанавливаемая согласно варианту № 4

Параметры ЭРЭ

Обозначение ЭРЭ: **DD1**

Типономинал ЭРЭ: **533ТВ6** **4**

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: **14,5**

Размер по оси OY, мм: **10**

Размер по оси OZ, мм: **2,97**

Мощность, мВт: **120**

В_{тк}, К/Вт: **55,4**

В_{тв}, К/Вт: **0**

Т_{мах}, °C: **120**

К_{черн}, отн.ед.: **0,8**

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: **319**

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: **0,7**

База данных "Радиоэлементы"

Расчет теплофизических парам. ЭРЭ

Расчёт параметров

Координата по X, мм: **70**

Координата по Y, мм: **60**

OK Отмена

вариант 4

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 1,97 |
| Ширина корпуса (A), мм | 6,7 |
| Длина корпуса (C), мм | 10 |
| Высота установки (h), мм | 2,97 |
| Длина выводов (L), мм | 6 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 3,9 |
| Размер для пайки (upl), мм | 1 |

Рис. 3.22. Окончание

При работе с графическими редакторами печатных плат (*P-CADPCB*, *Protel*) следует соблюдать следующие правила:

1. Формирование контура платы должно проводиться в слое *BRDOUT* (*Board*), все другие слои игнорируются. Идеальным случаем формирования прямоугольного контура печатной платы является использование функции *Rectangle*.

Выбор слоя для рисования контура печатной платы в графическом редакторе печатных плат *P-CADPCB*.

Формирование элементов должно проводиться в слое **COMP** (рис. 3.23), все другие слои игнорируются.

В настоящий момент программа *Conv2Triana* поддерживает следующие форматы: *BinaryPCB-PCAD 4.5*, *PDIF*, *ASCIIPCB*.

После конвертирования файла с результатами трассировки с помощью *Conv2Triana* в файл данных для ПК ТРИАНА следует выполнить привязку геометрических и теплофизических параметров ЭРЭ в этом файле к базе данных «Радиоэлементы» (см. рис. 3.24).

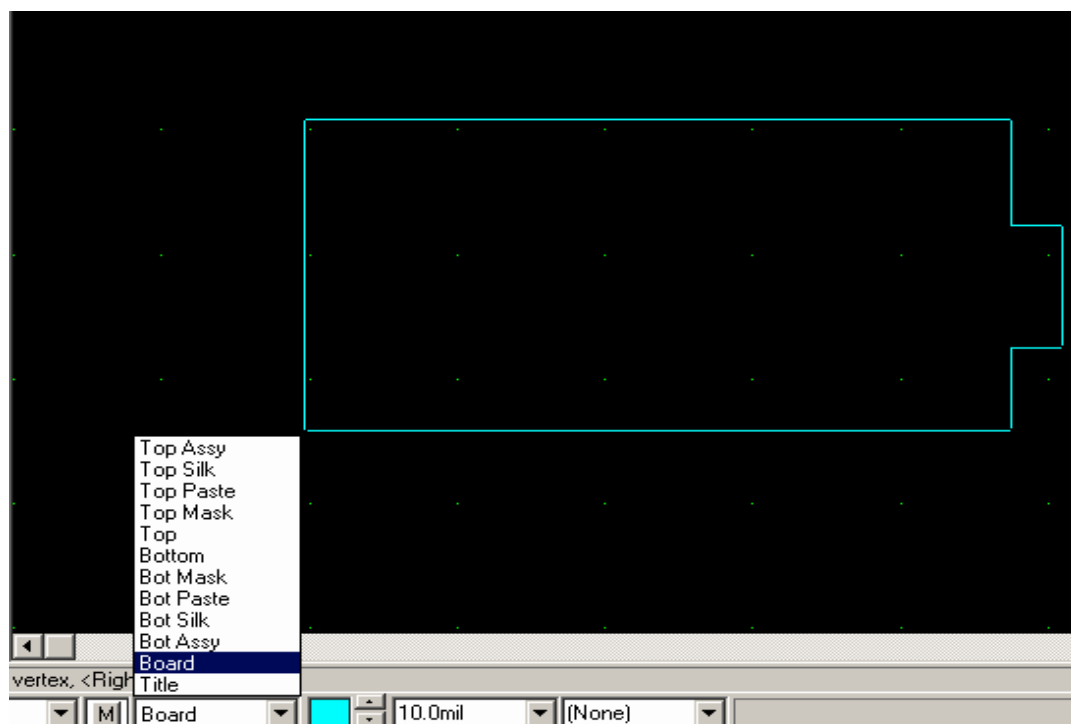


Рис. 3.23. Выбор слоя для рисования контура печатной платы

Для этого используется функция программы *BoardEditor* «Привязать к БД», которая вызывается либо через меню программы, либо щелчком правой кнопки мыши на выделенном ЭРЭ.

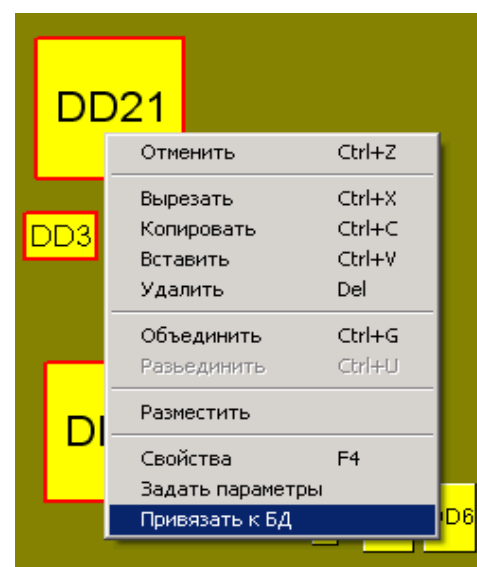
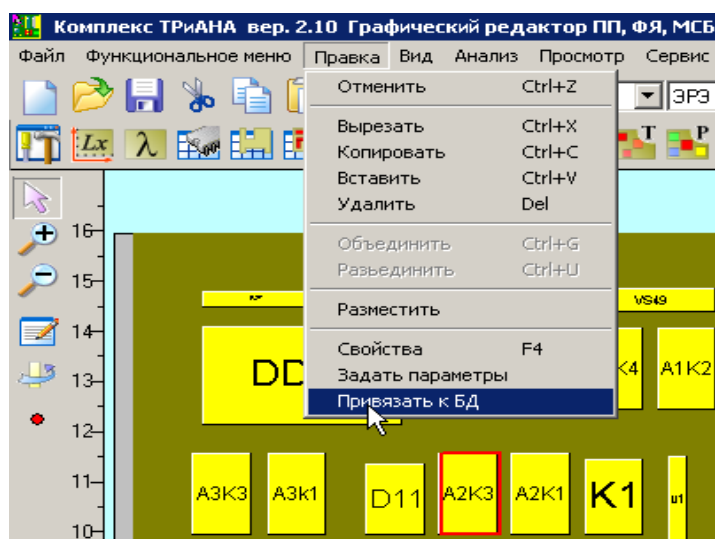


Рис. 3.24. Привязка ЭРЭ к БД «Радиоэлементы»

После выполнения данной функции к элементу, расположенному на плате, прикрепляются все геометрические и теплофизические параметры из базы данных «Радиоэлементы».

3.8.2. ГТФП несущей конструкции

После заполнения таблицы с управляющей информацией, когда файл с данными создается без специального конвертора, необходимо задать размеры НК КУ. Для этого надо войти в функциональное меню, а затем в подменю *<Размеры печатной платы>* (для ПУ), или *<Размеры основания ФЯ>* (для ФЯ), или *<Размеры подложки>* (для МСБ) и задать размеры несущей конструкции КУ (см. [рис. 3.25](#)). Для этого можно также использовать элемент визуального интерфейса (см. [рис. 3.16](#)).

На следующем шаге, вне зависимости от вариантов начала ввода данных (с конвертором или без него), необходимо описать теплофизические параметры НК КУ ([рис. 3.26](#)). Для ФЯ дополнительно необходимо определить структуру НК (пункт функционального меню *<Гибкие печатные платы>* и определить ТФП (*<ТФП материала основания ФЯ>*, *<ТФП ГПП₁>*, *<ТФП ГПП₂>*). Все это можно выполнить в пункте *<Гибкие печатные платы>*). На [рис. 3.27](#) приведен пример формы, появляющейся после обращения к функции *<ТФП ГПП>* из пункта *<Гибкие печатные платы>*. Из пунктов меню *<Гибкие печатные платы>*, *<ТФП печатной платы>*, *<ТФП ГПП>*, *<ТФП подложки>* существует возможность входа в базу данных «МАТЕРИАЛЫ» через функцию *<Справочник>* (см. [рис. 3.28](#)).

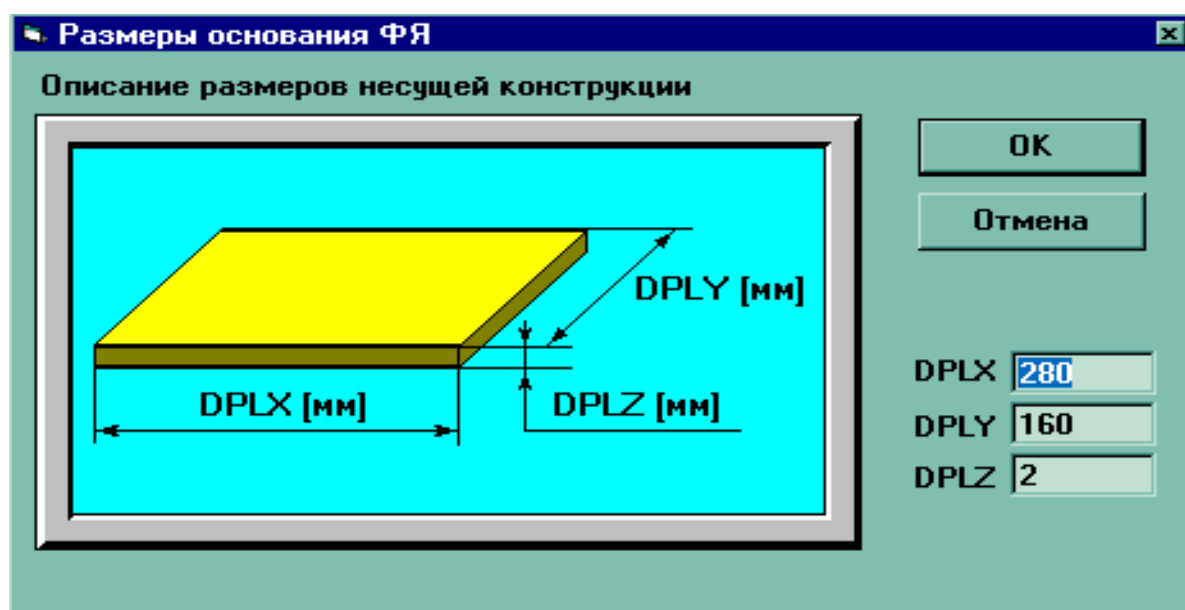
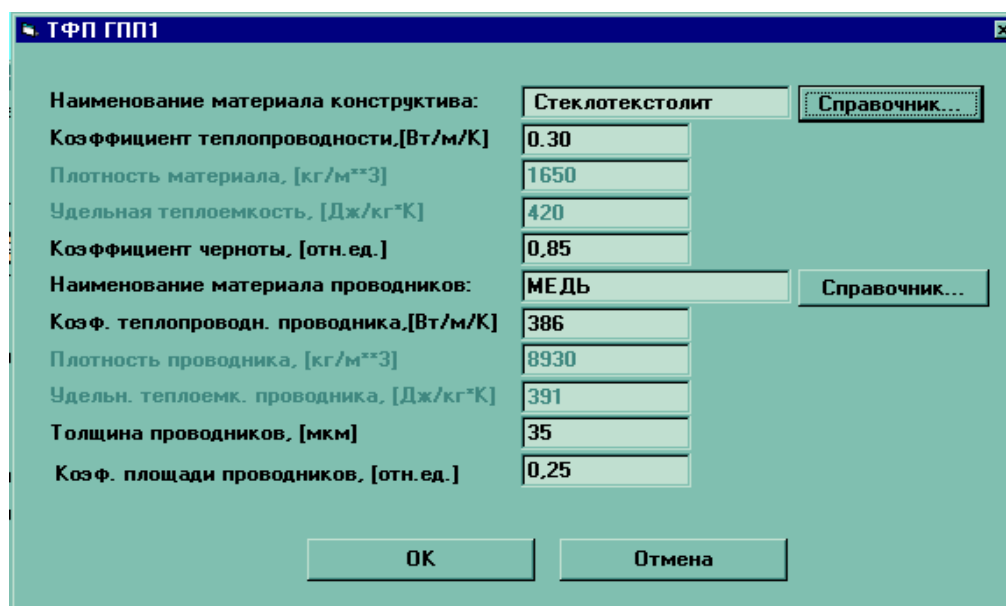


Рис. 3.25. Окно описания линейных размеров несущей конструкции печатного узла (ПП), ФЯ (основания ФЯ) или МСБ (подложки)



ТФП ГПП1

Наименование материала конструктива:

Коэффициент теплопроводности, [Вт/м/К]

Плотность материала, [кг/м³]

Удельная теплоемкость, [Дж/кг·К]

Коэффициент черноты, [отн.ед.]

Наименование материала проводников:

Коэф. теплопроводн. проводника, [Вт/м/К]

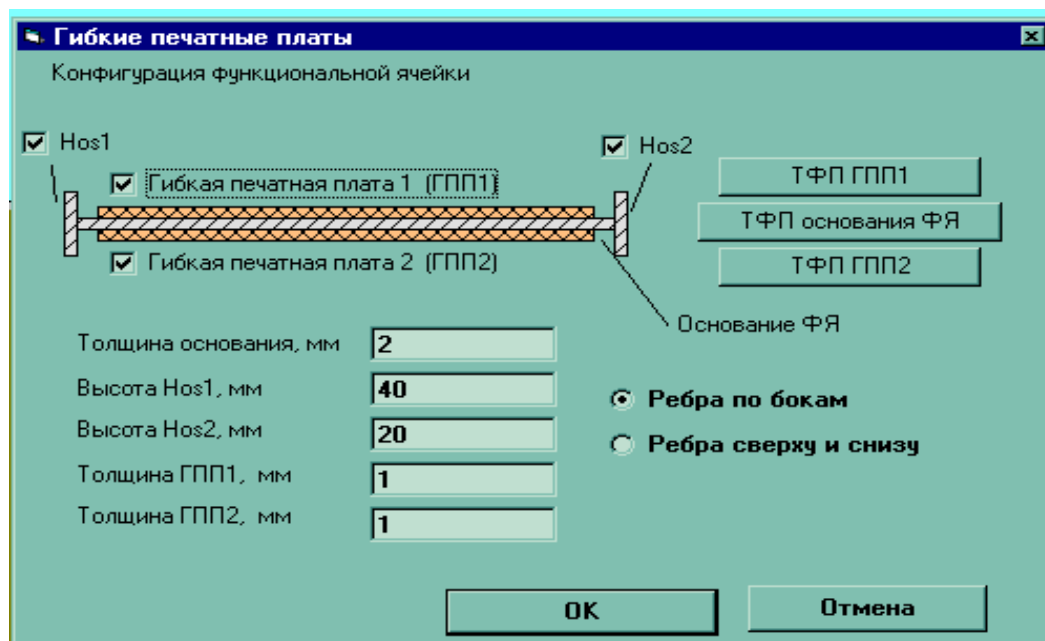
Плотность проводника, [кг/м³]

Удельн. теплоемк. проводника, [Дж/кг·К]

Толщина проводников, [мкм]

Коэф. площади проводников, [отн.ед.]

Рис. 3.26. Экран после обращения к функции «ТФП ГПП»' (теплофизические параметры ГПП)



Гибкие печатные платы

Конфигурация функциональной ячейки

☒ Нос1

☒ Гибкая печатная плата 1 (ГПП1)

☒ Гибкая печатная плата 2 (ГПП2)

☒ Нос2

Основание ФЯ

Толщина основания, мм

Высота Нос1, мм

Высота Нос2, мм

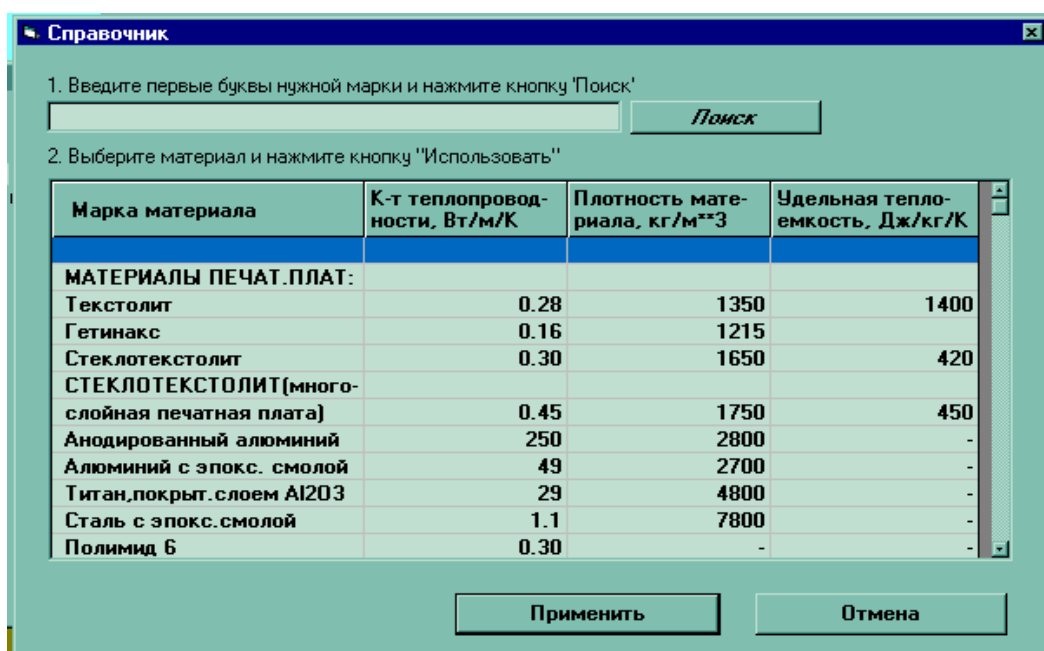
Толщина ГПП1, мм

Толщина ГПП2, мм

☒ Ребра по бокам

☐ Ребра сверху и снизу

Рис. 3.27. Описание слоистой структуры функциональной ячейки посредством функции «Гибкие печатные платы»'



1. Введите первые буквы нужной марки и нажмите кнопку 'Поиск'

2. Выберите материал и нажмите кнопку "Использовать"

| Марка материала | К-т теплопроводности, Вт/м/К | Плотность материала, кг/м³ | Удельная теплоемкость, Дж/кг/К |
|---|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| МАТЕРИАЛЫ ПЕЧАТ.ПЛАТ: | | | |
| Текстолит | 0.28 | 1350 | 1400 |
| Гетинакс | 0.16 | 1215 | |
| Стеклотекстолит | 0.30 | 1650 | 420 |
| СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ(много- слойная печатная плата) | 0.45 | 1750 | 450 |
| Анодированный алюминий | 250 | 2800 | - |
| Алюминий с эпокс. смолой | 49 | 2700 | - |
| Титан,покрыт.слоем Al2O3 | 29 | 4800 | - |
| Сталь с эпокс.смолой | 1.1 | 7800 | - |
| Полиимид 6 | 0.30 | - | - |

Применить Отмена

Рис. 3.28. Экранная форма после обращения к функции «Справочник»
(база данных «Материалы»)

3.8.3. Описание ГТФП ЭРЭ

Следующим шагом в подготовке данных является процесс формирования таблицы с перечнем ЭРЭ, которые необходимо разместить на НК КУ (см. [рис. 3.29](#)). В случае применения конвертора такая таблица формируется автоматически и ее можно, в случае необходимости, дополнять (функция <Добавить>), удалять из нее ЭРЭ (функция <Удалить>), изменять параметры входящих в ее состав ЭРЭ (функция <Изменить>). Кроме этого, используя функцию <Разместить>, пользователь может осуществлять процесс размещение ЭРЭ на НК КУ в графическом режиме, если этот процесс не был выполнен конвертором. В последнем случае пользователь может выполнить переразмещение ЭРЭ. В процессе размещения ЭРЭ через таблицу у неразмещенных ЭРЭ присутствует ноль в колонке «СТ» (сторона или поверхность КУ). После размещения значение данного параметра становится равным номеру поверхности, на которой был размещен ЭРЭ.

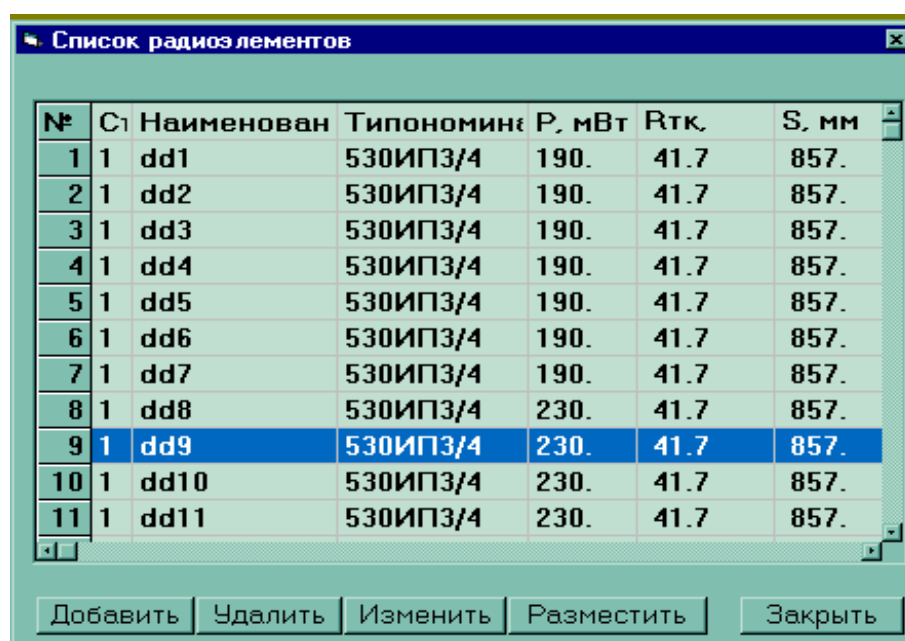
Применение функции <Добавить> активизирует экранную форму, в которой указываются: обозначение ЭРЭ в схеме (автоматически подставляется из таблицы); типонаминал ЭРЭ и через слеш («/») вариант установки ЭРЭ (используются для поиска ГТФП ЭРЭ в базе данных); размеры проекции ЭРЭ на плоскость НК КУ ([рис. 3.3](#)), а также высота ЭРЭ (размер по оси OZ); мощность тепло-

выделения в ЭРЭ и ряд других теплофизических параметров, описывающих ЭРЭ.

После входа в экранную форму допускается три варианта, реализующих процесс описания ГТФП ЭРЭ.

1-й вариант. Вносятся значения параметров в соответствующие окна экранной формы без применения специальных функций. После этого применяется команда <OK>.

2-й вариант. Заполнив окна «Обозначение ЭРЭ» и «Типономинал ЭРЭ», пользователь активизирует функцию <Расчет теплофизических параметров>. В результате этого на экране появляется окно (рис. 3.30, а), в котором приводится перечень типов ЭРЭ («Резисторы», «Транзисторы», «Конденсаторы», «Микросхемы» и др.). Выбрав необходимый тип ЭРЭ, пользователь получает на экране упрощенные эскизы вариантов установки данного типа ЭРЭ (рис. 3.30, б и прил. 4). После выбора необходимого варианта пользователь определяет (щелчок левой кнопкой манипулятора «мышь») тип корпуса и тип выводов ЭРЭ. После команды <OK> на экране ПЭВМ появляется экранная форма с детальным эскизом установки ЭРЭ на НК (рис. 3.30, в).

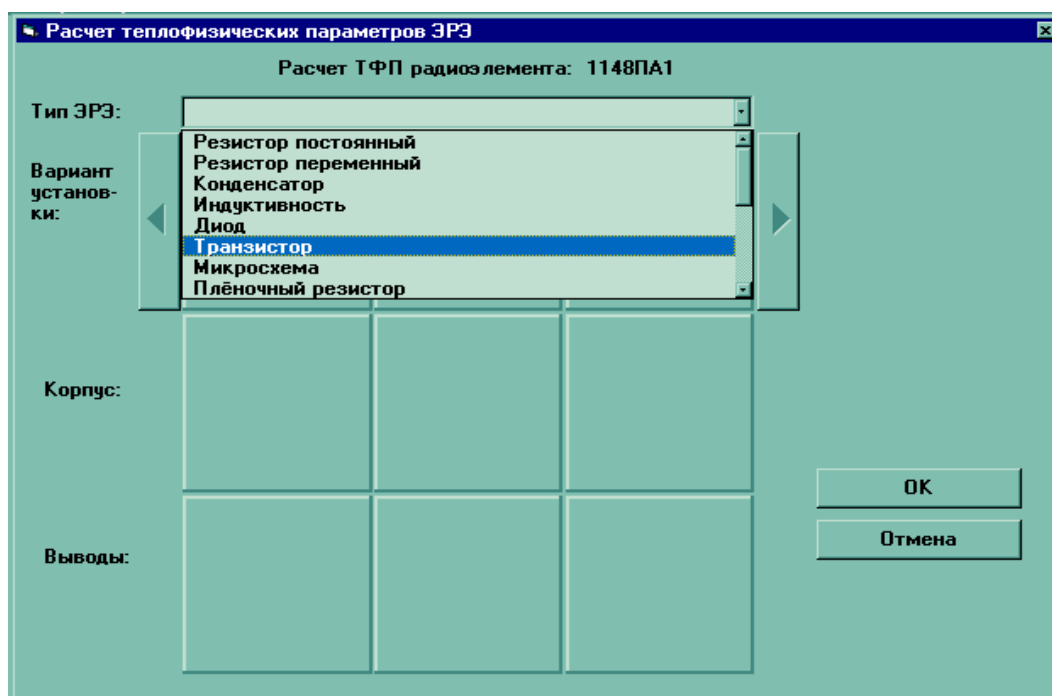


| № | С1 | Наименован | Типономинал | Р, мВт | Rтк. | S, мм |
|----|----|------------|-------------|--------|------|-------|
| 1 | 1 | dd1 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 2 | 1 | dd2 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 3 | 1 | dd3 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 4 | 1 | dd4 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 5 | 1 | dd5 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 6 | 1 | dd6 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 7 | 1 | dd7 | 530ИПЗ/4 | 190. | 41.7 | 857. |
| 8 | 1 | dd8 | 530ИПЗ/4 | 230. | 41.7 | 857. |
| 9 | 1 | dd9 | 530ИПЗ/4 | 230. | 41.7 | 857. |
| 10 | 1 | dd10 | 530ИПЗ/4 | 230. | 41.7 | 857. |
| 11 | 1 | dd11 | 530ИПЗ/4 | 230. | 41.7 | 857. |

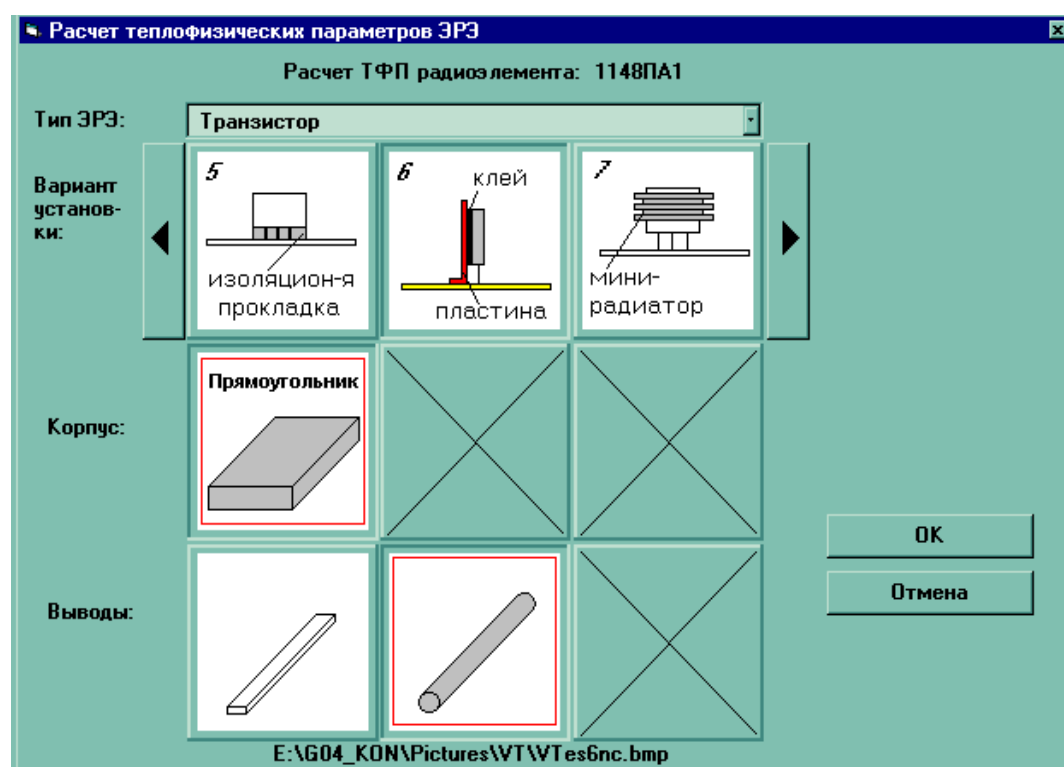
Рис. 3.29. Таблица с основными параметрами ЭРЭ

Пользователь должен внести значения в таблицу параметров, находящуюся в правом нижнем углу экранной формы. При внесении параметров в таблице может автоматически появляться кнопка [V], активизация которой (щелчок левой кнопкой манипулятора «мышь») приводит к входу в базу данных «Материалы» или «Теплоемкости ЭРЭ». Заполнив все параметры в таблице, пользователь активизирует функцию <Расчет параметров>, после чего левая вертикальная линейка окон заполняется цифрами. Незаполненные окна (T_{max} , $R_{тв}$, мощность, коэф-

фициент черноты) должны быть заполнены пользователем с применением нормативно-справочной литературы и карт режимов работы ЭРЭ (мощность). Значение мощности ЭРЭ является переменным параметром и используется только в текущем файле данных, т. е. в базу данных не записывается.



а



б

Рис. 3.30. Функция «Расчет теплофизических параметров ЭРЭ»: а – выбор типа ЭРЭ; б– выбор варианта установки, типа корпуса и типа выводов; в – описание параметров выбранного варианта установки и структуры ЭРЭ

Параметры ЭРЭ

Обозначение ЭРЭ: **DD3**

Типономинал ЭРЭ: **KT805AM** **6**

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: **10.8**

Размер по оси OY, мм: **40**

Размер по оси OZ, мм: **30**

Мощность, мВт: **70**

Р_{тк}, К/Вт: **1.7**

Р_{тв}, К/Вт: **3.3**

Т_{мах}, °C: **125**

К_{черн}, отн.ед.: **0.8**

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: **3181**

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: **1.25**

Теплоемк. рад-ра, Дж/К: **0**

Площадь ЭРЭ+рад-р, мм.кв.: **5851**

Теплоемк. ЭРЭ+рад-р, Дж/К: **1.25**

Масса радиатора, г: **7.86**

Масса ЭРЭ+рад-р, г: **10.36**

Расчёт параметров

Координата по X, мм: **125**

Координата по Y, мм: **47.5**

База данных "Радиоэлементы"

Расчет теплофизических парам. ЭРЭ

вариант 6

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Кэф-т теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |
| Колич-во выводов (kolv), шт. | 3 |
| Толщина клеевого слоя (dkl), мм | .15 |
| Кэф-т теплопр. клея (Lamkl), Вт/м/К | .97 |
| Масса транзистора (Mel), г | 2.5 |
| Удельная теплоемкость транз-ра (Cud), Дж/Г/К | .5 |
| Длина пластины (Ipl), мм | 40 |

OK **Отмена**

Рис. 3.30. Окончание

6

После команды <OK> поступает запрос на запись параметров ЭРЭ в базу данных под именем **типономинала ЭРЭ**. Используемые шифры вариантов установки ЭРЭ (цифра в типономинале ЭРЭ после прямого слеша) не соответствуют вариантам установки ЭРЭ по ОСТ, а определяют возможные проектные ситуации, применяемые в практике конкретного предприятия.

Следует отметить, что пользователь может отказаться от записи параметров ЭРЭ в базу данных. В этом случае значения параметров ЭРЭ будут использоваться только в текущем файле данных.

3-й вариант. После заполнения окон «Обозначение ЭРЭ» и «Типономинал ЭРЭ» осуществляется вызов функции <База данных «Радиоэлементы»>. Затем возможен выбор типа ЭРЭ по аналогии со 2-м вариантом в окне «Выбор типа ЭРЭ» (см. [рис. 3.30, а](#)). После этого в виде таблицы высвечивается список ЭРЭ выбранного типа с перечнем параметров ([рис. 3.31](#)). Пользователь выбирает необходимый тип ЭРЭ и активизирует функцию <Применить>. В результате выполнения данной функции на экран ПЭВМ выводится заполненная экранная форма (см. [рис. 3.30, в](#)), включая детальный эскиз установки ЭРЭ на НК КУ. Незаполненным остается одно окно «Мощность». Пользователь должен ввести значение мощности, используя карту режимов работы ЭРЭ. В нижнем правом

углу приводится таблица с полным перечнем параметров и их значениями. Пользователь имеет возможность изменить любой параметр и активизировать функцию *<Расчет параметров>*. В результате этого параметры ЭРЭ, располагающиеся слева в вертикальной линейке окон, изменятся.

База данных "Радиоэлементы" [D:\Program Files\BoardEditor\LIB\Standart.MDB]

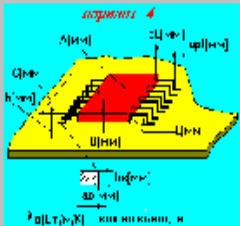
Сохранить Защита

Тип ЭРЭ: **Микросхема**

1. Введите первые буквы типономинала и нажмите 'Выбрать'

1526ЛА **Выбрать**

4 планарные выводы (2 ряда)



| Типономинал ЭРЭ | В У | ОХ, мм | ОУ, мм | ОZ, мм | R _{тк} , К/Вт | R _{тв} , К/Вт | T _{max} , °C | Кчерн отн.ед. | Сэра, мм.кв. | Тепл, Дж/К | Масса, г |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------------|-------------|
| 1526ЛА | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА1 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 31 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА10 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 31 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА3 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА31 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА7 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА8 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |
| 1526ЛА9 | 4 | 14,5 | 10 | 2,97 | 55,4 | 0 | 120 | 0,8 | 319 | 0,7 | 1 |

Типономинал радиоэлемента

Закреть

Рис. 3.31. Выбор геометрических и теплофизических параметров ЭРЭ из базы данных «Радиоэлементы»

Применение после этого команды *<OK>* приведет к запросу о необходимости перезаписи полученных параметров ЭРЭ в базе данных. Пользователь может отменить данную команду. В этом случае параметры будут использованы только в текущем файле данных.

3.8.4. Операции над ЭРЭ в процессе размещения

После описания параметров ЭРЭ графический редактор возвращает управление функции <Список электрорадиоэлементов> (см. [рис. 3.29](#)). При этом значение параметра ЭРЭ «Ст» (сторона КУ) в таблице равно «0». Активизация функции <Разместить> приводит к появлению контура ЭРЭ в левом нижнем углу на эскизе НК КУ. Пользователь перемещает ЭРЭ по полю НК КУ манипулятором мышь (нажата левая кнопка манипулятора). Определив место расположения ЭРЭ, пользователь отпускает левую кнопку и нажимает правую кнопку. После этого, **также как и в случае выделения ЭРЭ (щелчок левой кнопки на манипуляторе «мышь» при установке указателя манипулятора на поле, занимаемом ЭРЭ)**, на мониторе появляется таблица (см. [рис. 3.32](#)), в которой являются активными функции: <Вырезать> (аналог <Удалить>); <Объединить>; <Разместить>; <Свойства>. Активизировав еще раз функцию <Разместить>, пользователь окончательно закрепляет ЭРЭ (площадь, занимаемая ЭРЭ, заливается желтым цветом).

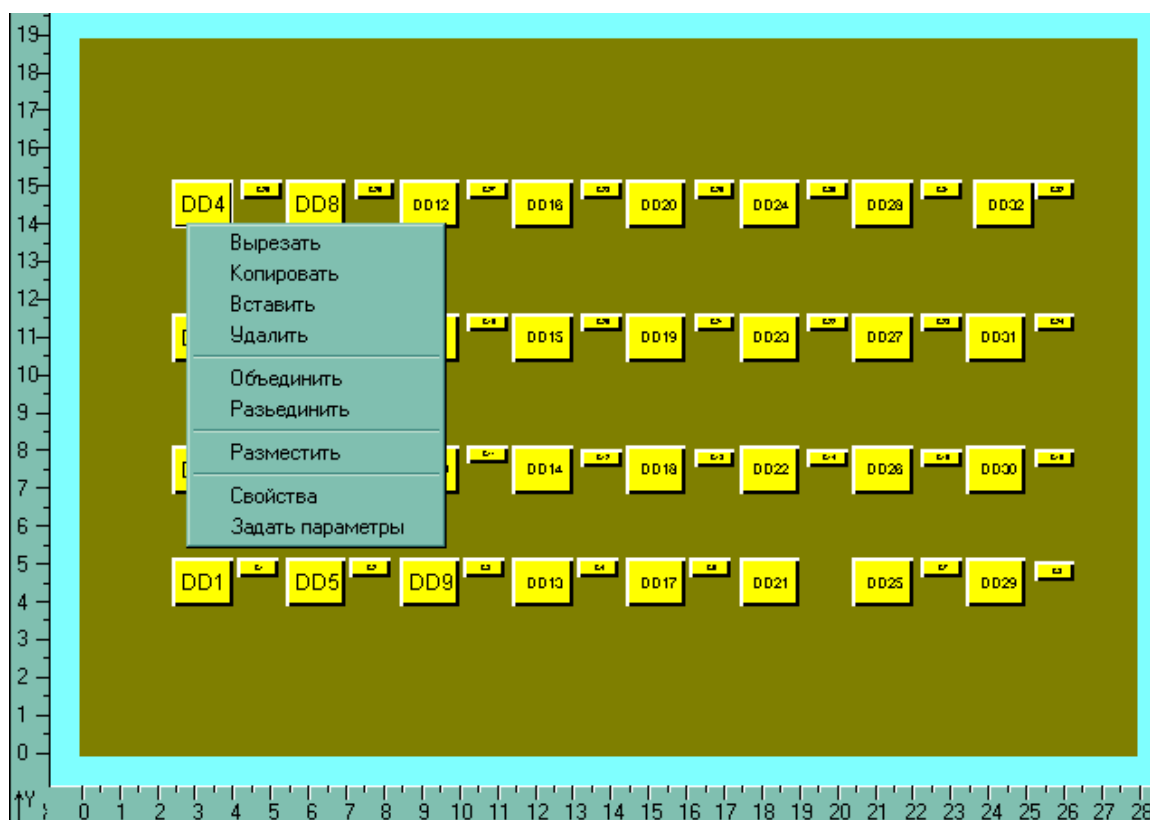




Рис. 3.32. Таблица с перечнем операций, осуществляемых с ЭРЭ после его выделения

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 218 |
|---|--|---|------------|

Для перераспределения ЭРЭ необходимо его выделить и выполнить заново вышеописанные действия. Использование функций *<Свойства>* или *<Задать параметры>* позволяет изменить любые параметры ЭРЭ.

В процессе размещения ЭРЭ на поле НК КУ пользователь может объединять несколько ЭРЭ в один, переносить или вращать ЭРЭ группой.

Кроме того, имеется функция *<Привязка к БД>*, позволяющая привести в соответствие с БД «Радиоэлементы» параметры ЭРЭ.

Для переноса ЭРЭ группой необходимо выделить по очереди несколько ЭРЭ (щелчок левой кнопки на манипуляторе «мышь» при установке указателя на изображении ЭРЭ), а затем, установив указатель манипулятора «мышь» на изображении одного из ЭРЭ в группе, переместить группу ЭРЭ (см. [рис. 3.33](#)) в необходимое место НК КУ. При этом первоначальное изображение группы пропадет после фиксации группы ЭРЭ на новом месте. Для переноса группы ЭРЭ на другую поверхность НК КУ необходимо после выделения группы изменить в основном меню ИС сторону (поверхность) НК. После этого можно осуществлять операцию перемещения группы. Выделенную группу элементов можно также вращать, используя соответствующий элемент визуального интерфейса (см. [рис. 3.16](#)).

Для привязки ЭРЭ к БД группой, например, после конвертации данных из системы топологического проектирования ПП (см. [рис. 3.17-3.19](#)), необходимо выделить несколько ЭРЭ (нажатие левой кнопки на манипуляторе «мышь» на изображении ЭРЭ, либо выделение группы ЭРЭ при помощи прямоугольной области), затем, установив указатель манипулятора «мышь» на изображении одного из ЭРЭ в группе, необходимо нажать правую кнопку «мыши» для отображения меню действий выполняемых над ЭРЭ в процессе размещения (см. [рис. 3.32](#)) и выбрать пункт меню *<Привязка к БД>*. После этого все выбранные ЭРЭ, у которых типономинал соответствует имеющимся в БД ЭРЭ, будут привязаны к БД, что означает, что параметры ЭРЭ будут приведены в соответствие со значениями в БД (см. [рис. 3.16](#)).

Если необходимо выделить несколько ЭРЭ, удобно воспользоваться функцией выделения ЭРЭ при помощи прямоугольной области. Для этого необходимо, удерживая нажатой клавишу «Shift», нажать и удерживать в нажатом состоянии левую кнопку мыши. После этого при перемещении указателя появляется динамическая прямоугольная область зеленого цвета. Перемещением мыши выбираем ЭРЭ, попадающие внутрь прямоугольной области. Можно повторить указанные действия и выделить дополнительные ЭРЭ, при этом выделенные ранее ЭРЭ остаются также выделенными. Выделить все ЭРЭ на текущей стороне КУ можно также нажатием клавиатурной комбинации «Ctrl+A».

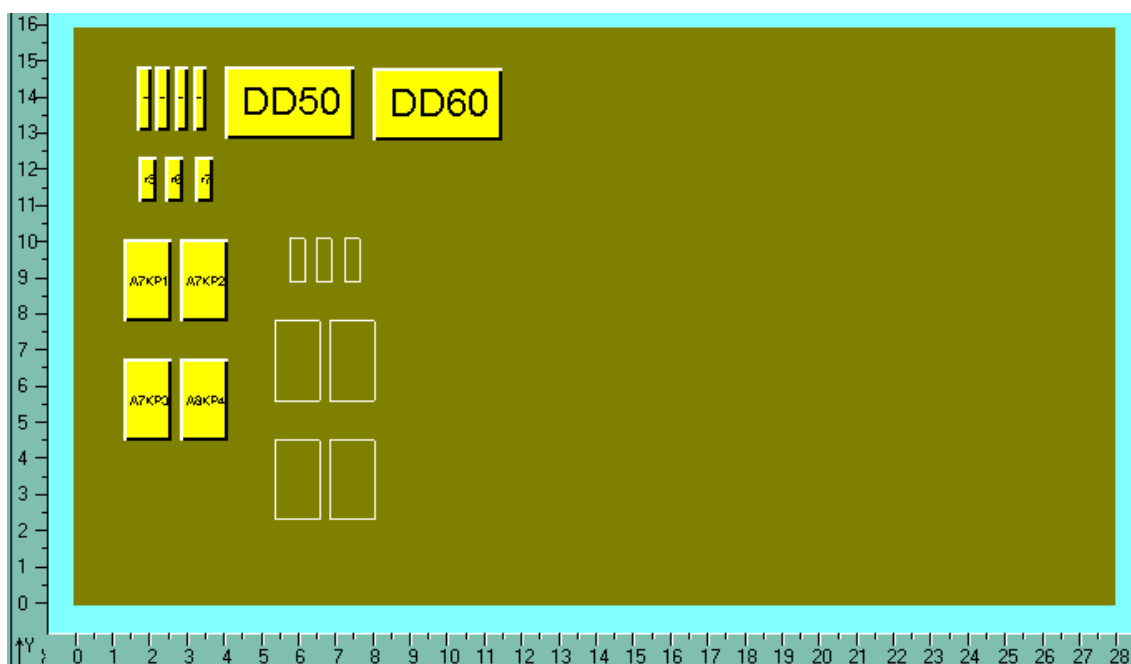


Рис. 3.33. Выделение ЭРЭ в группы и ее перемещение на другое место

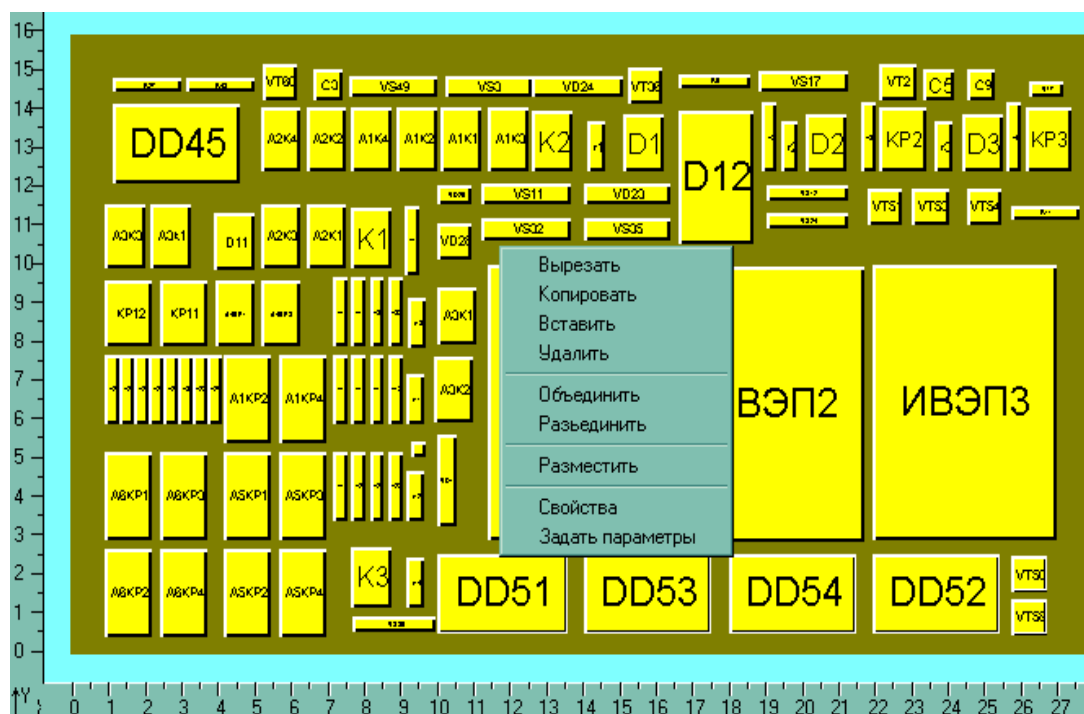
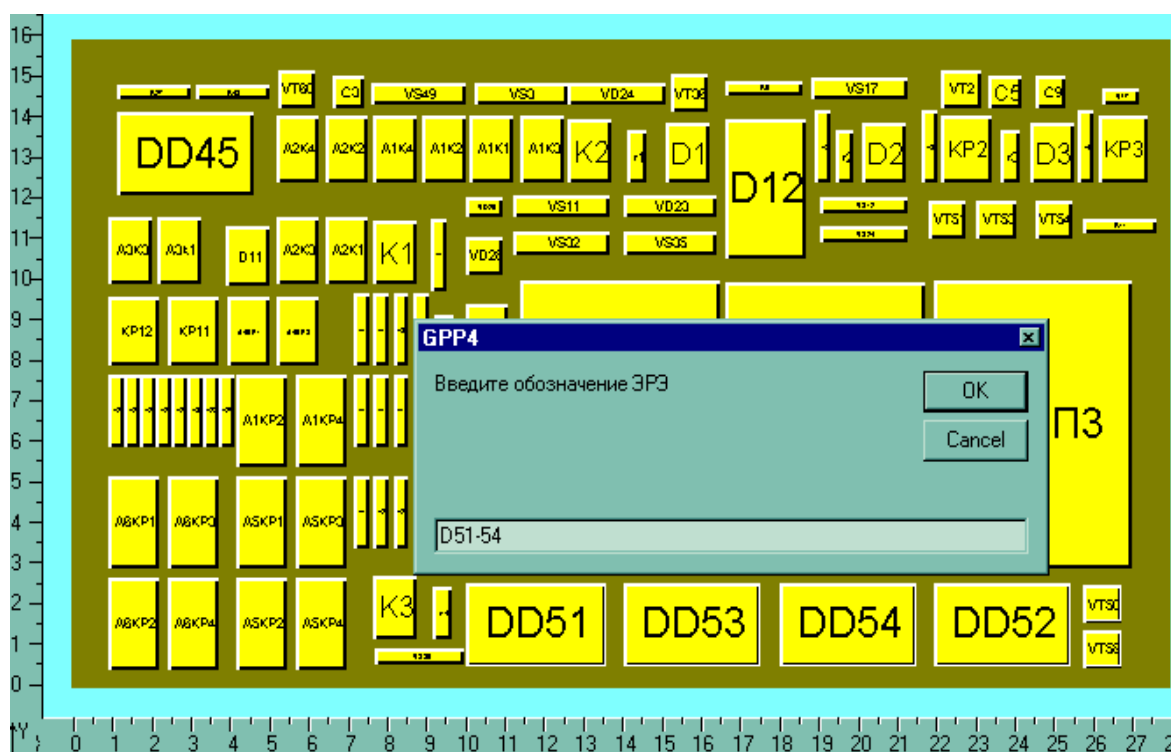
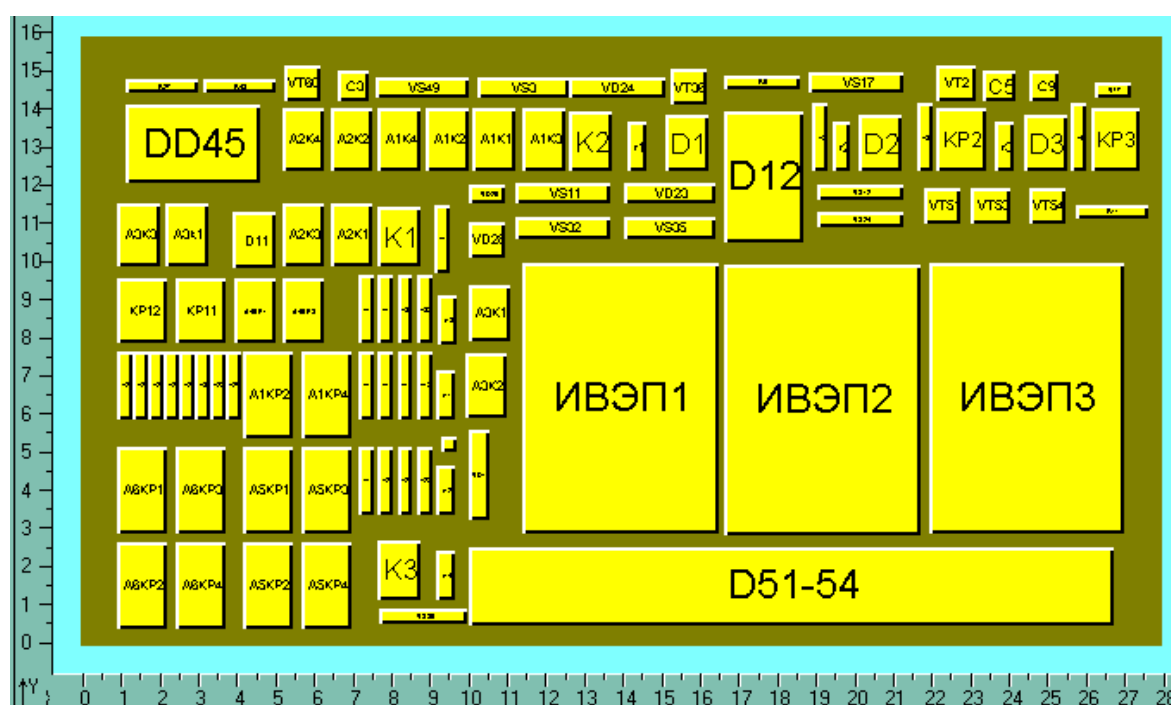


Рис. 3.34. Объединение нескольких ЭРЭ в один: *а* – выделение группы ЭРЭ; *б* – обозначение выделенной группы; *в* – результат объединения





б



б

Рис. 3.34. Окончание

Процесс объединения нескольких элементов в один (т. е. замена нескольких элементов одним) начинается с выделения элемента в группе. Так, например, на [рис. 3.34, а](#) выделены элементы DD51, DD52, DD53, DD54, VT50, VT58. После выде-

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 221 |
|---|---|--|---|------------|

ления элементов нажимается правая кнопка манипулятора «мышь» и активизируется функция <Объединить>. В результате выполнения такой функции выводится таблица, в которую записывается условное обозначение создаваемого элемента из группы ЭРЭ (см. [рис. 3.34, б](#)). После выполнения команды <ОК> на эскизе КУ прорисовывается созданный элемент (см. [рис. 3.34, в](#)). При этом ранее выделенные элементы в группе удаляются из списка ЭРЭ, а вместо них в список ЭРЭ заносится вновь созданный элемент, который характеризуется интегральными ГТФП, вычисленными на основе ГТФП выделенных ранее элементов. **Данная операция удобна при описании маломощных схем управления.**

3.8.5. Применение базы данных «Радиоэлементы»

Программа *BoardEditor* функционирует совместно с базой данных «Радиоэлементы», содержащей информацию о геометрических, теплофизических и ряде других параметров различных типов ЭРЭ. На [рис. 3.35](#) приведен общий вид Базы данных «Радиоэлементы» после обращения к ней. На рисунке представлено также описание визуального интерфейса управляющей программы. Обращение к управляющей программе базы данных может осуществляться автоматически при описании ГТФП ЭРЭ или автономно через элемент визуального интерфейса программы *BoardEditor* (см. [рис. 3.16](#)).

Перед использованием БД «Радиоэлементы» необходимо прописать путь к текущей библиотеке, применив пункт меню «Настройка среды» (см. [рис. 3.20](#)).

При эксплуатации базы данных «Радиоэлементы» (см. [рис. 3.31](#)) пользователю предоставляются следующие возможности:

1. Делать выборку ЭРЭ по группам (см. [рис. 3.36](#)).
2. Осуществлять выборку параметров ЭРЭ по шаблону, представленному в виде фрагмента (части) типономинала ЭРЭ.
3. Отображать упрощенный эскиз варианта установки ЭРЭ на НК КУ (см. [рис. 3.36](#)).
4. Отображать детальный эскиза установки ЭРЭ на НК КУ (см. [рис. 3.30](#) и [3.36](#)).
5. Создавать и вносить в БД записи новых ЭРЭ (см. [рис. 3.30](#)).
6. Копировать записи, описывающие параметры ЭРЭ.
7. Переносить записи ЭРЭ из одной группы в другую (см. [рис. 3.37](#)).

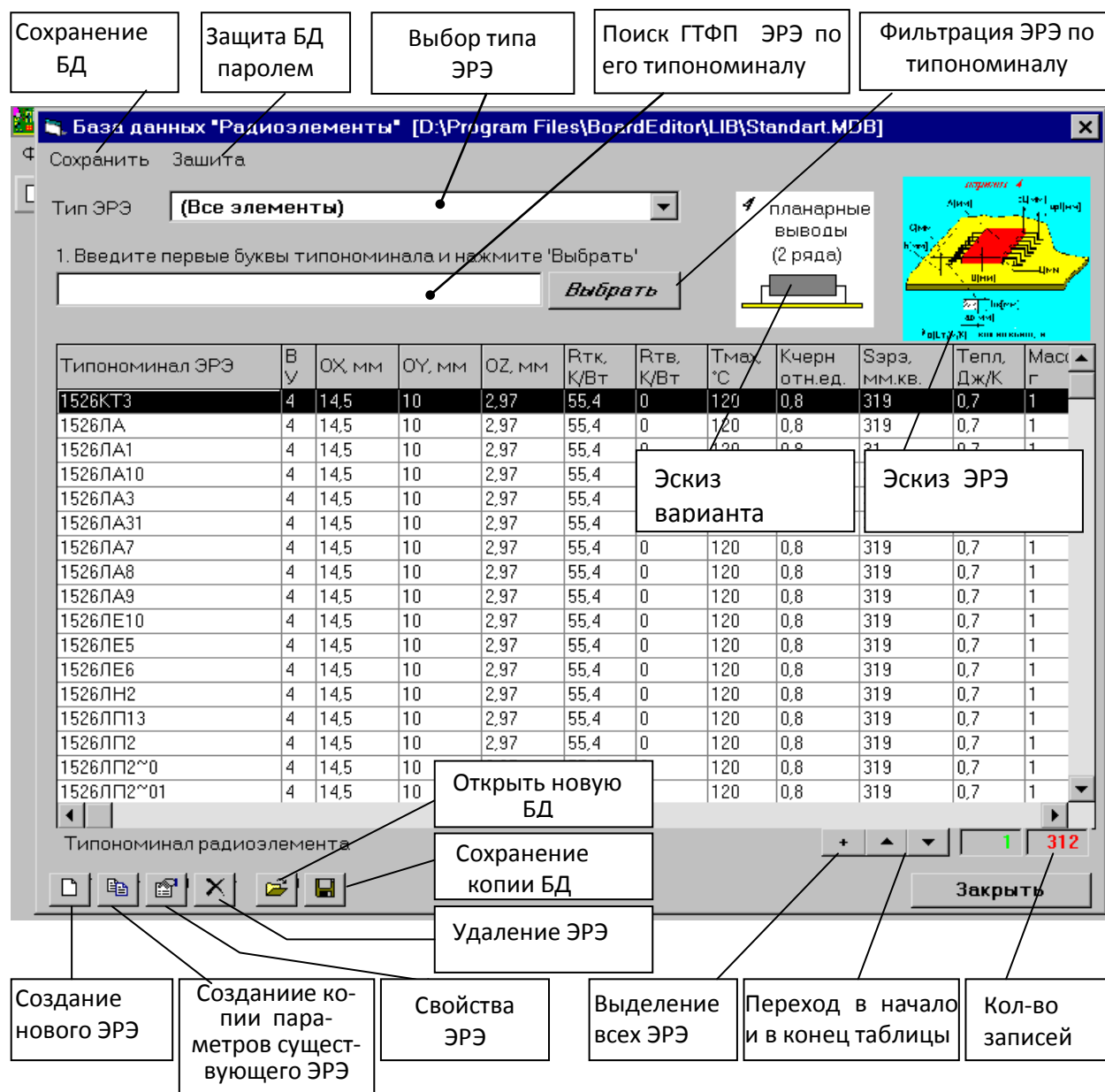


Рис. 3.35. Основные элементы визуального интерфейса БД

8. Производить сортировку ЭРЭ по выбранному столбцу параметров.
9. Изменять параметры ЭРЭ.
10. Выделять несколько или все ЭРЭ для последующих операций над ними (см. [рис. 3.38](#)).
11. Удалять выделенные ранее ЭРЭ.
12. Устанавливать защиту БД от нежелательных изменений посредством введения пароля (см. [рис. 3.39](#)).
13. Открывать библиотеки для их модификации.

14. Сохранять стандартную библиотеку (**Standart.mdb**) с новым именем (см. [рис. 3.40](#)).

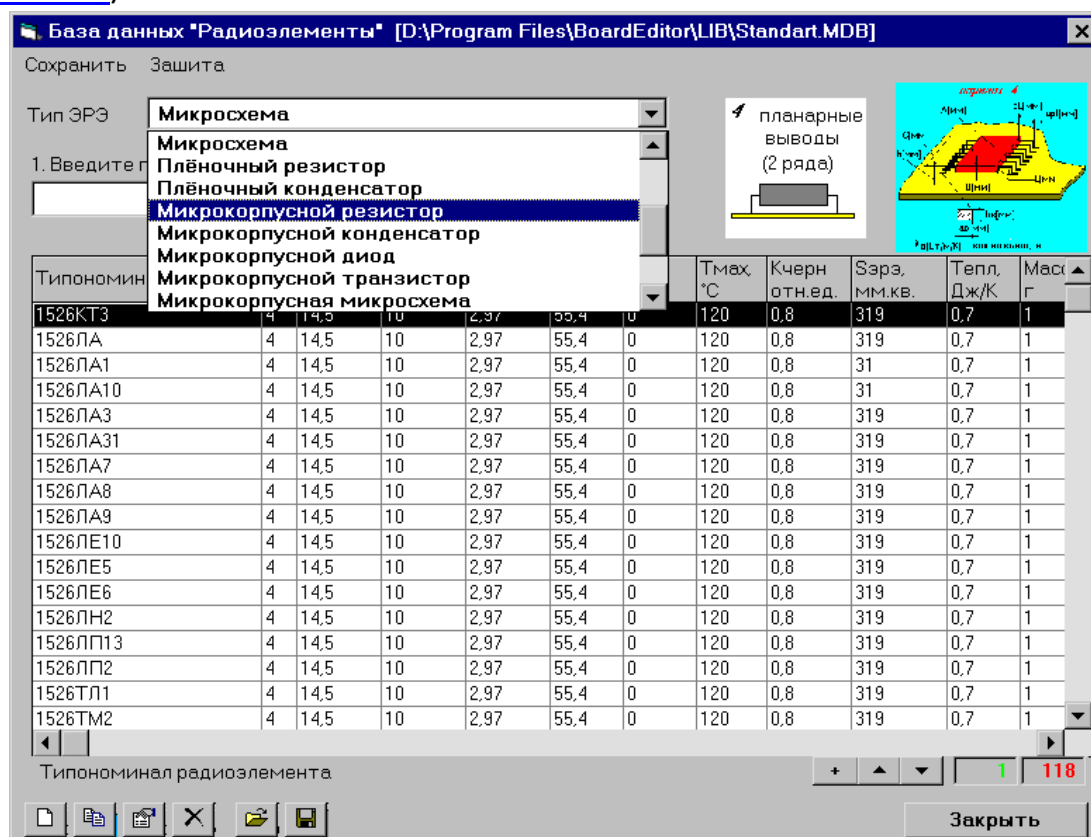


Рис. 3.36. Выбор группы радиоэлементов

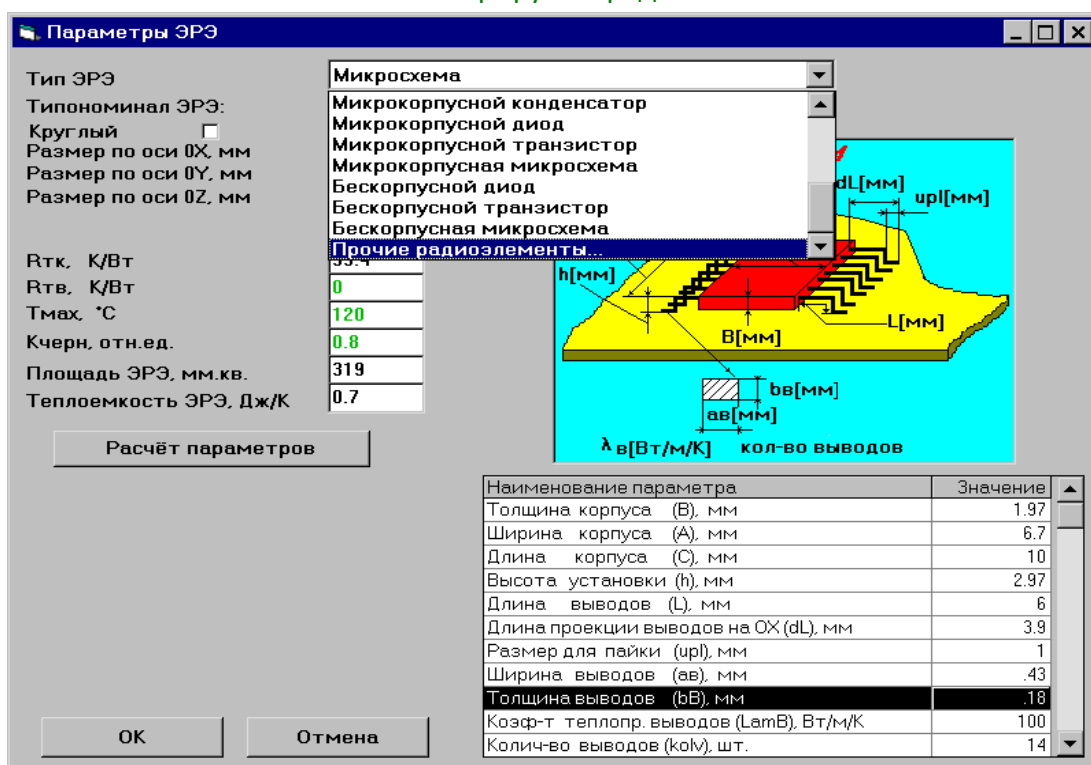


Рис. 3.37. Перенос ЭРЭ из группы «Микросхема» в группу «Прочие радиоэлементы»

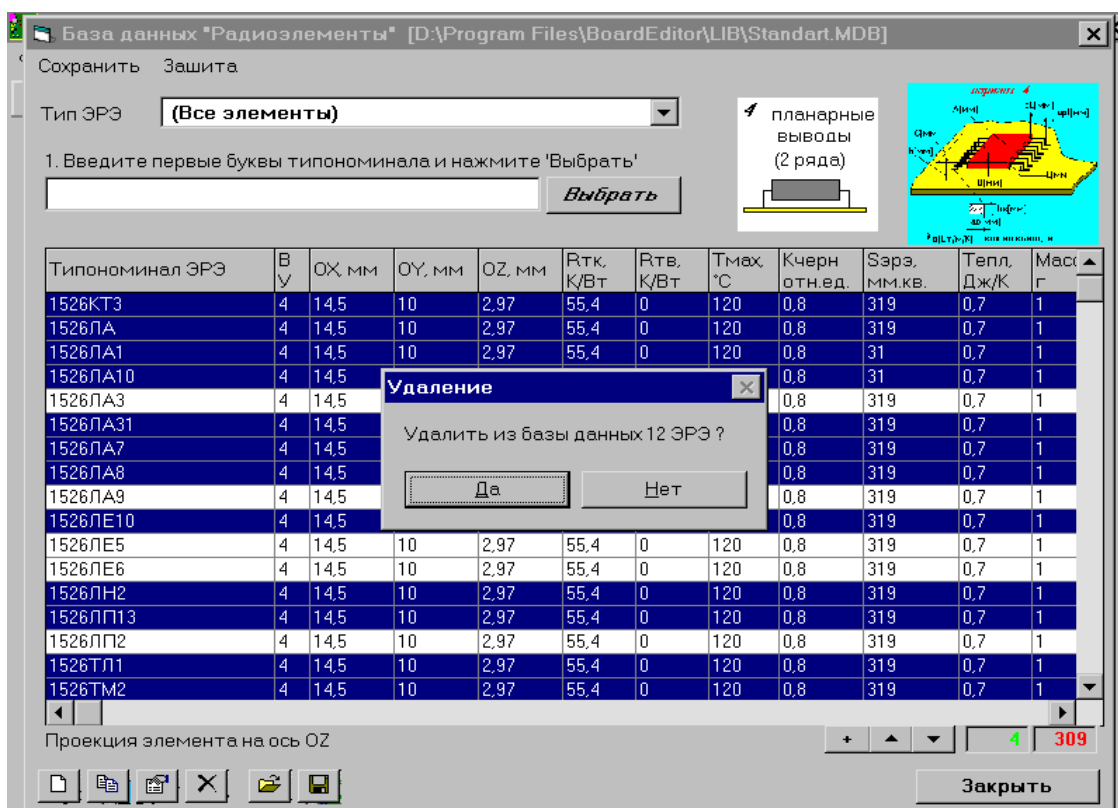


Рис. 3.38. Удаление выделенных ЭРЭ из библиотеки

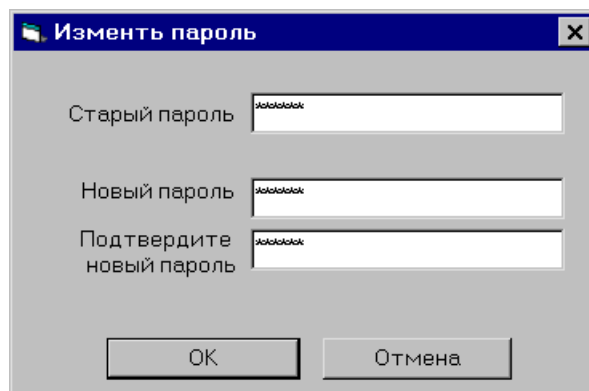


Рис. 3.39. Защита библиотеки паролем

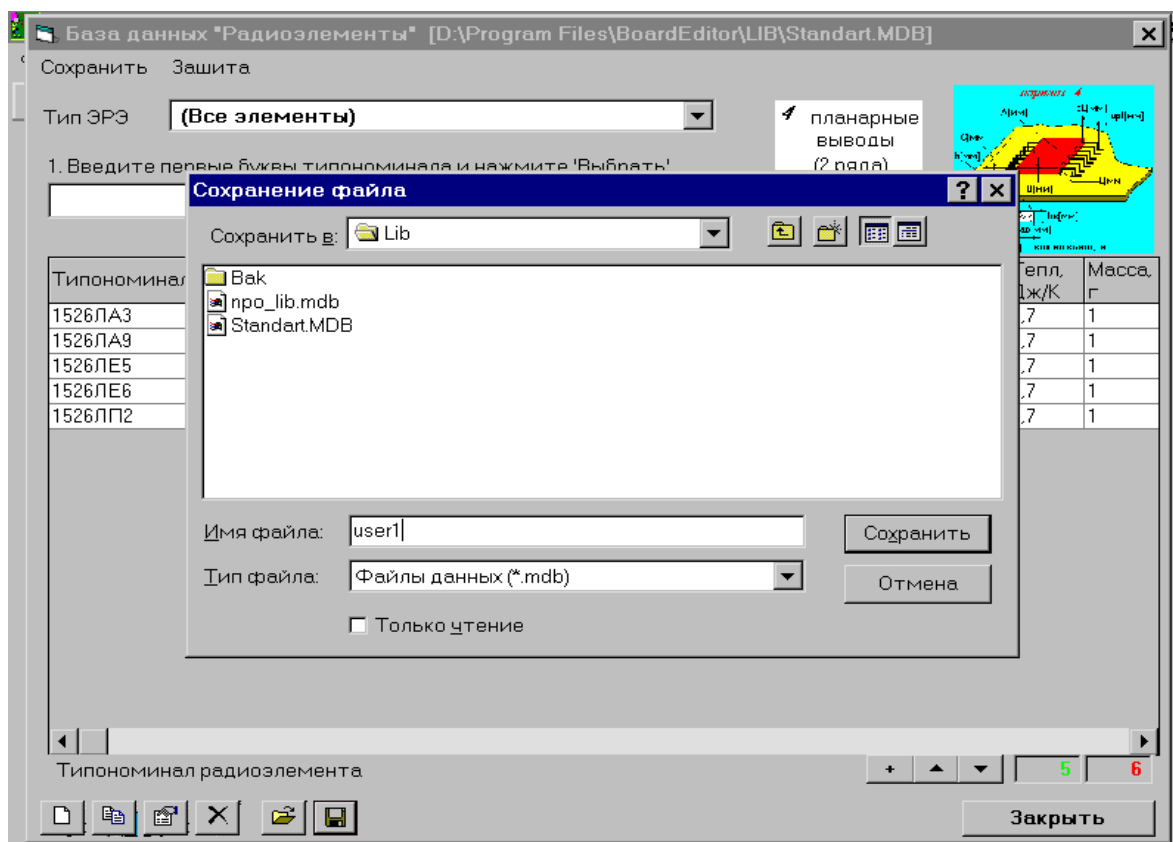


Рис. 3.40. Создание библиотеки пользователя «User1.mdb»

15. Формировать библиотеку пользователя. Эту возможность целесообразно осуществлять в следующей последовательности:

15.1. Сохранить стандартную библиотеку *Standart.mdb* с новым именем (см. [рис. 3.36](#)).

15.2. Удалить записи для выбранных ЭРЭ (см. [рис. 3.38](#)), которые не потребуются во вновь формируемой библиотеке (можно все).

15.3. Создать записи новых ЭРЭ (см. [рис. 3.30](#)).

15.4. Выполнить копирование ЭРЭ (в случае необходимости).

15.5. Изменить параметры ЭРЭ (в случае необходимости).

15.6. Выполнить перенос ЭРЭ (см. [рис. 3.37](#)) из одной группы в другую (в случае необходимости).

3.8.6. Описание дополнительных параметров

Используя пункты функционального меню или элементы визуального интерфейса ([рис. 3.16](#)), пользователь выбирает вариант ориентации КУ в пространстве ([рис. 3.41](#)), задает шаги дискретизационной сетки ([рис. 3.42](#)), а также описывает значения шагов dx , dy (см. [параграф 3.4, п. 2](#)). В пункте меню

«Вид» пользователь вводит шаг координатной сетки (шаг передвижения элементов на геометрической модели), выводит линейку, отражающую размеры КУ, устанавливает текущие слои по аналогии с системой ACCEL (см. [рис. 3.43](#)).

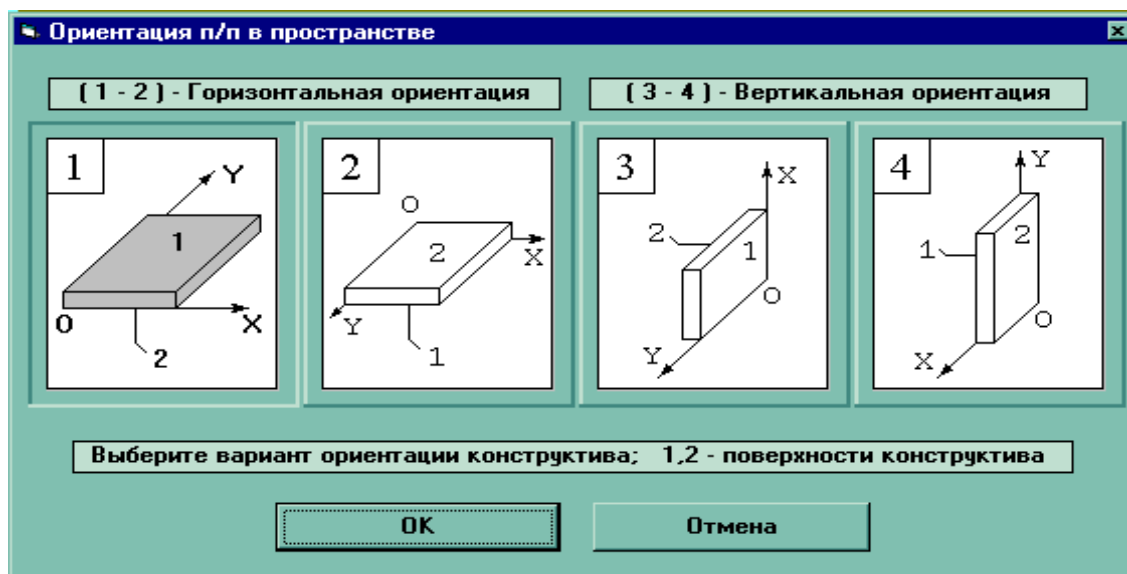


Рис. 3.41. Определение ориентации КУ в пространстве



Рис. 3.42. Задание сетки, дискретизирующей температурное поле КУ, при выводе результатов моделирования

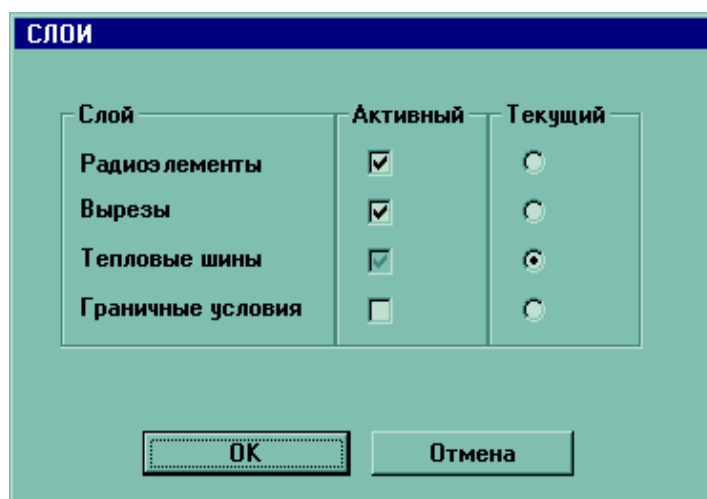
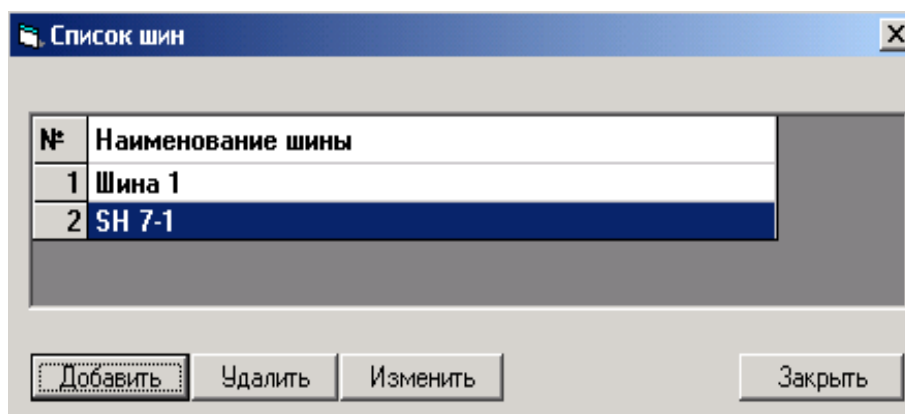


Рис. 3.43. Определение текущего и активного слоев

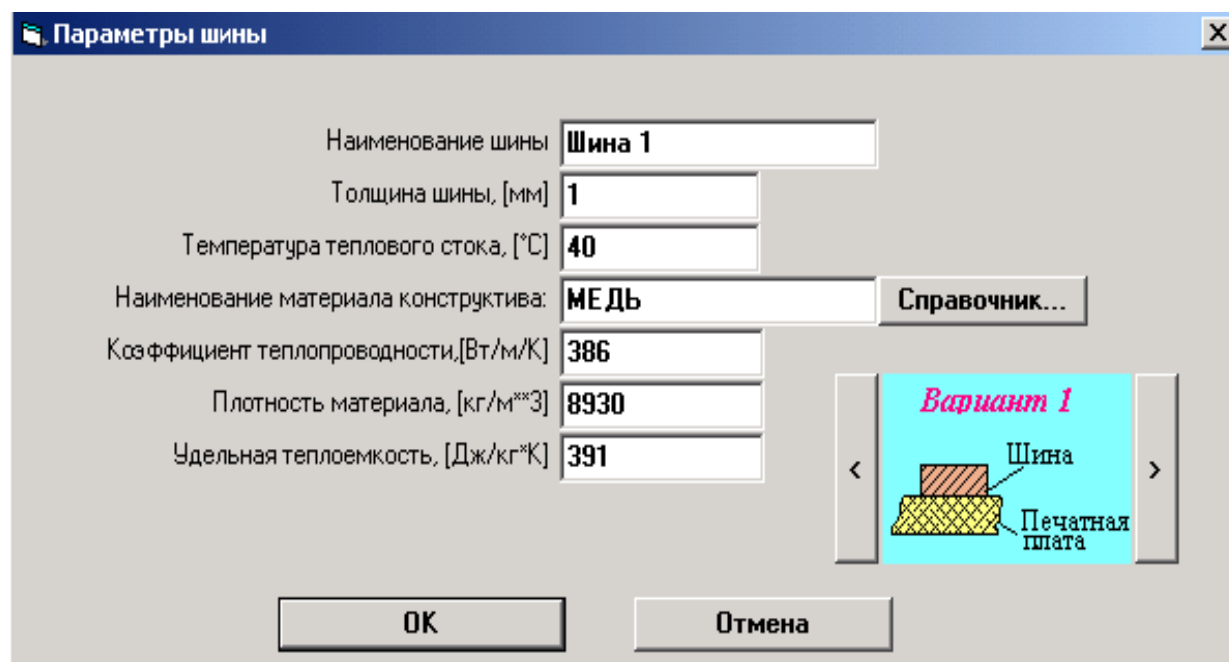
3.8.7. Формирование шин и вырезов

Для формирования тепловых шин в графическом режиме пользователю вначале необходимо активизировать функцию <Слой> и установить в качестве текущего слоя слой «Тепловые шины» ([рис. 3.40](#)). На следующем шаге используется функция <Список шин> ([рис. 3.44, а](#)), в рамках которой выполняется команда <Добавить>. В результате выполнения данной команды появляется экранная форма «Параметры шины», в которой необходимо выбрать посредством кнопки прокрутки один из вариантов установки шины ([рис. 3.44, б–д](#)). После заполнения выбранной экранной формы появляется таблица, предупреждающая о необходимости размещения шины на поле НК КУ ([рис. 3.44, е](#)). На следующем этапе в графическом режиме формируется и размещается шина ([рис. 3.44, ж](#)). В дальнейшем, установив в качестве текущего слоя слой «Электрорадиоэлементы», пользователь может размещать ЭРЭ на шинах.

Для формирования контура из шин пользователь должен выделить все шины, входящие в контур (по аналогии с ЭРЭ). При этом могут быть добавлены дополнительные шины, формирующие контур ([рис. 3.45, а](#)). После выделения шин нажатием правой кнопки манипулятора «мышь» приводит к появлению таблицы со списком функций. Из этого списка необходимо выбрать функцию <Объединить>, после чего появится таблица, в которую заносится имя контура ([рис. 3.45, б](#)). На завершающем этапе осуществляется графическое слияние элементов контура ([рис. 3.45, в](#)). Теплофизические параметры шин, входящих в контур, необходимо описывать с учетом рекомендаций, изложенных в данном параграфе.



а



б

Рис. 3.44. Формирование тепловых шин: *а* – операция добавления обозначения шины в список шин; *б–д* – экранные формы для описания ГТП шин, установленных в соответствии с вариантами №№ 1–4; *е*– сообщение о необходимости размещения шины; *ж* – результат размещения шины

Параметры шины

Наименование шины:

Толщина шины, [мм]:

Температура теплового стока, [°C]:

Наименование материала конструктива:

Коэффициент теплопроводности, [Вт/м·К]:

Плотность материала, [кг/м³]:

Удельная теплоемкость, [Дж/кг·K]:

Толщина клеевого слоя, мм:

Кэф-т теплопроводности клея, [Вт/м·К]:

Вариант 2

в

Параметры шины

Наименование шины:

Толщина шины, [мм]:

Температура теплового стока, [°C]:

Наименование материала конструктива:

Коэффициент теплопроводности, [Вт/м·К]:

Плотность материала, [кг/м³]:

Удельная теплоемкость, [Дж/кг·K]:

Толщина клеевого слоя, мм:

Кэф-т теплопроводности клея, [Вт/м·К]:

Вариант 3

г

Параметры шины

Наименование шины:

Толщина шины, [мм]:

Температура теплового стока, [°C]:

Наименование материала конструктива:

Коэффициент теплопроводности, [Вт/м·К]:

Плотность материала, [кг/м³]:

Удельная теплоемкость, [Дж/кг·K]:

Толщина клеевого слоя, мм:

Кэф-т теплопроводности клея, [Вт/м·К]:

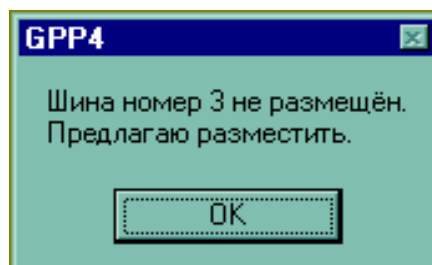
Толщина изоляционной прокладки, мм:

К-т теплопроводн. изол. прокладки, [Вт/м·К]:

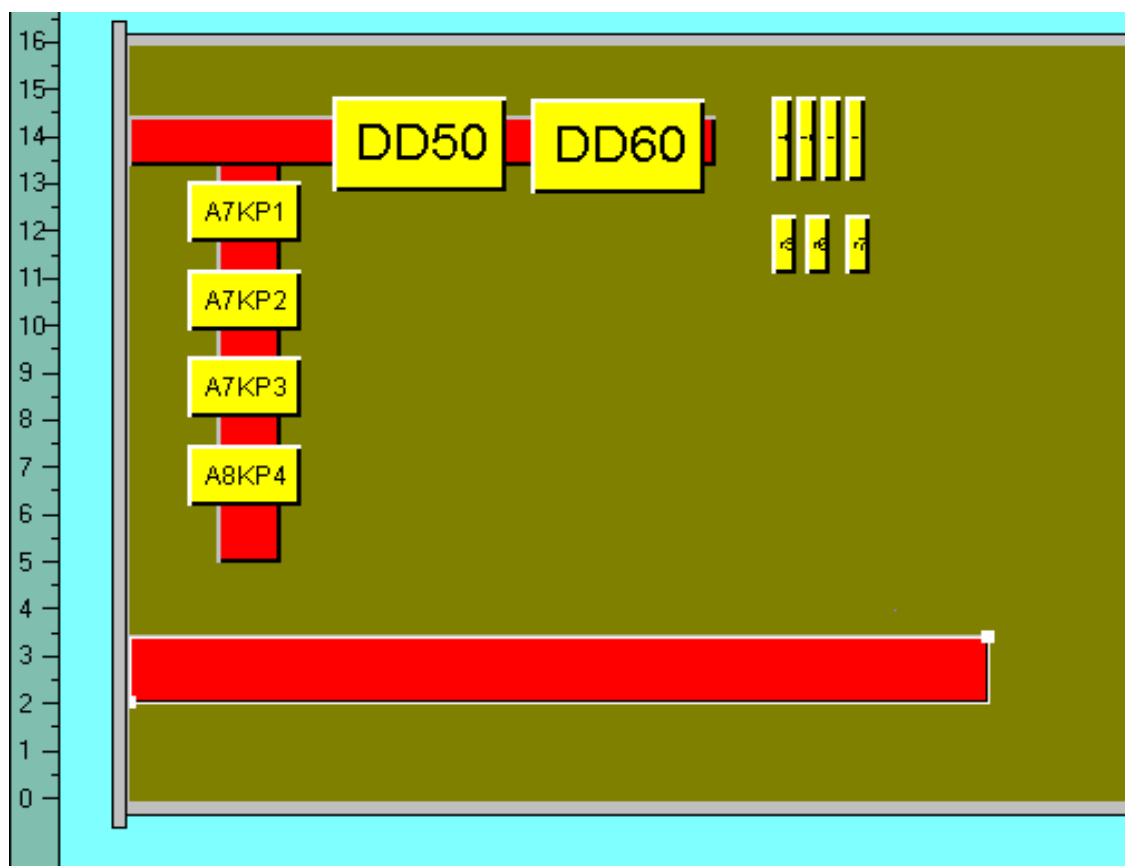
Вариант 4

д

Рис. 3.44. Продолжение

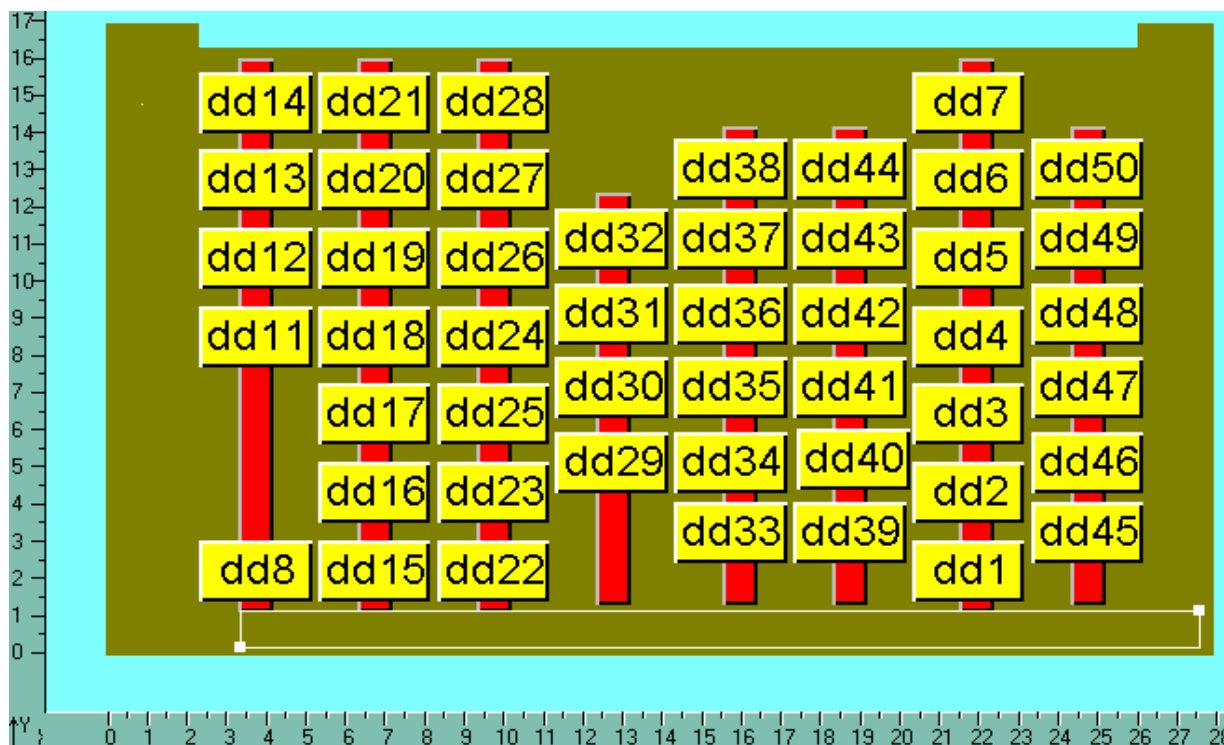


e



ж

Рис. 3.44. Окончание



а

GPP4

Введите название контура шины

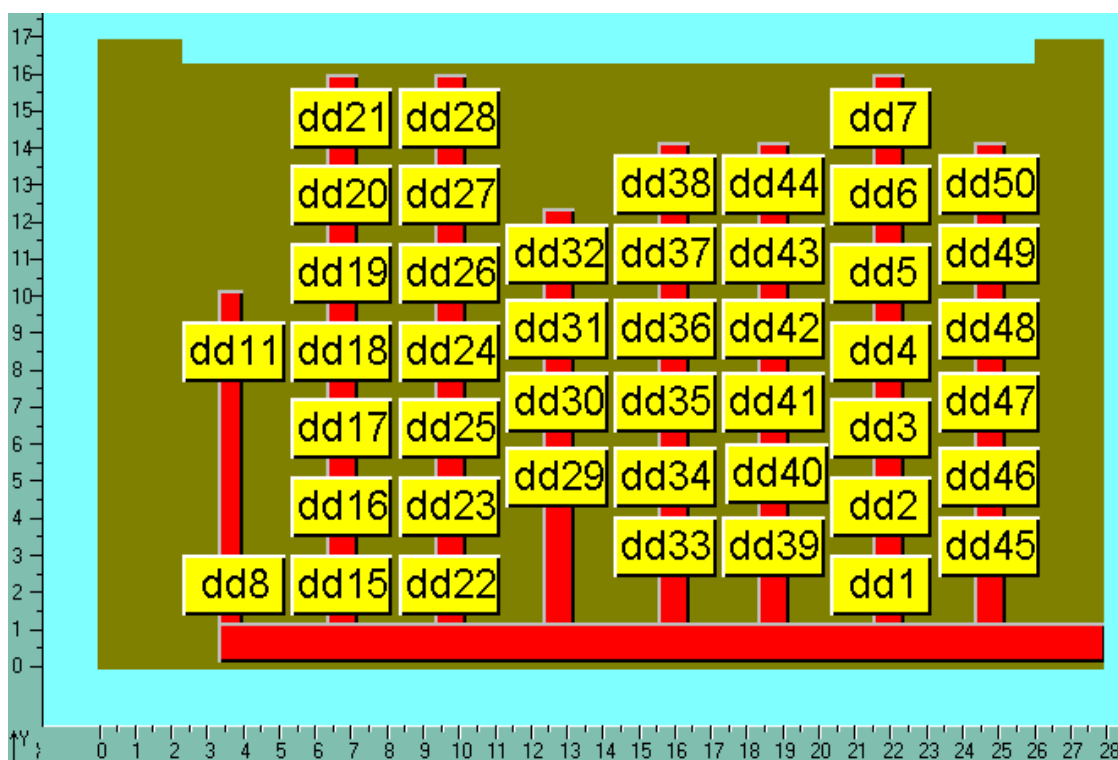
OK

Cancel

контур 1

б

Рис. 3.45. Формирование контура из шины: а– добавление объединяющей шины;
б– таблица для ввода обозначения контура;
в – сформированный контур

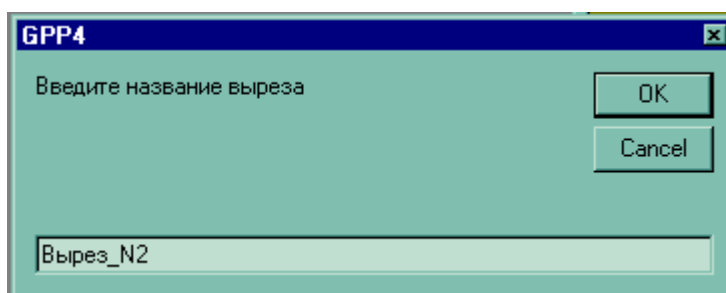


в

Рис. 3.45. Окончание

Создание выреза в графическом режиме выполняется по аналогии с операцией формирования тепловых шин, начиная от заполнения таблицы «Список вырез» ([рис. 3.46, а](#)) и заканчивая графическим формированием выреза ([рис. 3.46, б-в](#)).

На [рис. 3.47](#) приведены примеры геометрических моделей конструктивных узлов, создаваемых средствами функций, описывающих тепловые шины, вырезы и ЭРЭ.



а

Рис. 3.46. Формирование выреза: а – таблица для ввода обозначения выреза; б – формирование контура выреза; в – сформированный вырез в ПУ

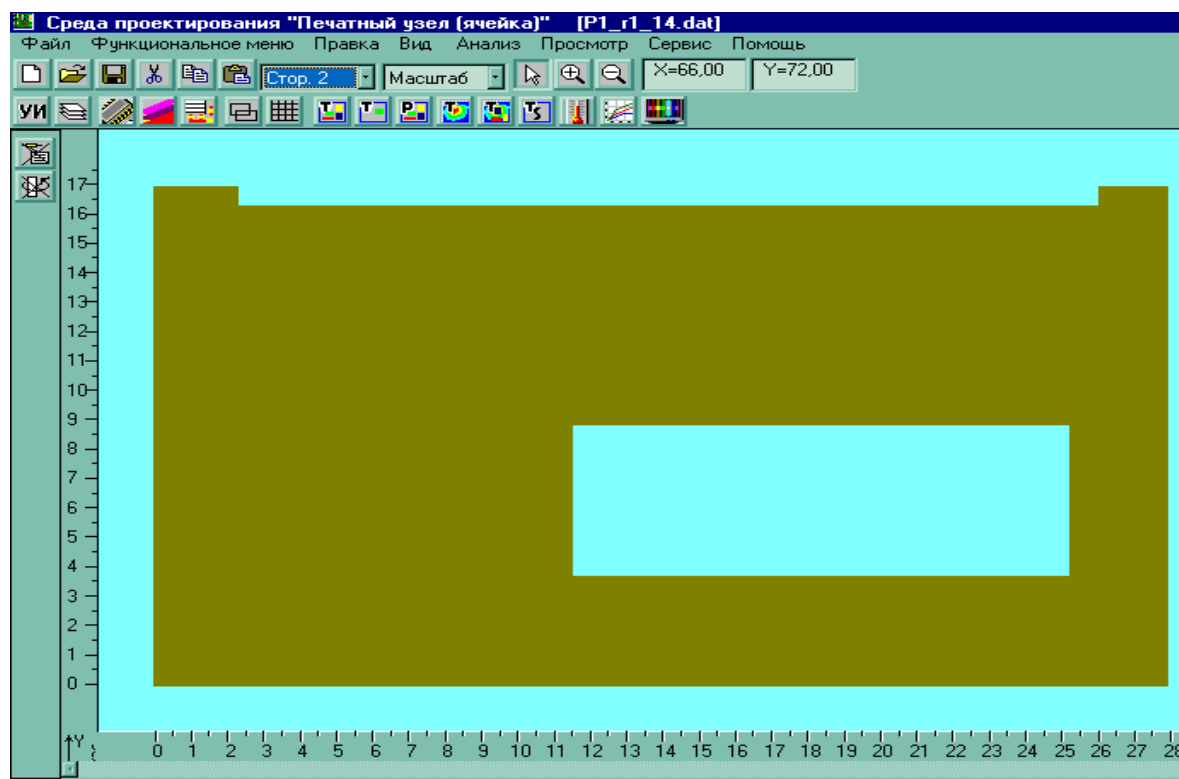
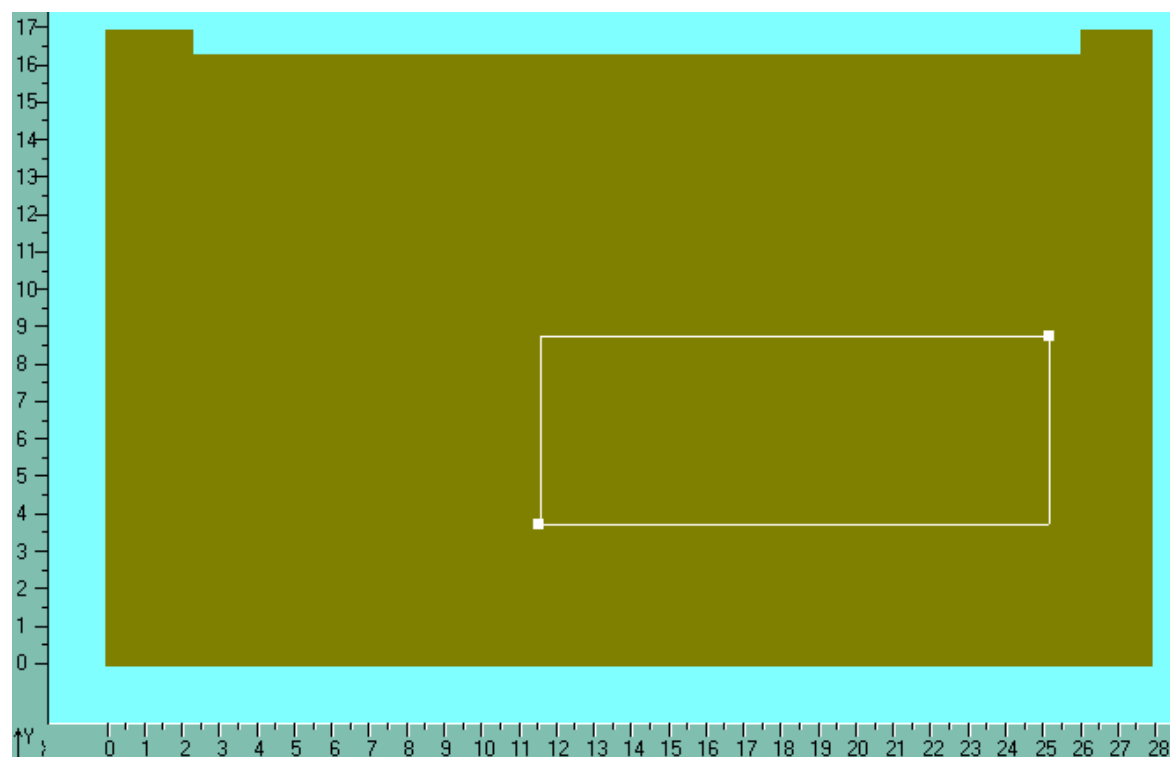
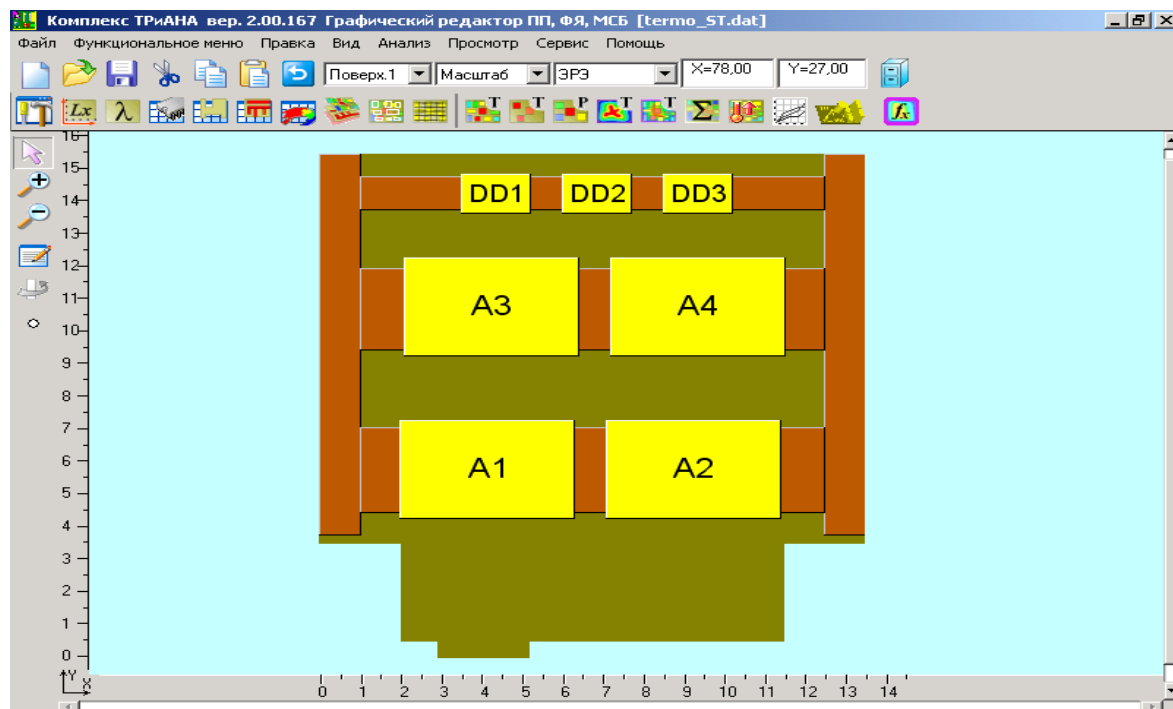
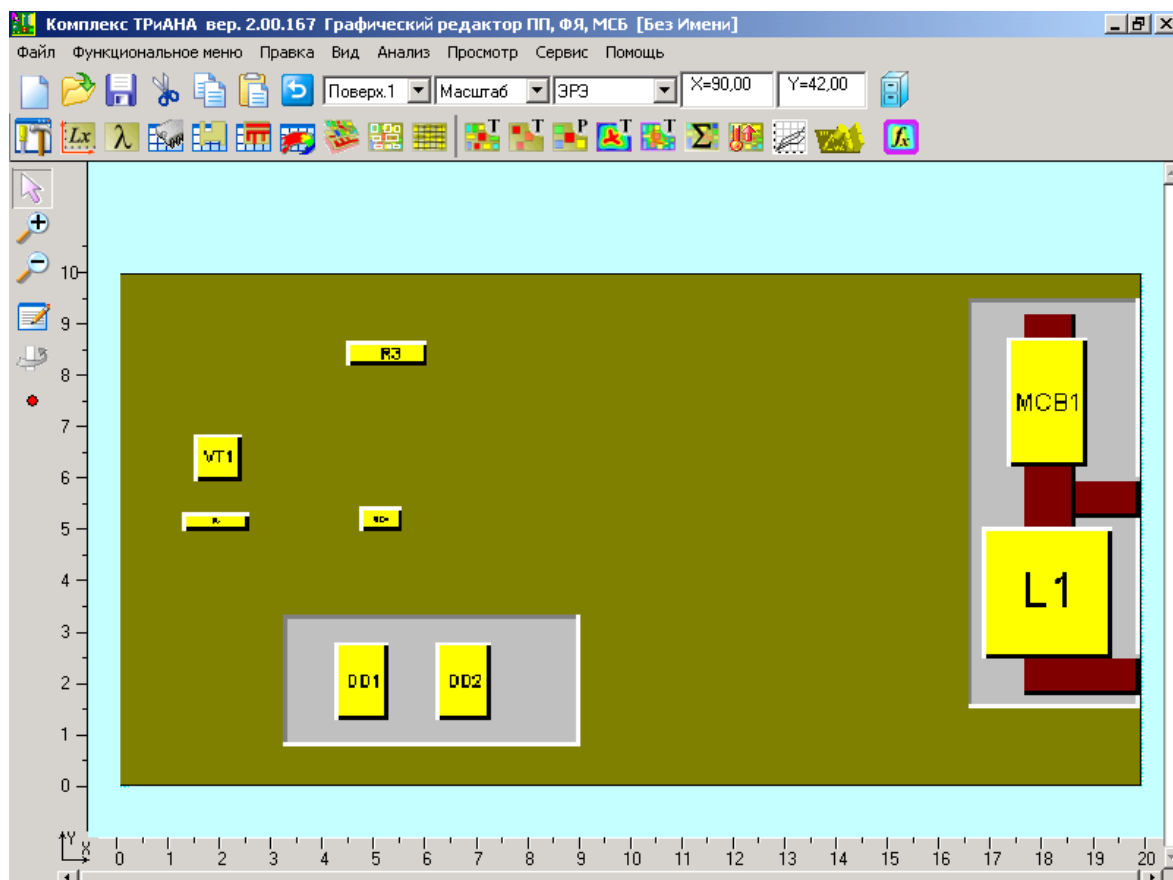


Рис. 3.46. Окончание





a



б

Рис. 3.47. Возможные формы ПУ и ФЯ, полученные в результате геометрического моделирования: *a* – ПУ с вырезами и системой шин; *б* – ФЯ, имеющая вырезы и контур из шин в слоистой структуре

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 235 |
|---|--|---|------------|

3.8.8. Граничные и начальные условия

Описание граничных условий (см. [параграф 3.7.5](#)) в графическом режиме может осуществляться при помощи двух функций — *<Глобальные граничные условия>* и *<Список граничных условий>*.

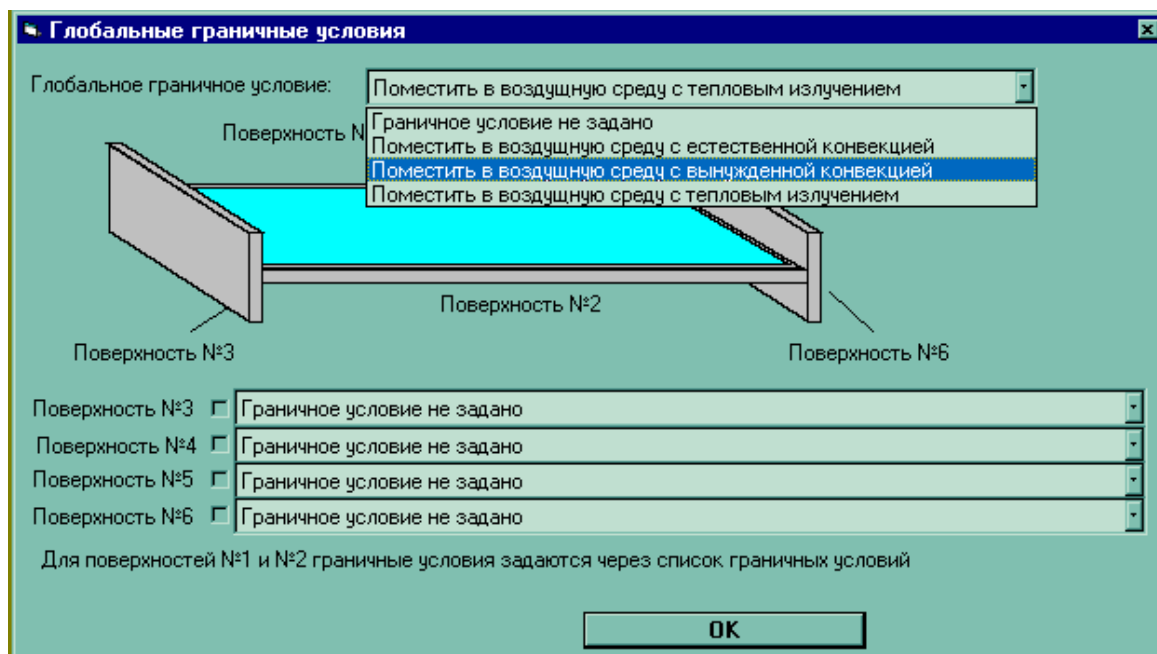
Функция *<Глобальные граничные условия>* применяется для КУ типа ФЯ и позволяет сразу задать один тип условия охлаждения (см. [табл. 3.2](#)) для всех поверхностей КУ (см. [рис. 3.48, а](#)). После определения типа УОХ на мониторе появляется таблица с параметрами выбранного УОХ ([рис. 3.48, б](#)), которую необходимо заполнить в соответствии с [табл. 3.2](#). В результате выполнения указанных выше действий на мониторе будет высвечена экранная форма, на которой будет изменен цвет поверхностей НК ФЯ, а также в списке номеров поверхностей (приводится ниже эскиз КУ) напротив каждого номера поверхности (от 3-го до 6-го) будет указан тип выбранного УОХ. Пользователь может изменить тип граничного условия для указанных поверхностей, воспользовавшись кнопкой [V], располагающейся справа от окна типа УОХ для каждой поверхности. На [рис. 3.48, в](#) указанное действие выполнено для поверхности № 6. В дальнейшем для поверхностей № 1 и № 2 может быть задано несколько типов УОХ посредством применения функции *<Список граничных условий>*. Приведенное на [рис. 3.48, в](#) изображение эскиза ФЯ может быть повернуто в другую сторону при помощи манипулятора «мышь». В этом случае необходимо установить указатель манипулятора справа или слева от изображения и щелкнуть левой кнопкой манипулятора.

Применение функции *<Список граничных условий>* позволяет для поверхностей №№ 1 и 2 всех типов КУ (ПУ, ФЯ, МСБ) задавать несколько зон локализации с различными типами УОХ (см. [параграф 3.7.5](#)). Активизация функции *<Список граничных условий>* приводит к появлению на экране таблицы (см. [рис. 3.49, а](#)), в которую при помощи команды *<Добавить>* вносится новая зона локализации граничного условия с типом УОХ, определяемым по таблице, приведенной на [рис. 3.49, б](#) (появляется после команды *<Добавить>*). После выбора типа УОХ на экране появляется таблица с параметрами граничного условия ([рис. 3.49, в](#)), которую необходимо заполнить. После заполнения таблицы на экране появляется сообщение ([рис. 3.49, г](#)) о необходимости формирования и размещения зоны локализации выбранного типа УОХ на поверхности КУ (поверхность может изменяться командой основного меню ИС). На последующих шагах осуществляется формирование зоны УОХ ([рис. 3.49, д](#)) и ее размещение ([рис. 3.49, е](#)) на выбранной поверхности КУ.

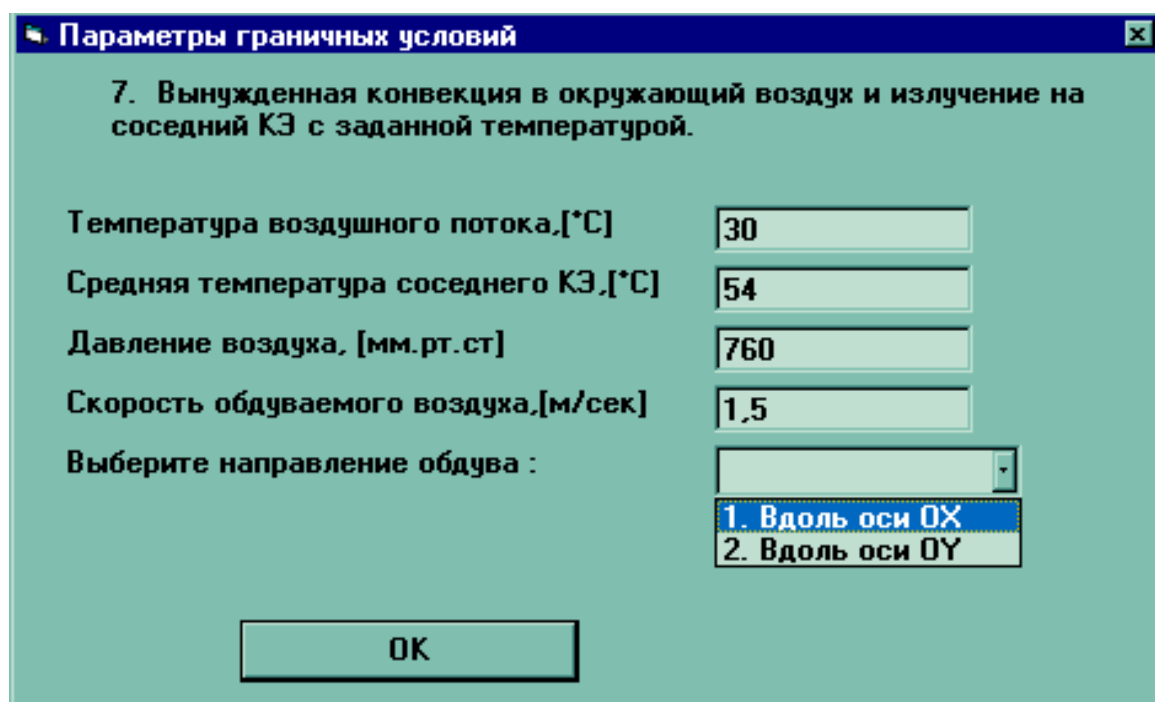
На одной поверхности КУ может быть выделено несколько зон одного и того же граничного условия. Такая ситуация возникает, например, при моделировании нагрева воздушного потока в канале, в котором устанавливается ПУ (см. [рис. 3.50](#)).

При размещении на НК ЭРЭ и зон граничных условий удобно использовать функцию *<Наложение>* (см. [рис. 3.51](#)).

В случае моделирования нестационарного теплового режима пользователь должен заполнить таблицу с начальными параметрами (см. [параграф 3.7.6](#)) и параметрами интегрирования. Для этого необходимо войти в функциональное меню и активизировать функцию *<Начальные условия>*.



a



б

Рис. 3.48. Задание глобальных граничных условий: *a* – общая графическая форма; *б* – таблица с параметрами; *в* – переход к отдельным поверхностям

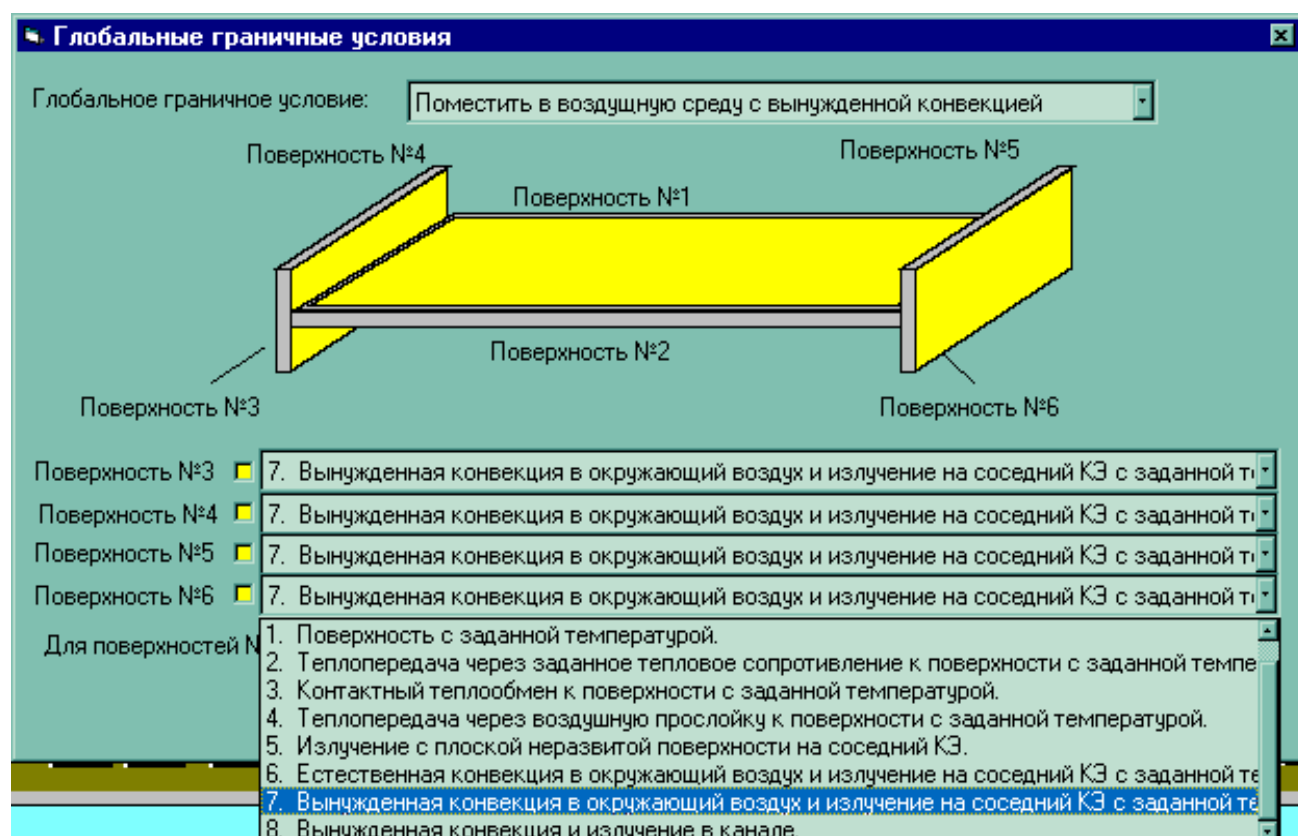


Рис. 3.48. Окончание

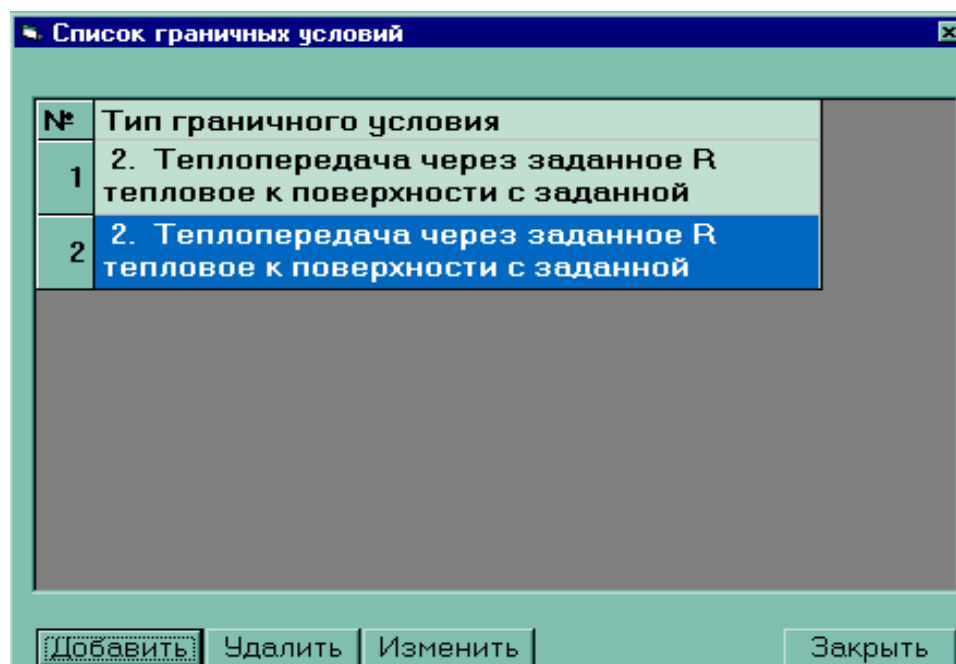
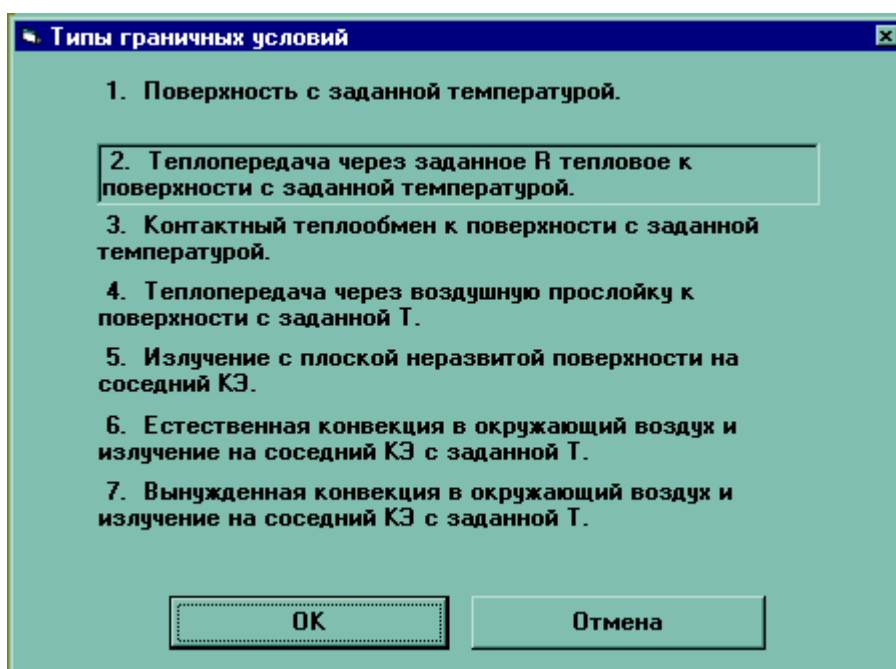
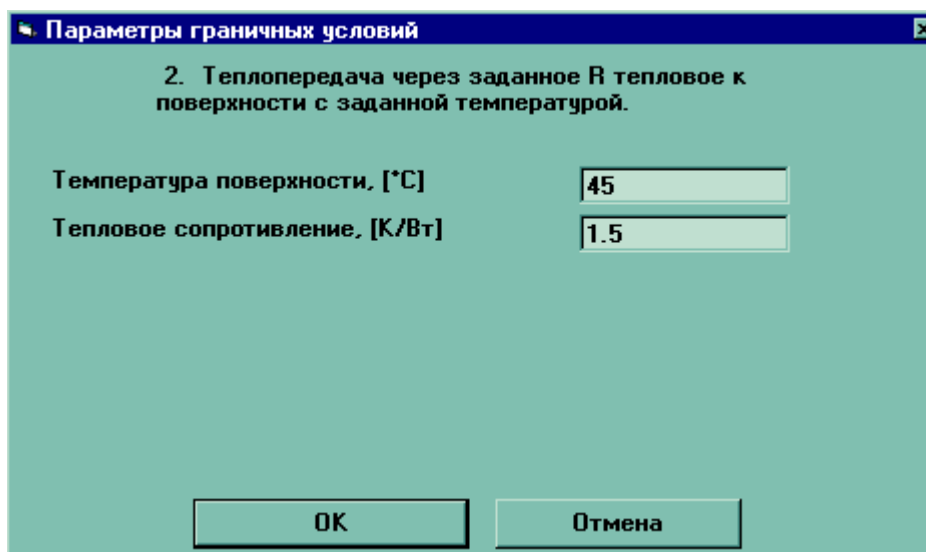


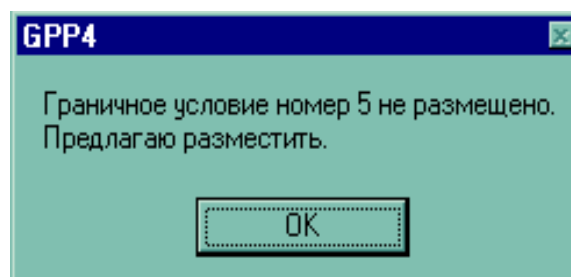
Рис. 3.49. Задание локальных граничных условий: а – добавление граничного условия; б – выбор типа граничного условия из общего списка; в – описание параметров; г – сообщение о процессе размещения; д – формирование зоны; е – результат размещения



6

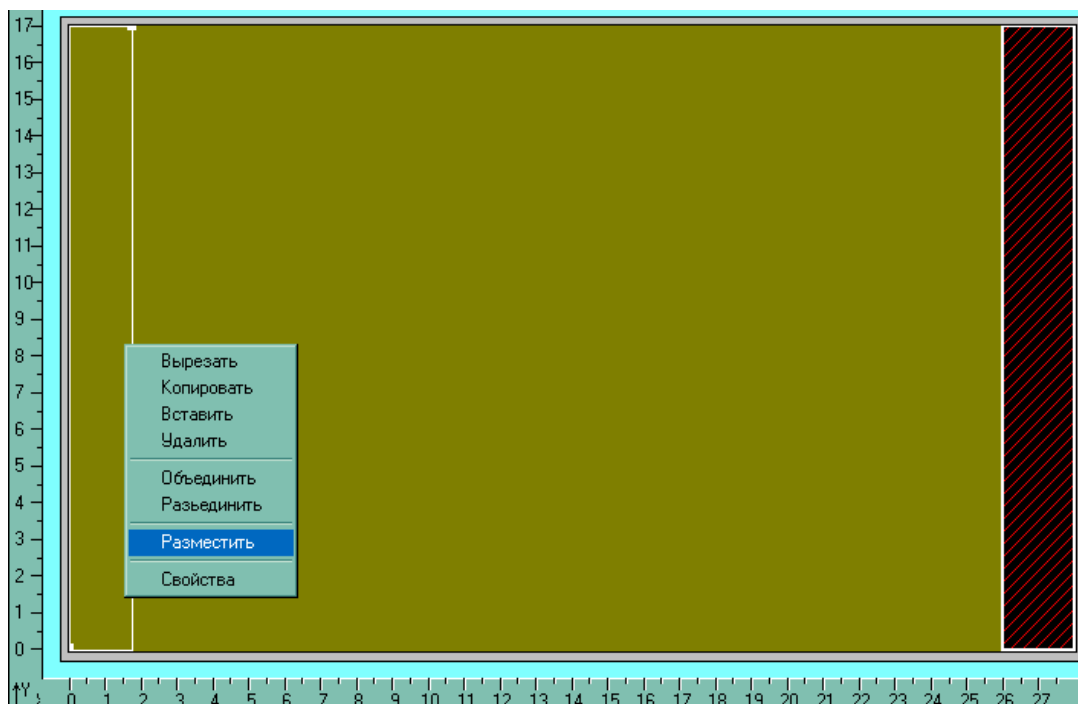


6

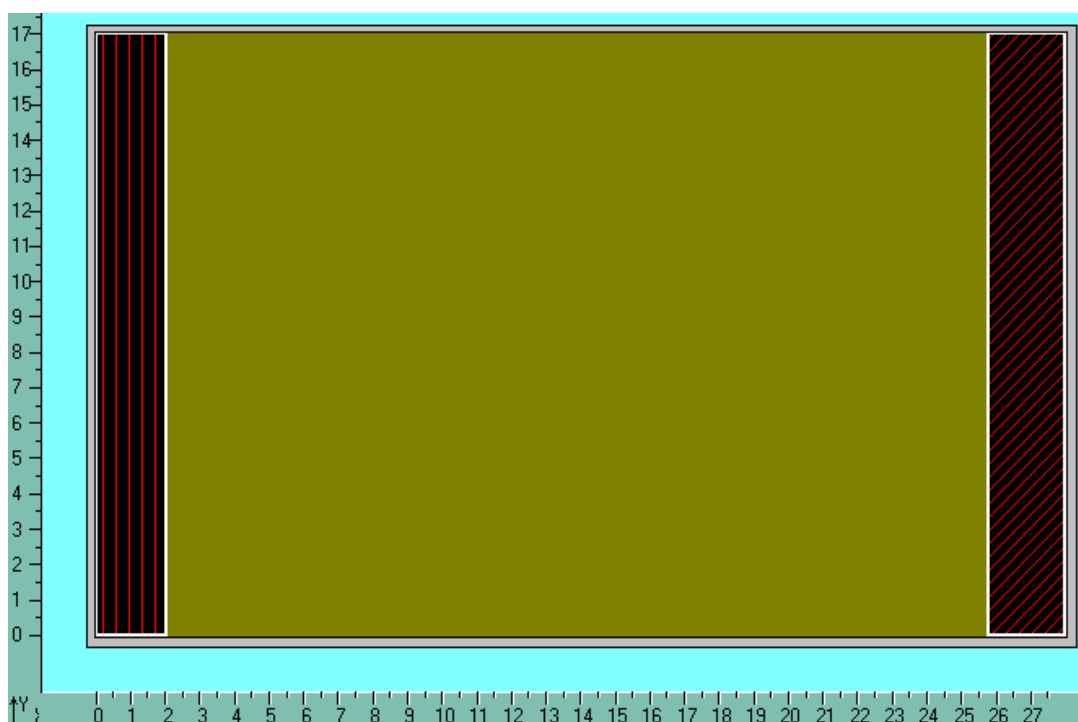


2

Рис. 3.49. Продолжение



д



е

Рис. 3.49. Окончание

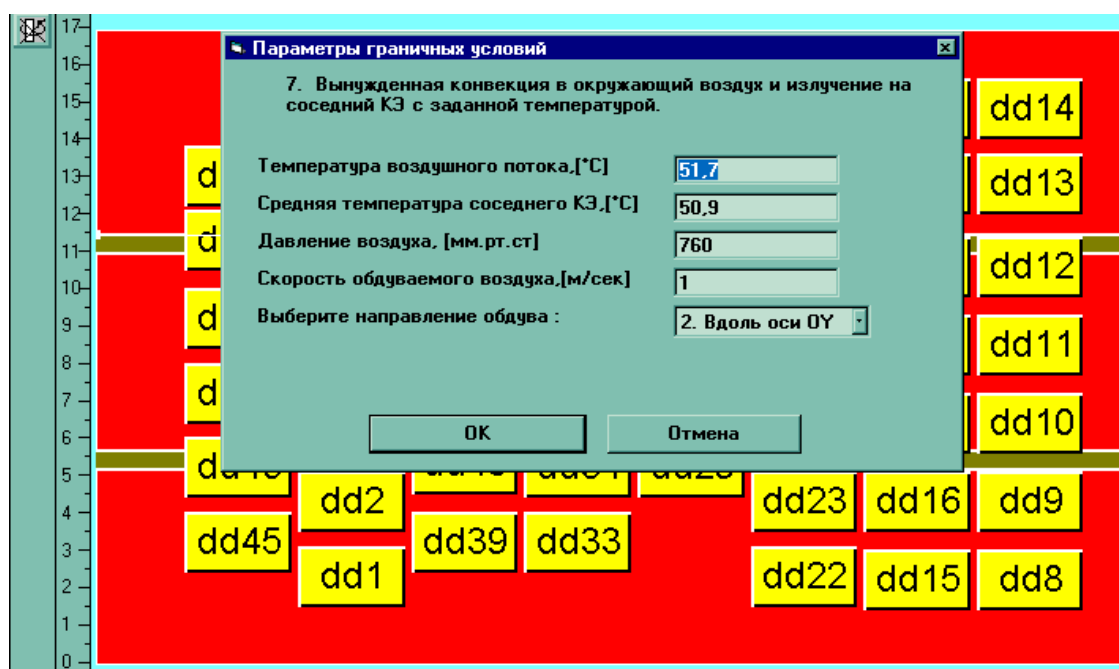


Рис. 3.50. Пример описания локальных граничных условий (3 зоны) на поверхности КУ, обдуваемого воздушным потоком

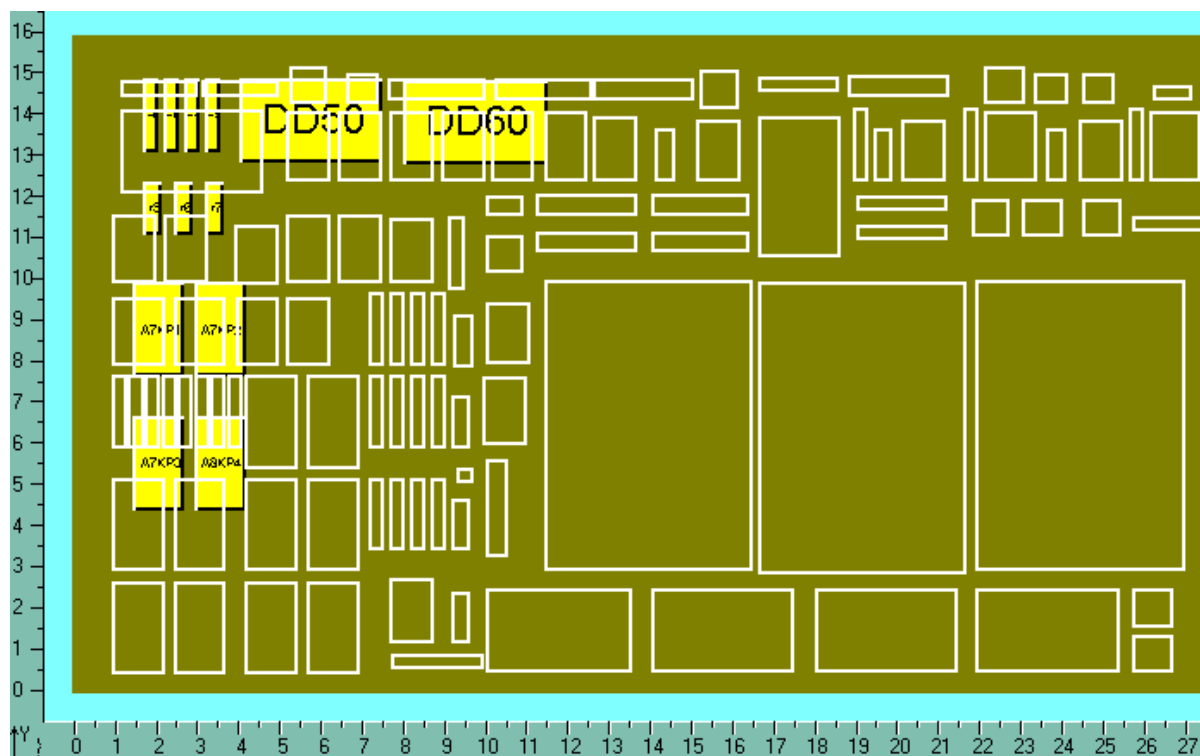


Рис. 3.51. Результат выполнения функции «Наложение сторон»

3.8.9. Отображение результатов моделирования в графическом режиме

После подготовки данных пользователь может выйти из ИС и провести моделирование согласно схеме, приведенной на [рис. 3.1](#). **Наиболее лучшим вариантом является активизация процесса моделирования в рамках *BoardEditor***. Для этого необходимо использовать соответствующий пункт основного меню или элемент визуального интерфейса (см. [рис. 3.16](#), [3.52](#)). После активизации процесса моделирования на экран будет выдано сообщение о ходе процесса моделирования.

После окончания процесса моделирования пользователь может просмотреть файл-отчет средствами функции *<Редактор>* (находится в пункте основного меню «Сервис») и/или воспользоваться графическим режимом отображения результатов моделирования (см. [рис. 3.52](#)).

Для просмотра результатов моделирования пользователь может войти в пункт «Просмотр» основного меню или воспользоваться элементами визуального интерфейса (см. [рис. 3.16](#)). Примеры отображения результатов моделирования средствами встроенного в *BoardEditor* графического постпроцессора приведены на [рис. 3.53–3.61](#).

В процессе отображения результатов моделирования пользователь может сменить цветовую палитру посредством активизации функции *<Загрузить цветовую палитру>*, которая находится в пункте «Сервис» основного меню *BoardEditor*.

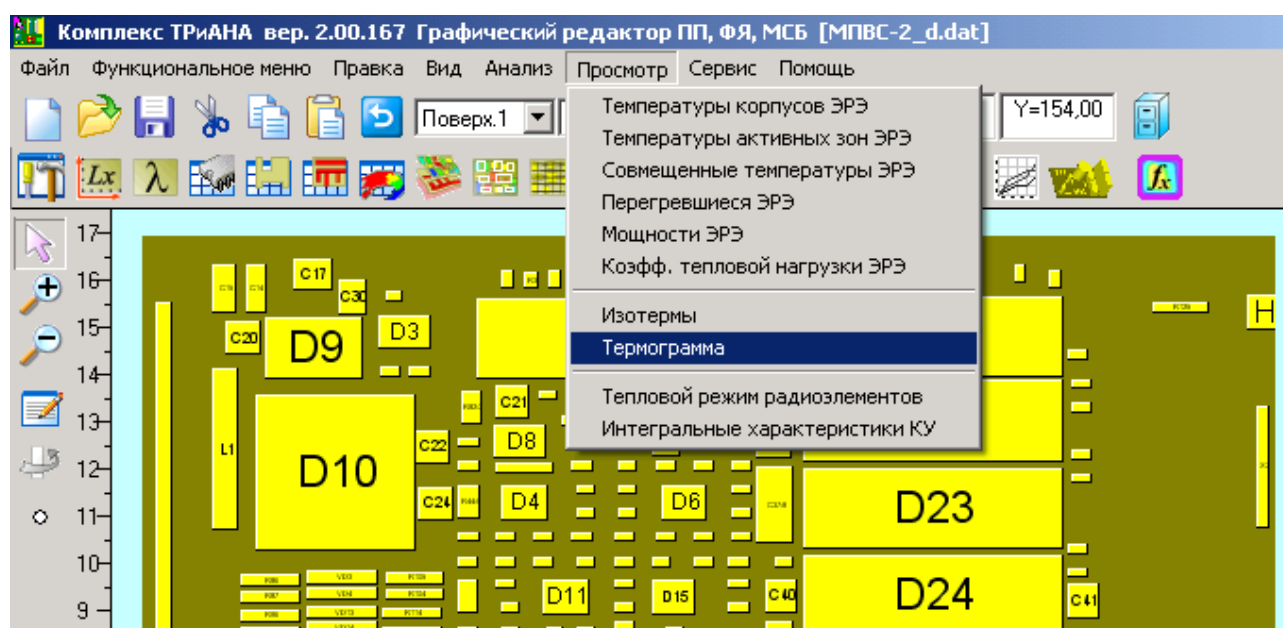


Рис. 3.52. Просмотр результатов

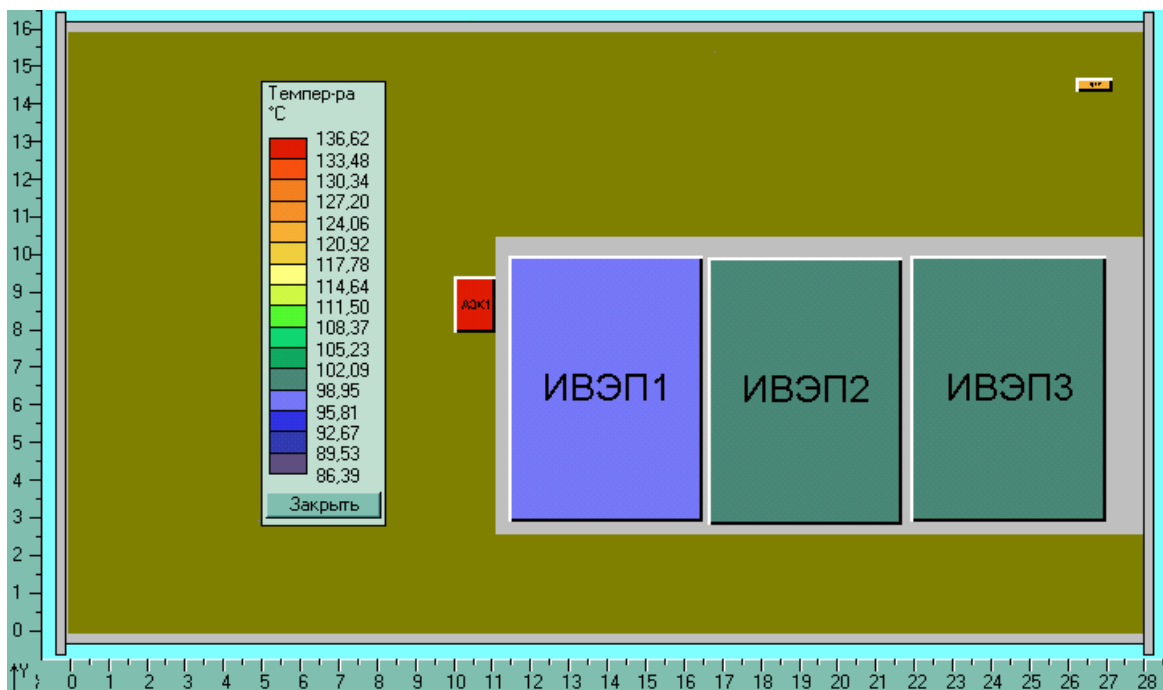


Рис. 3.55. Перегретшиеся ЭРЭ

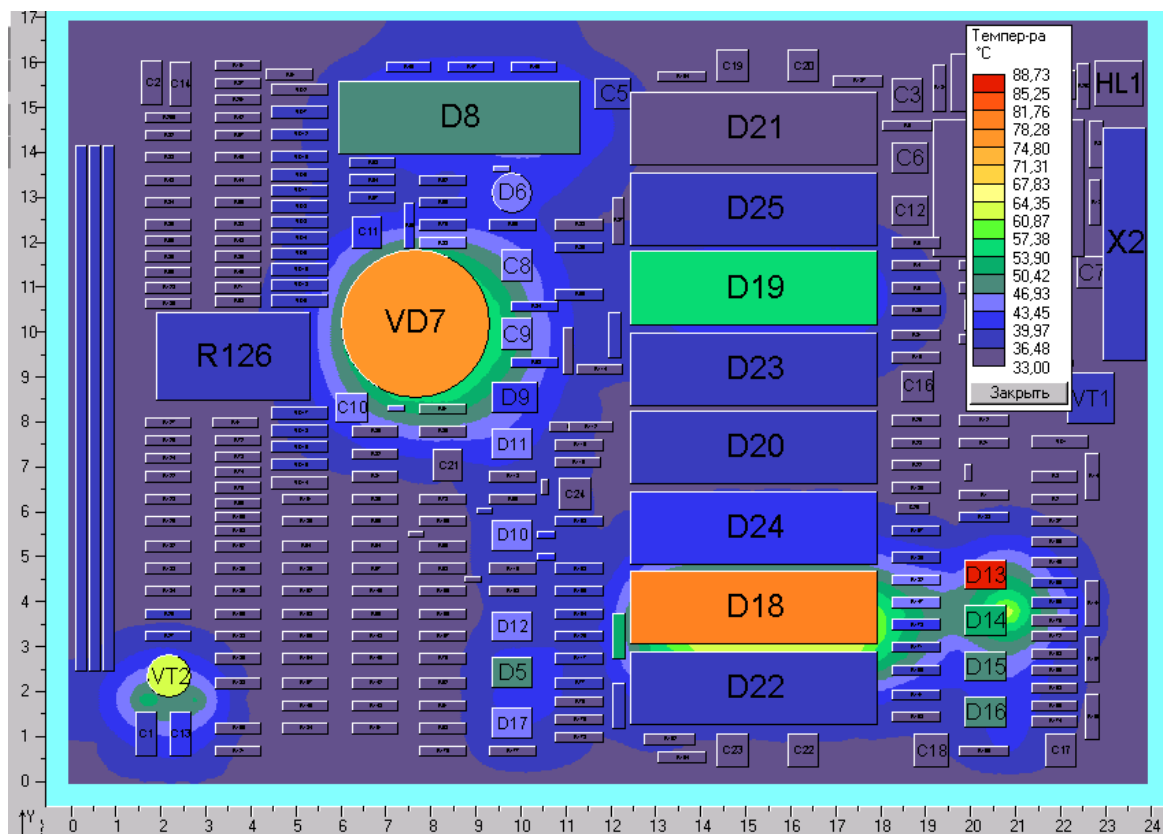


Рис. 3.56. Термограмма печатного узла

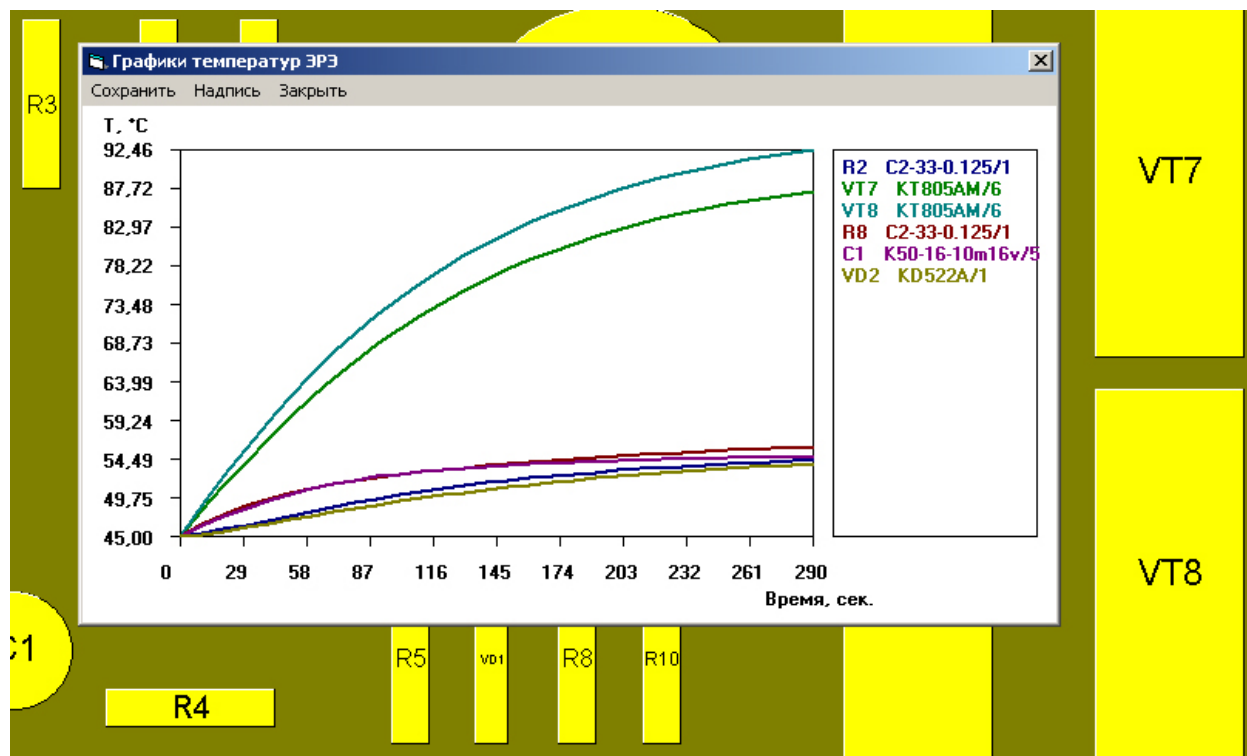


Рис. 3.57. Графики зависимостей температур ЭРЭ от времени

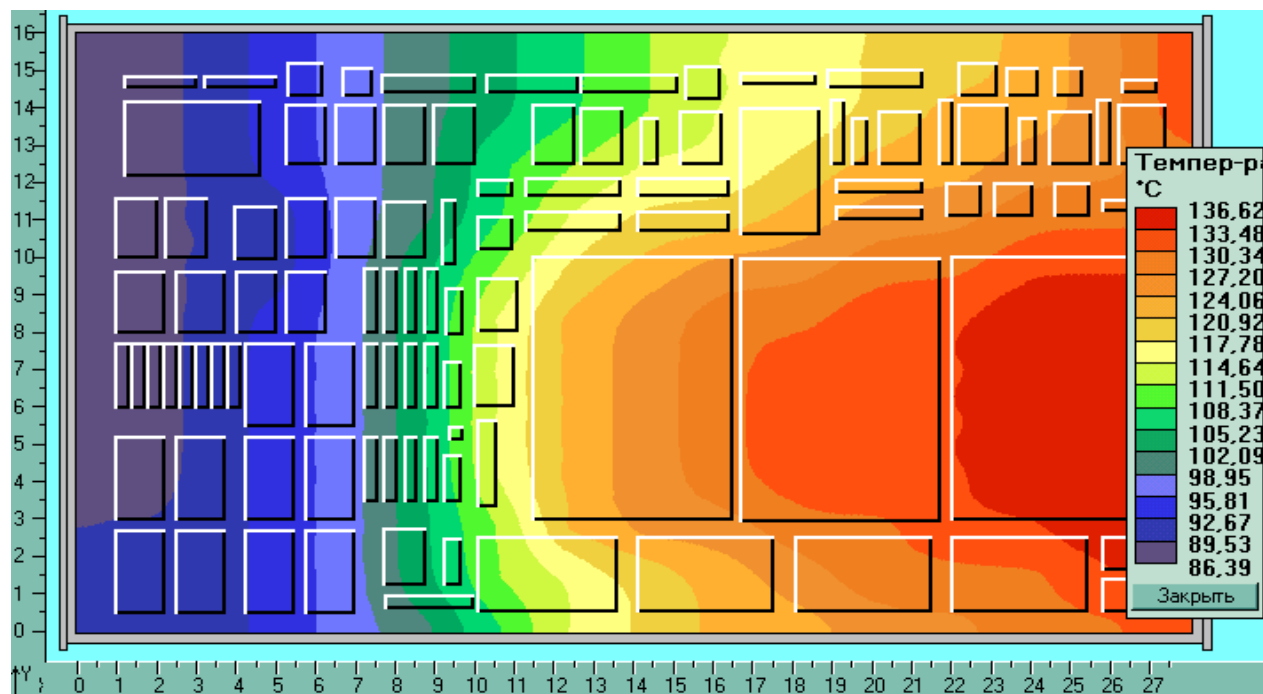


Рис. 3.58. Изотермы несущей конструкции печатного узла



Рис. 3.59. Распределение мощностей по ЭРЭ

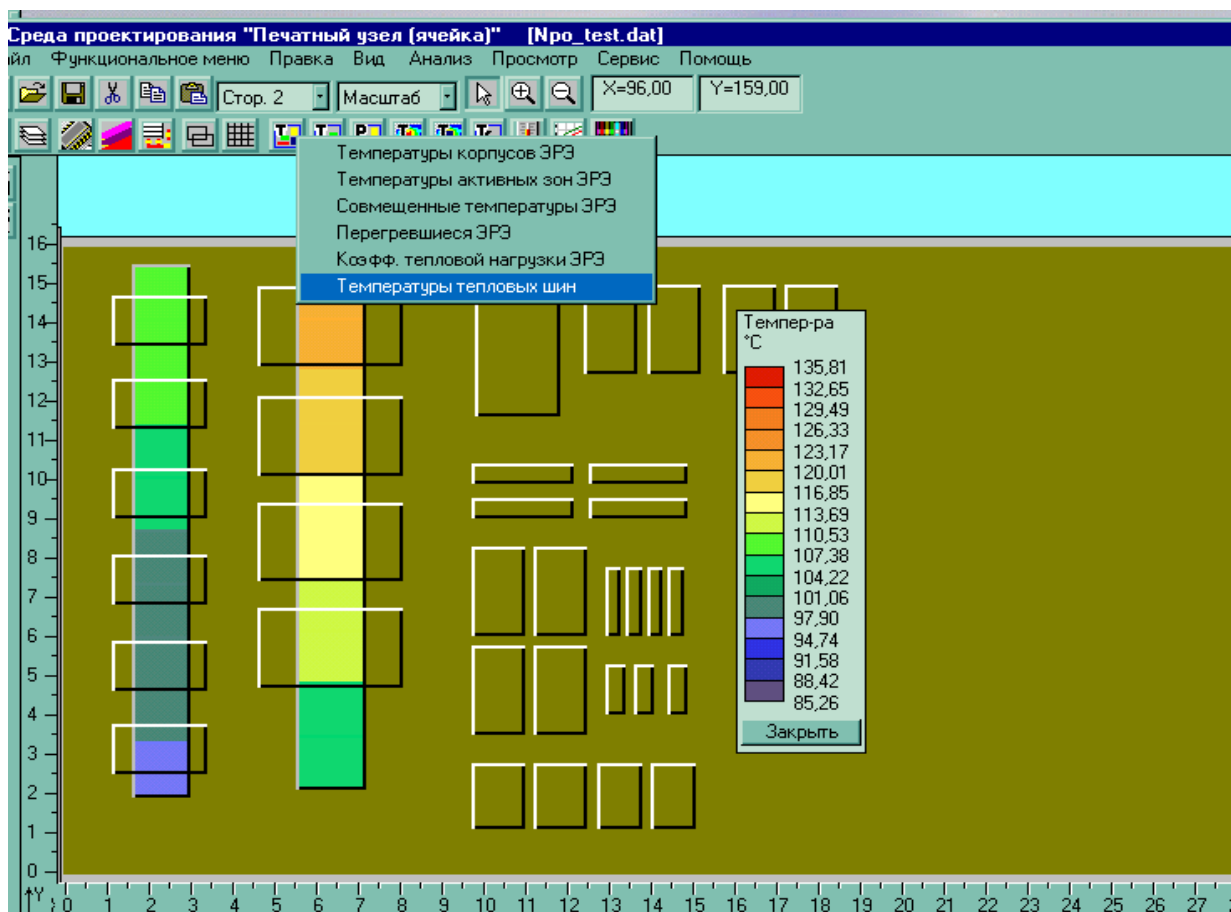


Рис. 3.60. Температурные поля тепловых шин

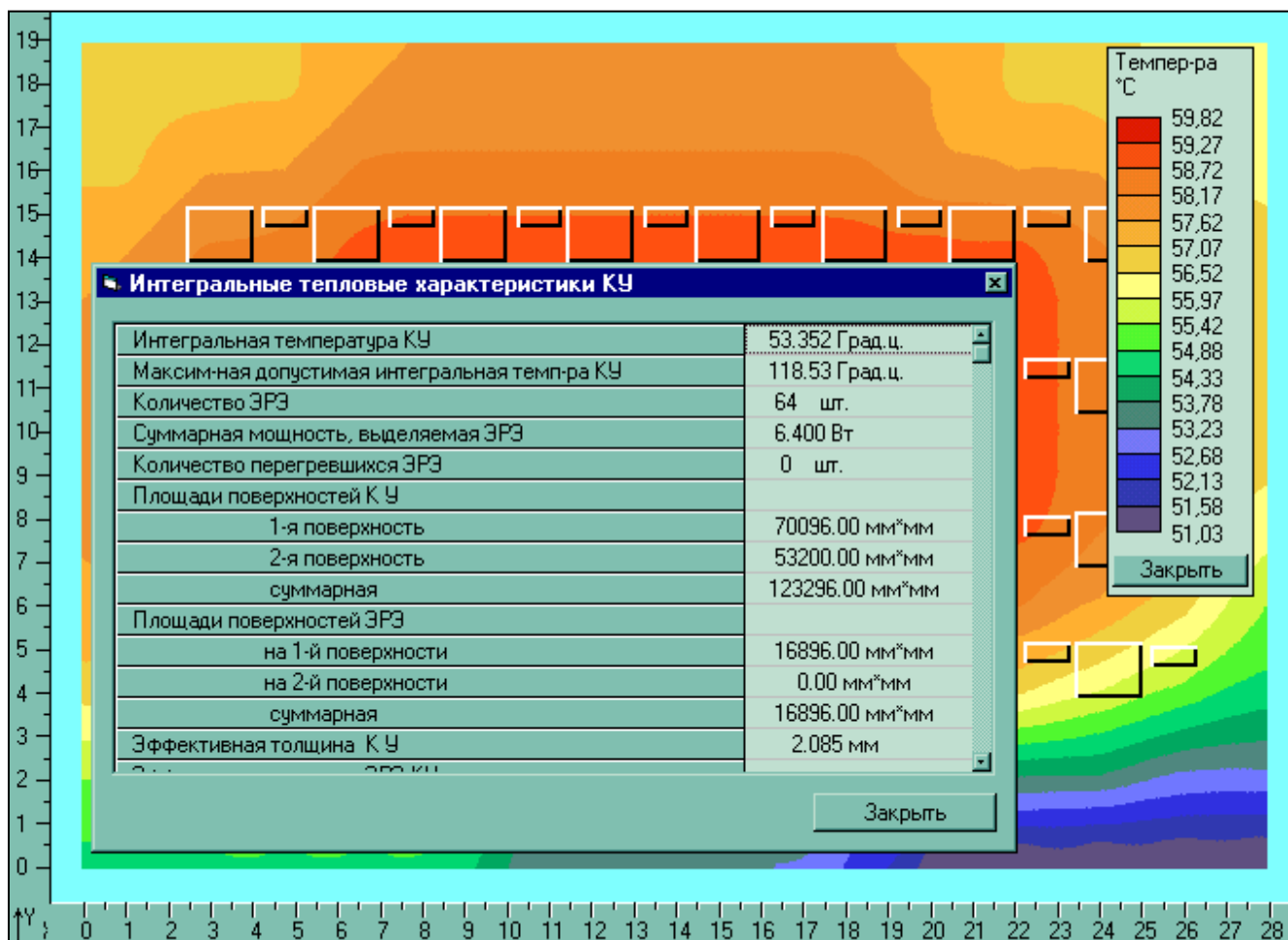


Рис. 3.61. Интегральные тепловые характеристики КУ

3.9. Работа с 3D-моделью КУ

Отображение 3D-модели КУ производится при активизации функции визуального интерфейса «3D-модель» (см. [рис. 3.16](#)). При этом появляется специальное окно, в котором отображается 3D-модель КУ ([рис. 3.62](#)).

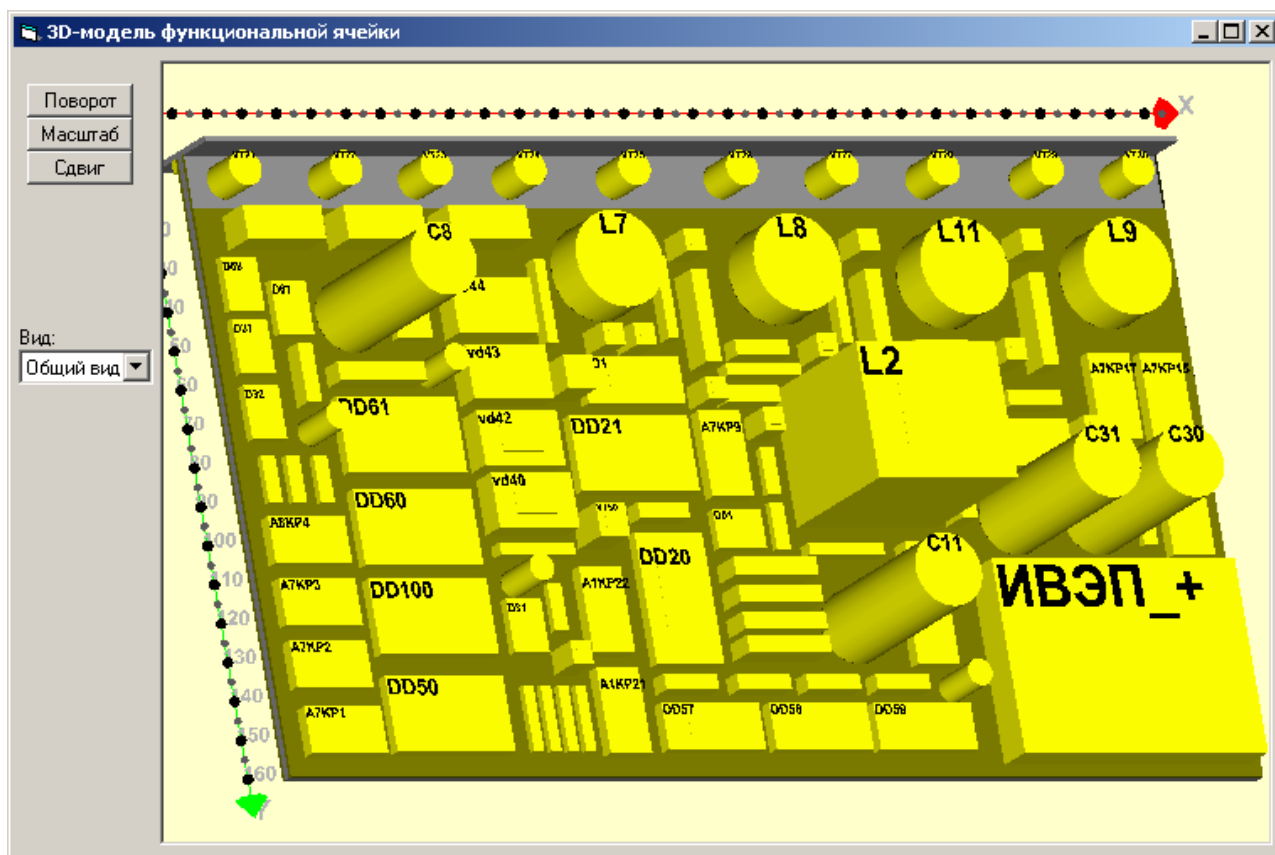


Рис. 3.62. 3D-эскиз конструктивного узла



Для работы с 3D-моделью доступны следующие операции:

- поворот КУ в пространстве (функция <Поворот>);
- изменение масштаба отображения 3D-модели КУ (функция <Масштаб>);
- сдвиг 3D-модели КУ в плоскости обзора (функция <Сдвиг>);
- выбор стандартного вида отображения 3D-модели КУ (функция <Вид>);
- обновление эскиза 3D-модели КУ (функция <Обновить>);
- отображение результатов моделирования на 3D-эскизе КУ.

Поворот

Назначение функции: поворачивает 3D-эскиз КУ относительно осей Ox и Oy .

Поворот КУ в пространстве осуществляется при выборе соответствующего действия, посредством активизации <Поворот> визуального интерфейса. Нажатием и удержанием левой кнопки мыши на эскизе КУ производится захват КУ. Движение мыши вверх и вниз обеспечивает поворот 3D-эскиза КУ относительно оси Ox . Движение мыши вправо и влево обеспечивает поворот 3D-эскиза КУ относительно оси Oy . Затем, отпуская левую кнопку мыши, фиксируется требуемое положение 3D-эскиза КУ.

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 248 |
|---|---|--|---|------------|

Масштаб

Назначение функции: увеличение или уменьшение 3D-эскиза КУ.

Для изменения масштаба необходимо активизировать функцию *<Масштаб>* визуального интерфейса (см. [рис. 3.62](#)). Затем осуществляется захват 3D-эскиза КУ посредством нажатия левой кнопки манипулятора «мышь». Движениями вправо, влево, вверх или вниз, при нажатой левой кнопке мыши, производится выбор необходимого масштаба КУ. Отпускание левой кнопки мыши влечет за собой фиксацию выбранного масштаба.

Сдвиг

Назначение функции: сдвиг 3D-эскиза КУ в пространстве текущего вида.

Для сдвига 3D-эскиза КУ в пространстве текущего вида относительно плоскости обзора необходимо произвести захват КУ нажатием левой кнопки мыши. Затем сдвиг мыши вверх или вниз обеспечивает необходимое перемещение 3D-эскиза КУ. Фиксация выбранного положения КУ производится посредством отпускания нажатой левой кнопки мыши.

Вид

Назначение функции: выбор стандартного вида отображения 3D-эскиза КУ.

Выбором из раскрывающегося списка можно определить один из стандартных видов. Возможны следующие стандартные виды: «общий вид», «вид сверху», «вид снизу», «вид спереди» и «вид сзади».

Обновление эскиза КУ

Назначение функции: обновление изображения 3D-эскиза КУ после внесения изменения во временный файл данных, содержащий информацию, используемую при отображении 3D-эскиза КУ.

3.9.1. Отображение результатов моделирования на 3D-эскизе КУ

Назначение функции: наглядное представление результатов моделирования посредством цветового отображения на 3D-эскизе КУ температур ЭРЭ, мощностей ЭРЭ, коэффициентов тепловой нагрузки ЭРЭ и т. п.

Для отображения результатов моделирования на 3D-эскизе КУ необходимо произвести моделирование теплового режима в программе *BoardEditor*, затем отобразить интересующие результаты моделирования на 2D-эскизе КУ посредством выбора необходимого пункта меню визуального интерфейса программы *BoardEditor*. После этого вызывается функция отображения 3D-модели

КУ. В появившемся окне отображается 3D-эскиз КУ в цвете, отображающий выбранный вариант результатов моделирования теплового режима, а также цветовая палитра, в которой приводится соответствие цветов и цифровых значений отображаемых данных ([рис. 3.63](#)).

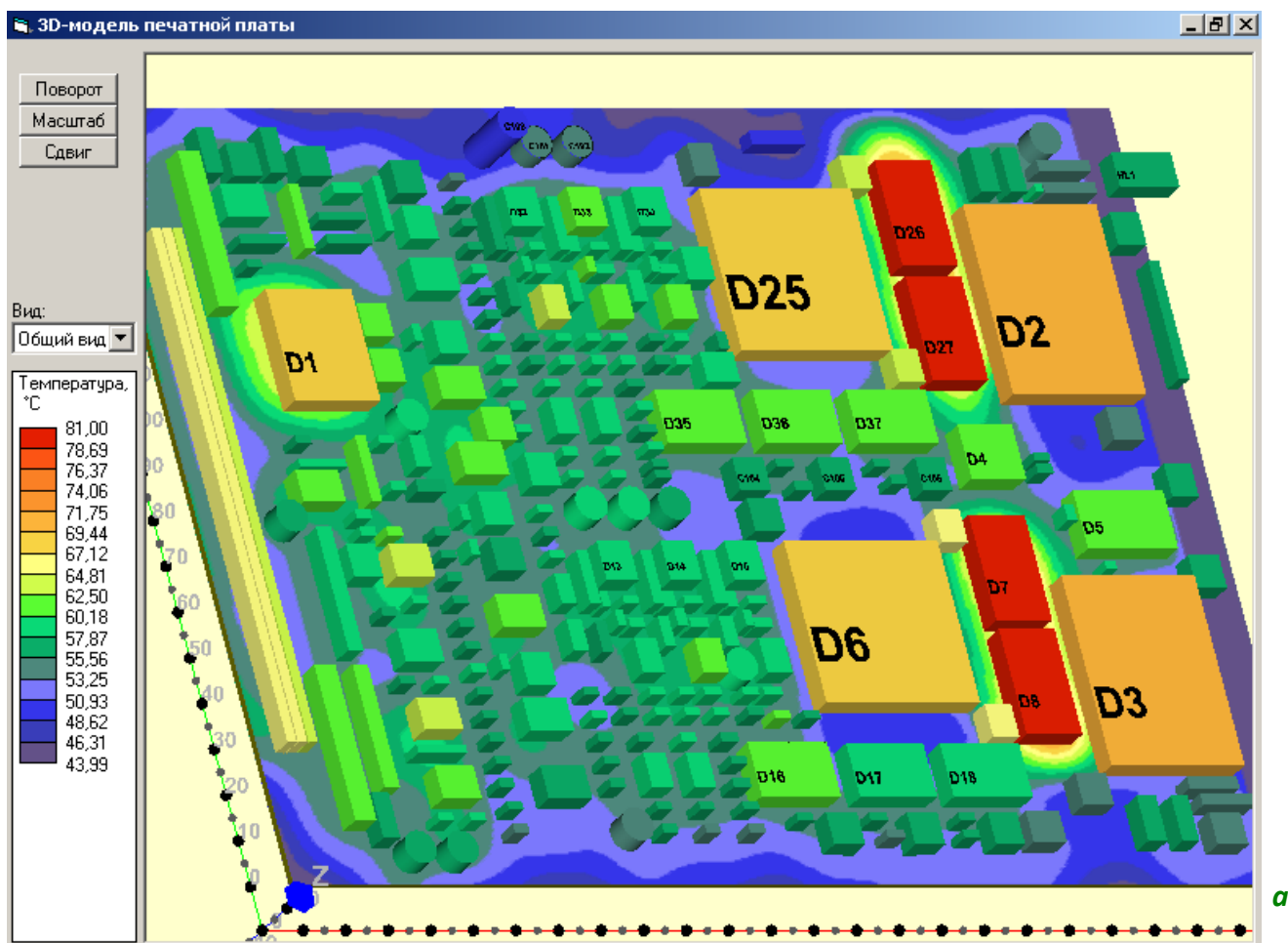
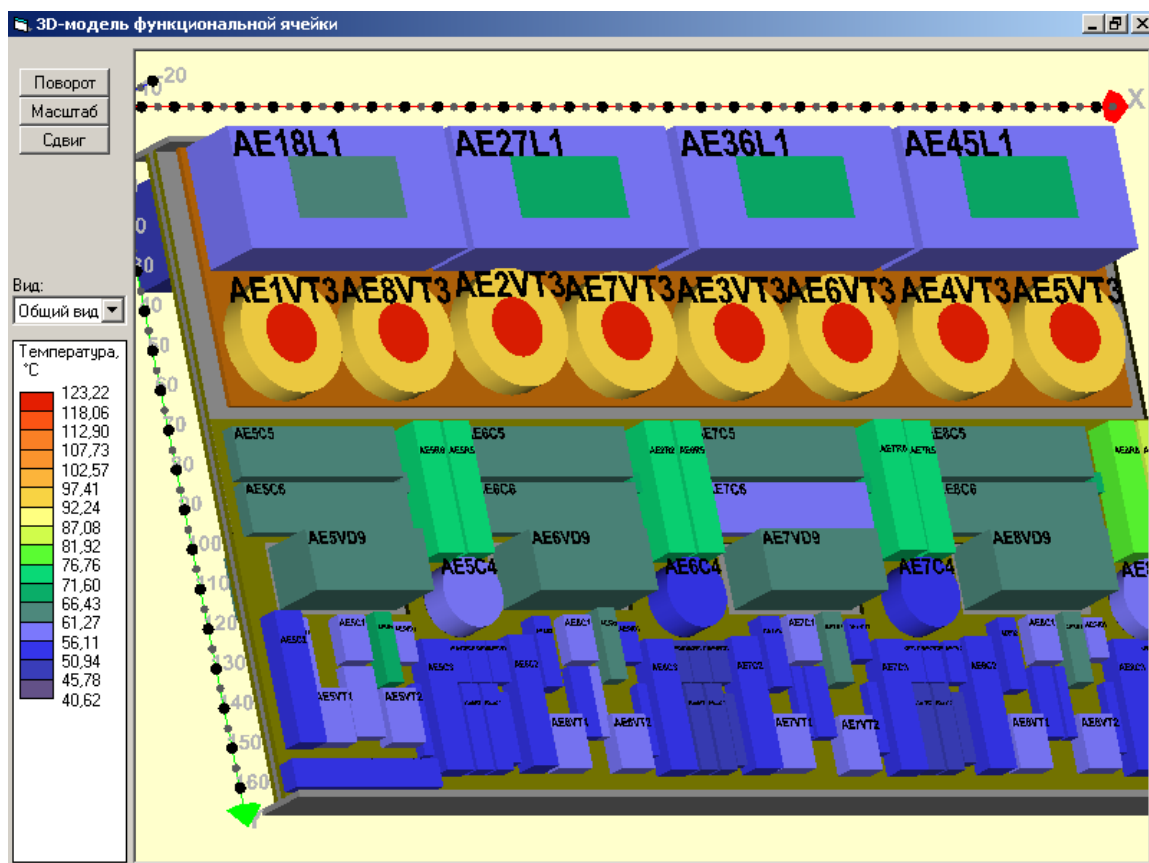
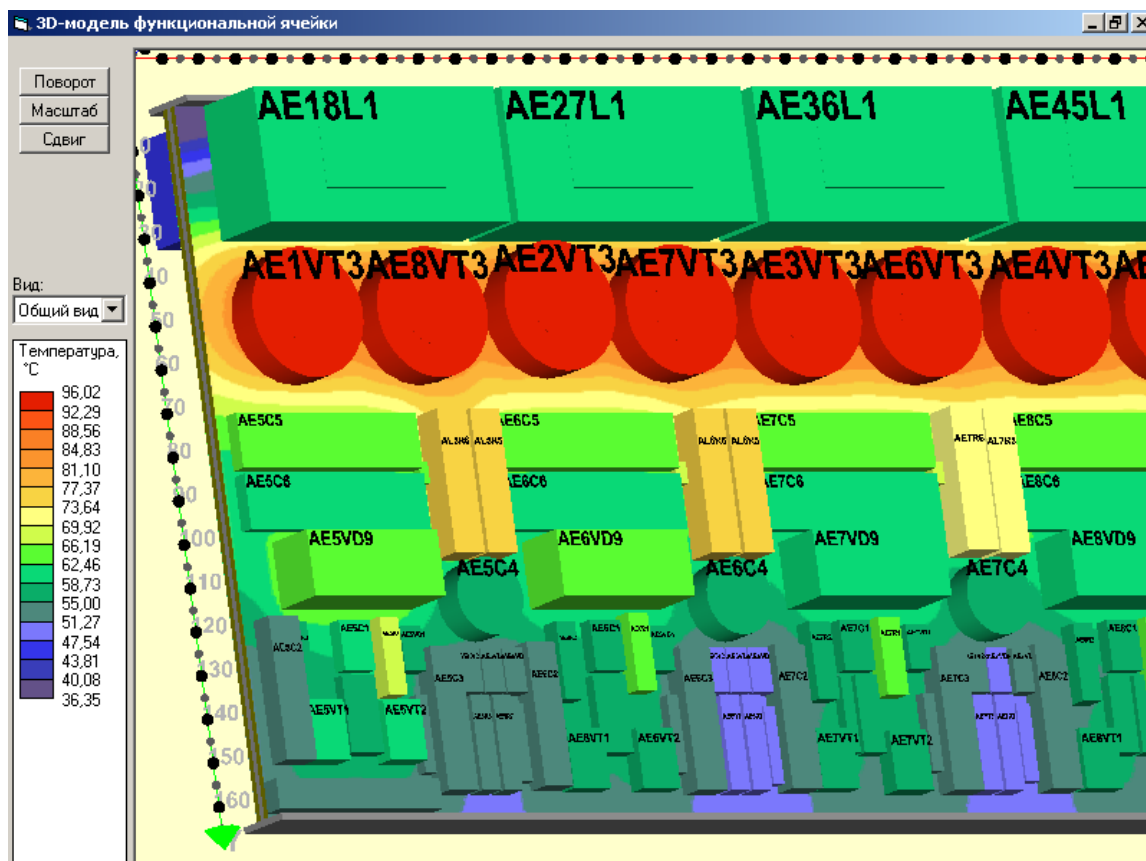


Рис. 3.63. Результаты моделирования на 3D-эскизе КУ: а – термограмма печатного узла; б – температуры ЭРЭ, и температуры активных зон эрэ на 3D-эскизе ФЯ; в – термограмма ФЯ; г и д – примеры отображения изотерм печатных узлов

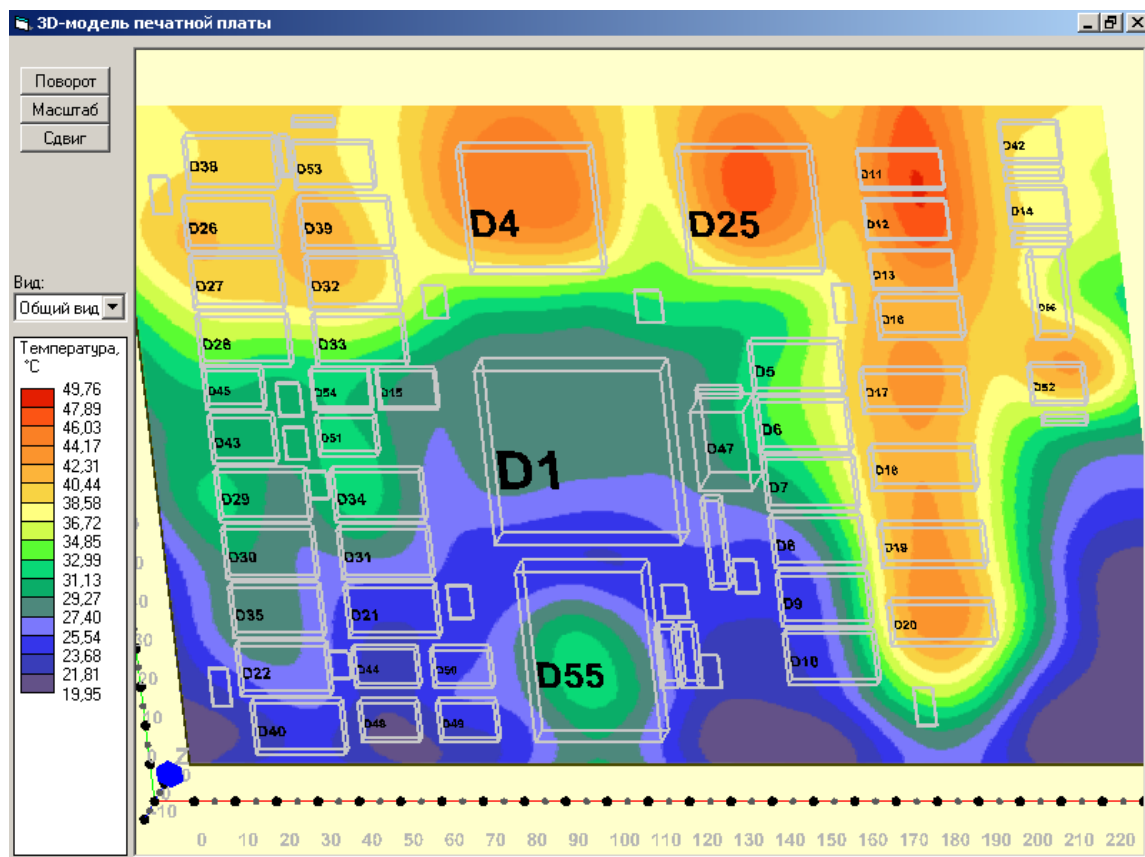


6

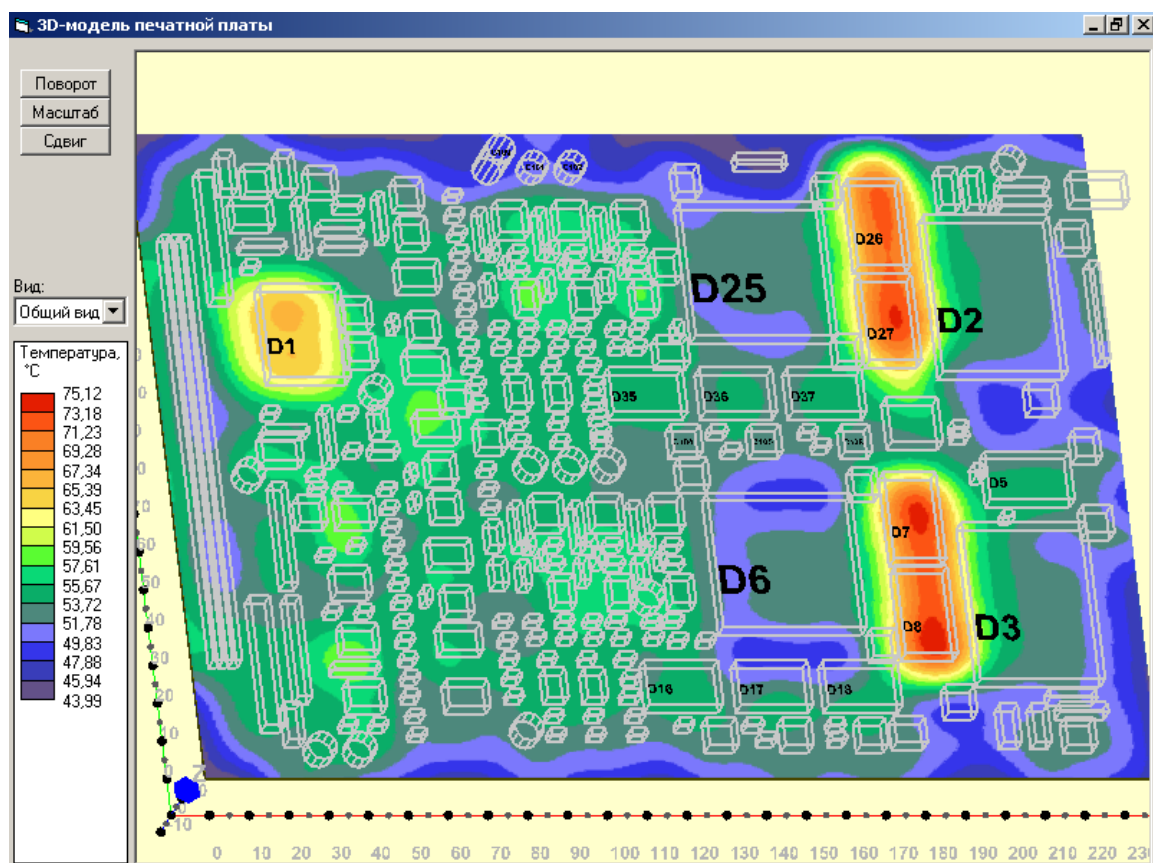


6

Рис. 3.63. Продолжение



a



b

Рис. 3.63. Окончание

3.10. Обращение к комплексу

Для обращения к компонентам *Комплекса № 2* (см. [рис. 3.2](#)) необходимо открыть папку *ТРИАНА* и активизировать необходимый компонент (см. [рис. 3.13](#)).

3.11. Режим «Клиент-сервер»

В ПК ТРИАНА предусмотрена возможность анализа тепловых характеристик ПУ и ФЯ при помощи математического ядра, расположенного на удаленном сервере (режим «Клиент-сервер»). В режиме «Клиент-сервер» математическое ядро ПК ТРИАНА находится на удаленном сервере и может принимать запросы на анализ тепловых характеристик от нескольких программ **BoardEditor** одновременно, как это показано на [рис. 3.64](#).

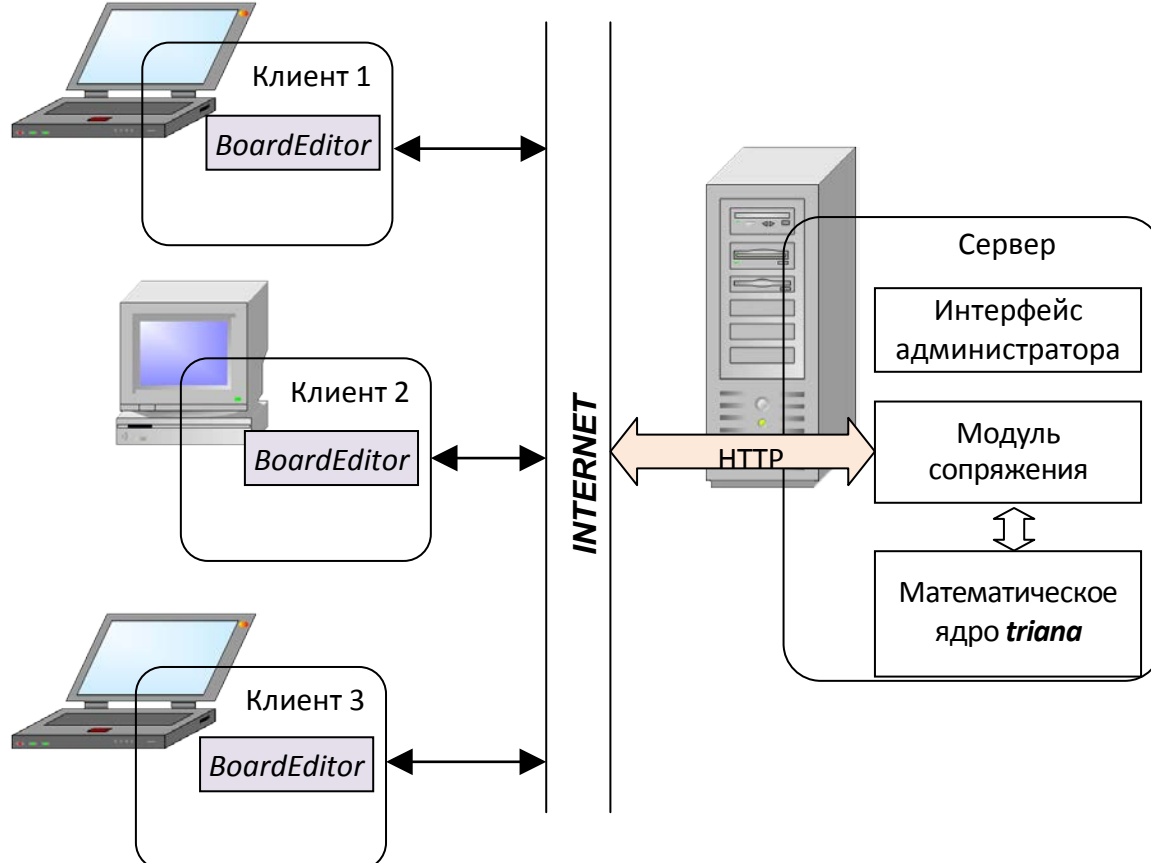


Рис. 3.64. Схема взаимодействия программных компонентов ПК ТРИАНА в режиме «Клиент-сервер»

В режиме «Клиент-сервер» моделирование тепловых режимов происходит в следующей последовательности:

1. В программе **BoardEditor** производится подготовка исходных данных для моделирования тепловых режимов ПУ и ФЯ.
2. Выполняется анализ тепловых характеристик, при котором исходные данные в автоматическом режиме передаются на сервер, где располагается математическое ядро.
3. Результаты анализа передаются обратно в программу **BoardEditor**, в которой производится отображение и графическая интерпретация результатов анализа.

Для использования возможности производить тепловые расчеты при помощи удаленного математического ядра необходимо включить режим «Клиент-сервер» в настройках программы **BoardEditor**. Для этого заходим в меню <Сервис>, выбираем подменю <Настройки> и в появившемся окне настроек выбираем вкладку <Клиент-сервер> (см. [рис. 3.65](#)). Для включения режима «Клиент-сервер» необходимо пометить галочкой пункт <Использовать удаленное мат. ядро> и указать путь к удаленному математическому ядру в соответствующем поле ввода. Путь к удаленному математическому ядру Вы можете узнать, связавшись с разработчиками ПК **ТРИАНА**. Кроме того, в этом же окне задаются имя пользователя и пароль, необходимые для доступа к удаленному математическому ядру, которые Вы также можете узнать у разработчиков ПК **ТРИАНА**.

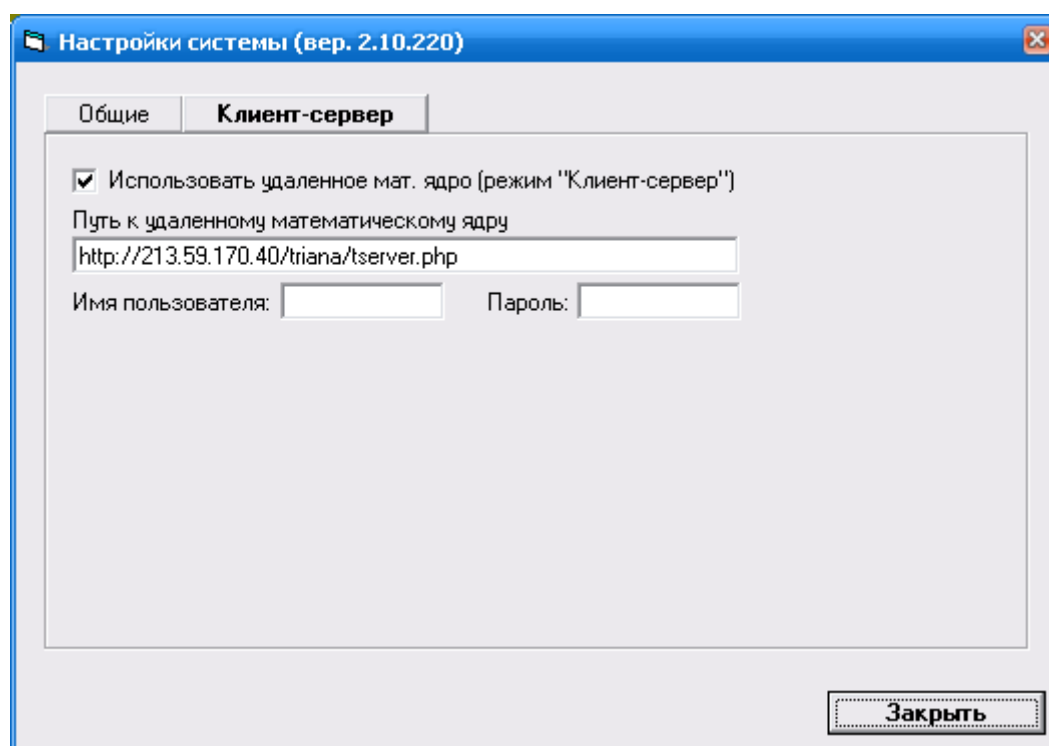


Рис. 3.65. Настройки режима «Клиент-сервер» в программе **BoardEditor**

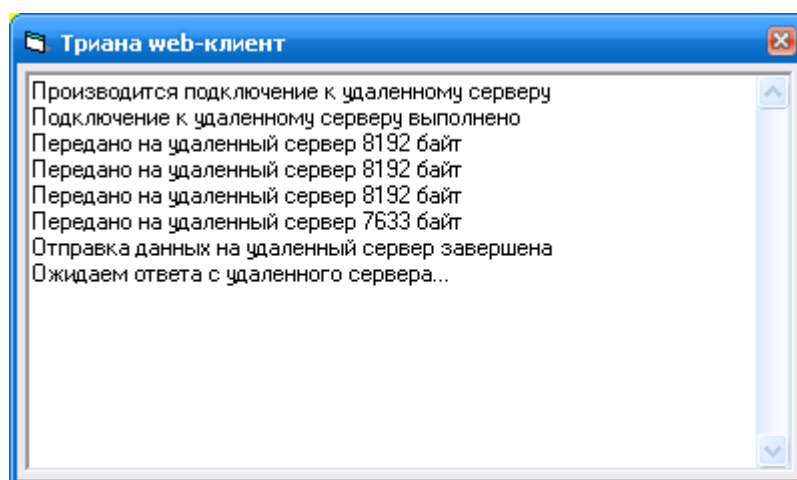




Рис. 3.66. Процесс анализа тепловых характеристик в режиме «Клиент-сервер»

Если настройки режима «Клиент-сервер» сделаны верно, то при вызове функции «Анализ тепловых режимов» из главного меню программы **BoardEditor** или при помощи соответствующей кнопки на панели инструментов панели инструментов происходит обмен данными с удаленным математическим ядром и отображается окно, показанное на [рис. 3.66](#).

3.12. Методика применения Комплекса № 2

Описанная в данном документе программа используется при моделировании на различных этапах проектирования (эскизный, технический, рабочий проект) конструктивных узлов РЭА. Обычно КУ входит в состав конструкции РЭА более высокого уровня конструктивной иерархии (блок или стойка), т. е. КУ не эксплуатируется непосредственно в окружающей среде. Поэтому, как правило, моделирование теплового режима КУ проводится на втором этапе иерархического моделирования теплового режима РЭА. На первом этапе проводится моделирование тепловых процессов конструкции высшего уровня иерархии (см. [главу 1](#)). При этом КУ представляются в конструкции более высокого уровня иерархии в виде нагретых зон (макромоделей). В процессе моделирования блока или стойки определяются температуры воздушных объемов с обеих сторон КУ и интегральные температуры соседних с КУ конструктивных элементов и других КУ (панели прибора, экраны, соседние ПУ и/или ФЯ). Эти температуры определяют граничные условия при моделировании теплового режима КУ на втором этапе (см. [табл. 3.2](#)).

Расчеты на первом этапе проводятся с помощью Комплекса программ № 1.

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 255 |
|---|---|--|---|------------|

Процесс анализа и обеспечения теплового режима исследуемого средствами математического моделирования КУ можно разбить на несколько стадий:

1. Подготовка исходных данных.
2. Моделирование теплового режима КУ на ПЭВМ.
3. Анализ результатов моделирования (выполняется разработчиком РЭА).
4. Коррекция исходных данных для повторного анализа, в случае неудовлетворительных тепловых режимов работы ЭРЭ и/или конструкционных материалов, и повторное прохождение стадий 1–3.



На этапе подготовки исходных данных пользователь подготавливает их в соответствии с [параграфами 3.6–3.8](#). Необходимые для этого справочные данные по теплофизическим параметрам материалов КУ приведены в [прил. 1](#). В приложении также приведены варианты установки различных типов ЭРЭ, которые реализованы в математическом ядре *triana*. программном обеспечении ППП. В [прил. 2](#) приведены ГТФП некоторых ЭРЭ.

На следующем этапе осуществляется моделирование теплового режима КУ и анализ полученных результатов на превышение температур ЭРЭ максимально допустимых по ТУ на них. Интегральное представление о температурном запасе КУ дает расчетная максимально допустимая интегральная температура, полученная в результате расчета (таблица с интегральными характеристиками – см. [рис. 3.61](#)).

При наличии перегревшихся ЭРЭ пользователь принимает меры по улучшению теплового режима КУ с целью его обеспечения. Это могут быть:

- новый вариант размещения ЭРЭ на КУ;
- замена применяемых материалов несущей конструкции КУ;
- замена ЭРЭ на более теплостойкие;
- изменение условий охлаждения (введение дополнительных теплоотводов, локальное охлаждение наиболее мощных ЭРЭ, изменение теплофизических параметров хладоносителя и пр.).

После принятия соответствующих решений пользователь корректирует в соответствии с ними исходные данные и повторяет операцию моделирования. Указанные процедуры повторяются до удовлетворения требований на тепловой режим проектируемого КУ РЭА.

| | | | |
|---|--|---|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 256 |
|---|--|---|------------|

3.13. Пример расчета

В качестве примера расчета рассмотрим процедуру анализа стационарного теплового режима печатного узла А7 (1C0D1), входящего в состав блока УПТС, рассмотренного в [параграфе 2.11](#) (см. [рис. 2.75–2.77](#)). Тепловой режим ПУ А7 должен обеспечиваться на уровне коэффициентов тепловой нагрузки входящих в его состав ЭРЭ, значения которых не должны превышать 0,75.

Детальный анализ тепловых характеристик ПУ, входящих в рассматриваемый блок, осуществляется на втором этапе нисходящего алгоритма (см. [параграф 2.6](#)), на котором в качестве граничных условий используется тепловое поле блока (см. [рис. 2.78](#)), полученное на 1-м этапе алгоритма (см. [параграф 2.6](#)).

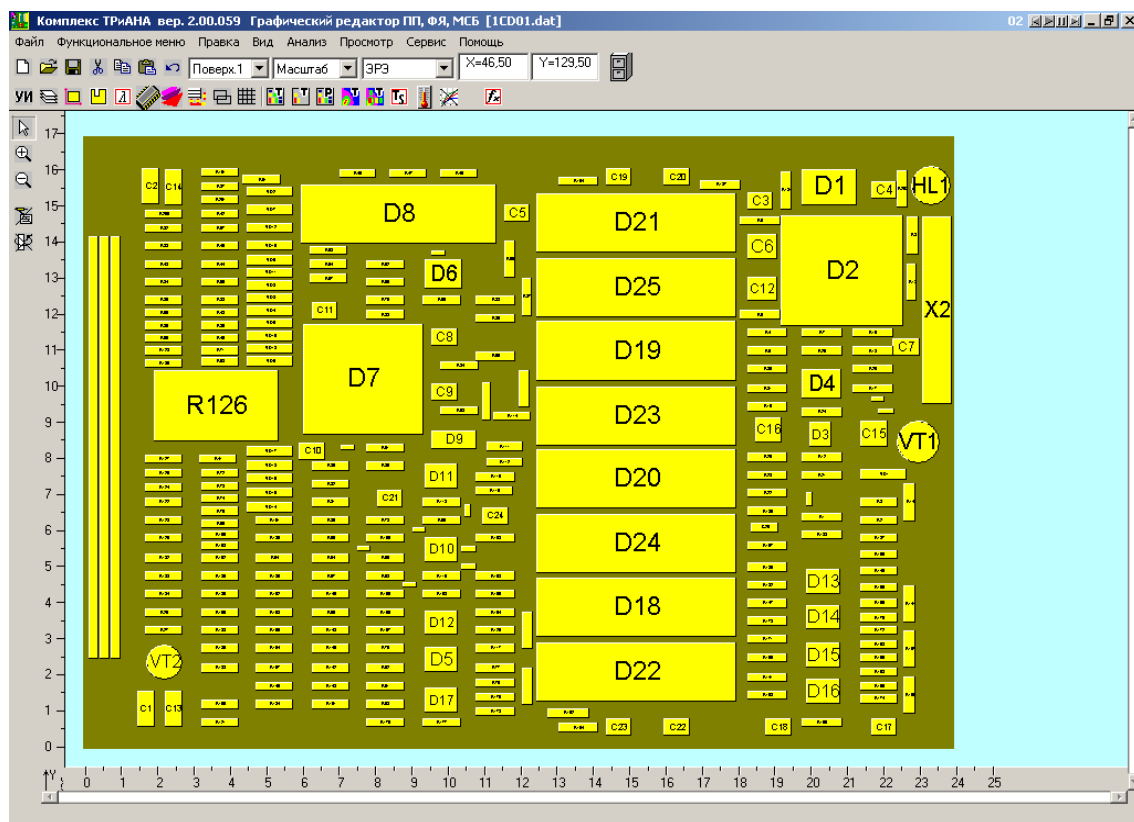
Печатный узел ПУ А7 имеет двусторонний монтаж ЭРЭ (см. [рис. 3.67](#)). Остановимся подробнее на задании граничных условий. Для 1-й и 2-й поверхностей ПУ А7 в качестве граничных условий необходимо использовать температуры воздушных потоков, распространяющихся в каналах $k7$, $k8$, и интегральные температуры ПУ А6 и ПУ А8 (см. [рис. 2.78](#) и [рис. 2.76](#)). 1-я поверхность ПУ А7 охлаждается воздушным потоком, проходящим через канал $k8$, а 2-я поверхность соответственно через канал $k7$.

Кроме этого, 1-я поверхность рассматриваемого ПУ взаимодействует посредством лучистого теплообмена с ПУ А8, интегральная температура которого составляет 49,96 °С, а 2-я поверхность – с ПУ А6 с интегральной температурой 54,42 °С (см. [рис. 2.75](#)).

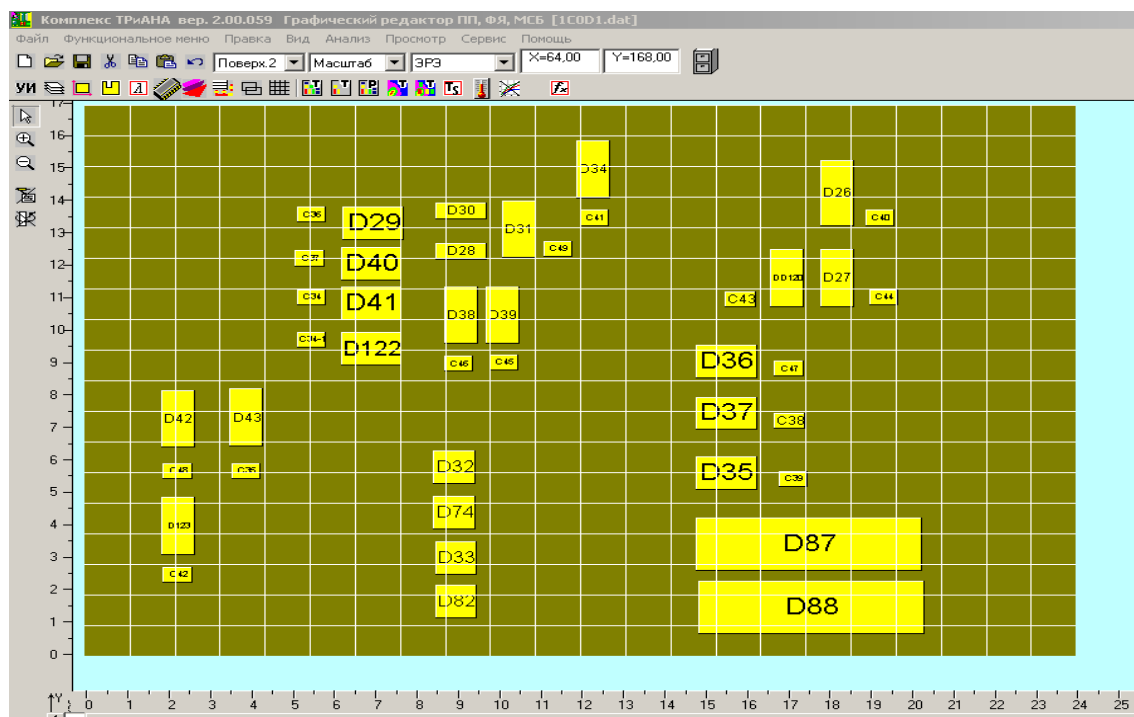
Как видно из [рис. 2.75](#) и [рис. 2.84](#), в результате моделирования тепловых процессов в блоке были получены температуры воздушных потоков на выходах сети каналов $k1–k12$. В свою очередь, корректность анализа тепловых характеристик ПУ А7 базируется на задании неизотермичности потоков хладоносителя, прокачиваемых в каналах $k7$ и $k8$, учитывая их значительный перегрев на выходе каналов ($\Delta T = 11–13$ °С).

Для учета данного эффекта изменение температуры воздушного потока можно задать посредством выделения на каждой поверхности ПУ нескольких зон с граничными условиями вдоль движения воздушного потока. Для значений длин каналов ($l_n = 170$ мм), образованных ПУ в блоке УПТС, вдоль движения воздушного потока достаточно выделить по 3 зоны на каждой поверхности ПУ, как это показано на [рис. 3.68](#). На рисунке также проставлены координаты локализации окончания зон вдоль оси Oy . Для каждой зоны воздушный поток принимается изотермичным. Для определения температуры воздушного потока на границе каждой зоны можно воспользоваться выражением

$$T_{\text{ВП}}(x) = T_{\text{ВХ}} + 2(T_{\text{М}} - T_{\text{ВХ}}) \cdot (x/l_x). \quad (3.6)$$



а



б

Рис. 3.67. Расположение ЭРЭ на поверхностях ПУ А7: а– 1-я поверхность; б – 2-я поверхность

При этом значения T_M для каждой поверхности ПУ вычисляются как средние значения температур $T_{вых}$ и $T_{вх}$ (см. [рис. 3.68](#)), а вместо значений x и l_x в выражение (3.6) подставляются значения y ($y = 57$ мм, $y = 114$ мм, $y = 170$ мм) и $l_y = 170$ мм.

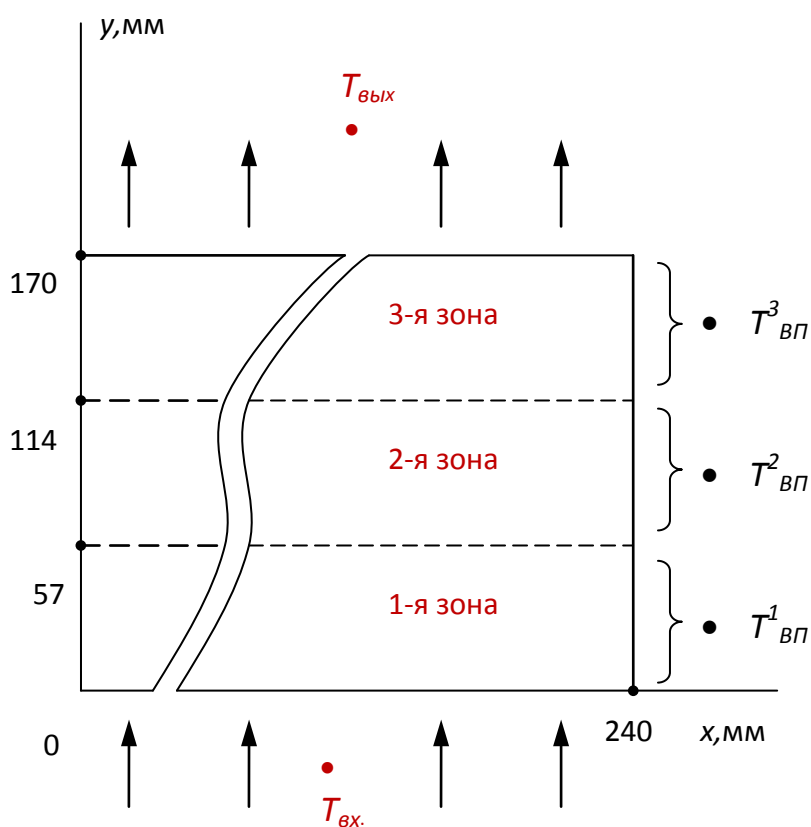


Рис. 3.68. Формализованная схема для вычисления параметров воздушного потока, продуваемого вдоль оси Oy ПУ А7

На основе полученных температур воздушного потока на границе выделенных на каждой поверхности ПУ зон вычисляются значения средних температур воздушного потока ($T^1_{вп}$, $T^2_{вп}$, $T^3_{вп}$) для каждой зоны как среднее значение температур в начале и в конце зоны. Вычисленные вышеописанным способом характеристики теплового потока для 1-й поверхности ПУ А7 будут следующими: $T_M = 26,6$; $T_{вп}(57) = 24,52$ °С; $T_{вп}(114) = 28,74$ °С; $T_{вп}(170) = 32,9$ °С; $T^1_{вп} = 22,4$ °С; $T^2_{вп} = 26,6$ °С; $T^3_{вп} = 30,8$ °С. Конечные результаты для 2-й поверхности: $T^1_{вп} = 22,2$ °С; $T^2_{вп} = 26,1$ °С; $T^3_{вп} = 30,0$ °С.

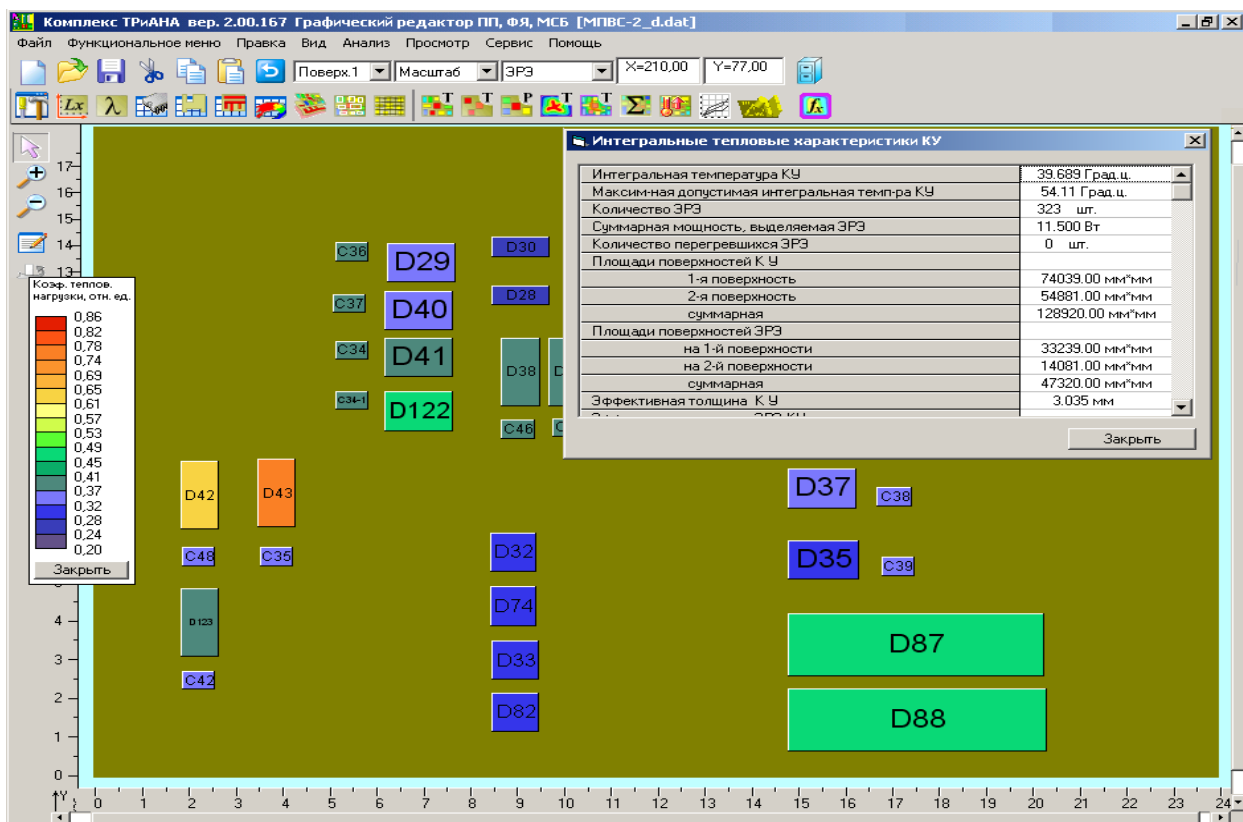
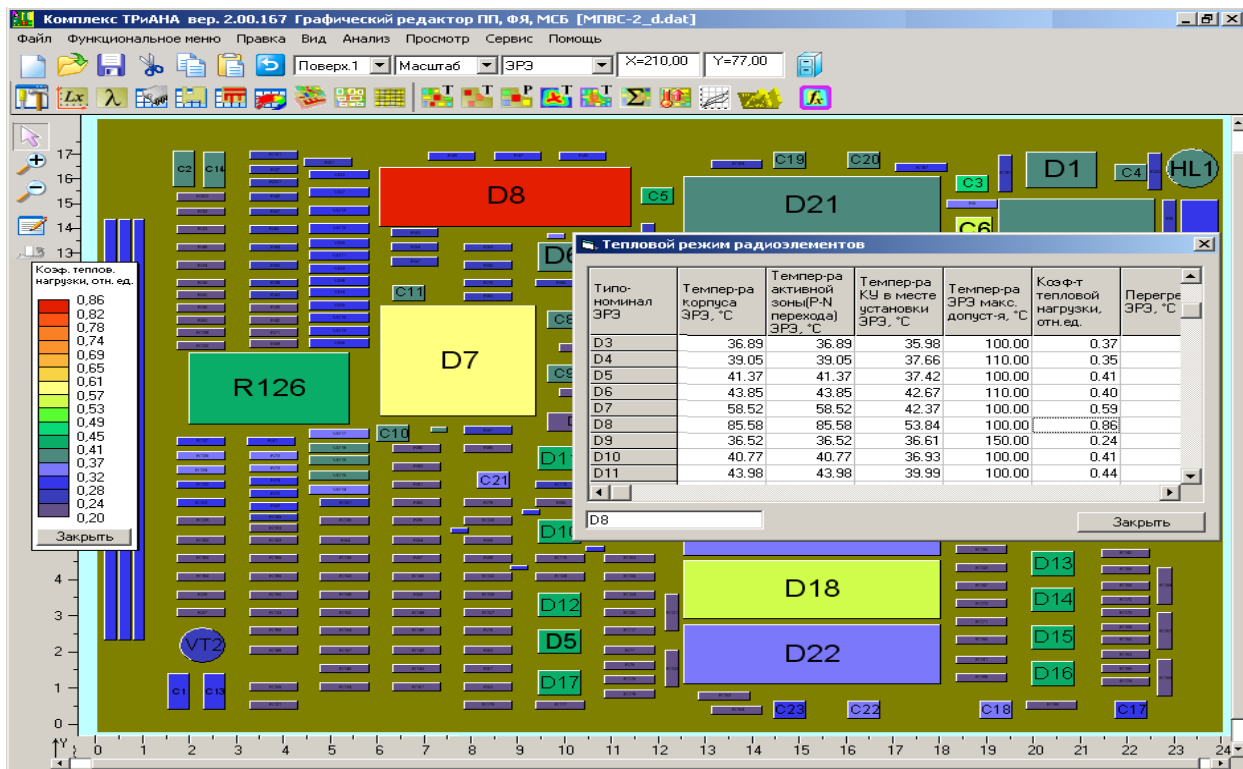


Рис. 3.69. Результаты моделирования ПУ А7: а – значения коэффициентов тепловой нагрузки ЭРЭ, установленных на 1-й поверхности; б – коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ /1-я поверхность/ и интегральные тепловые характеристики ПУ А7

После задания граничных условий осуществляется процедура моделирование теплового режима печатного узла.

Результаты моделирования ПУ А7 приведены на [рис. 3.69–3.71](#). Анализ значений коэффициентов тепловой нагрузки (КТН) ЭРЭ ([рис. 3.69, а](#)), а также термограммы ПУ ([рис. 3.70](#)) показывает, что некоторые ЭРЭ (D8, D43, D26) с точки зрения требований к нормальному тепловому режиму работают в перегруженном режиме, или близкому к нему: $КТН(D8) = 0,86$; $КТН(D26) = 0,74$; $КТН(D43) = 0,75$.

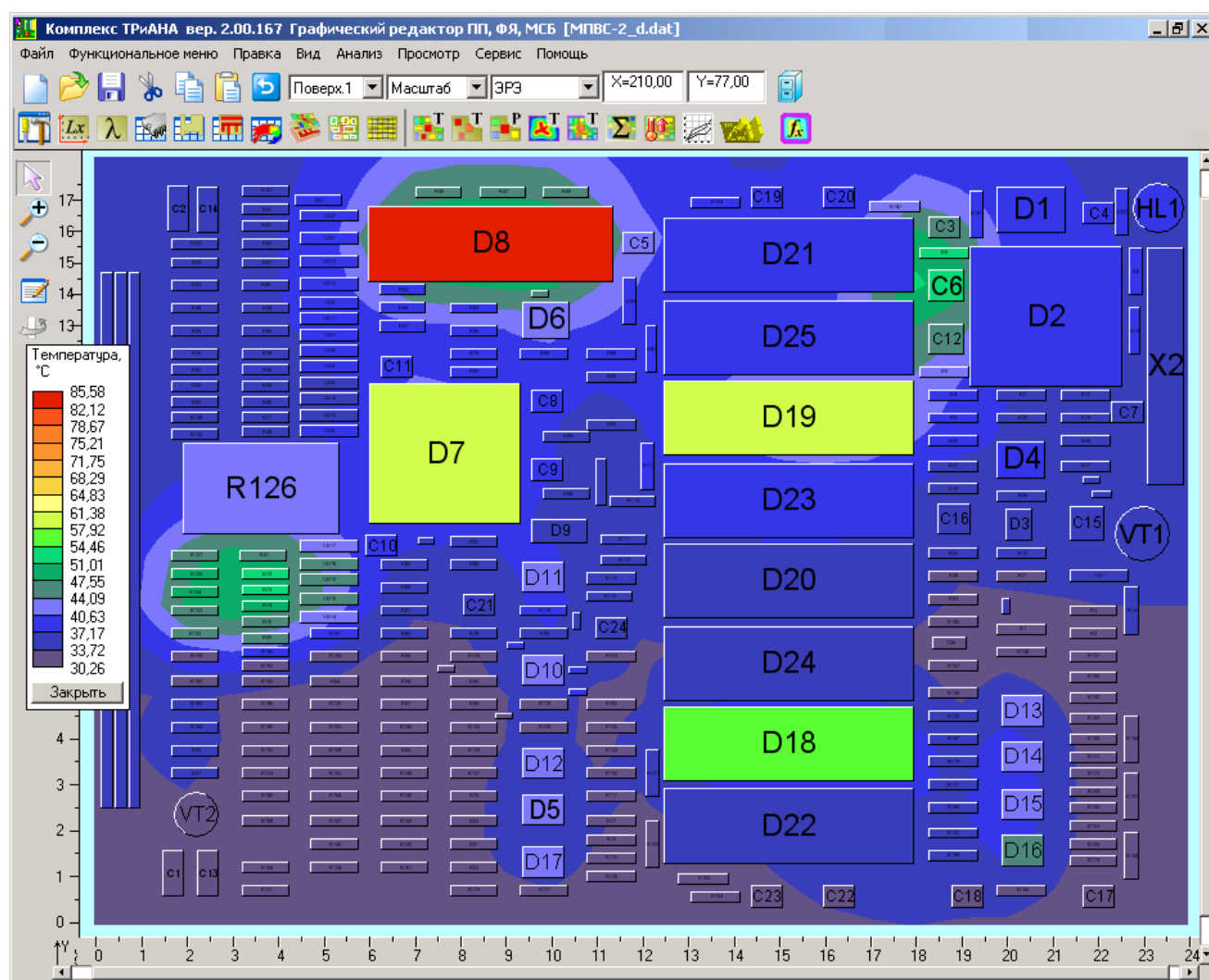




Рис. 3.70. Термограмма ПУ А7 (вид со стороны 1-ой поверхности),
полученная в результате моделирования

Анализ теплофизических параметров перечисленных ЭРЭ, а также результатов моделирования показывает, что обеспечить тепловой режим ЭРЭ

| | | | | |
|---|---|--|---|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2 | 261 |
|---|---|--|---|------------|

возможно несколькими способами. Первый – снизить значения сопротивлений крепления R_{tk} (см. [рис. 3.71](#)), применив иной способ установки ЭРЭ на ПП (ввести мини-радиатор, установить ЭРЭ на индивидуальные тепловые шины и т. п. – см. [параграф 3.7](#)). Второй способ – выполнить перерасположение ЭРЭ на ПП таким образом, чтобы перечисленные ЭРЭ находились на печатной плате ближе к точке входа воздушного потока. Второй способ приведет к повторному решению задач топологического проектирования, но на самых начальных этапах проектирования такой подход не приведет к существенным материальным затратам на проектирование. В качестве примера рассмотрим 2-й подход. Переразметив ЭРЭ (D8 меняется местами с D22, а D26 и D43 размещаются в 1-ой зоне /см. [рис. 3.68](#)/), выполним повторное моделирование теплового режима ПУ А7.

Анализ результатов повторного моделирования (см. термограмму и таблицу на [рис. 3.71](#)) показал, что при таком размещении ЭРЭ на ПП все ЭРЭ работают в нормальном тепловом режиме (значения коэффициента тепловой нагрузки отмеченных выше элементов составляют $K_{TH}(D8) = 0,65$; $K_{TH}(D26) = 0,62$; $K_{TH}(D43) = 0,65$), обеспечивают требования к нормальному тепловому режиму работы анализируемого печатного узла.

Программный комплекс ТРИАНА v.2.10.00

Copyright ©С 2006-2014,

А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин

Тел:8-(913)-571-54-71,

E-mail: triana@triana.su,

WWW: http://www.triana.su

КОПИЯ ФАЙЛА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

```
=====

ТИПК=02-1
ТИПП=01
ФПЧ =00
ТЕСТ=10
ПЛАТА
DLPX=XXXXXDLPY=XXXXXDLPZ=XXXXXMMMMMMMMMMMMMMMMHOS1=XXXXXHOS2=XXXXXOR=X
DLPX=240. DLPY=170. DLPZ=1.5 стеклотекстолит HOS1=0. HOS2=0. OR=0
LAMP=XXXXX ЧЕРН=XXXXXORI =XROKU=XXXXXXUTKU=XXXXXX
LAMP=0.3 ЧЕРН=0.8 ORI =1 ROKU=1500. UTKU=420.
КЗПП=XXXXXDPPR=XXXXXLAMP=XXXXXMMMMMMMMMMMMMMMMMROP =XXXXXXUTP=XXXXXX
КЗПП=0.25 DPPR=10. LAMP=380. медь (M1,M2,M3) ROP =8940. UTP=380.
KLX =XXXXKLY =XXXXDX =XXXXXDY =XXXXXSETK=XXXXX
KLX =22 KLY =18 DX =10. DY =10. SETK=0.5
ШИНЫ
UOOOOOOP!11111-22222!33333-44444!DDDD!MMMMMMMMMMMMMMMM!XXXXX!YYYYY!ZZZZZ!RRRRR!TTTTT!VV!TTTTT!
*
КОНТУРЫ ШИН
UOOOOOOP!11111!22222!33333!44444!55555!66666!77777!88888!99999!00000!11111!22222!33333!44444!55555
*
ВЫРЕЗЫ
UOOOOOOP!11111-22222!33333-44444
*
ЭЛЕМЕНТЫ
UOOOOOOP!11111-22222!33333-44444!55555!66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!44444!44444!44444!44444
. . . . .
C1 1 14.9 19.4 6.4 16.2 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50. . . . .
C2 1 16.2 20.7 151.3 161.2 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50. . . . .
C3 1 183. 189.8 150. 154.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-2200п50v/5
C4 1 217. 223.8 153. 157.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-1000п50v/5
C5 1 116. 122.8 146.5 151.1 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-680п50v/5
C6 1 183. 190.8 136.2 142.8 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50.
C7 1 223. 230.3 109.5 114.1 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-3600п50v/5
C8 1 96. 102.8 112. 116.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-2200п50v/5
C9 1 96. 102.8 97. 101.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-680п50v/5
. . . . .
D7 1 60.5 93.5 87.5 118. 800. 50. 0. 100. 0. 10. 1000.
D8 1 60. 113.6 140.5 156.7 1900. 10. 0. 100. 0. 4. 1000.
D9 1 96. 108. 83.5 88.5 10. 65.5 0. 150. 0.8 4. 179. 2Д906/4
. . . . .
D17 1 94. 102.9 10.4 17. 110. 50. 0. 100. 0. 4. 80.
D18 1 125. 179.6 31.5 47.6 950. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D19 1 125. 179.6 102.5 118.7 950. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D20 1 125. 179.6 67. 83.1 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D21 1 125. 179.6 138. 154.1 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D22 1 125. 179.6 13.5 29.7 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
. . . . .
D26 2 178. 186. 133. 153. 1000. 10. 0. 105. 0.8 5. 600. K1401УД3/1
. . . . .
D43 2 35. 43. 65. 82.5 1080. 10. 0. 105. 0.8 5. 482. K1401УД2А/1
. . . . .
*
```

Рис. 3.71. Фрагмент файла-отчета

UPPXX!11111-22222!33333-44444!55555-66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!

| | | | | | | | | | | |
|--------|------|------|-------|----|----|------|------|------|------|----|
| 1 9 0. | 240. | 0. | 56. | 0. | 0. | 22.4 | 49.9 | 700. | 0.13 | 2. |
| 1 9 0. | 240. | 57.5 | 113. | 0. | 0. | 26.6 | 49.9 | 700. | 0.13 | 2. |
| 1 9 0. | 240. | 114. | 170. | 0. | 0. | 30.8 | 49.9 | 700. | 0.13 | 2. |
| 2 9 0. | 240. | 0. | 58. | 0. | 0. | 22.2 | 54.4 | 700. | 0.13 | 2. |
| 2 9 0. | 240. | 59. | 114.5 | 0. | 0. | 26.1 | 54.4 | 700. | 0.13 | 2. |
| 2 9 0. | 240. | 115. | 170. | 0. | 0. | 30. | 54.4 | 700. | 0.13 | 2. |

*

*

НАЧАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 0.000E+00
 КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ 1.000E+03
 ТОЧНОСТЬ ИНТЕГРИРОВАНИЯ. 1.000E-05
 МИНИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГР 1.000E+00
 МАКСИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГР. 1.000E+01
 НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА 1.000E+01

КОНЕЦ ОПИСАНИЯ ФАЙЛА ДАННЫХ

Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры "АСОНИКА-Т"

Программный комплекс ТриАНА v.2.10.00

Copyright ©С 2006-2014,

А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
 В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин

Тел: 8-(913)-571-54-71,
 E-mail: [triana@triana.su](mailto: triana@triana.su),
 WWW: <http://www.triana.su>

Управляющая информация :

Тип конструкции : 2-1 печатный узел
 Тип анализа : 1 стационарный режим
 Расчет ФПЧ : 0 не производится
 Тестовая информация : 10 работа в составе ИС

О П И С А Н И Е П К У

| | | |
|--|--------------|-----------|
| Размеры П К У по оси OX | 240.00 | мм |
| OY | 170.00 | мм |
| OZ | 1.50 | мм |
| Ориентация П К У | 1 | горизонт. |
| Материал П К У | стеклотексто | |
| Коэффициент теплопроводности материала ПКУ | 0.30 | Вт/м/К |
| Коэффициент черноты основания ПКУ | 0.80 | отн.ед. |
| Материал проводников | медь (M1,M2, | |
| Коэффициент теплопроводности проводников | 380.00 | Вт/м/К |
| Коэффициент заполнения ПКУ проводниками | 0.25 | отн.ед. |
| Толщина проводников | 10.00 | мкм |
| Количество линий, дискретизирующих температурное поле КУ | | |
| по оси OX | 22 | |
| по оси OY | 18 | |
| Шаг генерируемой сетки dx; dy, мм | 10.00 | 10.00 |

Рис. 3.71. Продолжение

О П И С А Н И Е Э Р Э

Таблица 1

| Обозн. ЭРЭ | Пов. уст. | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | P, мВт | Rtk, К/Вт | Rtv, К/Вт | Tmax, Гр.Ц | Коэф черн | H, мм | S, мм*мм | Ce, Дж/К | Типономинал | Объект установки (НК или ШИНА) | ТИП МТП ЭРЭ | Rtk, К/Вт ЭРЭ-шина |
|---------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|----------|-------------|-------------|---------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------|
| C1 | 1 | 14.9 | 19.4 | 6.4 | 16.2 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C2 | 1 | 16.2 | 20.7 | 151.3 | 161.2 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C3 | 1 | 183.0 | 189.8 | 150.0 | 154.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-2200п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C4 | 1 | 217.0 | 223.8 | 153.0 | 157.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-1000п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C5 | 1 | 116.0 | 122.8 | 146.5 | 151.1 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-680п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C6 | 1 | 183.0 | 190.8 | 136.2 | 142.8 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C7 | 1 | 223.0 | 230.3 | 109.5 | 114.1 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-3600п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C8 | 1 | 96.0 | 102.8 | 112.0 | 116.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-2200п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| C9 | 1 | 96.0 | 102.8 | 97.0 | 101.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-680п50v/5 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D7 | 1 | 60.5 | 93.5 | 87.5 | 118.0 | 800. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 10. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D8 | 1 | 60.0 | 113.6 | 140.5 | 156.7 | 1900. | 10.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D9 | 1 | 96.0 | 108.0 | 83.5 | 88.5 | 10. | 65.5 | 0.0 | 150.0 | 0.8 | 4. | 179. | 0.0 | 2Д906/4 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D17 | 1 | 94.0 | 102.9 | 10.4 | 17.0 | 110. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 80. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D18 | 1 | 125.0 | 179.6 | 31.5 | 47.6 | 950. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D19 | 1 | 125.0 | 179.6 | 102.5 | 118.7 | 950. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D20 | 1 | 125.0 | 179.6 | 67.0 | 83.1 | 30. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D21 | 1 | 125.0 | 179.6 | 138.0 | 154.1 | 30. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| D22 | 1 | 125.0 | 179.6 | 13.5 | 29.7 | 430. | 30.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D26 | 2 | 178.0 | 186.0 | 133.0 | 153.0 | 1000. | 10. | 0.0 | 105.0 | 0.8 | 5. | 600. | 0.0 | K1401УД3/1 | Печатный узел | 1 | 0.000 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D43 | 2 | 35.0 | 43.0 | 65.0 | 82.5 | 1080. | 10. | 0.0 | 105.0 | 0.8 | 5. | 482. | 0.0 | K1401УД2А/1 | Печатный узел | 1 | 0.000 |

Рис. 3.71. Продолжение

ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ (ГУ)

| N | ГУ | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | Zn, мм | Zk, мм | ПАР.1 | ПАР.2 | ПАР.3 | ПАР.4 | ПАР.5 | ПАР.6 |
|---|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 0.00 | 56.00 | 0.00 | 0.00 | 22.40 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 57.50 | 113.00 | 0.00 | 0.00 | 26.60 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 114.00 | 170.00 | 0.00 | 0.00 | 30.80 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 0.00 | 58.00 | 0.00 | 0.00 | 22.20 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 59.00 | 114.50 | 0.00 | 0.00 | 26.10 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 115.00 | 170.00 | 0.00 | 0.00 | 30.00 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Начальное время работы - 0.000E+00
 Конечное время работы - 0.100E+04
 Точность расчета - 0.100E-04
 Минимальный шаг интегрирования - 0.100E+01
 Максимальный шаг интегрирования - 0.100E+02
 Начальная температура - 0.100E+02

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
 Размерность матрицы 743
 Начальное число ненулевых элементов 9405
 Число ненулевых элементов в факторизованной матрице..18917

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Y
^
|

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 18 | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 17 | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. |
| 16 | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 39. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 15 | 36. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 38. | 39. | 40. | 40. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 14 | 36. | 36. | 36. | 37. | 38. | 39. | 39. | 39. | 40. | 40. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 13 | 35. | 35. | 35. | 36. | 37. | 39. | 42. | 41. | 39. | 38. | 37. | 39. | 41. | 42. | 42. | 41. | 38. | 36. | 36. | 35. | 35. | 36. | 36. |
| 12 | 35. | 35. | 35. | 36. | 36. | 40. | 44. | 42. | 39. | 37. | 36. | 39. | 43. | 43. | 43. | 43. | 39. | 36. | 37. | 35. | 34. | 35. | 35. |
| 11 | 35. | 35. | 36. | 36. | 37. | 41. | 45. | 43. | 39. | 37. | 35. | 37. | 39. | 40. | 40. | 40. | 37. | 36. | 37. | 35. | 34. | 35. | 35. |
| 10 | 35. | 35. | 36. | 36. | 36. | 39. | 41. | 40. | 38. | 37. | 35. | 36. | 36. | 37. | 38. | 38. | 36. | 35. | 36. | 35. | 35. | 35. | 35. |
| 9 | 35. | 34. | 35. | 35. | 35. | 36. | 36. | 36. | 38. | 38. | 35. | 35. | 36. | 36. | 38. | 38. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. |
| 8 | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 38. | 38. | 35. | 35. | 35. | 36. | 38. | 37. | 35. | 34. | 34. | 35. | 36. | 36. | 36. |
| 7 | 34. | 33. | 32. | 33. | 33. | 33. | 33. | 33. | 37. | 37. | 34. | 34. | 34. | 35. | 36. | 36. | 34. | 33. | 33. | 34. | 36. | 36. | 36. |
| 6 | 33. | 31. | 32. | 32. | 32. | 32. | 32. | 32. | 36. | 36. | 34. | 35. | 36. | 37. | 38. | 37. | 34. | 33. | 34. | 34. | 36. | 36. | 36. |
| 5 | 33. | 33. | 35. | 40. | 40. | 36. | 33. | 33. | 35. | 36. | 35. | 40. | 43. | 43. | 43. | 42. | 38. | 34. | 39. | 37. | 36. | 36. | 36. |
| 4 | 34. | 37. | 42. | 56. | 56. | 45. | 34. | 34. | 40. | 40. | 38. | 44. | 48. | 48. | 48. | 47. | 40. | 36. | 40. | 43. | 41. | 38. | 38. |
| 3 | 34. | 38. | 43. | 57. | 56. | 45. | 34. | 34. | 40. | 40. | 38. | 49. | 55. | 56. | 56. | 55. | 45. | 37. | 42. | 54. | 51. | 44. | 44. |
| 2 | 32. | 34. | 36. | 39. | 38. | 35. | 33. | 34. | 40. | 40. | 38. | 47. | 50. | 52. | 53. | 52. | 43. | 36. | 41. | 53. | 51. | 43. | 43. |
| 1 | 32. | 33. | 34. | 34. | 34. | 33. | 32. | 32. | 34. | 35. | 36. | 38. | 38. | 36. | 36. | 36. | 34. | 33. | 33. | 35. | 36. | 35. | 35. |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 3.71. Продолжение



Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА

3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2

266

* КАРТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРЭ *

Таблица 2

| № п/п | Обоз-е ЭРЭ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-Н перехода) ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРЭ макс. допуст-я, Гр.Ц | Коэф-т тепловой нагрузки, Отн.ед. | Перегрев ЭРЭ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 1 | C1 | 1 | 33.43 | 33.43 | 33.50 | 100.00 | 0.33 | |
| 2 | C2 | 1 | 37.07 | 37.07 | 37.04 | 100.00 | 0.37 | |
| 3 | C3 | 1 | 37.14 | 37.14 | 37.14 | 100.00 | 0.37 | |
| 4 | C4 | 1 | 37.40 | 37.40 | 37.43 | 100.00 | 0.37 | |
| 5 | C5 | 1 | 38.18 | 38.18 | 38.31 | 100.00 | 0.38 | |
| 6 | C6 | 1 | 37.00 | 37.00 | 37.02 | 100.00 | 0.37 | |
| 7 | C7 | 1 | 34.42 | 34.42 | 34.56 | 100.00 | 0.34 | |
| 8 | C8 | 1 | 37.27 | 37.27 | 37.72 | 100.00 | 0.37 | |
| 9 | C9 | 1 | 37.36 | 37.36 | 37.78 | 100.00 | 0.37 | |
| 39 | D7 | 1 | 58.43 | 58.43 | 42.24 | 100.00 | 0.58 | |
| 40 | D8 | 1 | 64.94 | 64.94 | 54.05 | 100.00 | 0.65 | |
| 41 | D9 | 1 | 36.51 | 36.51 | 36.59 | 150.00 | 0.24 | |
| 49 | D17 | 1 | 45.53 | 45.53 | 41.42 | 100.00 | 0.46 | |
| 50 | D18 | 1 | 58.79 | 58.79 | 43.52 | 100.00 | 0.59 | |
| 51 | D19 | 1 | 57.28 | 57.28 | 42.39 | 100.00 | 0.57 | |
| 52 | D20 | 1 | 36.60 | 36.60 | 36.43 | 100.00 | 0.37 | |
| 53 | D21 | 1 | 38.31 | 38.31 | 37.68 | 100.00 | 0.38 | |
| 54 | D22 | 1 | 38.37 | 38.37 | 37.77 | 100.00 | 0.38 | |
| 297 | D26 | 2 | 65.28 | 65.28 | 55.86 | 105.00 | 0.62 | |
| 314 | D43 | 2 | 68.02 | 68.02 | 57.00 | 105.00 | 0.65 | |

Таблица 3

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНОГО УЗЛА

| | |
|---|-----------------|
| Интегральная температура КУ | 40.012 Град.ц. |
| Максим-ная допустимая интегральная темп-ра КУ | 74.50 Град.ц. |
| Количество ЭРЭ | 323 шт. |
| Суммарная мощность, выделяемая ЭРЭ | 11.500 Вт |
| Количество перегревших ЭРЭ | 0 шт. |
| Площади поверхностей К У | |
| 1-я поверхность | 74039.00 мм*мм |
| 2-я поверхность | 54881.00 мм*мм |
| суммарная | 128920.00 мм*мм |
| Площади поверхностей ЭРЭ | |
| на 1-й поверхности | 33239.00 мм*мм |
| на 2-й поверхности | 14081.00 мм*мм |
| суммарная | 47320.00 мм*мм |
| Эффективная толщина К У | 3.035 мм |
| Эффективная толщина ЭРЭ КУ | |
| на 1-й поверхности | 1.109 мм |
| на 2-й поверхности | 0.426 мм |

Рис. 3.71. Окончание

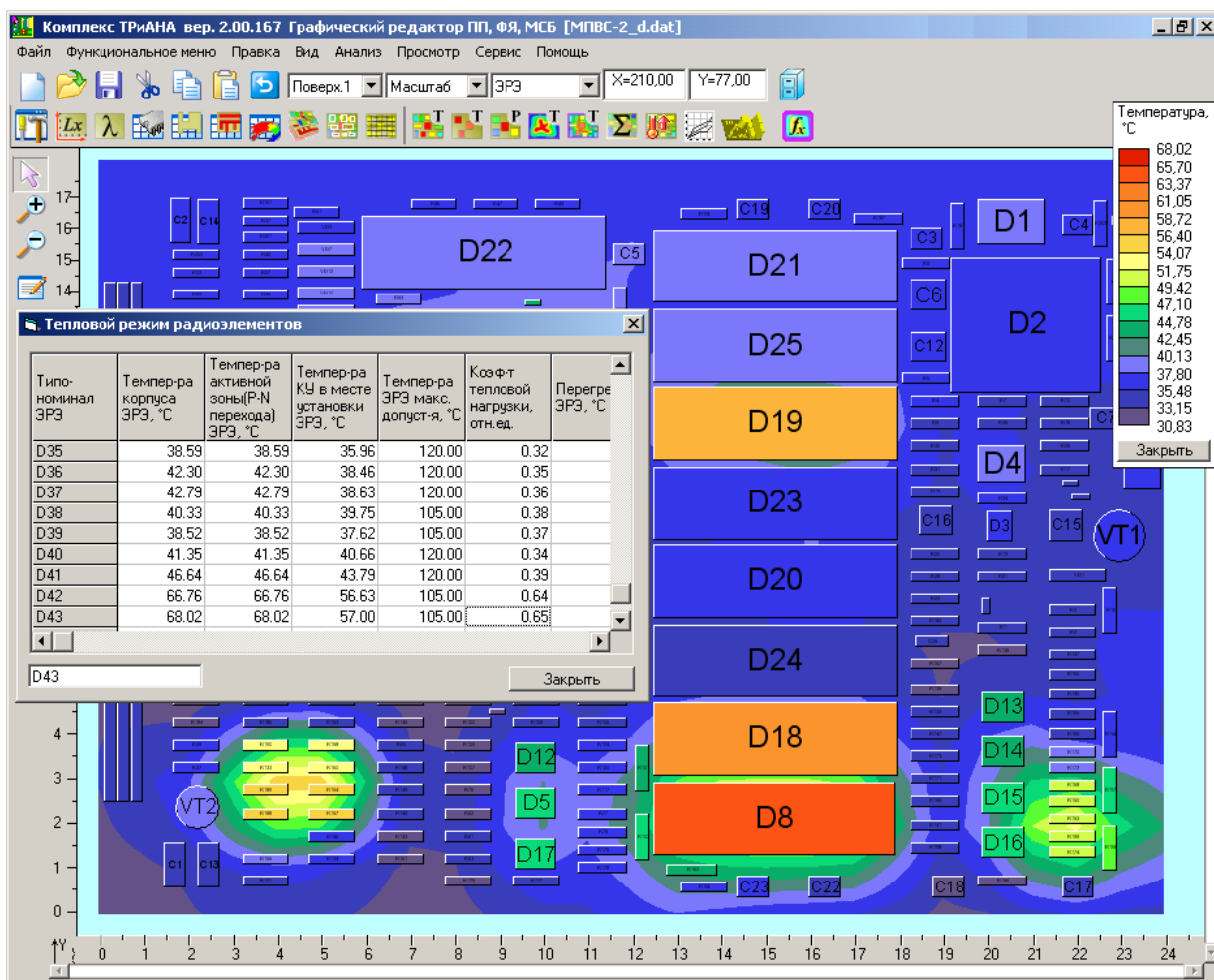


Рис. 3.72. Результаты повторного моделирования ПУ А7 после перераспределения ЭРЭ

В заключении следует отметить, что полученные интегральные характеристики (см. [рис. 3.69, б](#)) отличаются от принятых в первом приближении данных при анализе блока в целом (см. [параграф 2.10](#)). В этой связи, используя полученные интегральные характеристики ПУ А7, можно выполнить повторный анализ теплового режима блока с целью уточнения граничных условий. Однако в рассматриваемом случае увеличение площади теплоотдающей поверхности ЭРЭ для ПУ А7 приведет к некоторому улучшению тепловых характеристик блока. Ориентируясь на наихудший случай, связанный, в том числе, и с погрешностью моделирования, в данном случае можно пренебречь такой процедурой.

4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Описанный в главах 1–3 ПК *ТРИАНА*, являющийся ядром подсистемы *АСОНИКА-Т*, применялся в процессе промышленного проектирования РЭА различного назначения. Результаты исследований, полученные посредством математического моделирования, позволили предложить и обосновать принципиальные изменения, вносимые в ряд проектов. Эти изменения помогли улучшить как тепловые характеристики конструкций РЭА, так и их показатели надежности и унификации. В данной главе рассмотрены некоторые такие примеры применения ПК *ТРИАНА*.

4.1. Исследование тепловых характеристик стоечной конструкции гидроакустического комплекса

Объект исследований – 6-этажная стоечная конструкция гидроакустического комплекса с водяным охлаждением ([рис. 4.1](#)). Объект установки – морские корабли и суда.

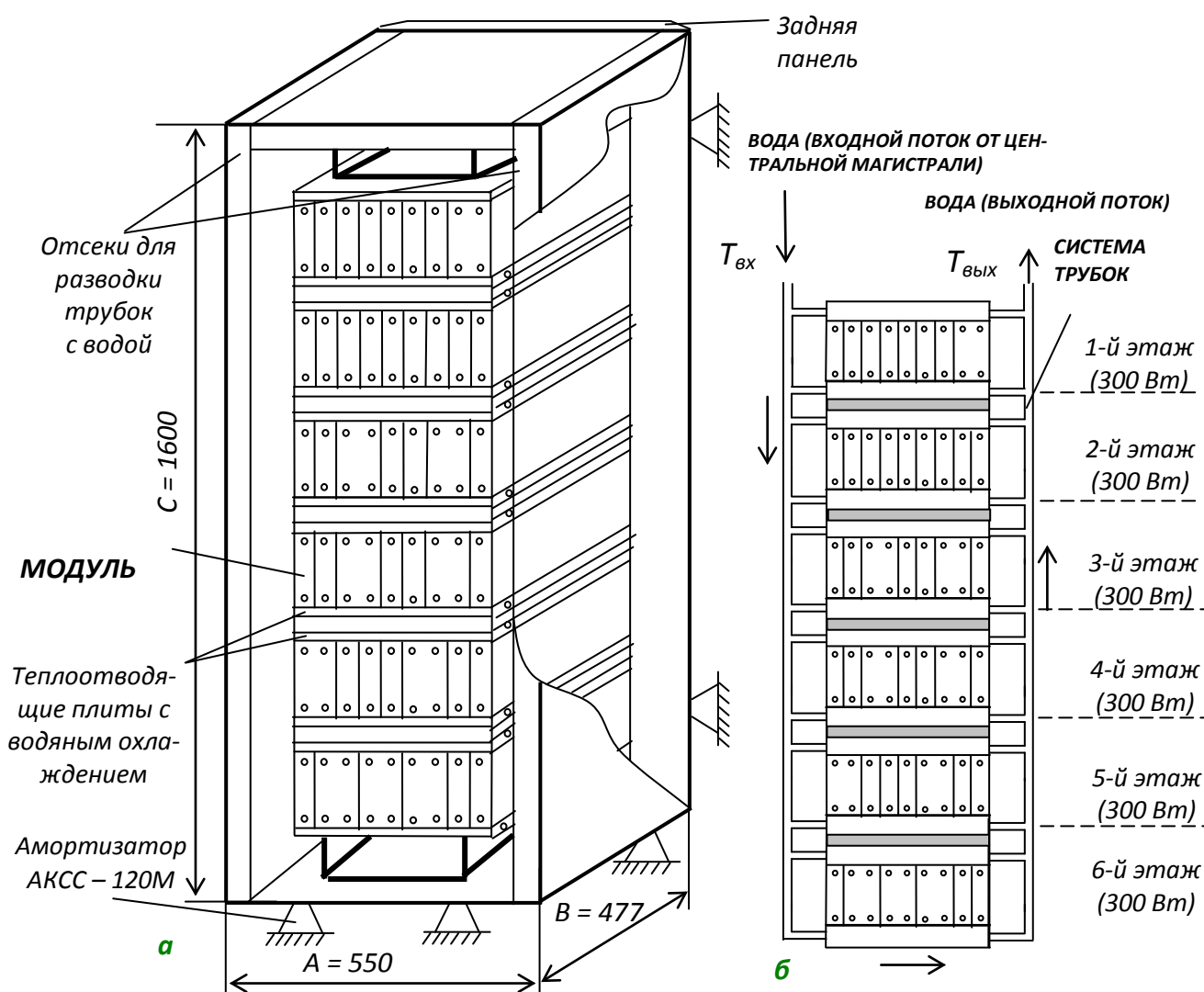


Рис. 4.1. Эскиз 6-этажной стоечной конструкции с водяным охлаждением: а – общий вид; б – схема охлаждения

Стойка устанавливается на объект с использованием системы виброизоляции. На каждый этаж стойки устанавливается набор из 2-х или 4-секционных модулей. Эскиз конструкции 2-секционного модуля с обобщенной схемой размещения ЭРЭ приведен на [рис. 4.2](#).

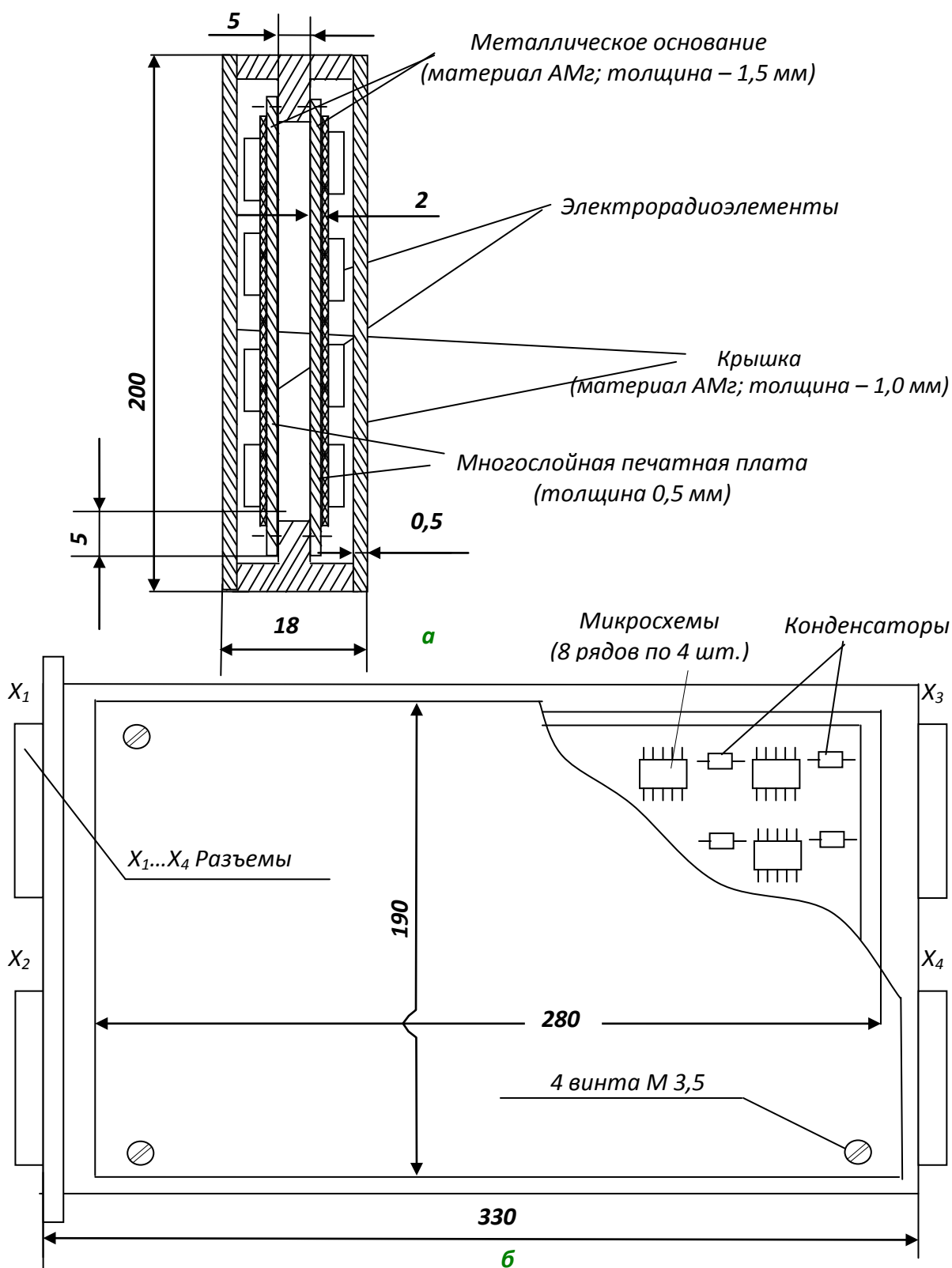


Рис. 4.2. Эскиз конструкции 2-секционного модуля: **а** – сечение модуля; **б** – функциональная ячейка, входящая в состав модуля

В состав каждого модуля входит 2 или 4 функциональные ячейки. Каждая ФЯ имеет металлическое основание, на которое наклеивается 2-слойная печатная плата (см. [рис. 4.2, а](#)).

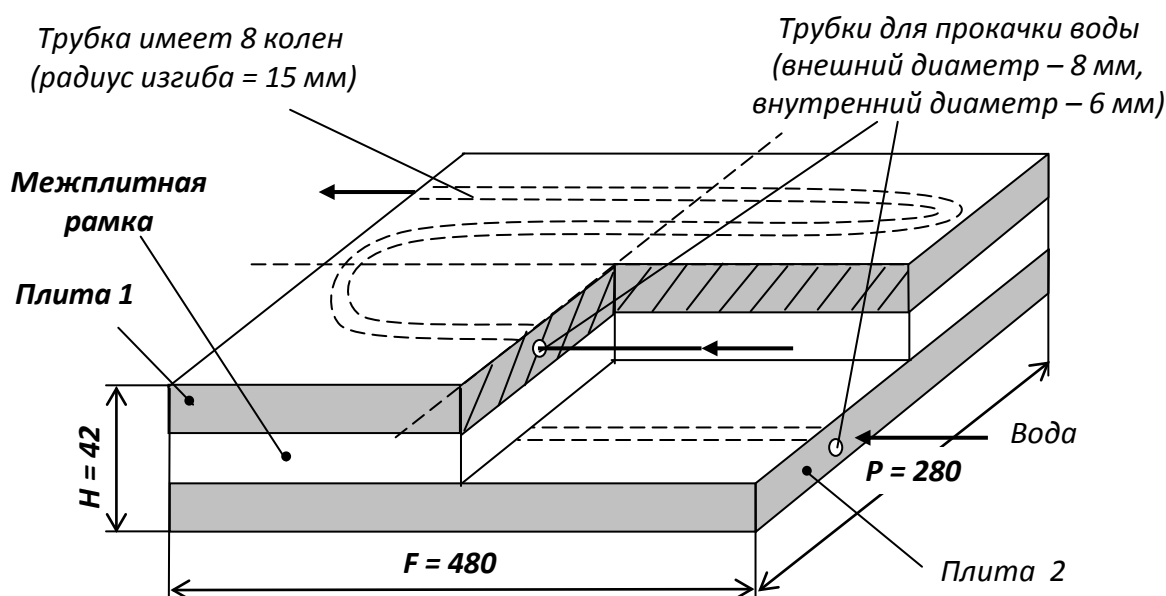


Рис. 4.3. Конструкция теплоотводящей плиты, устанавливаемой между этажами стойки

Модули устанавливаются между теплоотводящими плитами, образующими этажи стойки, при помощи специальных клиновидных распорок, обеспечивающих отдачу тепла с каждого модуля в теплоотводящие плиты посредством контактного теплообмена. На [рис. 4.1, б](#) представлена схема водяного охлаждения стойки. Теплоотводящие плиты имеют вид, приведенный на [рис. 4.3](#).

4.1.1. Постановка задачи на моделирование

Провести путем математического моделирования на ПЭВМ исследования, связанные с выявлением принципиальной возможности разработки конструктива БНК-3 с унифицированной системой охлаждения. При этом предусматривается, что новая конструкция БНК-3 будет иметь неизменную базовую часть (теплоотводящие межэтажные плиты, способы крепления модулей, все внешние панели, за исключением задней) и переменную часть (дополнительную панель – см. [рис. 4.4](#)), которая, в зависимости от условий охлаждения, может выполняться:

1. В виде пластинчатого радиатора с естественным воздушным охлаждением ([рис. 4.5, б](#)).
2. В виде пластинчатого радиатора с принудительным воздушным охлаждением ([рис. 4.5, а](#)).
3. В виде теплоотводящей плиты с водяным охлаждением ([рис. 4.5, в](#)).

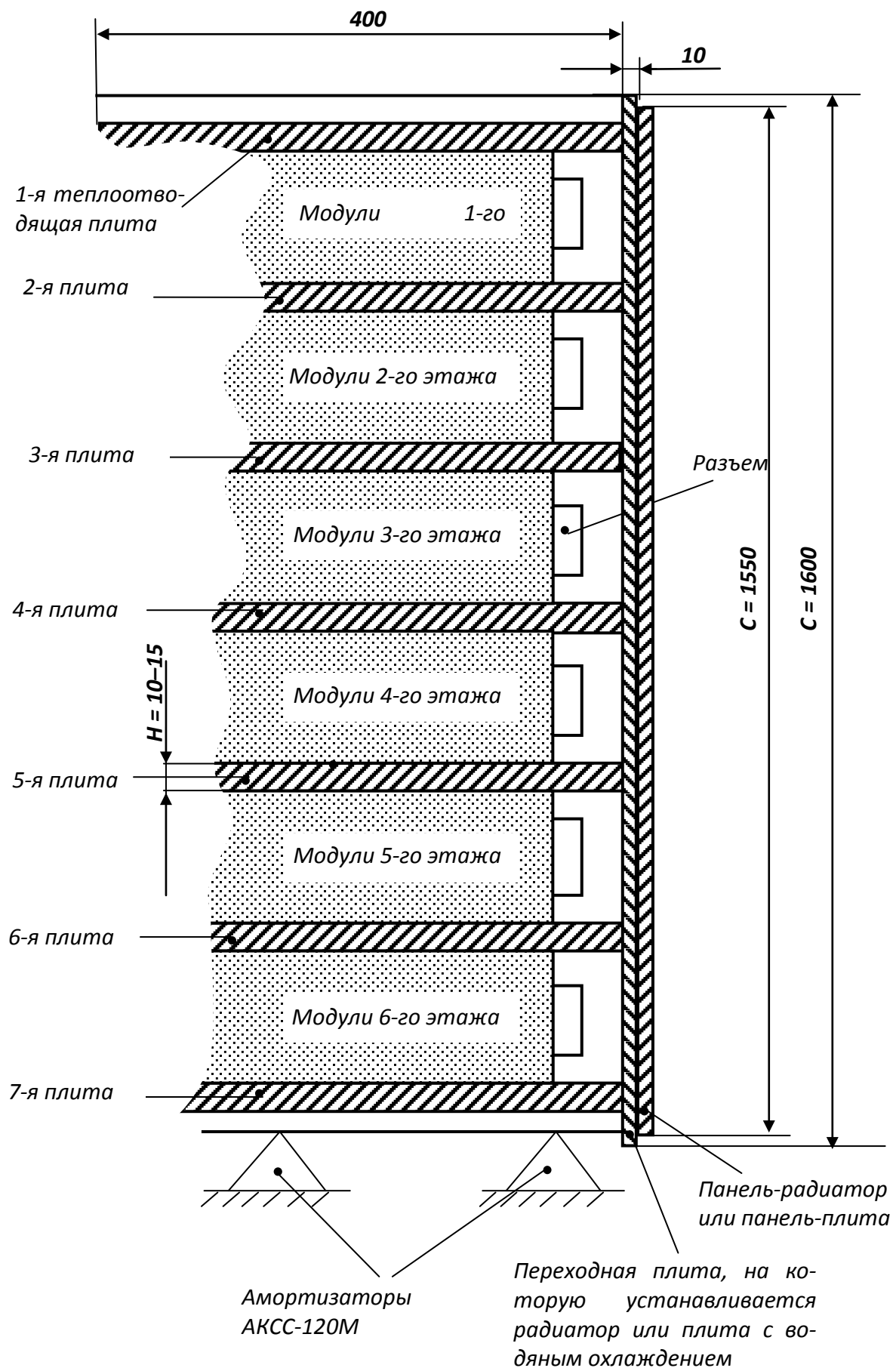


Рис. 4.4. Предлагаемый вариант конструктивного исполнения стойки

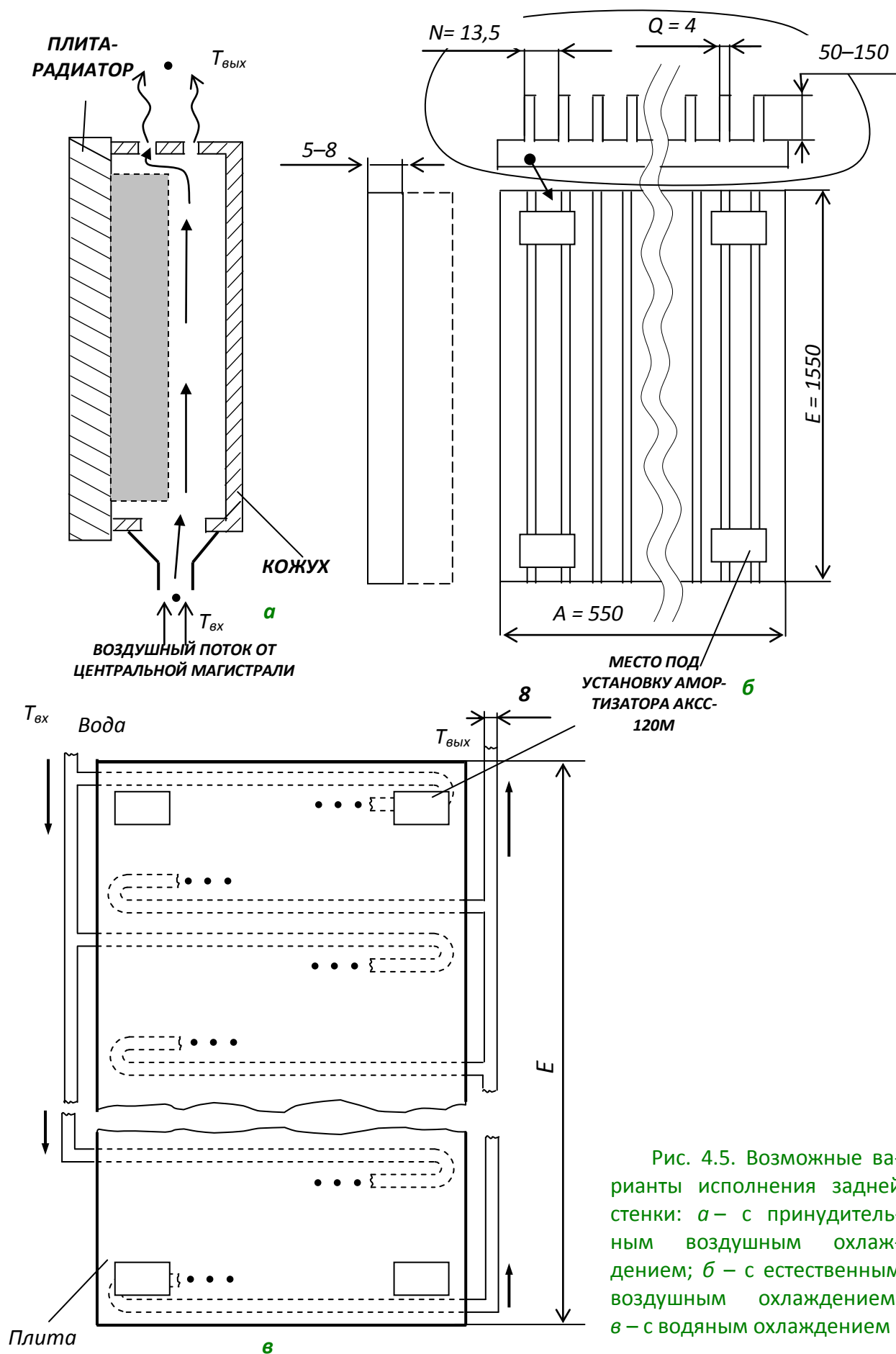


Рис. 4.5. Возможные варианты исполнения задней стенки: а – с принудительным воздушным охлаждением; б – с естественным воздушным охлаждением; в – с водяным охлаждением

В процессе проводимых исследований необходимо принять следующие значения параметров:

1. Расход воды в центральной магистрали – 300 л/час.
2. Мощность тепловыделения каждого этажа БНК-3 – 300 Вт. Мощность тепловыделений каждого 2-х секционного модуля – 12,5 Вт.
3. При исследовании тепловых характеристик функциональных ячеек базовой является ФЯ, представленная на [рис. 4.2, б](#).
4. Минимально допустимые температуры корпусов элементов, устанавливаемых на функциональных ячейках, с точки зрения обеспечения электрических характеристик и показателей надежности при любом варианте охлаждения не должны превышать + 45–47 °С.

В случае, когда не представляется возможным обеспечение необходимого теплового режима ЭРЭ, указанного выше при тепловыделении на каждом этаже, следует определить мощность этажа, при которой обеспечивается необходимый тепловой режим ЭРЭ.

4.1.2. Схема иерархического исследования тепловых характеристик стойки

Процесс моделирования стационарного теплового режима любого варианта стоечной конструкции строился по иерархической схеме, которая приведена на [рис. 4.6](#). Представленная схема ориентирована на получение локальных температур элементов, устанавливаемых на функциональной ячейке. Схема отражает последовательность применения моделей тепловых процессов различной степени детализации.

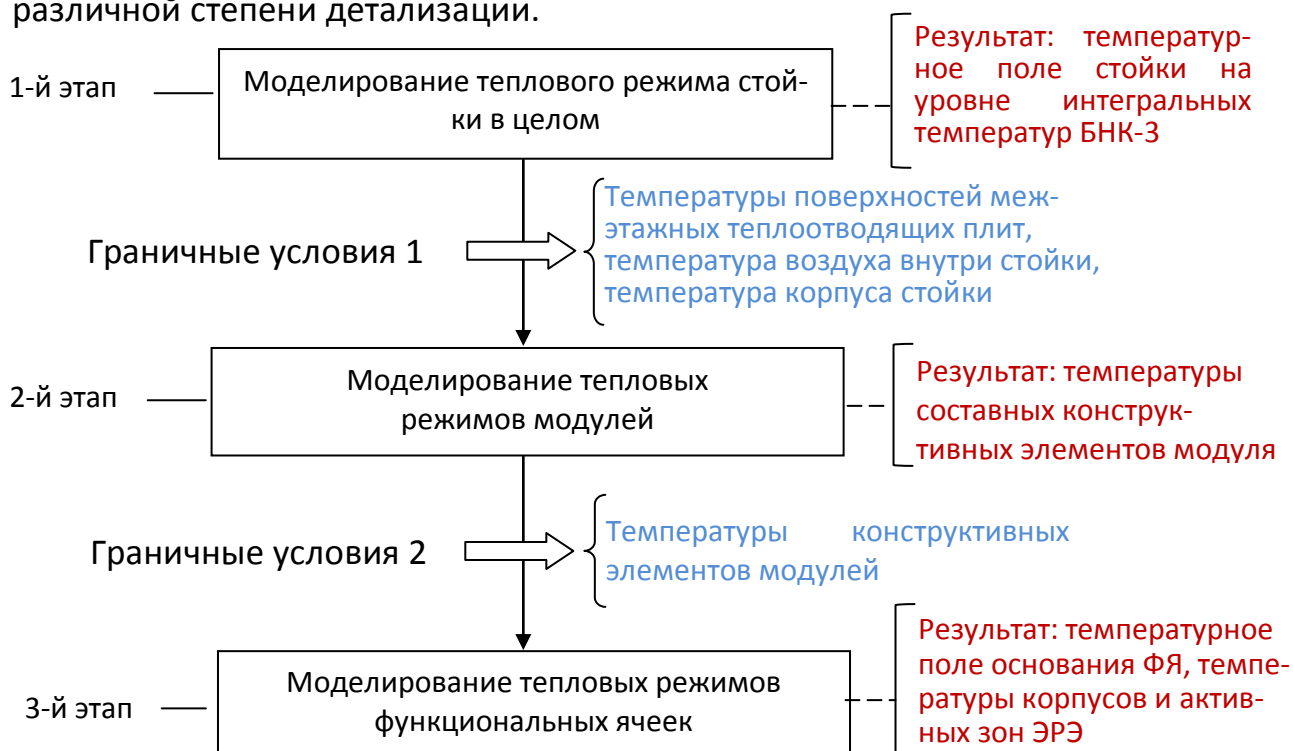


Рис. 4.6. Схема последовательности этапов исследования тепловых характеристик БНК-3

4.1.2.1. Моделирование теплового режима исходного варианта конструкции БНК-3

Основной особенностью исходного варианта конструктивного исполнения стойки БНК-3, с точки зрения протекания тепловых процессов, является наличие горизонтальных теплоотводящих плит с водяным охлаждением. С точки зрения схемы протекания воды в стойке все плиты включены параллельно, и, соответственно, нагрев воды в каждой плите не суммируется по всем плитам, а считается индивидуальным.

Для построения МТП БНК-3 были приняты следующие допущения:

1. Корпус стойки изотермичен.
2. Воздух в стойке изотермичен.
3. Каждая теплоотводящая плита изотермична.
4. Каждый этаж, состоящий из набора 24 модулей, изотермичен.
5. Теплопроводностью от этажа через элементы крепления к корпусу стойки пренебрегаем.
6. Вода в проложенной в каждой плите (см. [рис. 4.3](#)) трубке разбита на два изотермичных объема – вода на входе и вода на выходе трубки.
7. Каждая изотермичная единица (корпус, воздух и т. п.) моделировалась одним условно нагретым объемом (узлом МТП).

Исходя из принятых допущений, на [рис. 4.7](#) и [4.8](#) приведены графы тепловых моделей этажа (совокупность 24 модулей) и комплекта теплоотводящих плит, устанавливаемого на каждом этаже и состоящего из 2 плит (см. [рис. 4.3](#)).



Рис. 4.7. Модель тепловых процессов этажа: 1-й узел – условно изотермичный объем, моделирующий набор модулей, устанавливаемый на этаже; 2-й узел – верхняя теплоотводящая плита предыдущего этажа; 3-й узел – нижняя теплоотводящая плита следующего этажа; $P_{эт}$ – суммарная мощность тепловыделений во всех модулях, устанавливаемых на этаже

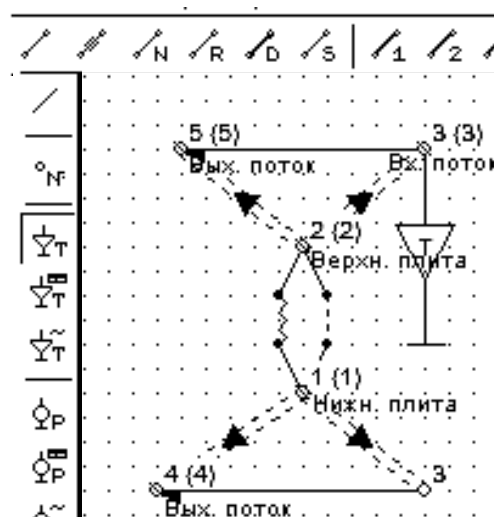


Рис. 4.8. Модель тепловых процессов комплекта теплоотводящих плит с водяным охлаждением: 1 – нижняя плита; 2 – верхняя плита; 3 – входной водяной поток; 4, 5 – выходные водяные потоки; T – температура входного водяного потока (25 °C)

Сформированная с учетом перечисленных выше допущений, разработанных моделей этажа и теплоотводящих плит МТП стойки в целом будет иметь вид в соответствии с [рис. 4.9](#).

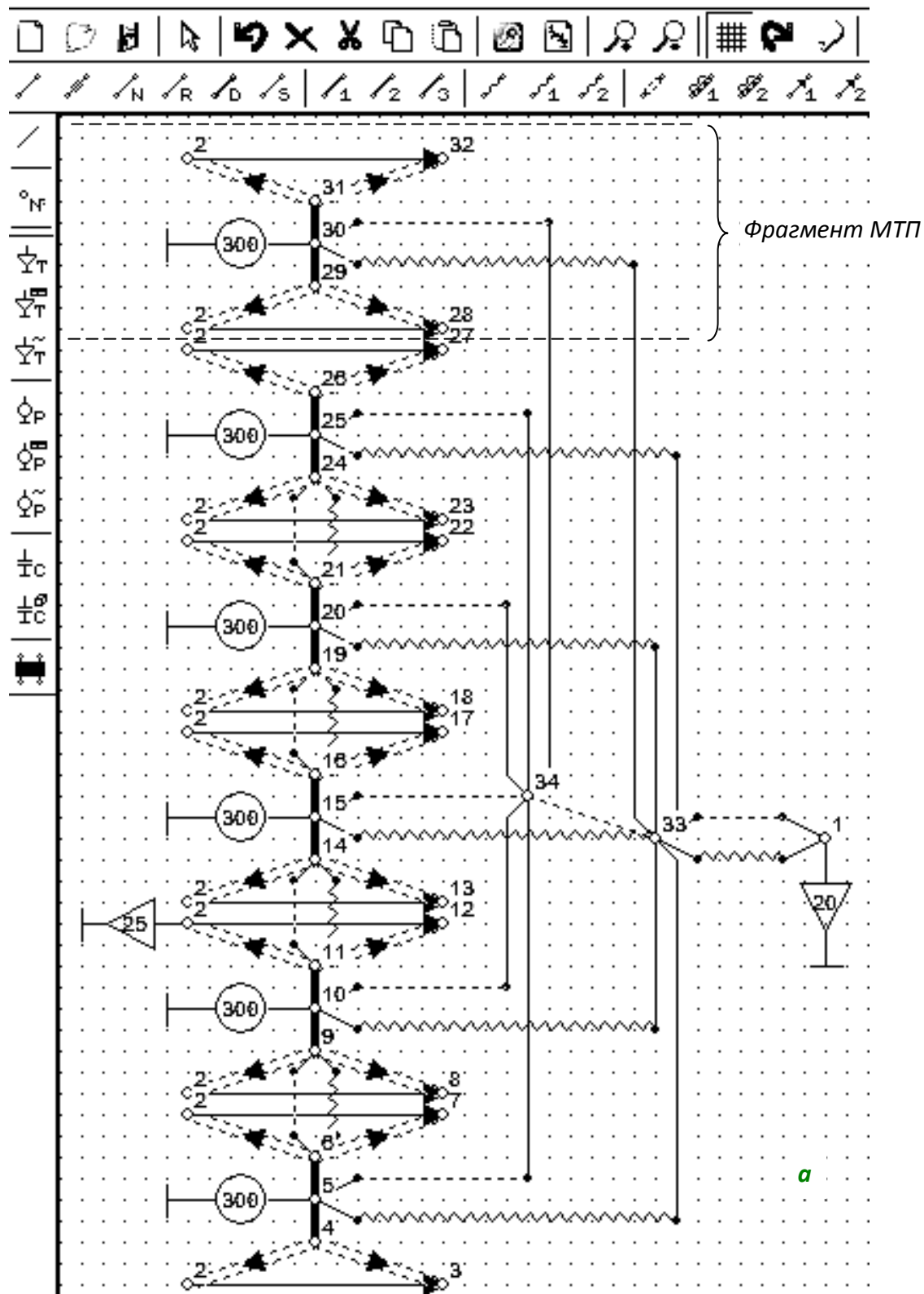


Рис. 4.9. Модель тепловых процессов исходного варианта БНК-3

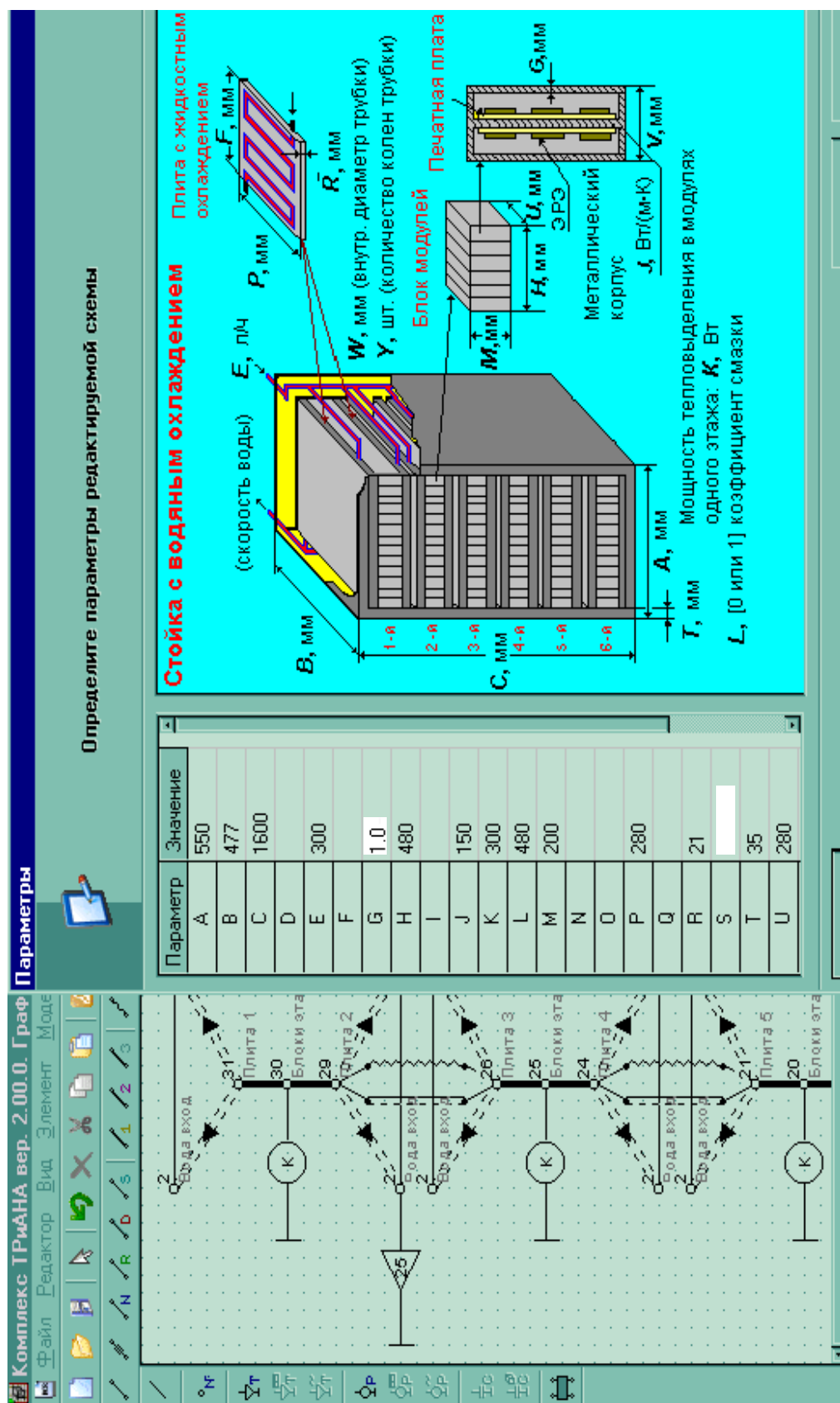


Рис. 4.9. Окончание

Тепловые процессы в стойке, описываемые приведенной МТП, протекают следующим образом. Тепловая энергия, выделяемая в модулях, например 6-го этажа, частью будет рассеиваться во внутренний воздушный объем посредством конвекции (ветвь 5–34; тип 26) и передаваться поверхности стойки (кожуху) излучением (ветвь 5–33; тип 16) и с него рассеиваться в окружающую среду посредством излучения и конвекции (ветви 1–33; типы 16 и 26). Большая часть энергии через контакт передается теплоотводящим горизонтальным плитам (ветви 4–5, 5–6; тип 11). Внутри плит проложены медные трубки, с которых вынужденной конвекцией тепловая энергия передается протекающей по ним воде (ветви 2–4, 3–4, 2–6, 6–7; тип 65). Вода нагревается и выносит тепло из зоны нагрева в центральную магистраль (ветви 2–3, 2–7; тип 75). Аналогичная картина будет наблюдаться и на других этажах стойки.

Тепловыделение этажа будет равно сумме тепловыделений в модулях этого этажа, т. е. тепловыделение модуля надо умножить на число модулей на этаже (24 шт.). Полученная при этом мощность и будет мощностью источников тепловыделения этажа, включенных в узлы 5, 10, 15, 20, 25, 30 модели.

С учетом того, что вода для охлаждения плит поступает из центральной магистрали, она моделируется одним изотермичным объемом с заданной температурой – температурой воды на входах в плиты +25 °С. Скорость воды была рассчитана из условия расхода 300 л/ч в целом на стойку. Так как в стойке 12 межэтажных плит, то расход на плиту составил 25 л/ч, что при внутреннем диаметре трубы в 6 мм дает скорость 0,25 м/с.

Окружающая среда будет моделироваться в МТП узлом 1, к которому подключается источник температуры 20 °С.

Рассмотренная выше МТП БНК-3 может анализироваться с использованием симметрии. Для этого необходимо посредством горизонтальных плоскостей симметрии перейти к фрагменту МТП, который выделен на [рис. 4.9](#). Кроме этого, используя подход, можно выполнить параметризацию МТП, представленных на [рис. 4.7](#) и [4.8](#), используя переменные A , B , C , L , M и пр. (см. [рис. 4.1–4.3](#)), а также осуществлять хранение полученных МТП в библиотеке.

4.1.2.2. Моделирование теплового режима стойки в целом

На основе разработанной МТП стойки (см. [рис. 4.9](#)) был проведен анализ, результаты которого представлены в [табл. 4.1](#). Исходными данными для анализа являлись следующие геометрические и теплофизические параметры:

1. Мощность тепловыделения каждого этажа – 300 Вт/этаж.
2. Расход воды – 300 л/ч на стойку или, соответственно, скорость воды в трубках – 0,25 м/с при их внутреннем сечении 6 мм.
3. Температура окружающей среды – 20 °С.
4. Температура воды – 25 °С.



| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 278 |
|---|---|--|--|------------|

Таблица 4.1

Температурное поле исходного варианта стойки

| Номер узла МТП | Температура, °С | Наименование конструктивного узла | Температуры корпусов ЭРЭ min-max, °С |
|----------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 20,0 | Окружающая среда | 29–36,1 |
| 2 | 25,0 | Вода на входе плит | |
| 3 | 26,5 | Вода на выходе 12-й плиты | |
| 4 | 27,4 | 12-я плита | |
| 5 | 27,7 | Модули 6-го этажа | |
| 6 | 27,4 | 11-я плита | |
| 7 | 26,5 | Вода на выходе 11-й плиты | |
| 8 | 26,5 | Вода на выходе 10-й плиты | |
| 9 | 27,5 | 10-я плита | |
| 10 | 27,7 | Модули 5-го этажа | |
| 11 | 27,5 | 9-я плита | |
| 12 | 26,5 | Вода на выходе 9-й плиты | |
| 13 | 26,5 | Вода на выходе 8-й плиты | |
| 14 | 27,5 | 8-я плита | |
| 15 | 27,7 | Модули 4-го этажа | |
| 16 | 27,5 | 7-я плита | |
| 17 | 26,5 | Вода на выходе 7-й плиты | |
| 18 | 26,5 | Вода на выходе 6-й плиты | |
| 19 | 27,5 | 6-я плита | |
| 20 | 27,7 | Модули 3-го этажа | |
| 21 | 27,5 | 5-я плита | |
| 22 | 26,5 | Вода на выходе 5-й плиты | |
| 23 | 26,5 | Вода на выходе 4-й плиты | |
| 24 | 27,5 | 4-я плита | |
| 25 | 27,7 | Модули 2-го этажа | |
| 26 | 27,5 | 3-я плита | |
| 27 | 26,5 | Вода на выходе 3-й плиты | |
| 28 | 26,5 | Вода на выходе 2-й плиты | |
| 29 | 27,4 | 2-я плита | |
| 30 | 27,7 | Модули 1-го этажа | |
| 31 | 27,4 | 1-я плита | |
| 32 | 26,5 | Вода на выходе 1-й плиты | |
| 33 | 23,9 | Корпус стойки | |
| 34 | 24,7 | Воздух в стойке | |

Вывод. Перегрев водяного потока на каждом этаже составляет 1,5 °С, а межэтажных плит – 2,5 °С.

4.1.2.3. Модель теплового режима модуля в целом

Моделирование теплового режима стойки в целом с использованием полученных температур межэтажных плит и интегральных температур этажей позволяет провести анализ тепловых режимов модулей (см. [рис. 4.2](#)).

При построении МТП 2-х секционного модуля были приняты следующие допущения:

1. Крышки и рамка модуля изотермичны.
2. Каждая функциональная ячейка моделируется одним условно изотермичным объемом, к которому подключается источник постоянной мощности 6,25 Вт (при тепловыделении 300 Вт/этаж).

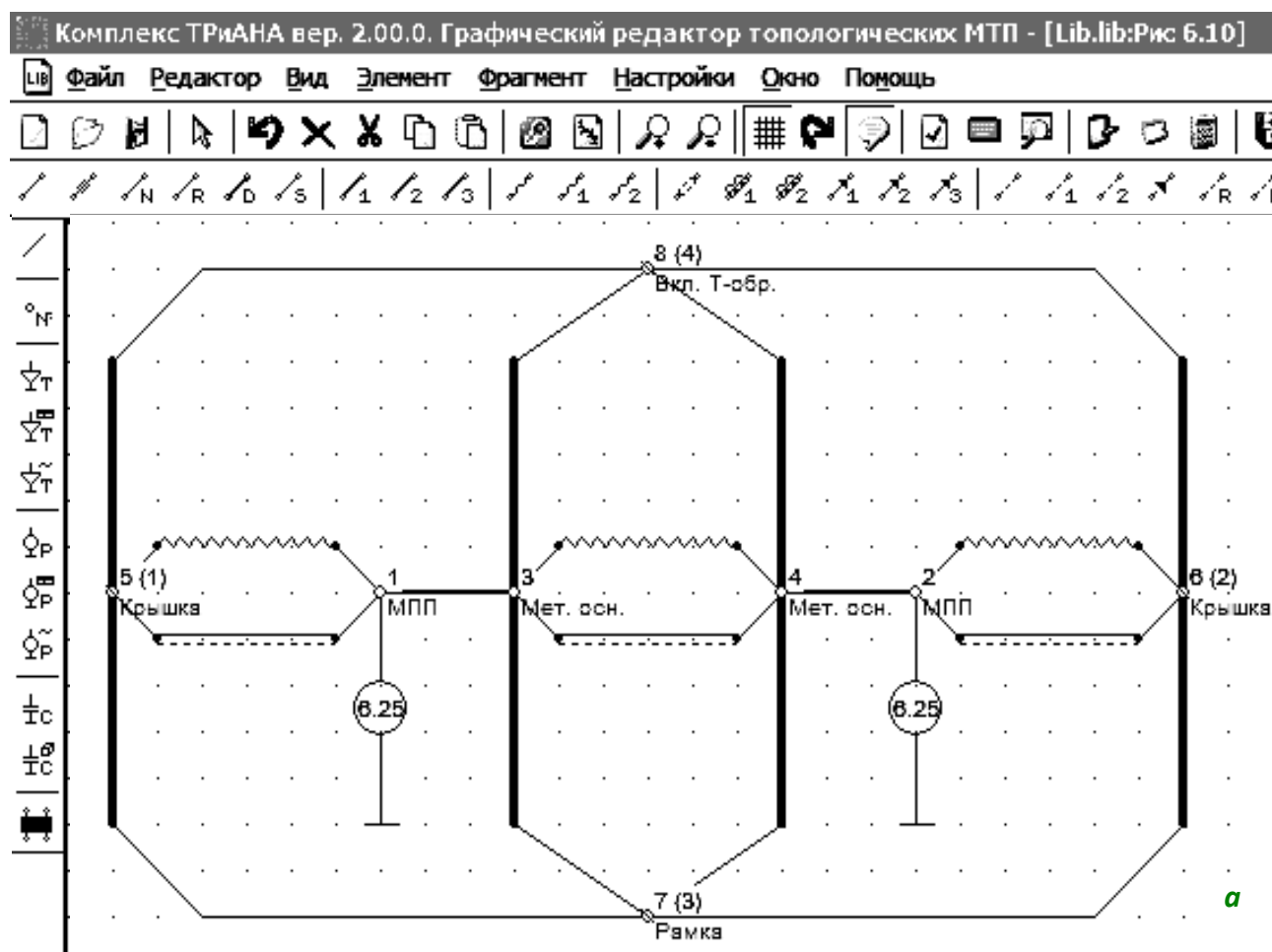
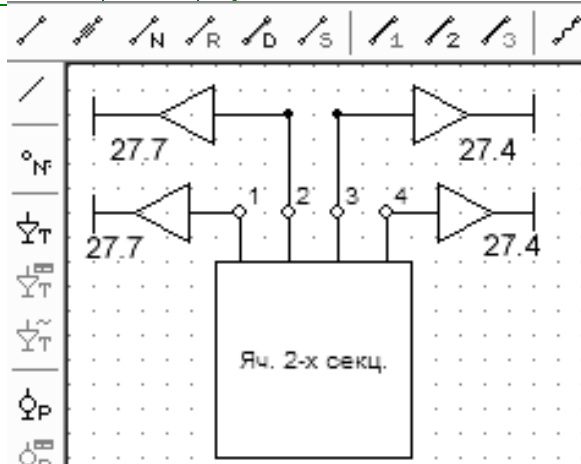


Рис. 4.10. Модель тепловых процессов (а) и граничные условия (б) 2-секционного модуля: 1, 2 – многослойные печатные платы; 3, 4 – металлические основания; 5, 6 – крышки; 7, 8 – рамка и Т-образные вкладки (см. также [рис. 4.2](#))



б

Рис. 4.10. Окончание

С учетом принятых допущений был синтезирован граф МТП модуля, общий вид которого приведен на [рис. 4.10](#). Структура синтезированной модели ориентирована на определение перегревов конструктивных элементов модуля, которые необходимы для детального моделирования тепловых процессов в ФЯ.

На [рис. 4.10, б](#) приведены граничные условия, полученные на предыдущем этапе моделирования (27,4 °С – температуры межэтажных плит; 27,7 °С – интегральные температуры соседних модулей).

В [табл. 4.2](#) приведены результаты анализа теплового режима модуля.

Таблица 4.2

Результаты анализа теплового режима модуля

| Узел МТП | Температура, °С | Наименование конструктивного элемента модуля |
|----------|-----------------|--|
| 1 | 28,4 | Печатная плата |
| 2 | 28,4 | Печатная плата |
| 3 | 28,4 | Металлическое основание |
| 4 | 28,4 | Металлическое основание |
| 5 | 28,1 | Крышка модуля |
| 6 | 28,1 | Крышка модуля |
| 7 | 28,0 | Рамка |
| 8 | 28,0 | Рамка |
| 9 | 28,1 | Крышка соседнего модуля (слева) |
| 10 | 28,1 | Крышка соседнего модуля (справа) |
| 11 | 27,7 | Плита нижняя |
| 12 | 27,7 | Плита верхняя |

Вывод. Перегрев конструктивных элементов модуля составляет менее 1,5 С.

4.1.2.4. Моделирование теплового режима функциональной ячейки

Данный этап моделирования позволяет провести анализ локальных температур элементов, устанавливаемых на ФЯ (см. [рис. 4.2](#)), с учетом граничных

условий, полученных на предыдущих этапах (см. [рис. 4.6](#)). В ПК *ТРИАНА* тепловая модель конструктивных узлов типа «печатный узел» или «функциональная ячейка» (БНК-1), как отмечалось ранее, формируются в автоматическом режиме на основе геометрических и теплофизических параметров несущей конструкции и ЭРЭ. Граничными условиями являются температуры конструктивных элементов модуля (см. [табл. 4.2](#)).

На [рис. 4.11](#) представлена условная схема задания граничных условий для анализа теплового режима функциональной ячейки. Геометрическая модель функциональной ячейки с отображенными на ней результатами моделирования приведена на [рис. 4.12](#). В [табл. 4.3](#) приведен фрагмент карты тепловых режимов работы ЭРЭ.

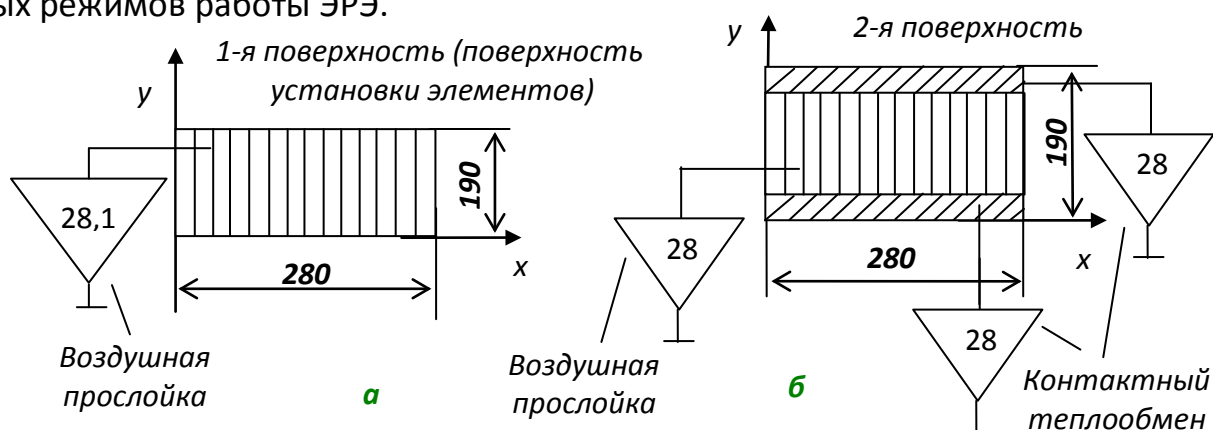


Рис. 4.11. Схема задания граничных условий для функциональной ячейки в виде совокупности локальных зон

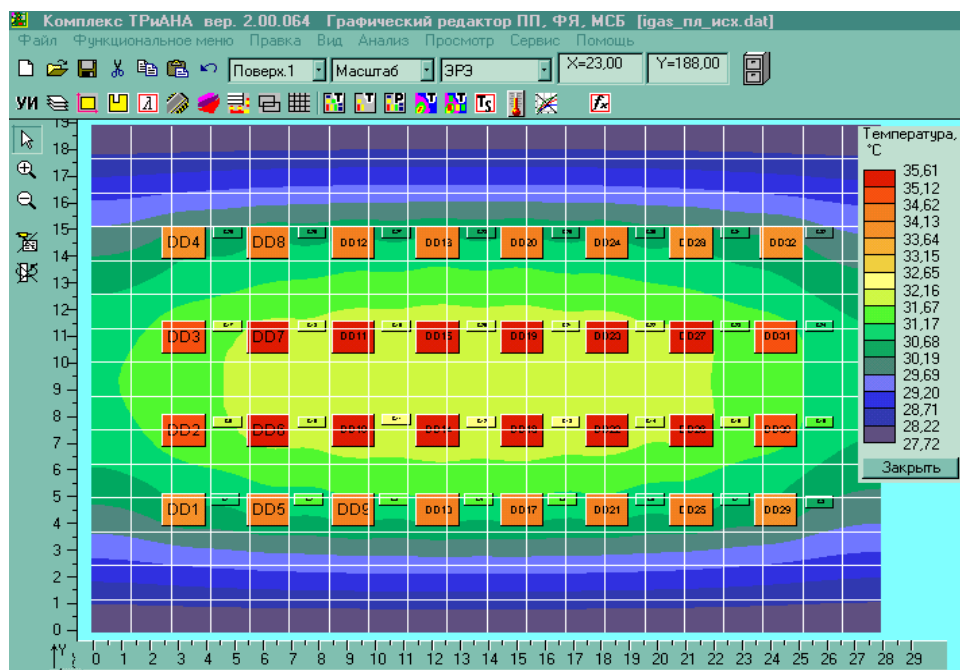


Рис. 4.12. Тепловой режим функциональной ячейки (исходный вариант конструкции)

Таблица 4.3

Карта тепловых режимов работы ЭРЭ

| № п/п | Обозн. ЭРЭ | Номер поверх. КУ | Температура корпуса ЭРЭ, °С | Температура активной зоны (Р-Н перехода) ЭРЭ, °С | Температура КУ в месте установки ЭРЭ, °С | Температура ЭРЭ макс. допустимая, °С | Коэффициент тепловой нагрузки, отн. ед. | Перегрев ЭРЭ, °С |
|-------|------------|------------------|-----------------------------|--|--|--------------------------------------|---|------------------|
| 1 | DD1 | 1 | 32,65 | 34,65 | 29,54 | 125,00 | 0,28 | |
| 2 | DD2 | 1 | 33,20 | 35,20 | 30,14 | 125,00 | 0,28 | |
| 23 | DD23 | 1 | 33,48 | 35,48 | 30,44 | 125,00 | 0,28 | |
| 24 | DD24 | 1 | 32,70 | 34,70 | 29,60 | 125,00 | 0,28 | |
| 31 | DD31 | 1 | 33,19 | 35,19 | 30,13 | 125,00 | 0,28 | |
| 32 | DD32 | 1 | 32,49 | 34,49 | 29,36 | 125,00 | 0,28 | |
| 33 | C1 | 1 | 29,64 | 29,64 | 29,65 | 125,00 | 0,24 | |
| 34 | C2 | 1 | 29,75 | 29,75 | 29,76 | 125,00 | 0,24 | |
| 41 | C9 | 1 | 30,25 | 30,25 | 30,27 | 125,00 | 0,24 | |
| 42 | C10 | 1 | 30,40 | 30,40 | 30,42 | 125,00 | 0,24 | |
| 52 | C20 | 1 | 30,30 | 30,30 | 30,31 | 125,00 | 0,24 | |
| 53 | C21 | 1 | 30,24 | 30,24 | 30,26 | 125,00 | 0,24 | |
| 63 | C31 | 1 | 29,19 | 29,19 | 29,20 | 125,00 | 0,23 | |
| 64 | C32 | 1 | 29,04 | 29,04 | 29,04 | 125,00 | 0,23 | |

Вывод. Температуры ЭРЭ лежат в диапазоне 29–33,5 °С.

4.1.3. Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при естественном воздушном охлаждении задней панели-радиатора

Предлагаемый вариант конструктивного исполнения БНК-3, как отмечалось ранее, отличается от исходного тем, что горизонтальные теплоотводящие панели этажей осуществляют основной отвод тепла на вертикальную заднюю панель стойки. На задней панели монтируется плита, которая в зависимости от вида охлаждения имеет разную конструкцию. Для естественного воздушного охлаждения это пластинчатый радиатор с вертикальным расположением ребер по всей высоте плиты. Для вынужденного воздушного охлаждения – также пластинчатый радиатор, но с обдувом. Для водяного охлаждения – плита с расположенными внутри ее трубками для прокачки воды.

Для упрощения конструкции предложено исходное межэтажное теплоотводящее основание, состоящее из двух теплоотводящих плит – панелей по 8 мм ([рис. 4.1](#)), заменить на одну дюралюминиевую теплоотводящую плиту толщиной 10 мм ([рис. 4.13](#)).

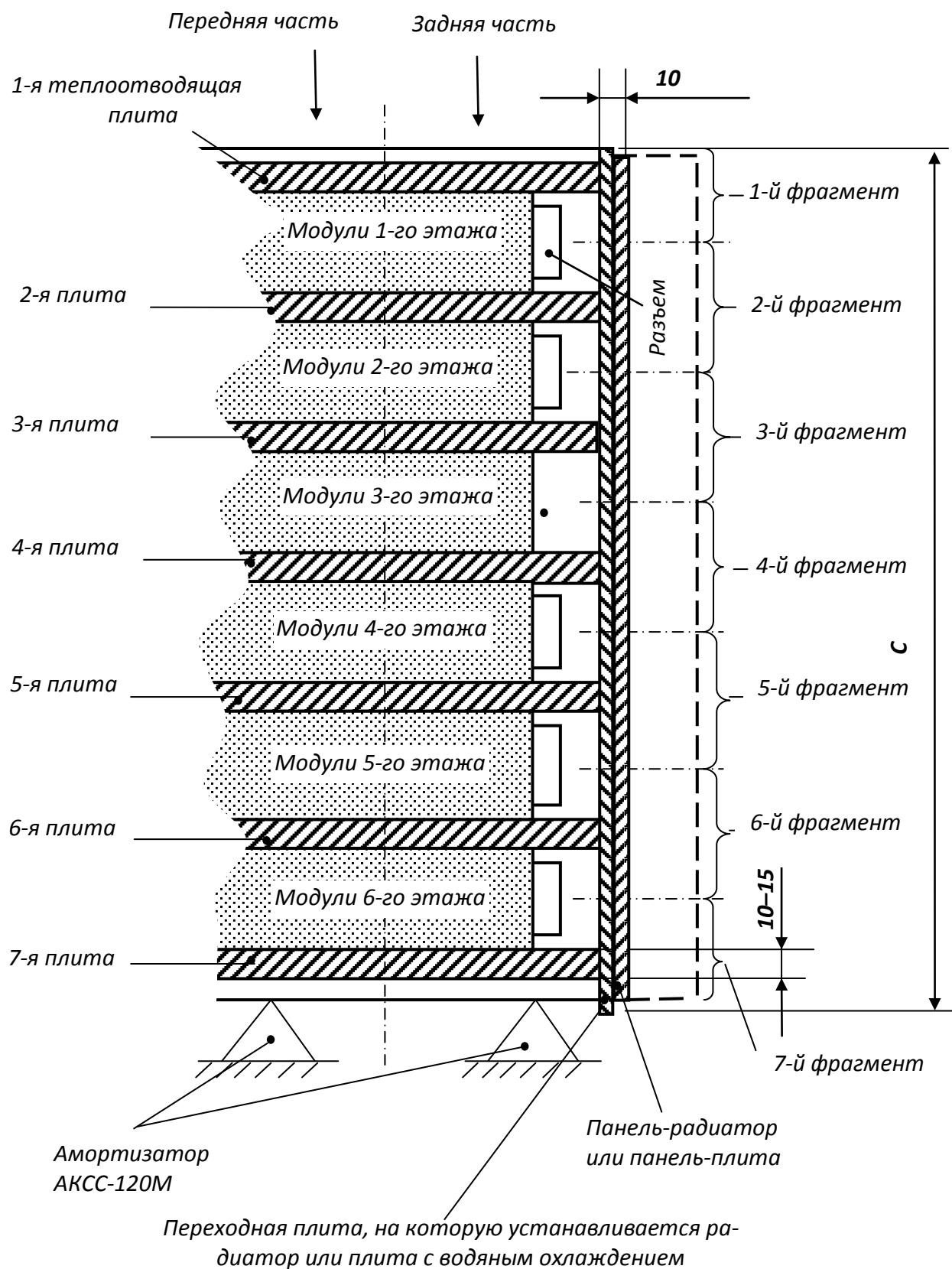
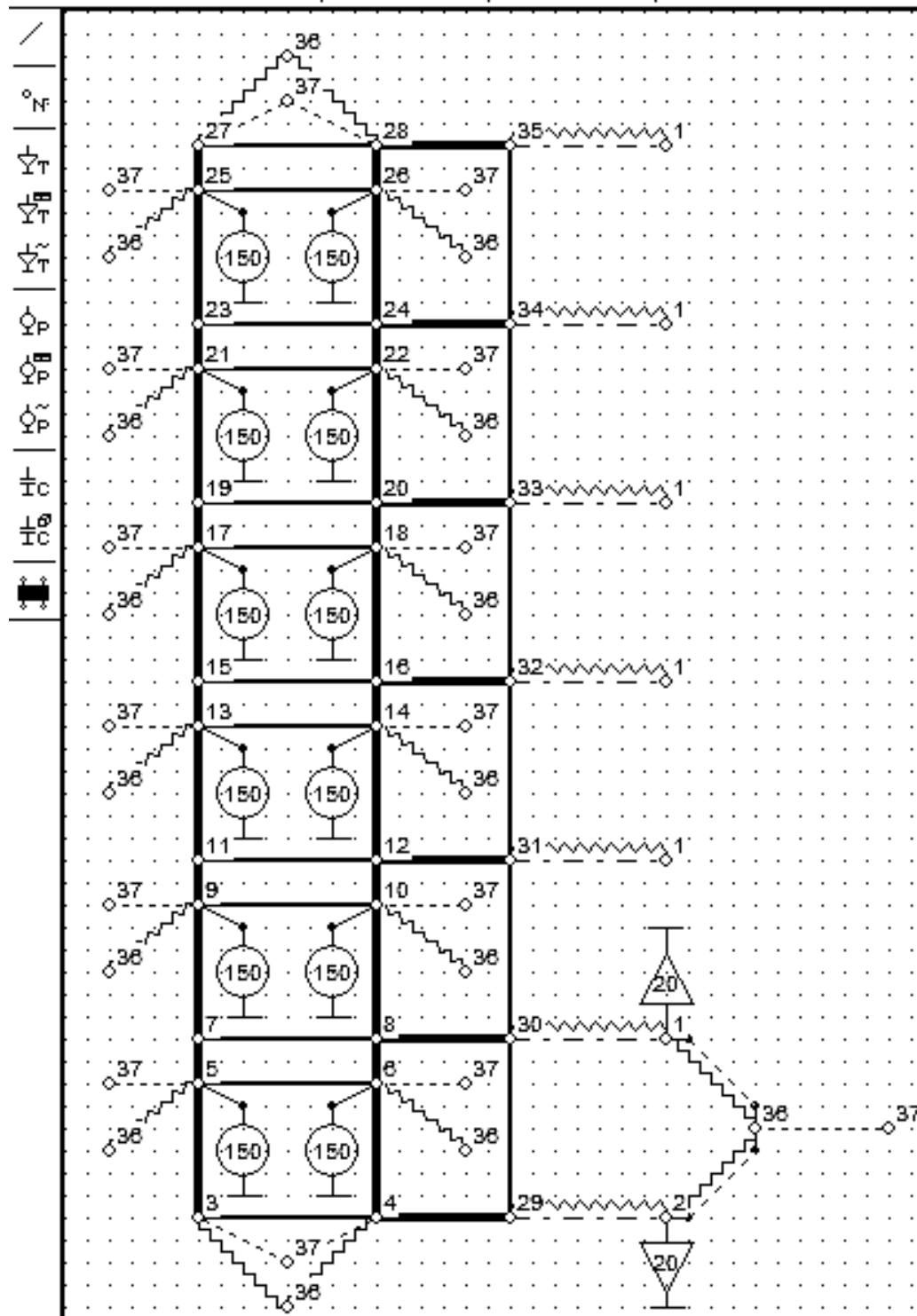


Рис. 4.13. Предлагаемый вариант конструктивного исполнения БНК-3



a

Рис. 4.14. Модель тепловых процессов конструкции стойки с естественным охлаждением задней панели-радиатора (см. [рис. 4.5, 6](#))

Рассмотрим вариант естественного воздушного охлаждения стойки (см. [рис. 4.5, б](#)). Для построения МТП рассматриваемого варианта стойки сделаем следующие допущения:

1. Корпус стойки изотермичен.
2. Воздух в стойке изотермичен.
3. Каждая горизонтальная теплоотводящая плита представляется двумя изотермичными объемами – передним и задним (см. [рис. 4.13](#)).
4. Каждый этаж формируется из двух изотермичных объемов – передней и задней частей стойки.
5. Теплопроводностью от этажа (совокупность 24 модулей) через элементы крепления к корпусу стойки пренебрегаем.
6. Переходная плита и радиатор представляются семью изотермичными объемами (см. фрагменты 1–7 на [рис. 4.13](#)).

Построенная с учетом описанных выше допущений МТП БНК-3 представлена на [рис. 4.14](#).

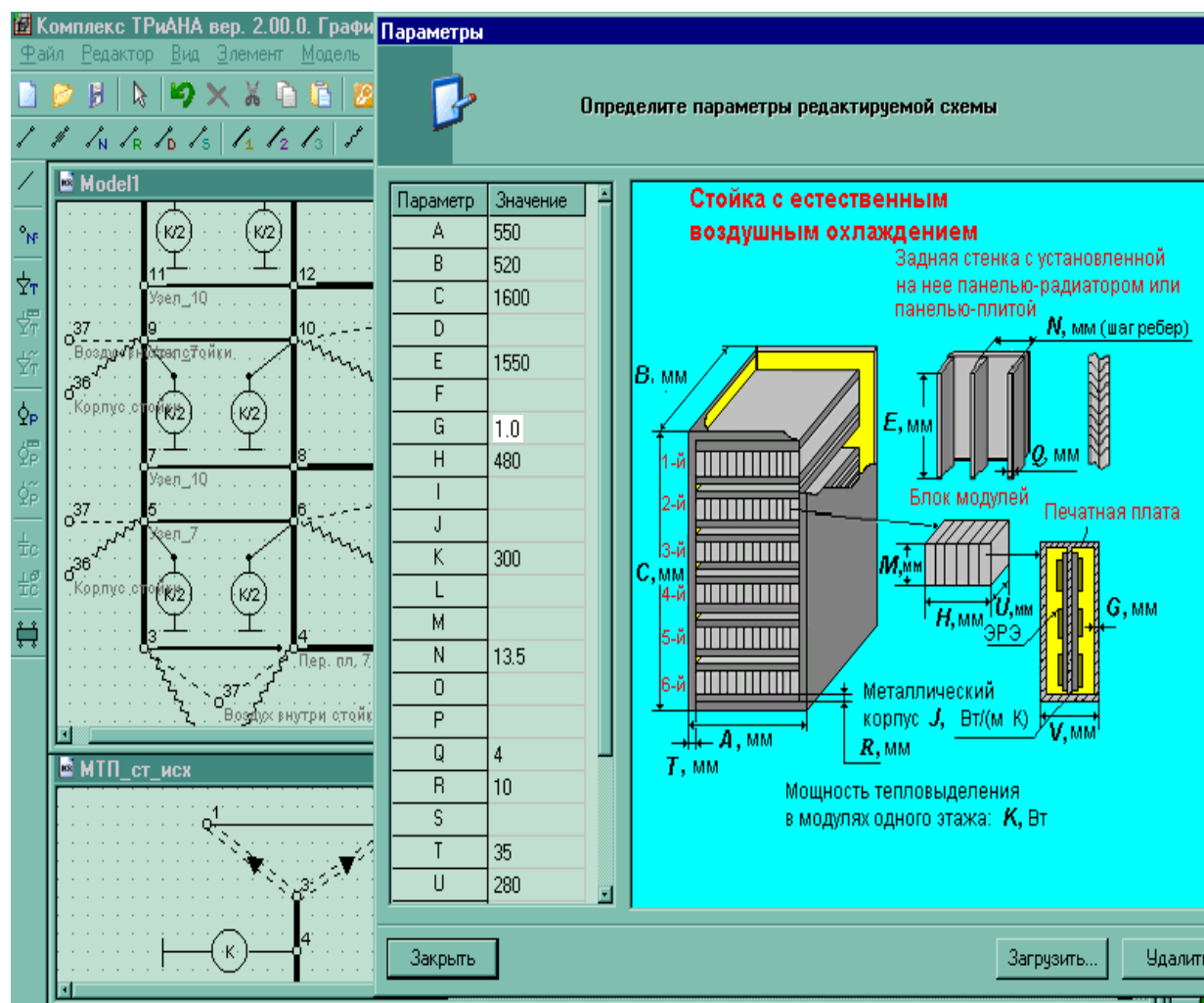


Рис. 4.14. Окончание

Картина протекания тепловых процессов, описываемая разработанной моделью, будет выглядеть следующим образом. Тепловая энергия, например 6-го этажа, с его поверхности будет рассеиваться во внутренний воздушный объем конвекцией (ветвь 5–37, 6–37; тип 26) и передаваться корпусу стойки излучением (ветвь 5–36, 6–36; тип 16), а также посредством контактного теплообмена теплоотводящим плитам этажа (ветви 5–3, 4–6; тип 11). По этим панелям (передняя часть панелей) тепловая энергия посредством теплопроводности (ветви 3–4, 5–6; тип 2) будет передаваться в заднюю часть панелей. Далее посредством контактного теплообмена (ветви 4–29, 8–30; тип 11) передаваться на заднюю переходную теплоотводящую панель. От нее тепловая энергия будет передаваться также посредством контактного теплообмена на панель, выполненную в виде пластинчатого радиатора и с нее рассеиваться в окружающую среду (ветви 29–2, 30–1; тип 36). Аналогичная картина будет наблюдаться и на других этажах стойки.

Особенностью рассматриваемой МТП является то, что каждый этаж разбит на две части – переднюю и заднюю. Соответственно, суммарная мощность тепловыделения этажа моделируется двумя источниками тепловыделения. Например, для шестого этажа – это источники, подключенные к узлам 5 и 6.

4.1.3.1. Выбор параметров оребрения панели-радиатора

На основе разработанной МТП конструкции БНК-3 с естественным охлаждением задней панели-радиатора была проведена серия вычислительных экспериментов для выбора геометрических параметров панели-радиатора (см. [рис. 4.5, 6](#)).

В качестве элементов конструкции, температуры которых контролировались в ходе вычислительных экспериментов, были выбраны горизонтальные межэтажные теплоотводящие плиты. Температуры указанных плит определяют условия охлаждения модулей каждого этажа и соответствующих функциональных ячеек, входящих в их состав.

Расчет температур передних и задних частей горизонтальной плиты проводился при разной высоте и количестве ребер пластинчатого радиатора. Все параметры стойки, кроме исследуемых, а также межэтажных плит, имели значения базового решения.

В ходе вычислительного эксперимента исследовалось влияние параметров сочленения межэтажных горизонтальных плит с вертикальной теплоотводящей переходной плитой (см. [рис. 4.15](#)). Такими параметрами являлись наличие/отсутствие в зазоре сочленения теплоотводящей смазки и ширина полосы контакта горизонтальных и вертикальной плит. В ходе эксперимента исследовалось также влияние толщины горизонтальной теплоотводящей плиты на значения контролируемых параметров. Результаты исследований сведены в [табл. 4.4–4.7](#).

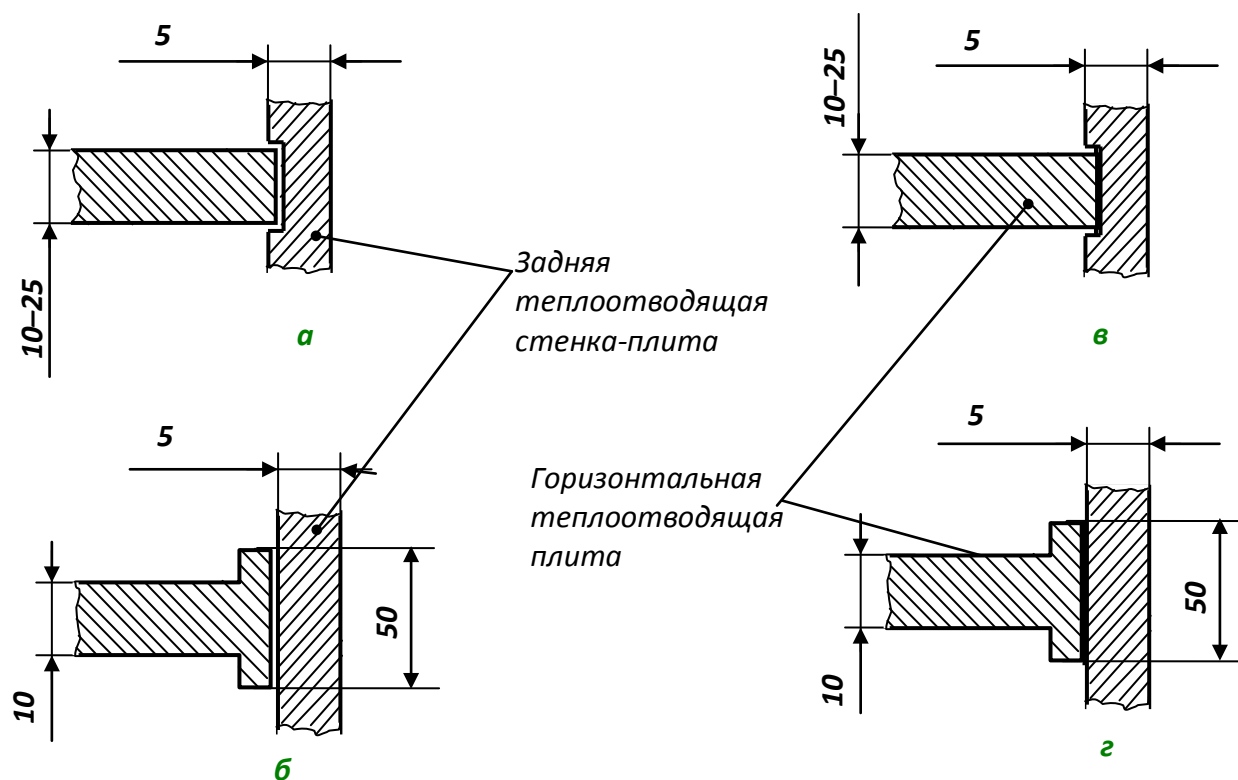


Рис. 4.15. Варианты сочленения горизонтальной и вертикальной теплоотводящих плит: сухой контакт (а, б); межконтактное пространство заполнено пастой КПТ-8 (в, г)

Таблица 4.4

Зависимость температур горизонтальной межэтажной плиты от высоты ребер

| Высота ребра, мм | Температура передней части плиты, °C | Температура задней части плиты, °C | Средняя температура плиты, °C |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 50 | 64,4 | 58,7 | 61,6 |
| 80 | 55,9 | 49,8 | 52,9 |
| 120 | 49,9 | 43,6 | 46,8 |
| 150 | 47,1 | 40,7 | 43,9 |

Таблица 4.5

Зависимость температур горизонтальной плиты от числа ребер (высота ребер – 120 мм)

| Число ребер, шт | Температура передней части плиты, °C | Температура задней части плиты, °C | Средняя температура плиты, °C |
|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 41 | 49,9 | 43,6 | 46,8 |
| 45 | 45,9 | 39,4 | 42,7 |

Таблица 4.6

**Зависимости температур плиты от параметров сочленения плит
(высота ребер – 120 мм; количество ребер – 41 шт.)**

| Состояние контакта плит | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С | Температура вертикальной переходной плиты, °С |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---|
| Межэтажное пространство заполнено пастой КПТ-8 (ширина контакта 20 мм) | 50,3 | 44,0 | 47,2 | 43,2 |
| Сухой контакт (ширина контакта 20 мм) | 52,5 | 46,3 | 49,4 | 42,9 |
| Межэтажное пространство заполнено пастой КПТ-8 (ширина контакта 50 мм) | 49,9 | 43,6 | 46,8 | 43,2 |
| Сухой контакт (ширина контакта 50 мм) | 50,9 | 44,6 | 47,8 | 43,1 |

Таблица 4.7

Зависимость температуры горизонтальной плиты от ее толщины

| Толщина горизонтальной плиты, мм | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 52,4 | 51,2 | 51,8 |
| 15 | 50,9 | 44,6 | 47,8 |
| 25 | 48,0 | 43,3 | 45,7 |

Выводы

Температура межэтажной горизонтальной плиты незначительно зависит от состояния контактного пятна между плитами. Наличие смазки снижает среднюю температуру плиты в среднем на 1 °С, при полосе как 20 мм, так и 50 мм. Увеличение ширины полосы контакта уменьшает в среднем температуру на 1,5 °С. Температура задней теплоотводящей переходной плиты меняется незначительно.

Толщина плиты также незначительно влияет на температуру горизонтальной межэтажной плиты. Изменение толщины плиты с 10 до 25 мм уменьшает среднюю температуру плиты на 6,1 °С, поэтому увеличивать толщину плиты для улучшения теплового режима нецелесообразно.

4.1.3.2. Моделирование теплового режима стойки в целом

В дальнейшем для уточнения теплового режима работы выполнялось моделирование теплового режима стойки при следующих выбранных в результате исследований геометрических и теплофизических параметрах:

- мощность тепловыделения на каждом этаже – 300 Вт;

- размер задней переходной панели – 1600×550 мм;
 - размер радиатора – 1550×540×10 мм;
 - толщина ребер – 4 мм;
 - высота ребер – 120 мм;
 - шаг ребер – 13,5 мм;
 - количество ребер – 41;
 - толщина горизонтальных межэтажных плит – 10 мм;
 - переход «горизонтальная плита»–«вертикальная переходная плита» – полоса шириной 20 мм с пастой КПТ-8;
 - температура окружающей среды – 20 °С.
- Результаты моделирования сведены в [табл. 4.8](#).

Таблица 4.8

Температурное поле стойки для варианта с задней панелью-радиатором при ее естественном охлаждении

| Номер узла МТП | Температура, °С | Наименование конструктивного узла | Температуры корпусов ЭРЭ min–max, °С |
|----------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 20,0 | Окружающая среда | 49–60 |
| 2 | 20,0 | Окружающая среда | |
| 3 | 49,5 | Передняя часть 7-й плиты | |
| 4 | 43,3 | Задняя часть 7-й плиты | |
| 5 | 49,6 | Передняя часть модуля 7-го этажа | 49–60 |
| 6 | 43,3 | Задняя часть модуля 7-го этажа | |
| 7 | 49,5 | Передняя часть 6-й плиты | |
| 8 | 43,4 | Задняя часть 6-й плиты | |
| 9 | 50,0 | Передняя часть модуля 5-го этажа | |
| 10 | 43,8 | Задняя часть модуля 5-го этажа | |
| 11 | 49,9 | Передняя часть 5-й плиты | |
| 12 | 43,6 | Задняя часть 5-й плиты | |
| 13 | 50,1 | Передняя часть модуля 4-го этажа | |
| 14 | 43,8 | Задняя часть модуля 4-го этажа | |
| 15 | 49,9 | Передняя часть 4-й плиты | |
| 16 | 43,6 | Задняя часть 4-й плиты | |
| 17 | 50,1 | Передняя часть модуля 3-го этажа | |
| 18 | 43,8 | Задняя часть модуля 3-го этажа | |
| 19 | 49,9 | Передняя часть 3-й плиты | |
| 20 | 43,6 | Задняя часть 3-й плиты | |
| 21 | 50,0 | Передняя часть модуля 2-го этажа | |
| 22 | 43,8 | Задняя часть модуля 2-го этажа | |
| 23 | 49,9 | Передняя часть 2-й плиты | |
| 24 | 43,5 | Задняя часть 2-й плиты | |
| 25 | 49,6 | Передняя часть модуля 1-го этажа | |
| 26 | 43,6 | Задняя часть модуля 1-го этажа | |
| 27 | 49,5 | Передняя часть 1-й плиты | |
| 28 | 43,4 | Задняя часть 1-й плиты | |

Окончание табл. 4.8

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-------------------------------|---|
| 29 | 43,1 | Задняя стенка 7-й фрагмент | |
| 30 | 43,2 | Задняя стенка 6-й фрагмент | |
| 31 | 43,4 | Задняя стенка 5-й фрагмент | |
| 32 | 43,4 | Задняя стенка 4-й фрагмент | |
| 33 | 43,4 | Задняя стенка 3-й фрагмент | |
| 34 | 43,4 | Задняя стенка 2-й фрагмент | |
| 35 | 43,1 | Задняя стенка 1-й фрагмент | |
| 36 | 31,9 | Корпус стойки | |
| 37 | 39,8 | Воздушный объем внутри стойки | |

На основании проведенного вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что при естественном воздушном охлаждении стойки обеспечение необходимого теплового режима при базовом значении мощности рассеяния стойки ($300 \times 6 = 1800$ Вт) невозможно. В данном случае следует рекомендовать снизить мощность тепловыделения в стойке.

4.1.3.3. Моделирование теплового режима модуля в целом

По аналогии с расчетом стойки на данном этапе выполнялся анализ теплового режима модуля для варианта конструкции, в состав которой входила панель-радиатор с параметрами: высота ребер – 120 мм; шаг ребер – 13,5 мм; количество ребер – 41. На [рис. 4.16](#) приведена схема задания граничных условий, а в [табл. 4.9](#) – результаты моделирования.

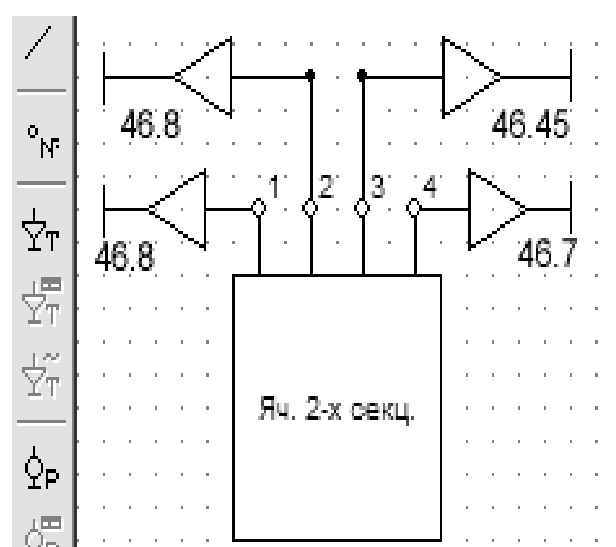


Рис. 4.16. Модель тепловых процессов 2-секционного модуля, представленная в виде библиотечного фрагмента

Таблица 4.9

Результаты анализа теплового режима модуля

| Узел МТП | Температура, °C | Наименование конструктивного элемента модуля |
|----------|-----------------|--|
| 1 | 28,4 | Печатная плата |
| 2 | 28,4 | Печатная плата |
| 3 | 28,4 | Металлическое основание |
| 4 | 28,4 | Металлическое основание |
| 5 | 28,1 | Крышка модуля |
| 6 | 28,1 | Крышка модуля |
| 7 | 28,0 | Рамка |
| 8 | 28,0 | Рамка |
| 9 | 28,1 | Крышка соседнего модуля (слева) |
| 10 | 28,1 | Крышка соседнего модуля (справа) |
| 11 | 27,7 | Плита нижняя |
| 12 | 27,7 | Плита верхняя |

4.1.3.4. Моделирование теплового режима функциональной ячейки

Используя температуры конструктивных элементов модуля (см. [табл. 4.9](#)), осуществлялся детальный анализ теплового режима функциональной ячейки. На [рис. 4.17](#) приведена схема задания граничных условий для ФЯ. В [табл. 4.8](#) приведены значения температур, полученные в результате моделирования.

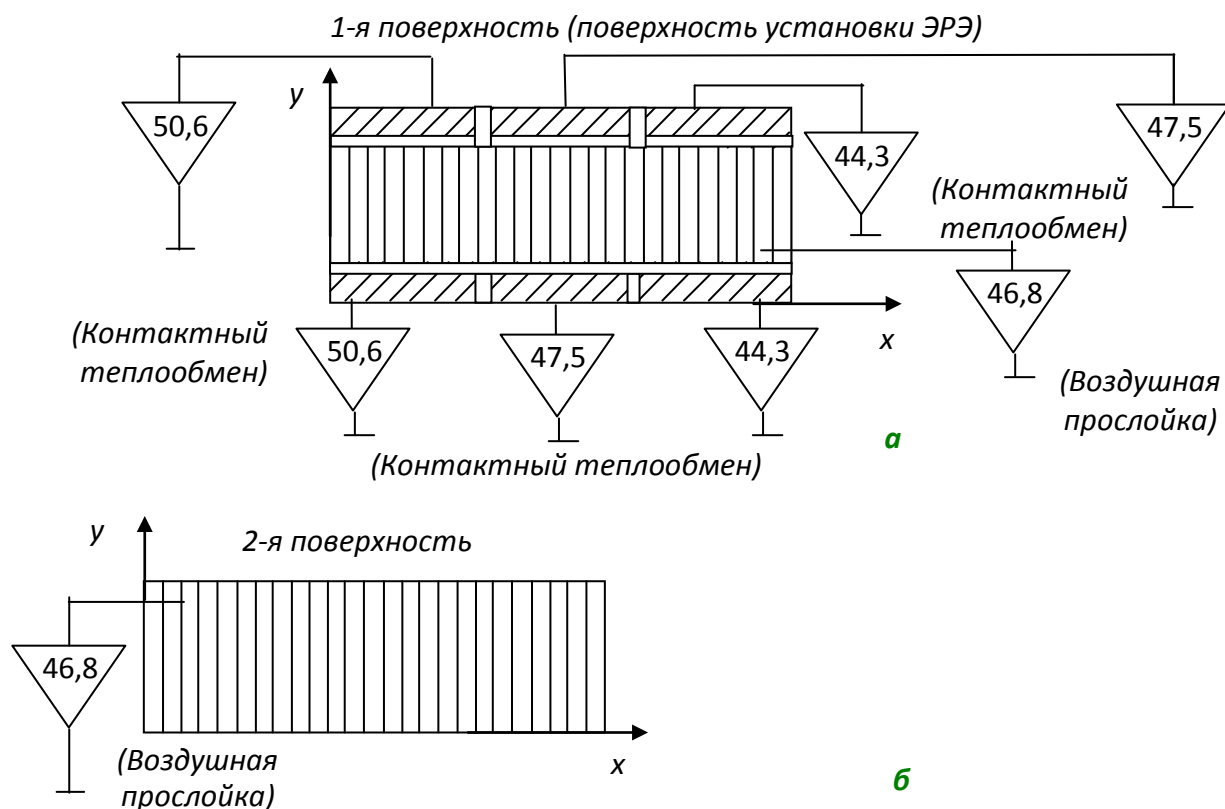


Рис. 4.17. Схема задания граничных условий для функциональной ячейки (естественное охлаждение панели-радиатора)

Выводы

При естественном воздушном охлаждении плиты-радиатора (параметры плиты-радиатора: высота ребер – 120 мм; шаг ребер – 13,5 мм; количество ребер – 41) температуры ЭРЭ лежат в диапазоне 49–60 °С. Для обеспечения нормального теплового режима в условиях естественного охлаждения необходимо снизить мощность тепловыделений в стойке. В этом случае необходимо воспользоваться графиком, приведенным на [рис. 4.18](#).

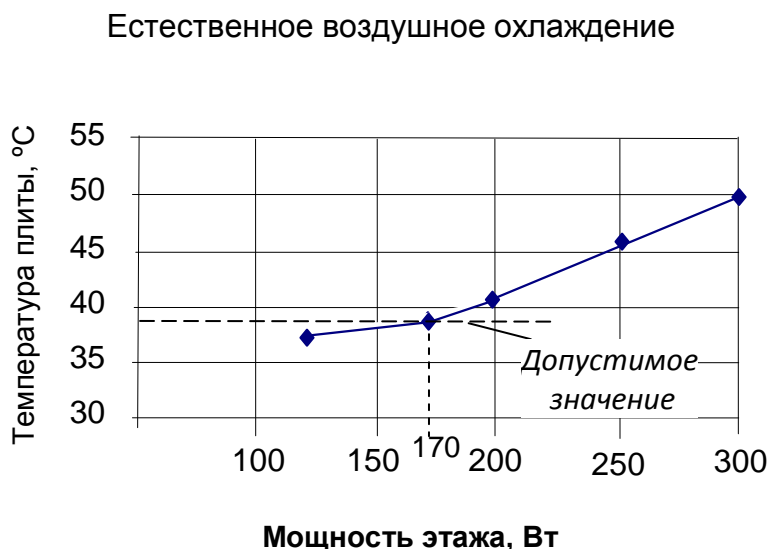


Рис. 4.18. Зависимость температуры межэтажной плиты от мощности тепловыделения на этаже

Принцип получения приведенного графика заключается в следующем. После анализа теплового режима ФЯ путем обратного расчета подбираются максимально допустимые температуры условий охлаждения, при которых возможно обеспечение теплового режима радиоэлементов ФЯ, ограничения на которые задаются на уровне 45–47 °С. Выполнение ука-

занной процедуры показало, что средняя температура межэтажной теплоотводящей плиты не должна превышать 38 °С. Эта температура и определяет максимальную допустимую мощность рассеяния на этаже. Так, для воздушного естественного охлаждения допустимый уровень тепловыделения должен составлять не более 170 Вт на этаж. При данном значении мощности температуры ЭРЭ лежат в диапазоне 34,5–42 °С.

4.1.3.5. Моделирование теплового режима конструкции БНК-3 при принудительном воздушном охлаждении задней панели-радиатора

Рассматриваемый в данном параграфе вариант конструктивного исполнения стойки БНК-3 отличается от рассмотренного в [параграфе 4.1.3.4](#) тем, что радиатор охлаждается воздушным потоком (см. [рис. 4.5, а](#)).

При построении МТП стойки рассматриваемого варианта были сделаны допущения, аналогичные принятым для варианта стойки с естественным воздушным охлаждением задней панели-радиатора. Построенная с учетом допущений МТП стойки представлена на [рис. 4.19](#).

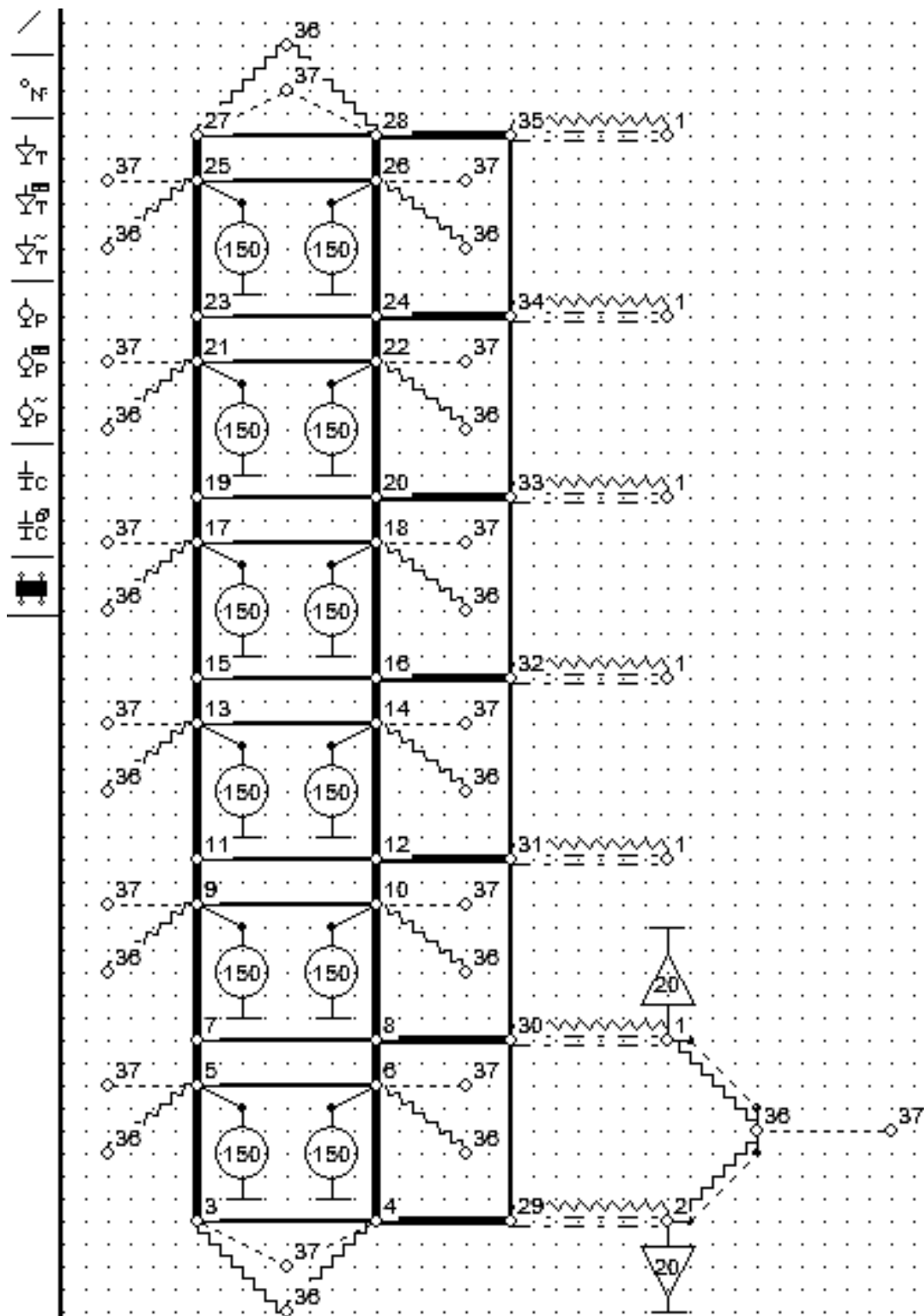


Рис. 4.19. Модель тепловых процессов конструкции стойки с вынужденным охлаждением задней панели-радиатора (см. [рис. 4.5, а](#)).

Картина протекания тепловых процессов в стойке с данным типом охлаждения будет выглядеть следующим образом. Тепловая энергия, например 6-го этажа, с его поверхности будет рассеиваться во внутренний воздушный объем конвекцией (ветви 5–37, 6–37; тип 26) и передаваться корпусу стойки излучением (ветви 5–36, 6–36; тип 16), а также посредством контактного теплопереноса – теплоотводящим панелям этажа (ветви 5–3, 4–6; тип 11). По панелям (передняя часть панелей) тепловая энергия посредством теплопроводности (ветви 3–4, 7–6; тип 2) будет передаваться в заднюю часть панели и через контакт (ветви 4–29, 8–30; тип 11) на заднюю переходную теплоотводящую панель. От переходной панели тепловая энергия будет посредством контактного теплообмена передаваться на заднюю панель – пластинчатый радиатор – и с нее сниматься воздушным потоком в окружающую среду (ветви 29–2, 30–1; тип 52). Аналогичная картина протекания тепловых процессов будет наблюдаться и на других этажах стойки.

4.1.3.6. Исследование влияния геометрических и теплофизических параметров на тепловой режим стойки

На основе МТП, приведенной на [рис. 4.19](#), были исследованы, по аналогии с предыдущим вариантом конструкции стойки, зависимости температур конструктивных элементов стойки от ряда геометрических и теплофизических параметров. Результаты исследований сведены в [табл. 4.10–4.13](#).

Таблица 4.10

Зависимости температур плиты от параметров сочленения плит

| Состояние контакта гор/вер. плита | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С | Температура переходной вертикальной плиты, °С |
|---|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---|
| Межэтажное пространство заполнено пастой КРТ-8 (ширина 20 мм) | 40,3 | 30,4 | 35,4 | 29,2 |
| Сухой контакт (ширина 20 мм) | 44,4 | 34,7 | 39,6 | 29,0 |
| Межэтажное пространство заполнено пастой КРТ-8 (ширина 50 мм) | 39,7 | 29,7 | 34,7 | 29,3 |
| Сухой контакт (ширина 50 мм) | 41,3 | 31,5 | 38,7 | 29,1 |

Таблица 4.11

Зависимость температур участков плиты от ее толщины

| Толщина горизонтальной плиты, мм | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 41,8 | 30,8 | 36,3 |
| 15 | 40,3 | 30,4 | 35,4 |
| 25 | 37,3 | 30,4 | 33,85 |

Таблица 4.12

Зависимость температур горизонтальной межэтажной плиты от скорости воздуха (количество ребер – 41; высота ребер – 70 мм; шаг установки ребер – 13,5 мм)

| Скорость воздушного потока, м/с | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1,5 | 46,3 | 36,4 | 41,4 |
| 2,5 | 43,3 | 33,3 | 38,3 |
| 3,5 | 41,7 | 31,5 | 36,6 |

Таблица 4.13

Зависимость температур плиты от числа ребер (высота ребер – 70 мм; скорость воздушного потока – 1,5 м/с)

| Число ребер, шт. | Температура передней части плиты, °С | Температура задней части плиты, °С | Средняя температура плиты, °С |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 41 | 43,3 | 33,3 | 38,5 |
| 45 | 42,4 | 32,3 | 37,4 |

Выводы

Температура горизонтальной плиты этажа незначительно зависит от состояния пятна контакта между плитами. Наличие смазки снижает температуру в среднем на 4 °С при ширине полосы 20 мм и на 2 °С при ширине полосы контакта 50 мм. При этом температура задней теплоотводящей плиты практически не меняется. Изменение толщины плиты с 10 до 25 мм уменьшает среднюю температуру плиты на 2,45 °С. Изменение скорости воздушного потока с 1,5 м/с до 3,5 м/с приводит к снижению средней температуры межэтажных плит на 4,8 °С, а увеличение количества ребер с 41 до 45 – на 1 °С.

4.1.3.7. Моделирование теплового режима стойки

Полученное в результате моделирования температурное поле стойки представлено в [табл. 4.14](#). Расчет велся при следующих выбранных в результате исследований параметрах:

- мощность тепловыделения – 300 Вт/этаж;
- размер радиатора – 1550×540×10 мм;
- толщина ребер – 4 мм;
- высота ребер – 70 мм;
- шаг ребер – 13,5 мм;
- количество ребер – 41 шт.;
- толщина межэтажных плит – 10 мм;
- переход «горизонтальная плита»–«переходная вертикальная панель» заполнен пастой КПТ-8 – контактное пятно 50 мм;
- температура окружающей среды и воздушного потока – 20 °С;
- скорость воздушного потока – 2,5 м/с.

На последующих шагах исследований были проанализированы, по аналогии с [параграфами 4.1.3.3, 4.1.3.4](#), тепловые режимы модуля и функциональной ячейки. Результаты анализа теплового режима элементной базы функциональной ячейки также сведены в [табл. 4.14](#).



Таблица 4.14

Температурное поле стойки для варианта с задней панелью-радиатором и ее принудительном охлаждении

| Номер узла МТП | Температура, °С | Название конструктивного узла | Температуры корпусов ЭРЭ min-max, °С |
|----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 20,0 | Окружающая среда | 33,8 – 43 |
| 2 | 20,0 | Окружающая среда | |
| 3 | 42,7 | Передняя часть 7-й плиты | |
| 4 | 32,8 | Задняя часть 7-й плиты | |
| 5 | 42,8 | Передняя часть модуля 7-го этажа | |
| 6 | 43,3 | Задняя часть модуля 7-го этажа | |
| 7 | 42,7 | Передняя часть 6-й плиты | |
| 8 | 33,0 | Задняя часть 6-й плиты | |
| 9 | 43,3 | Передняя часть модуля 5-го этажа | |
| 10 | 33,4 | Задняя часть модуля 5-го этажа | |
| 11 | 43,2 | Передняя часть 5-й плиты | |
| 12 | 33,2 | Задняя часть 5-й плиты | |
| 13 | 43,4 | Передняя часть модуля 4-го этажа | |
| 14 | 33,5 | Задняя часть модуля 4-го этажа | |
| 15 | 43,3 | Передняя часть 4-го плиты | |
| 16 | 33,3 | Задняя часть 4-й плиты | |
| 17 | 43,4 | Передняя часть модуля 3-го этажа | |
| 18 | 33,5 | Задняя часть модуля 3-го этажа | |
| 19 | 43,3 | Передняя часть 3-й плиты | |
| 20 | 33,3 | Задняя часть 3-й плиты | |
| 21 | 43,3 | Передняя часть модуля 2-го этажа | |
| 22 | 33,4 | Задняя часть модуля 2-го этажа | |
| 23 | 43,2 | Передняя часть 2-й плиты | |
| 24 | 33,1 | Задняя часть 2-й плиты | |
| 25 | 42,8 | Передняя часть модуля 1-го этажа | |
| 26 | 33,2 | Задняя часть модуля 1-го этажа | |
| 27 | 42,7 | Передняя часть 1-й плиты | |
| 28 | 32,8 | Задняя часть 1-й плиты | |
| 29 | 32,5 | Задняя стенка 7-й фрагмент | |
| 30 | 32,8 | Задняя стенка 6-й фрагмент | |
| 31 | 33,0 | Задняя стенка 5-й фрагмент | |
| 32 | 33,0 | Задняя стенка 4-й фрагмент | |
| 33 | 33,0 | Задняя стенка 3-й фрагмент | |
| 34 | 32,8 | Задняя стенка 2-й фрагмент | |
| 35 | 32,5 | Задняя стенка 1-й фрагмент | |
| 36 | 28,2 | Корпус стойки | |
| 37 | 33,9 | Воздушный объем внутри стойки | |

Выводы

При использовании вынужденного воздушного охлаждения задней панели-радиатора (см. [рис. 4.16](#)) тепловой режим стойки фактически обеспечивает-

| | | | |
|---|--|--|------------|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 297 |
|---|--|--|------------|

ся при базовом значении мощности тепловыделения. Однако, учитывая возможную погрешность моделирования, а также тот факт, что средняя температура межэтажной плиты (2-й этаж) превышает допустимую $\approx 0,4$ °С (см. [рис. 4.18](#)), целесообразно снизить мощность тепловыделения на этажах. Дальнейшие вычисления показали, что такое значение составляет 270 Вт/этаж.

4.1.3.8. Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при водяном охлаждении задней панели

В данном варианте конструктивного исполнения БНК-3 используется водяное охлаждение задней панели. При этом задняя плита разбивается на несколько участков (фрагментов) по высоте, которые, с точки зрения прокачки воды, включены параллельно в центральную магистраль.

При разработке МТП стойки были приняты следующие допущения:

1. Корпус стойки изотермичен.
2. Воздух в стойке изотермичен.
3. Каждая горизонтальная теплоотводящая плита представляется двумя изотермичными объемами – передней и задней частями стойки (см. [рис. 4.13](#)).
4. Каждый этаж стойки (набор модулей) состоит из двух изотермичных объемов – передняя и задняя его части.
5. Теплопроводностью от этажа (набора модулей) через элементы его крепления к корпусу стойки пренебрегаем.
6. Задняя переходная стенка и панель-радиатор представляются семью изотермичными объемами, располагаемыми по высоте (см. [рис. 4.13](#)).

Построенная с учетом перечисленных допущений МТП представлена на [рис. 4.20](#).

Картина протекания тепловых процессов в стойке будет выглядеть следующим образом. Тепловая энергия, например 6-го этажа, с его поверхности будет рассеиваться во внутренний воздушный объем конвекцией (ветви 5–37, 6–37; тип 26) и передаваться на корпус стойки излучением (ветви 5–36, 6–36 тип 16), а также посредством контактного теплообмена теплоотводящим панелям этажа (ветви 5–3, 4–6; тип 11). По этим панелям энергия из передней части теплопроводностью (ветви 3–4, 7–6; тип 2) будет передаваться в заднюю часть панелей и далее, посредством контактного теплообмена (ветви 4–29, 8–30; тип 11), на вертикальную переходную панель. От нее энергия также посредством контактного теплообмена будет передаваться на теплоотводящую панель с водяным охлаждением. Внутри панели тепловая энергия будет передаваться в водяной поток вынужденной конвекцией (ветви 29–2, 29–38; тип 65). Далее вода выносит тепло из зоны нагрева в центральную магистраль (2–38; тип 75). Аналогичная картина будет наблюдаться и на других этажах стойки.

Выбор параметров платы и условий водяного охлаждения

Скорость прокачки воды будет такая же, как в исходном варианте стойки с горизонтальными платами. Подвод воды при этом будет параллельным к каждому фрагменту – см. [рис. 4.13](#).

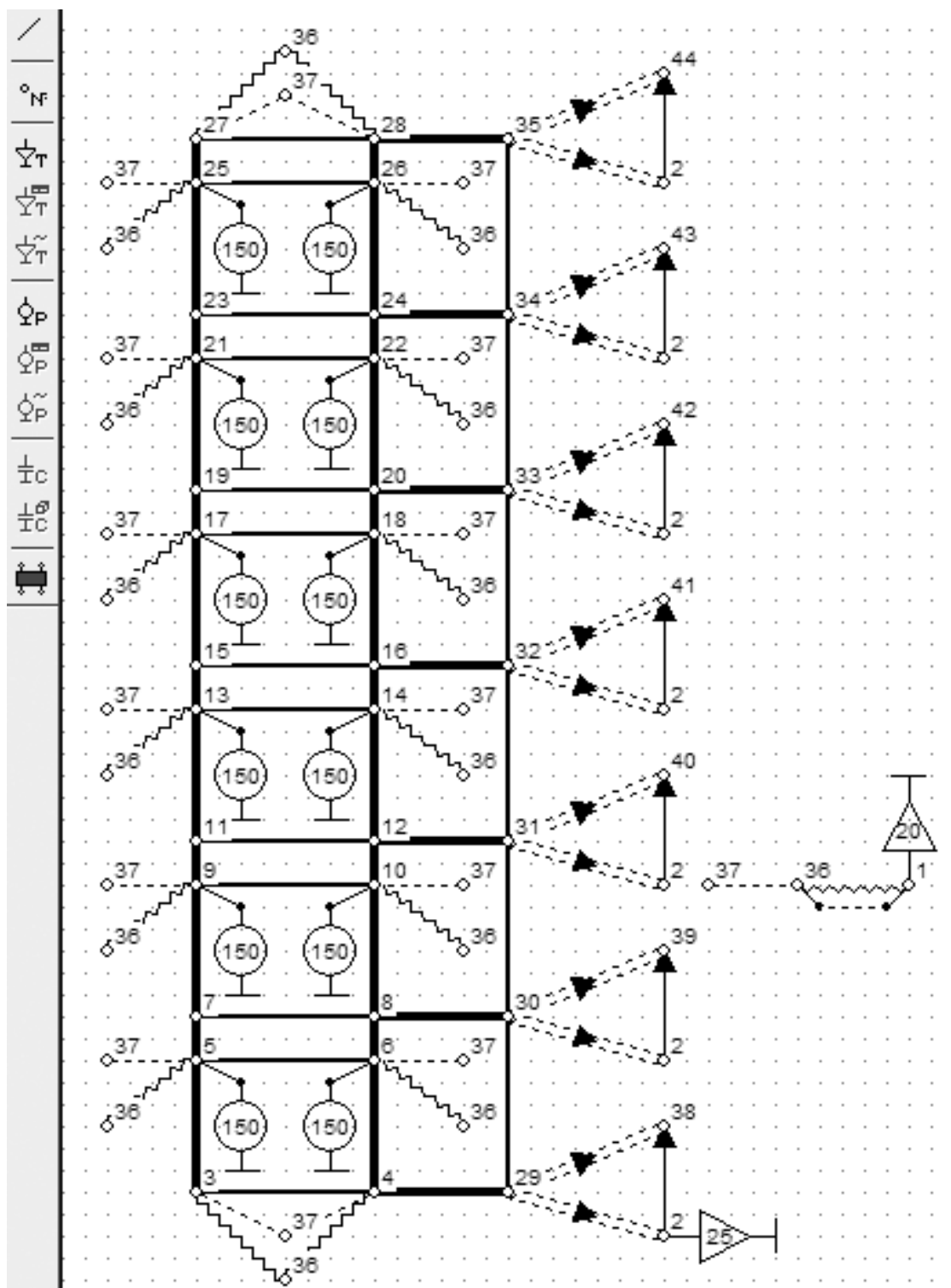


Рис. 4.20. Модель тепловых процессов конструкции стойки с водяным охлаждением задней панели (см. [рис. 4.5](#))

Соответственно, температура нагрева воды не будет суммироваться для всей задней теплоотводящей панели. Вычислительный эксперимент по исследованию тепловых характеристик стойки проводился на основе МТП, структура которой приведена на [рис. 4.20](#).

В процессе исследования изменялись следующие параметры: наличие/отсутствие смазки между горизонтальными и задней вертикальной переходной плитами ([рис. 4.15](#)); ширина полосы контактного пятна.

В результате анализа было выявлено, что температуры горизонтальных плит незначительно зависят от состояния пятна контакта между плитами. Исследования также показали, что изменение такого параметра, как толщина межэтажных плит, с 10 до 25 мм приводит к уменьшению средней температуры плит на 4,5 °С.

Моделирование теплового режима стойки

Анализ теплового режима стойки осуществлялся при следующих выбранных параметрах:

- мощность тепловыделения – 300 Вт/этаж;
- размер переходной плиты – 1600×590×10 мм;
- толщина межэтажных плит – 10 мм;
- ширина полосы контакта с задней плитой – 20 мм;
- межконтактная среда – паста КПТ-8;
- скорость воды – 0,25 м/с;
- подача воды – параллельная на все участки (фрагменты) задней стенки;
- температура окружающей среды – 20 °С;
- температура водяного потока – 25 °С.

Результаты моделирования температурного поля стойки сведены в [табл. 4.15](#). На последующих шагах исследований были проанализированы, по аналогии с [параграфами 4.1.3.3, 4.1.3.4](#), тепловые режимы модуля и функциональной ячейки. Результаты анализа теплового режима элементной базы функциональной ячейки сведены также в [табл. 4.15](#)

Таблица 4.15

Температурное поле варианта стойки при водяном охлаждении задней панели

| Номер узла МТП | Температура, °С | Название конструктивного узла | Температуры корпусов ЭРЭ min–max, °С |
|----------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 20,0 | Окружающая среда | |
| 2 | 20,0 | Окружающая среда | |
| 3 | 39,8 | Передняя часть 7-й плиты | |
| 4 | 30,4 | Задняя часть 7-й плиты | |
| 5 | 40,0 | Передняя часть 6-го этажа | |

Окончание табл. 4.15

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-------------------------------|-----------|
| 6 | 30,7 | Задняя часть 6-го этажа | 32,8–44,1 |
| 7 | 39,9 | Передняя часть 6-й плиты | |
| 8 | 30,5 | Задняя часть 6-й плиты | |
| 9 | 40,1 | Передняя часть 5-го этажа | |
| 10 | 30,8 | Задняя часть 5-го этажа | |
| 11 | 40,1 | Передняя часть 5-й плиты | |
| 12 | 30,5 | Задняя часть 5-й плиты | |
| 13 | 40,3 | Передняя часть 4-го этажа | |
| 14 | 30,7 | Задняя часть 4-го этажа | |
| 15 | 40,3 | Передняя часть 4-й плиты | |
| 16 | 30,4 | Задняя часть 4-й плиты | |
| 17 | 40,5 | Передняя часть 3-го этажа | |
| 18 | 30,6 | Задняя часть 3-го этажа | |
| 19 | 40,4 | Передняя часть 3-й плиты | |
| 20 | 30,3 | Задняя часть 3-й плиты | |
| 21 | 40,5 | Передняя часть 2-го этажа | |
| 22 | 30,5 | Задняя часть 2-го этажа | |
| 23 | 40,3 | Передняя часть 2-й плиты | |
| 24 | 30,3 | Задняя часть 2-й плиты | |
| 25 | 40,4 | Передняя часть 1-го этажа | 32,8–44,1 |
| 26 | 30,5 | Задняя часть 1-го этажа | |
| 27 | 40,2 | Передняя часть 1-й плиты | |
| 28 | 30,3 | Задняя часть 1-й плиты | |
| 29 | 29,6 | Задняя стенка 7-го фрагмента | |
| 30 | 29,2 | Задняя стенка 6-го фрагмента | |
| 31 | 29,2 | Задняя стенка 5-го фрагмента | |
| 32 | 29,1 | Задняя стенка 4-го фрагмента | |
| 33 | 29,1 | Задняя стенка 3-го фрагмента | |
| 34 | 29,1 | Задняя стенка 2-го фрагмента | |
| 35 | 29,5 | Задняя стенка 1-го фрагмента | |
| 36 | 26,9 | Корпус стойки | |
| 37 | 31,7 | Воздушный объем внутри стойки | |
| 38 | 27,1 | Вода на выходе 7-го фрагмента | |
| 39 | 27,6 | Вода на выходе 6-го фрагмента | |
| 40 | 27,6 | Вода на выходе 5-го фрагмента | |
| 41 | 27,6 | Вода на выходе 4-го фрагмента | |
| 42 | 27,5 | Вода на выходе 3-го фрагмента | |
| 43 | 27,5 | Вода на выходе 2-го фрагмента | |
| 44 | 27,1 | Вода на выходе 1-го фрагмента | |

Выводы

Водяное охлаждение задней плиты стойки (см. [рис. 4.5, в](#)) обеспечивает ее тепловой режим в соответствии с требованиями, изложенными в задании на моделирование.

4.1.4. Сводные данные результатов исследования

Результаты приведенных исследований для всех вариантов возможного исполнения БНК-3 сведены на [рис. 4.21](#) и в [табл. 4.16](#), [4.17](#).

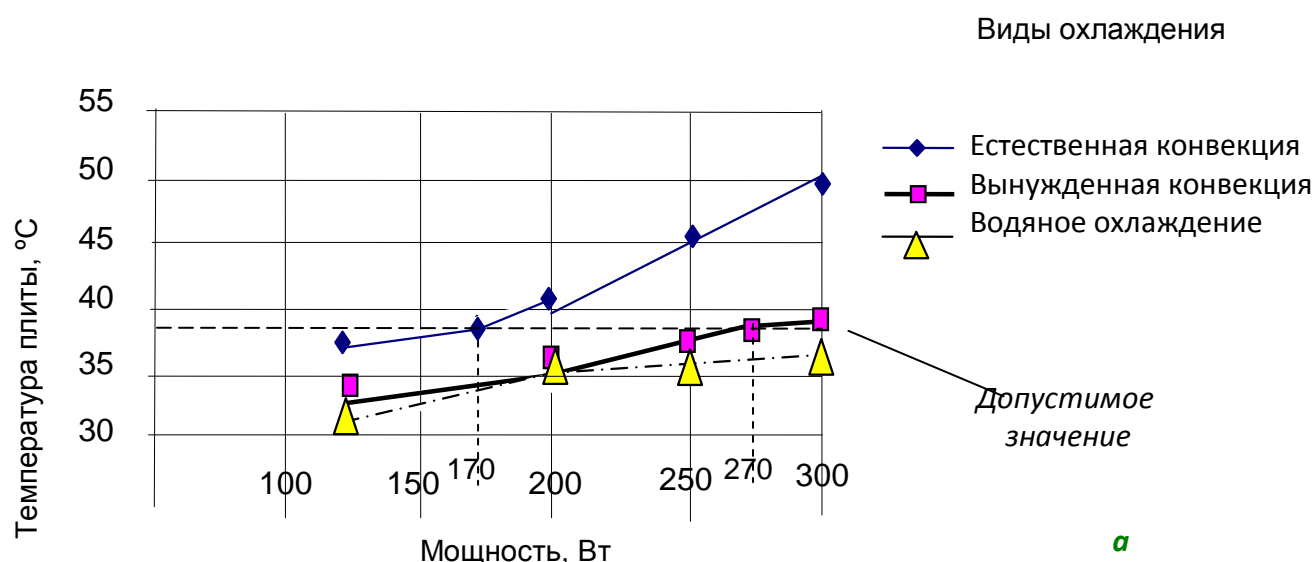


Рис. 4.21. Зависимости температур межэтажных плит–тепlostокoв БНК-3 от мощности тепловыделения на этаже: при различных видах охлаждения (а) и зависимость амплитуды виброускорения БНК-3 от частоты воздействующей гармонической вибрации (б)

Таблица 4.16

Температуры горизонтальной плиты при разных вариантах охлаждения задней панели и мощности тепловыделения на этаже

| Мощность этажа, Вт | Средняя температура межэтажной плиты, °C | | |
|--------------------|--|--------------------------------------|------------------------|
| | Естественное воздушное охлаждение, °C | Вынужденное воздушное охлаждение, °C | Водяное охлаждение, °C |
| 200 | 41,2 (37,5 при 170 Вт) | 35,6 | 35,2 |
| 250 | 45,6 | 36,9 | 35,3 |
| 300 | 49,9 | 38,1 (37,5 при 270 Вт) | 35,4 |

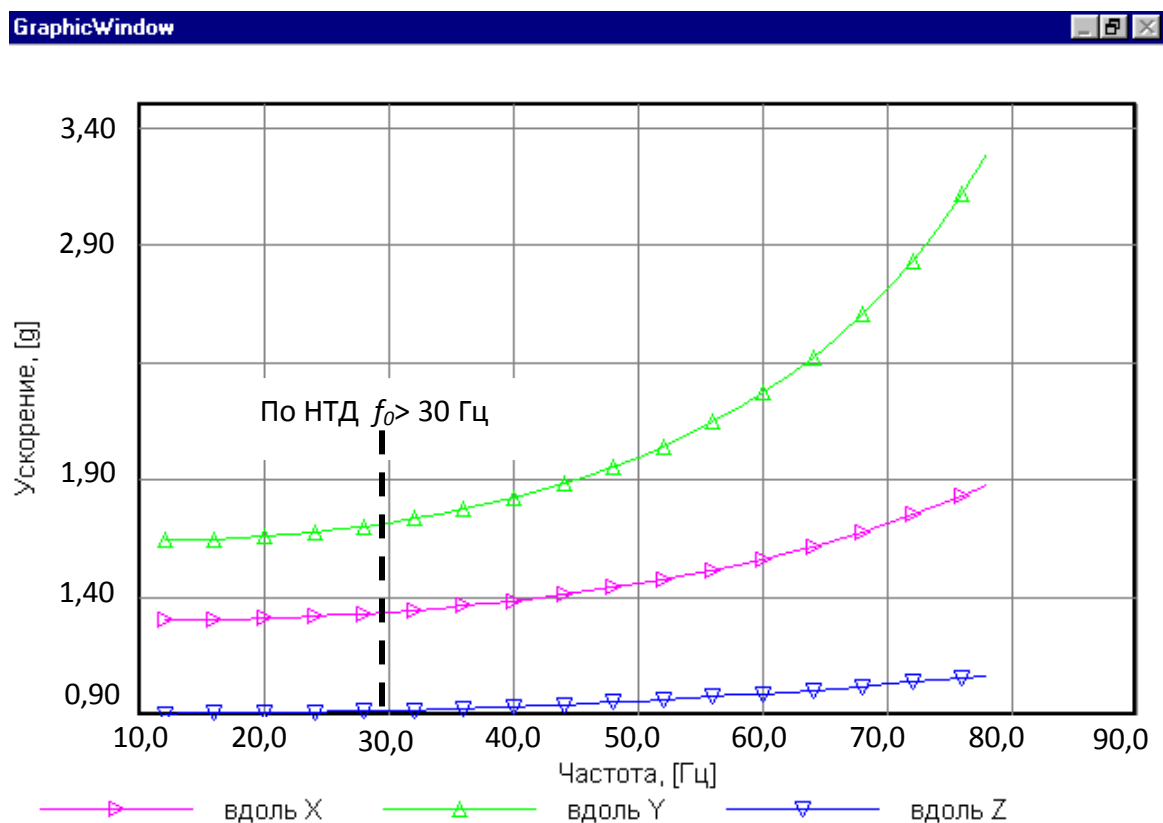
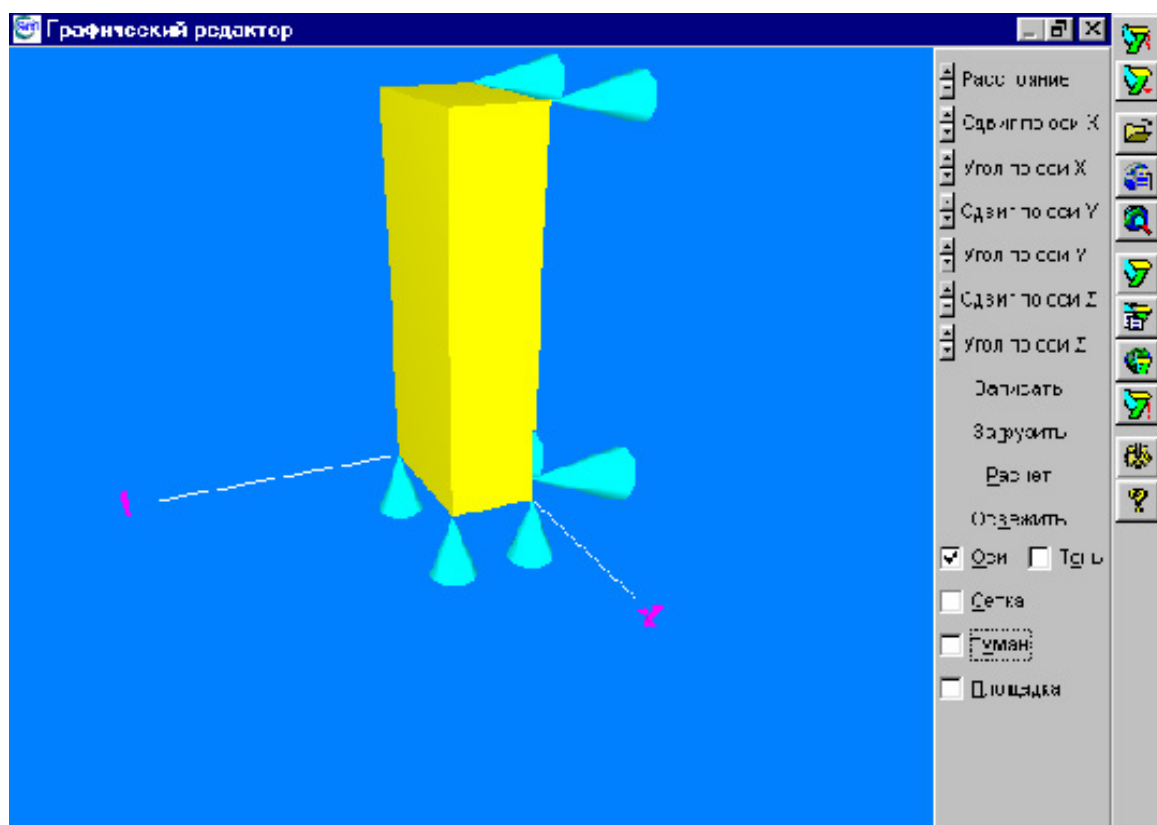


Рис. 4.21. Окончание

Таблица 4.17

Основные параметры БНК-3 при разных вариантах охлаждения задней панели

| Мощность этажа, Вт | Варианты исполнения | | |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | Естественное воздушное охлаждение | Вынужденное воздушное охлаждение | Водяное охлаждение |
| 1. Толщина межэтажных плит, мм | 10 | 10 | 10 |
| 2. Допустимая мощность тепловыделений, Вт/этаж | 170 | 270 | 300 |
| 3. Размеры основания радиатора или плиты с водяным охлаждением | 1600×550×10 | 1600×550×10 | 1600×590×10 |
| 4. Параметры оребрения: толщина ребер, мм; шаг ребер, мм; высота ребер, мм; количество ребер, шт. | 4 13,5 120 41 | 4 13,5 70 41 | – |
| 5. Скорость воздушного потока, м/с | – | 2,5 | – |
| 6. Скорость потока воды, м/с | – | – | 0,25 |
| 7. Температуры ЭРЭ (min–max), °C | 34,5–42 | 33,8–43 | 32,8–44,1 |

Вывод

В результате данных, полученных в ходе исследований на ЭВМ различных вариантов конструктивного исполнения БНК-3, были приняты геометрические и теплофизические параметры, значения которых сведены в [табл. 4.17](#).

Дальнейшие исследования механических характеристик полученной конструкции показали, что система виброизоляторов на основе амортизаторов АКСС-120М, устанавливаемых как на корпусе стойки, так и на задней панели (см. [рис. 4.8, б, в](#)), обеспечивает необходимый диапазон резонансных частот, который по нормативно-технической документации (НТД) должен быть выше 30 Гц. На [рис. 4.21, в](#) приведены механические характеристики спроектированного конструктива. На разработанный конструктив получено свидетельство РОСПАТЕНТА №1707 /2000 г./ (полезная модель, «Шкаф радиоэлектронной аппаратуры»).

4.2. Моделирование теплового режима работы системы электропитания ЭВМ «Электроника – СС-БИС»

Объект исследования – система вторичного электропитания (СВЭП) супер-ЭВМ «Электроника – СС-БИС» (аналог американской супер-ЭВМ CRAY-2). Конструктивно ЭВМ реализуется в виде комплекта стоек. Вторичная система электропитания (СВЭП) ЭВМ расположена на установленной в шкаф вертикальной 3-х

секционной составной плите с водяным охлаждением (см. [рис. 4.22](#)). Размеры секции 730 х 635 мм (см. [рис. 4.23](#)).

В каждой секции располагаются источники питания (ИП), которые имеют следующие характеристики:

первая секция: нестабилизированный ИП (750 А; 4,5 В);

вторая секция: нестабилизированный ИП (750 А; 4,5 В);

третья секция: нестабилизированный ИП (200 А; 4,5 В и 400 А; 2,0 В),
стабилизированный ИП (300 А; 4,5 В и 250 А; 2,0 В).

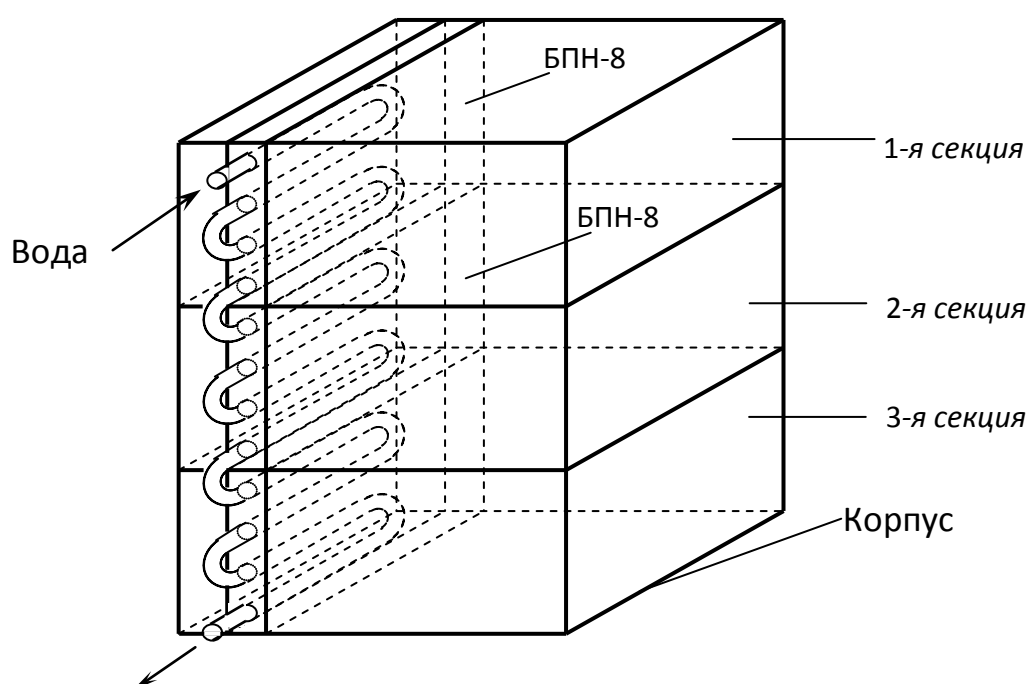


Рис. 4.22. Шкаф-стойка суперЭВМ в комплекте со СВЭП

Тип источников питания, расположенных в первой и второй секциях плиты, – БПН-8 (блок питания нестабилизированный, разработка номер 8). Конструктивной основой БПН-8 является алюминиевая плита толщиной 10 мм с наплавками толщиной 22 мм, внутри которых проложена трубка круглого сечения с внутренним диаметром 8 мм для прокачки воды (см. [рис. 4.22](#)). На плите установлены: 6 силовых понижающих трансформаторов трехфазной сети и 4 группы выпрямительных диодов Шоттки по 18 штук каждая. В середине плиты установлена с воздушным зазором 2 мм алюминиевая шина толщиной 3 мм, на которой установлены два дросселя и электролитические конденсаторы LC-фильтра вторичных обмоток. В качестве общего провода используется плита, в качестве другого полюса используется изолированная от плиты шина.

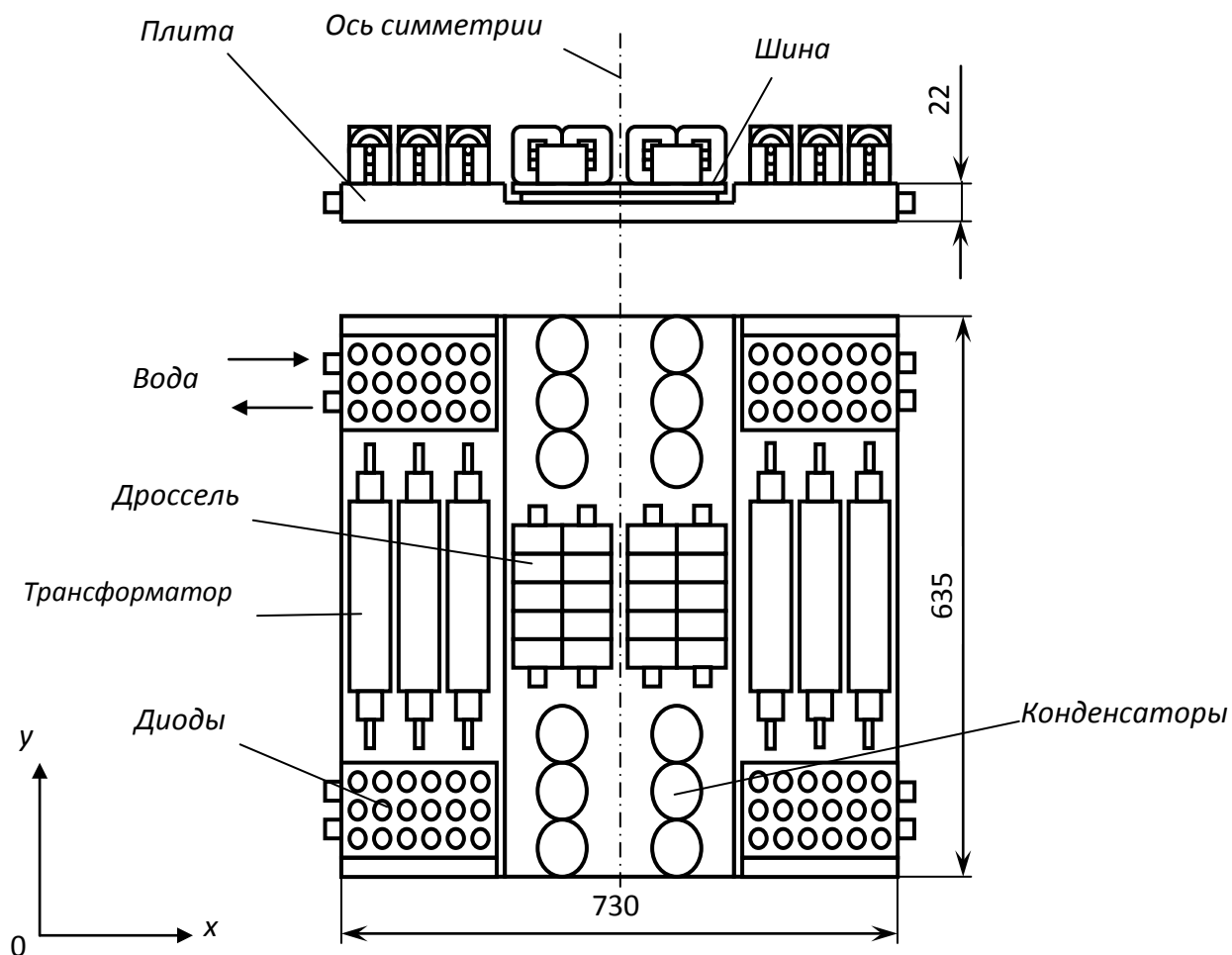


Рис. 4.23. Общий вид блока питания БПН-8

Особенностью блока является индивидуальное водяное охлаждение как плиты, так и трансформаторов с дросселями.

Трансформатор представляет собой корпус (см. [рис. 4.24](#)), в котором расположен составной торообразный сердечник с намотанной первичной обмоткой, «нанизанный» на медную трубку – вторичную обмотку, внутри которой проходит другая медная трубка (с внутренним диаметром 8 мм), изолированная компаундом и также являющаяся вторичной обмоткой, по которой прокачивается вода.

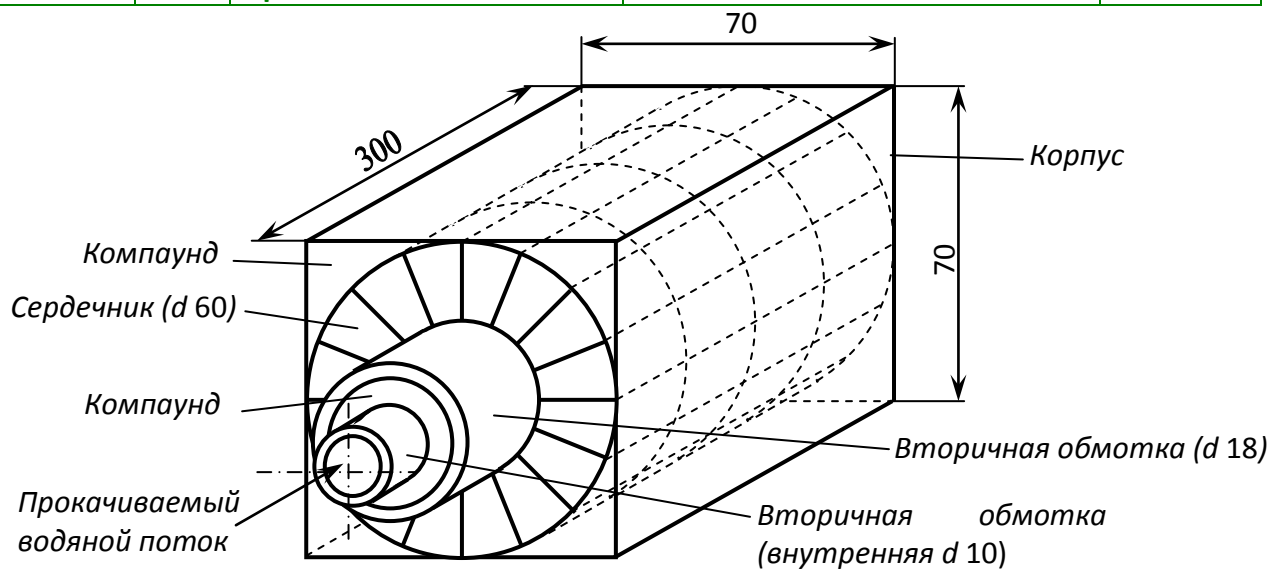


Рис. 4.24. Конструкция трансформатора

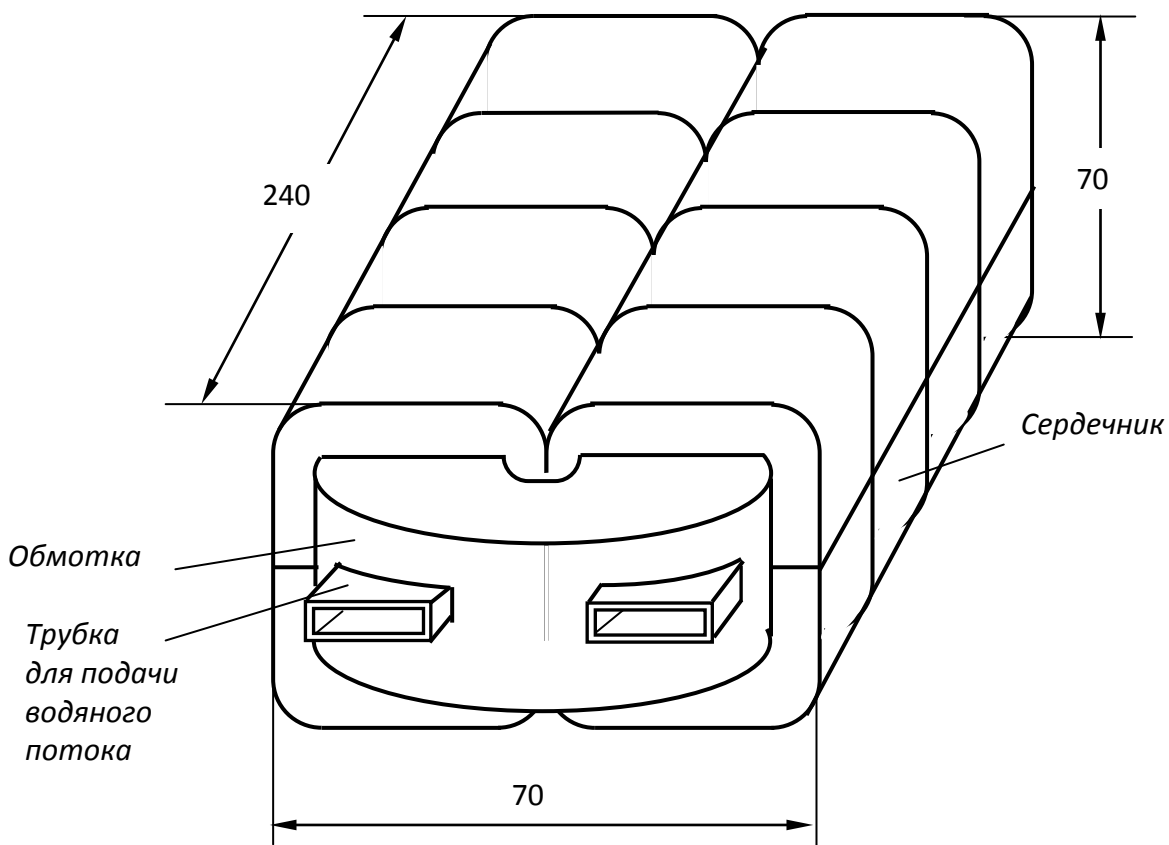




Рис. 4.25. Конструкция дросселя

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 307 |
|---|---|--|--|------------|

Дроссель представляет собой составной броневой сердечник, внутри которого намотана обмотка, охватывающая весь сердечник, внутри которого также проходит прямоугольная трубка для его водяного охлаждения (см. [рис. 4.25](#)).

4.2.1. Постановка задачи на моделирование

Посредством математического моделирования на ПЭВМ провести исследования стационарного теплового режима блока питания БПН-8 и на их основе выбрать геометрические и теплофизические параметры конструкции, значения которых обеспечивают удовлетворительный тепловой режим БПН-8. Удовлетворительным тепловым режимом работы БПН-8 считается такой режим, при котором температуры входящих в его состав электрорадиоэлементов не превышают 55 °С.

В качестве варьируемых ГТФП и их значений в процессе обеспечения теплового режима БПН-8 следует принять следующие:

- скорость прокачиваемой воды – 0,5–1,0 м/с;
- расстояние между трубками-обмотками трансформатора – 3–7 мм;
- марки компаунда – ЭК с кварцевой пылью ($\lambda = 0,5\text{--}0,8$ Вт/(м · К)), КТЭ-4 ($\lambda = 1,2$ Вт/(м · К)), К-1 ($\lambda = 2,0\text{--}2,2$ Вт/(м · К)), К-2 ($\lambda = 1,4$ Вт/(м · К)), КТЭ-2 ($\lambda = 1,3$ Вт/(м · К)).

Все исследования необходимо проводить при следующих условиях и значениях нижеперечисленных параметров:

- температура окружающей среды (воздушный объем внутри стойки) – 43–45 °С;
- температура воды на входе – 20 °С;
- мощности тепловыделения в обмотке и сердечнике дросселя – по 27 Вт;
- мощность тепловыделения: в сердечнике с первичной обмоткой трансформатора – 100 Вт; во вторичных обмотках: в трубке большего диаметра – 34 Вт, в трубке меньшего диаметра – 17 Вт;
- коэффициент теплопроводности локоткани – 0,3 Вт/(м · К);
- коэффициент теплопроводности алюминиевой плиты (материал АМЦ) – 180 Вт/(м · К);
- коэффициент теплопроводности сердечника – 5,0 Вт/(м · К).

4.2.2. Разработка модели тепловых процессов БПН-8

В соответствии с известными принципами проведем разбиение конструкции системы электропитания на конструктивные уровни.

1. Стойка с комплектом источников питания (см. [рис. 4.22](#)).

2. Блок БПН-8.

3. Моточные изделия (дроссели и трансформаторы) и прочие электро-радиоэлементы, входящие в состав БПН-8 (см. [рис. 4.23–4.25](#)).

В силу определенных требований задача анализа теплового режима шкафа не ставилась, поэтому получаем сокращенное разбиение на уровни:

1. Плита БПН-8.

2. Моточные изделия и прочие ЭРЭ.

Соответственно для моделей тепловых процессов получаем следующие уровни:

1. МТП плиты с водяным охлаждением.

2. МТП дросселей и трансформаторов с водяным охлаждением, МТП блоков диодов и конденсаторов.

Необходимо отметить, что конструкция БПН-8 симметрична относительно вертикальной оси Oy (см. [рис. 4.23](#)), поэтому можно ограничиться построением МТП половины блока, что позволит снизить размерность МТП в два раза. При необходимости можно ввести дополнительную (Ox) ось симметрии и анализировать четвертую часть БПН-8, но при этом дополнительная ось симметрии «рассечет» трансформаторы, и возникнут трудности с определением их параметров в разрабатываемой МТП. В этой связи остановимся на разработке МТП половины БПН-8, которая включает в свой состав один дроссель, три однотипных трансформатора, блок диодов и блок конденсаторов.

Разработка МТП моточных изделий

Рассмотрим протекание тепловых процессов в дросселе (см. [рис. 4.26](#)). Часть тепловой энергии, выделяемой в сердечнике и обмотке, рассеивается с поверхности сердечника излучением и конвекцией в окружающую среду. Другая часть передается кондукцией через изолирующую локоткань посредством контактного теплообмена с металлической прямоугольной трубой, в которой тепловая энергия снимается прокачиваемым через нее водяным потоком.

При построении МТП дросселя примем следующие допущения:

1. Сердечник изотермичен, т. е. моделируется одним условно изотермичным объемом.

2. Обмотка изотермична.

3. Трубка изотермична.

4. Локоткань изотермична.

5. Вода в трубке разбита на два изотермичных объема – водяной поток на входе и водяной поток на выходе трубки.

6. Теплоотдача в окружающую среду осуществляется только с поверхности сердечника.

Теплопередачу с дросселя на шину будем учитывать только при построении МТП в составе всего блока БПН-8.

Введем следующие обозначения узлов МТП дросселя: 1 – вода на входе; 2 – вода на выходе; 3 – прямоугольная трубка; 4 – обмотка-шина; 5 – сердечник; 6

–окружающая среда; 7 – локоткань между обмоткой-трубкой; 8 – локоткань между обмоткой и сердечником; 9 – локоткань между трубкой и сердечником.

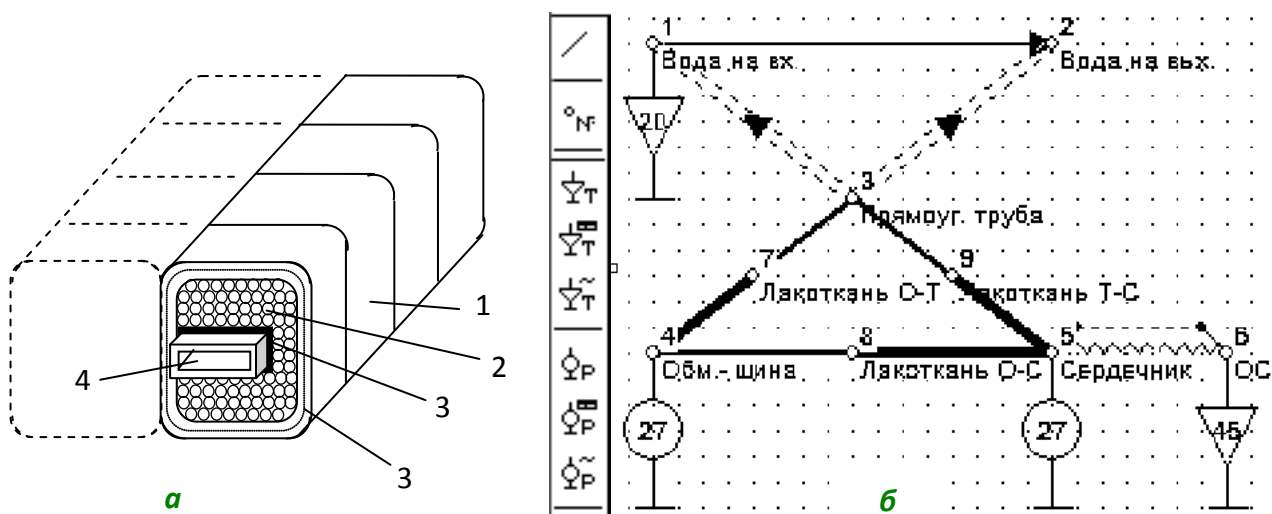


Рис. 4.26. Модель тепловых процессов дросселя: а – эскиз фрагмента половины дросселя (1 – броневой сердечник; 2 – обмотка; 3 – локоткань; 4 – трубка для прокачки воды); б – МТП дросселя

Рассмотрим участок пути теплового потока «трубка – локоткань – обмотка» (узлы 3, 8, 4). На данном участке присутствуют следующие виды теплообмена: контактный теплообмен «трубка – локоткань»; кондукция через локоткань; контактный теплообмен «локоткань – обмотка».

Объединим кондуктивные ветви: контактный теплообмен «трубка – локоткань» и «локоткань – обмотка»; кондукция через локоткань.

Преобразуем две последовательные контактные ветви в одну с меньшей в два раза площадью, т. е. ее тепловое сопротивление будет равно сумме сопротивлений двух последовательных ветвей: контактный теплообмен «трубка – локоткань»; кондукция через локоткань. В результате такого подхода сокращается количество ветвей с 3 до 2 и упрощается расчет их параметров. Полученная в результате преобразований МТП представлена на [рис. 4.26](#).

Рассмотрим протекание тепловых процессов в трансформаторе (см. рис. 4.27, а). Тепловая энергия, выделяемая в сердечнике и обмотках, частью с поверхности контура трансформатора рассеивается излучением и конвекцией в окружающую среду, а частью передается кондукцией (в цилиндрической системе координат; радиальное направление) через первичную обмотку на большую трубку вторичной обмотки и от нее через междутрубочный компаунд к внутренней трубке вторичной обмотки, которая нагревает вынужденной конвекцией протекающую в ней воду, выносящую тепло посредством теплопереноса (ветвь 75-го типа на [рис. 4.27, б](#)) из зоны нагрева.

Для трансформатора примем следующие допущения:

1. Сердечник и первичная обмотка изотермична, т. е. моделируется одним узлом МТП.
2. Вторичная обмотка (большая трубка) изотермична.

3. Вторичная обмотка (меньшая трубка-канал с водой) изотермична.
4. Вода в трубке разбита на два изотермичных объема: водяной поток на входе и водяной поток на выходе трубки.
5. Теплоотдача в окружающую среду осуществляется только с поверхности корпуса трансформатора без учета торцов.
6. Контактную теплопередачу с корпуса на плиту будем учитывать только при построении МТП трансформатора в составе МТП всего блока.

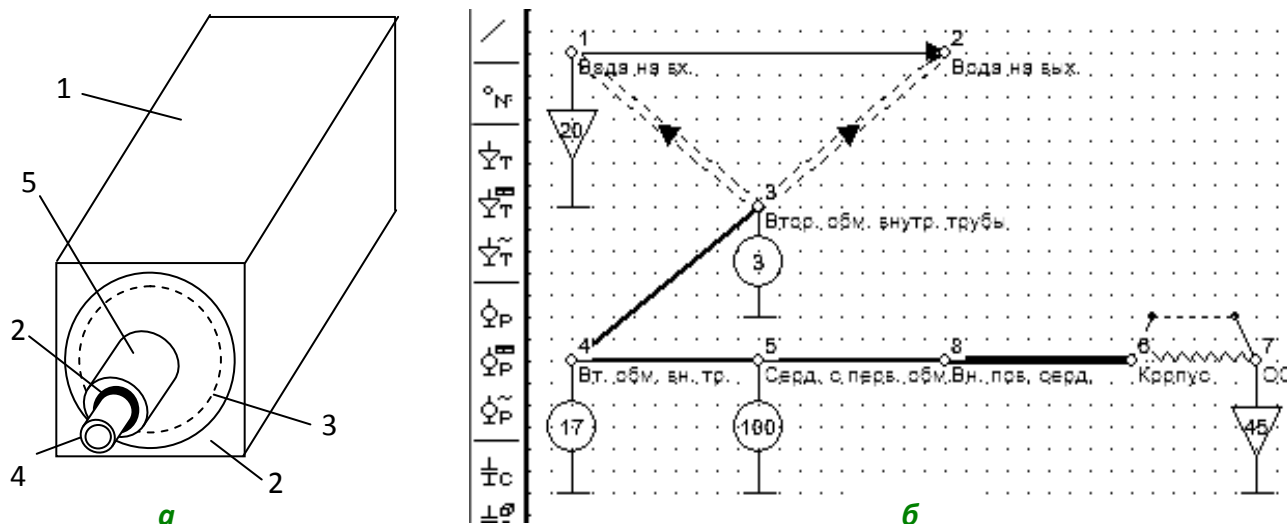


Рис. 4.27. Модель тепловых процессов трансформатора: *а* – эскиз конструкции трансформатора (1 – корпус; 2 – компаунд; 3 – первичная обмотка; 4 – трубка–вторичная обмотка /трубка меньшего диаметра/; 5 – трубка–вторичная обмотка /трубка большего диаметра/); *б* – модель тепловых процессов трансформатора

Введем следующие обозначения узлов МТП трансформатора: 1 – вода на входе; 2 – вода на выходе; 3 – вторичная обмотка внутренней трубки (трубка меньшего диаметра); 4 – вторичная обмотка внешней трубки; 5 – сердечник с первичной обмоткой; 6 – корпус; 7 – окружающая среда; 8 – внешняя поверхность сердечника.

Полная модель теплового процесса блока БПН-8

Для построения полной МТП БПН-8 будем использовать МТП точечных изделий, рассмотренных выше. На [рис. 4.28](#) приведены все фазы синтеза МТП БПН-8, а на [рис. 4.29](#) – граф МТП БПН-8.

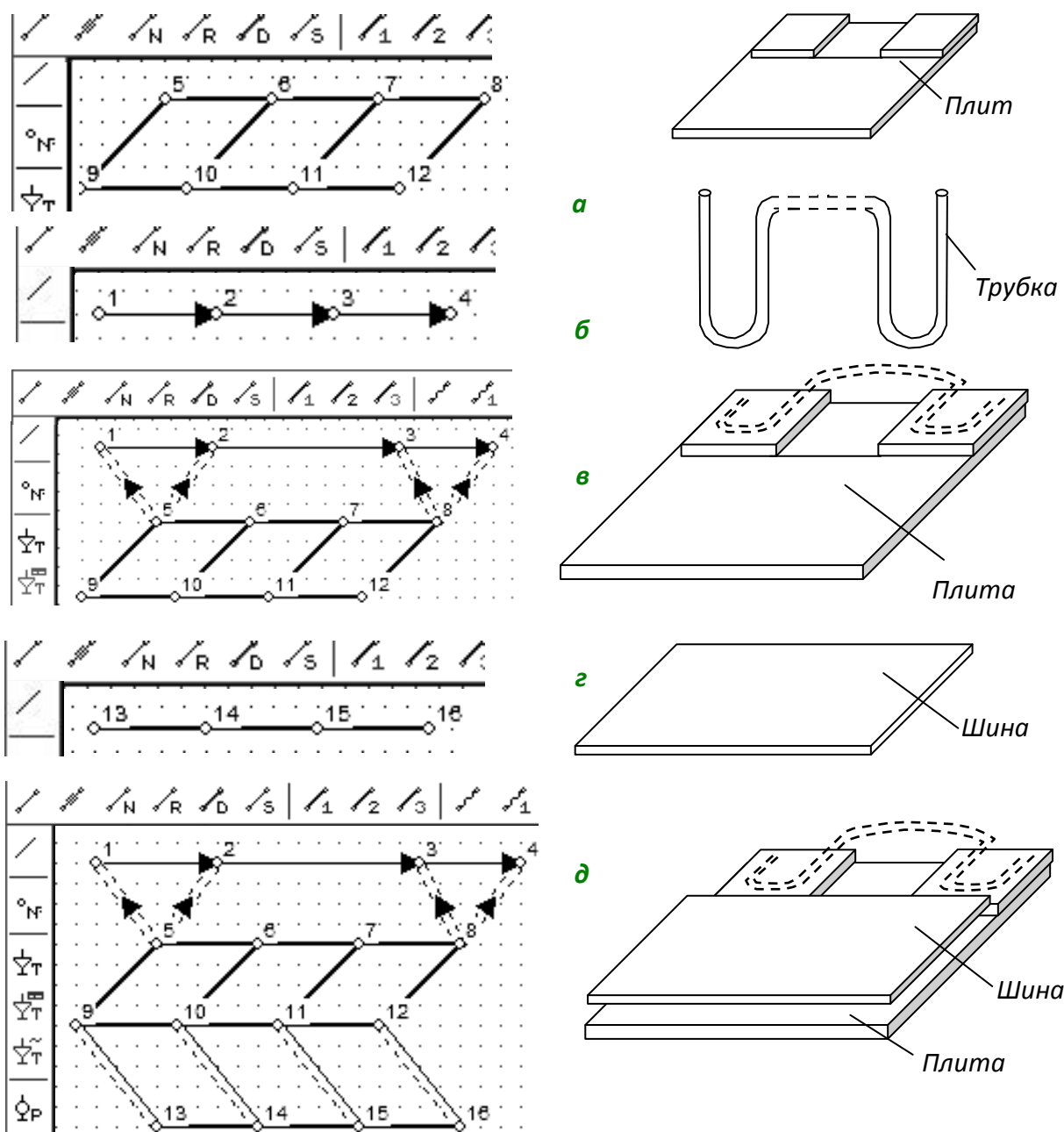


Рис. 4.28. Фазы построения МТП половины плиты: а – МТП несущей основы; б – МТП потока воды в трубках; в – МТП плиты с водяным охлаждением; г – МТП шины; д – МТП плиты с водяным охлаждением и шиной

Рассмотрим протекание тепловых процессов в БПН-8 (см. [рис. 4.29](#) и [табл. 4.18](#)). Тепловая энергия, выделяемая элементами, установленными на плите, растекается по ней путем кондукции: частью с поверхности плиты рассеивается излучением и конвекцией в окружающую среду, а частью передается круглым трубкам, расположенным в утолщениях в углах плиты, которые нагревают посредством вынужденной конвекции протекающую в них воду, выносящую тепло из зоны нагрева.

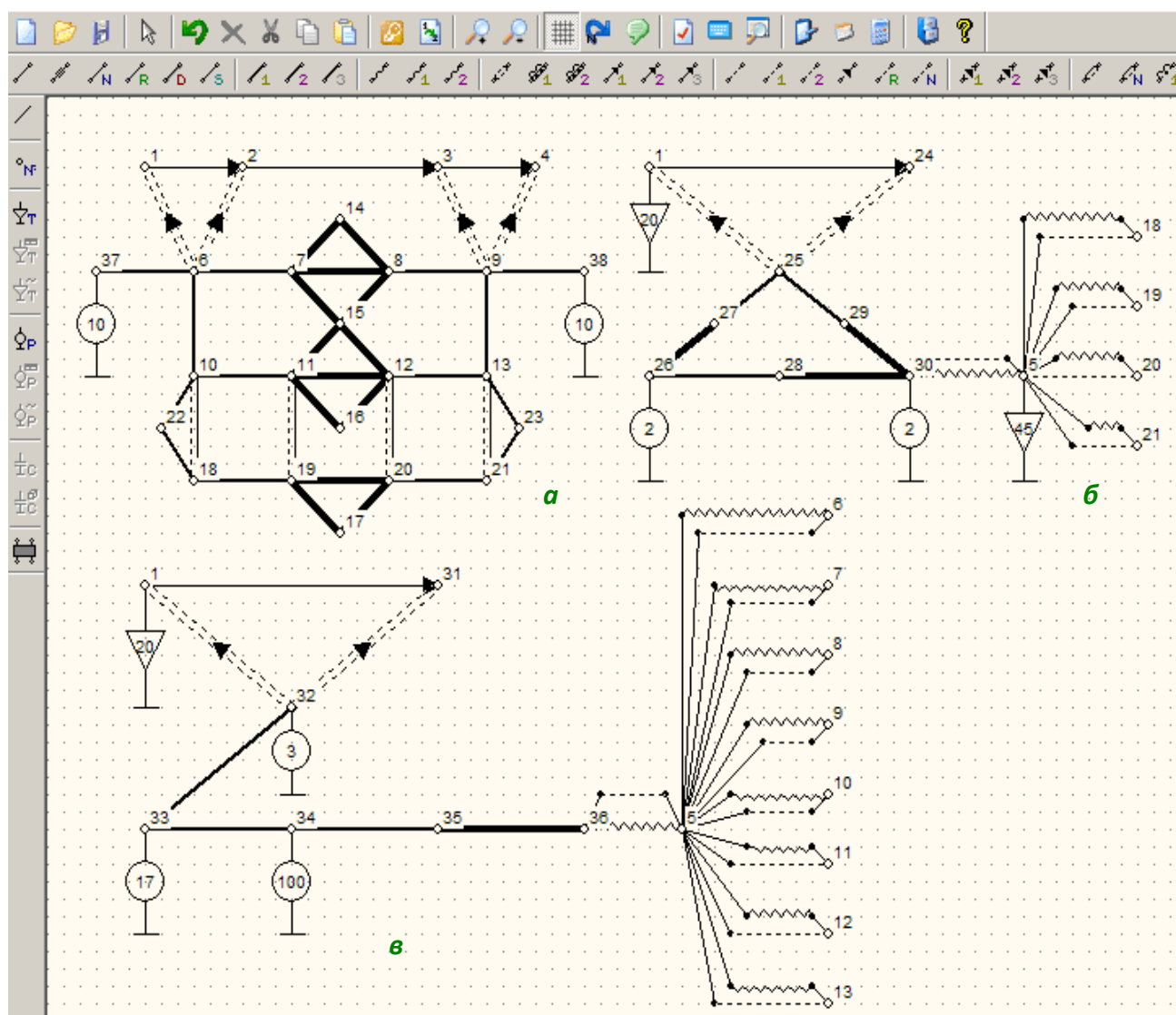


Рис. 4.29. Полная МТП половины БПН-8: а – полная МТП платы; б – МТП первого трансформатора (аналогичная МТП у двух других); в – МТП дросселя

Тепловая энергия, выделяющаяся в выпрямительных диодах, ввинченных в плату, посредством контактного теплообмена передается плате. Часть тепловой энергии дросселей передается через контакт металлической шины, по которой она посредством кондукции растекается, и через тонкую воздушную прослойку передается плате. Часть тепловой энергии, поступающей через выводы конденсаторов с платы и шины, рассеивается с поверхности конденсаторов в окружающую среду.

Таблица 4.18

Нумерация узлов в МТП БПН–8

| Номер узла МТП | Моделируемый элемент | Номер узла МТП | Моделируемый элемент |
|----------------|--|----------------|------------------------------------|
| 1 | Вода на входе первого колена | 27 | Лакоткань труба-обмотка |
| 2 | Вода на выходе первого колена и входе второго | 28 | Лакоткань обмотка-сердечник |
| 3 | Вода на выходе второго и входе третьего колена | 29 | Лакоткань труба-сердечник |
| 4 | Вода на входе третьего колена | 45, 46 | Блоки диодов |
| 5 | Окружающая среда | | Трансформаторы 1, 2, 3 |
| 6–13 | Плита | 14, 15, 16 | Корпус трансформатора |
| 17 | Сердечник дросселя | 30, 35, 40 | Вода на выходе трансформатора |
| 22, 23 | Блоки конденсаторов | 31, 36, 41 | Внутренняя труба-вторичная обмотка |
| 24 | Вода на выходе дросселя | 32, 37, 42 | Внешняя труба-вторичная обмотка |
| 25 | Прямоугольная труба дросселя | 33, 38, 43 | Внутренняя часть сердечника |
| 26 | Обмотка | 34, 39, 44 | Внешняя часть сердечника |

Для остальной части МТП БПН-8 примем следующие допущения:

1. Плиту (см. [рис. 4.28, а](#)) считаем изотермичной по толщине, а в плоскости xOy разобьем ее сеткой 4×2 . Аналогичное разбиение выполним для шины, но сеткой 4×1 (см. [рис. 4.28, г](#));

2. Трубка в плите изотермична с соответствующими дискретам, на которые разбивает сетка плиту.

3. Вода в каждом колене трубки разбита на два изотермичных объема: водяной поток на входе и водяной поток на выходе. Причем поток на выходе предыдущего колена одновременно является входным потоком на входе текущего колена.

4. Диоды, расположенные в каждом углу, объединим в условно изотермичные объемы.

5. Конденсаторы слева и справа от дросселя также объединим в условно изотермичные объемы.

4.2.3. Проведение исследований

На основе разработанной топологической МТП БПН-8 в соответствии с постановкой задач на моделирование была проведена серия вычислительных экспериментов, результаты которых представлены на [рис. 4.30–4.33](#).

Анализ полученных результатов показывает следующее:

1. На температуру сердечника и вторичной обмотки трансформатора в значительной степени влияет коэффициент теплопроводности компаунда, заполняющего межтрубное расстояние. Изменение значения коэффициента теплопроводности компаунда с 1,0 до 2,0 Вт/(м · К) приводит к снижению температуры элементов трансформатора на 13–18 °С (см. [рис. 4.30](#)).

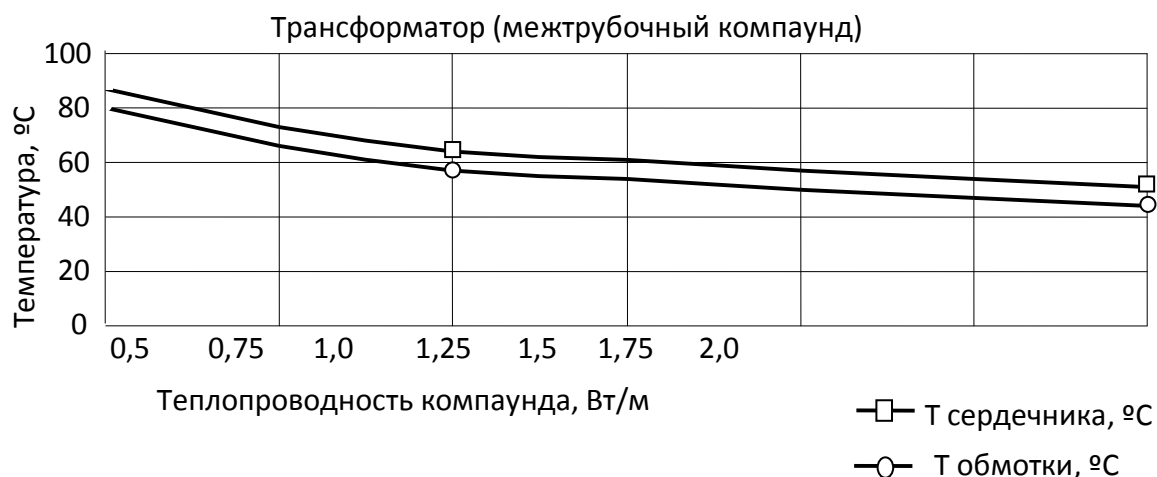


Рис. 4.30. Зависимость температуры сердечника и вторичной обмотки трансформатора от значения коэффициента теплопроводности межтрубного компаунда

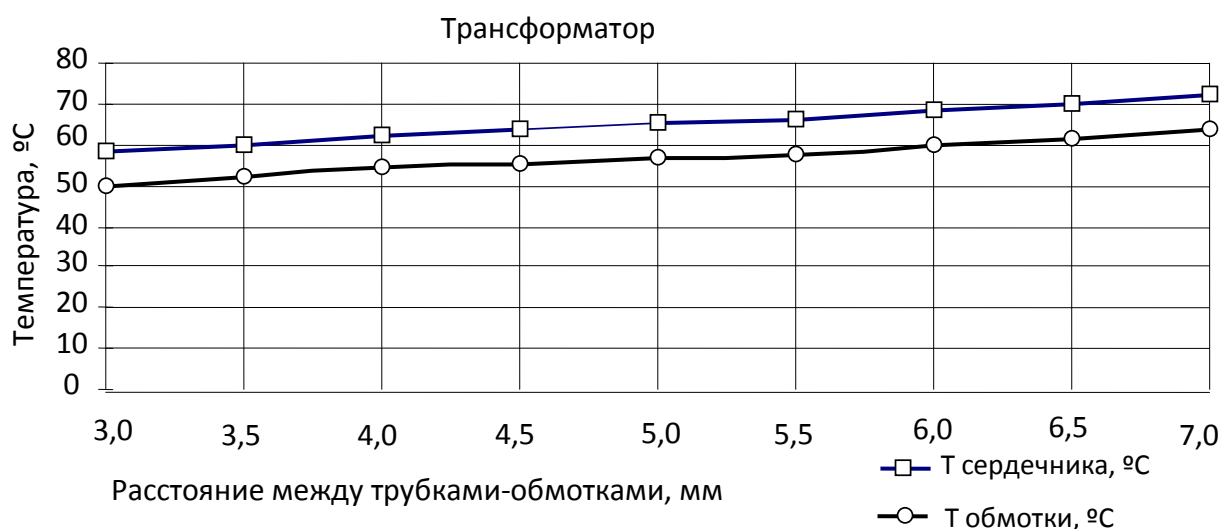


Рис. 4.31. Зависимость температуры сердечника и вторичной обмотки трансформатора от расстояния между трубками вторичных обмоток (разница диаметров внешней и внутренней трубы)

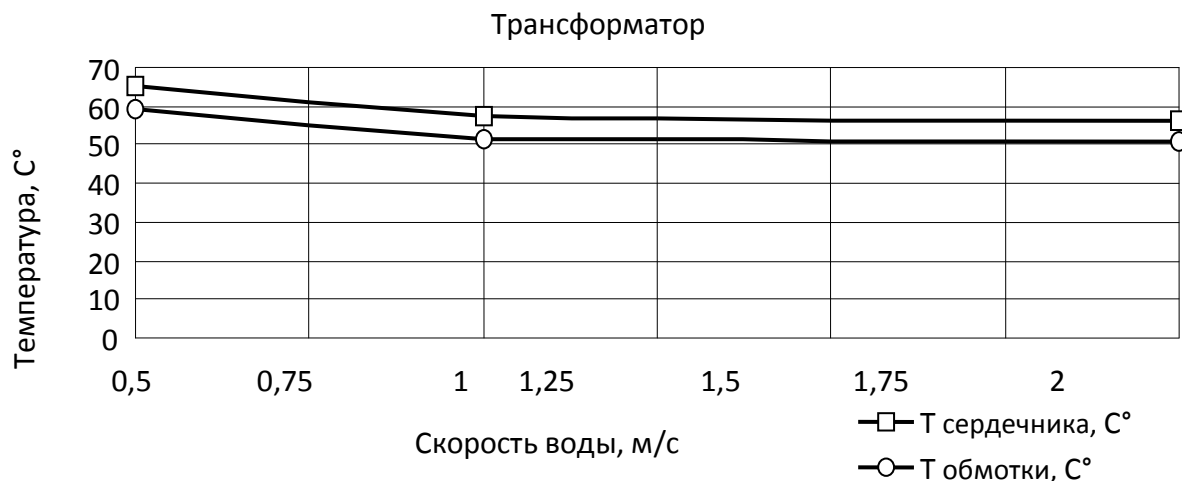


Рис. 4.32. Зависимость температуры сердечника и обмотки трансформатора от скорости водяного потока

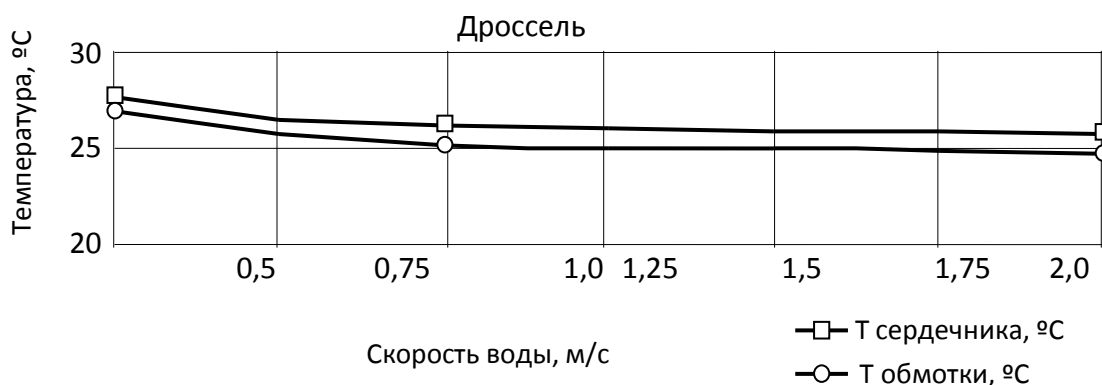


Рис. 4.33. Зависимость температуры сердечника и обмотки дросселя от скорости водяного потока

2. Увеличение расстояния между трубками-обмотками трансформатора приводит к росту температуры элементов трансформатора на 15 °C (см. [рис. 4.31](#)), что является существенным фактором.

3. Изменение скорости водяного потока (с 0,5 до 2 м/с), прокачиваемого через индуктивные элементы, приводит к незначительному перераспределению температуры индуктивных элементов (3–6 °C – см. [рис. 4.32, 4.33](#)).

Исходя из анализа результатов моделирования, были внесены следующие предложения по выбору параметров конструкции БПН-8:

- принять в качестве марки компаунда для заполнения межтрубного расстояния компаунд К-1 ($\lambda = 2,0\text{--}2,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$);
- принять расстояния между трубками вторичных обмоток трансформатора, равное 4 мм;
- принять в качестве окончательного значения скорости водяного потока значение 0,75 м/с. Кроме этого, включить последовательно контуры с водяным охлаждением плиты, диодов и отдельных групп трансформаторов, как это показано на [рис. 4.34](#).

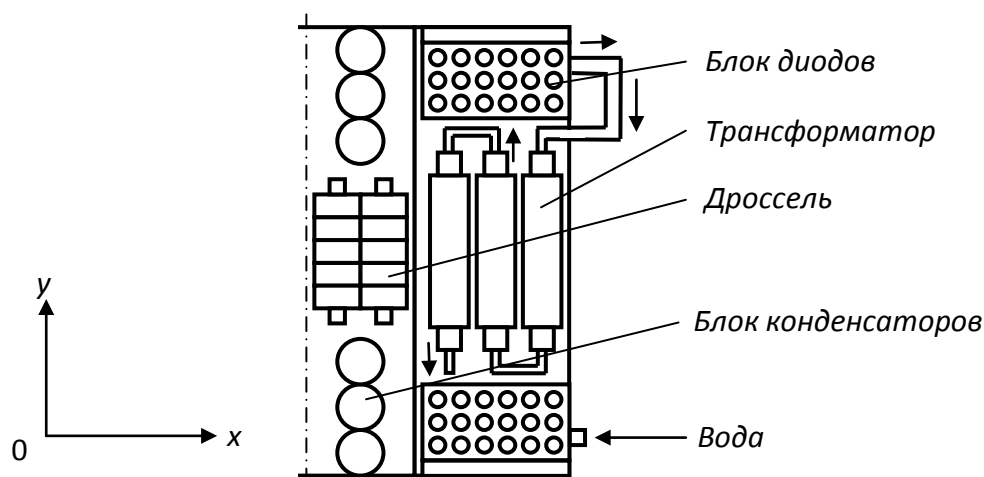




Рис. 4.34. Модифицированная схема водяного охлаждения БПН-8 (условно показана правая часть БПН-8)

Таблица 4.19

Температурное поле БПН-8 при определенных в результате исследований параметров конструкции и при двух скоростях прокачки воды

| Элемент конструкции | Номер узла МТП | $T, ^\circ\text{C}$ 0,5 м/с | $T, ^\circ\text{C}$ 0,75 м/с | Элемент конструкции | Номер узла МТП | $T, ^\circ\text{C}$ 0,5 м/с | $T, ^\circ\text{C}$ 0,75 м/с |
|---------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Вода на входе | 1 | 20,0 | 20,0 | Вода из дросс. | 24 | 20,8 | 20,5 |
| Вода на выходе | 2 | 21,0 | 20,6 | Трубка | 25 | 29,1 | 24,7 |
| Вода на входе | 3 | 21,7 | 20,9 | Обмотка | 26 | 36,9 | 32,9 |
| Вода на выходе | 4 | 22,0 | 21,1 | Трубка-обмотка | 27 | 35,0 | 30,9 |
| Окруж. среда | 5 | 45,0 | 45,0 | Сердеч-обмот. | 28 | 37,8 | 33,9 |
| Плита | 6 | 27,0 | 23,4 | Трубка-сердеч. | 29 | 35,9 | 31,9 |
| — // — | 7 | 40,8 | 37,1 | Вода из транс. | 30 | 22,9 | 22,4 |
| — // — | 8 | 40,8 | 37,1 | Трубка малая | 31 | 29,0 | 24,4 |
| — // — | 9 | 27,8 | 23,9 | Трубка большая | 32 | 47,3 | 43,2 |
| — // — | 10 | 33,4 | 29,9 | Сердеч. внутр. | 33 | 50,8 | 46,8 |
| — // — | 11 | 40,8 | 37,1 | Сердеч. внеш. | 34 | 46,3 | 42,5 |
| — // — | 12 | 40,8 | 37,1 | Вода из транс. | 35 | 23,8 | 23,2 |
| — // — | 13 | 33,8 | 30,2 | Трубка малая | 36 | 28,9 | 24,4 |
| Корп. трансф-ра | 14 | 41,3 | 37,6 | Трубка большая | 37 | 47,2 | 43,1 |
| Корп. трансф-ра | 15 | 41,9 | 38,0 | Сердеч. внутр. | 38 | 50,6 | 46,6 |
| Корп. трансф-ра | 16 | 42,5 | 38,6 | Сердеч. внеш. | 39 | 46,1 | 42,2 |
| Дросс. сердеч. | 17 | 38,2 | 34,3 | Вода из транс. | 40 | 24,5 | 23,9 |
| Шина | 18 | 33,6 | 30,2 | Трубка малая | 41 | 29,0 | 24,4 |
| — // — | 19 | 38,7 | 34,8 | Трубка большая | 42 | 47,3 | 43,2 |
| — // — | 20 | 38,7 | 34,8 | Сердеч. внутр. | 43 | 50,8 | 46,8 |
| — // — | 21 | 34,0 | 30,4 | Сердеч. внеш. | 44 | 46,3 | 42,4 |
| Блок конд-ров | 22 | 34,7 | 31,7 | Блок диодов | 45 | 27,6 | 24,0 |
| Блок конд-ров | 23 | 34,9 | 31,6 | Блок диодов | 46 | 29,4 | 25,5 |

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 317 |
|---|---|--|--|------------|

Принятые значения параметров и схема водяного охлаждения позволяют получить температурное поле конструкции БПН-8, которое сведено в [табл. 4.19](#).

Анализ теплового режима БПН-8 в целом показывает, что значения температур корпусов диодов (узлы МТП – 45, 46) и конденсаторов (узлы МТП – 22, 23) сравнительно невысоки – 27,6 и 34,7 °С и также, как и температуры индуктивных элементов, не превышают допустимого предела. В этой связи можно констатировать, что нормальный тепловой режим БПН-8 обеспечивается. При этом следует отметить сравнительно высокую неравномерность температуры основания. Например, узел 6 МТП БПН-8 имеет температуру 27,0 °С, а узел 11 – температуру 40,8 °С, причем эта разница практически не меняется при увеличении скорости воды. Для уменьшения этой неравномерности до 6 °С следует увеличить толщину плиты до 15 мм. При этом также облегчается тепловой режим диодов и конденсаторов на 6–7,5 °С.

4.3. Исследование тепловых характеристик системы электропитания космического аппарата

Объект исследования – часть системы электропитания (СЭП) непилотируемого космического аппарата, общий вид которой приведен на [рис. 4.35, а–в](#). СЭП устанавливается в отсеке, в котором не поддерживается газовая среда. Конструктивной основой СЭП является комплект термостатирующих плит с жидкостным охлаждением (см. [рис. 4.35, г–е](#)), которые реализуют последовательную схему охлаждения. На термостатирующие плиты устанавливаются переходные плиты, на которые, в свою очередь, крепятся блоки кассетного типа с кондуктивным охлаждением (см. [рис. 4.35, б](#)). В состав блока входят ФЯ, основания которых имеют нижние и боковые теплостоки (см. [рис. 4.35, е](#)), посредством которых они крепятся к переходной плите и боковым панелям-теплостокам.

Детальным объектом исследования в рассматриваемой части системы электропитания является блок зарядно-разрядного устройства (ЗРУ) /прибор 2 на [рис. 4.35, а](#)/. В состав блока ЗРУ входит 10 функциональных ячеек, на основе которых реализуются следующие устройства: зарядные устройства (ЗУ), разрядные устройства (РУ) и устройства автоматики (АВ). Мощности тепловыделений по ФЯ вышеперечисленных устройств распределяются следующим образом: ЗУ₁–ЗУ₄ по 43 Вт каждая; РУ₁ и РУ₂ по 62 Вт каждая; АВ₁–АВ₄ по 1,5 Вт каждая.

4.3.1. Постановка задачи на моделирование

Посредством математического моделирования на ПЭВМ необходимо исследовать тепловые характеристики СЭП на уровне системы охлаждения в целом, а также функциональной ячейки разрядного устройства, входящей в состав блока ЗРУ (см. PY_1 на [рис. 4.35, б](#)), и предложить, в случае необходимости, варианты размещения блоков на термостатирующих плитах, варианты крепления и размещения элементов на основании ФЯ PY_1 с целью обеспечения нормального теплового режима элементной базы. В качестве нормального теплового режима элементной базы PY_1 считается такой режим, при котором температуры корпусов элементов $AE1VT32$, $AE18L12$, $AE8VT32$, $AE2VT32$, $AE7VT32$, $AE4VT32$, $AE3VT32$, $AE6VT32$, $AE5VT32$, $AE27L12$, $AE36L12$, $AE45L12$, $AE5VD92$, $AE6VD92$, $AE7VD92$, $AE8VD42$, $AE8R6$, $AE5R5$, $AE5R6$, $AE6R5$, $AE6R6$, $AE7R5$, $AE7R6$, $AE8R5$, $AE4VD9$, $AE1VD9$, $AE2VD9$, $AE3VD9$ не превышают $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а остальных элементов – не более $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

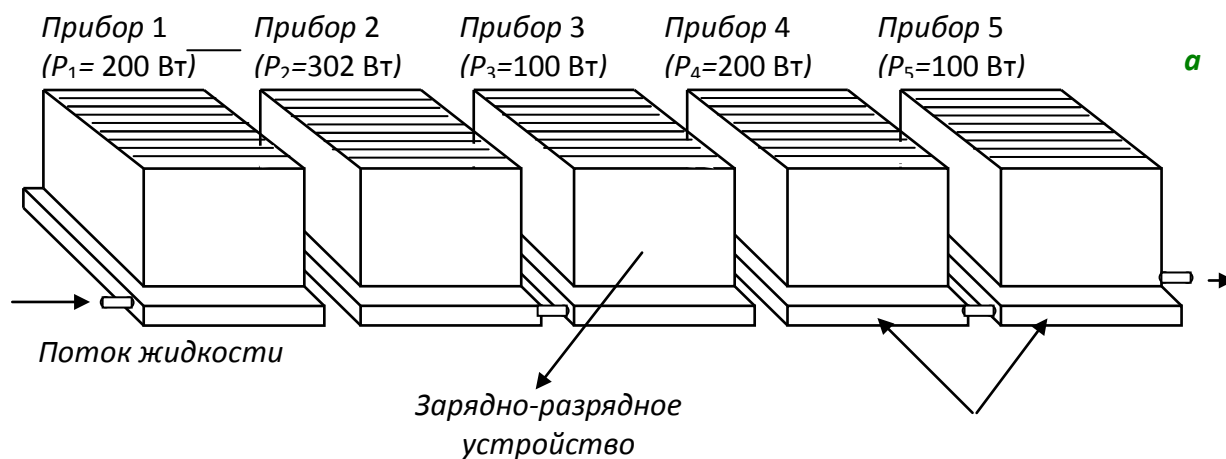


Рис. 4.35. Эскиз конструкции системы электропитания космического аппарата: *а* – общий вид СЭП и первоначальная схема размещения блоков на термостатирующих плитах; *б* – эскиз конструкции блока ЗРУ; *в* – эскиз конструкции функциональной ячейки; *г* – схема формализации температурного поля потока жидкости; *д* – эскиз конструкции термостатирующей плиты; *е* – геометрические параметры одного колена трубки

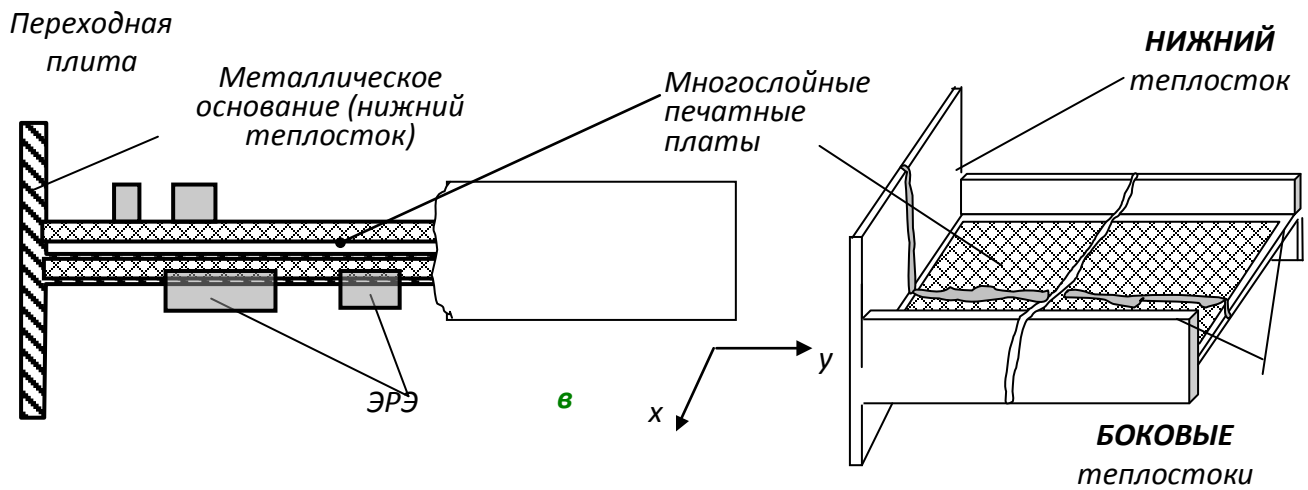
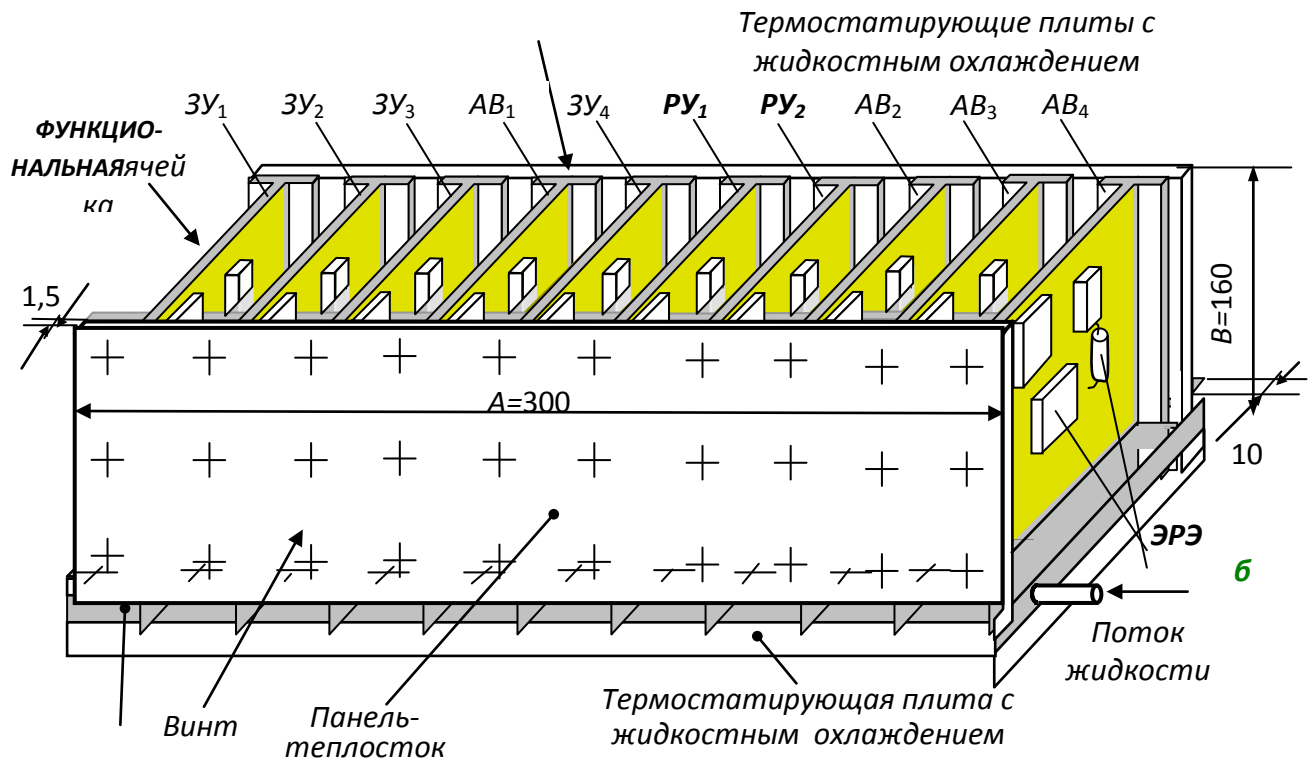


Рис. 4.35. Продолжение

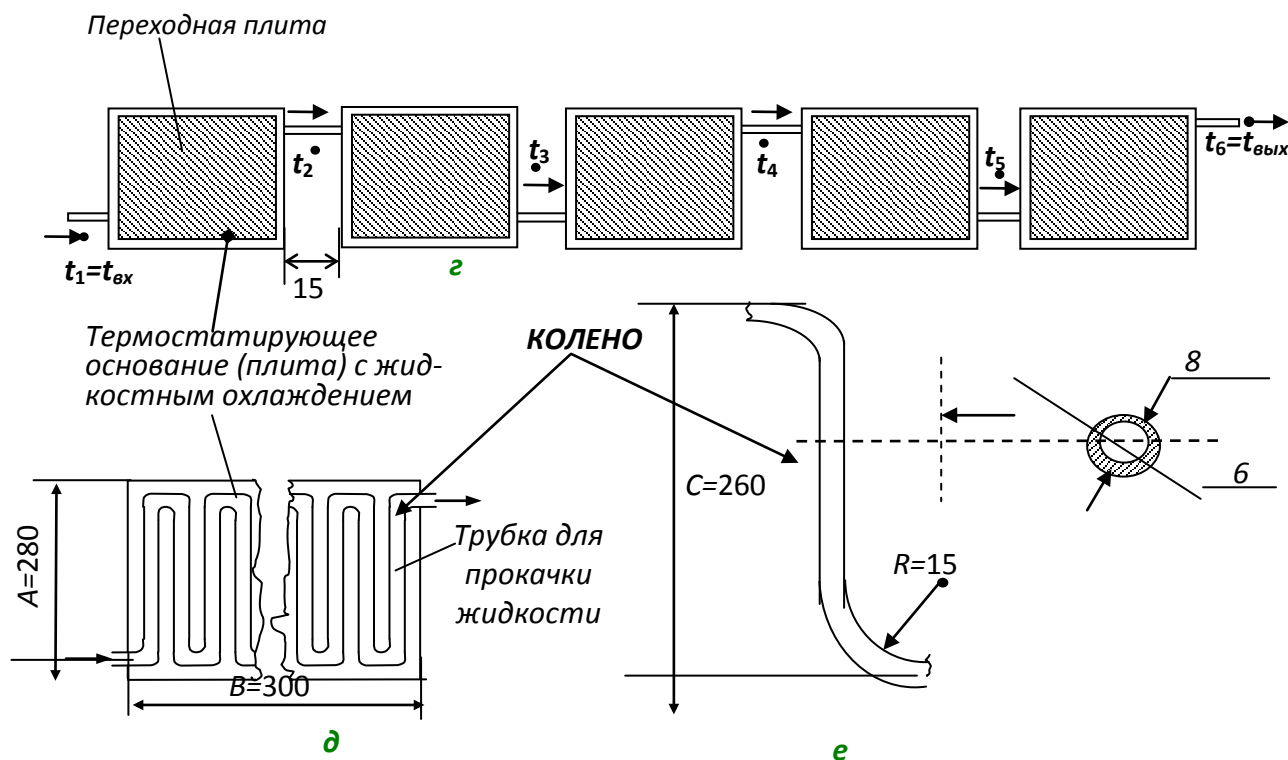


Рис. 4.35. Окончание

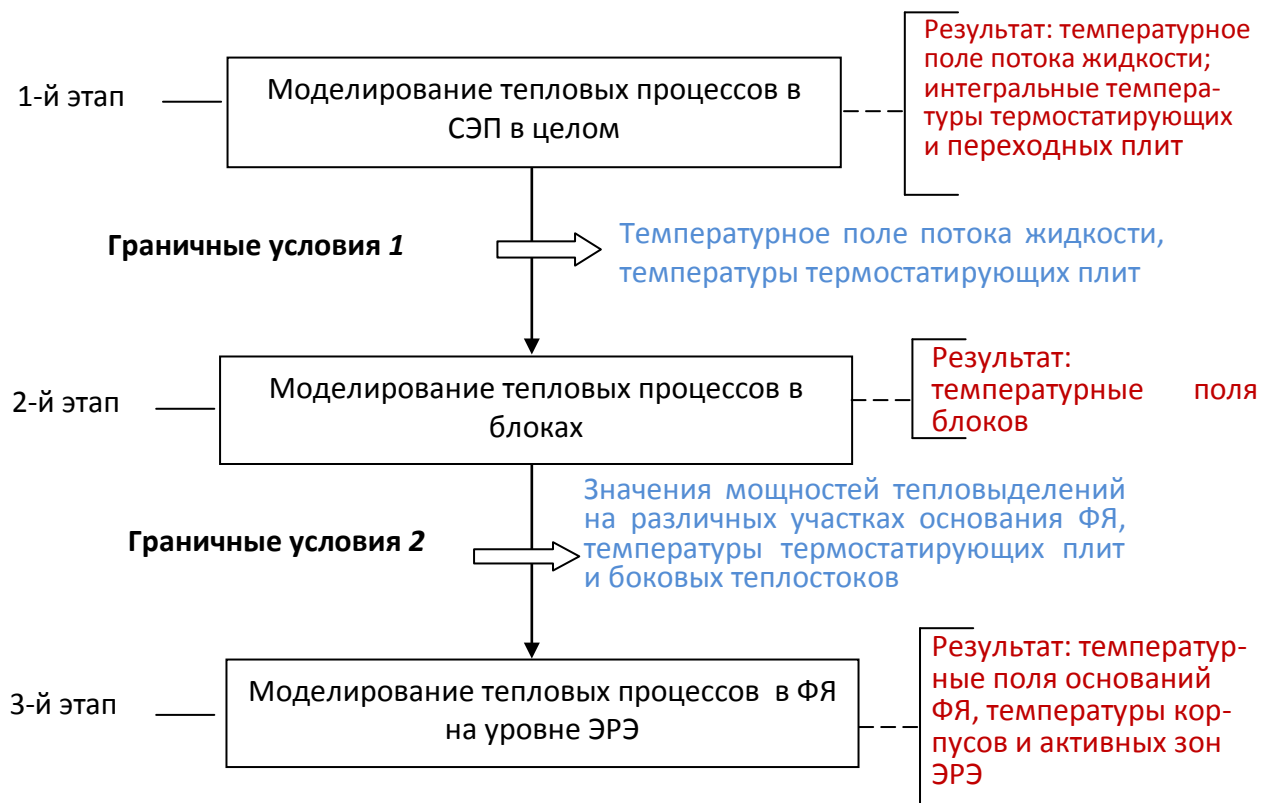




Рис. 4.36. Алгоритм иерархического анализа тепловых характеристик СЭП

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 321 |
|---|---|--|--|------------|

В процессе проведения исследований необходимо принять следующие значения конструкционных и теплофизических параметров:

- температура потока жидкости на входе в систему охлаждения – 5–15 °С;
- толщина основания ФЯ – 1–2,5 мм;
- внутренний диаметр трубок для прокачки воды – 6 мм;
- длина трубки для прокачки жидкости у каждой плиты – 520–2300 мм;
- скорость прокачки жидкости – 0,1–0,25 м/сек;
- мощности тепловыделения блоков ЗРУ – 302 Вт (*прибор 2*), остальных блоков – 100 Вт (*прибор 3 и прибор 5*) и 200 Вт (*прибор 1 и прибор 4*);
- коэффициент теплопроводности материала панелей-теплосток, переходных плит и плит с жидкостным охлаждением – 150 Вт/(м·К) /сплав АМг/;
- сила прижатия переходных плит к термостатирующим плитам – $1 \cdot 10^5$ Н/м²;
- шероховатость поверхностей переходных и термостатирующих плит – $R_z = 25$ мкм.



4.3.2. Иерархическая схема исследования тепловых характеристик СЭП

Для достижения поставленных выше задач необходимо осуществить исследование тепловых характеристик СЭП на основе иерархического подхода, схема которого приведена на [рис. 4.36](#).

Из схемы видно, что поставленная задача решается в 3 этапа. Рассмотрим кратко их содержание.

На первом этапе исследуются тепловые характеристики СЭП в целом на уровне интегральных температур термостатирующих плит и блоков. При этом температурное поле потока жидкости представляется температурами t_1 – t_6 (см. [рис. 4.35, з](#)). В результате исследований, проведенных на первом этапе, получают интегральные температуры блоков, а также термостатирующих и переходных плит, температуры которых являются граничными условиями для исследования тепловых характеристик блоков и ФЯ.

На втором этапе используются интегральные температуры переходных плит для исследования тепловых характеристик блоков (в рассматриваемом случае – блока ЗРУ) на уровне интегральных температур функциональных ячеек и панелей-теплосток. В результате исследований второго этапа получают интегральные температуры, на основе которых можно судить о тепловом режиме функциональных ячеек, устанавливаемых в блоке, в целом. На данном этапе также получают температурные поля панелей-теплосток (с учетом неравномерности тепловыделения по высоте ФЯ), выступающих в качестве граничных условий для детального исследования тепловых характеристик ФЯ, входящих в состав блока.

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 322 |
|---|---|--|--|------------|

На третьем этапе осуществляется детальное исследование тепловых характеристик ФЯ, установленных в блоке ЗРУ, а именно – функциональной ячейки $РУ_1$, на уровне отдельных ЭРЭ. При этом, как отмечалось выше, в качестве граничных условий выступают температурные поля боковых панелей-теплосток, интегральная температура переходной плиты, к которой ФЯ крепится через нижний теплосток, а также интегральные температуры соседних ФЯ ($ЗУ_4$ и $РУ_2$), с которыми осуществляется лучистый теплообмен.

Исследования тепловых характеристик СЭП на первом и втором этапах осуществляется на основе разрабатываемых моделей с использованием Комплекса № 1. На третьем этапе используется МТП ФЯ, формируемая в автоматическом режиме. При этом используется Комплекс № 2.

4.3.3. Разработка МТП СЭП в целом

МТП СЭП для первого этапа иерархического анализа должна позволять исследовать характеристики СЭП в целом на уровне интегральных температур блоков, переходных плит, термостатирующих плит, а также давать представление о температурном поле жидкости, прокачиваемой через термостатирующие плиты (см. [рис. 4.35, а](#) и [4.35, з](#)). Исходя из этого, идеализируем конструкцию СЭП (см. [рис. 4.35, а](#)) с точки зрения исследования ее теплового режима.

1. Примем каждый блок, устанавливаемый на переходную плиту, изотермичным. При этом каждый блок будет представлен узлом графа МТП с подключенным к нему источником мощности.
2. Примем каждую переходную плиту изотермичной.
3. Примем каждую термостатирующую плиту изотермичной.
4. Поток жидкости, прокачиваемой через систему охлаждения (см. [рис. 4.35, а](#)), представим совокупностью изотермичных объемов, каждому из которых будет поставлена в соответствие температура (см. [рис. 4.35, з](#)): t_1 – температура на входе первой плиты, t_2 – температура на выходе первой плиты и входе второй, t_3 – температура на выходе второй плиты и входе третьей, t_4 – температура на выходе третьей плиты и входе четвертой, t_5 – температура на выходе четвертой плиты и входе пятой, t_6 – температура на выходе пятой плиты. Исходя из наихудшего случая, значение t_1 примем равным 15 °С.

С учетом принятой идеализации граф МТП СЭП в целом будет иметь вид в соответствии с [рис. 4.34](#).

Для проведения исследований, в ходе которых предусматривается корректировка геометрических и теплофизических параметров СЭП, целесообразно осуществить параметризацию МТП СЭП на уровне предполагаемых варьируемых параметров. На [рис. 4.38](#) показаны элементы параметризации компонентов ветвей МТП СЭП. В качестве компонентов параметризации были приняты следующие: скорость потока жидкости V , внутренний диаметр трубки D ,

мощность тепловыделения в блоке ЗРУ P , температура потока жидкости на входе T и длина трубки C для каждой термостатирующей плиты.

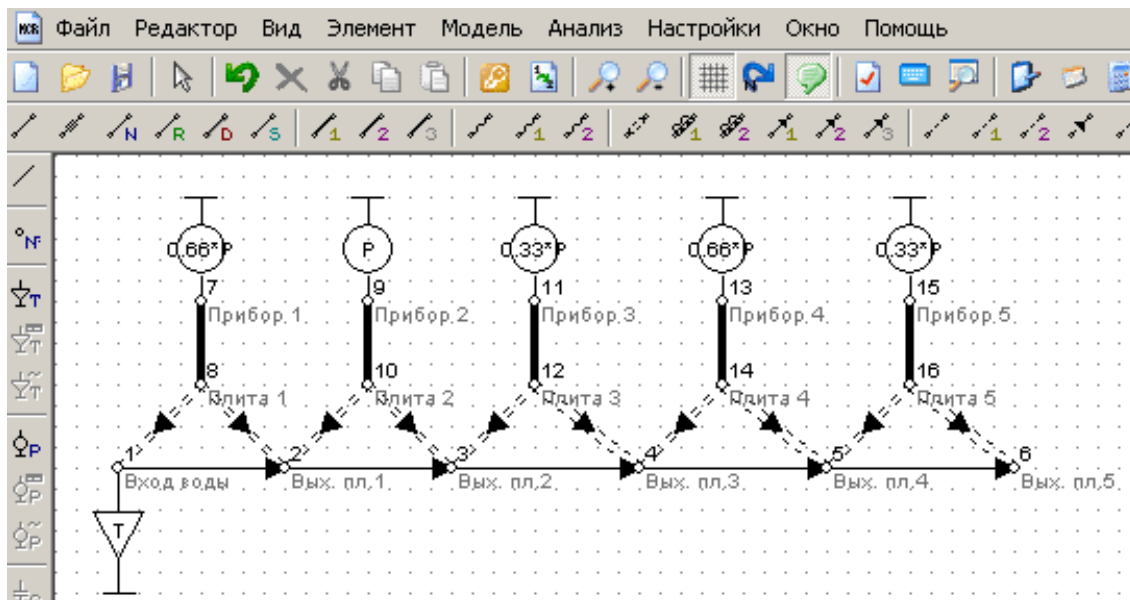


Рис. 4.37. Граф МТП СЭП в целом

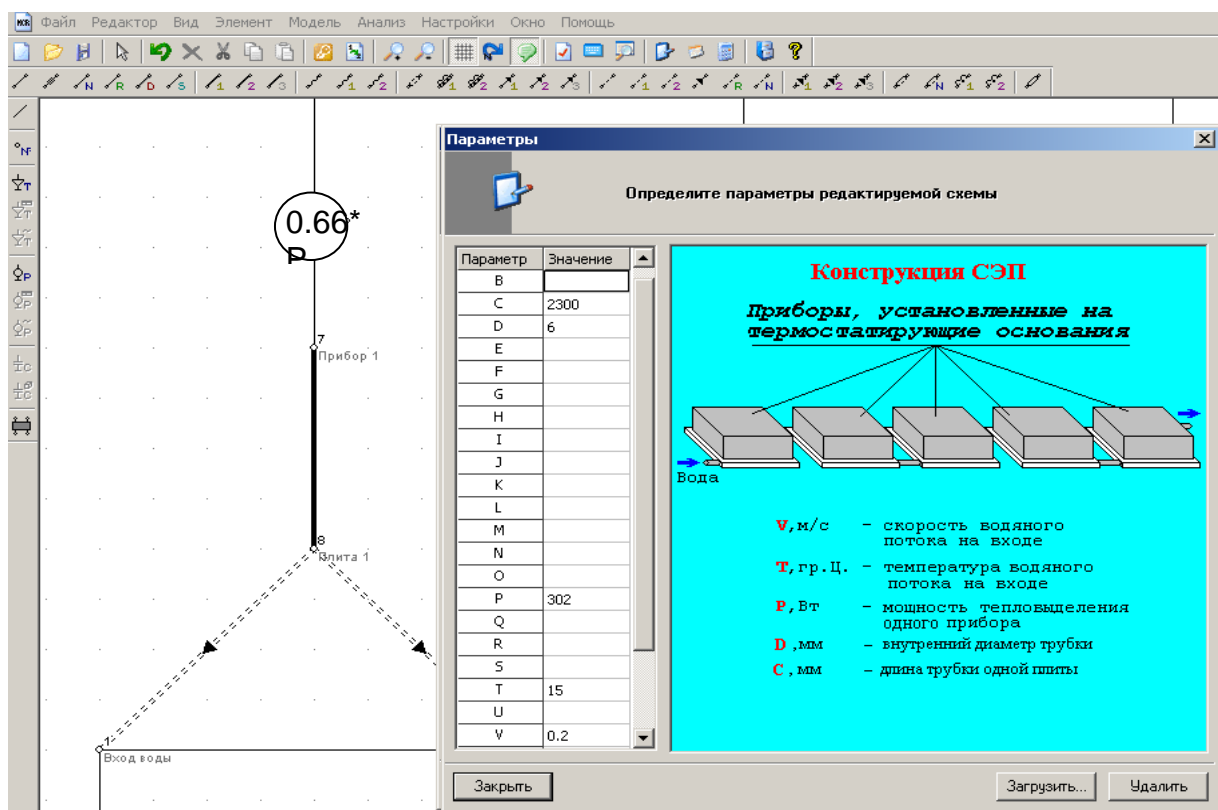


Рис. 4.38. Компоненты параметризации МТП СЭП в целом

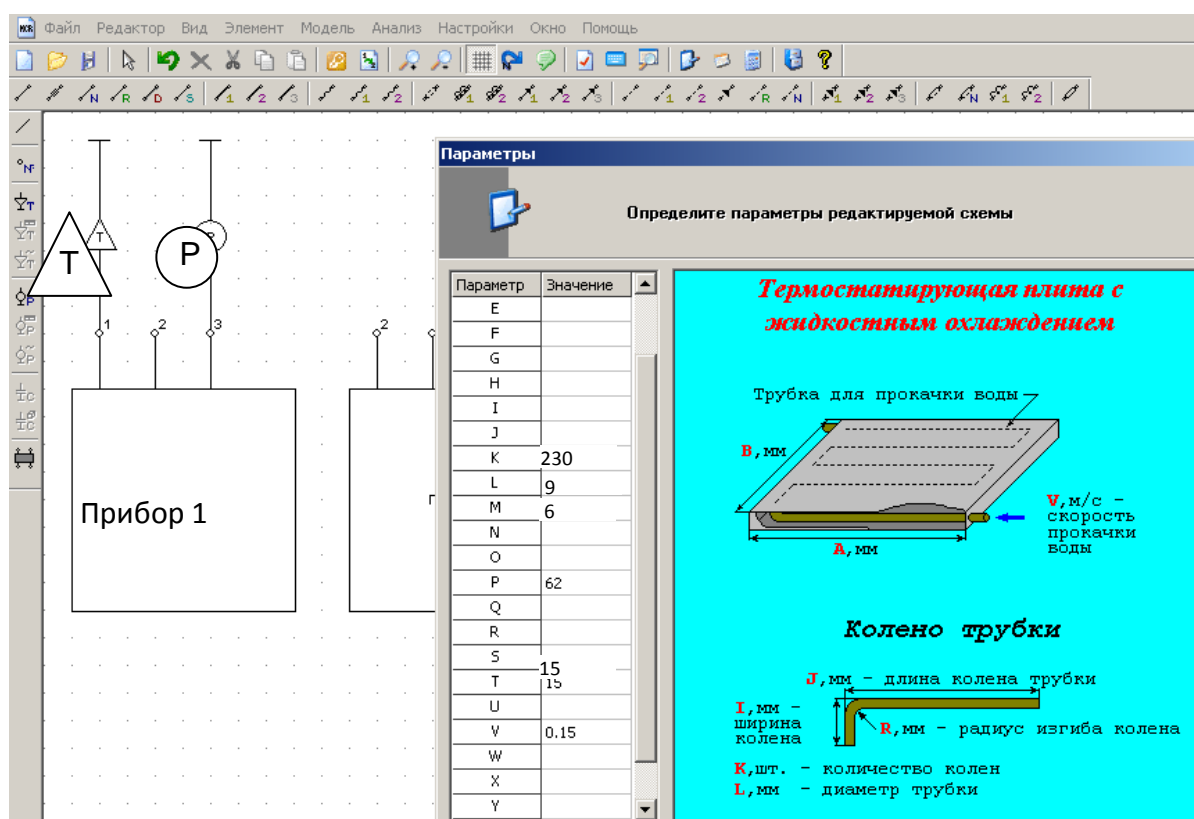


Рис. 4.39. Структура фрагмента библиотечной модели СЭП в целом

Представленная модель может быть также сформирована из библиотечных параметризованных фрагментов, включающих в себя модель каждой плиты. На [рис. 4.39](#) приведен фрагмент структуры МТП, составленный из библиотечных фрагментов с внедренным эскизом термостатирующей плиты и списком параметризованных компонентов топологической МТП плиты (фрагмента).

4.3.4. Разработка МТП блока

Идеализируем тепловые процессы в конструкции блока:

1. Учитывая значительные мощности тепловыделения в ФЯ, представим каждую из них в виде совокупности трех изотермичных объемов, ориентируемых вдоль оси Oy (см. [рис. 4.40, б](#)). Опыт компоновки аналогичных конструкций показывает, что в 1-й части ФЯ, как в наиболее близкой к нижнему теплостоку, как правило, устанавливаются наиболее мощные ЭРЭ. Во 2-й части ФЯ располагаются элементы со средней мощностью тепловыделения. А в 3-й части размещаются элементы с наименьшей мощностью тепловыделения (элементы схем управления, автоматики и т. п.).

2. По аналогии с ФЯ каждую область контакта панелей-теплосток с боковыми теплостоками функциональных ячеек представим тремя изотермичными объемами (см. [рис. 4.40, б](#)), между которыми тепловой поток распространяется посредством кондукции.

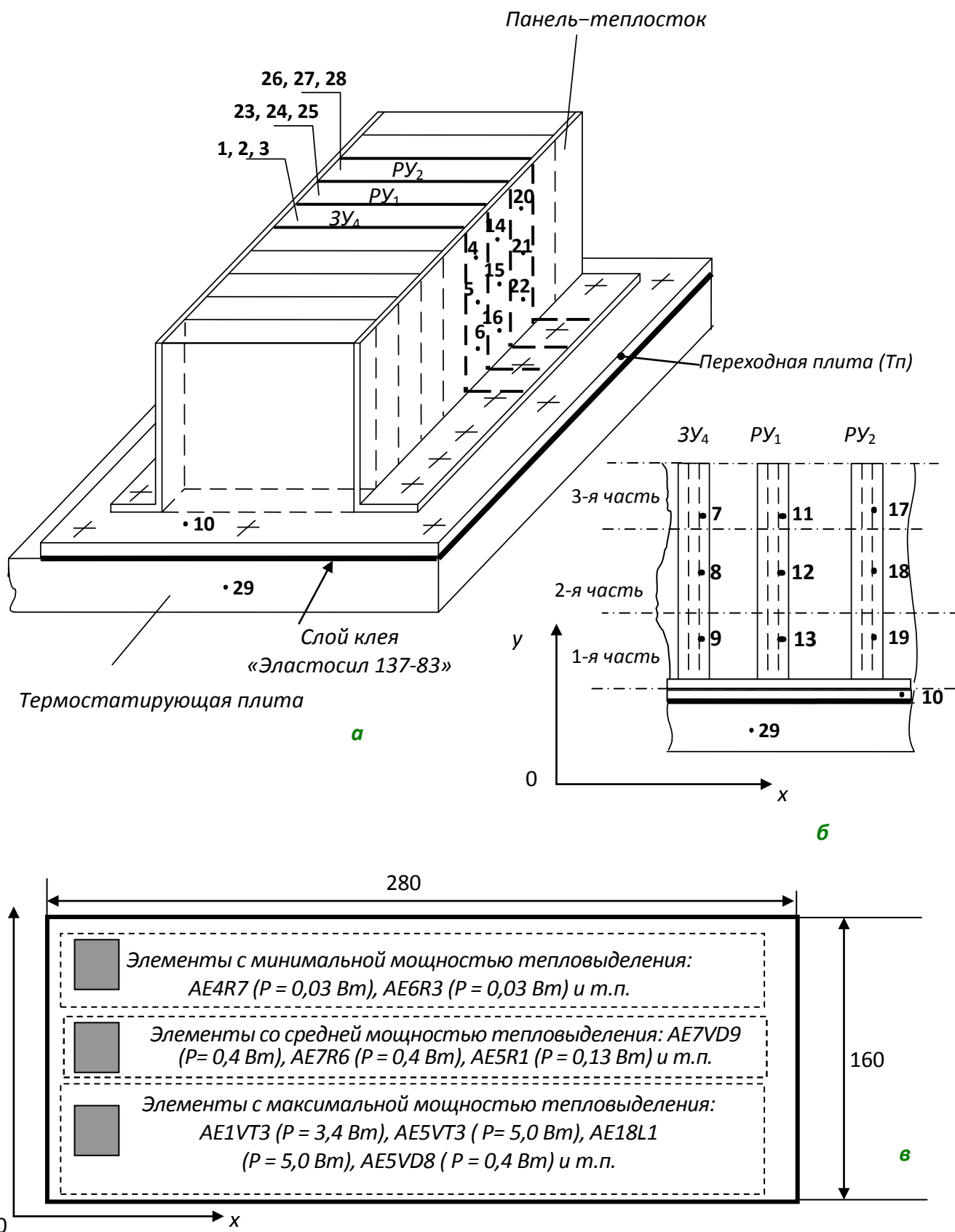


Рис. 4.40. Эскиз блока кассетной конструкции с кондуктивным охлаждением с пронумерованными на нем условно нагретыми зонами: а – эскиз блока в целом; б – условное разбиение ФЯ на изотермичные объемы; в – принцип компоновки ФЯ

3. Ввиду того, что СЭП устанавливается за пределами гермоконтейнера, исключим из рассмотрения в МТП блока конвективную составляющую.

Учитывая, что в приборе устанавливается несколько групп однотипных ФЯ, рассмотрим граф топологической МТП (см. [рис. 4.40, б](#)), отражающий совокупность трех функциональных ячеек (PY_1 , PY_2 и $ЗУ_4$).

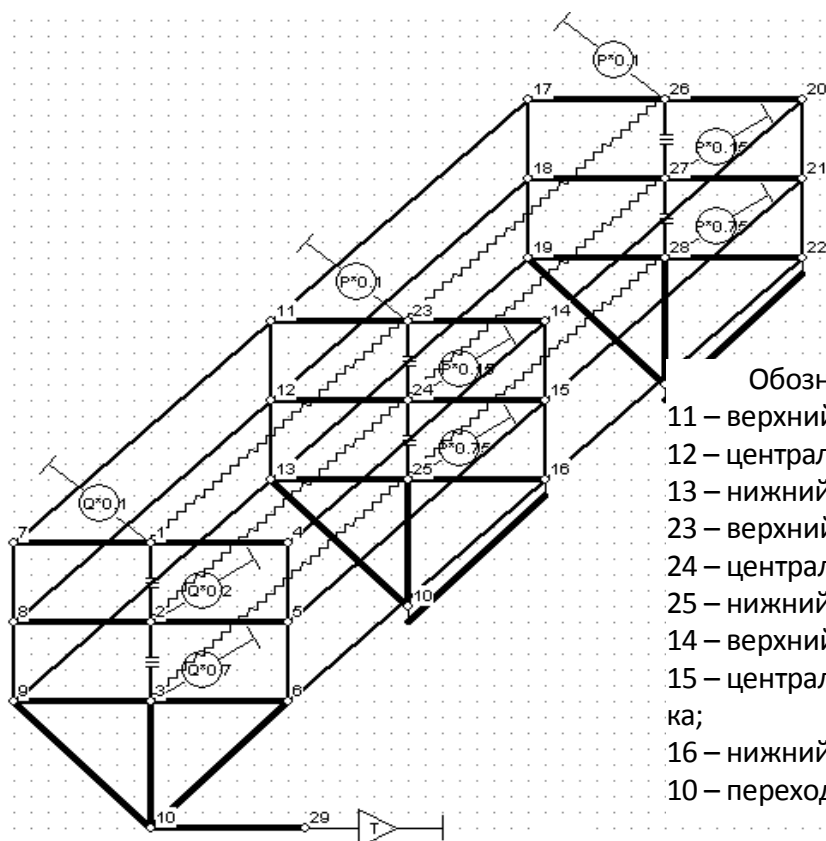
На [рис. 4.40, а](#) отмечены точками и пронумерованы выделенные с учетом принятой идеализации некоторые изотермичные объемы. Так, например, ФЯ $ЗУ_4$ в МТП будет представлена узлами 1–3, ФЯ PY_1 – узлами 23–25, а ФЯ PY_2 – узлами 6–28. Объемы с номерами 4–6 моделируют участок панели, контактирующий с ФЯ $ЗУ_4$ (узлы 1–3).

В МТП блока узлами 14–16 моделируется фрагмент панели, контактирующий с ФЯ PY_1 , а узлы 20–22 – фрагмент панели, контактирующий с ФЯ PY_2 . Узел 10 моделирует переходную плиту, а узел 29 – термостатирующее основание. Граф модели тепловых процессов рассмотренного фрагмента блока приведен на [рис. 4.41, а](#).

Представленный на рисунке граф МТП отражает:

- неравномерность тепловыделения по высоте каждой ФЯ (подключаются три источника мощности, разные по своей величине, позволяющие моделировать перераспределение ЭРЭ на ФЯ вдоль оси Oy);
- распространение теплового потока по основанию ФЯ вдоль оси Oy посредством кондукции (ветви 9-го типа: 1–2, 2–3, 23–24 и т. д.);
- распространение теплового потока посредством кондукции по боковым панелям-тепlostокам (ветви 2-го типа: 4–14, 14–20, 7–11, 11–17, ..., 4–5, 5–6, 7–8, 8–9, 14–15 и т. д.);
- контактный теплообмен между каждой ФЯ (боковые тепlostоки) и панелями-тепlostоками (ветви 11-го типа: 1–4, 2–5, 3–6, 1–7, 2–8, 3–9, 23–14, 24–15 и т. д.), а также ФЯ (нижний тепlostок) с переходной плитой (ветви 11-го типа: 3–10, 25–10 и 28–10);
- контактный теплообмен между боковыми панелями-тепlostоками и переходной плитой (ветви 2-го типа: 6–10, 9–10, 13–10, 16–10, 19–10, 22–10);
- передачу теплового потока посредством контактного теплообмена между переходной плитой и термостатирующим основанием (ветвь 13-го типа 10–29);
- лучистый теплообмен между ФЯ (ветви 17-го типа: 1–23, 23–26, 2–24, 24–27, 3–25, 25–28).

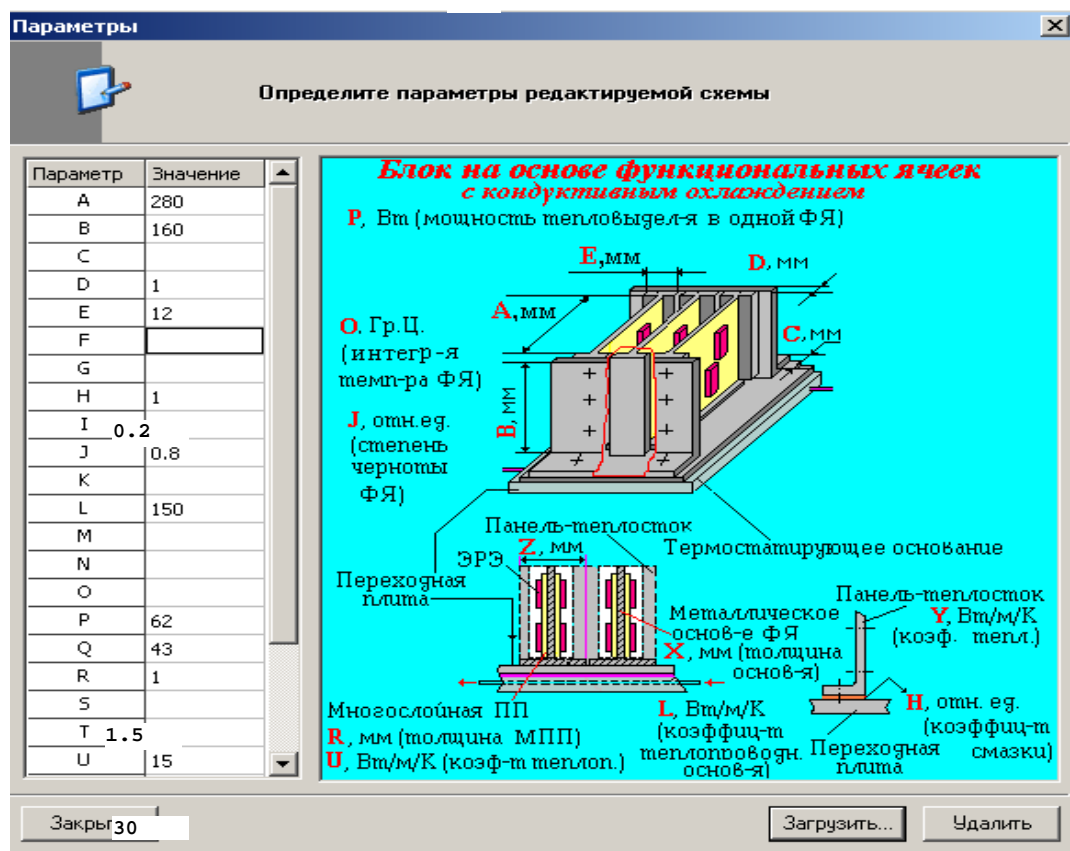
По аналогии с МТП СЭП (см. [рис. 4.37](#) и [4.38](#)) целесообразно выполнить параметризацию МТП блока. Кроме того, для дальнейшего применения разработанную МТП блока можно сформировать на базе библиотечных фрагментов.



Обозначение узлов МТП ФЯ PY_1 :

- 11 – верхний участок левого теплотока;
- 12 – центральный участок левого теплотока;
- 13 – нижний участок левого теплотока;
- 23 – верхний участок ФЯ;
- 24 – центральный участок ФЯ;
- 25 – нижний участок ФЯ;
- 14 – верхний участок правого теплотока;
- 15 – центральный участок правого теплотока;
- 16 – нижний участок правого теплотока;
- 10 – переходная плита

a



б

Рис. 4.41. Граф топологической модели тепловых процессов части блока ЗРУ (ФЯ ZY_4 , ФЯ PY_1 , ФЯ PY_2)

При описании компонентов ветвей графа МТП принимались следующие обозначения параметризующих величин, теплофизические и геометрические параметры, кроме ранее указанных: толщина многослойных печатных плат $R = 1$ мм; коэффициент теплопроводности многослойных печатных плат $L = 30$ К/(Вт•м); коэффициент черноты ФЯ $J = 0,8$; коэффициент смазки H (в ветвях, отражающих контактный теплообмен) $-0,2$; размер ФЯ вдоль оси $Ox A = 280$ мм, $Oy -B = 160$ мм; ширина нижнего теплостока $Z = 25$ мм.

4.3.5. Модель тепловых процессов ФЯ PY_1

Функциональная ячейка (габаритные размеры 280×160 мм) крепится в блоке, как было описано выше, при помощи 3-х специальных теплостоков (см. [рис. 4.35, в](#)). Ширина боковых теплостоков – 12 мм, а нижнего (Hot_1) – 25 мм. Между контактирующими поверхностями наносится слой пасты КПТ-8. МТП ФЯ формируется в автоматическом режиме.

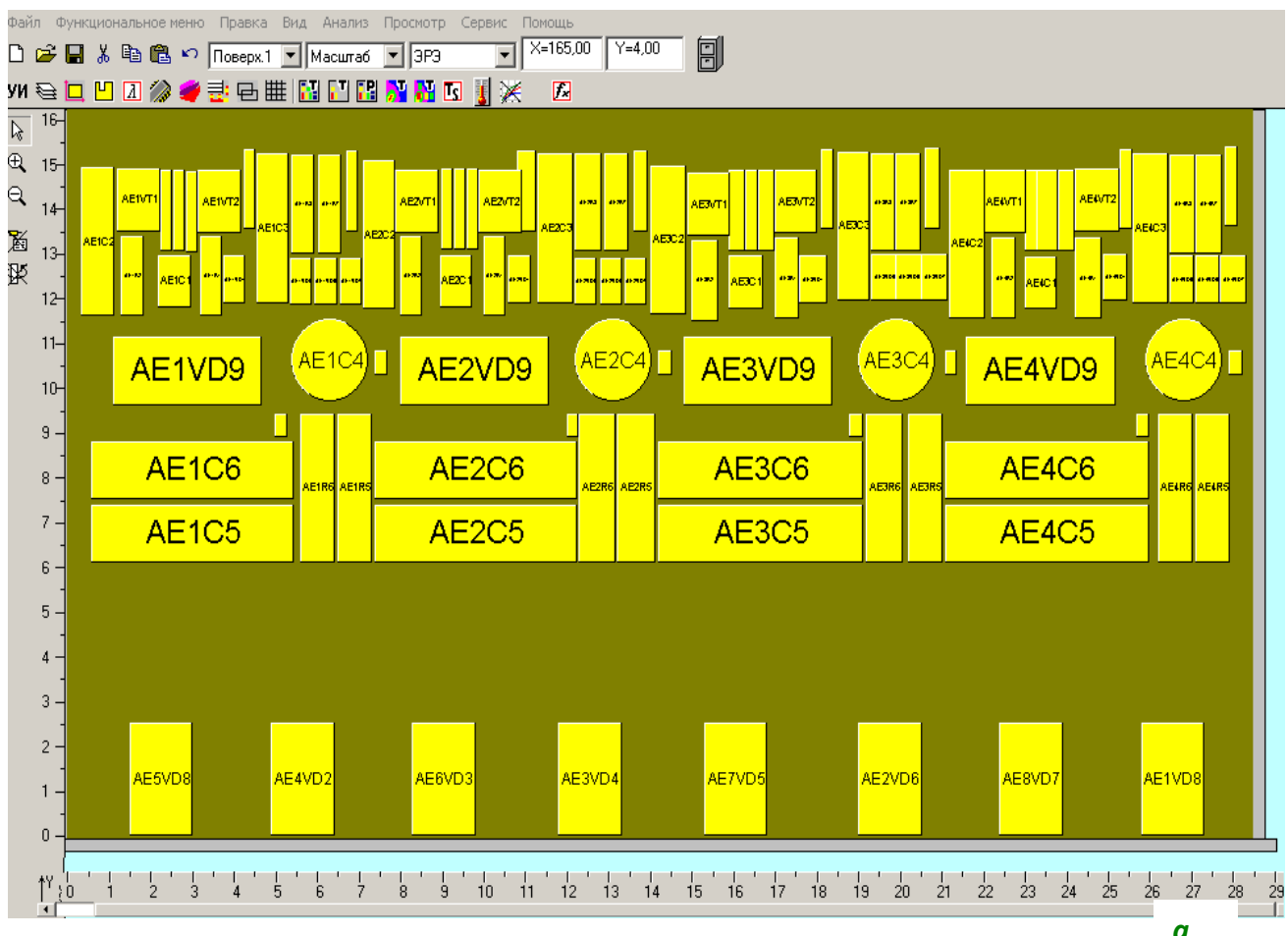
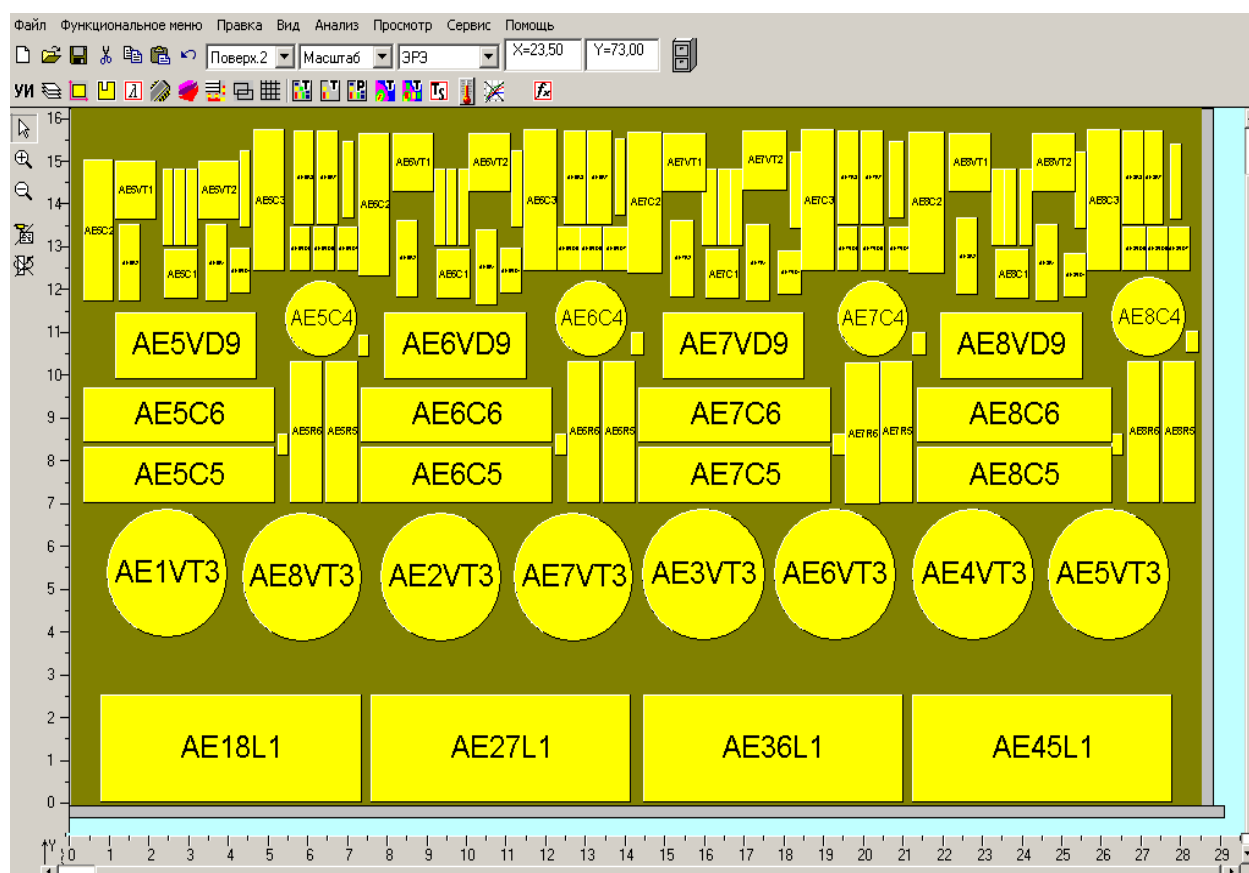


Рис. 4.42. Исходный вариант размещения ЭРЭ на ФЯ PY_1 : а – 1 поверхность ФЯ PY_1 ; б – 2 поверхность ФЯ PY_1



6

Рис. 4.42. Окончание

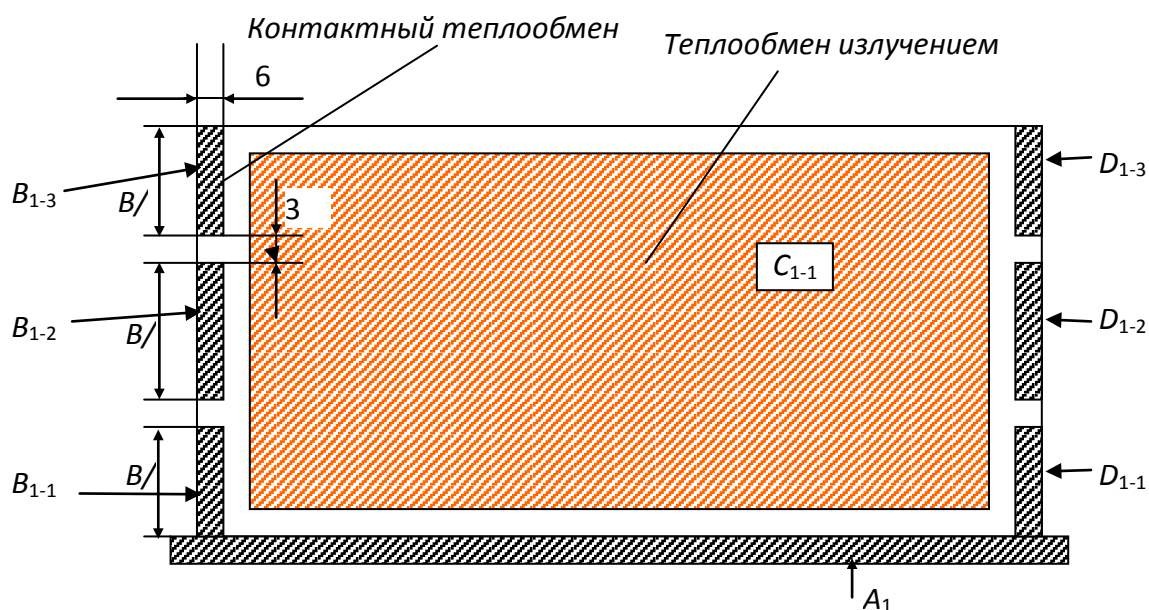


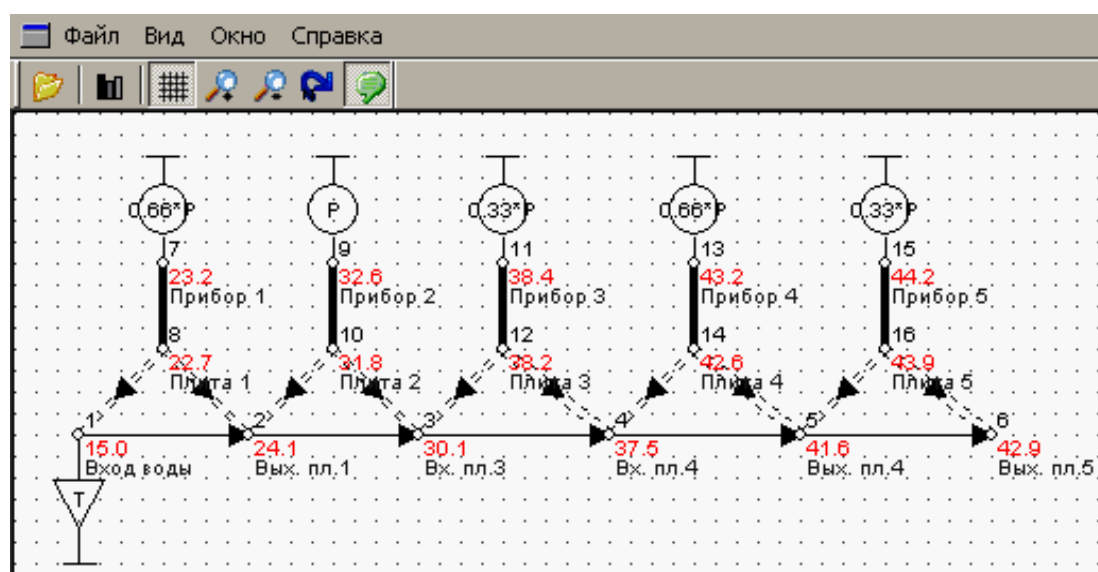
Рис. 4.43. Схема задания граничных условий для ФЯ РУ₁

Схема размещения ЭРЭ на ГПП, входящих в состав ФЯ (конвертирована из файлов *.pcb системы P-CAD), приведена на [рис. 4.42](#). Схема задания граничных

условий для ФЯ PY_1 приведена на [рис. 4.43](#). На рисунке обозначены зоны локализации граничных условий и приведены их геометрические параметры. Зоны $B_{1-1}-B_{1-3}$, $D_{1-1}-D_{1-3}$ отражают контактный теплообмен между боковыми теплостоками ФЯ и панелями-теплостоками блока. В указанных зонах индекс “1” обозначает номер поверхности основания ФЯ. Учитывая, что боковой теплосток имеет ширину 12 мм, пятно контакта распределяется на 1-ю и 2-ю поверхности по 6 мм на каждую, т. е. на второй поверхности также будут расположены зоны $B_{2-1}-B_{2-3}$, $D_{2-1}-D_{2-3}$. Зона A_1 моделирует контактный теплообмен между нижним теплостоком и переходной плитой и может быть задана через глобальные граничные условия. Зоны $C_{1-1}-C_{2-1}$ отражают лучистый теплообмен между ФЯ PY_1 , ФЯ PY_2 и ФЯ ZY_4 . Значения температур, задаваемых при описании граничных условий, используемых в перечисленных зонах, получают в результате анализа МТП блока (см. [рис. 4.40](#) и [4.41](#)). При этом для зон излучения можно задавать усредненные температуры узлов 26–28 и 1–3 МТП, приведенной на [рис. 4.41, а](#).

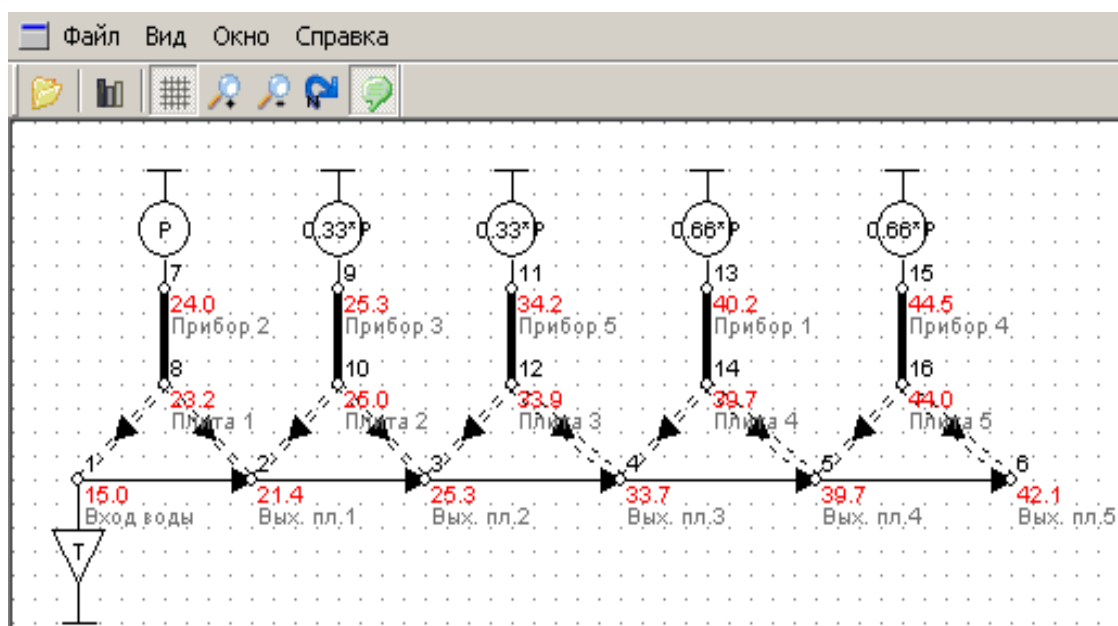
4.3.6. Исследование тепловых характеристик СЭП на основе разработанных моделей

На первом этапе, в соответствии со схемой анализа (см. [рис. 4.36](#)) с применением МТП СЭП (см. [рис. 4.37](#)), были проведены исследования тепловых характеристик СЭП в целом. Анализировались различные варианты размещения приборов на термостатирующих плитах. На [рис. 4.44, а](#) приведен исходный вариант. В результате исследований был принят вариант размещения приборов, приведенный на [рис. 4.44, б](#). Как видно из сравнения рассмотренных вариантов, последний вариант размещения приборов позволил существенно улучшить тепловой режим работы исследуемой СЭП. Так, в частности, общий интегральный показатель (интегральная температура всех приборов) уменьшился на 16 °С.



а

Рис. 4.44. Температурные поля в конструкции СЭП при различных вариантах размещения приборов на термостатирующих плитах: **а** – исходный вариант, **б** – вариант, полученный в результате перестановок приборов по плитам



6

Рис. 4.44. Окончание

На графиках, представленных на [рис. 4.45–4.47](#), приведены различные зависимости, полученные в ходе исследований: зависимость интегральной температуры ЗРУ (*прибор 2*) от длины трубки (см. [рис. 4.45](#)); зависимость интегральной температуры ЗРУ (*прибор 2*) от скорости прокачиваемой жидкости (см. [рис. 4.46](#)); зависимость интегральной температуры ЗРУ (*прибор 2*) от диаметра трубки (см. [рис. 4.47](#)). Исходя из возможности варьирования параметрами, перечисленными в [параграфе 4.3.1](#), а также инженерных соображений, были приняты следующие значения геометрических и теплофизических параметров: длина трубки для каждой плиты – 2000 мм, скорость прокачки жидкости – 0,2 м/с.

На следующем этапе, в соответствии с иерархической схемой исследований, был проведен анализ тепловых характеристик блока с применением МТП, представленной на [рис. 4.41, а](#). Результаты анализа приведены на [рис. 4.48](#). График зависимости температуры ФЯ от толщины ее основания приведен на [рис. 4.49](#). В качестве оптимальной толщины основания ФЯ было принято значение 1,5 мм.

На следующем этапе был выполнен анализ тепловых характеристик ФЯ. При этом в качестве граничных условий были приняты следующие значения температур по зонам: в зоне $B_{1-1}-B_{2-1}$ – 23,7 °С, $B_{1-2}-B_{2-2}$ – 30,9 °С, $B_{1-3}-B_{2-3}$ – 33,7 °С, $D_{1-1}-D_{2-1}$ – 23,7 °С, $D_{1-2}-D_{2-2}$ – 30,9 °С, $D_{1-3}-D_{2-3}$ – 33,7 °С, $C_{1-1}-C_{2-1}$ – 31,0 °С, A_1 – 23,3 °С. Перечисленные температуры были получены в результате анализа блока (см. [рис. 4.48](#)).

Результаты анализа исходного варианта ФЯ приведены на [рис. 4.50](#). Анализ полученных температур позволил сделать вывод, что не выполняются

условия обеспечения нормального теплового режима ЭРЭ, а именно, температуры контролируемых элементов с большой мощностью тепловыделения (см. [параграф 4.3.1](#)) находятся в диапазоне 63,7–65,9 °С.

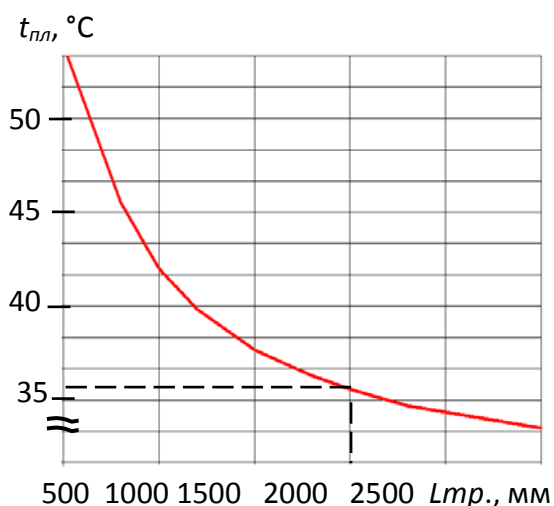


Рис. 4.45. Зависимость интегральной температуры ЗРУ (прибор 2) от длины трубки в термостатирующей плите при неизменной скорости прокачки жидкости

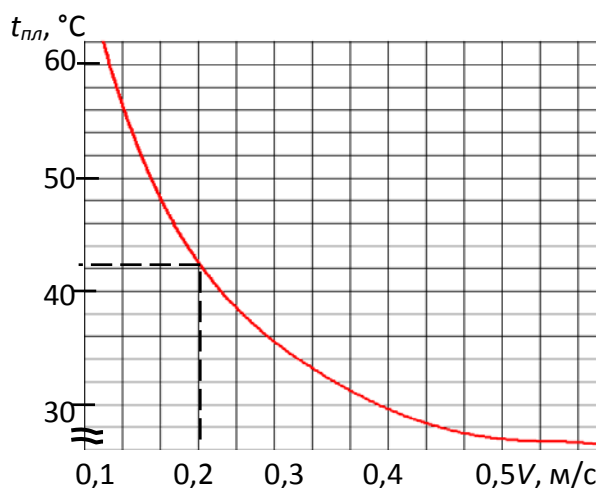


Рис. 4.46. Зависимость интегральной температуры ЗРУ (прибор 2) от скорости прокачиваемой жидкости при неизменной длине трубки (2000 мм)

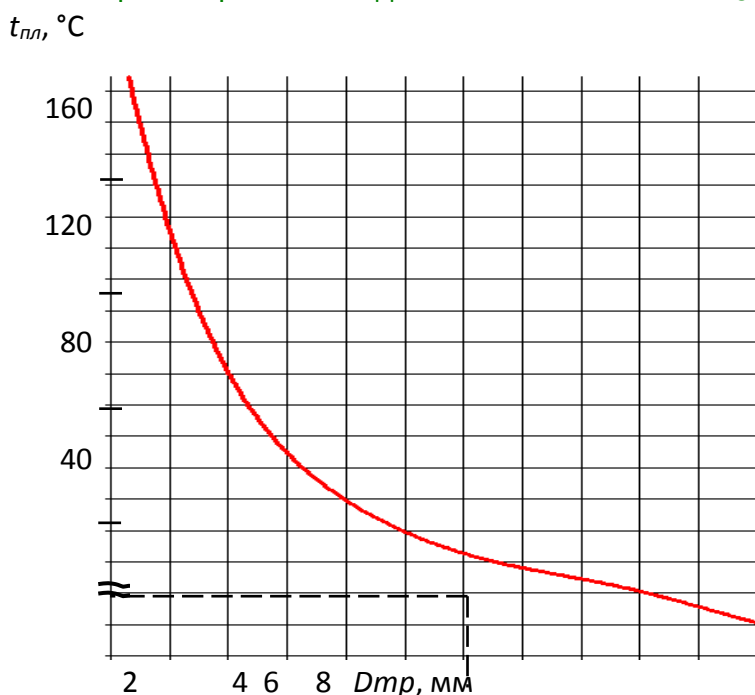


Рис. 4.47. Зависимость интегральной температуры блока ЗРУ (прибор 2) от диаметра трубки

В этой связи были предприняты меры, направленные на достижение нормального теплового режима работы ЭРЭ, а именно, были рассмотрены следующие варианты модификации конструкции ФЯ: вариант II – установка элементов с большой мощностью тепловыделения (AE7VT3, AE1VD9, AE18L12, AE27L12, AE36L12, AE8VT32, AE2VT32, AE7VT32 и т. п.) непосредственно на основание ФЯ через вырез (см. [рис. 4.51, а](#)); вариант III – установка элементов с большой мощностью тепловыделения через дополнительную

шину, которая крепится непосредственно на основание ФЯ через вырез и

увеличивает площадь сечения теплового потока. Учитывая, что элементы с большой мощностью тепловыделения являются однотипными, в ряде следований рассматривались тепловые характеристики только элемента АЕ7VT3.

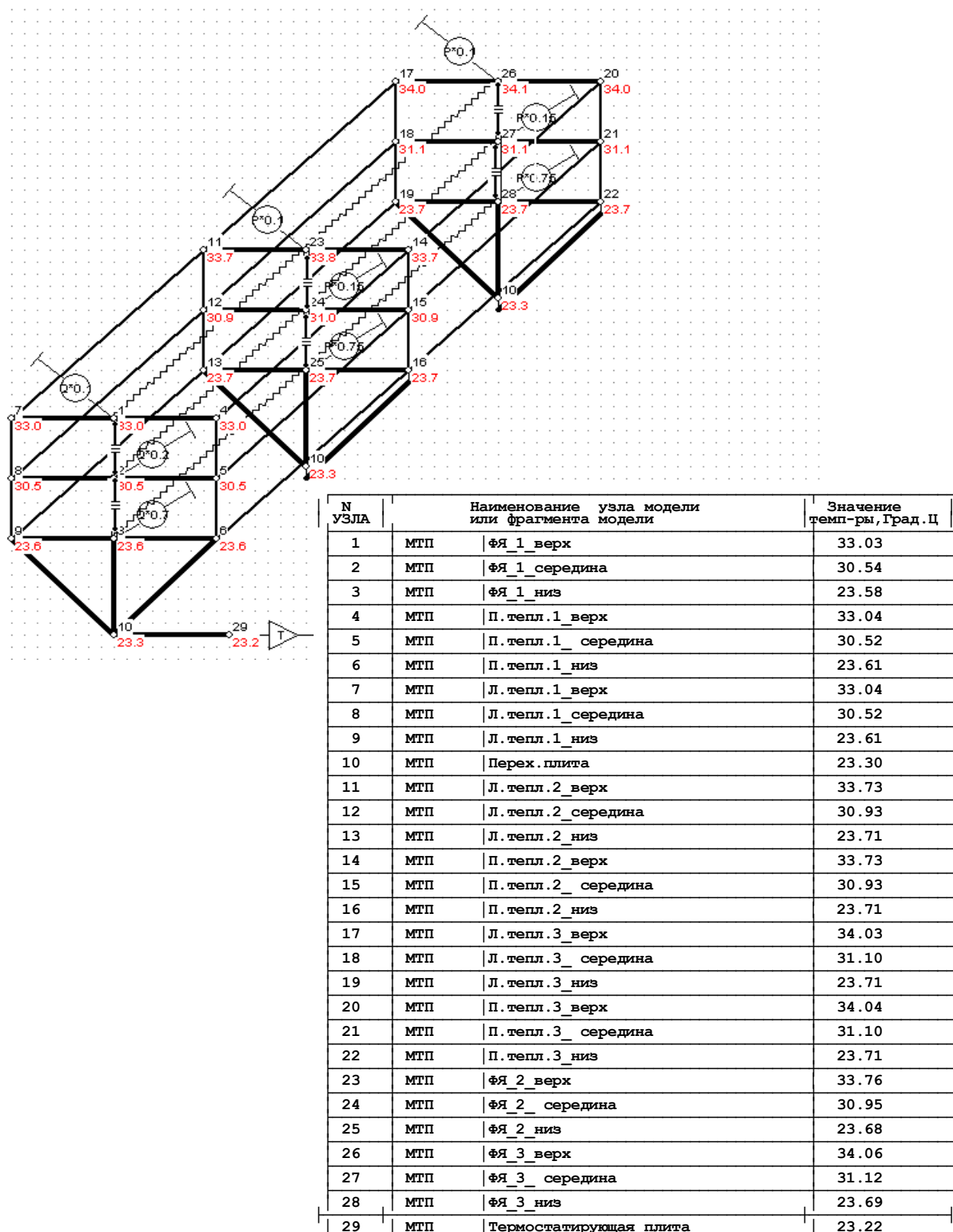


Рис. 4.48. Результаты анализа тепловых характеристик блока

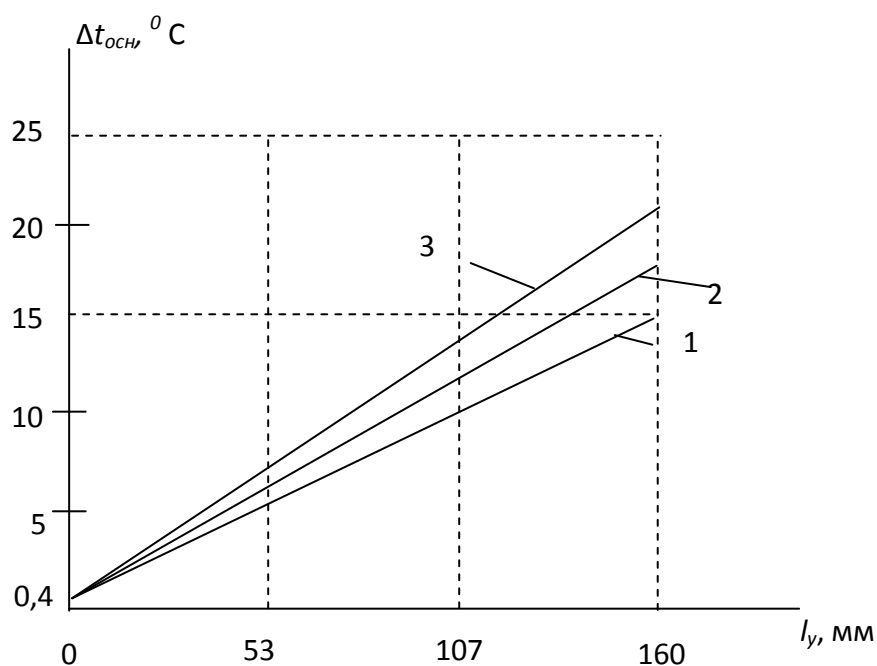


Рис. 4.49. Распределение перегрева ФЯ PY_1 вдоль оси Oy при разной толщине ее основания $b_{ос}$: 1 – $b_{ос} = 2$ мм; 2 – $b_{ос} = 1,5$ мм; 3 – $b_{ос} = 1$ мм

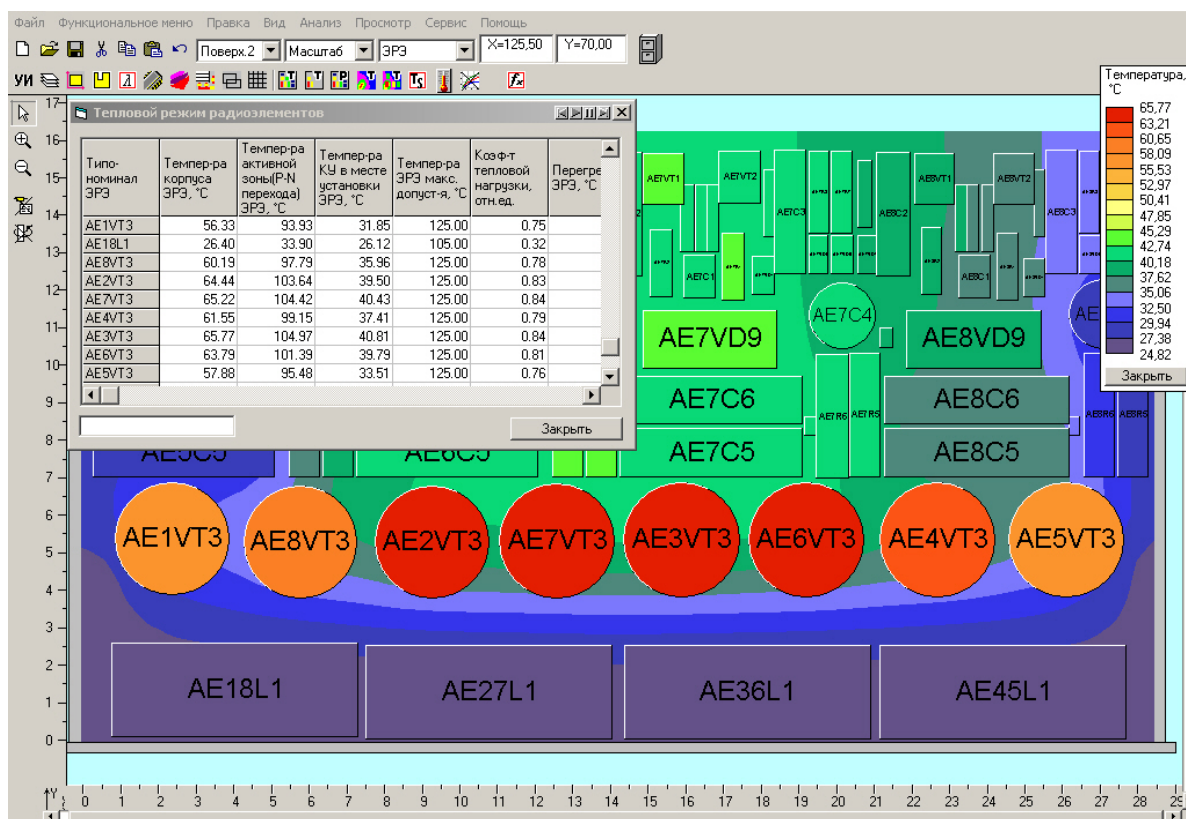
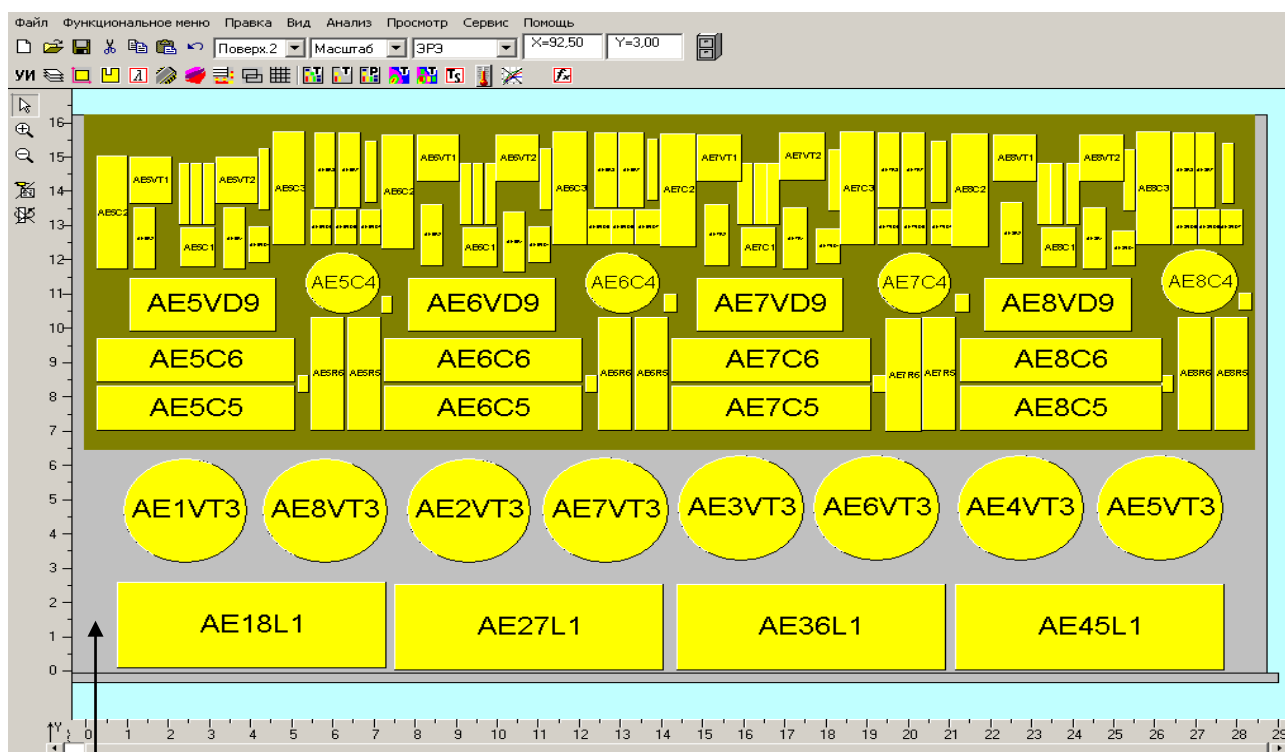
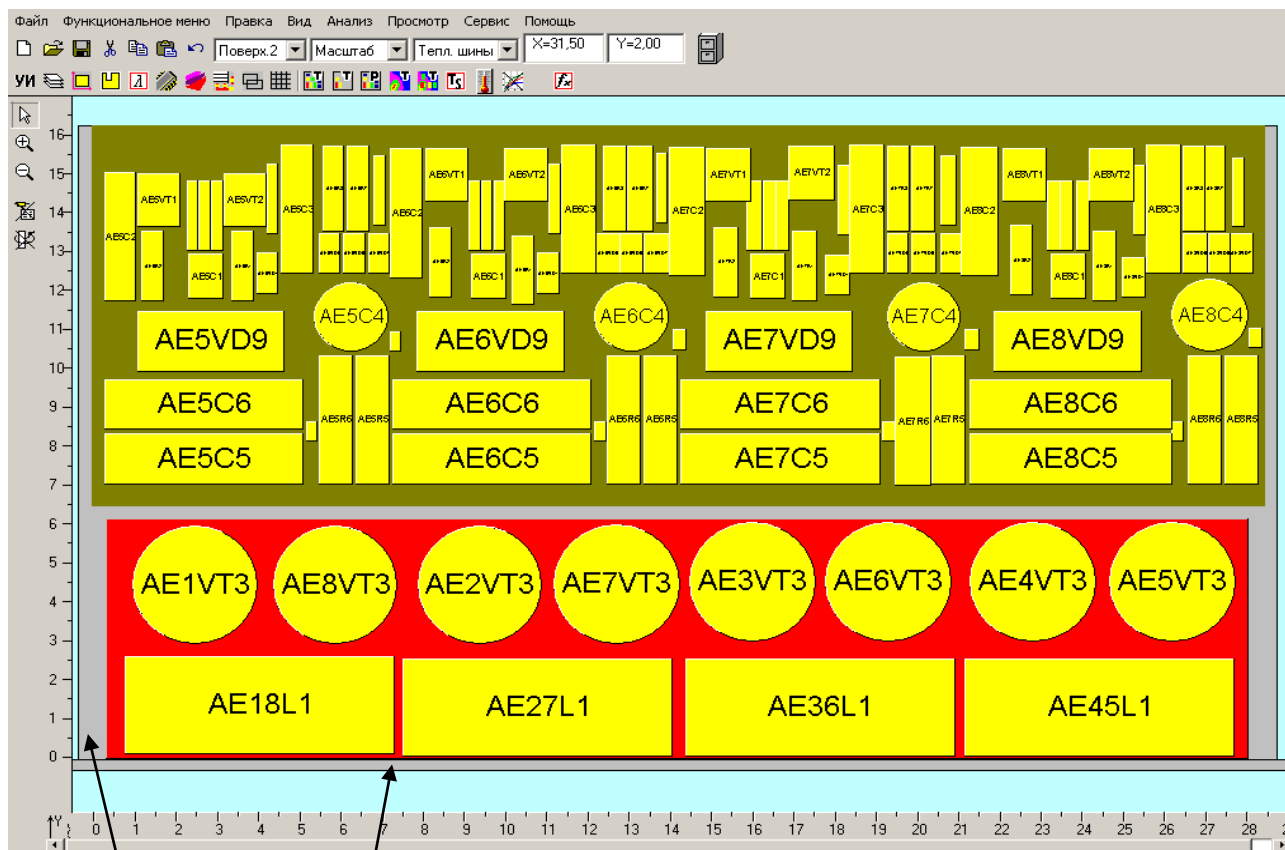


Рис. 4.50. Результаты анализа исходного варианта конструкции ФЯ



Вырез

а



Вырез

Шина

б

Рис. 4.51. Варианты конструктивного исполнения ФЯ РЭА, рассмотренные в процессе исследований

Проведенные исследования показали, что в исходном варианте (см. [рис. 4.50](#)) температура данного элемента составляет $65,2^{\circ}\text{C}$, для варианта установки через вырез (вариант II – см. [рис. 4.51, а](#) и [4.52](#)) – $56,8^{\circ}\text{C}$, а для варианта установки через вырез на дополнительную тепловую шину (вариант III – см. [рис. 4.51, б](#) и [4.52](#)) – $53,7^{\circ}\text{C}$. На [рис. 4.53](#) приведены тепловые характеристики транзистора АЕ7ВТ3, полученные в результате проведения серии вычислительных экспериментов. В процессе исследований варьировались толщина основания ФЯ и координата размещения элемента вдоль оси Oy . При этом перечисленные характеристики рассматривались при установке элемента с шиной и без нее. Результаты были обработаны и представлены в виде графиков (см. [рис. 4.54](#)). Как видно из графиков, на тепловые характеристики транзистора в значительной степени влияет толщина основания ФЯ, а также координата его расположения вдоль оси Oy . Наилучший результат дает вариант расположения, когда транзистор размещается непосредственно возле нижнего теплостока и устанавливается через вырез в ГПП на дополнительную шину. Исходя из этого, в качестве окончательного варианта был принят вариант III конструкции ФЯ. При этом были определены следующие значения параметров: толщина основания ФЯ – 1 мм; толщина дополнительной шины – 2 мм; координата размещения центров силовых транзисторов по оси Oy – 43 мм. Результаты исследования тепловых характеристик варианта III ФЯ (см. [рис. 4.52](#)) представлены на [рис. 4.55](#). Данный вариант конструкции обеспечивает температуры корпусов силовых элементов, указанных выше, в диапазоне $51,1$ – $54,01^{\circ}\text{C}$, что позволяет говорить об обеспечении необходимого теплового режима ФЯ $РУ_1$.

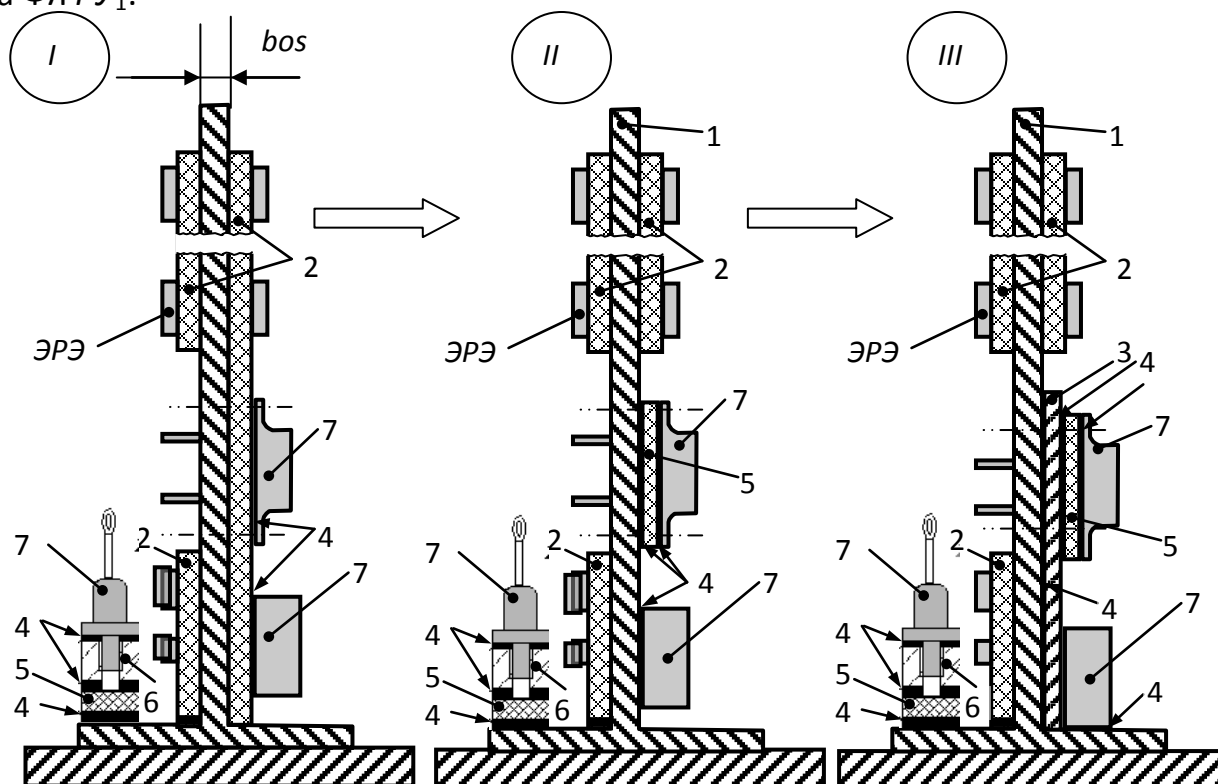


Рис. 4.52. Анализируемые варианты конструктивной реализации ФЯ $РУ_1$: 1 – основание ФЯ; 2 – многослойная печатная плата; 3 – тепловая шина; 4 – клеевой слой; 5 – изоляционная прокладка; 6 – втулка для крепления ЭРЭ; 7 – ЭРЭ с большой мощностью тепловыделения; bos – толщина основания ФЯ

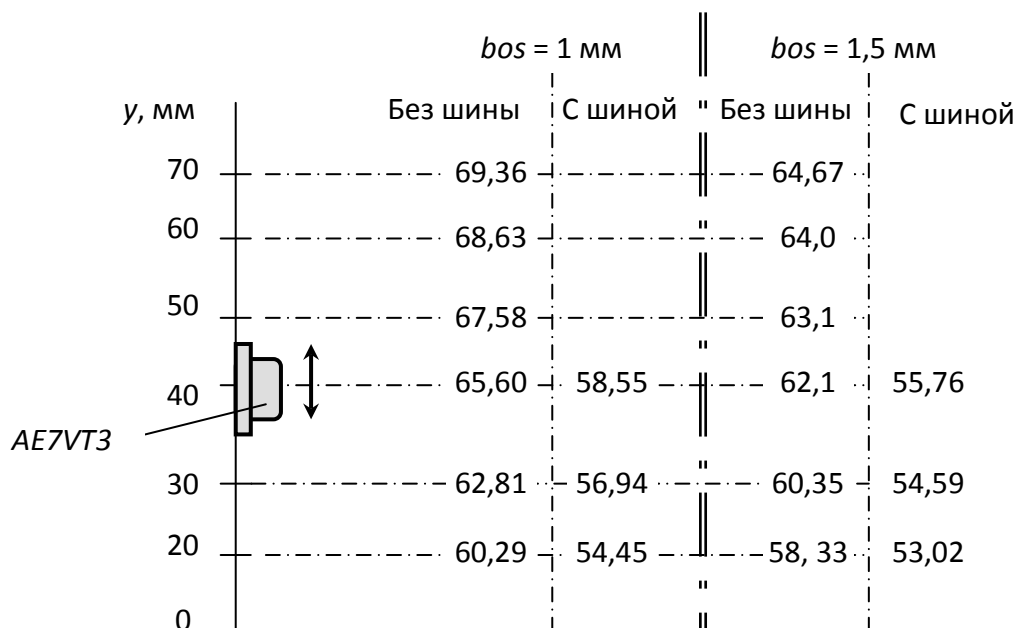


Рис. 4.53. Результаты исследований температуры теплонагруженного транзистора AE7VT3 от его размещения на ФЯ вдоль оси Oy при различных вариантах конструктивного исполнения ФЯ РУ₁

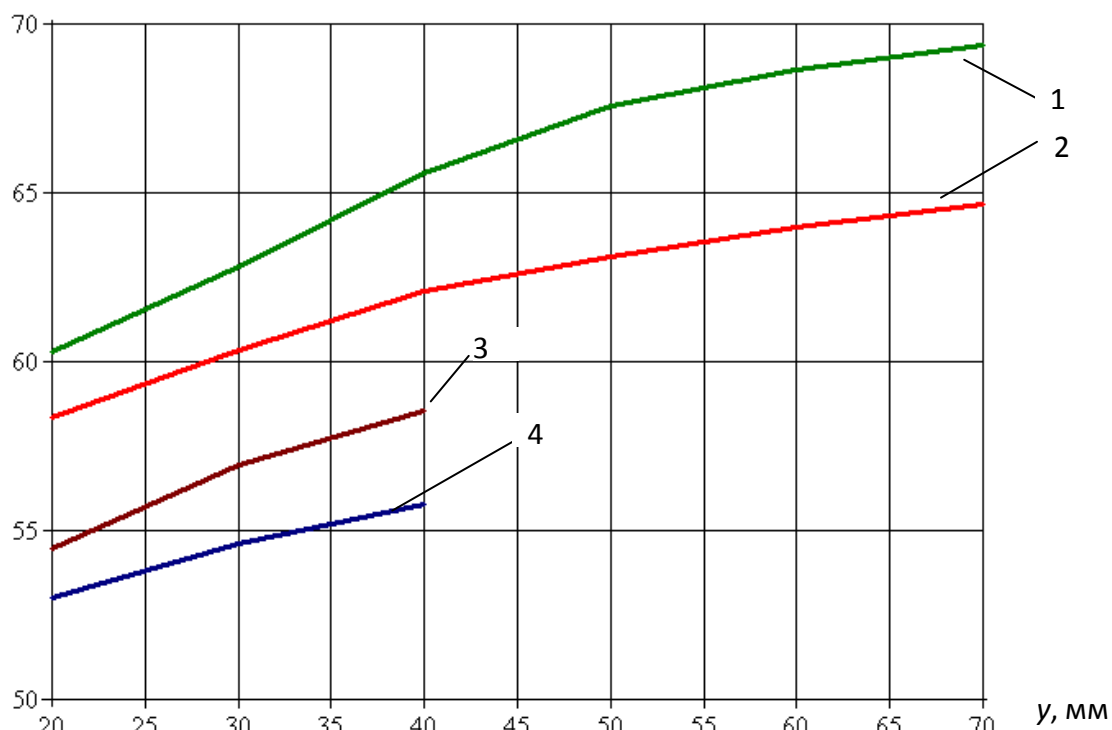


Рис. 4.54. Графики зависимостей температуры транзистора AE7VT3 от его размещения на ФЯ вдоль оси Oy при различных вариантах конструктивного исполнения ФЯ РУ₁: 1 – при толщине основания 1 мм и варианте установки без шины; 2 – при толщине основания 1 мм и варианте установки на шину; 3 – при толщине основания 1,5 мм и варианте установки без шины; 4 – при толщине основания 1,5 мм и варианте установки на шину

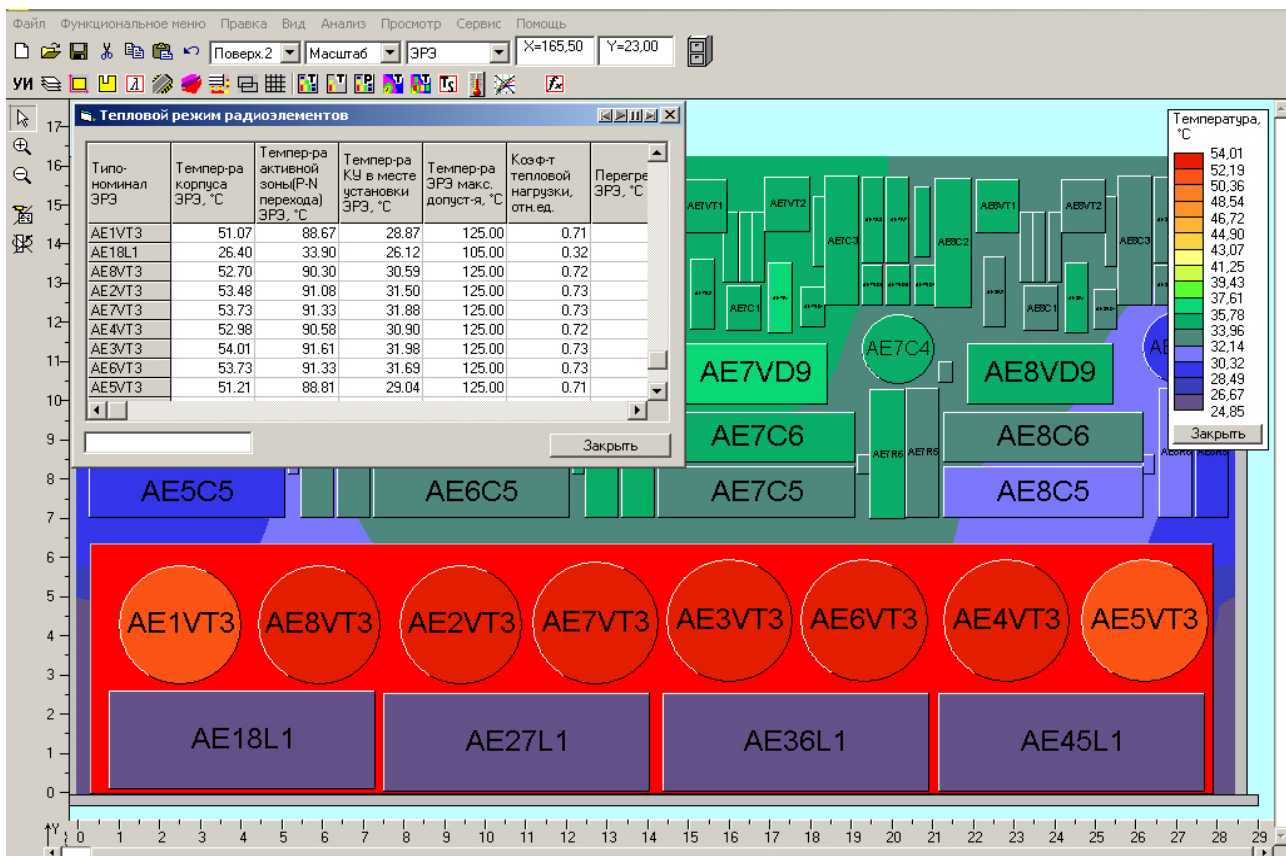


Рис. 4.55. Результаты анализа окончательного варианта ФЯРУ₁

На заключительном этапе для дальнейшего применения результатов исследования в практике конструирования аналогичных СЭП в целом на базе ФЯ данного типа была выполнена аппроксимация данных, полученных в результате исследований:

1. Зависимость интегральной температуры блока от длины трубки для прокачки жидкости в термостатирующей плите при неизменной скорости прокачки:

$$t_{\text{бл}} = 7596,34 / L_{\text{тр}} + 35,57, \quad (4.1)$$

где $t_{\text{пл}}$ – интегральная температура блока, °C; $L_{\text{тр}}$ – длина трубки, мм.

2. Зависимость интегральной температуры блока от скорости прокачиваемой жидкости при неизменной длине канала:

$$t_{\text{бл}} = 2,74 / V_{\text{ж}} + 25,02, \quad (4.2)$$

где $V_{\text{ж}}$ – скорость прокачки жидкости, м/с.

3. Зависимость интегральной температуры блока от диаметра трубки для прокачки жидкости:

$$t_{\text{бл}} = 297,53 / d_{\text{тр}} - 16,79, \quad (4.3)$$

где $d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр трубки, мм.

4. Распределение температуры корпуса теплонагруженного ЭРЭ по его координате размещения вдоль оси Oy :

$$t_{\text{ЭРЭ}} = 45,50 \cdot dy^{0.083}, \quad (4.4)$$

где $t_{\text{ЭРЭ}}$ – температура корпуса ЭРЭ, °С; dy – координата установки центра теплонагруженного ЭРЭ по оси Oy , мм.

4.4. Разработка МТП стойки модуля цифровой обработки сигналов

Объект исследования

Объектом исследования является стоечная конструкция ([рис. 4.56](#)), состоящая из двух автономных кожухов. В одном четырехэтажном кожухе располагается 4 крейта. В каждом крейте установлено по 23 платы. В исходном варианте каждый крейт выделяет тепловые мощности по 500 Вт. Охлаждение крейтов осуществляется прокачкой воздуха снизу вверх.

После 4-го этажа воздушный поток попадает во второй кожух, где расположена система трубок, по которым прокачивается жидкость. Омывая данную систему трубок, воздушный поток охлаждается, после чего снова поступает в 1-й кожух, где располагаются крейты.

Исходные условия охлаждения:

- температура окружающей среды + 30°С;
- температура жидкости на входе трубок + 30 °С.

Сборочный чертеж стоечной конструкции приведен в данном разделе.

Необходимо путем математического моделирования определить температуры воздушного потока в первом и втором кожухах при заданной суммарной мощности тепловыделения в крейтах 2000 Вт и заданных условиях охлаждения.

4.4.1. Идеализация конструкции модуля с точки зрения протекающих в нем тепловых процессов

Исходя из цели расчетов, в разрабатываемой модели тепловых процессов (МТП) конструкции модуля М-ЗКВЖ.32U были приняты следующие допущения:

- каждая стенка кожуха, в котором устанавливаются крейты, на каждом этаже является изотермичной (левая боковая, передняя, правая боковая, задняя);

- каждый крейт представляется условной изотермичной зоной с мощностью тепловыделения 500 Вт;

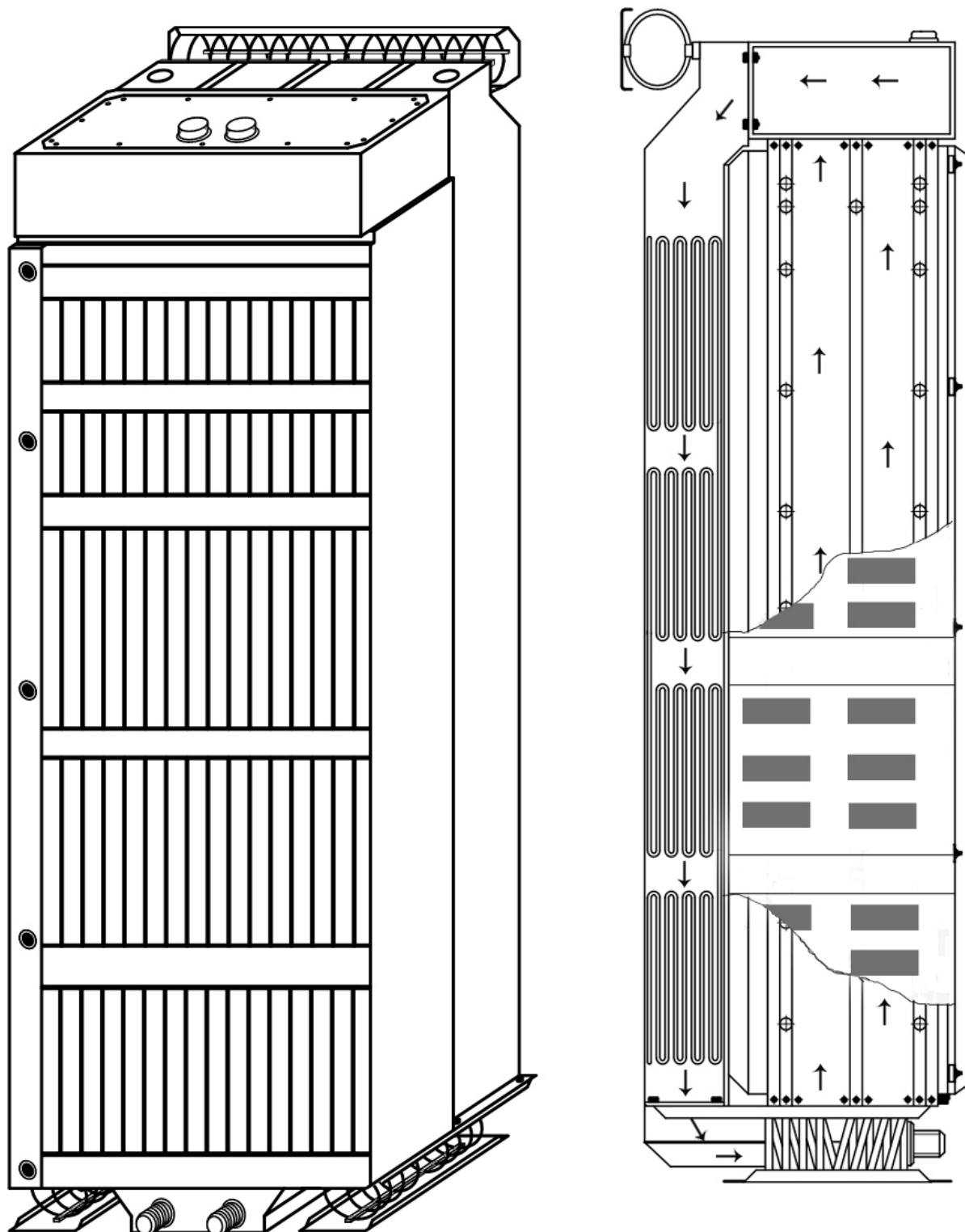


Рис. 4.56. Эскиз стоечной конструкции модуля М-3КВЖ.32U

- воздушный поток представляется десятью условно изотермичными объемами: воздух на входе перед 1-м крейтом, после 1-го крейта, после 2-го крейта, после 3-го крейта, после 4-го крейта, перед входом в кожух (охладитель, в котором располагаются трубки, также установленные в четыре этажа), после прохождения трубок 4-го этажа, 3-го этажа, 2-го этажа, 1-го этажа;
- жидкостные потоки представлены для каждой группы трубок (этажа трубок) двумя объемами: вход и выход;
- кожух охладителя условно представлен в виде четырех изотермичных объемов.

4.4.2. Нумерация и обозначения узлов модели тепловых процессов

Обозначения и номера узлов, использованных в модели тепловых процессов модуля М-ЗКВЖ.32U, с учетом изложенных в [п. 4.4.1](#) подходов к идеализации представлены в [табл. 4.20](#).

Таблица 4.20

| № узла МТП | Моделируемый конструктивный элемент или условия охлаждения | Обозначение в МТП |
|------------|--|-------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | Точка входа воздушного потока в стойку | Возд. вход |
| 2 | Переход воздушного потока между первым и вторым этажами стойки | Возд. 1 |
| 3 | Переход воздушного потока между вторым и третьим этажами стойки | Возд. 2 |
| 4 | Переход воздушного потока между третьим и четвертым этажами стойки | Возд. 3 |
| 5 | Точка выхода воздушного потока из стойки и перехода его в верхний бункер | Возд. выход |
| 6 | Крейт на первом этаже | Крейт 1-й этаж |
| 7 | Крейт на втором этаже | Крейт 1-й этаж |
| 8 | Крейт на третьем этаже | Крейт 1-й этаж |
| 9 | Крейт на четвертом этаже | Крейт 1-й этаж |
| 10 | Верхняя стенка корпуса стойки | Корп. ст. верх |
| 11 | Задняя стенка корпуса стойки на четвертом этаже | Корп. ст. зад. 4 |
| 12 | Задняя стенка корпуса стойки на третьем этаже | Корп. ст. зад. 3 |
| 13 | Задняя стенка корпуса стойки на втором этаже | Корп. ст. зад. 2 |
| 14 | Левая стенка корпуса стойки на первом этаже | Корп. ст. лев. 1 |
| 15 | Левая стенка корпуса стойки на втором этаже | Корп. ст. лев. 2 |
| 16 | Левая стенка корпуса стойки на третьем этаже | Корп. ст. лев. 3 |



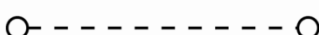

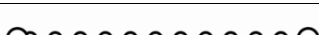
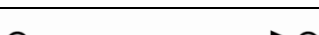

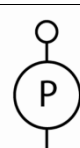
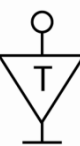
Окончание табл. 4.20

| 1 | 2 | 3 |
|----|--|---------------------|
| 17 | Левая стенка корпуса стойки на четвертом этаже | Корп. ст. лев. 4 |
| 18 | Правая стенка корпуса стойки на первом этаже | Корп. ст. прав. 1 |
| 19 | Окружающая среда | Окружающая среда |
| 20 | Правая стенка корпуса стойки на втором этаже | Корп. ст. прав. 2 |
| 21 | Правая стенка корпуса стойки на третьем этаже | Корп. ст. прав. 3 |
| 22 | Правая стенка корпуса стойки на четвертом этаже | Корп. ст. прав. 4 |
| 23 | Передняя стенка корпуса стойки на первом этаже | Корп. ст. перед. 1 |
| 24 | Передняя стенка корпуса стойки на втором этаже | Корп. ст. перед. 2 |
| 25 | Передняя стенка корпуса стойки на третьем этаже | Корп. ст. перед. 3 |
| 26 | Передняя стенка корпуса стойки на четвертом этаже | Корп. ст. перед. 4 |
| 27 | Задняя стенка корпуса стойки на первом этаже | Корп. ст. зад. 1 |
| 28 | Точка входа воздушного потока в охладитель | Охл. вход |
| 29 | Переход воздушного потока между четвертым и третьим этажами охладителя | Охл. 1 |
| 30 | Переход воздушного потока между третьим и вторым этажами охладителя | Охл. 2 |
| 31 | Переход воздушного потока между вторым и первым этажами охладителя | Охл. 3 |
| 32 | Точка выхода воздушного потока из охладителя | Охл. выход |
| 33 | Кожух охладителя на втором этаже | Корп. охлад. 2 |
| 34 | Кожух охладителя на третьем этаже | Корп. охлад. 3 |
| 35 | Кожух охладителя на четвертом этаже | Корп. охлад. 4 |
| 36 | Охлаждающие трубки на четвертом этаже | Трубки 4-й этаж |
| 37 | Охлаждающие трубки на четвертом этаже | Трубки 3-й этаж |
| 38 | Охлаждающие трубки на четвертом этаже | Трубки 2-й этаж |
| 39 | Охлаждающие трубки на четвертом этаже | Трубки 1-й этаж |
| 40 | Точка входа воды в охлаждающие трубки на 1-м этаже | Вода вход 1-й этаж |
| 41 | Точка выхода воды из охлаждающих трубок на 1-м этаже | Вода вых. 1-й этаж |
| 42 | Точка входа воды в охлаждающие трубки на 2-м этаже | Вода вход 2-й этаж |
| 43 | Точка выхода воды из охлаждающих трубок на 2-м этаже | Вода вых. 2-й этаж |
| 44 | Точка входа воды в охлаждающие трубки на 3-м этаже | Вода вход 3-й этаж |
| 45 | Точка выхода воды из охлаждающих трубок на 3-м этаже | Вода вых. 3-й этаж |
| 46 | Точка входа воды в охлаждающие трубки на 4-м этаже | Вода вход. 4-й этаж |
| 47 | Точка выхода воды из охлаждающих трубок на 4-м этаже | Вода вых. 4-й этаж |
| 48 | Нижняя стенка корпуса | Корп. ст. низ |
| 49 | Кожух охладителя на первом этаже | Корп. охлад. 1 |

4.4.3. Обозначения ветвей модели тепловых процессов

Условные обозначения ветвей, использованных в модели тепловых процессов, которые отражают процессы теплопереноса в конструкции модуля М-ЗКВЖ.32U, представлены в [табл. 4.21](#).

Таблица 4.21

| Графическое обозначение ветви | Название |
|---|---|
| 1 | 2 |
|  | Кондуктивный теплообмен |
|  | Контактный теплообмен |
|  | Естественная конвекция с плоской неразвитой поверхности в окружающую среду |
|  | Обдув неразвитой плоской поверхности |
|  | Теплообмен излучением |
|  | Теплоперенос в продуваемом воздушном канале / теплоперенос в прокачиваемом водяном канале |
|  | Конвекция в воздушном канале / конвекция в водяном канале |
|  | Источник постоянной мощности |
|  | Источник постоянной температуры |

4.4.4. Структура модели тепловых процессов

С учетом изложенных в [п.п. 4.4.1–4.4.3](#) допущений и обозначений разработанная топологическая модель тепловых процессов конструкции модуля М-ЗКВЖ.32U приведена на [рис. 4.57, а](#). Представленная МТП разработана в редакторе *MTPEditor* программного комплекса *TPuANA*.

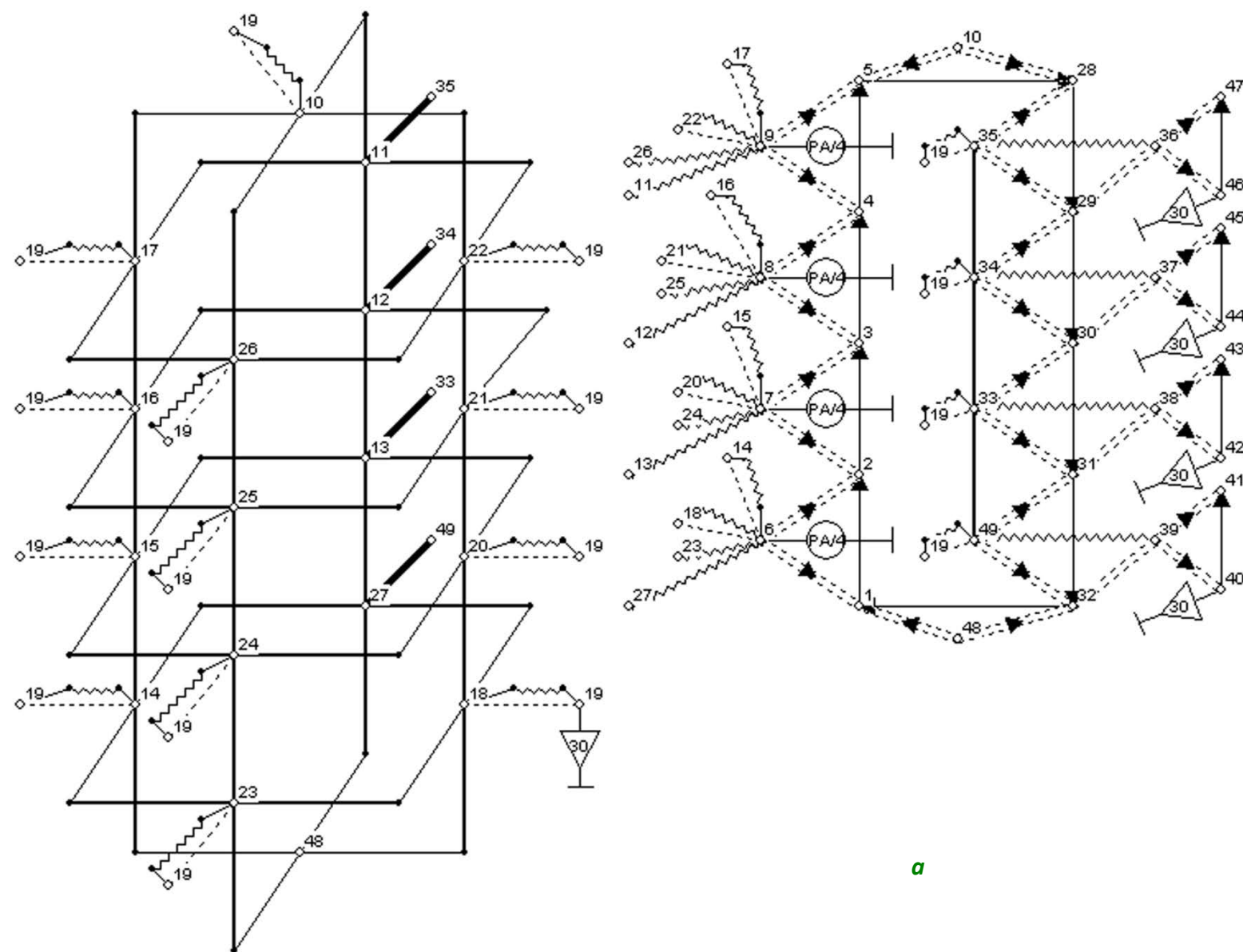




Рис. 4.57. Топологическая модель тепловых процессов стоечной конструкции модуля М-3КВЖ.32U: а – структура МТП, б – обозначение узлов МТП

4.4.5. Параметризация модели тепловых процессов

При описании параметров ветвей МТП, представленной на [рис. 4.57, а](#), использовался метод параметризации, позволяющий в дальнейшем в одном месте менять значения параметризуемых первичных параметров с целью дальнейшего исследования тепловых процессов на основе разработанной МТП. Перечень таких параметров, их описание и исходные значения приведены в [табл. 4.22](#).

Таблица 4.22

| Название параметра | Описание параметра | Значение |
|--------------------|--|----------|
| PA | Общая мощность стойки, Вт | 2000 |
| SPD | Скорость подачи воздуха, м/с | 0.95 |
| SPD2 | Скорость подачи воды, м/с | 2 |
| SW | Ширина стойки, мм | 530 |
| SH | Высота стойки, мм | 1475 |
| SD | Длина стойки, мм | 270 |
| OW | Ширина кожуха охладителя, мм | 460 |
| OH | Высота кожуха охладителя, мм | 1300 |
| OD | Длина кожуха охладителя, мм | 65 |
| DIAM1 | Внутренний диаметр трубы, мм | 6 |
| DIAM2 | Внешний диаметр трубы, мм | 8 |
| PLATEW | Ширина одной платы, мм | 150 |
| PLATEH | Высота одной платы, мм | 269 |
| PCOUNT1 | Количество плат в крейте на первом этаже, шт | 23 |
| PCOUNT2 | Количество плат в крейте на втором этаже, шт | 23 |
| PCOUNT3 | Количество плат в крейте на третьем этаже, шт | 23 |
| PCOUNT4 | Количество плат в крейте на четвертой этаже, шт | 23 |
| TL1 | Длина условных трубок первого этажа, мм | 35000 |
| TL2 | Длина условных трубок второго этажа, мм | 35000 |
| TL3 | Длина условных трубок третьего этажа, мм | 35000 |
| TL4 | Длина условных трубок четвертого этажа, мм | 35000 |
| SRAD1 | Площадь радиатора на трубках первого этажа, мм ² | 0 |
| SRAD2 | Площадь радиатора на трубках второго этажа, мм ² | 0 |
| SRAD3 | Площадь радиатора на трубках третьего этажа, мм ² | 0 |
| SRAD4 | Площадь радиатора на трубках четв-го этажа, мм ² | 0 |

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 347 |
|---|---|--|--|------------|

4.4.6. Результаты расчета МТП модуля М-3КВЖ.32U

Результаты расчетов теплового режима модуля М-3КВЖ.32U на основе разработанной МТП и исходных параметров представлены на [рис. 4.58](#) в виде таблицы и на [рис. 4.59](#) и [4.60](#) в виде топологической модели с нанесенными на нее температурами ([рис. 4.59](#)) и обозначениями узлов ([рис. 4.60](#)).

Анализ полученных результатов моделирования показал, что установившийся перепад температур воздушного потока (после его охлаждения во 2-м кожухе) относительно окружающей среды составляет **14,83 °C** (разница температур узлов МТП №№ 19, 32 – см. [рис. 4.58](#)).

Расчетная температура воздушного потока (узлы МТП №№ 1–5) на выходе первого кожуха с крейтами составила **60,43 °C** (температура узла № 5 – см. [рис. 4.58](#)), после прохождения по второму кожуху с теплообменником (узлы МТП №№ 28–32) составила **43,85 °C** (температура узла № 32 – см. [рис. 4.58](#)).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
 Размерность матрицы 49
 Начальное число ненулевых элементов 301
 Число ненулевых элементов в факторизованной матрице.. 551

 * ТАБЛИЦА ТЕМПЕРАТУР В УЗЛАХ М Т П *

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-----------------------------|
| 1 | МТП Возд. вход | 44.83 |
| 2 | МТП Возд. 1 | 49.44 |
| 3 | МТП Возд. 2 | 54.07 |
| 4 | МТП Возд. 3 | 58.67 |
| 5 | МТП Возд. выход | 60.43 |
| 6 | МТП Крейт 1-й этаж | 120.05 |
| 7 | МТП Крейт 2-й этаж | 123.46 |
| 8 | МТП Крейт 3-й этаж | 126.69 |
| 9 | МТП Крейт 4-й этаж | 128.78 |
| 10 | МТП Корп. ст. верх | 46.35 |
| 11 | МТП Корп. ст. зад. 4 | 52.52 |
| 12 | МТП Корп. ст. зад. 3 | 49.36 |
| 13 | МТП Корп. ст. зад. 2 | 46.63 |
| 14 | МТП Корп. ст. лев. 1 | 77.53 |
| 15 | МТП Корп. ст. лев. 2 | 79.86 |
| 16 | МТП Корп. ст. лев. 3 | 81.77 |
| 17 | МТП Корп. ст. лев. 4 | 82.62 |
| 18 | МТП Корп. ст. прав. 1 | 77.53 |
| 19 | МТП Окружающая среда | 30.08 |
| 20 | МТП Корп. ст. прав. 2 | 79.86 |
| 21 | МТП Корп. ст. прав. 3 | 81.77 |

Рис. 4.58. Таблица результирующих температур

| | | | |
|----|-----|----------------------|-------|
| 22 | МТП | Корп. ст. прав. 4 | 82.62 |
| 23 | МТП | Корп. ст. перед. 1 | 52.01 |
| 24 | МТП | Корп. ст. перед. 2 | 53.21 |
| 25 | МТП | Корп. ст. перед. 3 | 54.12 |
| 26 | МТП | Корп. ст. перед. 4 | 54.39 |
| 27 | МТП | Корп. ст. зад. 1 | 44.46 |
| 28 | МТП | Охл. вход | 60.05 |
| 29 | МТП | Охл. 1 | 54.39 |
| 30 | МТП | Охл. 2 | 49.99 |
| 31 | МТП | Охл. 3 | 46.52 |
| 32 | МТП | Охл. выход | 43.85 |
| 33 | МТП | Корп. охлад. 2 | 46.60 |
| 34 | МТП | Корп. охлад. 3 | 49.33 |
| 35 | МТП | Корп. охлад. 4 | 52.51 |
| 36 | МТП | Трубки 4-й этаж | 30.06 |
| 37 | МТП | Трубки 3-й этаж | 30.05 |
| 38 | МТП | Трубки 2-й этаж | 30.04 |
| 39 | МТП | Трубки 1-й этаж | 30.03 |
| 40 | МТП | Вода вход. 1-й этаж | 30.02 |
| 41 | МТП | Вода выход. 1-й этаж | 30.03 |
| 42 | МТП | Вода вход. 2-й этаж | 30.02 |
| 43 | МТП | Вода выход. 2-й этаж | 30.04 |
| 44 | МТП | Вода вход. 3-й этаж | 30.02 |
| 45 | МТП | Вода выход. 3-й этаж | 30.05 |
| 46 | МТП | Вода вход. 4-й этаж | 30.03 |
| 47 | МТП | Вода выход. 4-й этаж | 30.06 |
| 48 | МТП | Корп. ст. низ | 44.94 |
| 49 | МТП | Корп. охлад. 1 | 44.43 |

Рис. 4.58. Окончание

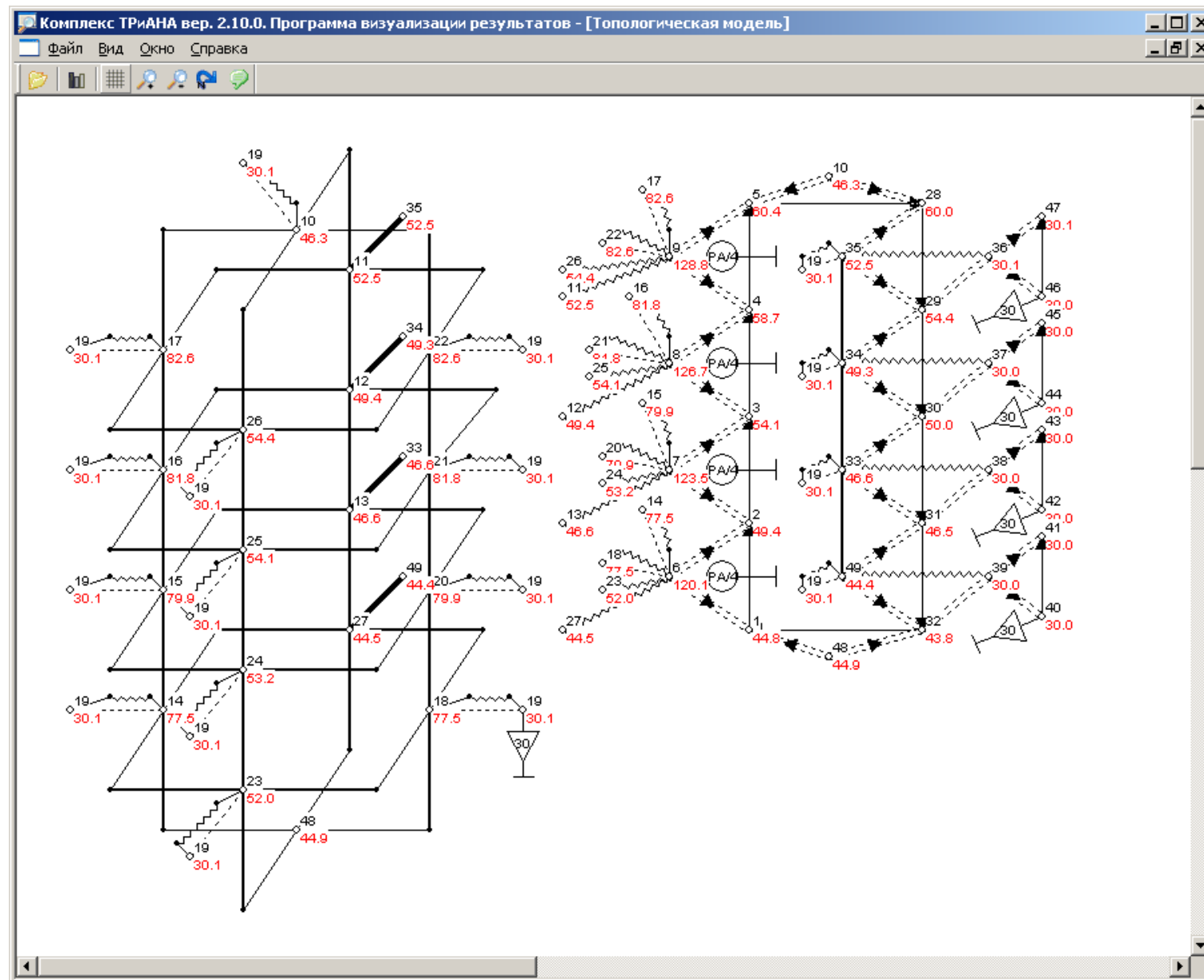


Рис. 4.59. Граф МТП конструкции модуля М-ЗКВЖ.32U с нанесенными результирующими температурами

4.5. Пример обеспечения тепловых характеристик и показателей надежности устройства преобразования телевизионных сигналов

Объектом исследования является устройство преобразования телевизионных сигналов (УПТС) [2], выполненное в виде кассетной конструкции, общий вид которой приведен на [рис. 4.61](#). Исследования проводились на основе алгоритма, блок-схема которого представлена на [рис. 4.62](#). Названия блоков на [рис. 4.62](#) представляют собой проектные процедуры, а в круглых скобках даны условные номера методов, применяемых в процессе реализации каждой процедуры. Так, например, блоки «Синтез структурной модели электрической принципиальной схемы (ЭПС)» и «Синтез аналитической модели ЭПС» предусматривают применение по определенному алгоритму методов управления проектами, управления электронным документооборотом, а также методов синтеза математических моделей, основанных на использовании различных видов моделей. Применение различных видов моделей позволяет исследовать электрическую принципиальную схему РЭА как на уровне функциональных узлов (структурная модель), так и на уровне электрических характеристик отдельных ЭРИ (аналитическая модель). Блок «Синтез топологической модели j -го вида» предусматривает применение по определенному алгоритму методов управления проектами, управления электронным документооборотом, а также синтез топологических моделей тепловых процессов ($j=1$), механических процессов ($j=2$), электромагнитных процессов ($j=3$), радиационных процессов ($j=4$), а также моделей монтажного пространства ($j=5, 6, \dots$), применяемых для решения задач размещения и трассировки РЭА. Анализ перечисленных выше моделей опирается на применение специальных методов математического моделирования, ориентированных на комплексные исследования характеристик БРЭА как для детерминированной, так и для вероятностной областей.

Выделение расчетов надежности в отдельные блоки обусловлено тем, что они являются одними из обязательных мероприятий, предусмотренных в ПОНр. Как следует из алгоритма, он направлен на поиск оптимального (или Парето оптимального) по критерию надежности варианта РЭА.

Расчет показателей надежности УПТС проводился в соответствии с ГОСТ Р 27.301-95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения». Термины и определения соответствуют ГОСТ 27.002-89. Условия эксплуатации УПТС относятся к группе аппаратуры 3.2.3 по ГОСТ Р В 20.39.304-98. Это аппаратура сверхзвуковых самолетов (группа 3), группа исполнения 3.2.3 «Аппаратура, размещаемая в носовой части фюзеляжа, включая кабину экипажа». Охлаждение конструкции блока УПТС на объекте установки осуществляется посредством принудительной вентиляции. Воздушный поток (температура – 20,3 °С, расход – 20 м³/час) направлен вдоль оси Oz (см. [рис. 4.61, б](#)). Температура окружающей среды в зоне установки УПТС составляет 40 °С.

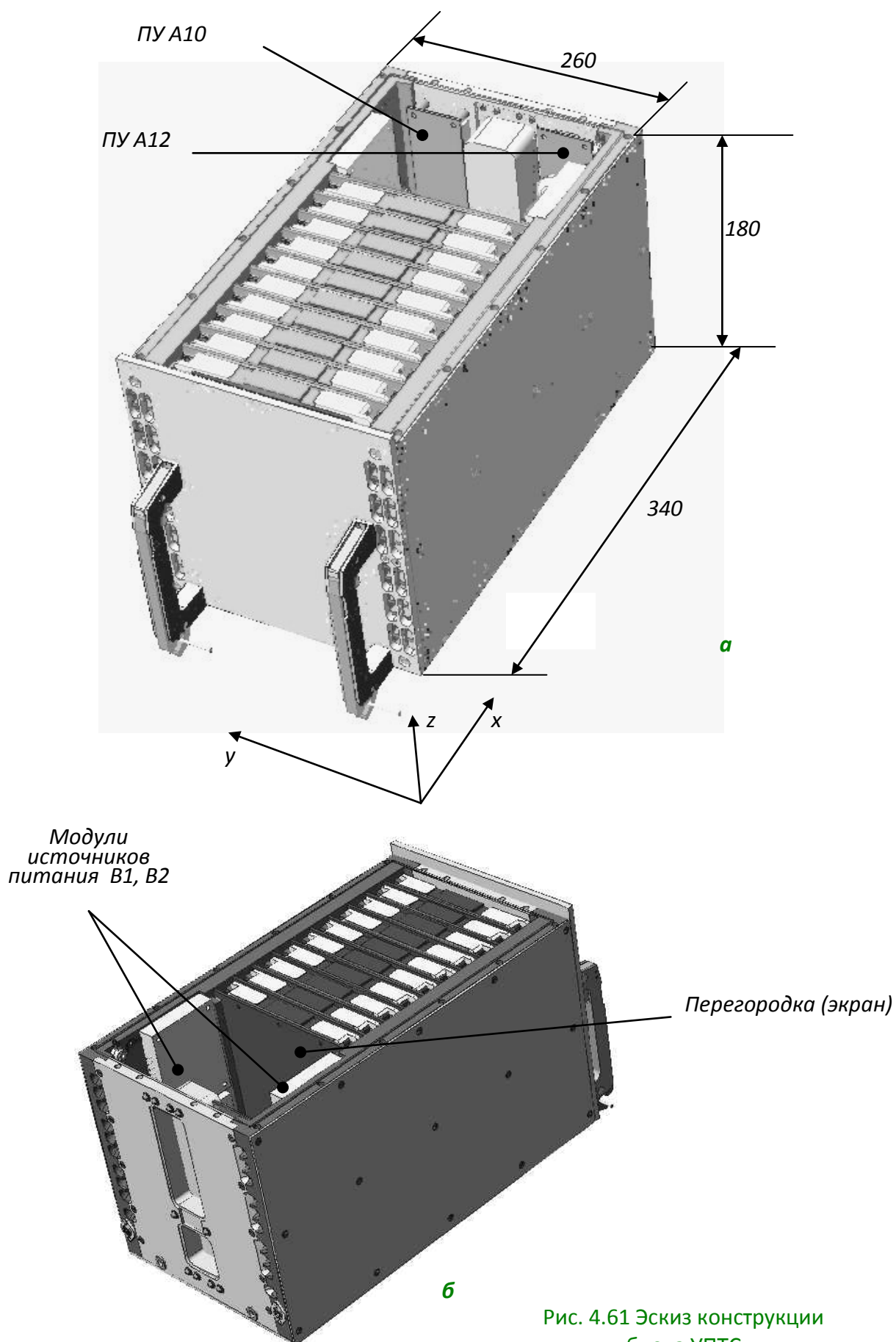


Рис. 4.61 Эскиз конструкции блока УПТС

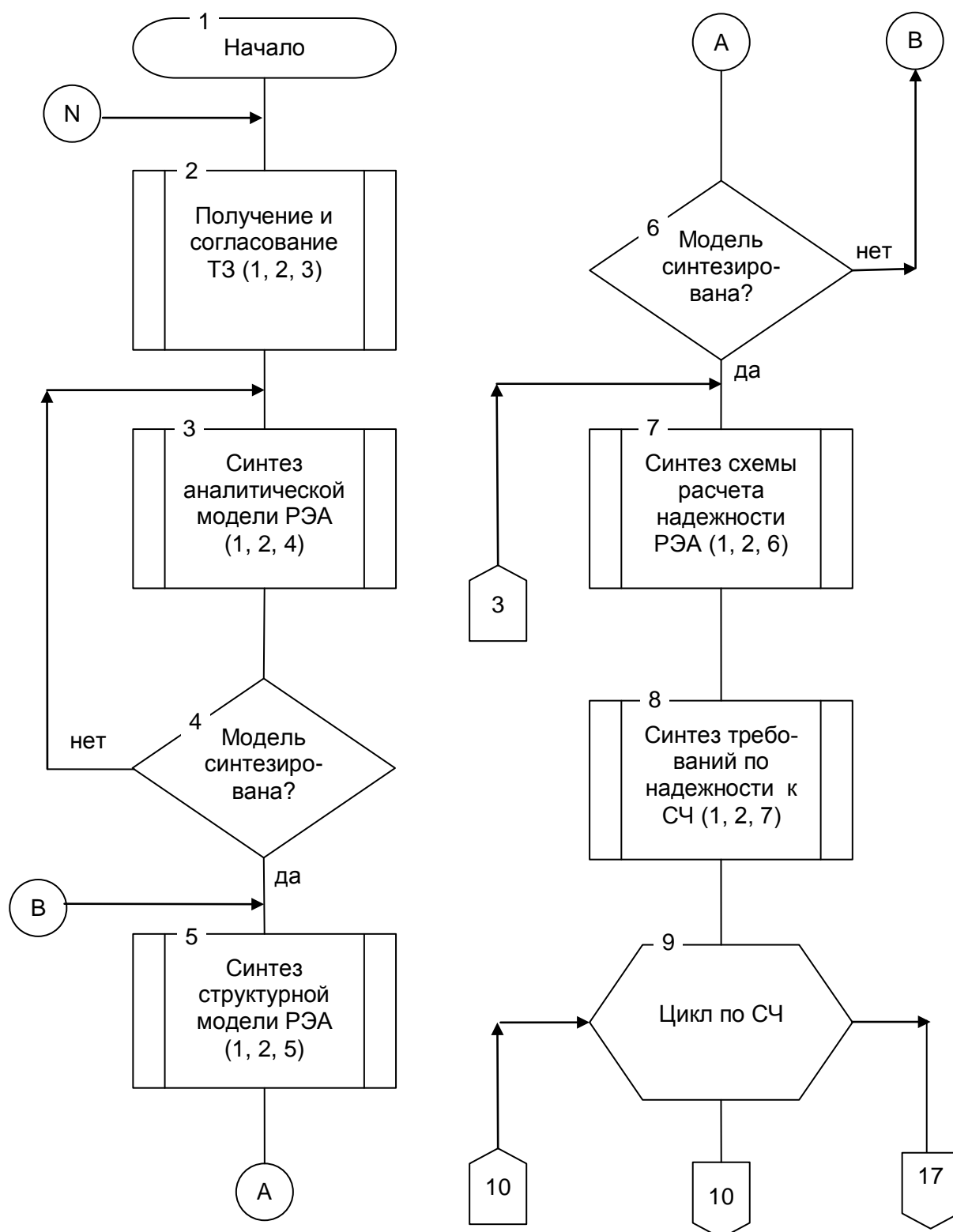


Рис. 4.62. Блок-схема алгоритма проектирования РЭА: 1 – методы управления проектами; 2 – методы управления электронным документооборотом (данными); 3 – методы принятия проектных решений; 4–6 – методы синтеза математических моделей (аналитических, структурных и топологических) ЭПС и СЧ; 7 – методы моделирования отказов (ЭПС, СЧ и ЭРИ); 8 – методы анализа физических процессов (электрических, тепловых, механических, радиационных, электромагнитных и т. д.) и топологического проектирования (компоновка, размещение, трассировка); 9 – методы параметрической оптимизации и идентификации (скалярной и векторной)

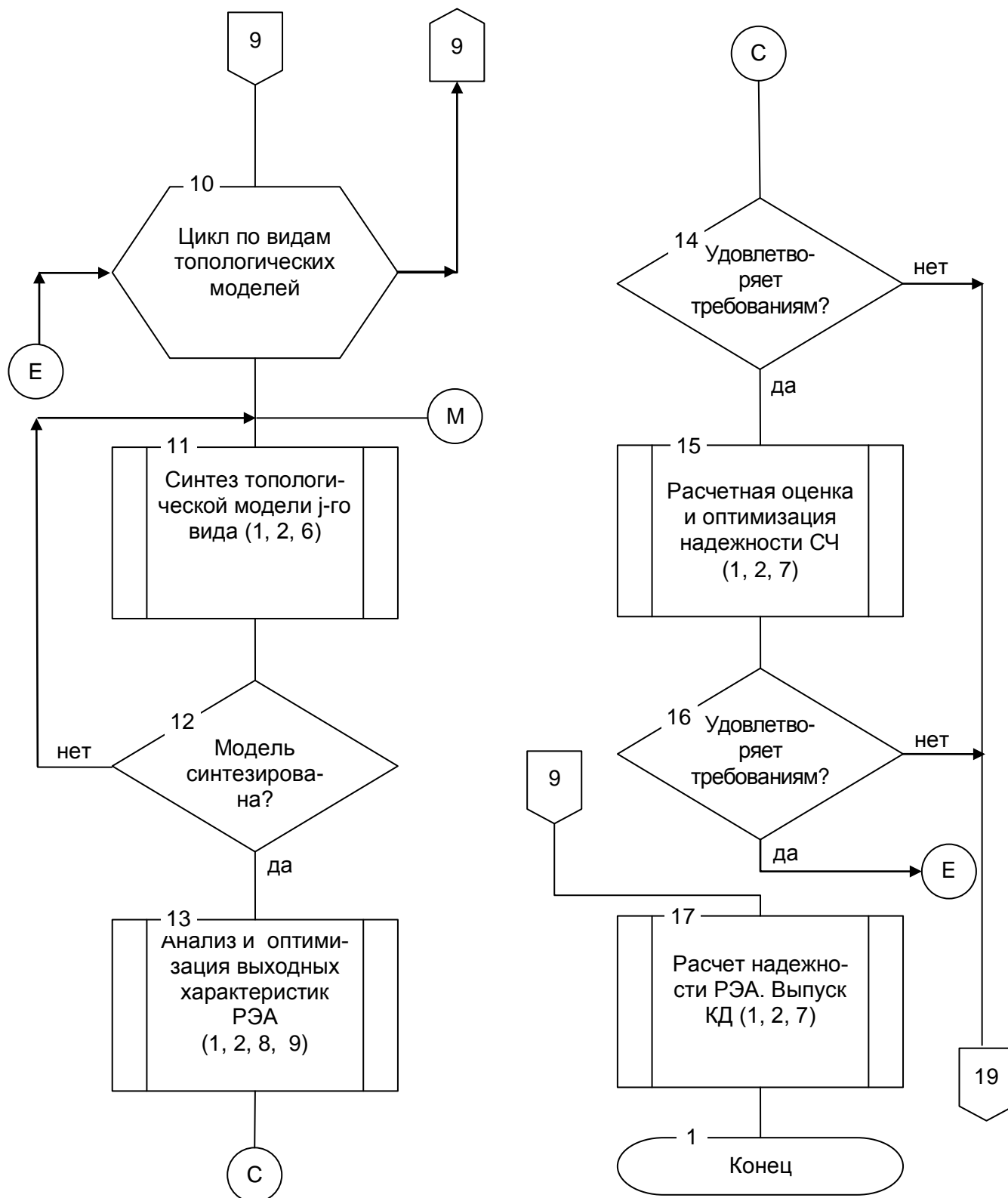


Рис. 4.62. Продолжение

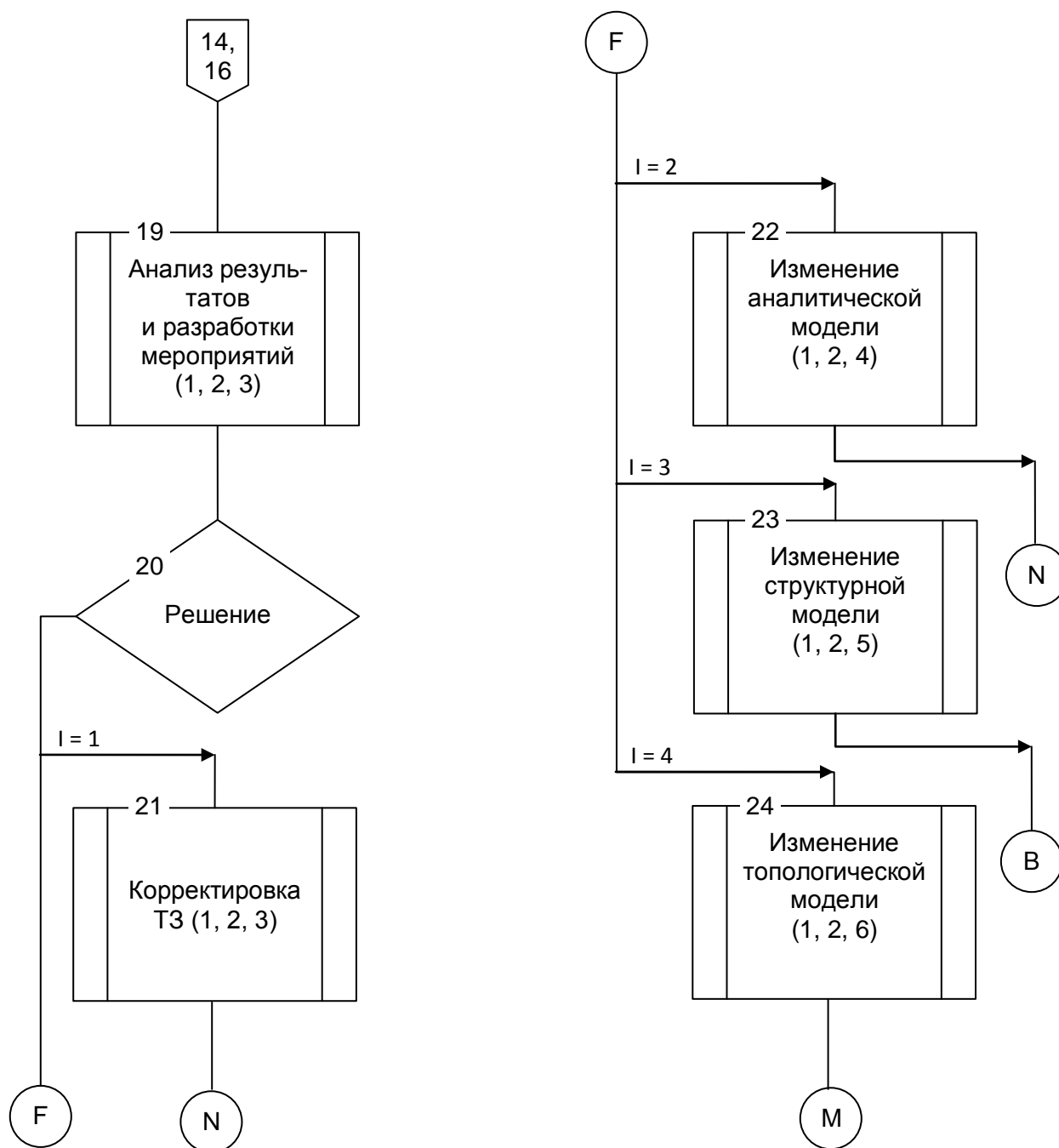


Рис. 4.62. Окончание

В процессе исследований показателей надежности УПТС были приняты следующие допущения:

- отказы ЭРИ, составных частей (СЧ) и УПТС в целом являются внезапными и представляют собой случайные независимые события;
- время работы до отказа компонента (ЭРЭ, СЧ) является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону с постоянным параметром λ .

УПТС относится к аппаратуре вида II по ГОСТ В 20.39.303-76, имеющей более двух уровней качества функционирования. В соответствии с ГОСТ Р В 20.39.303-76 безотказность аппаратуры вида II характеризуется показателями безотказности ее составных частей, которые можно отнести к аппаратуре вида I. Допускается также относить аппаратуру вида II к аппаратуре вида I путем условного разделения совокупности допустимых уровней качества функционирования на две группы, относимые к работоспособным и неработоспособным состояниям, и установления соответствующего критерия отказа.

При описании примера использовались следующие обозначения параметров: T_o – средняя наработка на отказ; T_C^0 – температура окружающей среды; d – число основных СЧ; r – число резервных СЧ; i – номер СЧ; $\lambda_{э СЧ i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -ой СЧ; $\lambda_{э ЭРИ i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -го ЭРИ; λ_s – суммарная интенсивность отказов всех ЭРИ СЧ; $T_{о ЭРИ i}$ – средняя наработка на отказ i -го ЭРИ; $K_{ог}$ – коэффициент оперативной готовности; P – вероятность безотказной работы.

4.5.1. Требования по надежности

На УПТС в ТЗ заданы следующие требования по надежности:

1. Критерием отказа является отсутствие любого из выходных сигналов, передаваемых УПТС потребителю.
2. Показатели надежности:
 - вероятность безотказной работы $P = 0,95$ в течение наработки 2200 ч.;
 - коэффициент оперативной готовности 0,999 в течение наработки 12 ч.;
 - среднее время восстановления 0,5 ч.

4.5.2. Проведение исследований

Исследования показателей надежности и тепловых характеристик УПТС осуществлялись с применением подсистемы АСОНИКА-К и ПК ТРИАНА на основе блок-схемы алгоритма проектирования РЭА ([рис. 4.62](#)). При этом в примере рассматриваются исследования, начинающиеся с блока № 7. Проведенные на начальном этапе исследования (блоки 1–6) схемы электрической принципиальной проводились с учетом температурного фактора, то есть, в процессе исследований электрических характеристик определялись также температуры ЭРИ, при которых обеспечивался необходимый уровень температурной стабильности выходных сигналов УПТС.

В соответствии с блоком № 7 алгоритма был выполнен синтез схемы расчета надежности. Схема расчета надежности (СРН) УПТС, соответствующая рассмотренному выше критерию отказа, приведена на [рис. 4.63](#). Безотказность УПТС характеризуется совокупностью интенсивностей отказов его составных

частей (СЧ), для которых отказом является отказ любого из входящих в состав СЧ ЭРИ. УПТС содержит восемь типов составных частей.

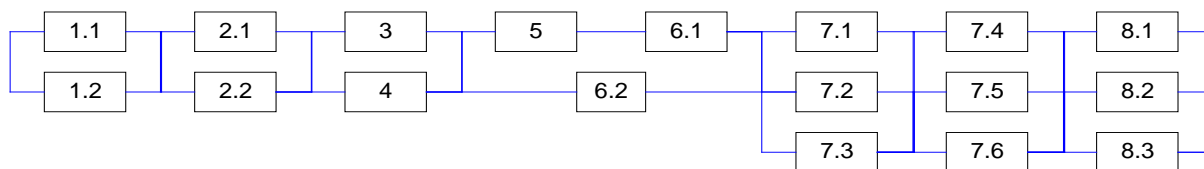


Рис. 4.63 Схема расчета надежности УПТС

Критерием отказа УПТС является отказ дублированных групп (СЧ1.1, СЧ1.2), (СЧ2.1, СЧ2.2) и (СЧ3, СЧ4), группы (СЧ5, СЧ6.1, СЧ6.2) и троированных групп (СЧ7.1, СЧ7.2, СЧ7.3), (СЧ7.4, СЧ7.5, СЧ7.6) и (СЧ8.1, СЧ8.2, СЧ8.3).

В [табл. 4.23](#) приведены условные обозначения и наименования СЧ СРН и модулей УПТС.

Таблица 4.23

Характеристики надежности составных частей УПТС

| № п/п | Условное обозначение | Наименование | Примечание |
|-------|----------------------|-----------------------------|---|
| 1 | СЧ1 | Модуль 1Т100-1Т201 | Составная часть схемы расчета надежности включает 1/2 элементного состава модуля 1Т100-1Т201, расположенного на ПУ1 и ПУ2 (А1 и А2 на рис. 4.67) |
| 2 | СЧ2 | Модуль 1Т002 | Составная часть схемы расчета надежности включает 1/2 элементного состава модуля 1Т002, расположенного на ПУ 3 (А3 на рис. 4.67) |
| 3 | СЧ3 | Модуль источника питания В1 | |
| 4 | СЧ4 | Модуль источника питания В2 | |
| 5 | СЧ5 | Модуль ПП-К10D | |
| 6 | СЧ6 | Модуль 1K0D1-1K0D2 | Составная часть схемы расчета надежности включает 1/2 элементного состава модуля 1K0D1-1K0D2, расположенного на ПУ8 и ПУ9 (А8 и А9 на рис. 4.67) |
| 7 | СЧ7 | Модуль 1C0D1 | Составная часть схемы расчета надежности включает 1/6 элементного состава модуля 1C0D1, расположенного на ПУ5...ПУ7 (А5 – А7 на рис. 4.67 , см. также рис. 4.77) |
| 8 | СЧ8 | Модуль 1B0D4 | Составная часть схемы расчета надежности включает 1/3 элементного состава модуля 1B0D4, расположенного на ПУ4 (А4 на рис. 4.67) |

4.5.3. Расчет надежности составных частей УПТС

В соответствии с алгоритмом на следующем шаге выполнялся расчет надежности составных частей УПТС.

Расчеты значений эксплуатационных интенсивностей отказов СЧ проводились с помощью подсистемы АСОНИКА-К, в базе данных которой содержатся характеристики надежности ЭРИ в объеме, соответствующем отечественным справочникам «Надежность ЭРИ», «Надежность зарубежных аналогов» и американского справочника *MILHDBK 217*.

Оценка эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ, входящих в СЧ, проводилась по соответствующим моделям с учетом всех коэффициентов, то есть, проводился «Уточненный расчет надежности СЧ» по классификации ПОНр. При этом значения рабочих температур ЭРИ были автоматически введены из соответствующих выходных файлов ПК ТРИАНА (см. [рис. 4.81](#)). Результаты расчетов эксплуатационной интенсивности отказов СЧ приведены в [табл. 4.24](#).

Таблица 4.24

Эксплуатационная интенсивность отказов составных частей УПТС

| Условное обозначение СЧ СРН | Наименование | $\lambda_{э сч}, 1/ч$ |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| СЧ1.1 | Модуль 1Т100-1Т201 | $1,00 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ2.1 | Модуль 1Т002 | $92,40 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ3 | Модуль источника питания В1 | $7,10 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ4 | Модуль источника питания В2 | $47,15 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ5 | Модуль ПП-К10D | $98,8 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ6.1 | Модуль 1K0D1-1K0D2 | $56,26 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ7.1 | Модуль 1C0D1 | $56,26 \cdot 10^{-6}$ |
| СЧ8.1 | Модуль 1B0D4 | $69,82 \cdot 10^{-6}$ |

Ниже, в качестве примера, приведено описание расчета эксплуатационной интенсивности отказов СЧ7.1 модуля 1C0D1 (А7 на [рис. 4.67](#)).

В общем случае эксплуатационная интенсивность отказов СЧ7.1 характеризуется совокупностью интенсивностей отказов его составных частей (ЭРИ). Так как в подсистеме АСОНИКА-К предусмотрена возможность задания СРН в виде дерева, то при ее создании ЭРИ одного класса были объединены в группы (компоненты 2-го уровня), что повышает удобство работы в среде подсистемы АСОНИКА-К и последующий автоматизированный выпуск карт рабочих режимов (КРР). В этом случае эксплуатационная интенсивность отказов СЧ7.1 характеризуется совокупностью интенсивностей отказов его составных частей (ком-

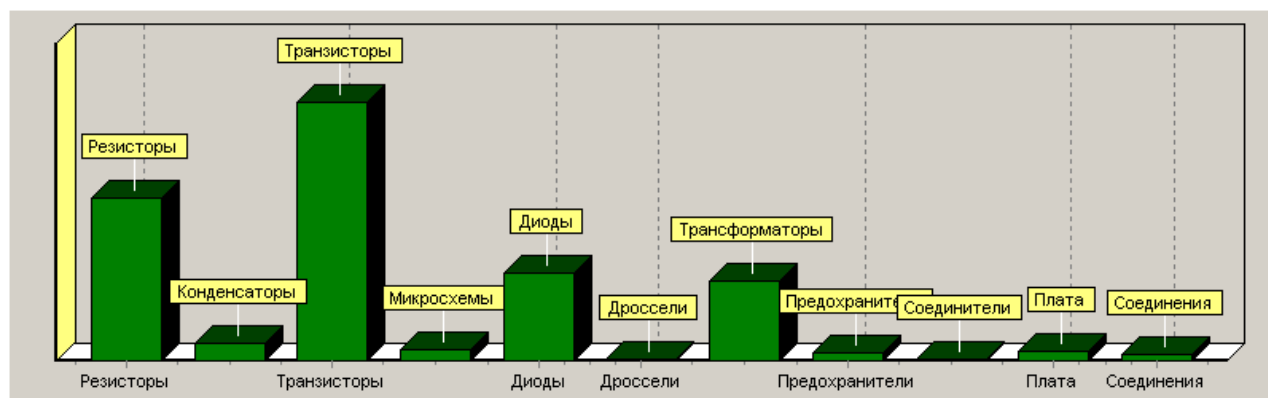
понентов 2-го уровня), а схема расчета надежности СЧ7.1, соответствующая заданному критерию отказа, представляет собой последовательное соединение компонентов 2 уровня (см. [рис. 4.64](#)).



Рис. 4.64. Схема расчета надежности СЧ7.1

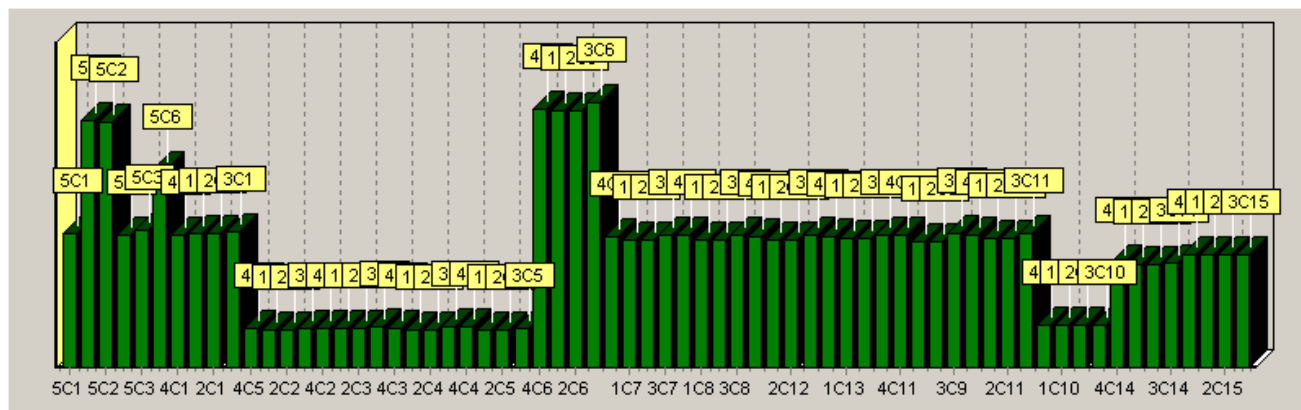
Фрагмент протокола отчета подсистемы АСОНИКА-К приведен на [рис. 4.65](#).

Расчет Изделия
 Название Изделия: **СЧ7.1**
 Децимальный номер: **модуль 1C0D1 (A7)**
 Лэ: **5,62675712845745E-5**



| Наименование компонента | Дец. номер / тип изделия | Эксплуатационная интенсивность отказов |
|-------------------------|--------------------------|--|
| Конденсаторы | ОЖО.460.107 ТУ | $7,45 \cdot 10^{-7}$ |
| Резисторы | ОЖО.457.093 ТУ | $6,84 \cdot 10^{-6}$ |
| Транзисторы | И93.456.1 ТУ/Д1 | $1,09 \cdot 10^{-5}$ |
| Микросхемы | АЕЯР.431200.093 ТУ | $4,54 \cdot 10^{-7}$ |
| Диоды | ТТЗ.362.096 ТУ | $3,72 \cdot 10^{-6}$ |
| Дроссели | ВБРИ.671319.031 | $5,58 \cdot 10^{-8}$ |
| Трансформаторы | ВБРИ.671319.031 | $3,35 \cdot 10^{-6}$ |
| Предохранители | ОЮО.480.003 ТУ | $3,55 \cdot 10^{-7}$ |
| Соединители | НЩО.364.061 ТУ | $5,93 \cdot 10^{-8}$ |
| Плата | РДВИ.469435.008 | $3,83 \cdot 10^{-7}$ |
| Соединения | Соединения | $2,4 \cdot 10^{-7}$ |

Рис. 4.65. Фрагмент протокола отчета подсистемы АСОНИКА-К



Компонент второго уровня 'Конденсаторы' в Изделии 'СЧ7.1'

| Наименование компонента | Дец. номер / Тип изделия | $\lambda_{э} \text{ ЭРИ, } 1/\text{ч}$ |
|-------------------------|--------------------------|--|
| C1 | K10-176 | $1,34 \cdot 10^{-8}$ |
| C2 | K10-176 | $2,46 \cdot 10^{-8}$ |
| C3 | K10-176 | $2,44 \cdot 10^{-8}$ |
| C4 | K10-176 | $1,32 \cdot 10^{-8}$ |
| C5 | K10-176 | $1,38 \cdot 10^{-8}$ |
| C6 | K73-16 | $1,98 \cdot 10^{-8}$ |
| C7 | K10-176 | $1,32 \cdot 10^{-8}$ |
| C8 | K10-176 | $1,33 \cdot 10^{-8}$ |
| C9 | K10-176 | $1,33 \cdot 10^{-8}$ |
| C10 | K10-176 | $1,35 \cdot 10^{-8}$ |
| C11 | K10-176 | $3,97 \cdot 10^{-9}$ |
| C12 | K10-176 | $3,82 \cdot 10^{-9}$ |
| C13 | K10-176 | $3,82 \cdot 10^{-9}$ |
| C14 | K10-176 | $3,86 \cdot 10^{-9}$ |
| C15 | K10-176 | $3,85 \cdot 10^{-9}$ |
| C16 | K10-176 | $3,94 \cdot 10^{-9}$ |
| C17 | K10-176 | $3,94 \cdot 10^{-9}$ |
| C18 | K10-176 | $4,07 \cdot 10^{-9}$ |
| C19 | K10-176 | $3,98 \cdot 10^{-9}$ |
| C20 | K10-176 | $3,84 \cdot 10^{-9}$ |

| Наименование компонента | Дец. номер / Тип изделия | $\lambda_{э} \text{ ЭРИ, } 1/\text{ч}$ |
|-------------------------|--------------------------|--|
| C21 | K10-176 | $3,84 \cdot 10^{-9}$ |
| C22 | K10-176 | $4,06 \cdot 10^{-9}$ |
| C23 | K10-176 | $4,04 \cdot 10^{-9}$ |
| C24 | K10-176 | $3,74 \cdot 10^{-9}$ |
| C25 | K10-176 | $3,74 \cdot 10^{-9}$ |
| C26 | K10-176 | $3,9 \cdot 10^{-9}$ |
| C27 | K10-176 | $2,58 \cdot 10^{-8}$ |
| C28 | K10-176 | $2,57 \cdot 10^{-8}$ |
| C29 | K10-176 | $2,57 \cdot 10^{-8}$ |
| C30 | K10-176 | $2,56 \cdot 10^{-8}$ |
| C31 | K10-176 | $1,31 \cdot 10^{-8}$ |
| C32 | K10-176 | $1,27 \cdot 10^{-8}$ |
| C33 | K10-176 | $1,27 \cdot 10^{-8}$ |
| C34 | K10-176 | $1,32 \cdot 10^{-8}$ |
| C35 | K10-176 | $1,32 \cdot 10^{-8}$ |
| C36 | K10-176 | $1,28 \cdot 10^{-8}$ |
| C37 | K10-176 | $1,28 \cdot 10^{-8}$ |
| C38 | K10-176 | $1,32 \cdot 10^{-8}$ |
| C39 | K10-176 | $1,31 \cdot 10^{-8}$ |
| C40 | K10-176 | $1,28 \cdot 10^{-8}$ |

Рис. 4.65. Окончание

Так как в СРН УПТС входят 6 СЧ одного типоразмера (СЧ7.1–СЧ7.6), условия охлаждения которых, а следовательно, и температуры ЭРИ (например температуры конденсаторов С1_{СЧ7.1} и С1_{СЧ7.6}) отличаются друг от друга, то для того, чтобы избежать расчетов эксплуатационной интенсивности отказов СЧ7.2–СЧ7.6, были идентифицированы коэффициенты макромоделей характеристик надежности СЧ7:

$$\lambda_{\text{ЭСЧ7}}^0(T) = \sum_{i=1}^6 (a_i \cdot T_c^i), \text{ где:}$$

| | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $a_1 = 1,057 \cdot 10^{-7}$ | $a_2 = 7,947 \cdot 10^{-7}$ | $a_3 = 3,533 \cdot 10^{-8}$ |
| $a_4 = 8,676 \cdot 10^{-10}$ | $a_5 = 1,064 \cdot 10^{-11}$ | $a_6 = 6,146 \cdot 10^{-14}$ |

T_c^i – температура среды, окружающей i -ю СЧ.

Примечание: расчет температурной зависимости, необходимой для идентификации коэффициентов макромоделей, проводился с помощью подсистемы АСОНИКА-К. Результаты расчета приведены на [рис. 4.66](#). Там же, для сравнения, приведена температурная зависимость эксплуатационной интенсивности отказов, полученная для часто применяемого на практике допущения о том, что температуры ЭРИ одинаковые и равны температуре среды, окружающей СЧ.

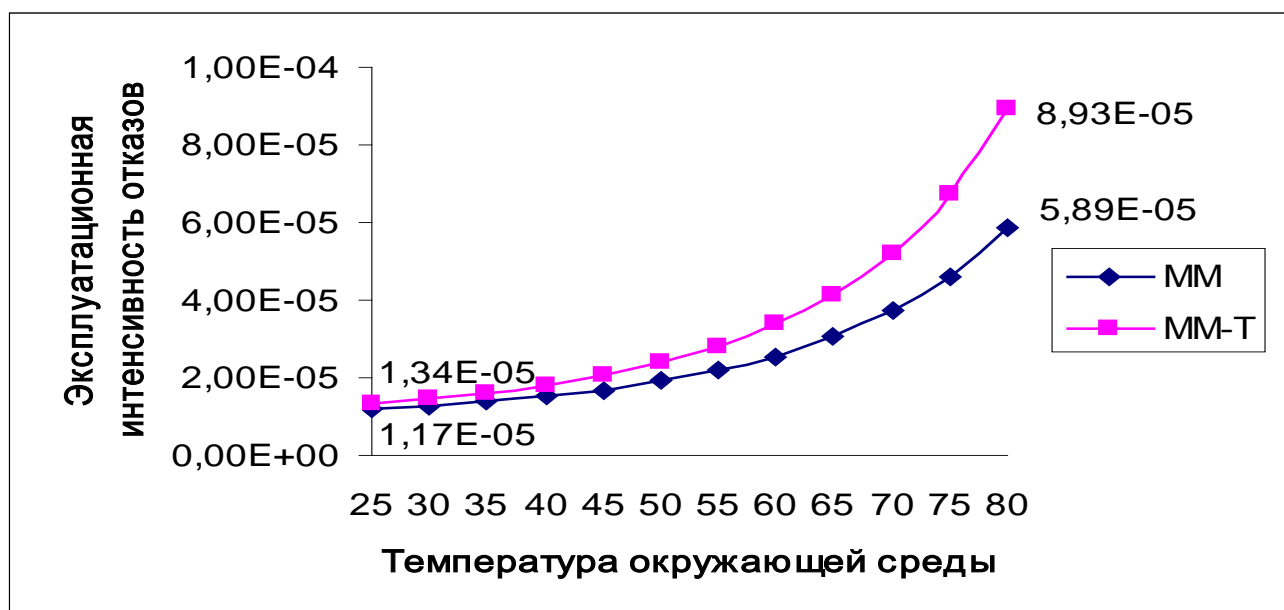




Рис. 4.66. Температурные зависимости эксплуатационной интенсивности отказов СЧ7

Как видно из рисунка, погрешность оценки эксплуатационной интенсивности отказов при температуре 50 °С составляет более 150 %.

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРиАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 363 |
|---|---|--|--|------------|

4.5.4. Исследование тепловых характеристик УПТС

На следующем шаге алгоритма проектирования (блок № 11 на [рис. 4.62](#)) на базе комплекса топологических моделей проводились исследования тепловых характеристик УПТС. *Целью исследований являлась задача определения теплового режима работы всего множества ЭРИ, входящих в состав УПТС.* Исходя из этого, был применен нисходящий алгоритм иерархического моделирования тепловых процессов в РЭА. На первом шаге алгоритма определялись температурное поле блока и интегральные температуры входящих в его состав конструктивных узлов (печатных узлов) и модулей питания. На втором шаге алгоритма выполнялся детальный анализ тепловых характеристик конструктивных узлов и модулей (на уровне отдельных ЭРИ), входящих в блок УПТС. При этом в качестве граничных условий использовалось температурное поле блока, полученное на 1-м шаге алгоритма (см. [рис. 4.75](#)).

В процессе исследований в качестве требований к тепловому режиму работы блока в целом, с точки зрения обеспечения стабильности его выходных сигналов (данные исследования проводились на начальном этапе алгоритма проектирования УПТС), выдвигались требования к интегральным температурам конструктивных узлов – *интегральные температуры конструктивных узлов не должны превышать 65–68 °С.* На начальном этапе проектирования УПТС (блоки 1–6 на [рис. 4.62](#)) также были получены мощности тепловыделений в ЭРИ.

4.5.5. Исследование тепловых характеристик блока УПТС в целом

Эскиз компоновки блока УПТС конструктивными узлами представлен на [рис. 4.67](#). Блок комплектуется печатными узлами А1–А12. Линейные размеры печатных узлов ($l_x \times l_y \times l_z$, где l_z – эффективная толщина ПУ /приближенное значение/) следующие: А1–А9, А11 – 240×170×15 мм; А10 – 160×70×12 мм; А12 – 120×70×8 мм. Монтаж ЭРИ на ПУ, за исключением ПУ А12, двусторонний. Мощности тепловыделений в печатных узлах распределены следующим образом: А1 – 10 Вт; А2 – 12,5 Вт; А3 – 10,5 Вт; А4 – 12 Вт; А5–А7 – 11,5 Вт; А8 – 9,5 Вт; А9 – 6 Вт; А10 – 6 Вт; А11 – 14 Вт; А12 – 5 Вт. На внутренних поверхностях боковых стенок блока устанавливаются модули источников питания В1 и В2 с мощностью тепловыделения 6 Вт каждый. Линейные размеры каждого модуля по

аналогии с размерами печатных узлов – 140×75×12 мм. Схема каналов, образованная печатными узлами и другими конструктивными элементами блока, приведена на [рис. 4.68](#). Расчетная средняя скорость воздуха в каналах конструкции ($k1-k12$), полученная на основе выражения (4.5), составляет $V = 0,13$ м/с.

$$V = G / S_k, \quad (4.5)$$

где G – расход хладоносителя, м³/с; S_k – площадь сечения канала, по которому прокачивается хладоноситель, м².

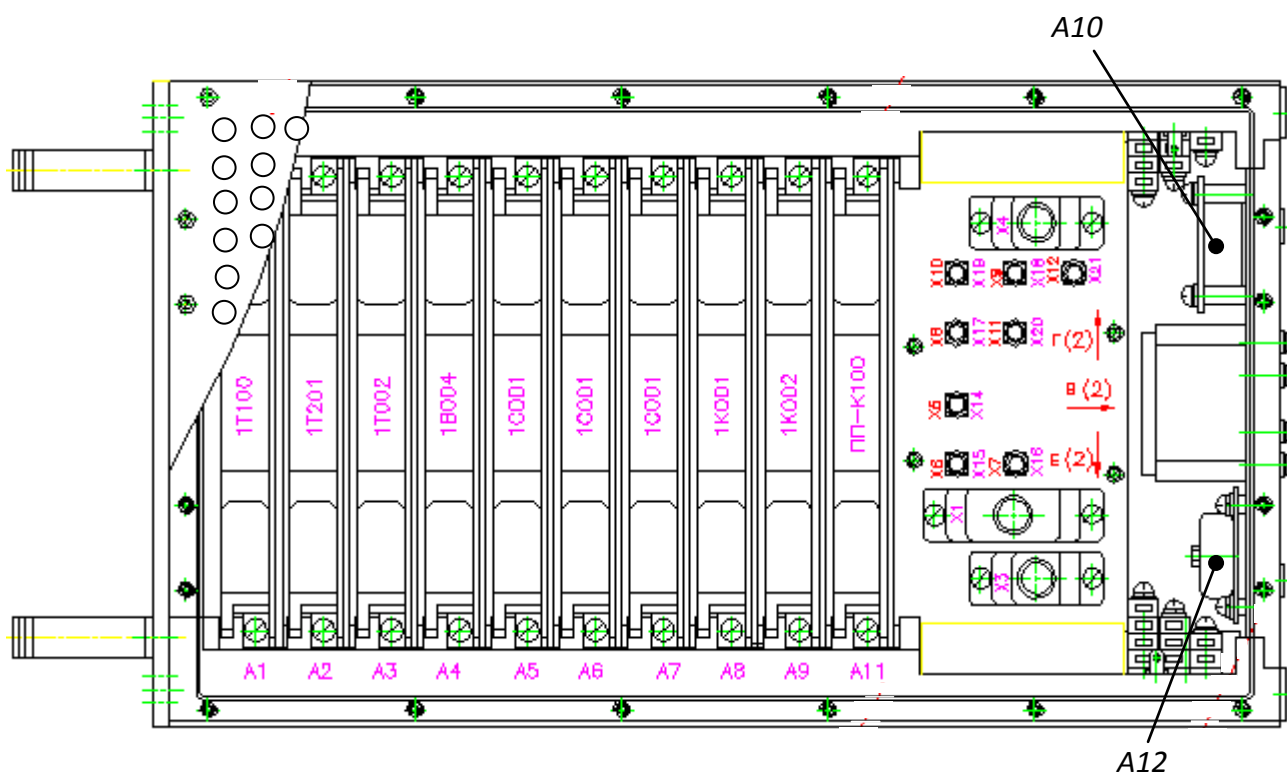


Рис. 4.67. Эскиз компоновки блока УПТС печатными узлами

Площади теплоотдающих поверхностей ЭРИ, установленных на печатных платах, в первом приближении могут приниматься равными $(l \times y) \times 0,5$. Относительные степени черноты ε внутренних поверхностей блока, ПУ и источников питания составляют 0,8. Наружные поверхности блока покрыты черным лаком ($\varepsilon = 0,97$). Материал корпуса блока – алюминиевый сплав АМЦ ($\lambda = 180$ Вт/м/К).

На основе приведенных выше данных разработаем МТП блока УПТС с параметрическим описанием ее компонентов.

Первоначально выполним идеализацию конструкции блока УПТС с точки зрения протекания в ней тепловых процессов.

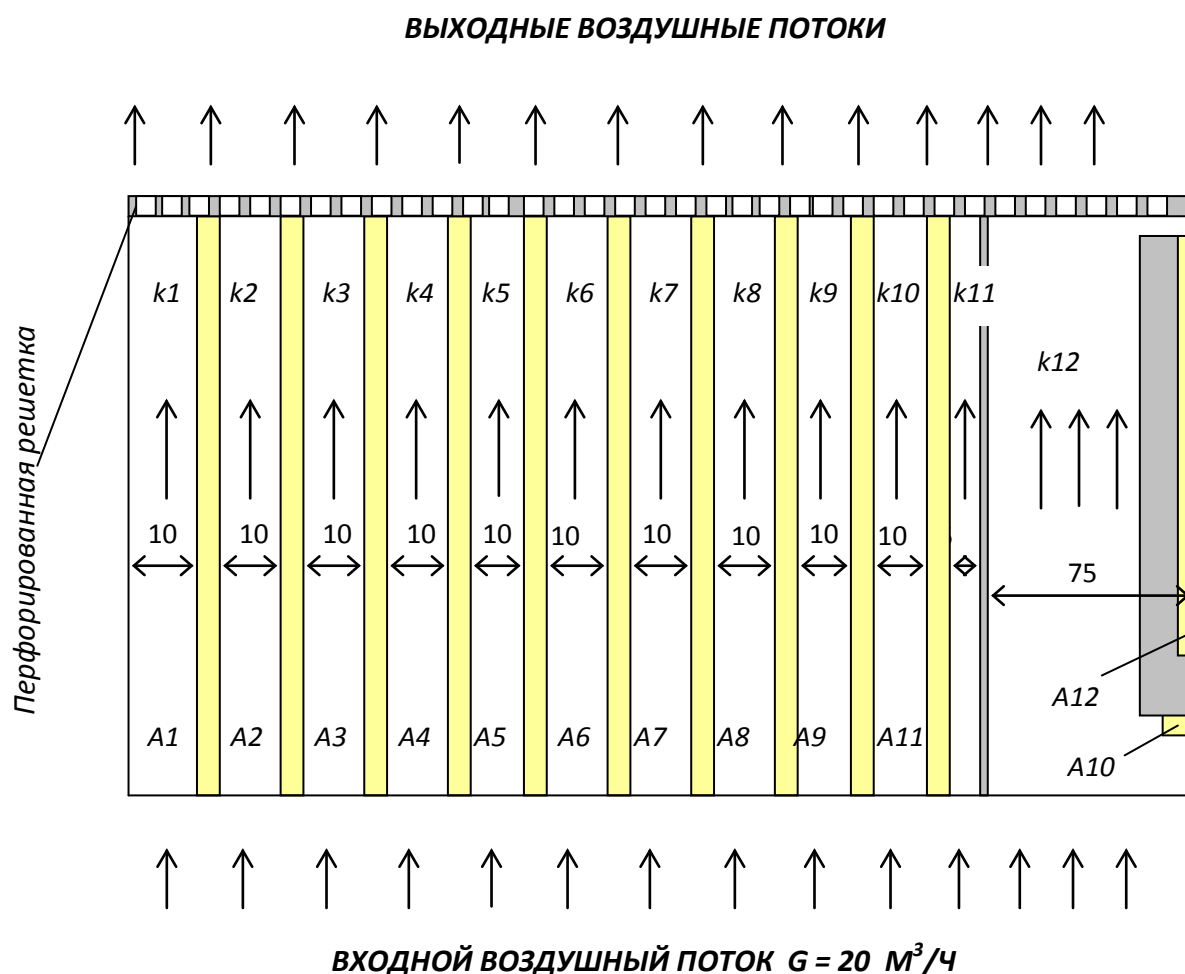


Рис. 4.68. Схема расположения каналов в конструкции УПТС

1. Ввиду большого значения коэффициента теплопроводности материала стенок корпуса, а также ввиду применения принудительного воздушного охлаждения примем изотермичным корпус блока.

2. Печатные узлы, модули источников питания и перегородку (экран) представим в виде условно нагретых зон с ранее приведенными размерами ($l_x \times l_y \times l_z$). При этом для ПУ A1–A9, A11 пренебрегаем их тепловыми сопротивлениями крепления к корпусу.

3. Сеть каналов в МТП будем формировать в соответствии со схемой, приведенной на [рис. 4.68](#). При этом для всех каналов входной поток хладоносителя будем моделировать одним узлом МТП (так как температура хладоносителя на входе в каждый канал является величиной постоянной /20,3 °С/), а выходные потоки хладоносителя на выходе каждого канала – отдельными узлами МТП.

С учетом перечисленных допущений граф МТП блока УПТС будет иметь структуру, приведенную на [рис. 4.69](#).

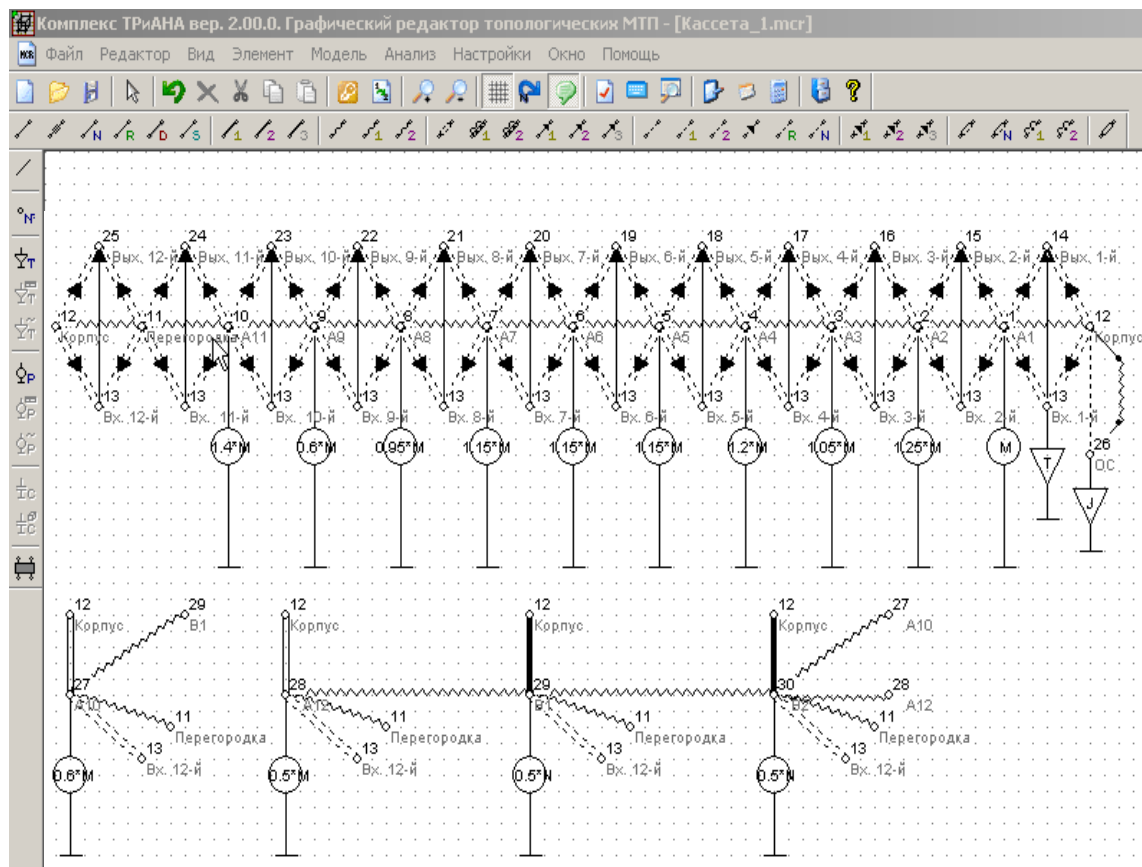


Рис. 4.69. Структура графа МТП блока УПТС

Блок кассетной конструкции

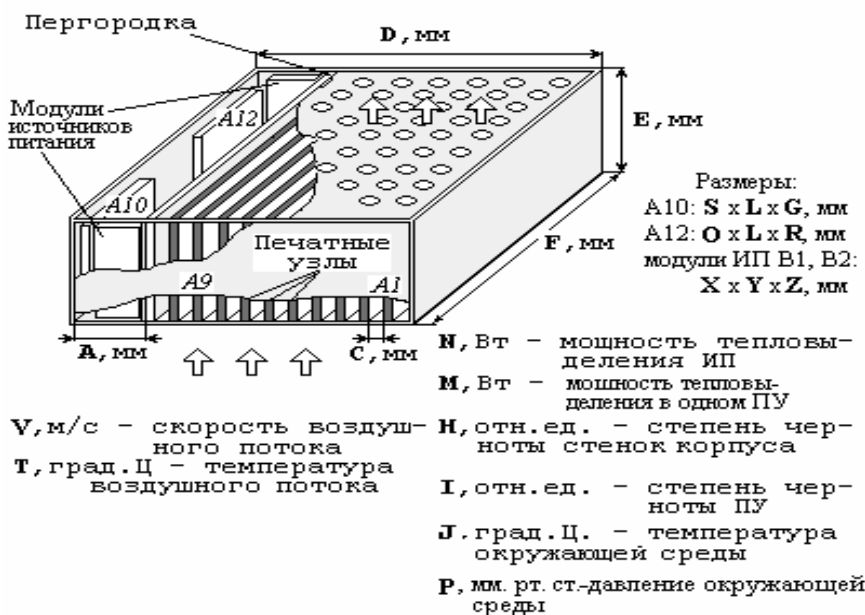


Рис. 4.70. Эскиз конструкции блока УПТС (с перечнем параметров), внедряемый в файл данных *.mcr

Рассмотрим кратко структуру приведенной МТП. Узлами 1–10 моделируются ПУ A1–A9, A11, а узлом 11 – перегородка (экран).

Корпус блока в МТП моделируется узлом 12. Печатные узлы A10 и A12 в МТП моделируются узлами 27 и 28, модули B1 и B2 – соответственно узлами 29 и 30. Узлами 14–25 в МТП моделируются воздушные потоки на выходе из каналов k1–k12. Каждый канал в конструкции блока в МТП представлен совокупностью ветвей 62-го типа (для 1-го канала ветви 1–13, 1–14, 12–13, 12–14) и 71-го типа (для 1-го канала ветвь 13–14) и 17-го или 16-го типа (для 1-го канала ветвь 1–12). Теплообмен внешней поверхности корпуса с окружающей средой в МТП отражен ветвями 26-го и 16-го типа (ветви 12–26). Для ПУ A10 и A12 элементы крепления к корпусу моделируются ветвью 1-го типа (тепловое сопротивление крепления между ПУ и корпусов составляет 1,5 К/Вт) /ветви: 27–12 и 28– 2/. Крепление модулей источников питания к корпусу моделируются ветвями контактного теплообмена (сухой контакт) /ветви 11-го типа: 29–12 и 30–12/.

Для последующей параметризации компонентов приведенного на [рис. 4.69](#) графа МТП создадим рисунок эскиза блока, который в дальнейшем будет сохранен в файле *.msr вместе с МТП. Созданный эскиз блока приведен на [рис. 4.70](#). На рисунке также приведены обозначения параметров, с помощью которых будет осуществлена параметризация компонентов МТП блока. Пример ввода параметров для параметризации МТП представлен на [рис. 4.71](#).

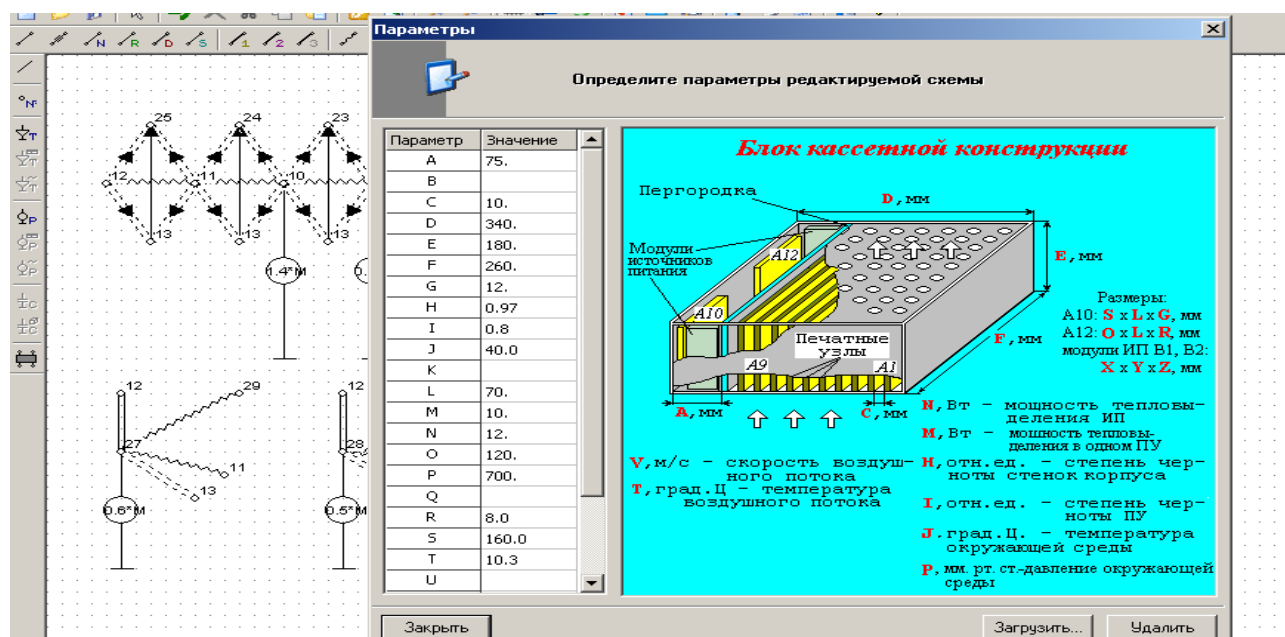


Рис. 4.71. Ввод значений параметров, используемых для параметрического описания компонентов МТП блока УПТС

Для параметрического описания источников мощности, моделирующих тепловыделения в печатных узлах A1–A12 (узлы МТП 1–10, 27, 28), в качестве мощности тепловыделения, обозначенной на [рис. 4.70](#) как параметр «M», примем мощность тепловыделения в ПУ A1. Тогда значение мощности тепловыделения в

ПУ А2 может быть описано как 1,25•М. По аналогии в графе МТП описаны остальные источники мощности для указанных выше печатных узлов.

Значения мощностей тепловыделения в модулях В1 и В2 описываются через параметр «N», представляющий суммарное тепловыделение в модулях В1 и В2. По аналогии в МТП описываются источники заданной температуры (см. [рис. 4.69](#) и [рис. 4.70](#)).

Описание ветвей МТП, отражающих теплообмен корпуса с окружающей средой (ветви 12–26 на [рис. 4.69](#)), опирается, в первую очередь, на описание площади теплоотдающей поверхности блока. Площадь внешней поверхности блока можно описать в ветвях 16-го и 26-го типов как $(F \cdot E \cdot 2) + (D \cdot E \cdot 2) + (D \cdot F \cdot 2)$. При этом значение первого параметра в ветвях 16-го и 26-го типов можно определить равным единице, а второй параметр записать в виде вышеприведенной формулы. Степень черноты поверхности блока определяется как параметр «Н», а определяющий размер для ветви 26-го типа как «Е». Коэффициент облученности (для ветви 16-го типа) и ориентации (для ветви 26-го типа) можно определить равными единице, то есть, без параметрического описания. Давление окружающей среды определяется как параметр «Р». *В некоторых случаях, когда параметризованную МТП необходимо занести в библиотеку фрагментов, целесообразно размер блока, определяемый количеством плат, выразить через шаг установки, эффективную толщину и количество ПУ, устанавливаемых в блоке, и т. п.*

Рассмотрим далее параметризацию компонентов ветвей, описывающих каналы. Рассмотрим в качестве примера 2-й канал, образованный ПУ А1 и А2 (см. [рис. 4.68](#)). В ветвях 62-го типа в качестве размеров «Высота канала» записывается параметр «F-20», размера «Ширина канала» – параметр «С», а размера «Длина рассматриваемой части канал» – параметр «Е-10». В качестве значения скорости воздуха в канале записывается параметр «V», определенный как средняя скорость хладоносителя в каналах конструкции. *В более общем случае значения скоростей в каналах конструкции блока могут быть определены индивидуально через заданный расход воздуха и площади сечений каналов.* Значение параметра «Номер участка канала» для приведенной на [рис. 4.69](#) МТП определяется равным единице, а значение «Радиус изгиба осевой линии» – 0. Параметр «Площадь дополнительных элементов», как было описано ранее, выражается как $(F-20) \cdot (E-10) \cdot 0.5$. Давление окружающей среды описывается по аналогии с ветвью 26-го типа. Параметры ветви 71-го типа описываются аналогичным образом, за исключением параметра «Коэффициент заполнения канала», который может быть определен без параметрического описания в виде числа из диапазона 0,1–0,2. Для ветви данного типа, описывающей теплоперенос в 12-м канале (k_{12} на [рис. 4.68](#)), значение параметра «Коэффициент заполнения канала» записывается приближенно как $((X \cdot Y \cdot Z \cdot 2) + (O \cdot L \cdot R \cdot 2)) / (F \cdot E \cdot A)$. При задании значений параметров ветвей 17-го типа, описывающих лучистый теплообмен (ветвь 2–1 и ей аналогичные), используются выражения с применением выше рассмотренных обозначений параметров «F», «Е», «С» и т. п.

Описание ветвей, моделирующих контактный теплообмен (ветви 12–9 и 12–30), осуществляется через размеры модулей В1 и В2, а именно: в ветвях 11-го типа значение размера «Длина контактного пятна» выражается через «Х», а размера «Ширина контактного пятна» через «У».

При описании параметров ветвей 51-го и 16-го типов (ветви 27–13, 28–13, 29–13, 30–13, 27–29, 28–29 и т. п.) площади теплоотдачи ПУ и модулей записы-

вались через параметры «S», «L», «O», «X», «Y», «Z». Например, в ветвях 27–13 и 27–11 как $S \cdot L \cdot 1.5$, в ветви 28–13 и 28–11 как $O \cdot L \cdot 1.5$, а в ветвях 29–13, 30–13, 29–11 и т. п. как $(X \cdot Z \cdot 2) + (Y \cdot Z \cdot 2) + (X \cdot Y)$.

Таким образом, на основе вышеизложенного подхода были описаны компоненты приведенного на [рис. 4.69](#) графа МТП.

Перед процессом моделирования, используя пункт меню «Параметры схемы» и функцию <Загрузить> программы *MTPEditor*, выполнялась привязка к файлу данных рисунка эскиза конструкции (см. [рис. 4.70](#)) и определялись числовые значения применяемых в описании компонентов графа МТП параметров («A», «C», «D», «E» и т. п.).

На [рис. 4.72](#) приведен фрагмент графа МТП блока УПТС, обработанный программой *MTPViewer* после анализа МТП математическим ядром *Triana*. На [рис. 4.73](#) представлен фрагмент файла отчета, а на [рис. 4.74](#) – фрагмент файла отчета, полученного в отладочном режиме. На [рис. 4.75](#) приведено температурное поле блока, построенное на основе результатов моделирования, которое соответствует выдвинутому требованию к нормальному тепловому режиму блока на уровне интегральных характеристик. Анализ результатов расчета также показывает, что в каналах конструкции присутствует переходной режим теплообмена (см. значение критерия *Re* на [рис. 4.74](#)), который, в случае необходимости, может быть доведен до турбулентного путем перераспределения ПУ и/или сети каналов в блоке или посредством увеличения расхода хладагента.

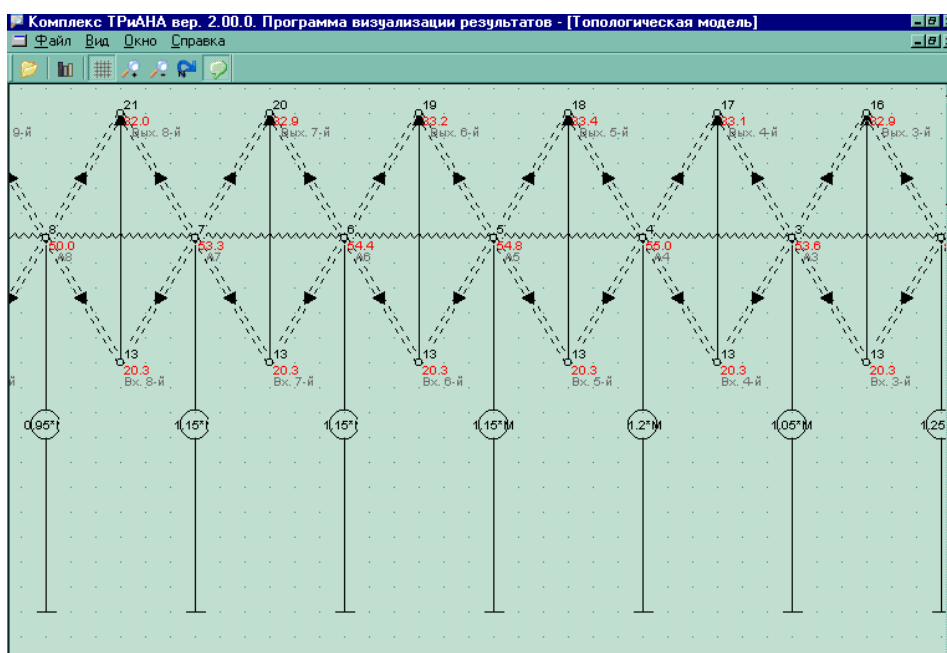


Рис. 4.72. Фрагмент графа МТП, полученный при просмотре результатов анализа программой *MTPViewer*

Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры
 "АСОНИКА-Т"
 Программный комплекс ТРиАНА v.2.10.00

 Copyright ©С 2006-2014,
 А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
 В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
 Тел:8-(913)-571-54-71,
 E-mail: triana@triana.su,
 WWW: http://www.triana.su

Управляющая информация :

Тип конструкции : 1-0 нетиповая конструкция
 Тип анализа : 1 стационарный режим
 Расчет ФПЧ : 0 не производится
 Тестовая информация : 11 работа в составе ИС

О П И С А Н И Е М О Д Е Л И Т Е П Л О В Ы Х П Р О Ц Е С С О В

Количество узлов модели - 30

Параметры ветвей модели

Таблица N1

| УЗ1-УЗ2 | ТИП | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 | Q7 | Q8 | Q9 |
|---------|-----|-----------|----------|--------|------|---------|----------|----------|--------|----|
| 12- 13 | 62 | 240.00 | 75.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 12- 25 | 62 | 240.00 | 75.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 11- 13 | 62 | 240.00 | 75.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 11- 25 | 62 | 240.00 | 75.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 11- 13 | 62 | 240.00 | 5.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 11- 24 | 62 | 240.00 | 5.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 12- 26 | 26 | 1.00 | 392800.0 | 180.00 | 1.00 | 700.00 | | | | |
| 12- 26 | 16 | 392800.00 | 1.0 | 0.97 | 1.00 | 0.00 | | | | |
| 12- 11 | 17 | 240.00 | 170.0 | 0.97 | 0.80 | 75.00 | 0.00 | | | |
| 1- 14 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 20400.00 | 700.00 | |
| 13- 14 | 71 | 240.00 | 10.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 12- 14 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 12- 13 | 62 | 240.00 | 10.0 | 170.00 | 0.13 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 700.00 | |
| 1- 12 | 17 | 240.00 | 170.0 | 0.80 | 0.80 | 10.00 | 20400.00 | | | |
| 27- 12 | 1 | 1.50 | | | | | | | | |
| 28- 12 | 1 | 1.50 | | | | | | | | |
| 29- 30 | 17 | 140.00 | 75.0 | 0.80 | 0.80 | 236.00 | 0.00 | | | |
| 12- 29 | 11 | 140.00 | 75.0 | 1.00 | | | | | | |
| 12- 30 | 11 | 140.00 | 75.0 | 1.00 | | | | | | |
| 27- 13 | 51 | 1.00 | 16800.0 | 160.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 13- 15 | 71 | 240.00 | 10.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 13- 16 | 71 | 240.00 | 10.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 13- 24 | 71 | 240.00 | 5.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 13- 25 | 71 | 240.00 | 75.0 | 0.13 | 0.10 | 700.00 | | | | |
| 28- 11 | 16 | 120.00 | 70.0 | 0.80 | 1.00 | 4200.00 | | | | |
| 27- 11 | 16 | 160.00 | 70.0 | 0.80 | 1.00 | 5600.00 | | | | |
| 27- 29 | 16 | 160.00 | 70.0 | 0.80 | 0.25 | 5600.00 | | | | |
| 28- 29 | 16 | 120.00 | 70.0 | 0.80 | 0.25 | 4200.00 | | | | |
| 29- 11 | 16 | 1.00 | 15660.0 | 0.80 | 0.50 | 0.00 | | | | |
| 30- 11 | 16 | 1.00 | 15660.0 | 0.80 | 0.50 | 0.00 | | | | |
| 30- 27 | 16 | 160.00 | 70.0 | 0.80 | 0.25 | 5600.00 | | | | |
| 28- 30 | 16 | 120.00 | 70.0 | 0.80 | 1.00 | 4200.00 | | | | |
| 28- 13 | 51 | 1.00 | 12600.0 | 120.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 29- 13 | 51 | 1.00 | 15660.0 | 140.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |
| 30- 13 | 51 | 1.00 | 15660.0 | 140.00 | 0.13 | 700.00 | | | | |

Рис. 4.73. Продолжение

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
 Размерность матрицы 30
 Начальное число ненулевых элементов 186
 Число ненулевых элементов в факторизованной матрице.. 204
 Количество итераций при решении СНАУ..... 6

 * ТАБЛИЦА ТЕМПЕРАТУР В УЗЛАХ М Т П *

| N УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение Темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|-------------|-----------------------------|
| 1 | МТП | A1 | 49.31 |
| 2 | МТП | A2 | 53.87 |
| 3 | МТП | A3 | 53.64 |
| 4 | МТП | A4 | 55.04 |
| 5 | МТП | A5 | 54.84 |
| 6 | МТП | A6 | 54.42 |
| 7 | МТП | A7 | 53.28 |
| 8 | МТП | A8 | 49.96 |
| 9 | МТП | A9 | 47.10 |
| 10 | МТП | A11 | 53.30 |
| 11 | МТП | Перегородка | 49.27 |
| 12 | МТП | Корпус | 42.77 |
| 13 | МТП | Вх. 12-й | 20.31 |
| 14 | МТП | Вых. 1-й | 28.97 |
| 15 | МТП | Вых. 2-й | 32.00 |
| 16 | МТП | Вых. 3-й | 32.88 |
| 17 | МТП | Вых. 4-й | 33.12 |
| 18 | МТП | Вых. 5-й | 33.37 |
| 19 | МТП | Вых. 6-й | 33.24 |
| 20 | МТП | Вых. 7-й | 32.92 |
| 21 | МТП | Вых. 8-й | 32.01 |
| 22 | МТП | Вых. 9-й | 30.75 |
| 23 | МТП | Вых. 10-й | 31.44 |
| 24 | МТП | Вых. 11-й | 36.78 |
| 25 | МТП | Вых. 12-й | 21.22 |
| 26 | МТП | ОС | 40.00 |
| 27 | МТП | A10 | 48.98 |
| 28 | МТП | A12 | 47.79 |
| 29 | МТП | B1 | 42.88 |
| 30 | МТП | B2 | 42.89 |

Программный комплекс ТРиАНА v.2.10.00
 Copyright ©С 2006-2014,
 А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
 В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
 Тел:8-(913)-571-54-71,
 E-mail: triana@triana.su,
 WWW: http://www.triana.su

Рис. 4.73. Окончание

.....

Тип ветви= 62

Подключение к узлам 12 - 13

Tm= 31.54098 Lamda= 2.6907869E-02 Nu= 1.6186817E-05

W, м/с= 0.1300000 Re= 980.5676 DI, м= 0.1700000

S, мкв.= 2.0400001E-02 Дэкв., м= 0.1142857 Nus= 9.791341

NUK= 1 Gam= 0.8117579 Epsl= 1.675855

Epsr= 1.000000 alfa= 2.212441 PROVODIM= 4.5133796E-02

MODBK2: ВХОД

Тип ветви= 26

Подключение к узлам 12 - 26

Tm= 41.38755 A= 2.4594256E-05 Lamda= 2.7597127E-02

Nu= 1.7094277E-05 Beta= 3.1807874E-03 Gr*Pr= 1199087.

Gr= 1725177. Pr= 0.6950516 Nus= 17.86926

alfa= 2.629299 PROVODIM= 1.032789

MODIZL: ВХОД

Тип ветви= 16

Подключение к узлам 12 - 26

S, м кв.= 0.3928000 OBL= 1.000000 Кчерн= 0.9700000

alfa_l= 6.836271 PROVODIM= 2.685287

MODIZL: ВХОД

Типветви= 17

Подключение к узлам 12 - 11

S, м кв.= 4.0800001E-02 OBL= -3.544850 Кчерн= 0.7806841

alfa_l= -20.38119 PROVODIM= -0.8315525

MODBK2: ВХОД

Типветви= 62

Подключение к узлам 1 - 14

Tm= 39.13977 Lamda= 2.7439784E-02 Nu= 1.6887121E-05

W, м/с= 0.1300000 Re= 156.4901 DI, м= 0.1700000

S, мкв.= 3.0600002E-02 Дэкв., м= 1.9200001E-02 Nus= 2.307442

NUK= 1 Gam= 0.8018777 Epsl= 1.266743

Epsr= 1.000000 alfa= 3.164845 PROVODIM= 9.6844256E-02

MODMAS: ВХОД

Тип ветви= 71

Подключение к узлам 13 - 14

Tm= 24.63902 CO= 1004.070 Davk(поправ.на давл.)= 1.092666

S, м кв.= 2.4000003E-03 RO ср.= 1.297923 PROVODIM= 0.3254727

MODBK2: ВХОД

Тип ветви= 62

Подключение к узлам 12 - 14

Tm= 35.87212 Lamda= 2.7211048E-02 Nu= 1.6585975E-05

W, м/с= 0.1300000 Re= 156.4901 DI, м= 0.1700000

S, мкв.= 2.0400001E-02 Дэкв., м= 1.9200001E-02 Nus= 2.218538

NUK= 1 Gam= 0.8018777 Epsl= 1.266743

Epsr= 1.000000 alfa= 3.017540 PROVODIM= 6.1557818E-02

MODBK2: ВХОД

.....

Рис. 4.74. Фрагмент файла *.debug на одной из итераций анализа МТП

На [рис. 4.75](#) жирной линией выделен контур ПУ А7, детальный анализ тепловых характеристик которого на уровне всех ЭРИ будет рассмотрен ниже.



Рис. 4.75. Температурное поле блока УПТС

На [рис. 4.76](#) представлены зависимости температур ряда конструктивных узлов и корпуса блока от скорости хладоносителя, полученные в результате исследований.

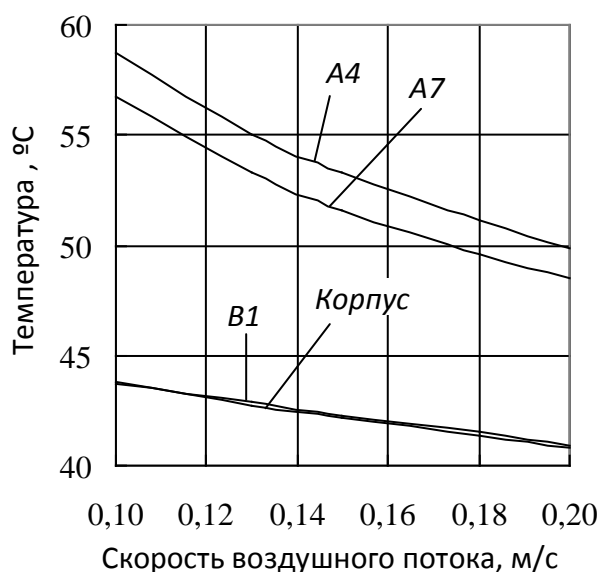


Рис. 4.76. Графики зависимостей температур конструктивных узлов и корпуса блока УПТС от скорости хладоносителя

В результате выполнения 1-го шага алгоритма следует отметить, что рассмотренная выше структура МТП блока может быть модифицирована в следующих направлениях:

1. В случае применения специальных теплостоков, обеспечивающих отток тепла с несущих конструкций ПУ к стенкам корпуса, в структуру МТП блока (см. [рис. 4.69](#) и [4.72](#)) могут быть добавлены ветви 1–12, 2–12, ..., 10–12, отражающие контактный теплообмен.

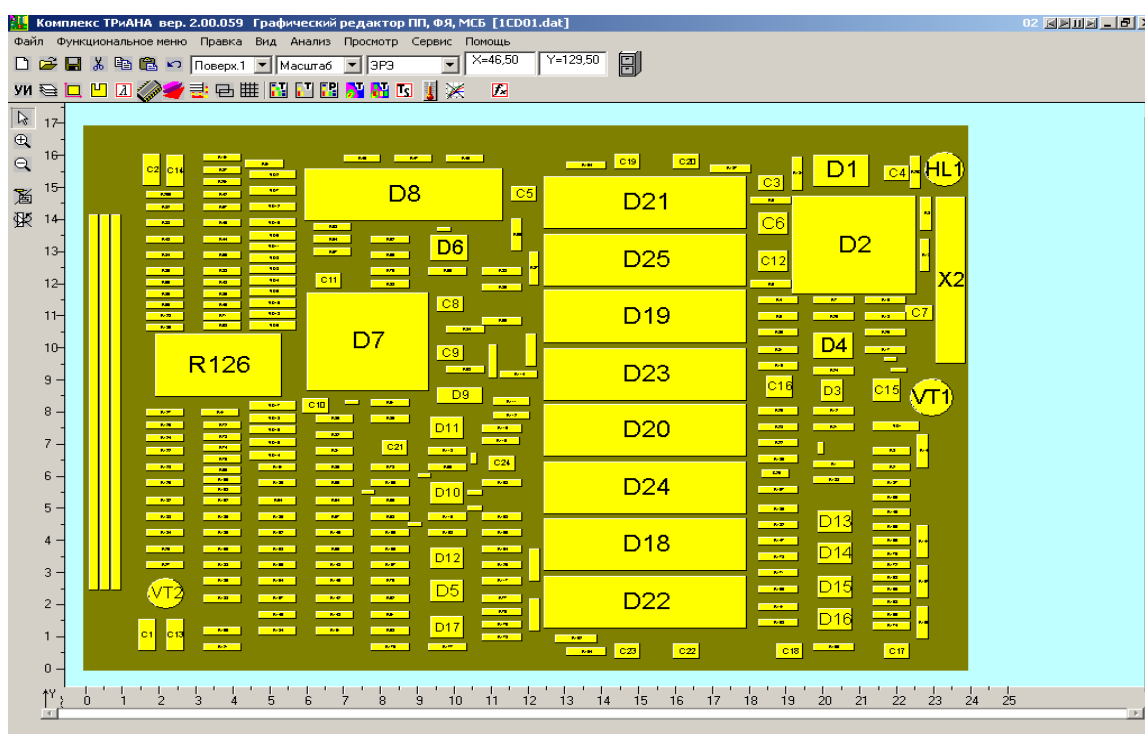
2. В случае значительного тепловыделения в конструктивных узлах и элементах, устанавливаемых непосредственно на стенках корпуса блока, в качестве МТП, отражающей кондуктивное распространение тепла по стенкам кор-

пуса и его отдачу в окружающую среду, может быть применена МТП, учитывающая неизотермичность стенок корпуса блока

4.5.6. Исследования тепловых характеристик печатных узлов

После моделирования теплового режима работы блока УПТС в целом осуществляется моделирование тепловых режимов работы печатных узлов на уровне ЭРИ. В качестве ограничения на тепловой режим ЭРИ, с точки зрения стабильности, накладываются требования: температуры корпусов ЭРИ не должны превышать 70 °С. Процесс детального моделирования стационарного теплового режима печатных узлов рассмотрим на примере печатного узла А7 (1C0D1 на [рис. 4.67](#)).

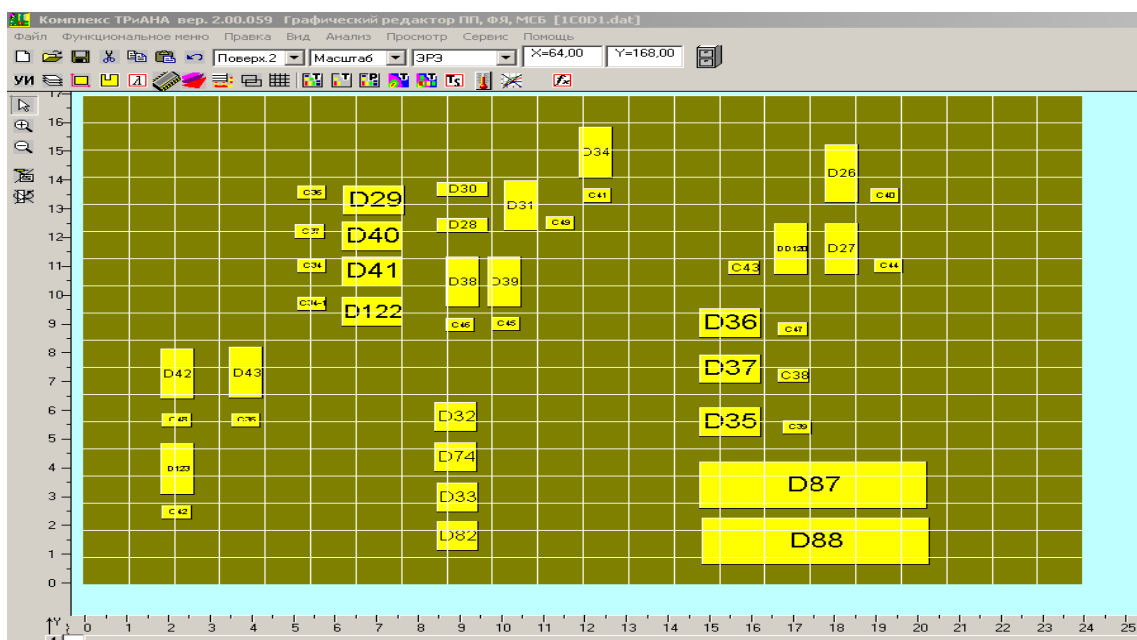
В результате анализа допустимых температур ЭРИ, устанавливаемых на ПУ А7, ограничение на температуры ЭРИ можно выразить через усредненный коэффициент тепловой нагрузки ЭРИ. Для ЭРИ ПУ А7 значения коэффициентов тепловой нагрузки не должны превышать 0,75.



a

Рис. 4.77. Расположение ЭРИ на поверхностях ПУ А7:

a – 1-я поверхность; *б* – 2-я поверхность



6

Рис. 4.77. Окончание

ПУ А7 имеет двусторонний монтаж ЭРИ (см. [рис. 4.77](#)). Исходные данные для анализа тепловых характеристик ПУ подготавливаются в соответствии с программной документацией. Остановимся подробнее на задании граничных условий. Для 1-й и 2-й поверхностей ПУ А7 в качестве граничных условий необходимо использовать температуры воздушных потоков, распространяющихся в каналах $k7$, $k8$, и интегральные температуры ПУ А6 и ПУ А8 (см. [рис. 4.68](#) и [рис. 4.70](#)). 1-я поверхность ПУ А7 охлаждается воздушным потоком, проходящим через канал $k8$, а 2-я поверхность – соответственно через канал $k7$.

Кроме этого, 1-я поверхность рассматриваемого ПУ взаимодействует посредством лучистого теплообмена с ПУ А8, интегральная температура которого составляет $49,96\text{ }^{\circ}\text{C}$, а 2-я поверхность – с ПУ А6 с интегральной температурой $54,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. [рис. 4.70](#)).

Как видно из [рис. 4.68](#), в результате моделирования тепловых процессов в блоке были получены температуры воздушных потоков на выходах сети каналов $k1$ – $k12$. В свою очередь, корректность анализа тепловых характеристик ПУ А7 базируется на задании неизотермичности потоков хладоносителя, прокачиваемых в каналах $k7$ и $k8$, учитывая их значительный перегрев на выходе

каналов ($\Delta T = 11\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для учета данного эффекта изменение температуры воздушного потока можно задать посредством выделения на каждой поверхности ПУ нескольких зон с граничными условиями вдоль движения воздушного потока. Для значений длин каналов ($l_n = 170\text{ мм}$), образованных ПУ в блоке УПТС, вдоль движения воздушного потока достаточно выделить по 3 зоны на

каждой поверхности ПУ, как это показано на [рис. 4.78](#). На рисунке также представлены координаты локализации окончания зон с граничными условиями вдоль оси Oy . Для каждой зоны воздушный поток принимается изотермичным. Для определения температуры воздушного потока на границе каждой зоны можно воспользоваться выражением (4.6).

$$T_{вп}^0(x) = T_{вх}^0 + 2(T_M^0 - T_{вх}^0) \cdot (x/l_x), \quad (4.6)$$

где $T_{вх}^0$ – температура воздушного потока на расстоянии x на входе в канал; l_x – высота канала;

$$T_M^0 = (T_{вх}^0 + T_{вых}^0),$$

где T_M^0 – значение температуры в середине канала; $T_{вых}^0$ – температура воздушного потока на выходе из канала.

При этом значения T_M^0 для каждой поверхности ПУ вычисляются как среднее значение температур $T_{вх}^0$ и $T_{вых}^0$ (см. [рис. 4.78](#)), а вместо значений x и l_x в выражение (4.6) подставляются значения y ($y = 57$ мм, $y = 114$ мм, $y = 170$ мм) и $l_y = 170$ мм.

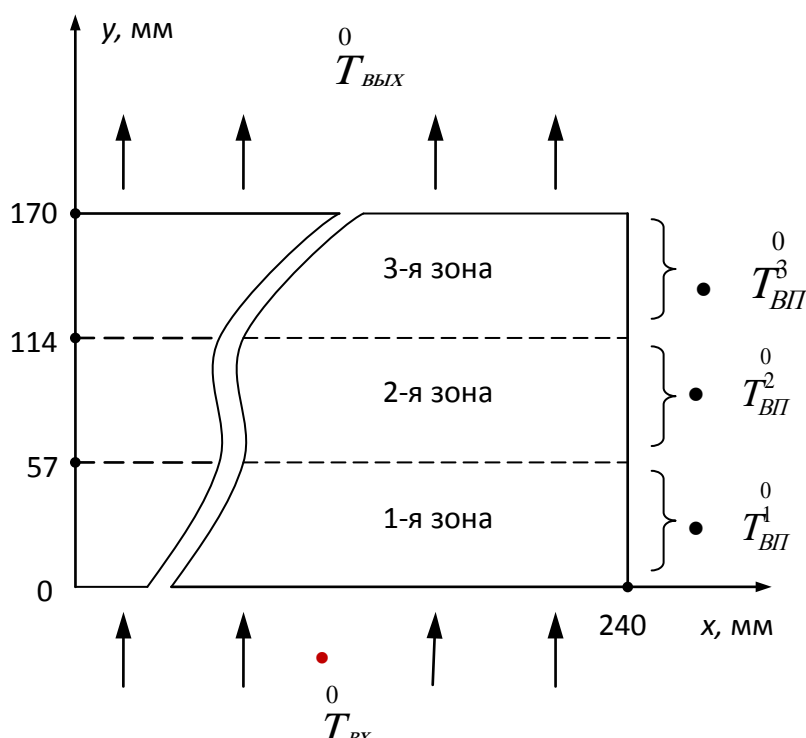


Рис. 4.78. Формализованная схема для вычисления параметров воздушного потока, продуваемого вдоль оси Oy ПУ А7

На основе полученных температур воздушного потока на границе выделенных на каждой поверхности ПУ зон вычисляются значения средних температур воздушного потока ($T_{ВП}^0$, $T_{ВП}^1$, $T_{ВП}^2$) для каждой зоны как среднее значение температур в начале и в конце зоны.

Вычисленные вышеописанным способом характеристики теплового потока для 1-й поверхности ПУ А7 будут следующими: $T_M^0 = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^0(57) = 24,52 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^0(114) = 28,74 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^0(170) = 32,9 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^1 = 22,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^2 = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^3 = 30,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Конечные результаты для 2-й поверхности: $T_{ВП}^1 = 22,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^2 = 26,1 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ВП}^3 = 30,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

После задания граничных условий осуществляется процедура моделирования теплового режима ПУ А7. Результаты моделирования ПУ А7 приведены на [рис. 4.79–4.81](#). Анализ значений коэффициентов тепловой нагрузки ($K_{ТН}$) ЭРЭ (см. [рис. 4.78, а](#)), а также термограммы ПУ (см. [рис. 4.80](#)) показывает, что некоторые ЭРИ (D8, D43, D26), с точки зрения требований к нормальному тепловому режиму, работают в перегруженном режиме, или близком к нему: $K_{ТН}(D8) = 0,86$; $K_{ТН}(D26) = 0,74$; $K_{ТН}(D43) = 0,75$.

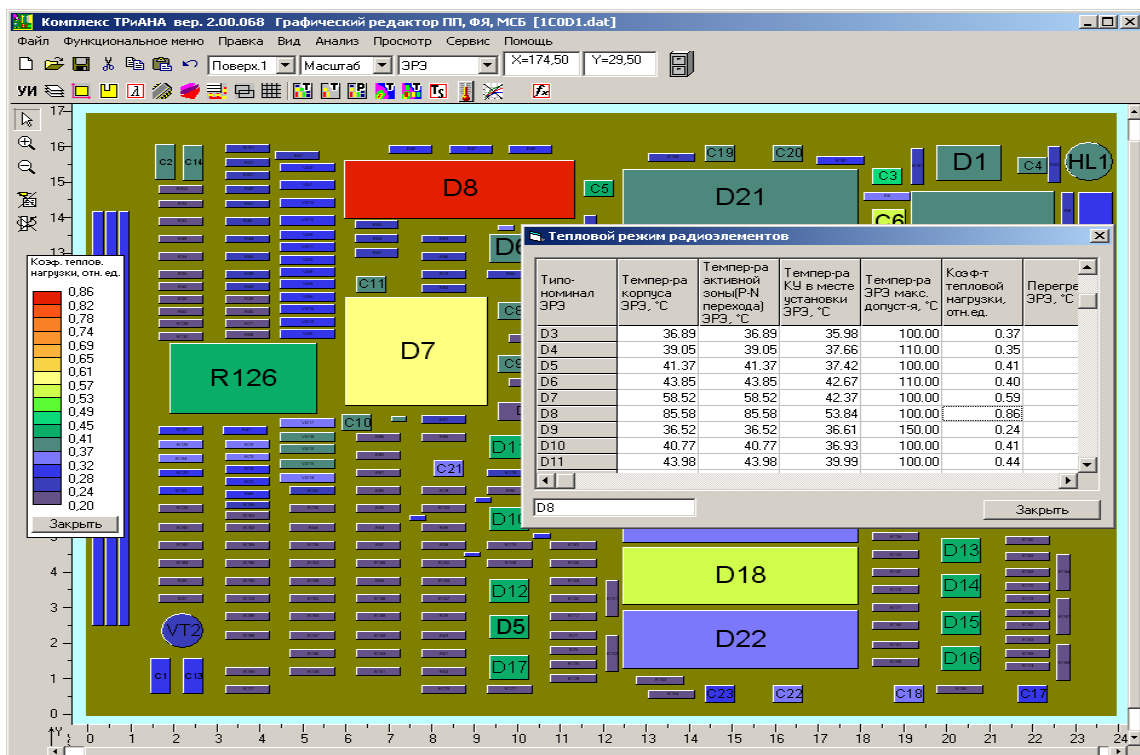
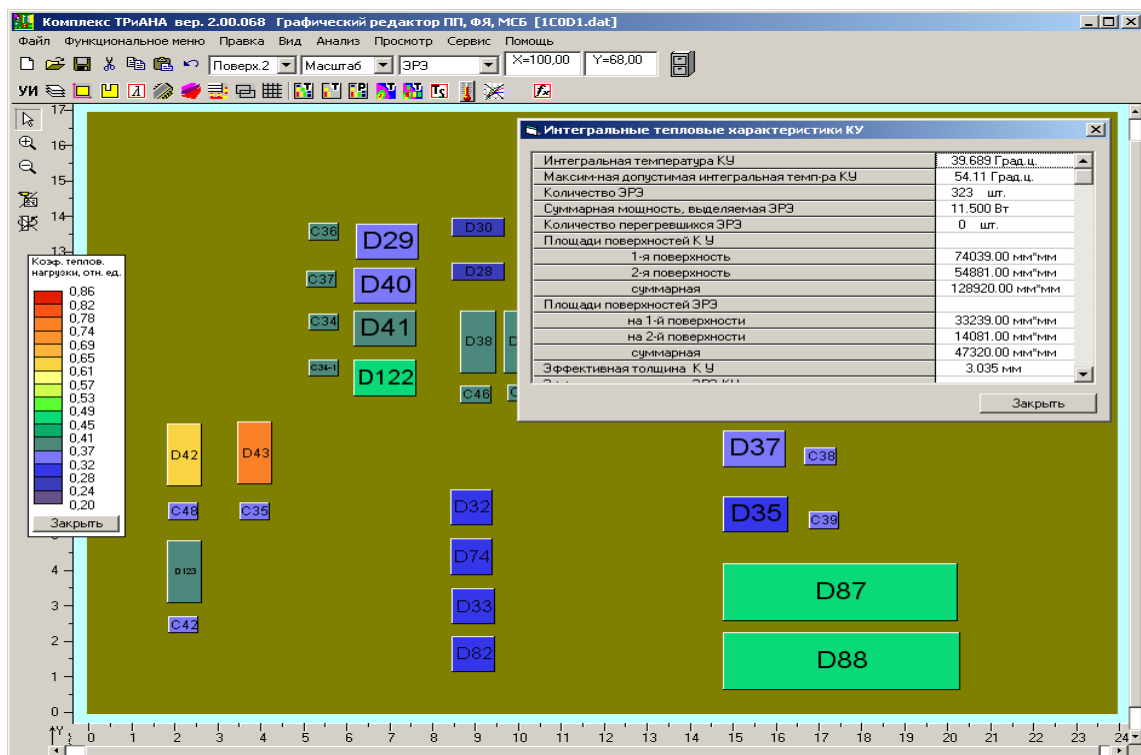


Рис. 4.79. Результаты моделирования ПУ А7: а – значения коэффициентов тепловой нагрузки ЭРИ, установленных на 1-й поверхности; б – коэффициенты тепловой нагрузки ЭРИ /1-я поверхность/ и интегральные тепловые характеристики ПУ А7



6

Рис. 4.79. Окончание

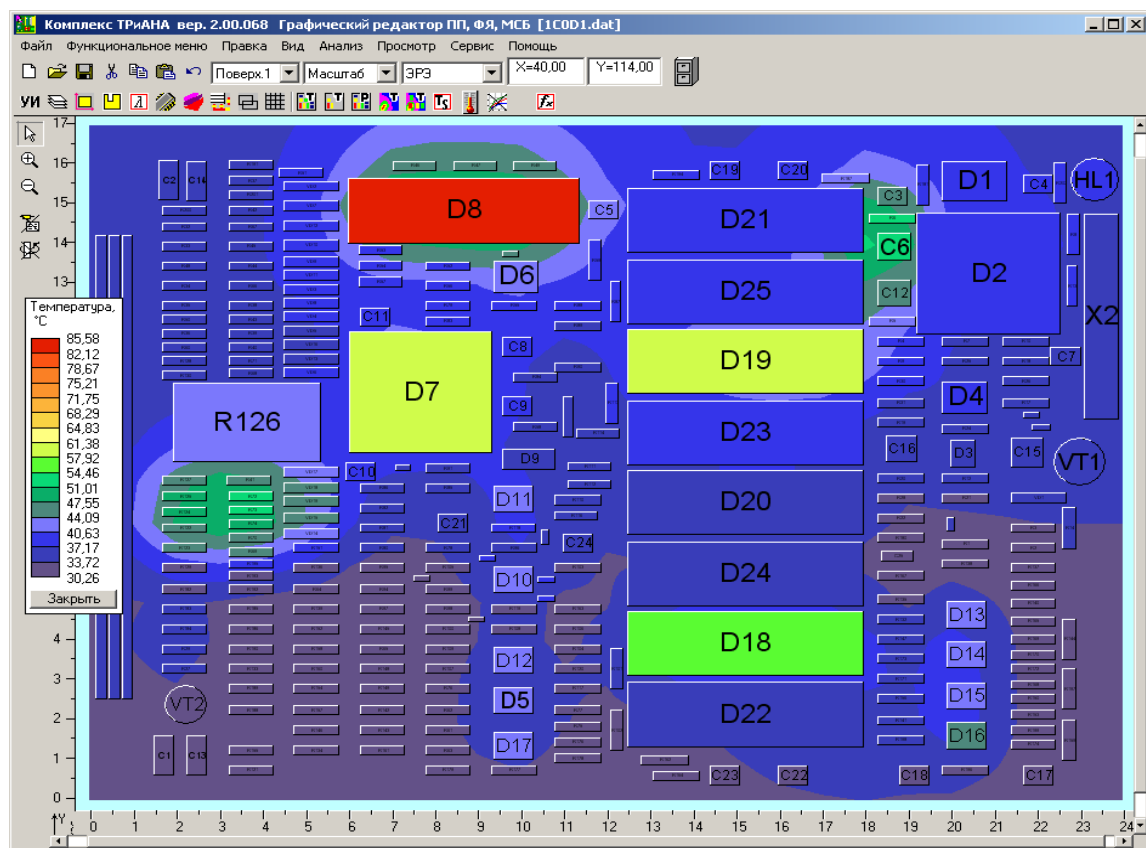




Рис. 4.80. Термограмма ПУ А7 (вид со стороны 1-й поверхности), полученная в результате моделирования

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРиАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 380 |
|---|---|--|--|------------|

Анализ теплофизических параметров перечисленных ЭРИ, а также результатов моделирования показывает, что обеспечить тепловой режим ЭРИ возможно несколькими способами. Первый – снизить значения сопротивлений крепления $R_{\text{тк}}$ (см. [рис. 4.81](#), табл. 1), применив иной способ установки ЭРИ на ПП (ввести мини-радиатор, установить ЭРИ на индивидуальные тепловые шины и т. п. Второй способ – выполнить перерасположение ЭРИ на ПП таким образом, чтобы перечисленные ЭРИ находились на печатной плате ближе к точке входа воздушного потока. Второй способ приведет к повторному решению задач топологического проектирования, но на самых начальных этапах проектирования такой подход не приведет к существенным материальным затратам на проектирование. В качестве примера рассмотрим 2-й подход. Перерасместив ЭРИ ($D8$ меняются местами с $D22$, а $D26$ и $D43$ размещаются в 1-ой зоне /см. [рис. 4.78](#)/), выполним повторное моделирование теплового режима ПУ А7.

Анализ результатов повторного моделирования (см. термограмму и таблицу на [рис. 4.82](#)) показал, что при таком размещении ЭРИ на ПП все ЭРИ работают в нормальном тепловом режиме (значения коэффициента тепловой нагрузки отмеченных выше элементов составляют $K_{\text{тн}}(D8) = 0,65$; $K_{\text{тн}}(D26) = 0,62$; $K_{\text{тн}}(D43) = 0,65$), обеспечивают требования к нормальному тепловому режиму работы анализируемого печатного узла.

КОПИЯ ФАЙЛА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

```
=====

ТИПК=02-1
ТИПР=01
ФПЧ =00
ТЕСТ=10
ПЛАТА
DLPX=XXXXXXDLPY=XXXXXXDLPZ=XXXXXXMMMMMMMMMMMMMMMMHOS1=XXXXXXHOS2=XXXXXXOR=X
DLPX=240. DLPY=170. DLPZ=1.5 стеклотекстолит HOS1=0. HOS2=0. OR=0
LAMP=XXXXXX ЧЕРН=XXXXXXORI =XROKU=XXXXXXUTKU=XXXXXX
LAMP=0.3 ЧЕРН=0.8 ORI =1 ROKU=1500. UTKU=420.
КЗПП=XXXXXX DPPR=XXXXXX LAMP=XXXXXX MMMMMMMMMMMMMMMMM ROP =XXXXXX УТР=XXXXXX
КЗПП=0.25 DPPR=10. LAMP=380. медь (M1,M2,M3) ROP =8940. УТР=380.
KLX =XXXXX KLY =XXXXX DX =XXXXX DY =XXXXX SETK=XXXXX
KLX =22 KLY =18 DX =10. DY =10. SETK=0.5
ШИНЫ
UOOOOOOP!11111-22222!33333-44444!DDDD!MMMMMMMMMMMMMMMMMM!XXXXX!YYYYY!ZZZZZ!RRRRR!TTTTT!VV!TTTTT!
*
КОНТУРЫ ШИН
UOOOOO11111!22222!3333334444445555556666667777778888889999990000011111222222333333444444555555
*
ВЫРЕЗЫ
UOOOOO00000000000000000000P!11111-22222!33333-44444
*
ЭЛЕМЕНТЫ
UOOOOOOP11111-22222!33333-44444!55555!66666!77777!88888!99999!1111!22222!33333!44444444444444444444
. . . . .
C1 1 14.9 19.4 6.4 16.2 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50. . . . .
C2 1 16.2 20.7 151.3 161.2 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50. . . . .
C3 1 183. 189.8 150. 154.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-2200п50v/5
C4 1 217. 223.8 153. 157.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-1000п50v/5
C5 1 116. 122.8 146.5 151.1 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-680п50v/5
C6 1 183. 190.8 136.2 142.8 0. 50. 0. 100. 0. 2. 50.
C7 1 223. 230.3 109.5 114.1 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-3600п50v/5
C8 1 96. 102.8 112. 116.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-2200п50v/5
C9 1 96. 102.8 97. 101.6 0. 19.5 0. 100. 0.8 7. 196. K10-17-1-680п50v/5
. . . . .
D7 1 60.5 93.5 87.5 118. 800. 50. 0. 100. 0. 10. 1000.
D8 1 60. 113.6 140.5 156.7 1900. 10. 0. 100. 0. 4. 1000.
D9 1 96. 108. 83.5 88.5 10. 65.5 0. 150. 0.8 4. 179. 2Д906/4
. . . . .
D17 1 94. 102.9 10.4 17. 110. 50. 0. 100. 0. 4. 80.
D18 1 125. 179.6 31.5 47.6 950. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D19 1 125. 179.6 102.5 118.7 950. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D20 1 125. 179.6 67. 83.1 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
D21 1 125. 179.6 138. 154.1 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
. . . . .
D22 1 125. 179.6 13.5 29.7 30. 40. 0. 100. 0. 4. 1000.
. . . . .
D26 2 178. 186. 133. 153. 1000. 10. 0. 105. 0.8 5. 600. K1401УД3/1
. . . . .
D43 2 35. 43. 65. 82.5 1080. 10. 0. 105. 0.8 5. 482. K1401УД2А/1
. . . . .
*
UPRXX!11111-22222!33333-44444!55555-66666!77777!88888!99999!11111!22222!33333!
1 9 0. 240. 0. 56. 0. 0. 22.4 49.9 700. 0.13 2.
1 9 0. 240. 57.5 113. 0. 0. 26.6 49.9 700. 0.13 2.
1 9 0. 240. 114. 170. 0. 0. 30.8 49.9 700. 0.13 2.
2 9 0. 240. 0. 58. 0. 0. 22.2 54.4 700. 0.13 2.
2 9 0. 240. 59. 114.5 0. 0. 26.1 54.4 700. 0.13 2.
2 9 0. 240. 115. 170. 0. 0. 30. 54.4 700. 0.13 2.
```

Рис. 4.81. Фрагмент файла-отчета

```

*
*
НАЧАЛЬНОЕВРЕМЯРАБОТЫ    0.000Е+00
КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ РАБОТЫ    1.000Е+03
ТОЧНОСТЬ ИНТЕГРИРОВАНИЯ. 1.000Е-05
МИНИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГР  1.000Е+00
МАКСИМАЛЬНЫЙ ШАГ ИНТЕГР. 1.000Е+01
НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА    1.000Е+01

```

КОНЕЦ ОПИСАНИЯ ФАЙЛА ДАННЫХ

Подсистема анализа обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры
 "АСОНИКА-Т"
 Программный комплекс ТРИАНА v.2.10.00

 Copyright ©С 2006-2014,
 А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
 В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
 Тел: 8-(913)-571-54-71,
 E-mail: [triana@triana.su](mailto: triana@triana.su),
 WWW: <http://www.triana.su>

Управляющая информация :

```

-----
Тип конструкции      : 2-1 .... печатный узел
Тип анализа          : 1 .... стационарный режим
Расчет ФПЧ           : 0 .... не производится
Тестовая информация : 10 .... работа в составе ИС

```

О П И С А Н И Е П К У

| | | | | |
|--|--|-----------|--------------|-----------|
| Размеры П К У по оси OX | | | 240.00 | мм |
| | | | 170.00 | мм |
| | | | 1.50 | мм |
| Ориентация П К У | | | 1 | горизонт. |
| Материал П К У | | | стеклотексто | |
| Кэффициент теплопроводности материала ПКУ | | | 0.30 | Вт/м/К |
| Кэффициент черноты основания ПКУ | | | 0.80 | отн.ед. |
| Материал проводников | | | медь (M1,M2, | |
| Кэффициент теплопроводности проводников | | | 380.00 | Вт/м/К |
| Кэффициент заполнения ПКУ проводниками | | | 0.25 | отн.ед. |
| Толщина проводников | | | 10.00 | мкм |
| Количество линий, дискретизирующих температурное поле КУ | | | | |
| | | по оси OX | 22 | |
| | | по оси OY | 18 | |
| Шаг генерируемой сетки dx; dy, мм | | | 10.00 | 10.00 |

Рис. 4.81. Продолжение

Таблица 1

О П И С А Н И Е Э Р И

| Обозн. ЭРЭ | Пов. уст. | Xп, мм | Xк, мм | Yп, мм | Yк, мм | P, мВт | Rтк, К/Вт | Rtv, К/Вт | Коэф. черн | H, мм | S, мм*мм | Се, Дж/К | Типоминал | Объект установки (НК или ШНА) | ТИП ЭРЭ | Rтк, К/Вт |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|------------|-------|----------|----------|-----------|-------------------------------|---------|-----------|
| C1 | 1 | 14.9 | 19.4 | 6.4 | 16.2 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| C2 | 1 | 16.2 | 20.7 | 151.3 | 161.2 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| C3 | 1 | 183.0 | 189.8 | 150.0 | 154.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-2200п50v/5 | 1 | 0.000 |
| C4 | 1 | 217.0 | 223.8 | 153.0 | 157.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-1000п50v/5 | 1 | 0.000 |
| C5 | 1 | 116.0 | 122.8 | 146.5 | 151.1 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-680п50v/5 | 1 | 0.000 |
| C6 | 1 | 183.0 | 190.8 | 136.2 | 142.8 | 0. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 2. | 50. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| C7 | 1 | 223.0 | 230.3 | 109.5 | 114.1 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-3600п50v/5 | 1 | 0.000 |
| C8 | 1 | 96.0 | 102.8 | 112.0 | 116.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-2200п50v/5 | 1 | 0.000 |
| C9 | 1 | 96.0 | 102.8 | 97.0 | 101.6 | 0. | 19.5 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 7. | 196. | 0.0 | K10-17-1-680п50v/5 | 1 | 0.000 |
| D7 | 1 | 60.5 | 93.5 | 87.5 | 118.0 | 800. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 10. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D8 | 1 | 60.0 | 113.6 | 140.5 | 156.7 | 1900. | 10.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D9 | 1 | 96.0 | 108.0 | 83.5 | 88.5 | 10. | 65.5 | 0.0 | 150.0 | 0.8 | 4. | 179. | 0.0 | 2Д906/4 | 1 | 0.000 |
| D17 | 1 | 94.0 | 102.9 | 10.4 | 17.0 | 110. | 50.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 80. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D18 | 1 | 125.0 | 179.6 | 31.5 | 47.6 | 950. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D19 | 1 | 125.0 | 179.6 | 102.5 | 118.7 | 950. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D20 | 1 | 125.0 | 179.6 | 67.0 | 83.1 | 30. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D21 | 1 | 125.0 | 179.6 | 138.0 | 154.1 | 30. | 40.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D22 | 1 | 125.0 | 179.6 | 13.5 | 29.7 | 430. | 30.0 | 0.0 | 100.0 | 0.8 | 4. | 1000. | 0.0 | Печатная плата | 1 | 0.000 |
| D26 | 2 | 178.0 | 186.0 | 133.0 | 153.0 | 1000. | 10. | 0.0 | 105.0 | 0.8 | 5. | 600. | 0.0 | K1401УД3/1 | 1 | 0.000 |
| D43 | 2 | 35.0 | 43.0 | 65.0 | 82.5 | 1080. | 10. | 0.0 | 105.0 | 0.8 | 5. | 482. | 0.0 | K1401УД2A/1 | 1 | 0.000 |

Рис. 4.81. Продолжение

ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ (ГУ)

| N | ГУ | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | Zn, мм | Zk, мм | ПАР.1 | ПАР.2 | ПАР.3 | ПАР.4 | ПАР.5 | ПАР.6 |
|---|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 0.00 | 56.00 | 0.00 | 0.00 | 22.40 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 57.50 | 113.00 | 0.00 | 0.00 | 26.60 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 1 | 9 | 0.00 | 240.00 | 114.00 | 170.00 | 0.00 | 0.00 | 30.80 | 49.90 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 0.00 | 58.00 | 0.00 | 0.00 | 22.20 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 59.00 | 114.50 | 0.00 | 0.00 | 26.10 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |
| 2 | 9 | 0.00 | 240.00 | 115.00 | 170.00 | 0.00 | 0.00 | 30.00 | 54.40 | 700.00 | 0.13 | 2.00 | |

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Начальное время работы - 0.000E+00
 Конечное время работы - 0.100E+04
 Точность расчета - 0.100E-04
 Минимальный шаг интегрирования - 0.100E+01
 Максимальный шаг интегрирования - 0.100E+02
 Начальная температура - 0.100E+02

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
 Размерность матрицы 743
 Начальное число ненулевых элементов 9405
 Число ненулевых элементов в факторизованной матрице..18917

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

У
^
|

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 18 | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 17 | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. |
| 16 | 37. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 39. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 15 | 36. | 37. | 37. | 37. | 38. | 38. | 38. | 39. | 40. | 40. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 14 | 36. | 36. | 36. | 37. | 38. | 39. | 39. | 39. | 40. | 40. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 38. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. | 37. |
| 13 | 35. | 35. | 35. | 36. | 37. | 39. | 42. | 41. | 39. | 38. | 37. | 39. | 41. | 42. | 42. | 41. | 38. | 36. | 36. | 35. | 35. | 35. | 36. |
| 12 | 35. | 35. | 35. | 36. | 36. | 40. | 44. | 42. | 39. | 37. | 36. | 39. | 43. | 43. | 43. | 43. | 39. | 36. | 37. | 35. | 34. | 35. | 35. |
| 11 | 35. | 35. | 36. | 36. | 37. | 41. | 45. | 43. | 39. | 37. | 35. | 37. | 39. | 40. | 40. | 40. | 37. | 36. | 37. | 35. | 34. | 35. | 35. |
| 10 | 35. | 35. | 36. | 36. | 36. | 39. | 41. | 40. | 38. | 37. | 35. | 36. | 36. | 37. | 38. | 38. | 36. | 35. | 36. | 35. | 35. | 35. | 35. |
| 9 | 35. | 34. | 35. | 35. | 35. | 36. | 36. | 36. | 38. | 38. | 35. | 35. | 36. | 36. | 38. | 38. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. | 35. |
| 8 | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 34. | 38. | 38. | 35. | 35. | 35. | 35. | 36. | 38. | 37. | 35. | 34. | 34. | 35. | 36. | 36. |
| 7 | 34. | 33. | 32. | 33. | 33. | 33. | 33. | 33. | 37. | 37. | 34. | 34. | 34. | 34. | 35. | 36. | 36. | 34. | 33. | 33. | 34. | 36. | 36. |
| 6 | 33. | 31. | 32. | 32. | 32. | 32. | 32. | 32. | 36. | 36. | 34. | 35. | 36. | 37. | 38. | 37. | 34. | 33. | 34. | 34. | 36. | 36. | 36. |
| 5 | 33. | 33. | 35. | 40. | 40. | 36. | 33. | 33. | 35. | 36. | 35. | 40. | 43. | 43. | 43. | 42. | 38. | 34. | 39. | 37. | 36. | 36. | 36. |
| 4 | 34. | 37. | 42. | 56. | 56. | 45. | 34. | 34. | 40. | 40. | 38. | 44. | 48. | 48. | 48. | 47. | 40. | 36. | 40. | 43. | 41. | 38. | 38. |
| 3 | 34. | 38. | 43. | 57. | 56. | 45. | 34. | 34. | 40. | 40. | 38. | 49. | 55. | 56. | 56. | 55. | 45. | 37. | 42. | 54. | 51. | 44. | 44. |
| 2 | 32. | 34. | 36. | 39. | 38. | 35. | 33. | 34. | 40. | 40. | 38. | 47. | 50. | 52. | 53. | 52. | 43. | 36. | 41. | 53. | 51. | 43. | 43. |
| 1 | 32. | 33. | 34. | 34. | 34. | 33. | 32. | 32. | 34. | 35. | 36. | 38. | 38. | 36. | 36. | 36. | 34. | 33. | 33. | 35. | 36. | 35. | 35. |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |

Рис. 4.81. Продолжение

* КАРТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРИ *

Таблица 2

| N п/п | Обоз-е ЭРЭ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-N перехода) ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРЭ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРЭ макс. допуст-я, Гр.Ц | Коэф-т тепловой нагрузки | Перегрев ЭРЭ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1 | C1 | 1 | 33.43 | 33.43 | 33.50 | 100.00 | 0.33 | |
| 2 | C2 | 1 | 37.07 | 37.07 | 37.04 | 100.00 | 0.37 | |
| 3 | C3 | 1 | 37.14 | 37.14 | 37.14 | 100.00 | 0.37 | |
| 4 | C4 | 1 | 37.40 | 37.40 | 37.43 | 100.00 | 0.37 | |
| 5 | C5 | 1 | 38.18 | 38.18 | 38.31 | 100.00 | 0.38 | |
| 6 | C6 | 1 | 37.00 | 37.00 | 37.02 | 100.00 | 0.37 | |
| 7 | C7 | 1 | 34.42 | 34.42 | 34.56 | 100.00 | 0.34 | |
| 8 | C8 | 1 | 37.27 | 37.27 | 37.72 | 100.00 | 0.37 | |
| 9 | C9 | 1 | 37.36 | 37.36 | 37.78 | 100.00 | 0.37 | |
| 39 | D7 | 1 | 58.43 | 58.43 | 42.24 | 100.00 | 0.58 | |
| 40 | D8 | 1 | 64.94 | 64.94 | 54.05 | 100.00 | 0.65 | |
| 41 | D9 | 1 | 36.51 | 36.51 | 36.59 | 150.00 | 0.24 | |
| 49 | D17 | 1 | 45.53 | 45.53 | 41.42 | 100.00 | 0.46 | |
| 50 | D18 | 1 | 58.79 | 58.79 | 43.52 | 100.00 | 0.59 | |
| 51 | D19 | 1 | 57.28 | 57.28 | 42.39 | 100.00 | 0.57 | |
| 52 | D20 | 1 | 36.60 | 36.60 | 36.43 | 100.00 | 0.37 | |
| 53 | D21 | 1 | 38.31 | 38.31 | 37.68 | 100.00 | 0.38 | |
| 54 | D22 | 1 | 38.37 | 38.37 | 37.77 | 100.00 | 0.38 | |
| 297 | D26 | 2 | 65.28 | 65.28 | 55.86 | 105.00 | 0.62 | |
| 314 | D43 | 2 | 68.02 | 68.02 | 57.00 | 105.00 | 0.65 | |

Таблица 3

| ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНОГО УЗЛА | |
|---|-----------------|
| Интегральная температура КУ | 40.012 Град.ц. |
| Максим-ная допустимая интегральная темп-ра КУ | 74.50 Град.ц. |
| Количество ЭРЭ | 323 шт. |
| Суммарная мощность, выделяемая ЭРЭ | 11.500 Вт |
| Количество перегревших ЭРЭ | 0 шт. |
| Площади поверхностей К У | |
| 1-я поверхность | 74039.00 мм*мм |
| 2-я поверхность | 54881.00 мм*мм |
| суммарная | 128920.00 мм*мм |
| Площади поверхностей ЭРЭ | |
| на 1-й поверхности | 33239.00 мм*мм |
| на 2-й поверхности | 14081.00 мм*мм |
| суммарная | 47320.00 мм*мм |
| Эффективная толщина К У | 3.035 мм |
| Эффективная толщина ЭРЭ КУ | |
| на 1-й поверхности | 1.109 мм |
| на 2-й поверхности | 0.426 мм |

Рис. 4.81. Окончание

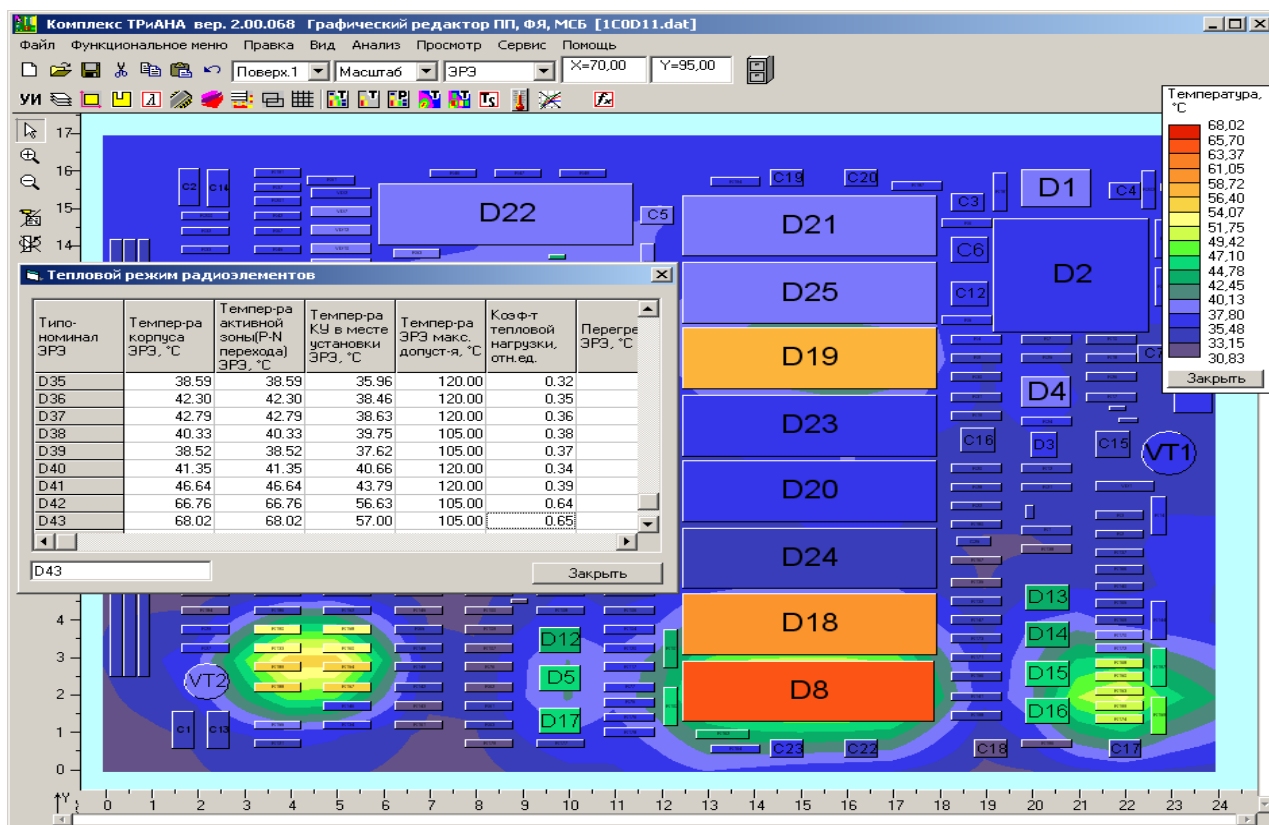


Рис. 4.82. Результаты повторного моделирования теплового режима ПУ А7 после перераспределения ЭРИ

Следует отметить, что полученные интегральные характеристики (см. [рис. 4.79, б](#)) отличаются от принятых в первом приближении данных при анализе блока в целом. В этой связи, используя полученные интегральные характеристики ПУ А7, можно выполнить повторный анализ теплового режима блока с целью уточнения граничных условий. Однако в рассматриваемом случае увеличение площади теплоотдающей поверхности ЭРИ для ПУ А7 приведет к некоторому улучшению тепловых характеристик блока. Ориентируясь на наихудший случай, связанный, в том числе, и с погрешностью моделирования, в данном случае можно пренебречь такой процедурой.

По аналогии с вышеописанным подходом были выполнены процедуры моделирования тепловых режимов всех печатных узлов, в результате которых были получены тепловые режимы работы всего множества ЭРИ.

4.5.7. Расчет надежности УПТС в целом

После расчета надежности составных частей в соответствии с алгоритмом проектирования РЭА (блок № 17) выполнялся расчет надежности УПТС в целом. Необходимые для расчетов характеристики надежности СЧ были автоматически введены из проектной части базы данных подсистемы АСНИКА-К.

На [рис. 4.83](#) приведено окно подсистемы, содержащее СРН и результаты расчета надежности УПТС с учетом восстановления.

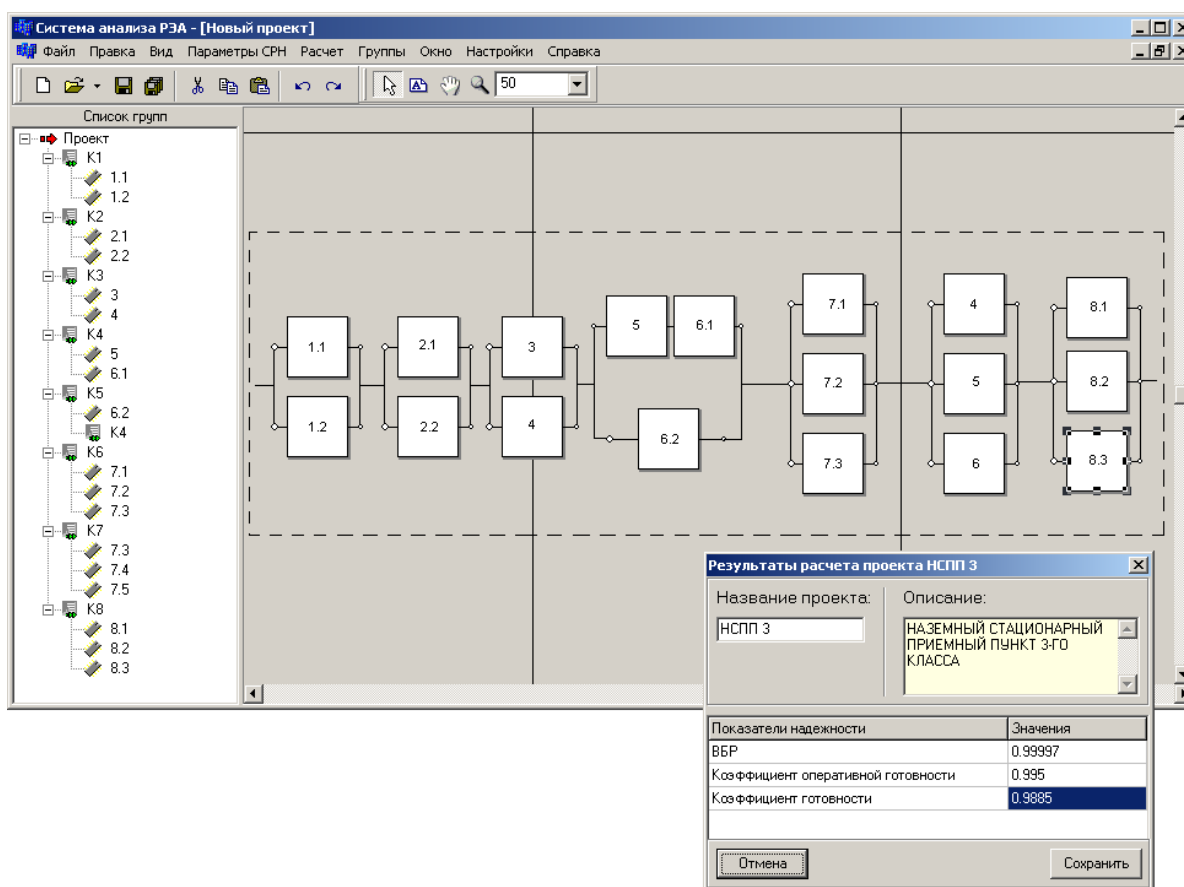


Рис. 4.83. Результаты расчета УПТС с учетом восстановления

Как видно из [рис. 4.83](#), полученная вероятность безотказной работы составила 0,99997, коэффициент оперативной готовности – 0,9995, что удовлетворяет требованиям ТЗ. Одновременно был рассчитан коэффициент готовности (см. [рис. 4.83](#)), значение которого составило 0,9985. Кроме того, были получены характеристики надежности УПТС без восстановления (см. [рис. 4.84](#)).

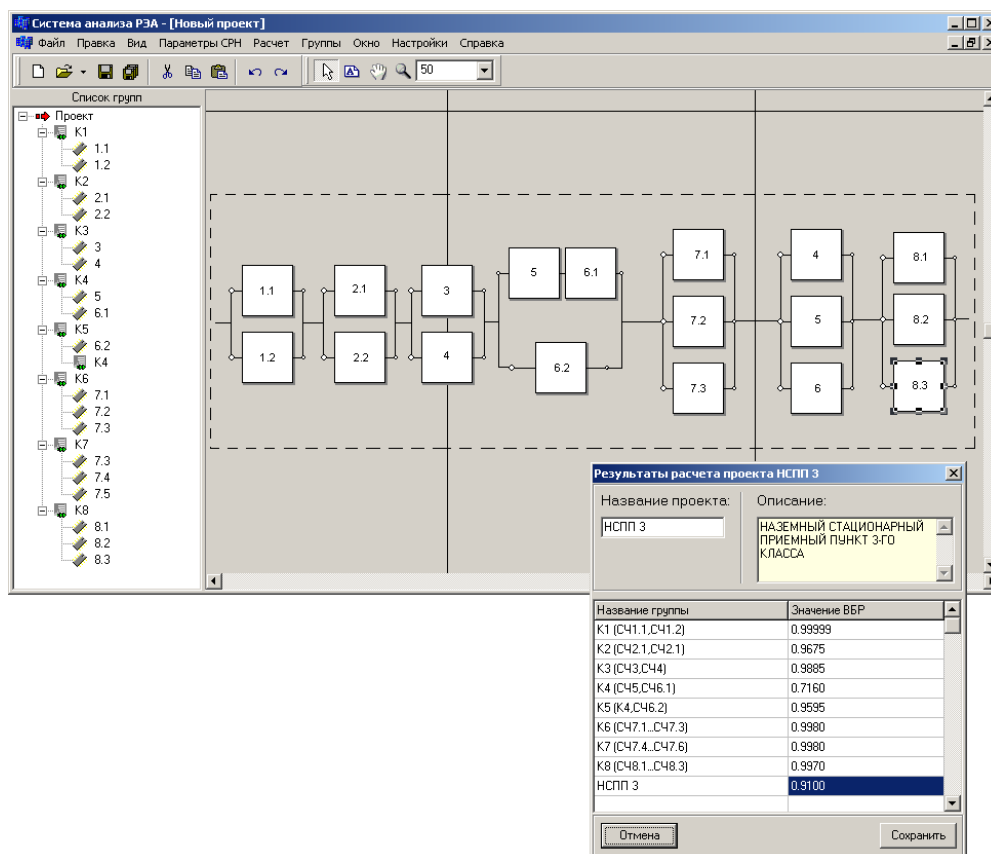


Рис. 4.84. Результаты расчета УПТС без восстановления

Результаты расчета ВБР УПТС и групп СРН приведены в [табл. 4.25](#).

Таблица 4.25

Результаты расчета вероятности безотказной работы

| Группы СРН | Параметры модели резервирования | ВБР |
|--------------------|---------------------------------|---------|
| K1 (C41.1, C41.2) | $d = 1, r = 1$ | 0,99999 |
| K2 (C42.1, C42.1) | $d = 1; r = 1$ | 0,9675 |
| K3 (C43, C44) | $d = 1; r = 1$ | 0,9885 |
| K4 (C45, C46.1) | $d = 2; r = 0$ | 0,7160 |
| K5 (K4, C46.2) | $d = 1; r = 1$ | 0,9595 |
| K6 (C47.1...C47.3) | $d = 1; r = 2$ | 0,9980 |
| K7 (C47.4...C47.6) | $d = 1; r = 2$ | 0,9980 |
| K8 (C48.1...C48.3) | $d = 1; r = 2$ | 0,9970 |
| НСПП 3 | $d = 1; r = 0$ | 0,9100 |

Примечание: d – число основных СЧ; r – число резервных СЧ.

На [рис. 4.85–4.87](#) приведены зависимости характеристик надежности УПТС от времени.

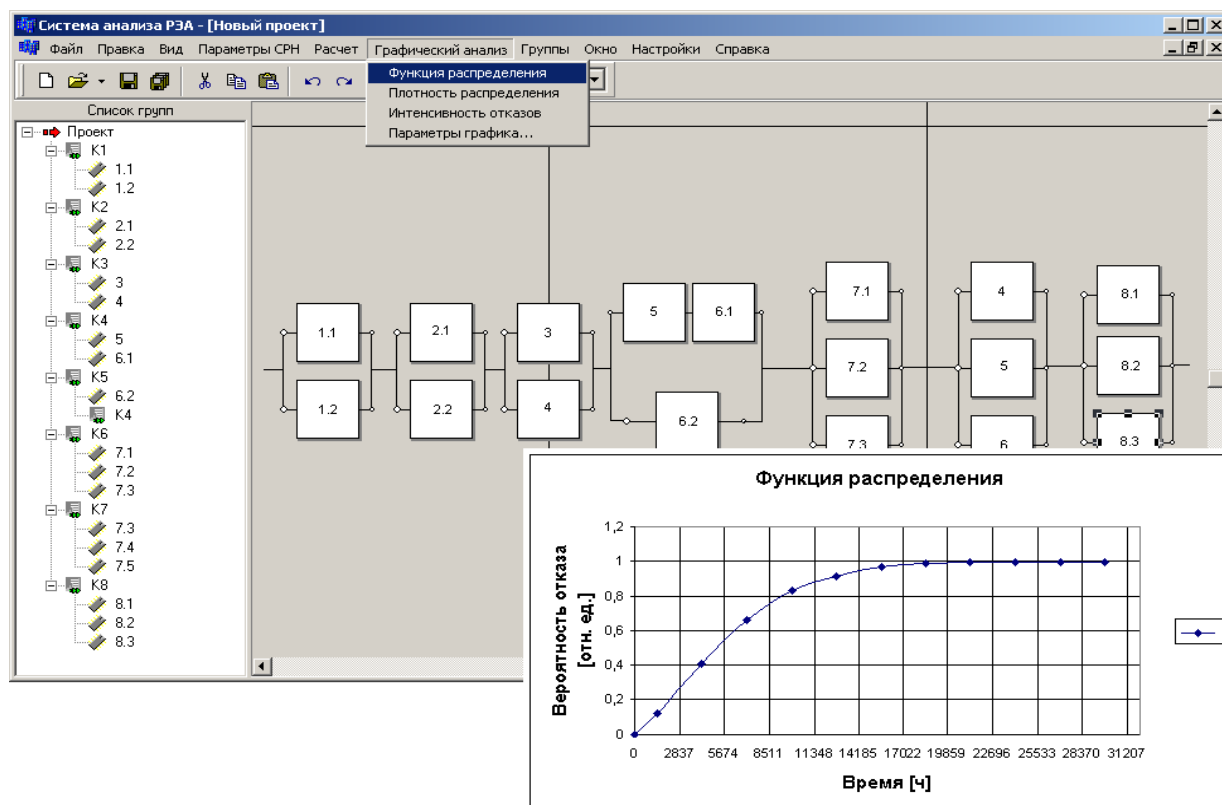


Рис. 4.85. Функция распределения времени наработки УПТС на отказ

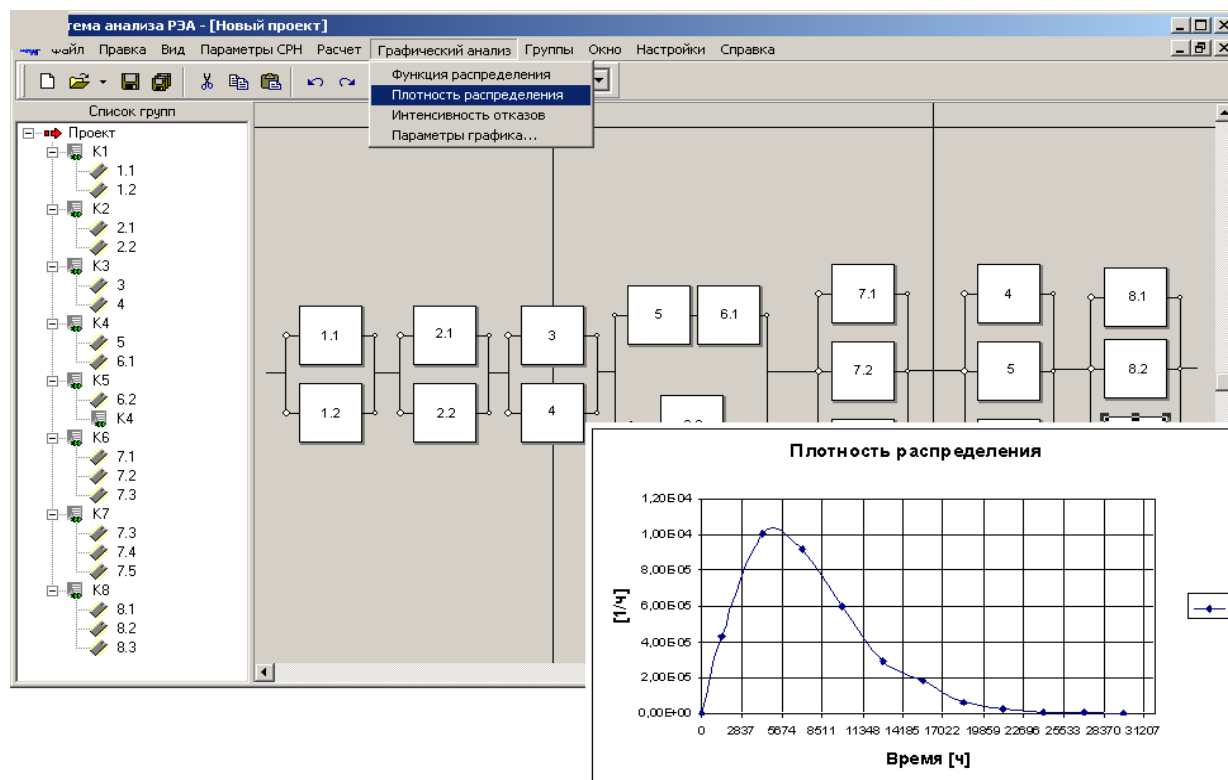


Рис. 4.86. Плотность вероятности времени наработки на отказ УПТС

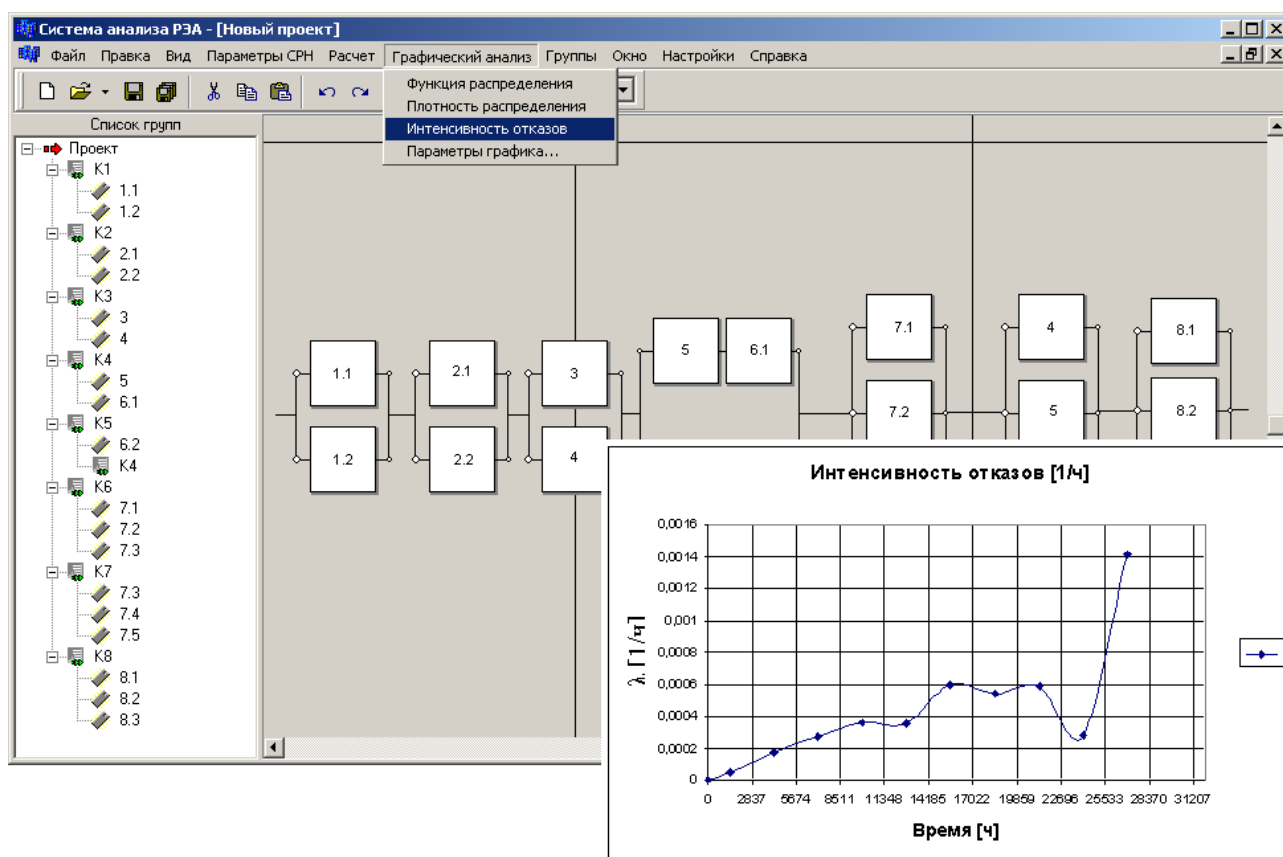


Рис. 4.87. Функция интенсивности отказов УПТС

4.5.8. Заключение

Проведенные исследования надежности УПТС позволили обеспечить требуемый уровень показателей надежности, заданный в ТЗ ($P = 0,999$; $K_{ор}=0,9995$).

Анализ данных, приведенных в [табл. 4.25](#), показывает, что отказы УПТС обусловлены, в основном, отказами групп К5 ($P = 0,9595$), К2 ($P = 0,9675$) и К4 ($P = 0,7160$). При этом наиболее ненадежными СЧ являются:

- в группе К5 – СЧ6 (модуль 1K0D1-1K0D2) и группа К4;
- в группе К4 – СЧ5 (модуль ПП-K10D);
- в группе К2 – СЧ2 (модуль 1T002).

Среди них самой ненадежной является СЧ5 (см. [табл. 4.25](#)). Оценка влияния характеристик надежности конкретных ЭРИ на эксплуатационную интенсивность отказов СЧ5 (модулятора) проводилась непосредственно в ходе проведения расчета. На [рис. 4.88](#) показан вклад классов ЭРИ в суммарную интенсивность отказов СЧ5.

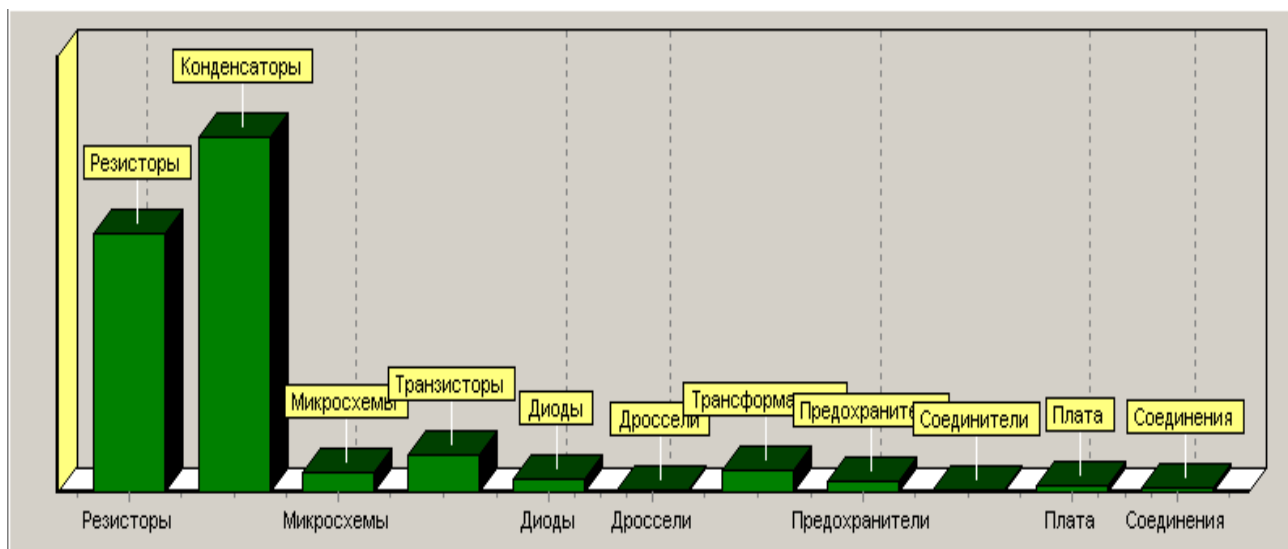


Рис. 4.88. Вклады классов ЭРИ С45

Как следует из [рис. 4.88](#), наиболее ненадежными компонентами 2-го уровня в С45 являются компоненты: «Конденсаторы» и «Резисторы». На [рис. 4.89](#) показаны вклады конденсаторов С45 в суммарную интенсивность отказов компонента 2-го уровня «Конденсаторы».

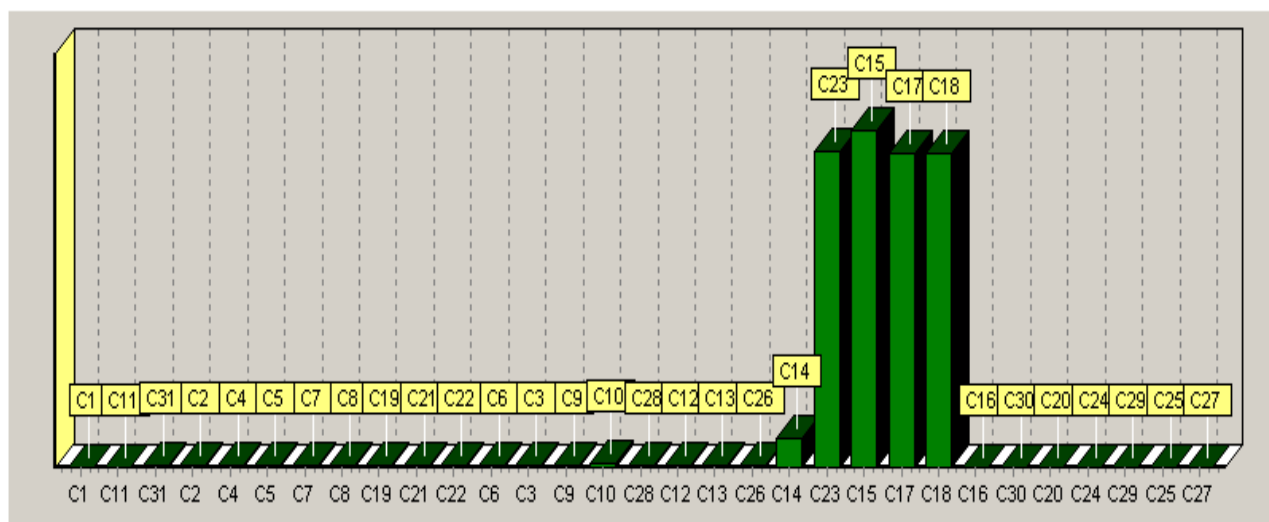


Рис. 4.89. Вклады конденсаторов С45

Как следует из [рис. 4.89](#), интенсивности отказов различных типов конденсаторов отличаются более чем на порядок, что является неоптимальным с точки зрения надежности (*известно, что нужно стремиться к равнонадежным элементам*). Наиболее ненадежными конденсаторами С45 является конденсаторы C23, C15, C17, C18 (тип K50-27). Однако и интенсивности отказов конденсаторов этого типа также существенно отличаются, что определяется численными значениями коэффициентов математической модели эксплуатационной ин-

тенсивности отказов. На [рис. 4.90](#) показаны значения этих коэффициентов для конденсатора C15.

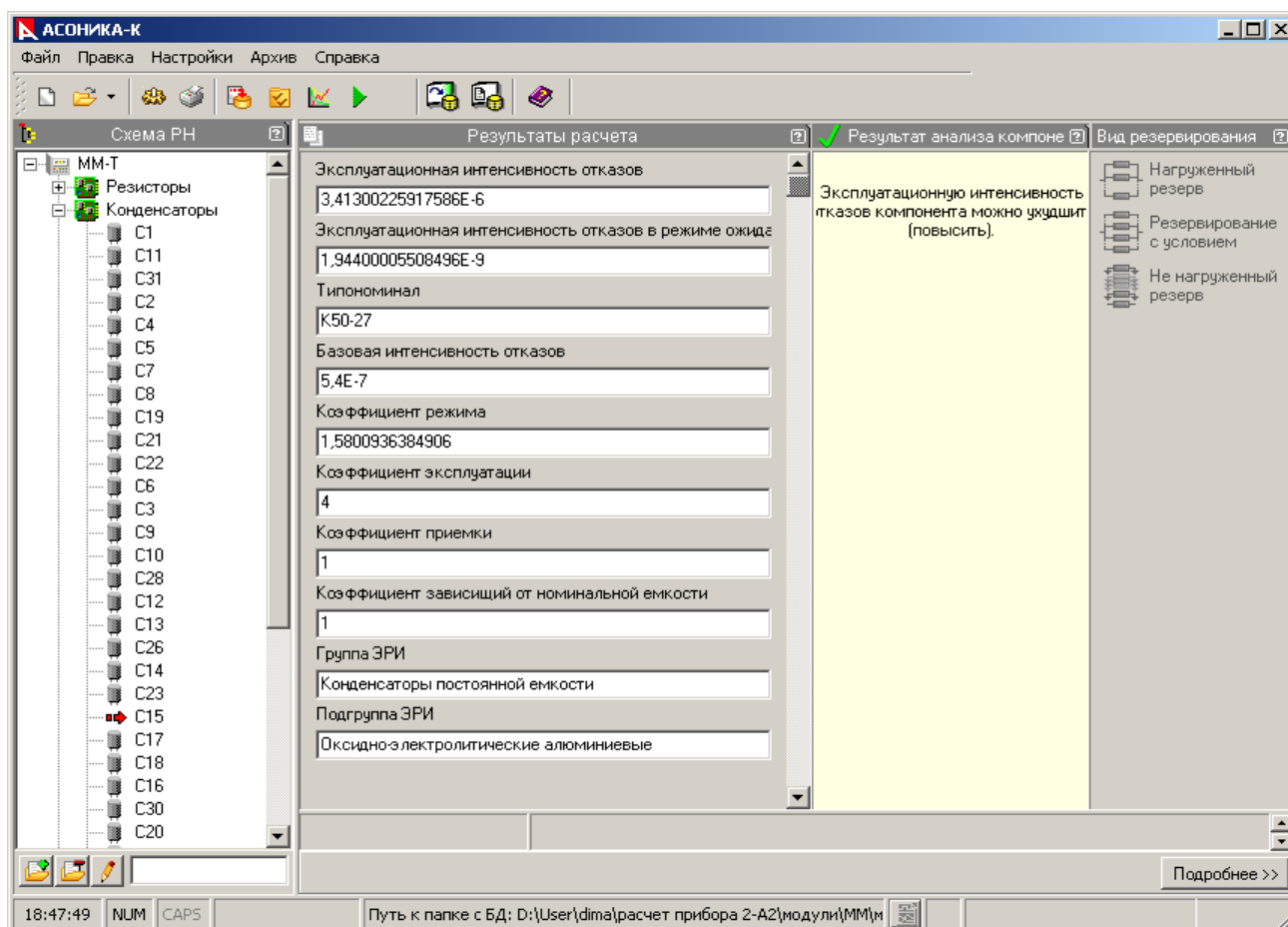




Рис. 4.90. Значения коэффициентов математической модели эксплуатационной интенсивности отказов конденсатора C15 СЧ5

Таким образом, проведенный анализ надежности СЧ5 (модуль ПП – K10D), а также остальных СЧ и УПТС в целом, позволил предложить следующие мероприятия, направленные на дальнейшее повышение надежности УПТС:

- изменение типов ЭРИ (применение ЭРИ с меньшим значением λ);
- облегчение режима работы ЭРИ (снижение коэффициентов электрической нагрузки и/или рабочих температур);
- снижение общего числа ЭРИ (применение заказных БИС или СБИС, резистивных и конденсаторных сборок и т. д.);
- снижение температуры среды, окружающей СЧ и УПТС (повышение эффективности системы охлаждения).

| | | | | |
|---|---|--|--|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ | 393 |
|---|---|--|--|------------|

4.6. Исследование тепловых характеристик блока электронного регулирования, входящего в систему электропитания космического аппарата

В данном параграфе представлены в виде отчета (оформлен в соответствии с *ГОСТ 2.106 Требования к пояснительной записке*) результаты исследований ТХ блока электронного регулирования СЭП КА, выполненные с применением ПК *ТРИАНА*. Исследования проводились в соответствии с методическим обеспечением, рассмотренном в главе 1 и параграфе 2.6.

УТВЕРЖДАЮ
Главный конструктор

_____ Ф. И. О.
(подпись)

М.П.

«___» _____ 20__ г.

БЛОК ЭЛЕКТРОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
Технический отчет
Анализ тепловых характеристик конструкции
АБВГ.ХХХ–0 Р17 ЭТ

СОГЛАСОВАНО
Руководитель
структурного подразделения

_____ Ф. И. О.

«___» _____ 20__ г.


Инженер-конструктор
_____ Ф. И. О.

«___» _____ 20__ г.

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | Подпись и дата |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| АННОТАЦИЯ | 3 |
| ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 5 |
| 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ | 6 |
| 1.1 Объект исследования | 6 |
| 1.2 Эксплуатационно-технические характеристики объекта исследования | 12 |
| 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ | 15 |
| 3 ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК | 16 |
| 3.1 Модели | 16 |
| 3.1.1 Разработка МТП БЭР в целом | 17 |
| 3.1.2 Модель блока АБВГ.ХХХ-14mm | 31 |
| 3.2 Методика анализа ТХ БЭР | 32 |
| 3.3 Исходные данные | 35 |
| 3.3.1 Исходные данные для анализа ТХ БЭР в целом | 35 |
| 3.3.2 Исходные данные для анализа ТХ блока АБВГ.ХХХ-14mm | 36 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА | 38 |
| 5 ВЫВОДЫ | 49 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Результаты анализа тепловых характеристик БЭР | 50 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты анализа тепловых характеристик блока АБВГ.ХХХ-14mm | 66 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Интегрированная табличная форма расчетных характеристик ЭРИ | 80 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|---|--------------------------------------|--|--|------|------|--------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Инв. № дудл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ ХХХ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | | | | | |
| | Разраб. | Иванов И.И. | | | | Анализ тепловых характеристик БЭР | | | Лит. | Лист | Листов |
| | Провер. | Петров П.П. | | | | | | | | 2 | 83 |
| | Реценз. | | | |  | | | | | | |
| | Н. Контр. | | | | | | | | | | |
| | Утверд. | Петров И.П. | | | | | | | | | |

Приведены результаты анализа тепловых режимов блока подгрузки СН БС АБВГ.ХХХ-14*тт*, а также прибора АБВГ.ХХХ-0 «Блок электронного регулирования», в состав которого входит блок АБВГ.ХХХ-14*тт*. Анализ проводился средствами программного комплекса ТРИАНА–2.10. Результаты анализа приведены в виде таблиц температур входящих в состав БЭР блоков, а также в виде изотерм и термограмм конструкции блока СН БС и температур входящих в его состав ЭРИ, представленных в графическом виде. Температуры ЭРИ сведены также в интегрированную табличную форму расчетных характеристик ЭРИ (приложение В).

Анализ тепловых характеристик блока АБВГ.XXX-14*mm* проводился для стационарного и нестационарного тепловых режимов, которые соответствуют режимам работы блока: стабилизатор CH100 в исправном состоянии (далее – «Режим ожидания») и стабилизатор CH100 не исправен (далее – «Режим выжигания печатного проводника»).

В процессе анализа использовались следующие документы:

- АБВГ.ХХХ-0 ТЗ ТЭ – «Техническое задание на составную часть ОКР «БЭР для модуля служебных систем»;
- АБВГ.ХХХ-0 ИД ТЭ– «БЭР. Исходные данные на разработку конструкции блока»;
- АБВГ.ХХХ-14mm P08 ТЭ – Технический отчет «Анализ электрических характеристик блока АБВГ.ХХХ-14mm»;
- «Программный комплекс ТРиАНА. Моделирование стационарных и нестационарных тепловых режимов бортовой РЭА. ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ»;
- АБВГ.ХХХ-14mm.SldAsm – файл 3D-сборки, созданный средствами SolidWorks 2009 и содержащий 3D-модель блока АБВГ.ХХХ-14mm;
- АБВГ.ХХХ-0.SldAsm – файл 3D-сборки, созданный средствами SolidWorks 2009 и содержащий 3D-модель прибора БЭР АБВГ.ХХХ-0;
- АБВГ.ХХХ-14mm.PrjPcb – файл, созданный в системе Altium Designer 9, содержащий результаты трассировки ПП блока АБВГ.ХХХ-14mm;
- интегрированная табличная форма рабочих характеристик ЭРИ, заполненная на этапе анализа электрических характеристик блока АБВГ.ХХХ-14mm.

Файлы (и их пути) с подготовленными данными для анализа ТХ средствами ПК ТРiАНА–2.10 размещены на ПЭВМ АРМ2:

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_1.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «1. СН27 + СН БС»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_2.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «2. СН27 + СН БС + ЗУ1»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_3.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «3. СН27 + СН БС + ЗУ2»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_4.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «4. СН27 + СН БС + ЗУ1 + ЗУ2»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_5.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «5. CH27 + PY1 + PY2»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_6.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «6. CH27 + PY1 + PY2 + 3Y1»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-0_7.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «7. CH27 + PY1 + PY2 + ZY2»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX_0_8.mcr – файл для моделирования ТР БЭР в целом (режим «8. CH27 + PY1 + PY2 + ZY1 + ZY2»);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-14mm_1.dat – файл для моделирования ТР блока подгрузки СН БС (режим ожидания);

C:\BER\ThermalModel\АБВГ.XXX-14mm_2.dat – файл для моделирования ТР блока подгрузки СН БС (режим выжигания печатного проводника).

| | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|-------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подпись и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 4 |

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

| | | |
|-------|---|--|
| АБ | - | аккумуляторная батарея |
| АРМ | - | автоматизированное рабочее место |
| БА | - | бортовая аппаратура |
| БИБК | - | бортовой информационно-вычислительный комплекс |
| БК | - | бортовой компьютер |
| БКС | - | бортовая кабельная сеть |
| БКУ | - | бортовой комплекс управления |
| БС | - | батарея солнечная |
| БУ | - | блок управления |
| БЭР | - | блок электронного регулирования |
| ГТП | - | геометрические и теплофизические параметры |
| ЗРУ | - | зарядно-разрядное устройство |
| ЗУ | - | зарядное устройство |
| ИБС | - | имитатор батареи солнечной |
| ИД | - | исходные данные |
| КА | - | космический аппарат |
| Ктн | - | коэффициент тепловой нагрузки |
| МТП | - | модель тепловых процессов |
| РЭА | - | радиоэлектронная аппаратура |
| СН100 | - | стабилизатор напряжения 100 В |
| СНБС | - | стабилизатор напряжения батареи солнечной |
| ТЗ | - | техническое задание |
| ТР | - | тепловой режим |
| ТХ | - | тепловые характеристики |
| ЭРИ | - | электрорадиоизделия |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|------|------|----------|---------|------|-----------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Инв. № подл. | Подпись и дата | | | | | | Лист 5 |
| | | | | | | | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Объект исследования

Прибор АБВГ.ХХХ-0 (БЭР) предназначен для работы в составе системы электропитания модуля служебных систем космических аппаратов и должен обеспечивать заданное качество электрической энергии на выходе для энергопитания бортовой аппаратуры, обеспечивать совместную работу БС, АБ1 и АБ2 в составе системы электропитания спутника, управлять режимами заряда/разряда АБ, формировать сигналы на отключение потребителей при снижении напряжения энергопитания за границы допустимого диапазона.

БЭР выполнен в виде кассетной конструкции, в которой каждая кассета (блок) выполняет роль законченного функционального узла или его части. В соответствии с ТЗ (АБВГ.ХХХ-0 ТЗ ТЭ) в таблице 1.1 представлены перечни функциональных узлов БЭР. Также, в соответствии с исходными данными на разработку конструкции БЭР (АБВГ.ХХХ-0 ИД ТЭ), в таблице 1.2 представлен перечень кассет (блоков), входящих в БЭР, и значения мощностей их тепловыделений.

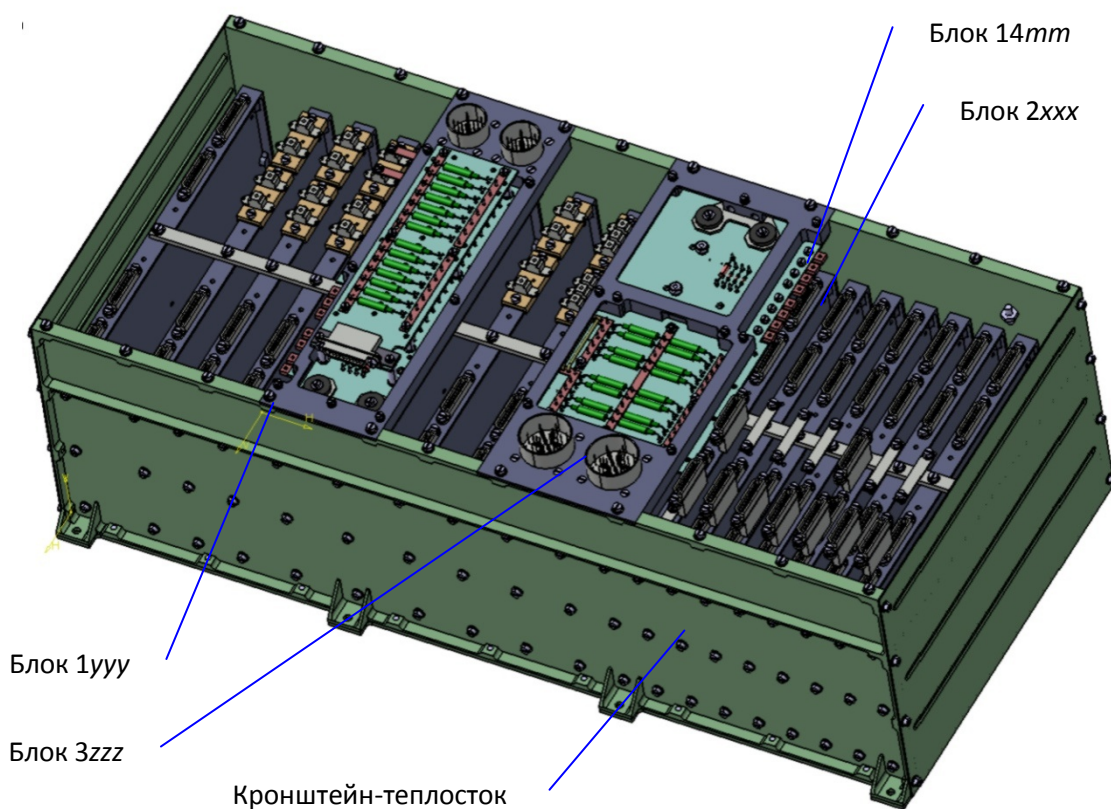


Рисунок 1.1 – Общий вид БЭР

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док.м. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

6

Таблица 1.1– Функциональные узлы, входящие в состав БЭР

| № п/п | Функциональный узел |
|-------|--|
| 1 | Стабилизатор напряжения ШС по шинам «+100 В», «–100 В» |
| 2 | Стабилизатор напряжения СН по шинам «+27 В», «–27 В» |
| 3 | Зарядно-разрядные устройства |
| 4 | Блоки приема обменных сигналов и команд управления |
| 5 | Блоки формирования и выдачи обменных сигналов и телеметрических параметров |
| 6 | Блоки автоматики ЗРУ |
| 7 | Блоки интерфейсных шин и соединителей |

Таблица 1.2 – Перечень кассет (блоков), входящих в состав БЭР и их рассеиваемые мощности

| Обозначение кассеты (блока) | Название кассеты (блока) | Рассеиваемая мощность кассеты (блока), Вт |
|-----------------------------|---|---|
| АБВГ.ХХХ–1100 | Стабилизатор напряжения солнечной батареи (СН БС) | 23,4 |
| АБВГ.ХХХ–1200 | Блок управления напряжением солнечной батареи (НБС) | 3 |
| АБВГ.ХХХ–1300 | Разрядное устройство (РУ) | 2 |
| АБВГ.ХХХ–14mm | Блок подгрузки СН БС (УП СН БС) | 0 (1500, кратковременно) |
| АБВГ.ХХХ–1500 | Зарядное устройство (ЗУ) | 36 |
| АБВГ.ХХХ–1600 | Автоматика зарядного устройства и(АЗУ1) | 4 |
| АБВГ.ХХХ–1700 | Автоматика зарядного устройства (АЗУ2) и узел распределения ... | 4 |
| АБВГ.ХХХ–1800 | Интегратор шины 100В (И100) и устройство формирования сигнала ... | 4 |
| АБВГ.ХХХ–1ууу | Фильтр шины 100 В | 0,8 |
| АБВГ.ХХХ–2100 | Стабилизатор напряжения СН27+ | 77,2 |
| АБВГ.ХХХ–2200 | Блок подгрузки СН27 (УП СН27) | 0 (540, кратковременно) |
| АБВГ.ХХХ–2300 | Интегратор шины 27В (И27) и канал | 4 |
| АБВГ.ХХХ–2400 | Блок электронных коммутаторов | 4 |
| АБВГ.ХХХ–2500 | Блок аналоговой телеметрии | 4 |
| АБВГ.ХХХ–2600 | Блок приема команд управления | 4 |
| АБВГ.ХХХ–2700 | Узел силовой коммутации | 4 |
| АБВГ.ХХХ–2xxx | Блок пуска БЭР (БП БЭР) | 4 |
| АБВГ.ХХХ–3zzz | Фильтр шины 27В (Ф27) | 3,2 |

Кассеты (блоки) длинной стороной установлены на основании прибора (рисунок 1.1). Для снижения теплового контактного сопротивления между основанием и блоками используется теплопроводящая паста. Кассеты (блоки) имеют габаритные размеры 140×270 мм. Блоки по коротким сторонам (140 мм) крепятся к кронштейнам-теплостокам. С верхней стороны на кронштейны устанавливаются крышки и панели с соединителями для подключения бортовой кабельной сети. В пространстве между верхней частью блоков и панелями с соединителями расположены жгуты и силовые шины прибора БЭР. С боко-

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

7

вых сторон БЭР закрывается крышками. Все блоки, за исключением 2-х, выполнены по аналогии с блоком АБВГ.ХХХ-14mm (см. рисунок 1.5). Два блока БЭР (АБВГ.ХХХ-1ууу и АБВГ.ХХХ-3zzz) выполнены в виде отдельных рамок с навесным монтажом ЭРИ и расположены в верхней части прибора под боевыми (внешними) панелями и крышками (рисунок 1.2). С внутренней стороны БЭР все детали (кронштейны, крышки, панели) имеют токопроводящее покрытие, что обеспечивает непрерывное экранирование.

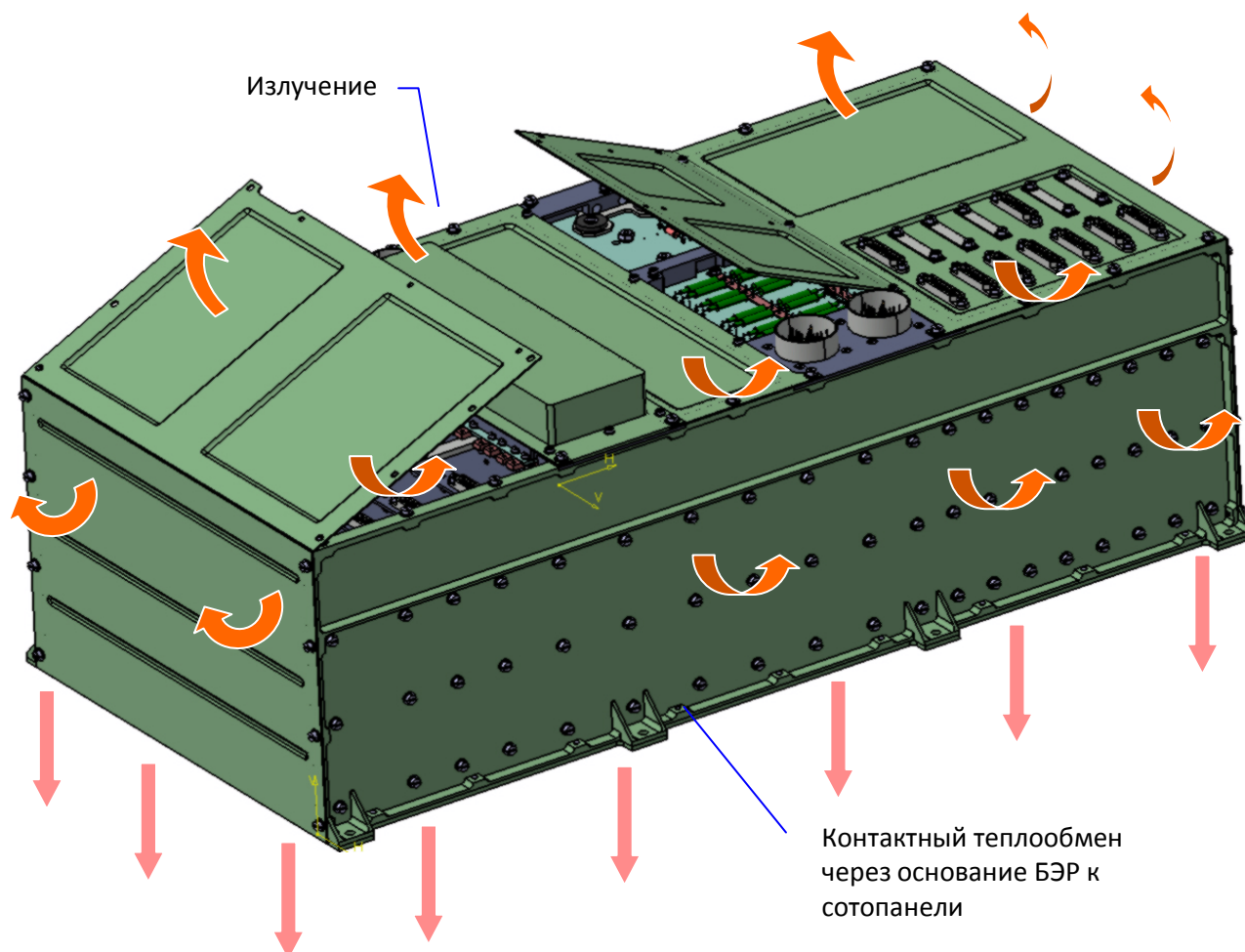


Рисунок 1.2 – Конструкция прибора БЭР со схемой, отражающей отвод тепловой энергии

БЭР устанавливается на термостатируемую (системой тепловых труб и нагревателей) сотовую панель через теплопроводящую пасту 131–179 (рисунок 1.3) и крепится винтами.

Рассеиваемая мощность прибора в самом тепловыделяющем режиме работы (в режиме № 4 «заряд АБ на орбите») не превышает 180 Вт (см. таблицу 1.4). Тепловыделение отдельных кассет (блоков) в данном режиме представлено в таблице 1.2.

Блок СН БС (блок АБВГ.ХХХ-14mm) входит в состав БЭР и предназначен для контроля отказа силовых транзисторов стабилизатора напряжения 100 В (блок АБВГ.ХХХ-1100) на замыкание.

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|--------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

8

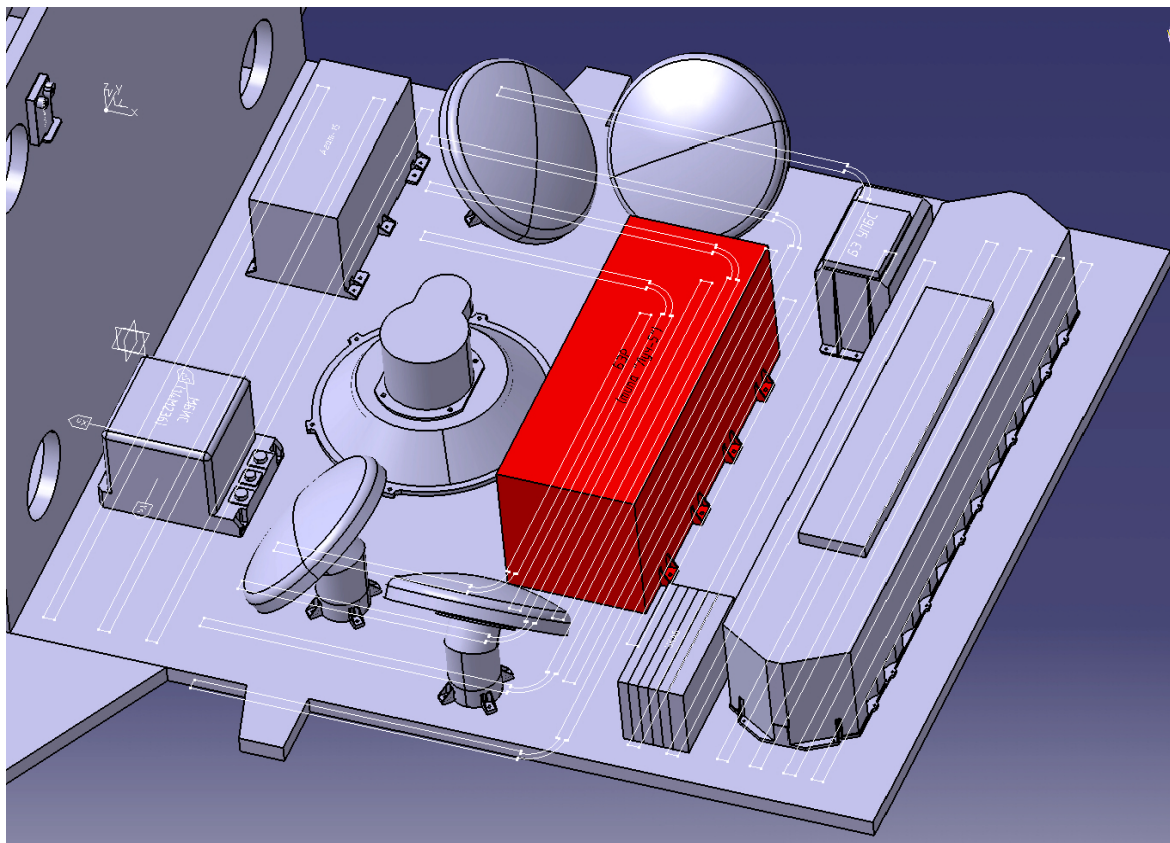


Рисунок 1.3 – Установка БЭР на объекте

Конструктивно блок АБВГ.ХХХ-14мм выполнен в виде металлической рамки с установленными на ее поверхностях печатными платами. Общий вид блока АБВГ.ХХХ-14мм в виде 3D-модели приведен на рисунке 1.4. На рисунке 1.5 приведена 3D-модель печатной платы, входящей в состав блока. В таблице 1.3 и на рисунке 1.6 приведены варианты установки ЭРИ на ПП блока СН БС.

Таблица 1.3 –Варианты установки ЭРИ на ПП блока АБВГ.ХХХ-14мм

| Тип ЭРИ | Вариант установки |
|---|-------------------------------------|
| Розетка ОС СНП339-42РП11-16 | Устанавливать по сборочному чертежу |
| Диод 2Д510А | ОСТ92-9389-98, вариант 3 |
| Конденсатор К10-17 в-Н20-0,1 мкФ | ОСТ92-9389-98, вариант 14 |
| Вставка плавкая ОС ВП 1 - 2 - 5,0 А - 250 В | ОСТ92-9389-98, вариант 406, |
| Резисторы Р1-16П -0,125 Вт | ОСТ92-9389-98, вариант 14 |
| Диод 2Д237Б1/ПМ | ОСТ92-9389-98, вариант 11 |
| Транзистор 2П794А92 | Рисунок 1.4 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

9

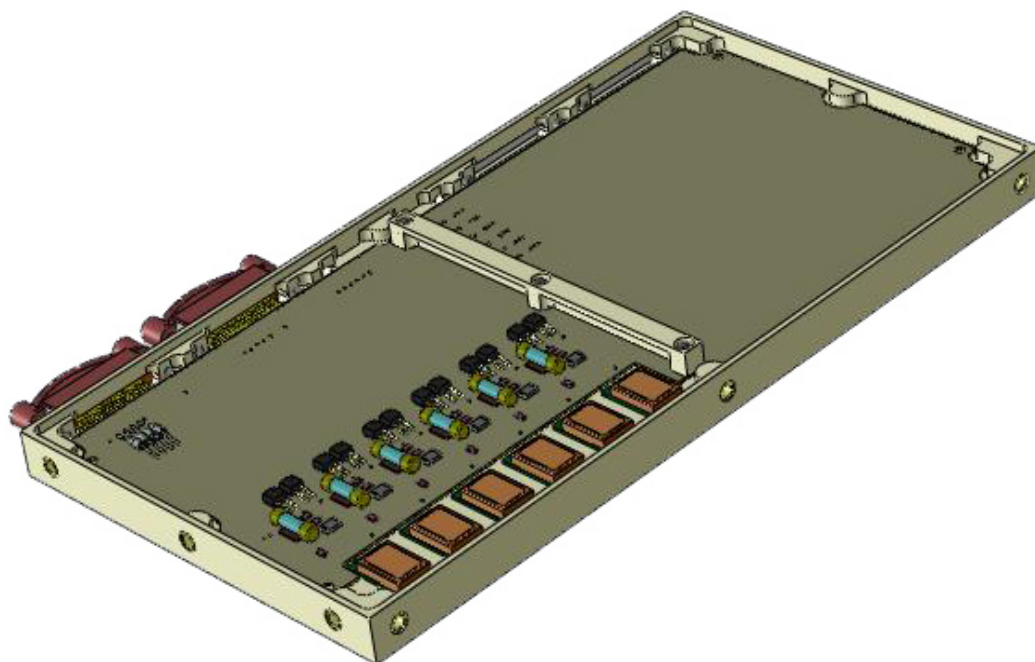


Рисунок 1.4 – 3D-модель блока АБВГ.XXX-14mm

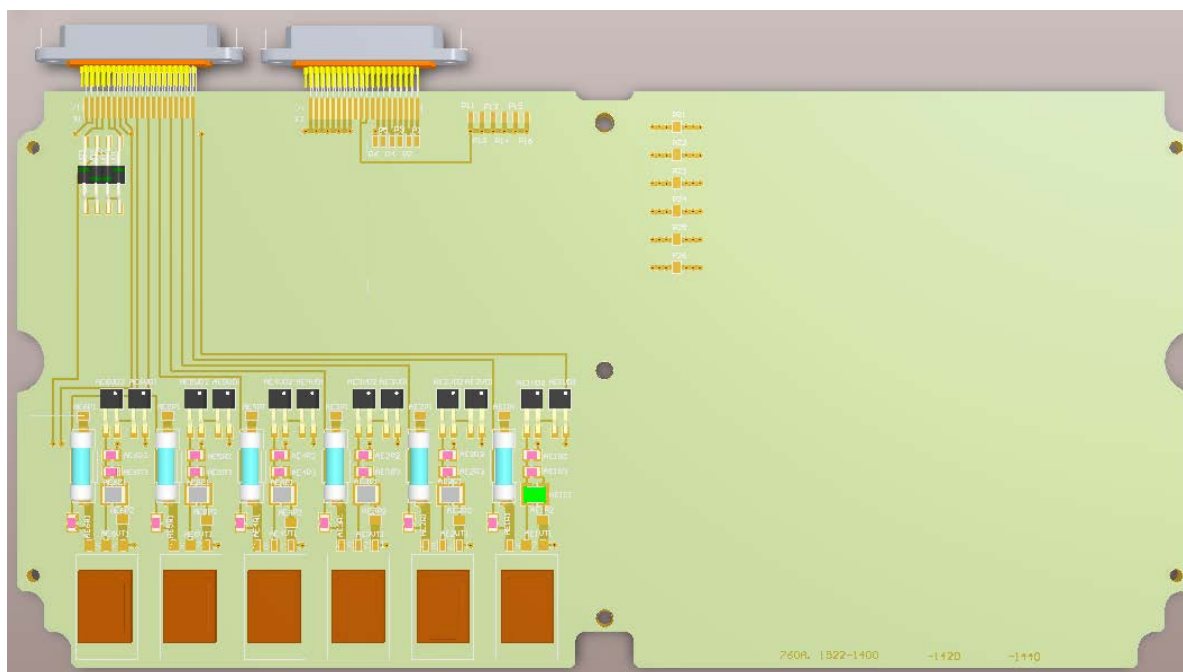
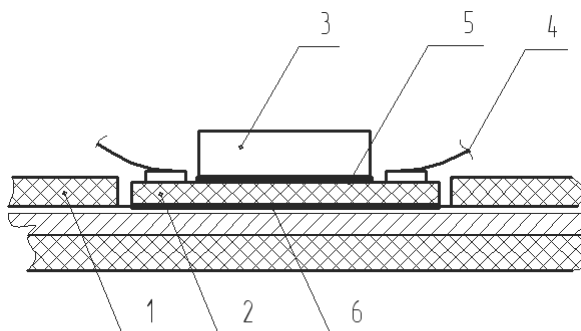


Рисунок 1.5 – 3D-модель печатной платы блока АБВГ.XXX-14mm

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ



1 – Плата 2 – плата керамическая 3 – элемент, 4 – провод

5 – паста припайная 6 – клей-герметик Эласил 137-182.

Рисунок 1.6 – Установка транзистора 2П794А92 с керамической платой

Тепловой режим блока АБВГ.ХХХ-14тт и других блоков, входящих в состав БЭР, обеспечивается за счет отвода тепловой энергии от нижней и боковых поверхностей конструкции БЭР.

В соответствии с ТЗ на БЭР при штатной эксплуатации на орбите прибор должен нормально функционировать при температуре на основании прибора от минус 20 до плюс 45 °С. Режимы работы БЭР и соответствующие им тепловыделения приведены в таблице 1.4.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|-------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 11 |
| Изм. | Лист | № док.м. | Подпись | Дата | | | | | | |

1.2 Эксплуатационно-технические характеристики объекта исследования

Прибор БЭР предназначен для работы в составе системы электропитания модуля служебных систем космических аппаратов и имеет несколько режимов работы. В таблице 1.4 приведены возможные режимы работы БЭР и соответствующие им мощности тепловыделения блоков.

Таблица 1.4 – Тепловыделение блоков при различных режимах функционирования БЭР

| № п/п | Режим работы БЭР | Условия расчета | $P_{\text{сн БС}}, \text{Вт}$ | $P_{\text{ру1+ру2}}, \text{Вт}$ | $P_{\text{сн27}}, \text{Вт}$ | $P_{\text{зу1}}, \text{Вт}$ | $P_{\text{блоков}}, (P_{\text{БЭР}}), \text{Вт}$ |
|-------|------------------|--|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | Режим I | $U_{6c} = 130 \text{ В}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | 23,4 | – | 77,2 | – | 141 (148) |
| | | $U_{6c} = 100 \text{ В}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | – | – | 70,56 | – | – |
| | | $U_{6c} = 85 \text{ В}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | 24 | – | 65,6 | – | 130 (137) |
| 2 | Режим II | $U_{6c} = 130 \text{ В}$ $U_{a6} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | 23,4 | – | 77,2 | 13,8 | 155 (163) |
| 3 | Режим III | $U_{6c} = 130 \text{ В}$ $U_{a6} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | 23,4 | – | 77,2 | 13,8 | 155 (163) |
| 4 | Режим IV | $U_{6c} = 130 \text{ В}$ $U_{a6} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 800 \text{ Вт}$ $P_{27} = 850 \text{ Вт}$ | 23,4 | – | 77,2 | 13,8 | 169 (177) |
| 5 | Режим V | $U_{6c} = 0 \text{ В}$ $U_{a6} = 50 \text{ В}$ $P_{100} = 670 \text{ Вт}$ $P_{27} = 625 \text{ Вт}$ | – | 34,4 | 40,88 | – | 116 (122) |
| | | $U_{6c} = 0 \text{ В}$ $U_{a6} = 50 \text{ В}$ $P_{100} = 100 \text{ Вт}$ $P_{27} = 520 \text{ Вт}$ | – | 17,5 | 34,1 | – | 92 (98) |
| | | $U_{6c} = 0 \text{ В}$ $U_{a6} = 50 \text{ В}$ $P_{100} = 0 \text{ Вт}$ $P_{27} = 0 \text{ Вт}$ | – | 16 | 8 | – | 64 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

12

Окончание таблицы 1.4

| № п/п | Режим работы БЭР | Условия расчета | $P_{\text{сн БС, Вт}}$ | $P_{\text{ру1+ру2, Вт}}$ | $P_{\text{сн27, Вт}}$ | $P_{\text{зу1, Вт}}$ | $P_{\text{блоков, (РБЭР), Вт}}$ |
|-------|------------------|---|------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|
| 6 | Режим VI | $U_{\text{бс}} = 80 \text{ В}$ $U_{\text{аб}} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 670 \text{ Вт}$ $P_{27} = 625 \text{ Вт}$ | — | 31,64 | 47,88 | 11,16 | 131 (138) |
| 7 | Режим VII | $U_{\text{бс}} = 80 \text{ В}$ $U_{\text{аб}} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 670 \text{ Вт}$ | — | 31,64 | 47,88 | 11,16 | 131 (138) |
| 8 | Режим VIII | $U_{\text{бс}} = 80 \text{ В}$ $U_{\text{аб}} = 60 \text{ В}$ $I_{\text{зар}} = 5 \text{ А}$ $P_{100} = 670 \text{ Вт}$ | — | 31,64 | 47,88 | 11,16 | 142 (150) |

Основная часть тепловыделений БЭР снимается через его основание, которое связано с радиационной поверхностью на внешней стороне обшивки космического аппарата при помощи системы тепловых труб (рисунок 1.3). Для поддержания рабочих температур прибора в тени Земли над тепловыми трубами в стороне от прибора установлены обогреватели. Таким образом поддерживается необходимая температура посадочной поверхности (места). Кроме того, отвод тепла производится при помощи излучения в пространство приборного отсека спутника и на соседние приборы.

По условиям эксплуатации БЭР принадлежит к группе 5.3 по ГОСТ РВ 20.39.304.

Согласно документу АБВГ.ХХХ-0 ИД ТЭ – «БЭР. Исходные данные на разработку конструкции блока» предельно допустимые температуры ЭРИ блока АБВГ.ХХХ-14mm, необходимые для обеспечения требований документа «Техническое задание на составную часть ОКР «БЭР для», приведены в таблице 1.5. В таблице 1.6 приведены мощности тепловыделений в ЭРИ.

Таблица 1.5 – Максимально допустимые температуры ЭРИ, входящих в состав блока АБВГ.ХХХ-14mm

| Обозначение ЭРИ согласно ПЭЗ | Наименование | Тип | Максимально допустимая температура, °C |
|---|-----------------|------------|--|
| AE1FU1-AE6FU1 | Вставка плавкая | ОС ВП1-2 | +50°C |
| AE1R1-AE6R1, AE1R2-AE6R2, AE1R3-AE6R3 | Резистор | P1-16П | +55°C |
| AE1C1-AE6C1 | Конденсатор | ОС К10-17 | +60°C |
| AE1VT1-AE6VT1 | Транзистор | 2П794А92 | +50°C |
| AE1VD1-AE6VD1, AE1VD2-AE6VD2 | Диод | 2Д237Б1/ПМ | +100°C |
| VD1-VD4 | Диод | 2Д510А | +50°C |
| X1, X2 | Соединитель | ОС СНП339 | +63°C |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | | | | | | 13 |

Таблица 1.6 – Мощности тепловыделений ЭРИ, входящих
в состав блока АБВГ.XXX-14mm

| Обозначение ЭРИ согласно ПЭЗ | Мощность тепловыделения, Вт |
|---|-----------------------------------|
| FU1 | — |
| R1 | 0,001 [*] /0,001 |
| R2 | 0,005 [*] /0,012 |
| R3 | 0,0005 [*] /0,0024 |
| C1 | — |
| VT1 | 2,0 ^{**} в течение 2 с. |
| VD1 | 0,0007 [*] /0,0012 |
| VD2 | 0,0007 [*] /0,0012 |
| VD1-VD4 | 4× 0,0007 [*] /0,0012 |
| X1, X2 | — |
| Rp | 1500 ^{**} в течение 2 с. |
| [*] – значение мощности для режима ожидания ^{**} – значения заданы в документе АБВГ.XXX-0 ИД ТЭ – «БЭР. Исходные данные на разработку конструкции блока» | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Инв. № подл. | Подпись и дата | АБВГ.XXX-0 Р17 ТЭ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | | | 14 |
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | | | | | | | | |

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основе параметров конструкции БЭР, режимов его функционирования (см. таблицы 1.4, 1.6), а также данных, приведенных в подразделах 3.1 и 3.2, необходимо средствами ПК ТРИАНА проанализировать:

- тепловые режимы работы БЭР (Режим I—Режим VIII) на уровне интегральных температур входящих в его состав блоков;
- тепловые режимы работы ЭРИ, входящих в состав блока АБВГ.XXX-14mm, для различных режимов работы блока и наиболее теплонагруженных режимов функционирования БЭР (см. таблицу 1.4).

[illegible]

3 ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИК

3.1 Модели

Для анализа тепловых режимов перечисленных в п. 2 объектов применяется иерархическая схема моделирования, согласно которой на первом этапе анализируется конструкция БЭР, модель тепловых процессов (МТП) которой учитывает интегральные тепловые характеристики блоков, т. е. используется модель с сосредоточенными параметрами. На втором этапе на основе полученных температур, которые выступают в качестве граничных условий, анализируется тепловой режим блока АБВГ.ХХХ-14mm на уровне отдельных ЭРИ, т. е. используется модель с распределенными параметрами.



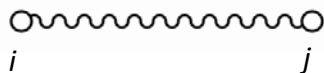
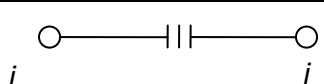
Реализация описанного подхода средствами ПК ТРИАНА требует разработки на первом этапе топологической МТП БЭР, а на втором этапе МТП блока АБВГ.ХХХ-14mm формируется в автоматическом режиме по заданным геометрическим и теплофизическим параметрам блока и ЭРИ, входящих в его состав.

Используемая для проведения иерархического анализа тепловых характеристик конструкции БЭР методика приведена в подразделе 3.2.

Обозначение ветвей модели тепловых процессов

Условные обозначения ветвей, использованных при разработке МТП, которые отражают процессы теплопередачи в конструкции БЭР, представлены в таблице 3.5.



Таблица 3.1 – Условные обозначения ветвей МТП

| Графическое обозначение ветви МТП | Название | Параметры ветви |
|---|-----------------------------------|--|
|  | Кондуктивный теплообмен | <ul style="list-style-type: none"> размер 1, определяющий площадь теплового потока, мм; размер 2, определяющий площадь теплового потока, мм; длина пути теплового потока, мм; коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К |
|  | Контактный теплообмен | <ul style="list-style-type: none"> длина контактного пятна, мм; ширина контактного пятна, мм; коэффициент смазки, отн. ед |
|  | Теплообмен излучением | <ul style="list-style-type: none"> определяющий размер, мм; ширина поверхности, мм; степень черноты поверхности, отн. ед.; коэффициент облученности, отн. ед.; площадь дополнительных элементов, мм² |
|  | Кондукция через многослойное тело | <ul style="list-style-type: none"> толщина 1 тела, мм; коэффициент теплопроводности 1-го тела, Вт/м·К; толщина 2 тела, мм; коэффициент теплопроводности 2-го тела, Вт/м·К; толщина 3 тела, мм; коэффициент теплопроводности 3-го |

| | |
|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Инв. № подл. | Подпись и дата |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | 16 |

Окончание таблицы 3.1

| Графическое обозначение ветви МТП | Название | Параметры ветви |
|---|---------------------------------|--|
| | | <p>тела, Вт/м·К;</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ направление теплопереноса (1 – поперечное, 2 – продольное); ○ длина (для продольного) или ширина (для поперечного) теплового потока, мм; ○ высота дискрета, мм. |
|  | Источник постоянной мощности | <ul style="list-style-type: none"> ○ значение мощности источника тепловыделения, Вт. |
|  | Источник постоянной температуры | <ul style="list-style-type: none"> ○ значение температуры источника, °С. |

3.1.1 Разработка МТП БЭРв целом

3.1.1.1 Идеализация конструкции с учетом протекающих тепловых процессов

Эскиз конструкции БЭР, отражающий протекающие в нем тепловые процессы, представлен на рисунке 3.1. Исходя из постановки задачи и особенностей конструкции БЭР, при построении тепловой модели были приняты следующие допущения:

- каждый блок БЭР представлен в виде трех изотермично нагретых зон, мощность тепловыделения которых увеличивается при приближении к основанию БЭР. При этом совокупная мощность всех трех зон является суммой мощностей всех входящих в блок ЭРИ (рисунок 3.1, в);
- каждый боковой кронштейн-тепlostок, к которому крепится рамка блока, представлен в местах крепления к нему блока в виде трех условно изотермично нагретых зон, связанных с тепловыделяющими узлами блока и основанием блока через контактный теплообмен;
- основание БЭР и его верхняя крышка также поделены по количеству блоков на условно изотермично нагретые зоны в области крепления блоков;
- учитывая, что место эксплуатации БЭР – космос, структура МТП исключает конвективные способы теплоотдачи: внутренние тепловыделяющие блоки БЭР связаны между собой и с кожухом излучением; между тем кожух БЭР излучает тепло в окружающее его внутреннее пространство спутника, имеющее постоянную температуру 40 °С;
- местом установки прибора является сотованель, имеющая по ТЗ максимальную температуру 45 °С, которая в МТП представлена в виде условно изотермичного объема, имеющего постоянную температуру, максимально допустимую по ТЗ.

Как было отмечено выше, каждый блок моделируется тремя условно изотермичными объемами, в которых выделяется тепло, в сумме составляющее тепловыделение всех входящих в блок ЭРИ. С учетом изложенных выше допущений была разработана топологическая МТП (см. рисунок 3.2) типового блока, входящего в состав БЭР (номера узлов соответствуют рисунку 3.1). Номера узлов и описание объектов, моделируемых данными узлами, представлены в таблице 3.2. Описание ветвей, отражающих тепловые процессы, протекающие в блоке БЭР, представлено в таблице 3.3.

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № посл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | 17 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | | |

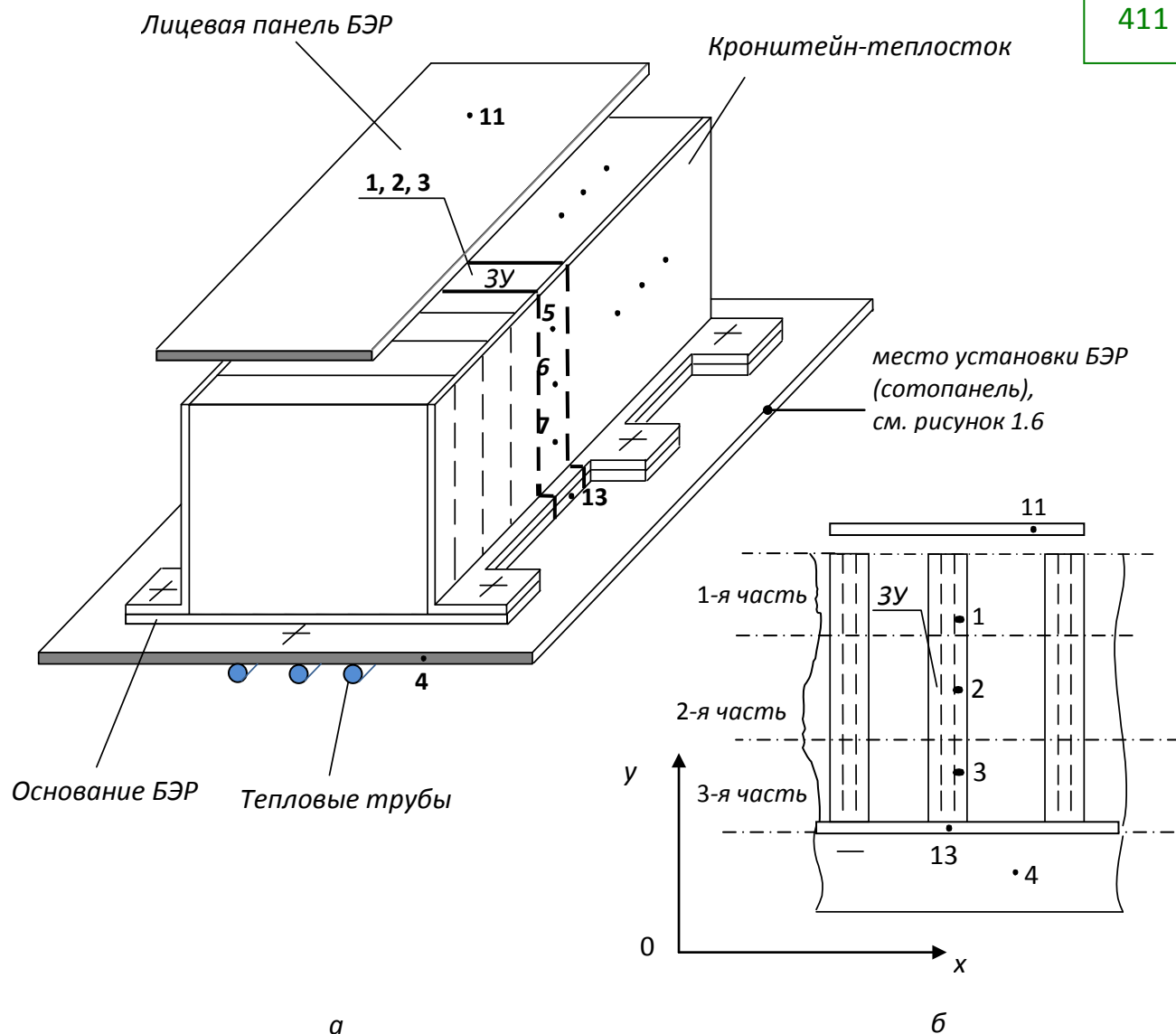


Рисунок 3.1 – Эскиз конструкции БЭР с примером нумерации на нем условно нагретых зон для одного блока: а – эскиз БЭР в целом; б – условное разбиение входящего в БЭР блока на изотермичные объемы вдоль оси ОУ; в – принцип учета тепловыделений в МТП типового блока

| | |
|----------------|--|
| Подпись и дата | |
| Инв. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|--------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

18

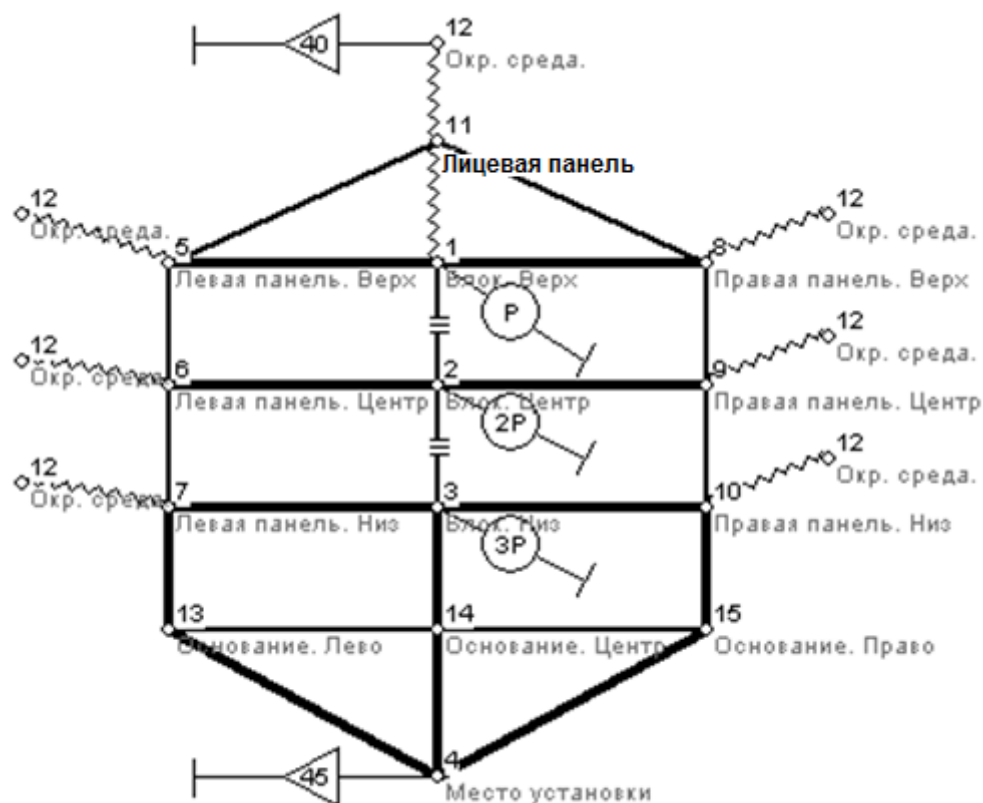


Рисунок 3.2– Макромодель МТП типового блока, входящего в состав БЭР

Таблица 3.2– Описание узлов МТП типового блока, входящего в состав БЭР

| Обозначение узла МТП | Обозначение узла в МТП | Объект, моделируемый узлом |
|----------------------|---|--|
| 1, 2 и 3 | Блок. Верх; Блок. Центр; Блок. Низ | Верхний, центральный и нижний тепловыделяющие объемы блока соответственно |
| 4 | Место установки | Место установки прибора (сотопанель) |
| 5—7 | Левая панель. Верх; Левая панель. Центр; Левая панель. Низ | Левый кронштейн-теплосток, разделенный на три условно изотермичных объема |
| 8—10 | Правая панель. Верх; Правая панель. Центр; Правая панель. Низ | Правый кронштейн-теплосток, разделенный на три условно изотермичных объема |
| 11 | Лицевая панель | Лицевая панель (верхняя крышка) БЭР |
| 12 | Окр. среда | Окружающая БЭР среда |
| 13—15 | Основание. Лево; Основание. Центр; Основание. Право | Основание прибора, разделенное на три условно изотермичных объема |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

19

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

Таблица 3.3 – Описание ветвей МТП типового блока, входящего в состав БЭР

| Номера узлов ветви МТП | Описание ветви |
|---|---|
| 1–2 и 2–3 | Кондуктивный теплообмен в слоистой структуре ПП—рамка—ПП |
| 3–14 | Контактный теплообмен между рамкой блока и основанием БЭР |
| 4–14 | Контактный теплообмен между основанием БЭР и отопительной панелью |
| 7–13 и 10–15 | Контактный теплообмен между боковыми кронштейнами-теплостоками и основанием БЭР |
| 13–4 и 15–4 | Контактный теплообмен между основанием БЭР и отопительной панелью области установки кронштейнов |
| 13–14 и 14–15 | Кондуктивный теплообмен по основанию БЭР |
| 5–6 и 6–7 | Кондуктивный теплообмен вдоль левого кронштейна-теплостока |
| 8–9 и 9–10 | Кондуктивный теплообмен вдоль правого кронштейна-теплостока |
| 1–5, 2–6 и 3–7 | Контактный теплообмен между левым кронштейном-теплостоком и тепловыделяющими областями блока |
| 1–8, 2–9 и 3–10 | Контактный теплообмен между правым кронштейном-теплостоком и тепловыделяющими областями блока |
| 1–11 | Теплообмен излучением между верхней поверхностью блока и боевой панелью БЭР |
| 12–11 и 11–8 | Кондуктивный теплообмен от боковых кронштейнов-теплостоков к боевой панели |
| 5–12, 6–12, 7–12, 8–12, 9–12, 10–12 и 11–12 | Теплоотдача излучением с боковых и боевой панелей БЭР в окружающую среду |

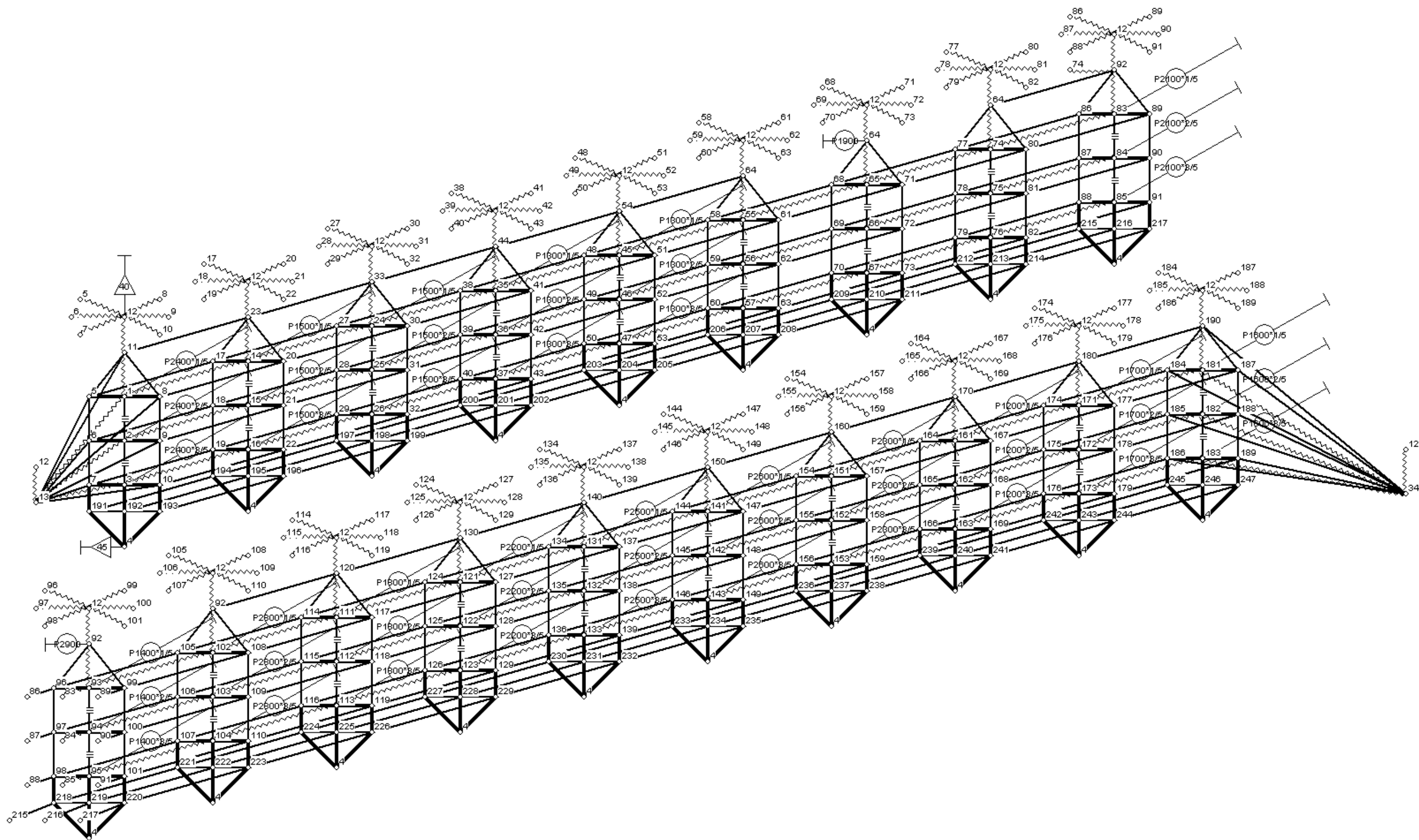
3.1.1.2 Разработка МТП БЭР в целом

На основе разработанной макромодели МТП типового блока, входящего в состав БЭР, была разработана МТП БЭР в целом (см. рисунок 3.3), состоящая из МТП типовых блоков, соединенных между собой ветвями, отражающими кондуктивный теплообмен по стенкам БЭР (кронштейнам, основанию БЭР, боевой панели) и лучистый теплообмен между блоками, а также блоками и боевой панелью.

3.1.1.3 Нумерация и обозначение узлов МТП

Обозначения и номера узлов, использованных в МТП конструкции БЭР, с учетом изложенных в п. 3.1.1 подходов к идеализации представлены в таблице 3.4.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | 3.1.1.2 Разработка МТП БЭР в целом | | | | | Лист |
| | | | | | <p>На основе разработанной макромодели МТП типового блока, входящего в состав БЭР, была разработана МТП БЭР в целом (см. рисунок 3.3), состоящая из МТП типовых блоков, соединенных между собой ветвями, отражающими кондуктивный теплообмен по стенкам БЭР (кронштейнам, основанию БЭР, боевой панели) и лучистый теплообмен между блоками, а также блоками и боевой панелью.</p> | | | | | |
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | 3.1.1.3 Нумерация и обозначение узлов МТП | | | | | Лист |
| | | | | | <p>Обозначения и номера узлов, использованных в МТП конструкции БЭР, с учетом изложенных в п. 3.1.1 подходов к идеализации представлены в таблице 3.4.</p> | | | | | |
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | | | | | 20 |



| | | | | |
|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
| Подпись и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подпись и дата | Инв. № подл. |
| | | | | |

Рисунок 3.3 – Макромодель МТП конструкции БЭР, сформированная в графическом редакторе *MTPEditor* ПК ТРИАНА

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЗ

Таблица 3.4–Описание узлов МТП БЭР

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|---------------------------------|--|
| 1 | 2400. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 2 | 2400. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 3 | 2400. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 4 | Сотопанель | Посадочное место БЭР |
| 5 | 2400. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 6 | 2400. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 7 | 2400. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 8 | 2400. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 9 | 2400. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 10 | 2400. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2400 |
| 11 | 2400. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–2400 |
| 12 | Окр. среда. | Окружающая среда |
| 13 | Передняя панель | Передняя панель БЭР |
| 14 | 1500_1. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 15 | 1500_1. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 16 | 1500_1. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 17 | 1500_1. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 18 | 1500_1. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 19 | 1500_1. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 20 | 1500_1. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 21 | 1500_1. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 22 | 1500_1. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 23 | 1500_1. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 24 | 1500_2. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 25 | 1500_2. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 26 | 1500_2. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 27 | 1500_2. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 28 | 1500_2. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 29 | 1500_2. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 30 | 1500_2. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

22

Изм. Лист № док. Подпись Дата

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|---------------------------------|--|
| 31 | 1500_2. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 32 | 1500_2. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1500 |
| 33 | 1500_2. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 34 | Задняя панель | Задняя панель прибора |
| 35 | 1300_1. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 36 | 1300_1. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 37 | 1300_1. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 38 | 1300_1. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 39 | 1300_1. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 40 | 1300_1. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 41 | 1300_1. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 42 | 1300_1. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 43 | 1300_1. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 44 | 1300_1. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 45 | 1300_2. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 46 | 1300_2. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 47 | 1300_2. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 48 | 1300_2. . Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 49 | 1300_2. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 50 | 1300_2. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 51 | 1300_2. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 52 | 1300_2. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 53 | 1300_2. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1300 |
| 54 | 1300_2. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 55 | 1100_1. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 56 | 1100_1. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 57 | 1100_1. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 58 | 1100_1. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 59 | 1100_1. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 60 | 1100_1. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | Подпись и дата |
| Инв. № подл. | Подпись и дата |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

23

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|---------------------------------|--|
| 61 | 1100_1. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 62 | 1100_1. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 63 | 1100_1. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 64 | 1ууу | Тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1ууу |
| 65 | 1100_2. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 66 | 1100_2. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 67 | 1100_2. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 68 | 1100_2. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 69 | 1100_2. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 70 | 1100_2. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 71 | 1100_2. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 72 | 1100_2. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 73 | 1100_2. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1100 |
| 74 | 2100_1. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 75 | 2100_1. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 76 | 2100_1. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 77 | 2100_1. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 78 | 2100_1. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 79 | 2100_1. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 80 | 2100_1. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 81 | 2100_1. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 82 | 2100_1. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 83 | 2100_2. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 84 | 2100_2. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 85 | 2100_2. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 86 | 2100_2. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 87 | 2100_2. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 88 | 2100_2. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 89 | 2100_2. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 90 | 2100_2. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

24

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|-------------------------------|--|
| 91 | 2100_2. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2100 |
| 92 | 3zzz | Тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–3zzz |
| 93 | 14mm. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 94 | 14mm. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 95 | 14mm. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 96 | 14mm. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 97 | 14mm. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 98 | 14mm. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 99 | 14mm. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 100 | 14mm. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 101 | 14mm. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–14mm |
| 102 | 2xxx. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 103 | 2xxx. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 104 | 2xxx. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 105 | 2xxx. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 106 | 2xxx. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 107 | 2xxx. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 108 | 2xxx. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 109 | 2xxx. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 110 | 2xxx. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 111 | 1800. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 112 | 1800. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 113 | 1800. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 114 | 1800. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 115 | 1800. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 116 | 1800. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 117 | 1800. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 118 | 1800. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |
| 119 | 1800. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1800 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

25

Изм. Лист № док. Подпись Дата

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|-------------------------------|--|
| 120 | 1800. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1800 |
| 121 | 2200. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 122 | 2200. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 123 | 2200. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 124 | 2200. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 125 | 2200. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 126 | 2200. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 127 | 2200. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 128 | 2200. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 129 | 2200. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2200 |
| 130 | 2200. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–2200 |
| 131 | 2500. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 132 | 2500. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 133 | 2500. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 134 | 2500. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 135 | 2500. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 136 | 2500. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 137 | 2500. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 138 | 2500. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 139 | 2500. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2500 |
| 140 | 2500. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–2500 |
| 141 | 2600. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 142 | 2600. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 143 | 2600. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 144 | 2600. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 145 | 2600. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 146 | 2600. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 147 | 2600. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 148 | 2600. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 149 | 2600. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2600 |
| 150 | 2600. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–2600 |
| 151 | 2300. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 152 | 2300. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 153 | 2300. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–2300 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

26

Изм. Лист № докум. Подпись Дата

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|-------------------------------|--|
| 154 | 2300. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 155 | 2300. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 156 | 2300. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 157 | 2300. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 158 | 2xxx. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 159 | 2300. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–2300 |
| 160 | 2300. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–2300 |
| 161 | 1200. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 162 | 1200. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 163 | 1200. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 164 | 1200. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 165 | 1200. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 166 | 1200. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 167 | 1200. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 168 | 1200. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 169 | 1200. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1200 |
| 170 | 1200. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1200 |
| 171 | 1700. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 172 | 1700. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 173 | 1700. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 174 | 1700. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 175 | 1700. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 176 | 1700. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 177 | 1700. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 178 | 1700. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 179 | 1700. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1700 |
| 180 | 1700. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1700 |
| 181 | 1600. Верх | Верхний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 182 | 1600. Середина | Средний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 183 | 1600. Низ | Нижний тепловыделяющий объем блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 184 | 1600. Левая панель. Верх | Верхний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 185 | 1600. Левая панель. Середина | Средний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 186 | 1600. Левая панель. Низ | Нижний объем левого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 187 | 1600. Правая панель. Верх | Верхний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 188 | 1600. Правая панель. Середина | Средний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

27

Изм. Лист № док. Подпись Дата

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|----------------------------|---|
| 189 | 1600. Правая панель. Низ | Нижний объем правого кронштейна блока АБВГ.ХХХ–1600 |
| 190 | 1600. Лицевая панель | Лицевая панель над блоком АБВГ.ХХХ–1600 |
| 191 | 2400. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2400 |
| 192 | 2400. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2400 |
| 193 | 2400. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2400 |
| 194 | 1500_1. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 195 | 1500_1. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 196 | 1500_1. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 197 | 1500_2. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 198 | 1500_2. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 199 | 1500_2. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1500 |
| 200 | 1300_1. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 201 | 1300_1. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 202 | 1300_1. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 203 | 1300_2. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 204 | 1300_2. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 205 | 1300_2. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1300 |
| 206 | 1100_1. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 207 | 1100_1. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 208 | 1100_1. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 209 | 1100_2. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 210 | 1100_2. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 211 | 1100_2. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1100 |
| 212 | 2100_1. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |
| 213 | 2100_1. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |
| 214 | 2100_1. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |
| 215 | 2100_2. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

28

Продолжение таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|----------------------------|---|
| 216 | 2100_2. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |
| 217 | 2100_2. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2100 |
| 218 | 14mm. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–14mm |
| 219 | 14mm. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–14mm |
| 220 | 14mm. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–14mm |
| 221 | 2xxx. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 222 | 2xxx. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 223 | 2xxx. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2xxx |
| 224 | 1800. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1800 |
| 225 | 1800. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1800 |
| 226 | 1800. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1800 |
| 227 | 2200. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2200 |
| 228 | 2200. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2200 |
| 229 | 2200. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2200 |
| 230 | 2500. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2500 |
| 231 | 2500. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2500 |
| 232 | 2500. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2500 |
| 233 | 2600. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2600 |
| 234 | 2600. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2600 |
| 235 | 2600. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2600 |
| 236 | 2300. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2300 |
| 237 | 2300. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–2300 |
| 238 | 2300. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–2300 |
| 239 | 1200. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1200 |
| 240 | 1200. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1200 |
| 241 | 1200. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1200 |
| 242 | 1700. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1700 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Лист

29

Окончание таблицы 3.4

| № узла МТП | Обозначение узла в МТП БЭР | Описание |
|------------|----------------------------|---|
| 243 | 1700. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1700 |
| 244 | 1700. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1700 |
| 245 | 1600. Основание. Лево | Объем основания БЭР под левым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1600 |
| 246 | 1600. Основание. Центр | Объем основания БЭР под блоком АБВГ.ХХХ–1600 |
| 247 | 1600. Основание. Право | Объем основания БЭР под правым кронштейном под блоком АБВГ.ХХХ–1600 |

3.1.1.4 Параметризация МТП БЭР

Описание ветвей МТП БЭР осуществляется через геометрические и теплофизические параметры конструкции БЭР. Для дальнейшего применения разработчиками МТП БЭР целесообразно при описании модели использовать параметры, которые задаются в одном месте, а программа подставляет их численные значения в МТП в автоматическом режиме. Перечень параметров МТП БЭР приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры МТП БЭР

| Название параметра МТП БЭР в ПК ТРИАНА | Описание |
|--|---|
| PRW | Ширина прибора, мм |
| PRH | Высота прибора, мм |
| PRD | Глубина прибора, мм |
| FUW | Ширина типовой функциональной ячейки, мм |
| FUH | Высота типовой функциональной ячейки, мм |
| FUD | Длина типовой функциональной ячейки, мм |
| BLCOUNT | Количество типовых функциональных ячеек, установленных в приборе, ед. |
| KRDOWNW | Ширина контакта кронштейна-тепlostока с основанием прибора, мм |
| DEPTHKR | Толщина стенок кронштейна, мм |
| DEPTHTOP | Толщина стенок верхней (боевой) панели, мм |
| DEPTHDOWN | Толщина стенок основания прибора, мм |
| DEPTHFU | Толщина металлической рамки блока, на которой закреплены ПП, мм |
| DEPTHP | Толщина ПП, устан. в мет.рамку блока, мм |
| KTBASE | Коэффициент теплопроводности металла, из которого изготовлены КЭ, формирующие кожух прибора (кронштейны, верхняя и боковые панели, основание), Вт/м·К |
| KTFU | Коэффициент теплопроводности металла, из которого изготовлены рамки блоков, Вт/м·К |
| KCHERN | Коэффициент черноты материала элементов конструкции БЭР, отн. ед. |

| | |
|----------------|--|
| Подпись и дата | |
| Инв. № дубл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Изм. | Лист | № докцм. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | 30 |

3.1.2 Модель блока АБВГ.XXX–14mm

МТП блока, представляющая собой металлическую рамку с ПП (см. рисунки 1.4 и 1.5) формируется в автоматическом режиме ПК ТРИАНА на основе ГТП ПП, металлической рамки ПП и ЭРИ. В качестве основы для формирования МТП служит геометрическая модель, формируемая в программе *BoardEditor* ПК ТРИАНА. На рисунке 3.4 представлен фрагмент геометрической модели блока АБВГ.XXX-14mm, подготовленной в ПК ТРИАНА.

| | | | | | | | | |
|--------------|----------------|----------|---------|------|-------------------|--------------|----------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | | | | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подпись и дата | |
| | | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | | | Лист |
| | | | | | | | | 31 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

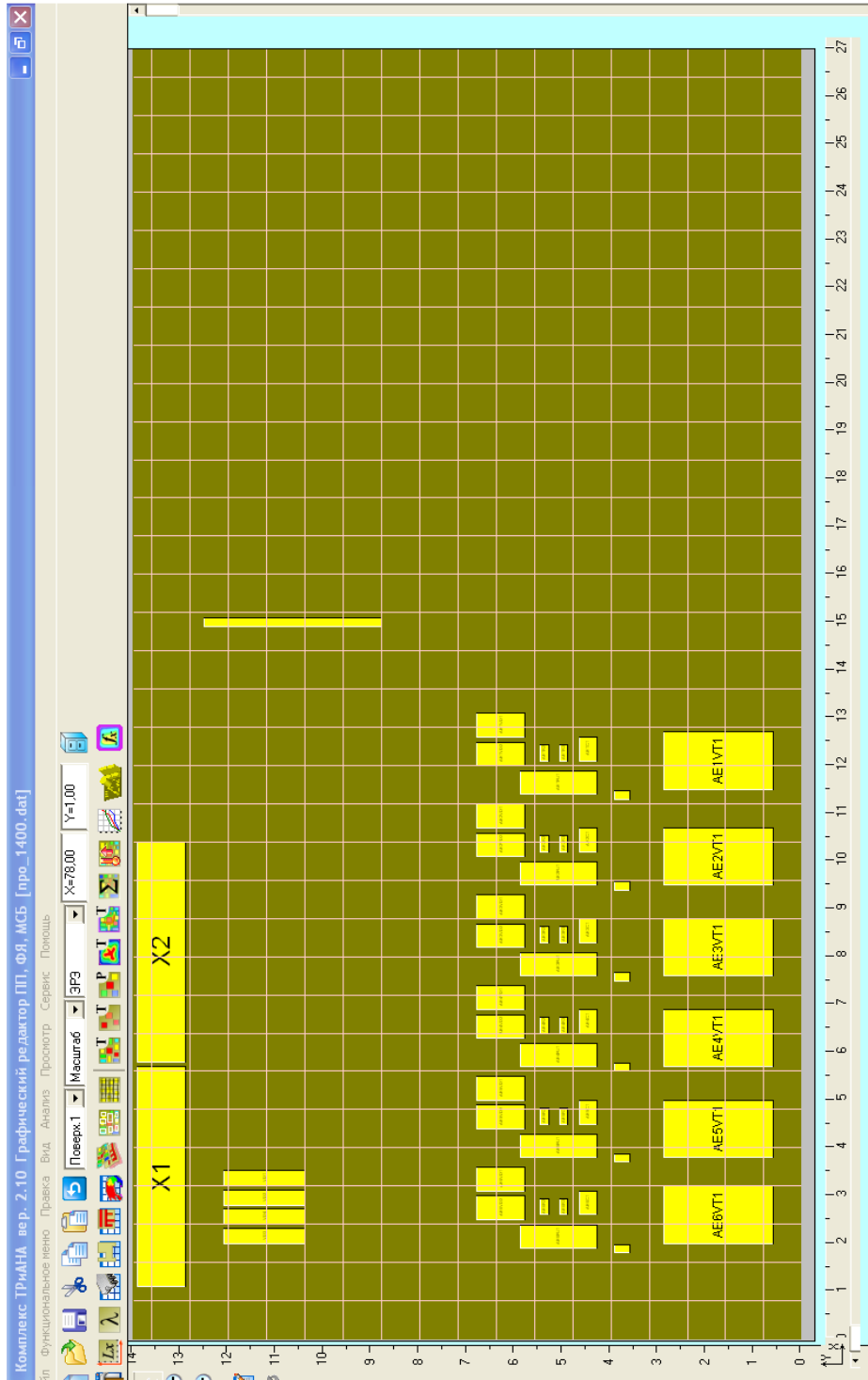


Рисунок 3.4 – Геометрическая модель ПП блока 760А.1522-14тм с нанесенной дискретизационной сеткой

3.2 Методика анализа тепловых характеристик БЭР

Исследования ТХ БЭР производятся на основе методики исследования ТР конструкции БЭР, блок-схема алгоритма которой представлена на рисунке 3.5.

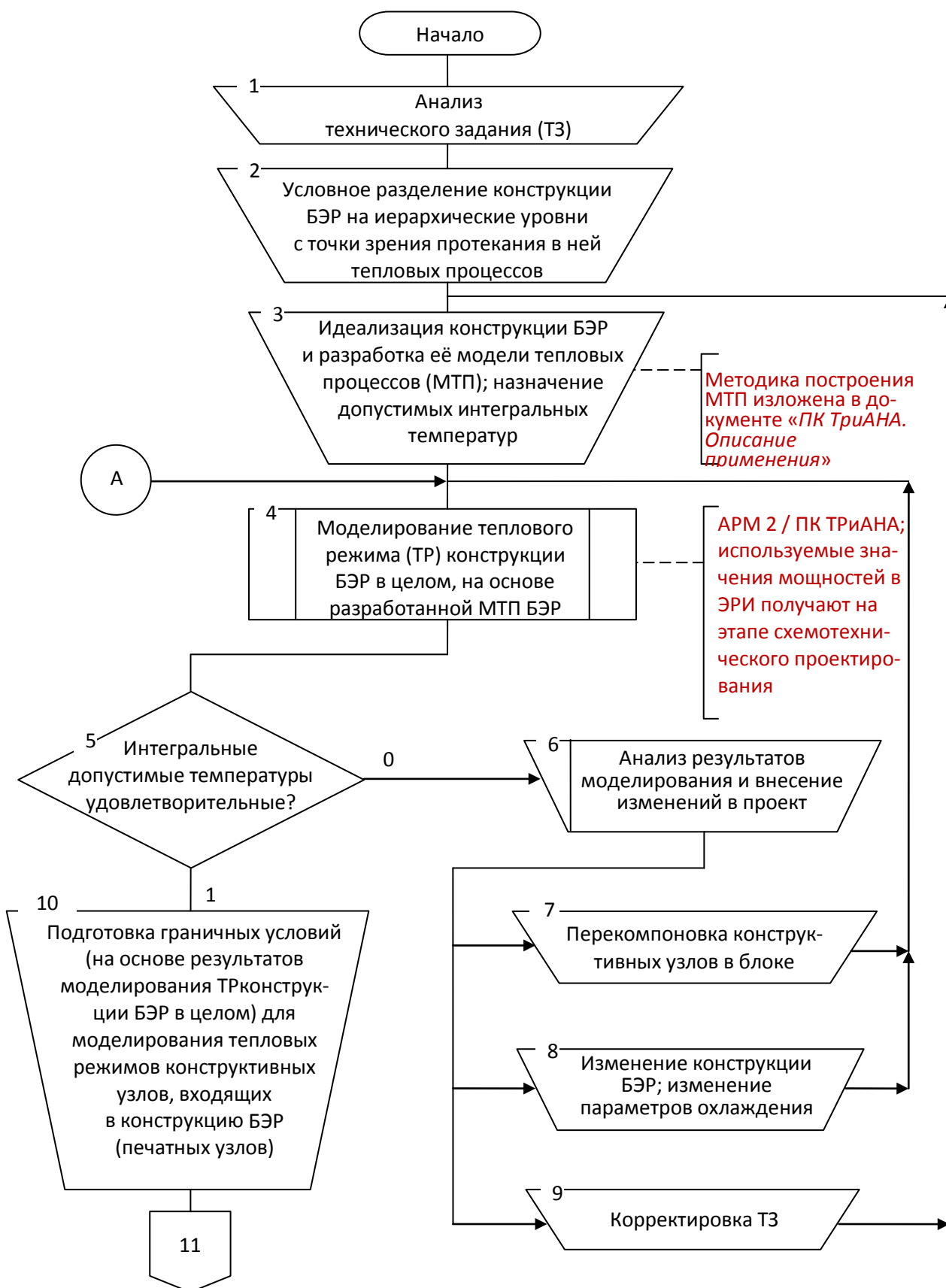


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритма методики иерархического моделирования тепловых режимов в конструкциях БЭР

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|--------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист
33

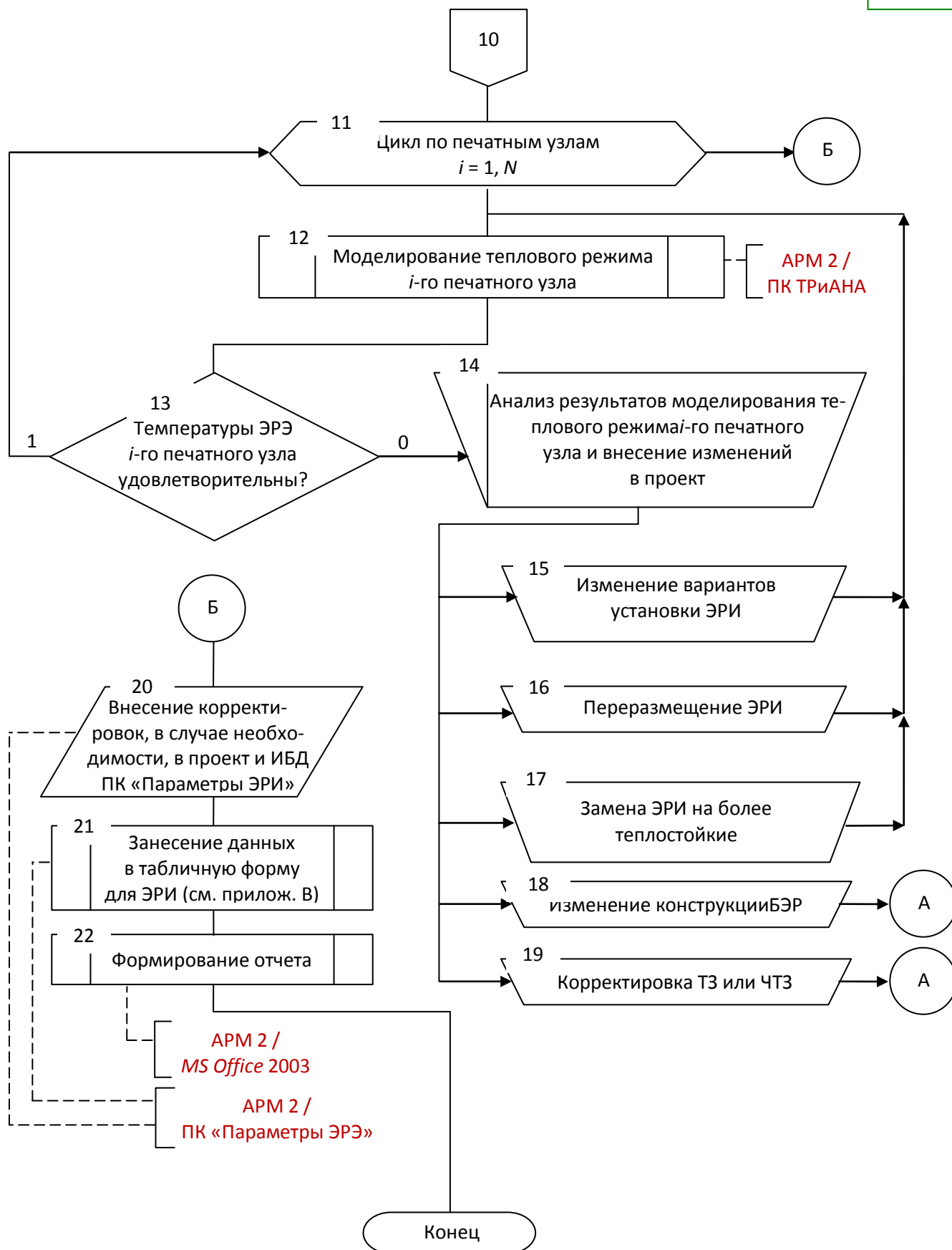


Рисунок 3.5 – Окончание

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

3.3 Исходные данные

3.3.1 Исходные данные для анализа ТХ БЭР в целом:

В качестве исходных данных для исследования ТХ БЭР используется информация, представленная в документах АБВГ.ХХХ-0 ТЗ ТЭ и АБВГ.ХХХ-0 ИД ТЭ:

- тепловыделения в блоках прибора для различных режимов работы – таблица 1.3;
- температура в месте установки прибора: от -20°C до $+45^{\circ}\text{C}$;
- теплофизические параметры конструкционных материалов – таблица 3.6.;
- с внутренней стороны крышки, кронштейны, панели и основание имеют покрытие ан.окс.нхр с $\epsilon \geq 0,85$;
- температура окружающей среды составляет $+40^{\circ}\text{C}$;
- геометрические параметры БЭР – $632 \times 270 \times 140$ мм.

Таблица 3.6 – Теплофизические характеристики материалов конструктивных узлов и элементов БЭР

| Элемент конструкции | Материал | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Основания, рамки, крышки, кронштейны | АМг6Б | 130 |
| Клеи, пасты, герметики | Эластосил 137—182 | 1,85 |
| | У-9М | 1,3 |

На основе указанных выше ГТФП БЭР были заданы значения параметров модели БЭР (см.таблицу 3.1 и рисунок 3.3), описанные в таблице 3.4. Данные значения приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Числовые значения параметров, используемых в МТП БЭР

| Название параметра МТП БЭР в ПК ТРИАНА | Значение параметра |
|--|--------------------------------------|
| PRW | 312 мм |
| PRH | 195 мм |
| PRD | 632 мм |
| FUW | 270 мм |
| FUH | 140 мм |
| FUD | 15 мм |
| BLCOUNT | 19 мм |
| KRDOWNW | 21 мм |
| DEPTHKR | 2 мм |
| DEPTHTOP | 2 мм |
| DEPTHDOWN | 2 мм |
| DEPTHFU | 1.2 мм |
| DEPTHPP | 1.1 мм |
| KTBASE | 130 Вт/м·К |
| KTFU | 0,5 Вт/м·К (с учетом медных экранов) |
| KCHERN | 0,85 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | | | | | | 35 |

3.3.2 Исходные данные для анализа ТХ блока АБВГ.ХХХ-14mm:

- линейные размеры блока – 140×270 мм;
- толщина основания металлической рамки – 1,2 мм;
- материал – АМг6Б ($\lambda=130$ Вт/м×К; $C=970$ Дж/кг×К; $\rho=2630$ Кг/м³);
- толщина ПП – 1,1 мм (ПП с ЭРИ) и 0,9 мм;
- материал ПП – стеклотекстолит ($\lambda=0,3$ Вт/м×К; $C=450$ Дж/кг×К; $\rho=1750$ Кг/м³);
- мощности тепловыделений в ЭРИ – таблица 1.6;
- допустимые температуры ЭРИ – таблица 1.5.

Схема размещения ЭРИ на ПП блока АБВГ.ХХХ-14mm определяется файлом АБВГ.ХХХ-14mm.PrjPcb.

Значения тепловых сопротивлений креплений ЭРИ к ПП приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Значения тепловых сопротивлений крепления ЭРИ

| Обозначение ЭРИ | Наименование | Тип | Площадь контакта с платой, мм ² | Характер Контакта (марка материала) | Тепловое сопротивление ЭРИ-плата (в т.ч. с учетом выводов) К/Вт |
|-----------------|-----------------|------------|--|-------------------------------------|---|
| FU1 | Вставка плавкая | ОС ВП1-2 | 50 | Клей (У-9М) | 3,8 |
| R1, R2, R3 | Резистор | Р1-16П | 4,5 | Клей (У-9М) | 4,7 |
| C1 | Конденсатор | ОС К10-17 | 10 | Клей (У-9М) | 1,5 |
| VT1 | Транзистор | 2П794А92 | 280 | Клей (Эластосил 137-182) | 1,4 |
| VD1, VD2 | Диод | 2Д237Б1/ПМ | 25 | Клей (Эластосил 137-182) | 10,2 |
| VD1-VD4 | Диод | 2Д510А | 11,5 | Клей (У-9М) | 44 |
| X1, X2 | Соединитель | ОС СНП339 | 920 | Клей (У-9М) | 0,5 |

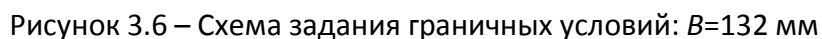
Граничные условия

Граничные условия для анализа ТХ блока АБВГ.ХХХ-14mm задаются согласно схеме, приведенной на рисунке 3.6.

На схеме обозначены зоны локализации граничных условий и приведены их геометрические параметры. Зоны $B_{1-1}-B_{1-3}$, $D_{1-1}-D_{1-3}$ отражают контактный теплообмен между боковыми поверхностями конструкции блока АБВГ.ХХХ-14mm и боковыми панелями-кронштейнами БЭР. В указанных зонах индекс «1» обозначает номер поверхности металлической рамки блока с ПП. Учитывая, что боковые поверхности рамки блока имеют ширину 15 мм, пятно контакта распределяется на 1-ю и 2-ю поверхности по 7,5 мм

| | |
|----------------|--|
| Подпись и дата | |
| Инв. № докл. | |
| Взам. инв. № | |
| Подпись и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | | | |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | 36 |



на каждую, т. е. на второй поверхности также будут расположены зоны $B_{2-1}-B_{2-3}$, $D_{2-1}-D_{2-3}$. Зона A_1 моделирует контактный теплообмен между нижней поверхностью металлической рамки и основанием конструкции БЭР (см. рисунок 1.1). Зоны $C_{1-1}-C_{2-1}$ отражают лучистый теплообмен между печатными платами блока АБВГ.XXX-14mm и блоков БЭР (блок пуска БЭР /АБВГ.XXX-2xxx/ и блок стабилизатора напряжения СН27+ /АБВГ.XXX-2100/). Значения температур, задаваемых при описании граничных условий, которые обозначены на схеме зонами, определяются из анализа ТХ БЭР (см. рисунок 3.3). Для зон излучения задаются усредненные температуры узлов, которыми моделируются соседние блоки: узлы №№ 102–104 для блока АБВГ.XXX-2xxx и узлы №№ 83–85 для блока АБВГ.XXX-2100 (см. рисунок 3.3). Для режима БЭР № 8(СН27 + РУ1 + РУ2 + ЗУ1 + ЗУ2) значения температур для приведенных на рисунке 3.6 зон задаются следующие:

- A_1 : 45,1 °C;
- C_{1-1} : 50 °C;
- C_{2-1} : 48,8 °C;
- B_{1-3} и D_{1-3} : 50,35 °C;
- B_{1-2} и D_{1-2} : 48,84 °C;
- B_{1-1} и D_{1-1} : 45,12 °C.

Начальные условия

В качестве начальных условий для проведения анализа ТХ блока АБВГ.XXX-14mm для нестационарного теплового режима (режим выжигания печатного проводника) используются временные диаграммы работы ЭРИ и выжигаемого печатного проводника, приведенные в отчете АБВГ.XXX-14mmP08 ТЭ.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На основе разработанной МТП БЭР (см. рисунок 3.3) и выполненной ее параметризации был проведен анализ ТХ БЭР для его различных режимов работы. В таблице 4.1 приведены сводные данные по ТХ блоков для всех режимов работы БЭР. Результаты анализа ТХ конструкции БЭР в целом для минимально нагруженного (режим I – «CH27 + CH BC») и максимально нагруженного (режим VIII – «CH27 + PY1 + PY2 + ZY1 + ZY2») режимов приведены в приложении А. На рисунке 4.1 приведены расчетные температуры областей левого кронштейна и боевой панели БЭР для минимально нагруженного режима БЭР I – «CH27 + CH BC».

На рисунке 4.2 приведены изотерма, термограмма и таблица температур ЭРИ блока АБВГ.ХХХ-14mm для режима «Ожидание» (режим БЭР I – «CH27 + CH BC»), а на рисунке 4.3 для режима «Выжигание печатного проводника» (режим БЭР VIII – «CH27 + PY1 + PY2 + ZY1 + ZY2»). В приложении Б приведены подробные результаты анализа ТХ блока.

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Инв. № подл. | Подпись и дата | Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | | | | | | | | 38 |

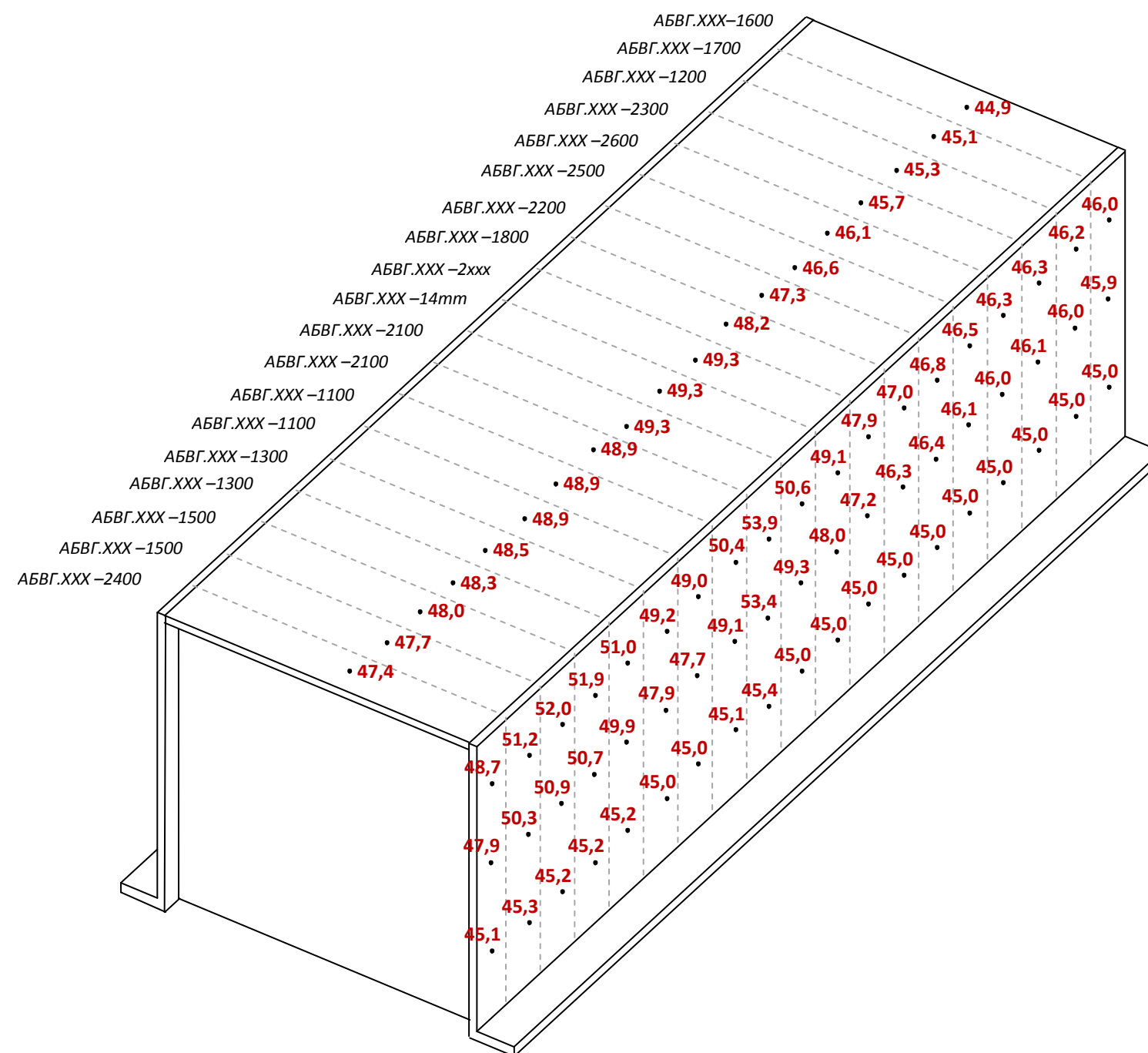


Рисунок 4.1 – Расчетное температурное поле правого кронштейна и боевой панели БЭР в режиме 8 (CH27 + PY1 + PY2 + ZY1 + ZY2)

| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док-м. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Таблица 4.1 – Результаты анализа тепловых характеристик блоков БЭР при различных режимах работы БЭР

| Обозначение блока БЭР | Расчетные значения температур блоков при различных режимах, °С | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|
| | Режим I | | Режим II | | Режим III | | Режим IV | | Режим V | | Режим VI | | Режим VII | | Режим VIII | |
| | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| АБВГ.ХХХ–1100 (СН БС ₁) | 50,98 | 48,83 | 52,74 | 49,86 | 52,89 | 49,95 | 52,78 | 49,88 | 49,26 | 47,46 | 49,67 | 47,68 | 49,86 | 47,79 | 50,13 | 47,94 |
| | 50,17 | | 51,46 | | 51,57 | | 51,48 | | 48,04 | | 48,29 | | 48,43 | | 48,60 | |
| | 45,35 | | 45,38 | | 45,38 | | 45,38 | | 45,07 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,09 | |
| АБВГ.ХХХ–1100 (СН БС ₂) | 50,96 | 48,44 | 54,05 | 50,39 | 54,13 | 50,44 | 53,67 | 50,16 | 49,92 | 47,89 | 50,54 | 48,25 | 50,64 | 48,31 | 50,80 | 48,40 |
| | 49,27 | | 51,96 | | 52,01 | | 51,63 | | 48,65 | | 49,11 | | 49,18 | | 49,28 | |
| | 45,10 | | 45,17 | | 45,17 | | 45,17 | | 45,09 | | 45,10 | | 45,11 | | 45,11 | |
| АБВГ.ХХХ–1200 (НБС) | 46,37 | 45,86 | 46,38 | 45,87 | 46,38 | 45,87 | 46,38 | 45,87 | 46,28 | 45,81 | 46,31 | 45,83 | 46,31 | 45,83 | 46,32 | 45,83 |
| | 46,15 | | 46,15 | | 46,15 | | 46,15 | | 46,10 | | 46,11 | | 46,11 | | 46,12 | |
| | 45,06 | | 45,07 | | 45,07 | | 45,07 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | |
| АБВГ.ХХХ–1300 (РУ ₁) | 46,71 | 45,95 | 47,83 | 46,58 | 48,41 | 46,94 | 49,00 | 47,28 | 49,95 | 48,18 | 50,63 | 48,54 | 51,37 | 49,00 | 52,27 | 49,51 |
| | 46,11 | | 46,87 | | 47,36 | | 47,77 | | 49,32 | | 49,71 | | 50,35 | | 50,97 | |
| | 45,03 | | 45,05 | | 45,06 | | 45,07 | | 45,27 | | 45,27 | | 45,28 | | 45,30 | |
| АБВГ.ХХХ–1300 (РУ ₂) | 48,19 | 46,84 | 49,39 | 47,51 | 49,69 | 47,69 | 49,88 | 47,80 | 50,42 | 48,45 | 50,76 | 48,60 | 51,15 | 48,83 | 51,63 | 49,10 |
| | 47,26 | | 48,07 | | 48,29 | | 48,42 | | 49,64 | | 49,78 | | 50,06 | | 50,38 | |
| | 45,06 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,09 | | 45,28 | | 45,27 | | 45,28 | | 45,28 | |
| АБВГ.ХХХ–14mm (УП СН БС) | 50,15 | 47,92 | 50,11 | 47,78 | 50,03 | 47,86 | 49,92 | 47,79 | 48,12 | 46,76 | 48,49 | 46,97 | 48,51 | 46,98 | 48,57 | 47,01 |
| | 48,54 | | 48,14 | | 48,46 | | 48,36 | | 47,12 | | 47,37 | | 47,38 | | 47,41 | |
| | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,05 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док-м. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Продолжение таблицы 4.1

| Обозначение блока БЭР | Расчетные значения температур блоков при различных режимах °С | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|
| | Режим I | | Режим II | | Режим III | | Режим IV | | Режим V | | Режим VI | | Режим VII | | Режим VIII | |
| | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение |
| АБВГ.XXX–1500 (ЗУ ₁) | 45,66 | 45,38 | 48,20 | 47,09 | 47,08 | 46,22 | 49,44 | 47,83 | 46,55 | 45,89 | 49,52 | 47,95 | 48,17 | 46,85 | 51,28 | 48,98 |
| | 45,45 | | 47,86 | | 46,52 | | 48,82 | | 46,08 | | 49,07 | | 47,31 | | 50,35 | |
| | 45,02 | | 45,21 | | 45,05 | | 45,23 | | 45,03 | | 45,27 | | 45,06 | | 45,30 | |
| АБВГ.XXX–1500 (ЗУ ₂) | 45,96 | 45,53 | 47,48 | 46,42 | 48,56 | 47,27 | 49,78 | 48,00 | 47,66 | 46,55 | 49,23 | 47,47 | 50,63 | 48,59 | 52,30 | 49,58 |
| | 45,60 | | 46,73 | | 48,05 | | 48,99 | | 46,93 | | 48,11 | | 49,84 | | 51,11 | |
| | 45,02 | | 45,05 | | 45,21 | | 45,23 | | 45,05 | | 45,08 | | 45,29 | | 45,32 | |
| АБВГ.XXX–1600 (АЗУ ₁) | 46,06 | 45,69 | 46,06 | 45,69 | 46,06 | 45,69 | 46,06 | 45,69 | 45,99 | 45,65 | 46,01 | 45,66 | 46,01 | 45,66 | 46,02 | 45,67 |
| | 45,94 | | 45,94 | | 45,94 | | 45,94 | | 45,90 | | 45,91 | | 45,91 | | 45,92 | |
| | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,05 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | |
| АБВГ.XXX–1700 (АЗУ ₂) | 46,27 | 45,81 | 46,28 | 45,81 | 46,28 | 45,81 | 46,27 | 45,81 | 46,19 | 45,76 | 46,21 | 45,78 | 46,22 | 45,78 | 46,23 | 45,79 |
| | 46,10 | | 46,10 | | 46,10 | | 46,10 | | 46,05 | | 46,06 | | 46,07 | | 46,07 | |
| | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,05 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | |
| АБВГ.XXX–1800 (И100) | 47,89 | 46,69 | 47,92 | 46,71 | 47,92 | 46,71 | 47,83 | 46,66 | 47,19 | 46,31 | 47,33 | 46,39 | 47,34 | 46,39 | 47,38 | 46,42 |
| | 47,10 | | 47,11 | | 47,12 | | 47,06 | | 46,67 | | 46,75 | | 46,76 | | 46,78 | |
| | 45,09 | | 45,09 | | 45,09 | | 45,09 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,09 | |
| АБВГ.XXX–1ууу (Ф100) | 49,91 | | 50,13 | | 50,17 | | 50,11 | | 48,36 | | 48,85 | | 48,90 | | 49,20 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док-м. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

Продолжение таблицы 4.1

| Обозначение блока БЭР | Расчетные значения температур блоков при различных режимах °С | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| | Режим I | | Режим II | | Режим III | | Режим IV | | Режим V | | Режим VI | | Режим VII | | Режим VIII | |
| | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение |
| АБВГ.ХХХ–2100 (СН27) | 59,11 | 54,29 | 59,19 | 54,62 | 59,23 | 54,65 | 58,22 | 53,94 | 52,68 | 50,17 | 53,75 | 50,90 | 53,81 | 50,94 | 53,92 | 51,00 |
| | 58,58 | | 58,63 | | 58,66 | | 57,62 | | 52,28 | | 53,32 | | 53,36 | | 53,42 | |
| | 45,18 | | 46,05 | | 46,05 | | 45,97 | | 45,56 | | 45,64 | | 45,64 | | 45,65 | |
| АБВГ.ХХХ–2100 (СН27) | 53,21 | 49,89 | 53,27 | 49,89 | 53,29 | 49,90 | 52,74 | 49,57 | 49,60 | 47,70 | 50,21 | 48,07 | 50,25 | 48,09 | 53,32 | 49,13 |
| | 51,33 | | 51,27 | | 51,28 | | 50,83 | | 48,43 | | 48,90 | | 48,92 | | 48,97 | |
| | 45,14 | | 45,14 | | 45,14 | | 45,13 | | 45,08 | | 45,09 | | 45,09 | | 45,09 | |
| АБВГ.ХХХ–2200 (УП СН27) | 47,01 | 46,13 | 47,03 | 46,14 | 47,04 | 46,14 | 46,98 | 46,11 | 46,59 | 45,90 | 46,68 | 45,95 | 46,69 | 45,96 | 46,71 | 45,97 |
| | 46,33 | | 46,35 | | 46,35 | | 46,32 | | 46,09 | | 46,14 | | 46,14 | | 46,16 | |
| | 45,04 | | 45,04 | | 45,04 | | 45,04 | | 45,03 | | 45,04 | | 45,04 | | 45,04 | |
| АБВГ.ХХХ–2300 (И27) | 46,40 | 45,85 | 46,41 | 45,85 | 46,41 | 45,85 | 46,40 | 45,85 | 46,27 | 45,78 | 46,30 | 45,80 | 46,30 | 45,80 | 46,32 | 45,81 |
| | 46,10 | | 46,10 | | 46,10 | | 46,10 | | 46,03 | | 46,04 | | 46,05 | | 46,05 | |
| | 45,05 | | 45,05 | | 45,05 | | 45,06 | | 45,05 | | 45,05 | | 45,05 | | 45,05 | |
| АБВГ.ХХХ–2400 (БЭК) | 45,79 | 45,54 | 47,12 | 46,34 | 46,51 | 45,95 | 47,79 | 46,74 | 46,17 | 45,75 | 47,86 | 46,78 | 47,07 | 46,28 | 48,78 | 47,32 |
| | 45,75 | | 46,79 | | 46,26 | | 47,29 | | 46,01 | | 47,36 | | 46,66 | | 48,03 | |
| | 45,07 | | 45,11 | | 45,09 | | 45,13 | | 45,08 | | 45,13 | | 45,10 | | 45,15 | |
| АБВГ.ХХХ–2500 (БАТ) | 46,87 | 46,14 | 46,89 | 46,15 | 46,89 | 46,15 | 46,86 | 46,13 | 46,61 | 45,99 | 46,67 | 46,03 | 46,67 | 46,03 | 46,69 | 46,04 |
| | 46,46 | | 46,47 | | 46,47 | | 46,45 | | 46,30 | | 46,34 | | 46,34 | | 46,35 | |
| | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,07 | | 45,08 | | 45,08 | | 45,08 | |

Окончание таблицы 4.1

| Обозначение блока БЭР | Расчетные значения температур блоков при различных режимах °С | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|
| | Режим I | | Режим II | | Режим III | | Режим IV | | Режим V | | Режим VI | | Режим VII | | Режим VIII | |
| | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение | По объемам (верх, середина, низ) | Среднее значение |
| АБВГ.ХХХ–2600 (БКУ) | 46,55 | 45,93 | 46,56 | 45,94 | 46,57 | 45,94 | 46,55 | 45,93 | 46,37 | 45,84 | 46,42 | 45,86 | 46,42 | 45,86 | 46,44 | 45,87 |
| | 46,19 | | 46,20 | | 46,20 | | 46,19 | | 46,09 | | 46,11 | | 46,12 | | | |
| | 45,05 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,06 | | 45,05 | | 45,05 | | 45,05 | | 45,06 | |
| АБВГ.ХХХ–2xxx (БП БЭР) | 48,86 | 47,23 | 48,90 | 47,25 | 48,91 | 47,26 | 48,75 | 47,17 | 47,69 | 46,59 | 47,91 | 46,71 | 47,93 | 46,71 | 47,98 | 46,74 |
| | 47,74 | | 47,76 | | 47,77 | | 47,65 | | 46,98 | | 47,12 | | 47,12 | | 47,15 | |
| | 45,10 | | 45,10 | | 45,10 | | 45,10 | | 45,09 | | 45,09 | | 45,09 | | 45,09 | |
| АБВГ.ХХХ–3zzz (Ф27) | 49,99 | | 50,14 | | 50,17 | | 50,07 | | 48,59 | | 48,98 | | 49,01 | | 49,21 | |

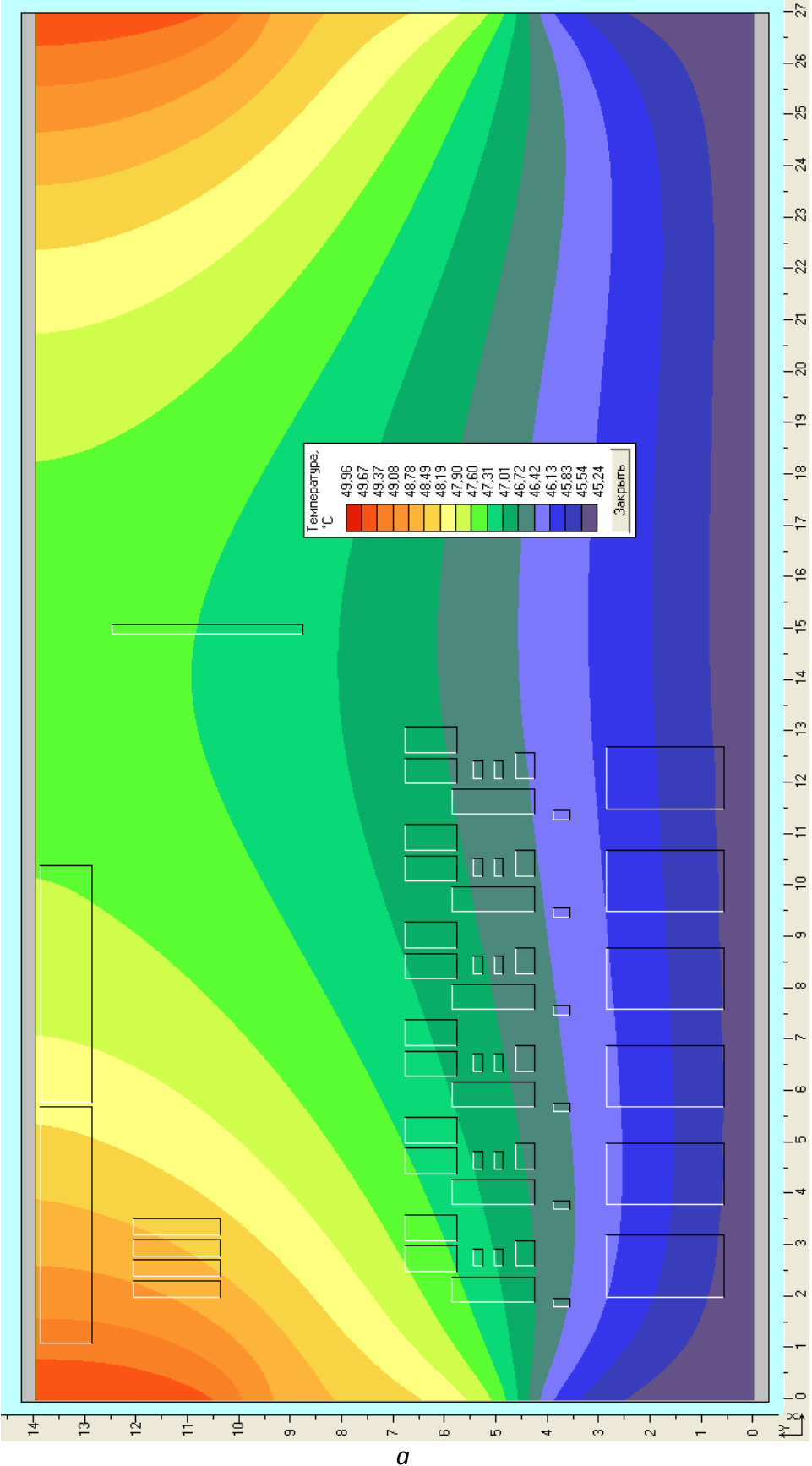


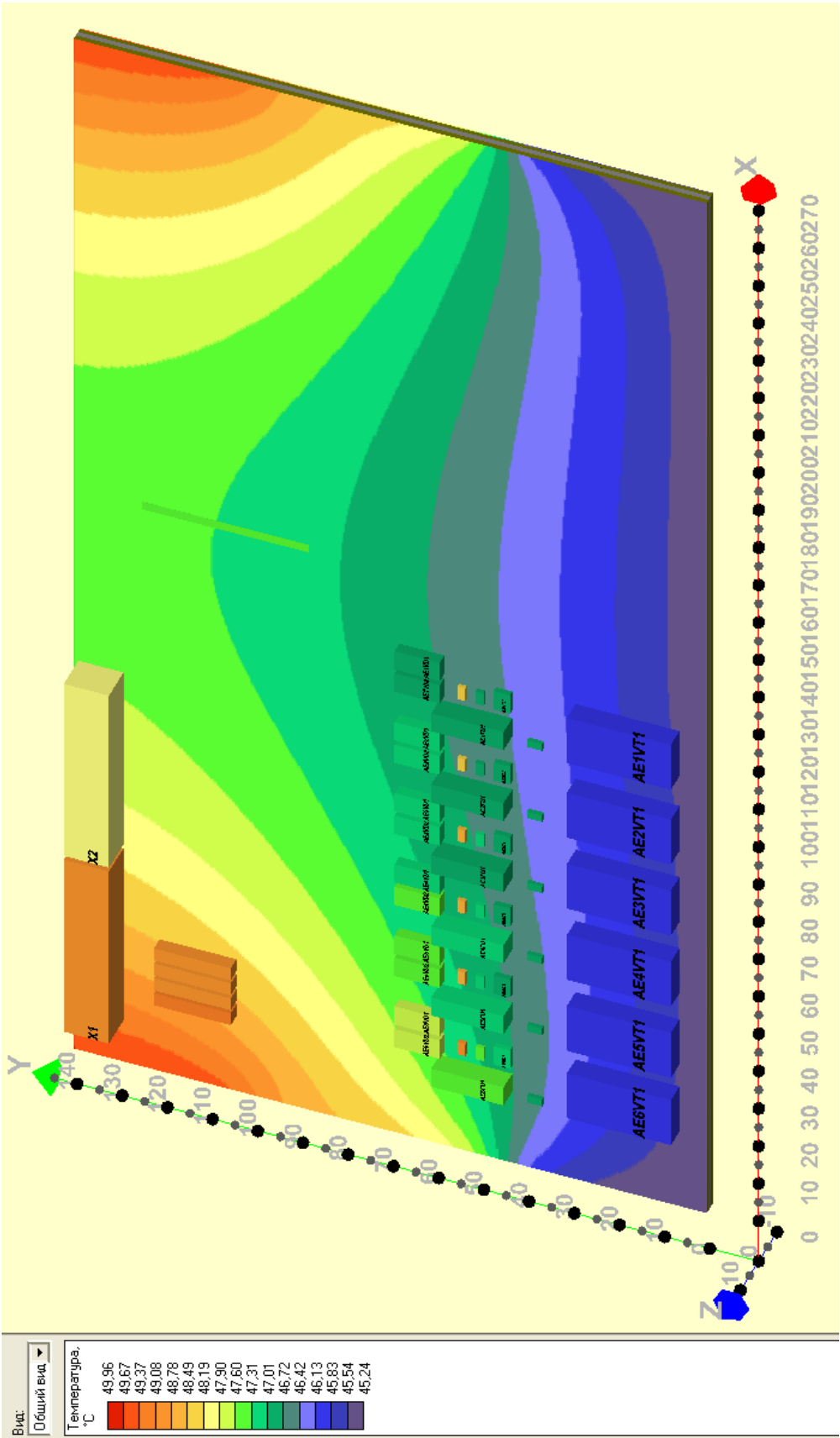
Рисунок 4.2 – Расчет тепловых характеристик для блока АБВГ.XXX-14mm для режима «ожидание» (а – изотермы, б – термограмма в виде 3D-модели, в – температуры ЭРИ)

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |



6

Рисунок 4.2 – Продолжение

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

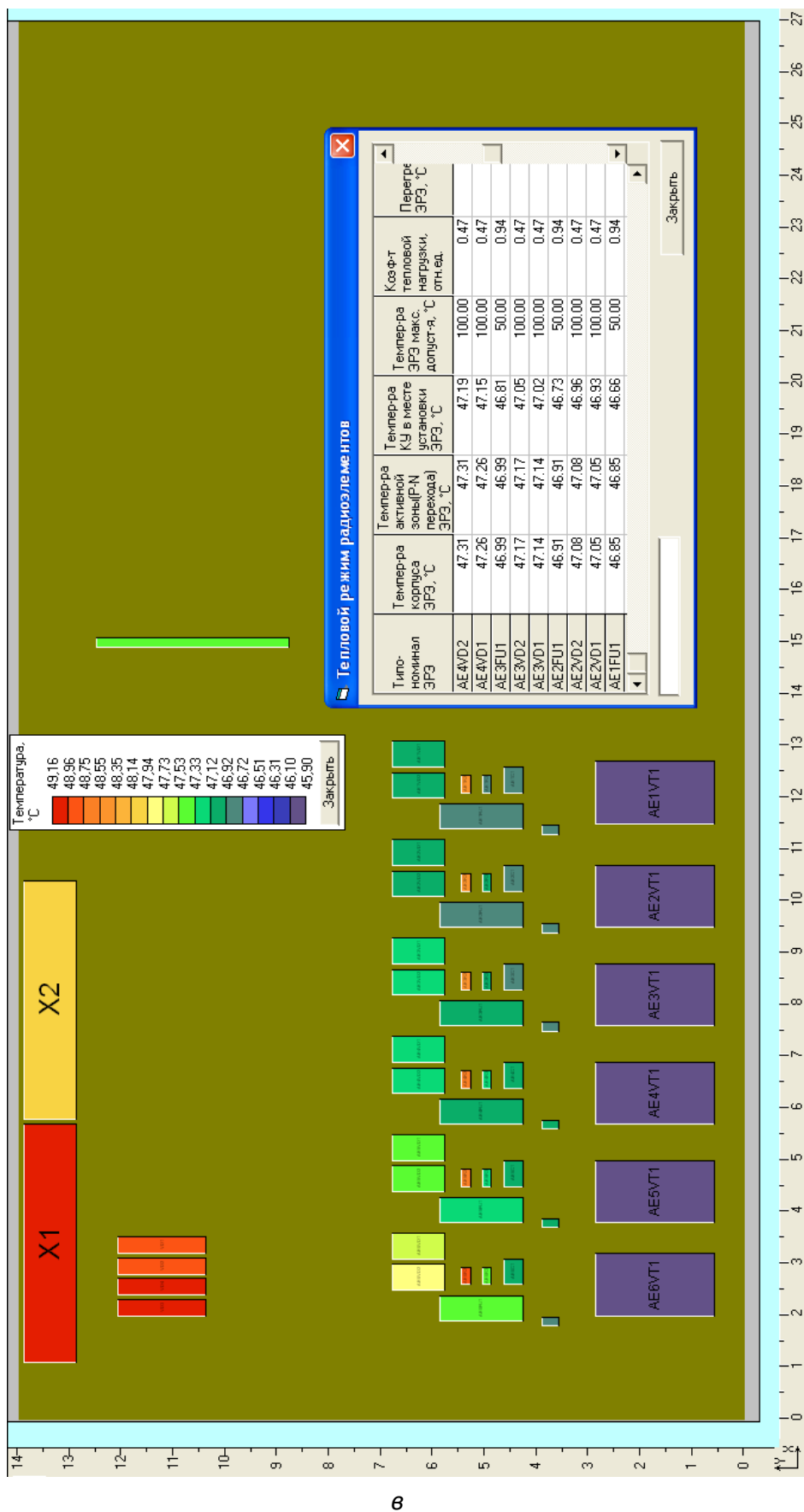


Рисунок 4.2 – Окончание

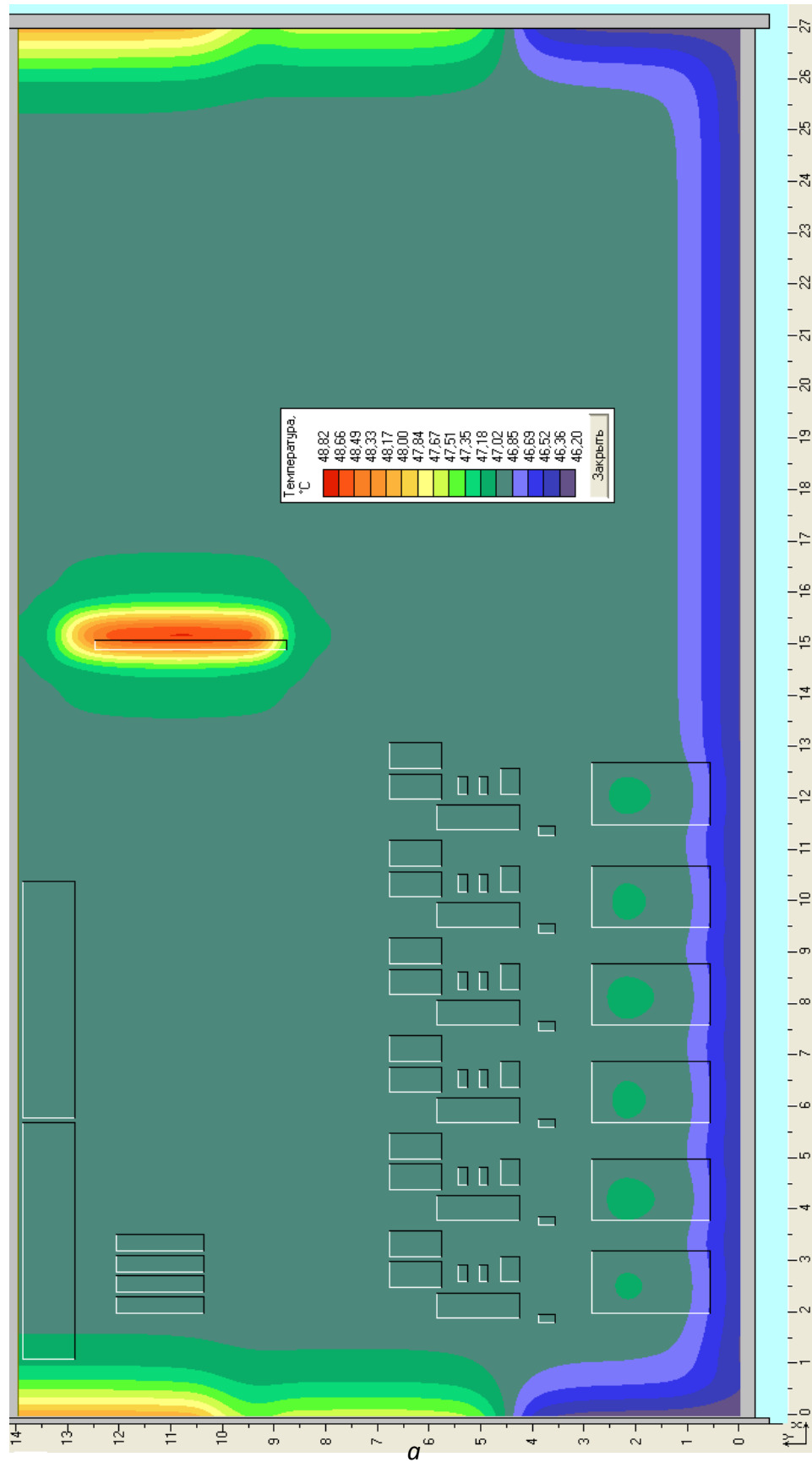
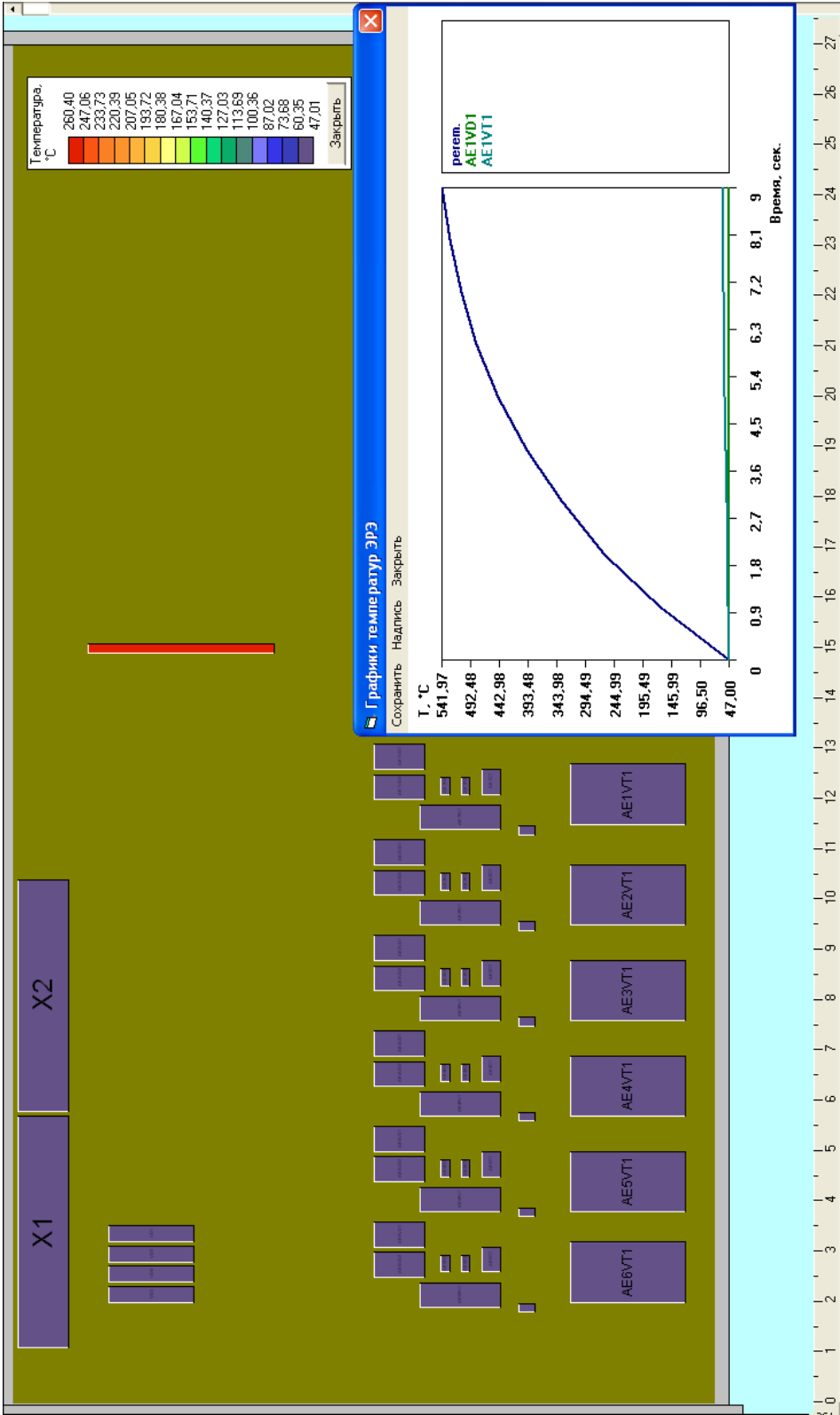


Рисунок 4.3 – Расчет тепловых характеристик для блока АБВГ.ХХХ-14mm для режима «выжигание печатного проводника» (а – изотермы, б – зависимость температур ЭРИ от времени)

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № док-м. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ



6
Рисунок 4.3 – Окончание

Выводы

Результаты проведенных средствами математического моделирования исследований показали следующее:

1. Интегральные температуры блоков, входящих в состав БЭР, для наиболее нагруженного режима лежат в диапазоне от 45,53 до 54,29 °С;
2. Перегревы относительно сотованели (+45 °С) кронштейна и боевой панели, входящих в состав конструкции БЭР, для наиболее нагруженного режима составляют не более +9,37 °С;
3. Значения температур ЭРИ, входящих в состав блока подгрузки СН БС (АБВГ.ХХХ-14mm), для всех режимов не превышают значений, заданных в 240-ххх-06 ТЗ ТЭ (см. таблицу 1.5 и приложение Б).

В приложении В приведена интегрированная табличная форма расчетных характеристик ЭРИ (используется в дальнейшем для анализа показателей надежности с применением подсистемы АСОНИКА-К), в которую также занесены тепловые режимы работы ЭРИ блока СН БС (АБВГ.ХХХ-14mm).

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Инв. № подл. | Подпись и дата | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | Лист |
| | | | | | | | | | | | | | 49 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Результаты анализа тепловых характеристик БЭР

Результаты анализа ТХ для режима «Ожидание» – режим БЭР/«СН27 + СН БС»

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
Размерность матрицы 247
Начальное число ненулевых элементов 1885
Число ненулевых элементов в факторизованной матрице.. 5369

* ТАБЛИЦА ТЕМПЕРАТУР В УЗЛАХ М Т П *

| N УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | Значение темпер-ры, Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|
| 1 | МТП 2400. Верх | 45.79 |
| 2 | МТП 2400. Середина | 45.75 |
| 3 | МТП 2400. Низ | 45.07 |
| 4 | МТП Сопотанель | 45.01 |
| 5 | МТП 2400. Левая панель. Верх | 45.77 |
| 6 | МТП 2400. Левая панель. Середина | 45.71 |
| 7 | МТП 2400. Левая панель. Низ | 45.06 |
| 8 | МТП 2400. Правая панель. Верх | 45.77 |
| 9 | МТП 2400. Правая панель. Середина | 45.72 |
| 10 | МТП 2400. Правая панель. Низ | 45.06 |
| 11 | МТП 2400. Лицевая панель | 45.96 |
| 12 | МТП Окр. среда. | 40.00 |
| 13 | МТП Передняя панель | 45.16 |
| 14 | МТП 1500_1. Верх | 45.80 |
| 15 | МТП 1500_1. Середина | 45.53 |
| 16 | МТП 1500_1. Низ | 45.02 |
| 17 | МТП 1500_1. Левая панель. Верх | 45.81 |
| 18 | МТП 1500_1. Левая панель. Середина | 45.54 |
| 19 | МТП 1500_1. Левая панель. Низ | 45.02 |
| 20 | МТП 1500_1. Правая панель. Верх | 45.81 |
| 21 | МТП 1500_1. Правая панель. Середина | 45.54 |
| 22 | МТП 1500_1. Правая панель. Низ | 45.02 |
| 23 | МТП 1500_1. Лицевая панель | 46.32 |
| 24 | МТП 1500_2. Верх | 46.20 |
| 25 | МТП 1500_2. Середина | 45.75 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

| | | |
|-------------------|--|------|
| АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | | Лист |
| | | 50 |

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-----------------------------|
| 26 | МТП 1500_2. Низ | 45.03 |
| 27 | МТП 1500_2. Левая панель. Верх | 46.21 |
| 28 | МТП 1500_2. Левая панель. Середина | 45.76 |
| 29 | МТП 1500_2. Левая панель. Низ | 45.03 |
| 30 | МТП 1500_2. Правая панель. Верх | 46.21 |
| 31 | МТП 1500_2. Правая панель. Середина | 45.76 |
| 32 | МТП 1500_2. Правая панель. Низ | 45.03 |
| 33 | МТП 1500_2. Лицевая панель | 46.89 |
| 34 | МТП Задняя панель | 44.44 |
| 35 | МТП 1300_1. Верх | 47.14 |
| 36 | МТП 1300_1. Середина | 46.39 |
| 37 | МТП 1300_1. Низ | 45.04 |
| 38 | МТП 1300_1. Левая панель. Верх | 47.16 |
| 39 | МТП 1300_1. Левая панель. Середина | 46.41 |
| 40 | МТП 1300. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 41 | МТП 1300_1. Правая панель. Верх | 47.16 |
| 42 | МТП 1300. Правая панель. Середина | 46.41 |
| 43 | МТП 1300_1. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 44 | МТП 1300_1. Лицевая панель | 47.67 |
| 45 | МТП 1300_2. Верх | 49.02 |
| 46 | МТП 1300_2. Середина | 47.83 |
| 47 | МТП 1300_2. Низ | 45.07 |
| 48 | МТП 1300_2. Левая панель. Верх | 49.04 |
| 49 | МТП 1300_2. Левая панель. Середина | 47.86 |
| 50 | МТП 1300. Левая панель. Низ | 45.08 |
| 51 | МТП 1300_2. Правая панель. Верх | 49.04 |
| 52 | МТП 1300_2. Правая панель. Середина | 47.86 |
| 53 | МТП 1300_2. Правая панель. Низ | 45.08 |
| 54 | МТП 1300_2. Лицевая панель | 48.68 |
| 55 | МТП 1100_1. Верх | 52.53 |
| 56 | МТП 1100_1. Середина | 51.33 |
| 57 | МТП 1100_1. Низ | 45.37 |
| 58 | МТП 1100_1. Левая панель. Верх | 52.44 |
| 59 | МТП 1100_1. Левая панель. Середина | 51.19 |
| 60 | МТП 1100_1. Левая панель. Низ | 45.29 |
| 61 | МТП 1100_1. Правая панель. Верх | 52.44 |

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | Подпись и дата |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

51

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| 62 | МТП | 1100_1. Правая панель. Середина | 51.19 |
| 63 | МТП | 1100_1. Правая панель. Низ | 45.29 |
| 64 | МТП | 1ууу | 49.91 |
| 65 | МТП | 1100_2. Верх | 53.92 |
| 66 | МТП | 1100_2. Середина | 51.88 |
| 67 | МТП | 1100_2. Низ | 45.17 |
| 68 | МТП | 1100_2. Левая панель. Верх | 53.97 |
| 69 | МТП | 1100_2. Левая панель. Середина | 51.98 |
| 70 | МТП | 1100_2. Левая панель. Низ | 45.18 |
| 71 | МТП | 1100_2. Правая панель. Верх | 53.97 |
| 72 | МТП | 1100_2. Правая панель. Середина | 51.98 |
| 73 | МТП | 1100_2. Правая панель. Низ | 45.18 |
| 74 | МТП | 2100_1. Верх | 59.11 |
| 75 | МТП | 2100_1. Середина | 58.58 |
| 76 | МТП | 2100_1. Низ | 46.05 |
| 77 | МТП | 2100_1. Левая панель. Верх | 58.71 |
| 78 | МТП | 2100_1. Левая панель. Середина | 58.02 |
| 79 | МТП | 2100_1. Левая панель. Низ | 45.77 |
| 80 | МТП | 2100_1. Правая панель. Верх | 58.71 |
| 81 | МТП | 2100_1. Правая панель. Середина | 58.02 |
| 82 | МТП | 2100_1. Правая панель. Низ | 45.77 |
| 83 | МТП | 2100_2. Верх | 53.21 |
| 84 | МТП | 2100_2. Середина | 51.23 |
| 85 | МТП | 2100_2. Низ | 45.14 |
| 86 | МТП | 2100_2. Левая панель. Верх | 53.26 |
| 87 | МТП | 2100_2. Левая панель. Середина | 51.33 |
| 88 | МТП | 2100_2. Левая панель. Низ | 45.13 |
| 89 | МТП | 2100_2. Правая панель. Верх | 53.26 |
| 90 | МТП | 2100_2. Правая панель. Середина | 51.33 |
| 91 | МТП | 2100_2. Правая панель. Низ | 45.13 |
| 92 | МТП | 3zzz | 49.99 |
| 93 | МТП | 14mm. Верх | 50.15 |
| 94 | МТП | 14mm. Середина | 48.54 |
| 95 | МТП | 14mm. Низ | 45.08 |
| 96 | МТП | 14mm. Левая панель. Верх | 50.19 |
| 97 | МТП | 14mm. Левая панель. Середина | 48.58 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

52

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-----------------------------|
| 98 | МТП 14mm. Левая панель. Низ | 45.07 |
| 99 | МТП 14mm. Правая панель. Верх | 50.19 |
| 100 | МТП 14mm. Правая панель. Середина | 48.58 |
| 101 | МТП 14mm. Правая панель. Низ | 45.07 |
| 102 | МТП 2xxx. Верх | 48.86 |
| 103 | МТП 2xxx. Середина | 47.74 |
| 104 | МТП 2xxx. Низ | 45.10 |
| 105 | МТП 2xxx. Левая панель. Верх | 48.87 |
| 106 | МТП 2xxx. Левая панель. Середина | 47.73 |
| 107 | МТП 2xxx. Левая панель. Низ | 45.08 |
| 108 | МТП 2xxx. Правая панель. Верх | 48.87 |
| 109 | МТП 2xxx. Правая панель. Середина | 47.73 |
| 110 | МТП 2xxx. Правая панель. Низ | 45.08 |
| 111 | МТП 1800. Верх | 47.89 |
| 112 | МТП 1800. Середина | 47.10 |
| 113 | МТП 1800. Низ | 45.09 |
| 114 | МТП 1800. Левая панель. Верх | 47.88 |
| 115 | МТП 1800. Левая панель. Середина | 47.08 |
| 116 | МТП 1800. Левая панель. Низ | 45.07 |
| 117 | МТП 1800. Правая панель. Верх | 47.88 |
| 118 | МТП 1800. Правая панель. Середина | 47.08 |
| 119 | МТП 1800. Правая панель. Низ | 45.07 |
| 120 | МТП 1800. Лицевая панель | 48.72 |
| 121 | МТП 2200. Верх | 47.01 |
| 122 | МТП 2200. Середина | 46.33 |
| 123 | МТП 2200. Низ | 45.04 |
| 124 | МТП 2200. Левая панель. Верх | 47.02 |
| 125 | МТП 2200. Левая панель. Середина | 46.35 |
| 126 | МТП 2200. Левая панель. Низ | 45.03 |
| 127 | МТП 2200. Правая панель. Верх | 47.02 |
| 128 | МТП 2200. Правая панель. Середина | 46.34 |
| 129 | МТП 2200. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 130 | МТП 2200. Лицевая панель | 47.71 |
| 131 | МТП 2500. Верх | 46.87 |
| 132 | МТП 2500. Середина | 46.46 |
| 133 | МТП 2500. Низ | 45.08 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

53

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 134 | МТП | 2500. Левая панель. Верх | 46.86 |
| 135 | МТП | 2500. Левая панель. Середина | 46.44 |
| 136 | МТП | 2500. Левая панель. Низ | 45.06 |
| 137 | МТП | 2500. Правая панель. Верх | 46.86 |
| 138 | МТП | 2500. Правая панель. Середина | 46.44 |
| 139 | МТП | 2500. Правая панель. Низ | 45.06 |
| 140 | МТП | 2500. Лицевая панель | 46.93 |
| 141 | МТП | 2600. Верх | 46.55 |
| 142 | МТП | 2600. Середина | 46.19 |
| 143 | МТП | 2600. Низ | 45.05 |
| 144 | МТП | 2600. Левая панель. Верх | 46.55 |
| 145 | МТП | 2600. Левая панель. Середина | 46.18 |
| 146 | МТП | 2600. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 147 | МТП | 2600. Правая панель. Верх | 46.55 |
| 148 | МТП | 2600. Правая панель. Середина | 46.18 |
| 149 | МТП | 2600. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 150 | МТП | 2600. Лицевая панель | 46.32 |
| 151 | МТП | 2300. Верх | 46.40 |
| 152 | МТП | 2300. Середина | 46.10 |
| 153 | МТП | 2300. Низ | 45.05 |
| 154 | МТП | 2300. Левая панель. Верх | 46.39 |
| 155 | МТП | 2300. Левая панель. Середина | 46.09 |
| 156 | МТП | 2300. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 157 | МТП | 2300. Правая панель. Верх | 46.39 |
| 158 | МТП | 2xxx. Правая панель. Середина | 46.09 |
| 159 | МТП | 2300. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 160 | МТП | 2300. Лицевая панель | 45.86 |
| 161 | МТП | 1200. Верх | 46.37 |
| 162 | МТП | 1200. Середина | 46.15 |
| 163 | МТП | 1200. Низ | 45.06 |
| 164 | МТП | 1200. Левая панель. Верх | 46.36 |
| 165 | МТП | 1200. Левая панель. Середина | 46.14 |
| 166 | МТП | 1200. Левая панель. Низ | 45.05 |
| 167 | МТП | 1200. Правая панель. Верх | 46.36 |
| 168 | МТП | 1200. Правая панель. Середина | 46.14 |
| 169 | МТП | 1200. Правая панель. Низ | 45.05 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

54

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 170 | МТП | 1200. Лицевая панель | 45.50 |
| 171 | МТП | 1700. Верх | 46.27 |
| 172 | МТП | 1700. Середина | 46.10 |
| 173 | МТП | 1700. Низ | 45.06 |
| 174 | МТП | 1700. Левая панель. Верх | 46.26 |
| 175 | МТП | 1700. Левая панель. Середина | 46.08 |
| 176 | МТП | 1700. Левая панель. Низ | 45.05 |
| 177 | МТП | 1700. Правая панель. Верх | 46.26 |
| 178 | МТП | 1700. Правая панель. Середина | 46.08 |
| 179 | МТП | 1700. Правая панель. Низ | 45.05 |
| 180 | МТП | 1700. Лицевая панель | 45.23 |
| 181 | МТП | 1600. Верх | 46.06 |
| 182 | МТП | 1600. Середина | 45.94 |
| 183 | МТП | 1600. Низ | 45.06 |
| 184 | МТП | 1600. Левая панель. Верх | 46.05 |
| 185 | МТП | 1600. Левая панель. Середина | 45.93 |
| 186 | МТП | 1600. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 187 | МТП | 1600. Правая панель. Верх | 46.05 |
| 188 | МТП | 1600. Правая панель. Середина | 45.93 |
| 189 | МТП | 1600. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 190 | МТП | 1600. Лицевая панель | 45.02 |
| 191 | МТП | 2400. Основание. Лево | 45.04 |
| 192 | МТП | 2400. Основание. Центр | 45.04 |
| 193 | МТП | 2400. Основание. Право | 45.04 |
| 194 | МТП | 1500_1. Основание. Лево | 45.02 |
| 195 | МТП | 1500_1. Основание. Центр | 45.02 |
| 196 | МТП | 1500_1. Основание. Право | 45.02 |
| 197 | МТП | 1500_2. Основание. Лево | 45.02 |
| 198 | МТП | 1500_2. Основание. Центр | 45.02 |
| 199 | МТП | 1500_2. Основание. Право | 45.02 |
| 200 | МТП | 1300_1. Основание. Лево | 45.03 |
| 201 | МТП | 1300_1. Основание. Центр | 45.03 |
| 202 | МТП | 1300_1. Основание. Право | 45.03 |
| 203 | МТП | 1300_2. Основание. Лево | 45.05 |
| 204 | МТП | 1300_2. Основание. Центр | 45.05 |
| 205 | МТП | 1300_2. Основание. Право | 45.05 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

55

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|--------------------------|-----------------------------|
| 206 | МТП | 1100_1. Основание. Лево | 45.15 |
| 207 | МТП | 1100_1. Основание. Центр | 45.19 |
| 208 | МТП | 1100_1. Основание. Право | 45.15 |
| 209 | МТП | 1100_2. Основание. Лево | 45.10 |
| 210 | МТП | 1100_2. Основание. Центр | 45.10 |
| 211 | МТП | 1100_2. Основание. Право | 45.10 |
| 212 | МТП | 2100_1. Основание. Лево | 45.39 |
| 213 | МТП | 2100_1. Основание. Центр | 45.52 |
| 214 | МТП | 2100_1. Основание. Право | 45.39 |
| 215 | МТП | 2100_2. Основание. Лево | 45.07 |
| 216 | МТП | 2100_2. Основание. Центр | 45.08 |
| 217 | МТП | 2100_2. Основание. Право | 45.07 |
| 218 | МТП | 14mm. Основание. Лево | 45.04 |
| 219 | МТП | 14mm. Основание. Центр | 45.05 |
| 220 | МТП | 14mm. Основание. Право | 45.04 |
| 221 | МТП | 2xxx. Основание. Лево | 45.05 |
| 222 | МТП | 2xxx. Основание. Центр | 45.06 |
| 223 | МТП | 2xxx. Основание. Право | 45.05 |
| 224 | МТП | 1800. Основание. Лево | 45.04 |
| 225 | МТП | 1800. Основание. Центр | 45.05 |
| 226 | МТП | 1800. Основание. Право | 45.04 |
| 227 | МТП | 2200. Основание. Лево | 45.02 |
| 228 | МТП | 2200. Основание. Центр | 45.03 |
| 229 | МТП | 2200. Основание. Право | 45.03 |
| 230 | МТП | 2500. Основание. Лево | 45.04 |
| 231 | МТП | 2500. Основание. Центр | 45.05 |
| 232 | МТП | 2500. Основание. Право | 45.04 |
| 233 | МТП | 2600. Основание. Лево | 45.03 |
| 234 | МТП | 2600. Основание. Центр | 45.03 |
| 235 | МТП | 2600. Основание. Право | 45.03 |
| 236 | МТП | 2300. Основание. Лево | 45.03 |
| 237 | МТП | 2300. Основание. Центр | 45.03 |
| 238 | МТП | 2300. Основание. Право | 45.03 |
| 239 | МТП | 1200. Основание. Лево | 45.03 |
| 240 | МТП | 1200. Основание. Центр | 45.04 |
| 241 | МТП | 1200. Основание. Право | 45.03 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

56

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|------------------------|-----------------------------|
| 242 | МТП | 1700. Основание. Лево | 45.03 |
| 243 | МТП | 1700. Основание. Центр | 45.04 |
| 244 | МТП | 1700. Основание. Право | 45.03 |
| 245 | МТП | 1600. Основание. Лево | 45.03 |
| 246 | МТП | 1600. Основание. Центр | 45.04 |
| 247 | МТП | 1600. Основание. Право | 45.03 |

Программный комплекс ТРИАНА v.2.10.00
 Copyright ©С 2006-2014,
 А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
 В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
 Тел: 8-(913)-571-54-71,
 E-mail: triana@triana.su,
 WWW: http://www.triana.su

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------------------|------|----------|---------|------|------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата | Инв. № подл. | Подпись и дата | <p>АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ</p> | | | | | Лист |
| | | | | | | | Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | 57 |

Результаты анализа ТХ для режима «Выжигание печатного проводника»–
режим БЭРVIII–«CH27 + PУ1 + PУ2 + ЗУ1 + ЗУ2»

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
Размерность матрицы 247
Начальное число ненулевых элементов 1885
Число ненулевых элементов в факторизованной матрице.. 5369

* ТАБЛИЦА ТЕМПЕРАТУР В УЗЛАХ М Т П *

| N УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 | МТП | 2400. Верх | 48.73 |
| 2 | МТП | 2400. Середина | 47.99 |
| 3 | МТП | 2400. Низ | 45.15 |
| 4 | МТП | Сопопанель | 45.02 |
| 5 | МТП | 2400. Левая панель. Верх | 48.71 |
| 6 | МТП | 2400. Левая панель. Середина | 47.99 |
| 7 | МТП | 2400. Левая панель. Низ | 45.17 |
| 8 | МТП | 2400. Правая панель. Верх | 48.71 |
| 9 | МТП | 2400. Правая панель. Середина | 47.99 |
| 10 | МТП | 2400. Правая панель. Низ | 45.17 |
| 11 | МТП | 2400. Лицевая панель | 47.46 |
| 12 | МТП | Окр. среда. | 40.00 |
| 13 | МТП | Передняя панель | 46.85 |
| 14 | МТП | 1500_1. Верх | 51.20 |
| 15 | МТП | 1500_1. Середина | 50.30 |
| 16 | МТП | 1500_1. Низ | 45.30 |
| 17 | МТП | 1500_1. Левая панель. Верх | 51.13 |
| 18 | МТП | 1500_1. Левая панель. Середина | 50.19 |
| 19 | МТП | 1500_1 . Левая панель. Низ | 45.24 |
| 20 | МТП | 1500_1. Правая панель. Верх | 51.13 |
| 21 | МТП | 1500_1. Правая панель. Середина | 50.19 |
| 22 | МТП | 1500_1. Правая панель. Низ | 45.24 |
| 23 | МТП | 1500_1. Лицевая панель | 47.76 |
| 24 | МТП | 1500_2. Верх | 52.16 |
| 25 | МТП | 1500_2. Середина | 51.02 |
| 26 | МТП | 1500_2. Низ | 45.32 |
| 27 | МТП | 1500_2. Левая панель. Верх | 52.09 |
| 28 | МТП | 1500_2. Левая панель. Середина | 50.93 |

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | Подпись и дата |

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| 29 | МТП | 1500_2. Левая панель. Низ | 45.26 |
| 30 | МТП | 1500_2. Правая панель. Верх | 52.09 |
| 31 | МТП | 1500_2. Правая панель. Середина | 50.93 |
| 32 | МТП | 1500_2. Правая панель. Низ | 45.26 |
| 33 | МТП | 1500_2. Лицевая панель | 48.06 |
| 34 | МТП | Задняя панель | 44.41 |
| 35 | МТП | 1300_1. Верх | 52.00 |
| 36 | МТП | 1300_1. Середина | 50.79 |
| 37 | МТП | 1300_1. Низ | 45.30 |
| 38 | МТП | 1300_1. Левая панель. Верх | 51.95 |
| 39 | МТП | 1300_1. Левая панель. Середина | 50.72 |
| 40 | МТП | 1300. Левая панель. Низ | 45.24 |
| 41 | МТП | 1300_1. Правая панель. Верх | 51.95 |
| 42 | МТП | 1300. Правая панель. Середина | 50.72 |
| 43 | МТП | 1300_1. Правая панель. Низ | 45.24 |
| 44 | МТП | 1300_1. Лицевая панель | 48.33 |
| 45 | МТП | 1300_2. Верх | 51.13 |
| 46 | МТП | 1300_2. Середина | 50.04 |
| 47 | МТП | 1300_2. Низ | 45.28 |
| 48 | МТП | 1300_2. . Левая панель. Верх | 51.07 |
| 49 | МТП | 1300_2. Левая панель. Середина | 49.95 |
| 50 | МТП | 1300. Левая панель. Низ | 45.22 |
| 51 | МТП | 1300_2. Правая панель. Верх | 51.07 |
| 52 | МТП | 1300_2. Правая панель. Середина | 49.95 |
| 53 | МТП | 1300_2. Правая панель. Низ | 45.22 |
| 54 | МТП | 1300_2. Лицевая панель | 48.59 |
| 55 | МТП | 1100_1. Верх | 49.19 |
| 56 | МТП | 1100_1. Середина | 47.88 |
| 57 | МТП | 1100_1. Низ | 45.08 |
| 58 | МТП | 1100_1. Левая панель. Верх | 49.21 |
| 59 | МТП | 1100_1. Левая панель. Середина | 47.92 |
| 60 | МТП | 1100_1. Левая панель. Низ | 45.08 |
| 61 | МТП | 1100_1. Правая панель. Верх | 49.21 |
| 62 | МТП | 1100_1. Правая панель. Середина | 47.92 |
| 63 | МТП | 1100_1. Правая панель. Низ | 45.08 |
| 64 | МТП | 1ууу | 48.92 |

| | |
|----------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата |
| Взам. инв. № | Инв. № дубл. |
| Подпись и дата | Подпись и дата |
| Инв. № подл. | Инв. № дубл. |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ

Лист

59

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| 65 | МТП | 1100_2. Верх | 48.99 |
| 66 | МТП | 1100_2. Середина | 47.68 |
| 67 | МТП | 1100_2. Низ | 45.07 |
| 68 | МТП | 1100_2. Левая панель. Верх | 49.02 |
| 69 | МТП | 1100_2. Левая панель. Середина | 47.71 |
| 70 | МТП | 1100_2. Левая панель. Низ | 45.07 |
| 71 | МТП | 1100_2. Правая панель. Верх | 49.02 |
| 72 | МТП | 1100_2. Правая панель. Середина | 47.71 |
| 73 | МТП | 1100_2. Правая панель. Низ | 45.07 |
| 74 | МТП | 2100_1. Верх | 50.46 |
| 75 | МТП | 2100_1. Середина | 49.06 |
| 76 | МТП | 2100_1. Низ | 45.10 |
| 77 | МТП | 2100_1. Левая панель. Верх | 50.49 |
| 78 | МТП | 2100_1. Левая панель. Середина | 49.12 |
| 79 | МТП | 2100_1. Левая панель. Низ | 45.11 |
| 80 | МТП | 2100_1. Правая панель. Верх | 50.49 |
| 81 | МТП | 2100_1. Правая панель. Середина | 49.12 |
| 82 | МТП | 2100_1. Правая панель. Низ | 45.11 |
| 83 | МТП | 2100_2. Верх | 54.19 |
| 84 | МТП | 2100_2. Середина | 53.80 |
| 85 | МТП | 2100_2. Низ | 45.64 |
| 86 | МТП | 2100_2. Левая панель. Верх | 53.95 |
| 87 | МТП | 2100_2. Левая панель. Середина | 53.48 |
| 88 | МТП | 2100_2. Левая панель. Низ | 45.44 |
| 89 | МТП | 2100_2. Правая панель. Верх | 53.95 |
| 90 | МТП | 2100_2. Правая панель. Середина | 53.48 |
| 91 | МТП | 2100_2. Правая панель. Низ | 45.44 |
| 92 | МТП | 3zzz | 49.39 |
| 93 | МТП | 14mm. Верх | 50.66 |
| 94 | МТП | 14mm. Середина | 49.30 |
| 95 | МТП | 14mm. Низ | 45.10 |
| 96 | МТП | 14mm. Левая панель. Верх | 50.69 |
| 97 | МТП | 14mm. Левая панель. Середина | 49.36 |
| 98 | МТП | 14mm. Левая панель. Низ | 45.09 |
| 99 | МТП | 14mm. Правая панель. Верх | 50.69 |
| 100 | МТП | 14mm. Правая панель. Середина | 49.36 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

| | |
|-------------------|--|
| АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ | |
| | |

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 101 | МТП | 14mm. Правая панель. Низ | 45.09 |
| 102 | МТП | 2xxx. Верх | 49.11 |
| 103 | МТП | 2xxx. Середина | 48.03 |
| 104 | МТП | 2xxx. Низ | 45.11 |
| 105 | МТП | 2xxx. Левая панель. Верх | 49.11 |
| 106 | МТП | 2xxx. Левая панель. Середина | 48.03 |
| 107 | МТП | 2xxx. Левая панель. Низ | 45.09 |
| 108 | МТП | 2xxx. Правая панель. Верх | 49.11 |
| 109 | МТП | 2xxx. Правая панель. Середина | 48.03 |
| 110 | МТП | 2xxx. Правая панель. Низ | 45.09 |
| 111 | МТП | 1800. Верх | 48.00 |
| 112 | МТП | 1800. Середина | 47.21 |
| 113 | МТП | 1800. Низ | 45.09 |
| 114 | МТП | 1800. Левая панель. Верх | 47.99 |
| 115 | МТП | 1800. Левая панель. Середина | 47.20 |
| 116 | МТП | 1800. Левая панель. Низ | 45.07 |
| 117 | МТП | 1800. Правая панель. Верх | 47.99 |
| 118 | МТП | 1800. Правая панель. Середина | 47.20 |
| 119 | МТП | 1800. Правая панель. Низ | 45.07 |
| 120 | МТП | 1800. Лицевая панель | 48.27 |
| 121 | МТП | 2200. Верх | 47.05 |
| 122 | МТП | 2200. Середина | 46.38 |
| 123 | МТП | 2200. Низ | 45.04 |
| 124 | МТП | 2200. Левая панель. Верх | 47.06 |
| 125 | МТП | 2200. Левая панель. Середина | 46.39 |
| 126 | МТП | 2200. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 127 | МТП | 2200. Правая панель. Верх | 47.06 |
| 128 | МТП | 2200. Правая панель. Середина | 46.39 |
| 129 | МТП | 2200. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 130 | МТП | 2200. Лицевая панель | 47.38 |
| 131 | МТП | 2500. Верх | 46.88 |
| 132 | МТП | 2500. Середина | 46.47 |
| 133 | МТП | 2500. Низ | 45.08 |
| 134 | МТП | 2500. Левая панель. Верх | 46.87 |
| 135 | МТП | 2500. Левая панель. Середина | 46.45 |
| 136 | МТП | 2500. Левая панель. Низ | 45.06 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ

Лист

61

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 137 | МТП | 2500. Правая панель. Верх | 46.87 |
| 138 | МТП | 2500. Правая панель. Середина | 46.45 |
| 139 | МТП | 2500. Правая панель. Низ | 45.06 |
| 140 | МТП | 2500. Лицевая панель | 46.68 |
| 141 | МТП | 2600. Верх | 46.54 |
| 142 | МТП | 2600. Середина | 46.19 |
| 143 | МТП | 2600. Низ | 45.06 |
| 144 | МТП | 2600. Левая панель. Верх | 46.54 |
| 145 | МТП | 2600. Левая панель. Середина | 46.18 |
| 146 | МТП | 2600. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 147 | МТП | 2600. Правая панель. Верх | 46.54 |
| 148 | МТП | 2600. Правая панель. Середина | 46.18 |
| 149 | МТП | 2600. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 150 | МТП | 2600. Лицевая панель | 46.13 |
| 151 | МТП | 2300. Верх | 46.38 |
| 152 | МТП | 2300. Середина | 46.09 |
| 153 | МТП | 2300. Низ | 45.05 |
| 154 | МТП | 2300. Левая панель. Верх | 46.38 |
| 155 | МТП | 2300. Левая панель. Середина | 46.09 |
| 156 | МТП | 2300. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 157 | МТП | 2300. Правая панель. Верх | 46.38 |
| 158 | МТП | 2xxx. Правая панель. Середина | 46.09 |
| 159 | МТП | 2300. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 160 | МТП | 2300. Лицевая панель | 45.71 |
| 161 | МТП | 1200. Верх | 46.36 |
| 162 | МТП | 1200. Середина | 46.14 |
| 163 | МТП | 1200. Низ | 45.07 |
| 164 | МТП | 1200. Левая панель. Верх | 46.35 |
| 165 | МТП | 1200. Левая панель. Середина | 46.13 |
| 166 | МТП | 1200. Левая панель. Низ | 45.05 |
| 167 | МТП | 1200. Правая панель. Верх | 46.35 |
| 168 | МТП | 1200. Правая панель. Середина | 46.13 |
| 169 | МТП | 1200. Правая панель. Низ | 45.05 |
| 170 | МТП | 1200. Лицевая панель | 45.39 |
| 171 | МТП | 1700. Верх | 46.25 |
| 172 | МТП | 1700. Середина | 46.09 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ

Лист

62

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темпер., Град.Ц |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------|
| 173 | МТП | 1700. Низ | 45.06 |
| 174 | МТП | 1700. Левая панель. Верх | 46.24 |
| 175 | МТП | 1700. Левая панель. Середина | 46.07 |
| 176 | МТП | 1700. Левая панель. Низ | 45.05 |
| 177 | МТП | 1700. Правая панель. Верх | 46.24 |
| 178 | МТП | 1700. Правая панель. Середина | 46.07 |
| 179 | МТП | 1700. Правая панель. Низ | 45.05 |
| 180 | МТП | 1700. Лицевая панель | 45.14 |
| 181 | МТП | 1600. Верх | 46.04 |
| 182 | МТП | 1600. Середина | 45.93 |
| 183 | МТП | 1600. Низ | 45.06 |
| 184 | МТП | 1600. Левая панель. Верх | 46.03 |
| 185 | МТП | 1600. Левая панель. Середина | 45.92 |
| 186 | МТП | 1600. Левая панель. Низ | 45.04 |
| 187 | МТП | 1600. Правая панель. Верх | 46.03 |
| 188 | МТП | 1600. Правая панель. Середина | 45.92 |
| 189 | МТП | 1600. Правая панель. Низ | 45.04 |
| 190 | МТП | 1600. Лицевая панель | 44.95 |
| 191 | МТП | 2400. Основание. Лево | 45.09 |
| 192 | МТП | 2400. Основание. Центр | 45.08 |
| 193 | МТП | 2400. Основание. Право | 45.09 |
| 194 | МТП | 1500_1. Основание. Лево | 45.13 |
| 195 | МТП | 1500_1. Основание. Центр | 45.16 |
| 196 | МТП | 1500_1. Основание. Право | 45.13 |
| 197 | МТП | 1500_2. Основание. Лево | 45.14 |
| 198 | МТП | 1500_2. Основание. Центр | 45.17 |
| 199 | МТП | 1500_2. Основание. Право | 45.14 |
| 200 | МТП | 1300_1. Основание. Лево | 45.13 |
| 201 | МТП | 1300_1. Основание. Центр | 45.16 |
| 202 | МТП | 1300_1. Основание. Право | 45.13 |
| 203 | МТП | 1300_2. Основание. Лево | 45.12 |
| 204 | МТП | 1300_2. Основание. Центр | 45.15 |
| 205 | МТП | 1300_2. Основание. Право | 45.12 |
| 206 | МТП | 1100_1. Основание. Лево | 45.05 |
| 207 | МТП | 1100_1. Основание. Центр | 45.05 |
| 208 | МТП | 1100_1. Основание. Право | 45.05 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

Лист

63

| № УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|--------------------------|-----------------------------|
| 209 | МТП | 1100_2. Основание. Лево | 45.04 |
| 210 | МТП | 1100_2. Основание. Центр | 45.04 |
| 211 | МТП | 1100_2. Основание. Право | 45.04 |
| 212 | МТП | 2100_1. Основание. Лево | 45.06 |
| 213 | МТП | 2100_1. Основание. Центр | 45.06 |
| 214 | МТП | 2100_1. Основание. Право | 45.06 |
| 215 | МТП | 2100_2. Основание. Лево | 45.22 |
| 216 | МТП | 2100_2. Основание. Центр | 45.32 |
| 217 | МТП | 2100_2. Основание. Право | 45.22 |
| 218 | МТП | 14mm. Основание. Лево | 45.06 |
| 219 | МТП | 14mm. Основание. Центр | 45.06 |
| 220 | МТП | 14mm. Основание. Право | 45.06 |
| 221 | МТП | 2xxx. Основание. Лево | 45.05 |
| 222 | МТП | 2xxx. Основание. Центр | 45.06 |
| 223 | МТП | 2xxx. Основание. Право | 45.05 |
| 224 | МТП | 1800. Основание. Лево | 45.04 |
| 225 | МТП | 1800. Основание. Центр | 45.05 |
| 226 | МТП | 1800. Основание. Право | 45.04 |
| 227 | МТП | 2200. Основание. Лево | 45.03 |
| 228 | МТП | 2200. Основание. Центр | 45.03 |
| 229 | МТП | 2200. Основание. Право | 45.03 |
| 230 | МТП | 2500. Основание. Лево | 45.04 |
| 231 | МТП | 2500. Основание. Центр | 45.05 |
| 232 | МТП | 2500. Основание. Право | 45.04 |
| 233 | МТП | 2600. Основание. Лево | 45.03 |
| 234 | МТП | 2600. Основание. Центр | 45.04 |
| 235 | МТП | 2600. Основание. Право | 45.03 |
| 236 | МТП | 2300. Основание. Лево | 45.03 |
| 237 | МТП | 2300. Основание. Центр | 45.04 |
| 238 | МТП | 2300. Основание. Право | 45.03 |
| 239 | МТП | 1200. Основание. Лево | 45.03 |
| 240 | МТП | 1200. Основание. Центр | 45.04 |
| 241 | МТП | 1200. Основание. Право | 45.03 |
| 242 | МТП | 1700. Основание. Лево | 45.03 |
| 243 | МТП | 1700. Основание. Центр | 45.04 |
| 244 | МТП | 1700. Основание. Право | 45.03 |

Подпись и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.XXX-0 P17 ТЭ

Лист

64

| N УЗЛА | Наименование узла модели или фрагмента модели | | Значение темп-ры, Град.Ц |
|-----------|--|------------------------|-----------------------------|
| 245 | МТП | 1600. Основание. Лево | 45.03 |
| 246 | МТП | 1600. Основание. Центр | 45.04 |
| 247 | МТП | 1600. Основание. Право | 45.03 |

| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ

| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Результаты анализа тепловых характеристик блока АБВГ.ХХХ-14mm

Результаты анализа ТХ для режима «Ожидание» – режим БЭР/«CH27 + CH БС»

Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры
"АСОНИКА-Т"
Программный комплекс ТРиАНА v.2.10.00

Copyright ©С 2006-2014,
А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
В. И. Коваленок, С. В. Работин, М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
Тел:8-(913)-571-54-71,
E-mail: triana@triana.su,
WWW: http://www.triana.su

Управляющая информация :

Тип конструкции: 2-3 функциональная ячейка
Тип анализа : 1 стационарный режим
Расчет ФПЧ : 0 не производится
Тестовая информация:10 работа в составе ИС

О П И С А Н И Е ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

| | | |
|--|------------------------|----------|
| Размеры основания по оси OX | 270.00 | мм |
| OY | 140.00 | мм |
| OZ | 1.20 | мм |
| Ширина 1-го теплостока | 0.000 | мм |
| Ширина 2-го теплостока | 0.000 | мм |
| Материал основания ФЯ | Сплав Д16М | |
| Коэффициент теплопроводности основания ФЯ | 192.00 | Вт/м/К |
| Коэффициент черноты основания ФЯ | 0.85 | отн.ед. |
| Количество линий, дискретизирующих температурное поле КУ | по оси OX по оси OY | 22 14 |
| Шаг генерируемой сетки dx; dy, мм | 5.50 | 5.50 |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

ГИВКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ (ГПП)

| | | |
|---|-------------|--------|
| Размеры ГПП1 по оси OX | 270.00 | мм |
| OY | 140.00 | мм |
| OZ | 1.10 | мм |
| Материал ГПП1 | слоистаяпеч | |
| Кэфф. теплопроводности материала ГПП1 | 0.45 | Вт/м/К |
| Материалпроводников ГПП1 | МЕДЬ | |
| Кэфф. теплопроводности проводников ГПП1 | 386.00 | Вт/м/К |
| Кэфф. заплонения ГПП1 проводниками | 0.25 | отн.ед |
| Толщина проводников | 35.00 | мкм |

| | | |
|---|-------------|--------|
| Размеры ГПП2 по оси OX | 270.00 | мм |
| OY | 140.00 | мм |
| OZ | 0.90 | мм |
| Материал ГПП2 | слоистаяпеч | |
| Кэфф. теплопроводности материала ГПП2 | 0.45 | Вт/м/К |
| Материалпроводников ГПП2 | МЕДЬ | |
| Кэфф. теплопроводности проводников ГПП2 | 386.00 | Вт/м/К |
| Кэфф. заплонения ГПП2 проводниками | 0.25 | отн.ед |
| Толщина проводников | 35.00 | мкм |

О П И С А Н И Е Э Р Э

| Обозн. ЭРИ | Пов. уст. | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | P, мВт | Rtk, К/Вт | Rtv, К/Вт | Tmax, Гр.Ц | Кэфф. черн | H, мм | S, мм*мм | Ce, Дж/К | Типономинал | Объект установки (НК или ШИНА) | ТИП МТП ЭРИ | Rtk,К/Вт ЭРИ-шина |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|------------|------------|-------|----------|----------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------|
| AE6VT1 | 1 | 20.0 | 32.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6R1 | 1 | 18.0 | 19.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6C1 | 1 | 26.0 | 30.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6VD2 | 1 | 25.0 | 29.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| VD3 | 1 | 20.0 | 23.2 | 104.0 | 121.0 | 1. | 44.0 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 3. | 101. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6FU1 | 1 | 19.0 | 23.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6VD1 | 1 | 31.0 | 35.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6R2 | 1 | 26.0 | 29.4 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE6R3 | 1 | 26.0 | 29.4 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| VD4 | 1 | 24.0 | 27.2 | 104.0 | 121.0 | 1. | 44.0 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 3. | 101. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| VD2 | 1 | 28.0 | 31.2 | 104.0 | 121.0 | 1. | 44.0 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 3. | 101. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| VD1 | 1 | 32.0 | 35.2 | 104.0 | 121.0 | 1. | 44.0 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 3. | 101. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5FU1 | 1 | 38.0 | 42.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5VD2 | 1 | 44.0 | 48.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5VD1 | 1 | 50.0 | 54.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5R2 | 1 | 45.0 | 48.3 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5R3 | 1 | 45.0 | 48.3 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5C1 | 1 | 45.0 | 49.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |

| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| Обозн. ЭРИ | Пов. уст. | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | P, мВт | Rtk, К/Вт | Rtv, К/Вт | Tmax, Гр.Ц | Коэф. черн | H, мм | S, мм*мм | Ce, Дж/К | Типономинал | Объектустановки (НК или ШИНА) | ТИП МТП ЭРИ | Rtk, К/Вт ЭРИ-шина |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|------------|------------|-------|----------|----------|-------------|-------------------------------|-------------|--------------------|
| AE5R1 | 1 | 37.0 | 38.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE5VT1 | 1 | 38.0 | 50.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4FU1 | 1 | 57.0 | 61.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4VD2 | 1 | 63.0 | 67.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4VD1 | 1 | 69.0 | 73.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3FU1 | 1 | 76.0 | 80.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3VD2 | 1 | 82.0 | 86.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3VD1 | 1 | 88.0 | 92.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2FU1 | 1 | 95.0 | 99.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2VD2 | 1 | 101.0 | 105.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2VD1 | 1 | 107.0 | 111.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1FU1 | 1 | 114.0 | 118.8 | 43.0 | 59.0 | 0. | 3.8 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 276. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1VD2 | 1 | 120.0 | 124.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1VD1 | 1 | 126.0 | 130.9 | 58.0 | 68.0 | 1. | 10.2 | 0.0 | 100.0 | 0.9 | 3. | 100. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4R2 | 1 | 64.0 | 67.3 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3R2 | 1 | 83.0 | 86.3 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2R2 | 1 | 102.0 | 105.3 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1R2 | 1 | 121.0 | 124.3 | 53.0 | 54.8 | 5. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4R3 | 1 | 64.0 | 67.3 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3R3 | 1 | 83.0 | 86.3 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2R3 | 1 | 102.0 | 105.3 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1R3 | 1 | 121.0 | 124.3 | 49.0 | 50.8 | 0. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4R1 | 1 | 56.0 | 57.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3R1 | 1 | 75.0 | 76.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2R1 | 1 | 94.0 | 95.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1R1 | 1 | 113.0 | 114.8 | 36.0 | 39.3 | 1. | 4.7 | 0.0 | 55.0 | 0.9 | 1. | 14. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4C1 | 1 | 64.0 | 68.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3C1 | 1 | 83.0 | 87.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2C1 | 1 | 102.0 | 106.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1C1 | 1 | 121.0 | 125.9 | 43.0 | 46.6 | 0. | 1.5 | 0.0 | 60.0 | 0.9 | 1. | 40. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE4VT1 | 1 | 57.0 | 69.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE3VT1 | 1 | 76.0 | 88.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE2VT1 | 1 | 95.0 | 107.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| AE1VT1 | 1 | 115.0 | 127.0 | 6.0 | 29.0 | 1. | 1.4 | 0.0 | 50.0 | 0.9 | 5. | 548. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| X1 | 1 | 11.0 | 57.0 | 129.0 | 139.0 | 0. | 0.5 | 0.0 | 63.0 | 0.9 | 8. | 1500. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| X2 | 1 | 58.0 | 104.0 | 129.0 | 139.0 | 0. | 0.5 | 0.0 | 63.0 | 0.9 | 8. | 1500. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |
| perem. | 1 | 149.0 | 151.0 | 88.0 | 125.0 | 0. | 0.1 | 0.0 | 200.0 | 0.9 | 0. | 74. | 0.0 | | Гибк. ПП | 1 | 0.000 |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | |
|----------|--|--|
| Изм. | | |
| Лист | | |
| № докум. | | |
| Подп. | | |
| Дата | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ (ГУ)

| N | ГУ | Xn, мм | Xk, мм | Yn, мм | Yk, мм | Zn, мм | Zk, мм | ПАР.1 | ПАР.2 | ПАР.3 | ПАР.4 | ПАР.5 | ПАР.6 |
|---|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 6 | 0.00 | 270.00 | 0.00 | 140.00 | 0.00 | 0.00 | 50.00 | | | | | |
| 2 | 6 | 8.00 | 258.00 | 10.00 | 139.00 | 0.00 | 0.00 | 47.20 | | | | | |
| 2 | 3 | 0.00 | 6.00 | 0.00 | 43.00 | 0.00 | 0.00 | 45.12 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 264.00 | 270.00 | 0.00 | 43.00 | 0.00 | 0.00 | 45.12 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 8.00 | 262.00 | 1.00 | 7.00 | 0.00 | 0.00 | 45.10 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 0.00 | 6.00 | 48.00 | 90.00 | 0.00 | 0.00 | 48.84 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 0.00 | 6.00 | 98.00 | 140.00 | 0.00 | 0.00 | 50.35 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 264.00 | 270.00 | 48.00 | 91.00 | 0.00 | 0.00 | 48.84 | 0.20 | | | | |
| 2 | 3 | 264.00 | 270.00 | 97.00 | 140.00 | 0.00 | 0.00 | 50.35 | 0.20 | | | | |

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Начальное время работы - 0.000E+00
Конечное время работы - 0.300E+02
Точность расчета - 0.100E-04
Минимальный шаг интегрирования - 0.100E+01
Максимальный шаг интегрирования - 0.100E+01
Начальная температура - 0.300E+02

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Информация для оценки метода решения САУ:
Размерность матрицы1289
Начальное число ненулевых элементов11825
Число ненулевых элементов в факторизованной матрице....34827

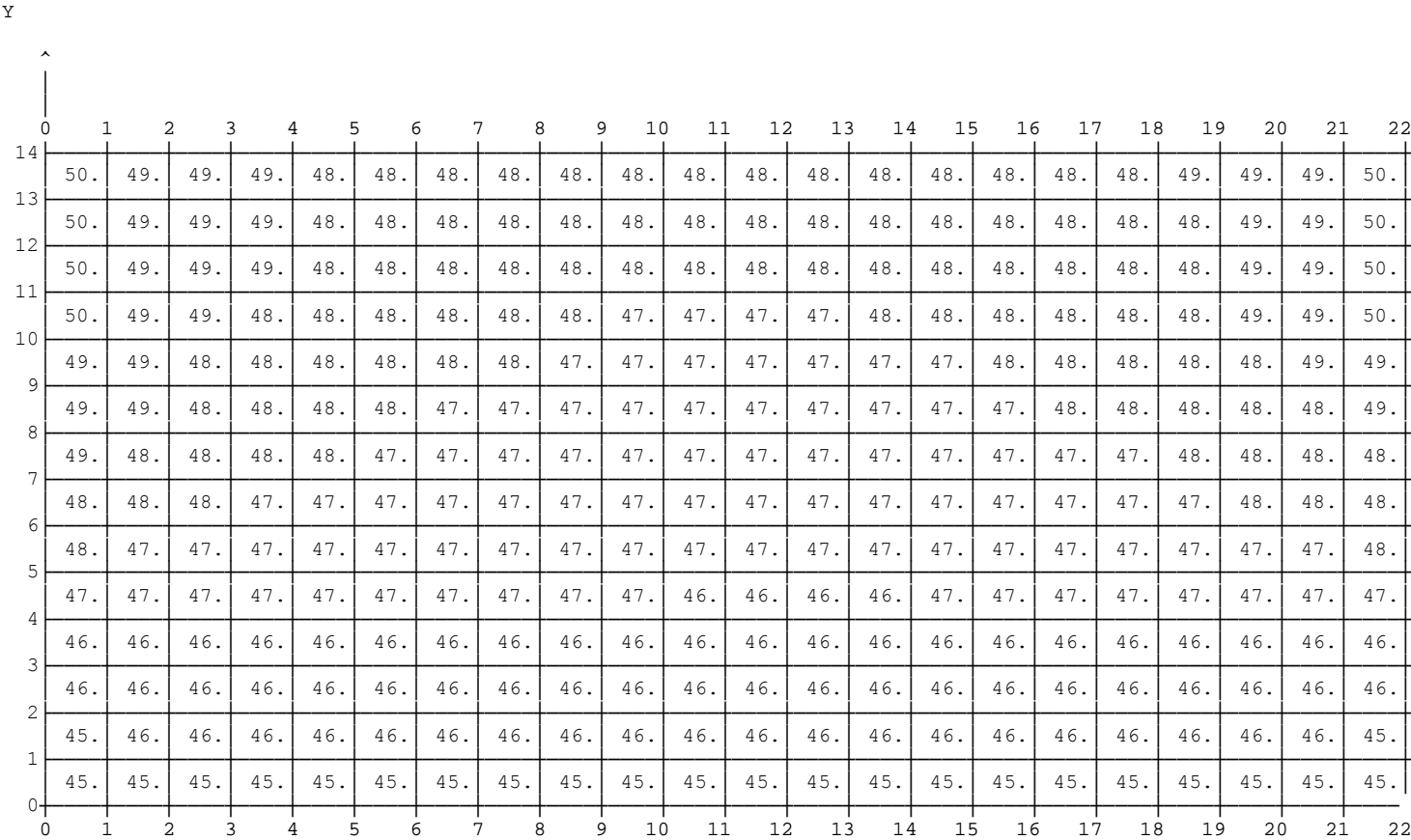
| | | | | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв № подл | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | |
|----------|--|--|
| Изм. | | |
| Лист | | |
| № докум. | | |
| Подп. | | |
| Дата | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 70 |
|------|----|

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ОСНОВАНИЯ Ф Я



| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 71 |
|------|----|

* КАРТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРИ *

Таблица N 1

| N п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-жн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-N перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИмакс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки, Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1 | AE6VT1 | 1 | 45.90 | 45.90 | 45.78 | 50.00 | 0.92 | |
| 2 | AE6R1 | 1 | 46.90 | 46.90 | 46.48 | 55.00 | 0.85 | |
| 3 | AE6C1 | 1 | 47.10 | 47.10 | 46.90 | 60.00 | 0.78 | |
| 4 | AE6VD2 | 1 | 47.74 | 47.74 | 47.64 | 100.00 | 0.48 | |
| 5 | VD3 | 1 | 49.16 | 49.16 | 49.08 | 50.00 | 0.98 | |
| 6 | AE6FU1 | 1 | 47.38 | 47.38 | 47.22 | 50.00 | 0.95 | |
| 7 | AE6VD1 | 1 | 47.65 | 47.65 | 47.54 | 100.00 | 0.48 | |
| 8 | AE6R2 | 1 | 48.89 | 48.89 | 47.22 | 55.00 | 0.89 | |
| 9 | AE6R3 | 1 | 47.39 | 47.39 | 47.15 | 55.00 | 0.86 | |
| 10 | VD4 | 1 | 49.05 | 49.05 | 48.96 | 50.00 | 0.98 | |
| 11 | VD2 | 1 | 48.89 | 48.89 | 48.79 | 50.00 | 0.98 | |
| 12 | VD1 | 1 | 48.79 | 48.79 | 48.69 | 50.00 | 0.98 | |
| 13 | AE5FU1 | 1 | 47.22 | 47.22 | 47.05 | 50.00 | 0.94 | |
| 14 | AE5VD2 | 1 | 47.48 | 47.48 | 47.37 | 100.00 | 0.47 | |
| 15 | AE5VD1 | 1 | 47.43 | 47.43 | 47.32 | 100.00 | 0.47 | |
| 16 | AE5R2 | 1 | 48.73 | 48.73 | 47.06 | 55.00 | 0.89 | |
| 17 | AE5R3 | 1 | 47.25 | 47.25 | 47.01 | 55.00 | 0.86 | |
| 18 | AE5C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 46.82 | 60.00 | 0.78 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| № п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-N перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИ макс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 19 | AE5R1 | 1 | 46.97 | 46.97 | 46.55 | 55.00 | 0.85 | |
| 20 | AE5VT1 | 1 | 45.98 | 45.98 | 45.85 | 50.00 | 0.92 | |
| 21 | AE4FU1 | 1 | 47.10 | 47.10 | 46.93 | 50.00 | 0.94 | |
| 22 | AE4VD2 | 1 | 47.31 | 47.31 | 47.19 | 100.00 | 0.47 | |
| 23 | AE4VD1 | 1 | 47.26 | 47.26 | 47.15 | 100.00 | 0.47 | |
| 24 | AE3FU1 | 1 | 46.99 | 46.99 | 46.81 | 50.00 | 0.94 | |
| 25 | AE3VD2 | 1 | 47.17 | 47.17 | 47.05 | 100.00 | 0.47 | |
| 26 | AE3VD1 | 1 | 47.14 | 47.14 | 47.02 | 100.00 | 0.47 | |
| 27 | AE2FU1 | 1 | 46.91 | 46.91 | 46.73 | 50.00 | 0.94 | |
| 28 | AE2VD2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 46.96 | 100.00 | 0.47 | |
| 29 | AE2VD1 | 1 | 47.05 | 47.05 | 46.93 | 100.00 | 0.47 | |
| 30 | AE1FU1 | 1 | 46.85 | 46.85 | 46.66 | 50.00 | 0.94 | |
| 31 | AE1VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 46.89 | 100.00 | 0.47 | |
| 32 | AE1VD1 | 1 | 46.99 | 46.99 | 46.87 | 100.00 | 0.47 | |
| 33 | AE4R2 | 1 | 48.61 | 48.61 | 46.93 | 55.00 | 0.88 | |
| 34 | AE3R2 | 1 | 48.50 | 48.50 | 46.82 | 55.00 | 0.88 | |
| 35 | AE2R2 | 1 | 48.45 | 48.45 | 46.74 | 55.00 | 0.88 | |
| 36 | AE1R2 | 1 | 48.39 | 48.39 | 46.68 | 55.00 | 0.88 | |
| 37 | AE4R3 | 1 | 47.13 | 47.13 | 46.88 | 55.00 | 0.86 | |
| 38 | AE3R3 | 1 | 47.03 | 47.03 | 46.78 | 55.00 | 0.86 | |
| 39 | AE2R3 | 1 | 46.96 | 46.96 | 46.70 | 55.00 | 0.85 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 73 |
|------|----|

| № п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-N перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИ макс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки, Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 40 | AE1R3 | 1 | 46.90 | 46.90 | 46.64 | 55.00 | 0.85 | |
| 41 | AE4R1 | 1 | 46.92 | 46.92 | 46.50 | 55.00 | 0.85 | |
| 42 | AE3R1 | 1 | 46.87 | 46.87 | 46.45 | 55.00 | 0.85 | |
| 43 | AE2R1 | 1 | 46.80 | 46.80 | 46.38 | 55.00 | 0.85 | |
| 44 | AE1R1 | 1 | 46.76 | 46.76 | 46.33 | 55.00 | 0.85 | |
| 45 | AE4C1 | 1 | 46.92 | 46.92 | 46.72 | 60.00 | 0.78 | |
| 46 | AE3C1 | 1 | 46.84 | 46.84 | 46.64 | 60.00 | 0.78 | |
| 47 | AE2C1 | 1 | 46.77 | 46.77 | 46.56 | 60.00 | 0.78 | |
| 48 | AE1C1 | 1 | 46.72 | 46.72 | 46.51 | 60.00 | 0.78 | |
| 49 | AE4VT1 | 1 | 45.97 | 45.97 | 45.85 | 50.00 | 0.92 | |
| 50 | AE3VT1 | 1 | 45.95 | 45.95 | 45.83 | 50.00 | 0.92 | |
| 51 | AE2VT1 | 1 | 45.92 | 45.92 | 45.80 | 50.00 | 0.92 | |
| 52 | AE1VT1 | 1 | 45.90 | 45.90 | 45.77 | 50.00 | 0.92 | |
| 53 | X1 | 1 | 48.96 | 48.96 | 48.90 | 63.00 | 0.78 | |
| 54 | X2 | 1 | 48.09 | 48.09 | 47.98 | 63.00 | 0.76 | |
| 55 | perem. | 1 | 47.50 | 47.50 | 47.44 | 200.00 | 0.24 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 74 |
|------|----|

ТАБЛИЦА N 2
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНОГО УЗЛА

| | |
|---|--|
| Интегральная температура КУ | 46.448 Град.ц. |
| Максим-ная допустимая интегральная темп-ра КУ | 47.29Град.ц. |
| Количество ЭРИ | 55 шт. |
| Суммарная мощность, выделяемая ЭРИ | 0.056 Вт |
| Количество перегревшихсяЭРИ | 0 шт. |
| Площади поверхностей К У 1-я поверхность 2-я поверхность суммарная | 47914.00 мм*мм 37800.00 мм*мм 85714.00 мм*мм |
| Площади поверхностей ЭРИ на 1-й поверхности на 2-й поверхности суммарная | 10114.00 мм*мм 0.00 мм*мм 10114.00 мм*мм |
| Эффективная толщина К У | 3.597 мм |
| Эффективная толщина ЭРИ КУ на 1-й поверхности на 2-й поверхности | 0.397 мм 0.000 мм |

Программный комплекс ТРИАНА v.2.10.00
Copyright ©С 2006-2014,
А. В. Сарафанов, В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев,
В. И. Коваленок, С. В. Работин,М. В. Тюкачев, А. А. Трухин
Тел:8-(913)-571-54-71,
E-mail: triana@triana.su,
WWW: http://www.triana.su

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

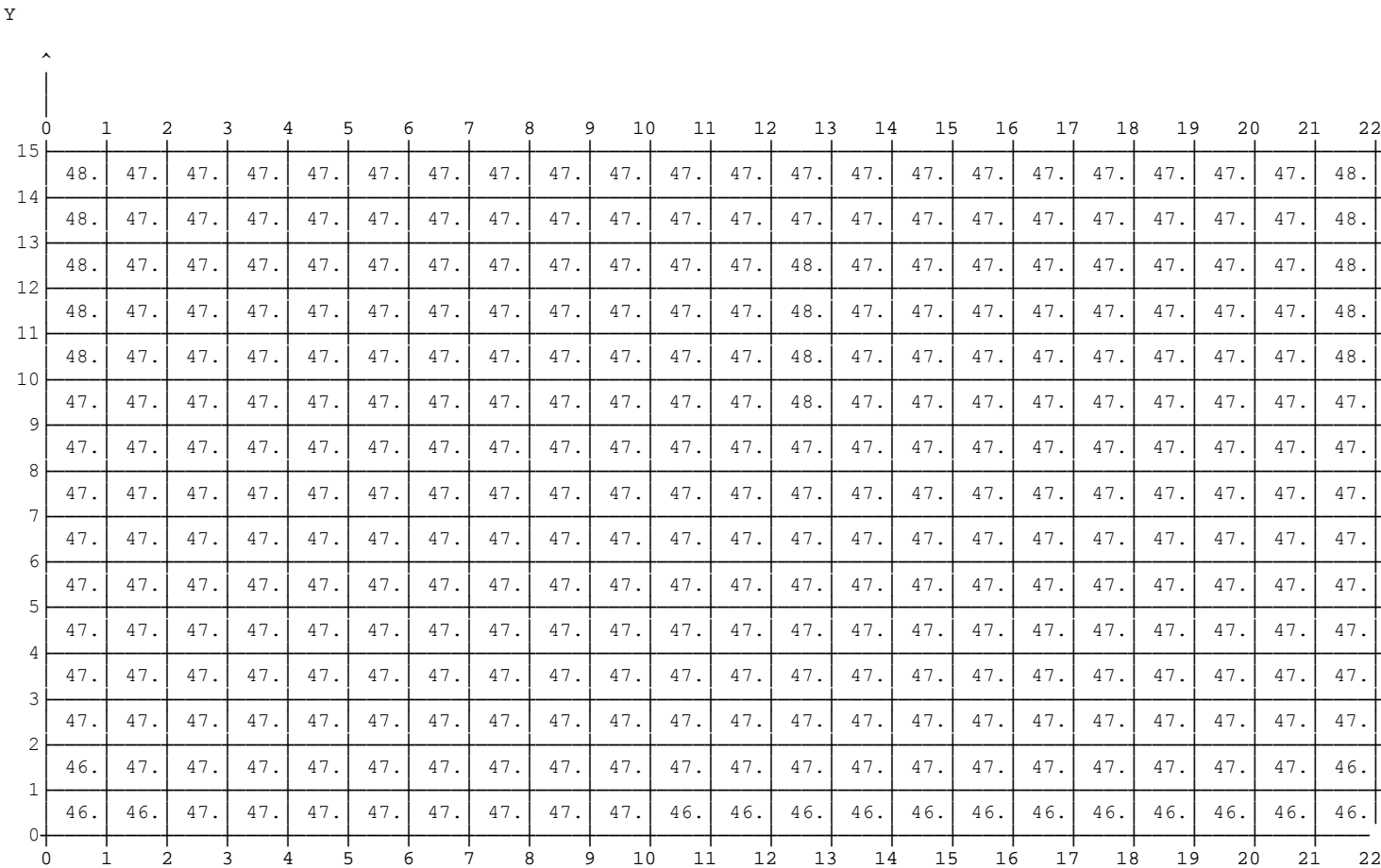
АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 75 |
|------|----|

Результаты анализа ТХ для режима «Выжигание печатного проводника»– режим БЭРVIII– «CH27 + PУ1 + PУ2 + ЗУ1 + ЗУ2»

Время = 0.200Е+01 секунд

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ОСНОВАНИЯ Ф Я



| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

* КАРТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРИ *

Таблица N 1

| N п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-жн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-Н перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИмакс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки, Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1 | AE6VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.95 | 50.00 | 1.00 | |
| 2 | AE6R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 46.99 | 55.00 | 0.85 | |
| 3 | AE6C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 60.00 | 0.78 | |
| 4 | AE6VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 100.00 | 0.47 | |
| 5 | VD3 | 1 | 47.06 | 47.06 | 47.04 | 50.00 | 0.94 | |
| 6 | AE6FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.01 | 50.00 | 0.94 | |
| 7 | AE6VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 100.00 | 0.47 | |
| 8 | AE6R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.01 | 55.00 | 0.86 | |
| 9 | AE6R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |
| 10 | VD4 | 1 | 47.06 | 47.06 | 47.02 | 50.00 | 0.94 | |
| 11 | VD2 | 1 | 47.05 | 47.05 | 47.01 | 50.00 | 0.94 | |
| 12 | VD1 | 1 | 47.05 | 47.05 | 47.01 | 50.00 | 0.94 | |
| 13 | AE5FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 50.00 | 0.94 | |
| 14 | AE5VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 15 | AE5VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 16 | AE5R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.00 | 55.00 | 0.86 | |
| 17 | AE5R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 55.00 | 0.85 | |
| 18 | AE5C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 60.00 | 0.78 | |
| 19 | AE5R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| № п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-Н перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИ макс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 20 | AE5VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.96 | 50.00 | 1.00 | |
| 21 | AE4FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 50.00 | 0.94 | |
| 22 | AE4VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 23 | AE4VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 24 | AE3FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 50.00 | 0.94 | |
| 25 | AE3VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 26 | AE3VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 27 | AE2FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 50.00 | 0.94 | |
| 28 | AE2VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 29 | AE2VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 30 | AE1FU1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 50.00 | 0.94 | |
| 31 | AE1VD2 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 32 | AE1VD1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 100.00 | 0.47 | |
| 33 | AE4R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.00 | 55.00 | 0.86 | |
| 34 | AE3R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.00 | 55.00 | 0.86 | |
| 35 | AE2R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.00 | 55.00 | 0.86 | |
| 36 | AE1R2 | 1 | 47.08 | 47.08 | 47.00 | 55.00 | 0.86 | |
| 37 | AE4R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 55.00 | 0.85 | |
| 38 | AE3R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 55.00 | 0.85 | |
| 39 | AE2R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 55.00 | 0.85 | |
| 40 | AE1R3 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 55.00 | 0.85 | |
| 41 | AE4R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |

| | | | | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв № подл | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 78 |
|------|----|

| № п/п | Обоз-е ЭРИ в схеме | Ном-р повер-хн-ти КУ | Темпер-ра корпуса ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра активной зоны (Р-N перехода) ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра КУ в месте установки ЭРИ, Гр.Ц | Темпер-ра ЭРИмакс. допуст-я, Гр.Ц | Кэф-т тепловой нагрузки Отн.ед. | Перегрев ЭРИ, Гр.Ц |
|-------|--------------------|----------------------|-----------------------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 42 | AE3R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |
| 43 | AE2R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |
| 44 | AE1R1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 55.00 | 0.85 | |
| 45 | AE4C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 60.00 | 0.78 | |
| 46 | AE3C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.01 | 60.00 | 0.78 | |
| 47 | AE2C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 60.00 | 0.78 | |
| 48 | AE1C1 | 1 | 47.01 | 47.01 | 47.00 | 60.00 | 0.78 | |
| 49 | AE4VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.96 | 50.00 | 1.00 | |
| 50 | AE3VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.96 | 50.00 | 1.00 | |
| 51 | AE2VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.96 | 50.00 | 1.00 | |
| 52 | AE1VT1 | 1 | 50.53 | 50.53 | 46.96 | 50.00 | 1.00 | |
| 53 | X1 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.03 | 63.00 | 0.75 | |
| 54 | X2 | 1 | 47.02 | 47.02 | 47.00 | 63.00 | 0.75 | |
| 55 | perem. | 1 | 260.40 | 260.40 | 48.67 | 350.00 | 0.74 | |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | |
|----------|--|--|
| Изм. | | |
| Лист | | |
| № докум. | | |
| Подп. | | |
| Дата | | |

АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ

| | |
|------|----|
| Лист | 79 |
|------|----|

ТАБЛИЦА N 2
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНОГО УЗЛА

| | |
|---|--|
| Интегральная температура КУ | 46.852 Град.ц. |
| Максим-ная допустимая интегральная темп-ра КУ | 46.32Град.ц. |
| Количество ЭРИ | 55 шт. |
| Суммарная мощность, выделяемая ЭРИ | 27.130 Вт |
| Количество перегревшихсяЭРИ | 0 шт. |
| Площади поверхностей К У 1-я поверхность 2-я поверхность суммарная | 47914.00 мм*мм 37800.00 мм*мм 85714.00 мм*мм |
| Площади поверхностей ЭРИ на 1-й поверхности на 2-й поверхности суммарная | 10114.00 мм*мм 0.00 мм*мм 10114.00 мм*мм |
| Эффективная толщина К У | 3.597 мм |
| Эффективная толщина ЭРИ КУ на 1-й поверхности на 2-й поверхности | 0.397 мм 0.000 мм |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | |
|----------|--|--|
| Изм. | | |
| Лист | | |
| № докум. | | |
| Подп. | | |
| Дата | | |

| | |
|-------------------|------|
| АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | |
| 80 | Лист |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 –Интегрированная табличная форма расчетных характеристик ЭРИ

| № п/п | Позиционное обозначение | Типономинал | U _{раб} , В | I _{раб} , А | P, Вт | K _{эн.ст} , отн. ед | K _{эн.дин} , отн. ед | T _{акт} , °С | T _{корп} , °С | K _{ти} , отн. ед | A _{вибр} , г | K _{ин} , отн. ед | t _{нараб.} , час |
|----------------------------|-------------------------|---|---|---|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | X1 | Розетка ОС СНП339-42РП11-1В ЦСНК.430421.020 ТУ | – | – | – | 0,5* | 0,5* | – | 47,02 | 0,75 | – | – | – |
| 2 | X2 | Розетка ОС СНП339-42РП11-1В ЦСНК.430421.020 ТУ | – | – | – | 0,5* | 0,5* | – | 47,02 | 0,75 | – | – | – |
| 3 | VD1 | Диод 2Д510А ТТЗ.362.096 ТУ | 0,6 (0,6)** | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,05 | 0,94 | – | – | – |
| 4 | VD2 | Диод 2Д510А ТТ 3.362.096 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,05 | 0,94 | – | – | – |
| 5 | VD3 | Диод 2Д510А ТТЗ.362.096 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,06 | 0,94 | – | – | – |
| 6 | VD4 | Диод 2Д510А ТТЗ.362.096 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,06 | 0,94 | – | – | – |
| АЕ1 – Ключ подгрузки СН БС | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | C1 | Конденсатор К10-17В-Н20-0,1 мкФ±10%-4 ОЖО.460.107 ТУ, ОЖО.460.183 | 9 (1) | | 1,2·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 0,02 | 0,12 | – | 47,01 (46,72) | 0,78 (0,78) | – | – | – |
| 8 | FU1 | Вставка плавкая ОС ВП 1-2-5,0А-250В ОЮ0.480.003 ТУ-Р, СНКЖ.646170.001 ТУ | 2,5·10 ⁻³ (10 ⁻⁹) | 2,5 (10 ⁻⁹) | 1,2·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻² | 0,001 | 0,5 | – | 47,02 (46,85) | 0,94 (0,94) | – | – | – |
| 9 | R1 | P1-16П-0,125 Вт-2,05 КОМ±0,5%-0,5-Л | 5·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 2,5·10 ⁻⁹ (10 ⁻⁹) | 1 ·10 ⁻³ 1 ·10 ⁻³ | 0,001 | 0,001 | – | 47,01 (46,76) | 0,85 (0,85) | – | – | – |
| 10 | R2 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 КОМ±0,5%-0,5-Л | 22 (13) | 0,68·10 ⁻³ (0,37·10 ⁻³) | 15·10 ⁻³ (5·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 0,12 | – | 47,08 (48,39) | 0,86 (0,88) | – | – | – |
| 11 | R3 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 КОМ±0,5%-0,5-Л | 9 (1) | 0,27·10 ⁻³ (30·10 ⁻⁶) | 2,4·10 ⁻³ (0,05·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 2,4·10 ⁻³ | – | 47,01 (46,90) | 0,85 (0,85) | – | – | – |
| 12 | VD1 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120,197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,01 (46,99) | 0,47 (0,47) | – | – | – |
| 13 | VD2 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120,197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | – | 47,01 (47,01) | 0,47 (0,47) | – | – | – |
| 14 | VT1 | Транзистор 2П794А92 АЕЯР.432140,273 ТУ | 100 (1,2) | 2,5 (1·10 ⁻⁹) | 2,8 (0,1·10 ⁻³) | 0,1·10 ⁻³ | 0,25 | – | 50,53 (45,90) | 1,00 (0,92) | – | – | – |
| АЕ2 – Ключ подгрузки СН БС | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | C1 | Конденсатор К10-17В-Н20-0,1 мкФ±10%-4 ОЖО.460.107 ТУ, ОЖО.460.183 | 9 (1) | | 1,2·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 0,02 | 0,12 | – | 47,01 (46,77) | 0,78 (0,78) | – | – | – |
| 16 | FU1 | Вставка плавкая ОС ВП 1-2-5,0А-250В ОЮ0.480.003 ТУ-Р, СНКЖ.646170.001 ТУ | 2,5·10 ⁻³ (10 ⁻⁹) | 2,5 (10 ⁻⁹) | 1,2·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻² | 0,001 | 0,5 | – | 47,02 (46,91) | 0,94 (0,94) | – | – | – |
| 17 | R1 | P1-16П-0,125 Вт-2,05 КОМ±0,5%-0,5-Л | 5·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 2,5·10 ⁻⁹ (10 ⁻⁹) | 1 ·10 ⁻³ 1 ·10 ⁻³ | 0,001 | 0,001 | – | 47,01 (46,80) | 0,85 (0,85) | – | – | – |
| 18 | R2 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 КОМ±0,5%-0,5-Л | 22 (13) | 0,68·10 ⁻³ (0,37·10 ⁻³) | 15·10 ⁻³ (5·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 0,12 | – | 47,08 (48,45) | 0,86 (0,88) | – | – | – |
| 19 | R3 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 КОМ±0,5%-0,5-Л | 9 (1) | 0,27·10 ⁻³ (30·10 ⁻⁶) | 2,4·10 ⁻³ (0,05·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 2,4·10 ⁻³ | – | 47,01 (46,96) | 0,85 (0,85) | – | – | – |

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дудл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|-------------------|------|
| Изм. | |
| Лист | |
| № докум. | |
| Подп. | |
| Дата | |
| АБВГ.ХХХ-0 Р17 ТЭ | |
| 81 | Лист |

Продолжение таблицы В.1

| № п/п | Позиционное обозначение | Типономинал | U _{раб} , В | I _{раб} , А | P, Вт | K _{эн.ст} , отн. ед | K _{эн.дин} , отн. ед | T _{акт} , °С | T _{корп} , °С | K _{ти} , отн. ед | A _{вибр} , г | K _{ин} , отн. ед | t _{нараб.} , час |
|----------------------------|-------------------------|---|---|---|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|
| 20 | VD1 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,05) | 0,47 (0,47) | — | — | — |
| 21 | VD2 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,08) | 0,47 (0,47) | — | — | — |
| 22 | VT1 | Транзистор 2П794А92 АЕЯР.432140.273 ТУ | 100 (1,2) | 2,5 (1·10 ⁻⁹) | 2,8 (0,1·10 ⁻³) | 0,1·10 ⁻³ | 0,25 | — | 50,53 (45,92) | 1,00 (0,92) | — | — | — |
| АЕЗ – Ключ подгрузки СН БС | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | C1 | Конденсатор К10-17В-Н20-0,1 мкФ±10%-4 ОЖО.460.107 ТУ, ОЖО.460.183 | 9 (1) | | 1,2·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 0,02 | 0,12 | — | 47,01 (46,84) | 0,78 (0,78) | — | — | — |
| 24 | FU1 | Вставка плавкая ОС ВП 1-2- 5,0А-250В ОЮ0.480.003 ТУ-Р, СНКЖ.646170.001 ТУ | 2,5·10 ⁻³ (10 ⁻⁹) | 2,5 (10 ⁻⁹) | 1,2·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻² | 0,001 | 0,5 | — | 47,02 (46,99) | 0,94 (0,94) | — | — | — |
| 25 | R1 | P1-16П-0,125 Вт-2,05 кОм±0,5%-0,5-Л | 5·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 2,5·10 ⁻⁹ (10 ⁻⁹) | 1·10 ⁻³ 1·10 ⁻³ | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (46,87) | 0,85 (0,85) | — | — | — |
| 26 | R2 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 кОм±0,5%-0,5-Л | 22 (13) | 0,68·10 ⁻³ (0,37·10 ⁻³) | 15·10 ⁻³ (5·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 0,12 | — | 47,08 (48,50) | 0,86 (0,88) | — | — | — |
| 27 | R3 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 кОм±0,5%-0,5-Л | 9 (1) | 0,27·10 ⁻³ (30·10 ⁻⁶) | 2,4·10 ⁻³ (0,05·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 2,4·10 ⁻³ | — | 47,01 (47,03) | 0,85 (0,85) | — | — | — |
| 28 | VD1 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,14) | 0,47 (0,47) | — | — | — |
| 29 | VD2 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,17) | 0,47 (0,47) | — | — | — |
| 30 | VT1 | Транзистор 2П794А92 АЕЯР.432140.273 ТУ | 100 (1,2) | 2,5 (1·10 ⁻⁹) | 2,8 (0,1·10 ⁻³) | 0,1·10 ⁻³ | 0,25 | — | 50,53 (45,95) | 1,00 (0,92) | — | — | — |
| АЕ4 – Ключ подгрузки СН БС | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | C1 | Конденсатор К10-17В-Н20-0,1 мкФ±10%-4 ОЖО.460.107 ТУ, ОЖО.460.183 | 9 (1) | | 1,2·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 0,02 | 0,12 | — | 47,01 (46,92) | 0,78 (0,78) | — | — | — |
| 32 | FU1 | Вставка плавкая ОС ВП 1-2- 5,0А-250В ОЮ0.480.003 ТУ-Р, СНКЖ.646170.001 ТУ | 2,5·10 ⁻³ (10 ⁻⁹) | 2,5 (10 ⁻⁹) | 1,2·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻² | 0,001 | 0,5 | — | 47,02 (47,10) | 0,94 (0,94) | | | |
| 33 | R1 | P1-16П-0,125 Вт-2,05 кОм±0,5%-0,5-Л | 5·10 ⁻³ (10 ⁻⁶) | 2,5·10 ⁻⁹ (10 ⁻⁹) | 1·10 ⁻³ 1·10 ⁻³ | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (46,91) | 0,85 (0,85) | | | |
| 34 | R2 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 кОм±0,5%-0,5-Л | 22 (13) | 0,68·10 ⁻³ (0,37·10 ⁻³) | 15·10 ⁻³ (5·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 0,12 | — | 47,08 (48,61) | 0,86 (0,88) | | | |
| 35 | R3 | P1-16П-0,125 Вт-33,2 кОм±0,5%-0,5-Л | 9 (1) | 0,27·10 ⁻³ (30·10 ⁻⁶) | 2,4·10 ⁻³ (0,05·10 ⁻³) | 5·10 ⁻³ | 2,4·10 ⁻³ | — | 47,01 (47,13) | 0,85 (0,86) | | | |
| 36 | VD1 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,26) | 0,47 (0,47) | | | |
| 37 | VD2 | Диод 2Д237В1/ПМ АЕЯР.432120.197 ТУ | 0,6 (0,6) | 2·10 ⁻³ (1,2·10 ⁻³) | 1,2·10 ⁻³ (0,7·10 ⁻³) | 0,001 | 0,001 | — | 47,01 (47,31) | 0,47 (0,47) | | | |
| 38 | VT1 | Транзистор 2П794А92 АЕЯР.432140.273 ТУ | 100 (1,2) | 2,5 (1·10 ⁻⁹) | 2,8 (0,1·10 ⁻³) | 0,1·10 ⁻³ | 0,25 | — | 50,53 (45,97) | 1,00 (0,92) | | | |

Лист регистрации изменений

[illegible]



| | | | | |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|
| Инв. № подл. | Подпись и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подпись и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| | | | | |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

АБВГ.ХХХ-О Р17 ТЭ



Луст

83

| | | | | |
|---|---|--|--------------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 477 |
|---|---|--|--------------------------|------------|

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: Монография / В. В. Гольдин, В. Г. Журавский, Ю. Н. Кофанов и др.; Под ред. А. В. Сарафанова. – М.: Радио и связь, 2003. – 456 с.
2. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с. (Б-ка инж.)
3. Гольдин, В. В. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств: Монография / В. В. Гольдин, В. Г. Журавский, Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов. – М.: Радио и связь, 2002. – 386 с.
4. Методы расчета тепловых режимов прибора / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
5. Резников, Г. В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ / Г. В. Резников. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
6. Сарафанов, А. В. Основные направления развития программного комплекса для моделирования тепловых режимов работы радиоэлектронной аппаратуры ТРИАНА/ Сарафанов А.В., Тюкачев М.В., Коваленок В.И., Работин С.В. // EDA Express: Науч.-техн. журн. – М.: Издат-во «ОАО Родник Софт», 2004. № 9. – С. 7–10.
7. Кофанов, Ю. Н. Автоматизация проектирования и моделирования печатных узлов радиоэлектронной аппаратуры: Монография / Ю. Н. Кофанов, Н. В. Малютин, А. В. Сарафанов и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 389 с.
8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611734. Моделирование на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в стойках, блоках, печатных узлах, функциональных ячейках, микросборках радиоэлектронной аппаратуры (программный комплекс ТРИАНА подсистемы АСОНИКА-Т) / Ю. Н. Кофанов, В. И. Коваленок, С. В. Работин, А. В. Сарафанов, М. В. Тюкачев и др. – М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), 2003.
9. Кофанов, Ю. Подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры «АСОНИКА-Т» / Ю. Кофанов, Ю. Потапов, А. Сарафанов // CHIPNEWS– Инженерная электроника: Науч.-техн. журн. – М.: «CHIPNEWS», 2001. – № 6 (59). – С. 56–58.
10. Коваленок, В. И. Унифицированный ряд комплексных теплоаэродинамических моделей стоечных конструкций бортовых РЭС / В. И. Коваленок, А. В. Сарафанов, М. В. Тюкачев // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий: Материалы Меж-

| | | | | |
|---|---|--|--------------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 478 |
|---|---|--|--------------------------|------------|

дународной научно-технической конференции и Российской научной школы. Ч. 4. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2000. – С. 130–132.

11. Манохин, А. И. Математическое моделирование термоэлектрических систем охлаждения для бортовых радиолокационных комплексов / А. И. Манохин, А. В. Сарафанов // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы. Ч. 1. – М.: ГНПО «АГАТ», 2001. – С. 61–62.

12. Алексеев, А. Г. Разработка блока цифровой обработки сигналов для авиационной РЭС при помощи системы «АСОНИКА» / А. Г. Алексеев, Р. Л. Желтов, А. И. Манохин, А. В. Сарафанов, С. В. Работин // Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий: / Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы. Ч. 4. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2000. – С. 117.



13. Жаднов, В. В. Разработка средствами системы АСОНИКА унифицированного конструктива стоечного типа с системой виброизоляции и термоэлектрической системой охлаждения для судовых устройств навигации / В. В. Жаднов, Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов и др. // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Ч. 7. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2002. – С. 10–11.

14. РД В 319.01.05-ХХ. Аппаратура электронная военного назначения. Принципы применения математического моделирования при проектировании: Методические указания // А. И. Андреев, Ю. Н. Кофанов, В. В. Жаднов. – М.: ЦНИИ 22 МО РФ, 1997. – 71 с.

15. Кофанов, Ю. Н. Электронный макет как методологическая основа разработки высоконадежных РЭС в рамках CALS-технологий / Ю. Н. Кофанов, В. Д. Кулиев, А. В. Сарафанов // Информационные технологии в проектировании и производстве: Науч.-техн. журн. – ГУП «ВИМИ», 2001. – № 3. – С. 53–62.

16. Жаднов, В. В. Оценка надежности элементной базы бортовых РЭС в рамках системы АСОНИКА / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов, А. П. Гриненко // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Ч. 7. – М.: НИИ «Автоэлектроника», 2002. – С. 19–22.

17. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610050. Электронный (виртуальный) макет радиоэлектронного средства / Ю. Н. Кофанов, В. И. Коваленок, С. В. Работин, А. В. Сарафанов, М. В. Тюкачев и др. – М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам РОСПАТЕНТ, 2002.

| | | | | |
|---|---|--|--------------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 479 |
|---|---|--|--------------------------|------------|

18. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012612891. Моделирование на ЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в блоках, крейтах, печатных узлах, узлах радиаторов и микроэлектронных узлах радиоэлектронной аппаратуры (TRIANA-M+ (ver. 1.01)) / В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев, В. И. Коваленок, А. В. Сарафанов, А. А. Трухин, Д. Ю. Худоногов и др. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), 2012. (Зарегистрировано в Реестре программа для ЭВМ 23.03.2012 г.).

19. Сунцов, С. Б. Инженерный анализ при сквозном автоматизированном проектировании радиоэлектронной аппаратуры модульной ракетно-космической техники / С. Б. Сунцов, О. А. Климкин, А. В. Сарафанов, А. М. Фень, Д. Ю. Худоногов // Технология машиностроения: науч.-техн. журн. – М., 2011. – № 5. С. 25–27.

20. Сарафанов, А. В. Метод синтеза моделей тепловых процессов блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Сарафанов, А. А. Трухин, М. В. Тюкачев // Качество. Инновации. Образование: науч.-техн. журн. – М., 2008. – № 7. С. 64–68.



21. Zhadnov V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems. [Электронный ресурс]. / Reliability: Theory & Applications: e-journal. Vol. 2, No 4, 2011. – р. 94-102. – Режим доступа: http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2011/042011/RTA_4_2011-07.pdf.

22. Жаднов, В. В. Информационные технологии в прогнозировании надежности электронных средств. / Информационные технологии в проектировании и производстве, № 1, 2012. – С. 20–25.

23. Компьютерные технологии в приборостроении : лаб. практикум / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов и др. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 203 с. – (Компьютерные технологии в приборостроении : УМКД № 49-2007 / рук. творч. коллектива А. В. Сарафанов).

24. Воловиков, В. В. Моделирование теплового сопротивления при вынужденном конвективном теплообмене в каналах конструкций радиоэлектронной аппаратуры / В. В. Воловиков, А. В. Сарафанов // Информационные технологии: Ежемесячный теоретический и прикладной науч.-техн. журн. – М.: Издательство «Новые технологии», 2012. – № 2, с. 44–48.

25. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Устройства приема и обработки сигналов». Версия 1.0 [Электронный ресурс] : Интерактивное электронное техническое руководство / Капустин-Богданов Ю. А., Зандер Ф. В., Сарафанов А. В., Трегубов С. И., Дектерев М. Л., Худоногов Д. Ю., Фень А. М. и др. – Электрон. дан. (470 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Номер госрегистрации в НТЦ Информрегистр: 0320900276 от 27.02.2009 г.).

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 480 |
|---|---|---|--------------|-----|



ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Теплофизические параметры конструкционных материалов РЭА

Таблица П1.1

Теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость некоторых конструкционных материалов РЭА

| Наименование или марка материала | Коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$ | Плотность, $кг/м^3$ | Удельная теплоемкость $Дж/(кг \cdot м)$ |
|---|--|---------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Материалы печатных плат: | | | |
| Гетинакс | 0,15–0,19 | 1200–1400 | – |
| Текстолит | 0,23–0,33 | 1350 | 1400 |
| Стеклотекстолит | 0,23–0,37 | 1500–1800 | 420 |
| Стеклотекстолит (многослойная печатная плата) | 0,43–0,50 | 1750 | 410 |
| Анодированный алюминий | 200–300 | 2800 | 850 |
| Алюминий с эпоксид-й смолой | 50–65 | 2800 | 800 |
| Титан покрытый слоем Al_2O_3 | 29 | 4800 | – |
| Сталь с эпоксидной смолой | 1,1 | 7800 | 550 |
| Полиимид 6 | 0,3 | – | – |
| Полиимид (<i>vlspel</i>) | 0,36 | – | – |
| Фольгированный полистирол | 0,03–0,04 | – | – |
| Материалы проводников: | | | |
| Медь | 380–390 | 8940 | 380 |
| Серебро | 390–420 | 10500 | 234 |
| Золото | 219 | 19300 | 130 |
| Материалы радиаторов и оснований функциональных ячеек: | | | |
| АЛ–7 | 196 | 2600 | 830 |
| АЛ–2 | 167 | 2650 | 840 |
| АЛ–9 | 151 | 2660 | 890 |
| АМЦ | 180 | 2730 | 1090 |
| АМГ | 150 | 2630 | 970 |
| АМГ-6 | 90 | 2680 | 970 |
| Алюминий деформируемый (АД, АД–1 и др.) | 210–230 | 2710 | 900 |
| Дюралюминий | 160–180 | 2750 | 920 |
| Д 16М | 192 | 2780 | – |
| Д 16Т | 121 | – | – |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 481 |
|---|---|---|--------------|-----|

Продолжение табл. П1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Материалы подложек: | | | |
| Ситалл СТ-32-1 | 1,0 | 3190 | — |
| Ситалл СТ-38-1 | 1,3 | 2900 | — |
| Ситалл СТ-50-1 | 1,4–1,5 | 2200–2700 | — |
| Феррит 10 СЧ-6 | 2,6 | 5020 | — |
| Поликор (ВК-100) | 30–35 | 3960–3990 | — |
| 22хс (ВК-94-1) | 13,4 | 3750–3850 | — |
| КМ | 21–25 | — | — |
| М7 | 10,0 | — | — |
| ВК-98-1 (сапфирит) | 24–26 | 3880–3940 | — |
| Стекло С41-1 | 1,0 | 2500 | — |
| Стекло С48-3 | 1,2–1,5 | 2200–2700 | — |
| Плавленый кварц | 7,0–15,0 | 2210 | 740 |
| Клеи | | | |
| <i>(Тм – допустимая рабочая температура, °С; t – технологическая толщина клеевого слоя, мкм):</i> | | | |
| Д9 (Тм=150, t=50–250) | 0,74 | — | — |
| ЭТА (Тм=150, t=30–200) | 0,80 | — | — |
| ТКЛ-2 (Тм=125, t=50–250) | 1,60 | — | — |
| ВТ-25-200 (Тм=200, t=50–250) | 0,62 | — | — |
| К-400 (Тм=250, t=100–250) | 1,0–2,0 | — | — |
| Эластосил 10-01-марка Б | 0,65 | — | — |
| Эластосил 137-83(Тм=200, t=50–250) | 0,97 | — | — |
| Мастика ЛН (Тм=120, t=50–250) | 0,65 | — | — |
| Эпоксидная смола | 0,15 | — | — |
| УП-5-201 | 1,0 | — | — |
| Паста КПТ-8 | 0,8 | — | — |
| ВК-9 (наполнитель TiO ₂) | 0,21–0,22 | — | — |
| КВК-68 | 0,137 | — | — |
| ВК-9 (наполнитель AlN) | 0,56–1,62 | — | — |
| КВК-68 (наполнитель AlN) | 1,0 –1,87 | — | — |
| Компаунды: | | | |
| ЭК-16А | 0,3–0,35 | 1350 | 1200–1400 |
| К-1 | 2,2 | — | — |
| К-2 | 1,4 | — | — |
| КТЭ-2 | 1,3 | — | — |
| КТЭ-4 | 1,2 | — | — |
| ЭК-16А с кварцевой пылью | 0,5–0,8 | — | — |
| Прочие материалы | | | |
| Пенополиуретан | 0,06 | 1250 | — |
| Пластмасса полихлорвиниловая | 0,44 | — | — |

Окончание табл. П1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Пластмасса ЭФП–63 | 0,23 | – | – |
| Плексиглас | 0,19 | 1180 | 1420–1550 |
| Полистирол | 0,09–0,14 | 1500 | – |
| Фторопласт–4 | 0,25 | 2300 | 920–1050 |
| Германий | 23 | 5320 | 314 |
| Кремний | 22 | 2300 | 733 |
| Латунь | 109 | 8440 | 376 |
| Титан | 22 | 4500 | – |
| Сталь 10 | 73 | 7850 | 460 |
| Магний | 156 | 1750 | 1047 |
| Бронза | 25 | 8800 | 381 |
| Парафин | 0,27 | 920 | 1000 |
| Картон | 0,23 | – | – |
| Слюда | 0,45 | 2600–3200 | 879 |
| Асбестовая ткань | 0,17 | – | – |
| Эбонит | 0,16 | 1200 | – |
| Резина | 0,16 | 1200 | 1380 |



Таблица П1.2

Коэффициенты черноты поверхностей некоторых конструкционных материалов РЭА

| Материал и состояние его поверхности | Коэффициент черноты, <i>отн.ед.</i> | Температура, °С |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Алюминий: | | |
| грубо полированный | 0,05 | 100 |
| тщательно полированный | 0,04–0,06 | 50–500 |
| листовой (коммерческий) | 0,09 | 30–200 |
| сильно окисленный | 0,20–0,80 | 50–500 |
| сплав Д–16 | 0,37–0,40 | 50–350 |
| фольга | 0,10 | 100 |
| Медь: | | |
| тщательно полированная | 0,02 | 80–115 |
| шлифованная | 0,05 | 20 |
| сильно окисленная | 0,79 | 150 |
| Латунь: | | |
| тщательно полированная | 0,02 | 100 |
| шлифованная | 0,05 | 50 |
| сильно окисленная | 0,78 | 100 |
| пластина тусклая | 0,22 | 200 |
| окисленная | 0,60 | 100 |

Окончание табл. П1.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|-----------|---------|
| Бронза полированная | 0,16 | 50 |
| Сталь: | | |
| никелированная | 0,11 | 25 |
| окисленная | 0,80 | 25 |
| литье | 0,54 | 25 |
| листовая, шероховатая | 0,96 | 300 |
| холоднокатанная | 0,09 | 93 |
| Железо: | | |
| шлифованное | 0,14 | 20 |
| листовое, сильно окисленное | 0,69 | 100 |
| Ковар | 0,82 | 23 |
| Золото | 0,10 | 90–600 |
| Никель полированный | 0,08 | 99–370 |
| Титан | 0,63 | 25 |
| Чугунное литье | 0,81 | 50 |
| Окиси металлов | 0,40–0,80 | 100–400 |
| Кварц плавленый | 0,93 | 20 |
| Стекло гладкое | 0,94 | 22 |
| Бумага (картон) | 0,93 | 20–300 |
| Асбестовый картон | 0,96 | 20 |
| Резина | 0,86–0,95 | 24 |
| Фарфор глазурованный | 0,92 | 23 |
| Краски: | | |
| масляные различных цветов | 0,92–0,96 | 100 |
| эмалевые | 0,92 | 20–100 |
| алюминевые различных цветов | 0,27–0,67 | 100 |
| защитнозеленая | 0,90 | 40 |
| бронзовая | 0,51 | 50 |
| Лаки: черный | 0,96–0,98 | 40–100 |
| белый | 0,80–0,95 | 40–95 |
| щеллак черный матовый | 0,91 | 25 |
| муар серый, черный | 0,90 | 20 |
| Белая эмаль на железной пластине | 0,90 | 25 |
| Алюминиевый лак на шероховатой пластине | 0,39 | 20 |



| | | | |
|---|---|--------------|-----|
|  |  Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 484 |
|---|---|--------------|-----|

Приложение 2. Геометрические и теплофизические параметры некоторых электрорадиоэлементов

Информация, приводимая в данном приложении, содержит справочную информацию, необходимую в процессе моделирования тепловых режимов узлов радиоэлектронной или микроэлектронной аппаратуры второго уровня конструктивной иерархии (печатные узлы, функциональные ячейки и микросборки). Моделирование таких конструктивных узлов, как правило, осуществляется на основе моделей с распределенными параметрами и требует подробной информации о геометрических и теплофизических параметрах (ГТФП) ЭРЭ, которая приводится в соответствующих таблицах данного приложения. В таблицах приведены данные о некоторых типах ЭРЭ, таких как: транзисторы, диоды, микросхемы, резисторы и конденсаторы.

Информация о ГТФП перечисленных типов ЭРЭ представлена в приложении в следующем виде. Для транзисторов и диодов ([табл. П2.1](#) и [П2.2](#)) – таблицы определения ГТФП по типу транзистора или диода. Для резисторов ([табл. П2.3](#)) – таблица определения ГТФП по типоминалу резистора. Для микросхем ([табл. П2.4](#) и [П2.5](#)) – таблицы определения ГТФП по типоминалу микросхемы и (или) шифру корпуса микросхемы. Для конденсаторов ([табл. П2.6](#)) – таблица определения номера типоразмера корпуса по типоминалу конденсатора и таблица ([табл. П2.7](#)) определения ГТФП по номеру типоразмера корпуса конденсатора.

К приводимым в таблицах ГТФП ЭРЭ относятся: площадь поверхности ЭРЭ ($S_{пэ}$), омываемая воздухом; тепловое контактное сопротивление ($R_{кон}$) ЭРЭ (тепловое сопротивление «корпус ЭРЭ–радиатор» или «корпус ЭРЭ–печатная плата»); тепловое сопротивление крепления ($R_{тк}$) ЭРЭ (тепловое сопротивление «выводы и (или) корпус ЭРЭ–печатная плата (или основание функциональной ячейки или подложка)»); теплоемкость ЭРЭ ($C_э$). Остальные параметры ЭРЭ относятся к разряду нормативно-справочной информации. Значения таких ГТФП ЭРЭ, как $S_{пэ}$, $R_{кон}$ и $R_{тк}$ зависят от варианта установки ЭРЭ на конструктиве, поэтому значения этих параметров приведены в таблицах для соответствующих вариантов установки. ГТФП перечисленных выше типов ЭРЭ приводятся для некоторых вариантов установки ЭРЭ на конструктиве. Для резисторов и конденсаторов принимался один вариант установки: резистор располагается (горизонтально) на высоте 1 мм над поверхностью печатной платы (резисторы: С2-33, С2-34, МЛТ, ОМЛТ, С5-5В и т. п.); резистор устанавливается на несущую конструкцию через изоляционную прокладку толщиной 2,5 мм (резисторы: СП5-2В, СП5-16ВВ, РП1-53 и т. п.); резистор крепится винтами непосредственно к несущей конструкции (резисторы: СП5-2ВСП5-3В и т. п.); конденсатор располагается

| | | | | |
|---|---|--|---------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 485 |
|---|---|--|---------------------|------------|

на высоте 1 мм над поверхностью печатной платы (конденсаторы: К73-16, К73-15, К53-4А и т. п.); конденсатор боковой поверхностью приклеивается к несущей конструкции (конденсаторы: К71-7, К10-47 и т. п.). Для микросхем, в зависимости от типа корпуса, принималось три варианта установки: 1-й вариант – микросхема устанавливается на высоте 1 мм (шифры корпусов: «ПОСОЛ», «ТРОПА», «ТРАПЕЦИЯ», 151.15-2, 151.15-4, 201.1-1,8) или 0,5 мм (шифры корпусов: 421.50-1, 402.14-5, 402.16-6, 401.14-1,2,5) над поверхностью несущей конструкции; 2-й вариант – микросхема приклеивается на проложенную по несущей конструкции теплоотводящую шину (ширина шины 0,8 ширины корпуса микросхемы) толщиной 1мм (шифры корпусов: «ПОСОЛ», «ТРОПА», «ТРАПЕЦИЯ», 151.15-2, 151.15-4, 201.14-1,8) или 0,7 мм (шифры корпусов: 421.50-1, 402.14-5, 402.16-6, 401.14-1,2,5); 3-й вариант – микросхема приклеивается к несущей конструкции (шифры корпусов: 421.50-1, 402.14-5, 402.16-6, 401.14-1,2,5).

Для транзисторов, устанавливаемых на печатных платах, принимались два варианта установки: 1-й вариант – транзистор устанавливается на высоте 2–4 мм над поверхностью печатной платы (КТ3107, КТ363, КТ315, КТ3102, КК940 и т. п.); 2-й вариант – транзистор крепится боковой поверхностью при помощи винта (КТ805АМ, КТ943 и т. п.) или клея (2Т625БМ-2, КТ315, 2П103 и т. п.) к печатной плате. Для диодов, устанавливаемых на печатных платах, принимался один вариант установки: диод с осевыми выводами располагается горизонтально на высоте 1 мм над поверхностью печатной платы (2С108, 2Д510, КД208 и т. п.); диод боковой поверхностью приклеивается к печатной плате (2Д213, 2Д906); диод крепится к печатной плате гайкой за винт – корпус (Д815, КС650А, 2Д202А, Д817 и т. п.).

Для бескорпусных и микрокорпусных ЭРЭ ([табл П2.8](#) и [П2.9](#)) принимался один вариант установки: ЭРЭ через слой припоя, клея или компаунда устанавливается на подложке. При расчетах значений теплофизических параметров ЭРЭ использовались выражения (2)–(5). При этом в расчетах принимались в качестве исходной информации следующие ТФП: коэффициент теплопроводности клея 1,0 Вт/(м•К); коэффициент изоляционной прокладки 0,3 Вт/(м•К); технологическая толщина клеевого слоя или толщина изоляционной прокладки принимались равными 300 мкм; значения удельной теплоемкости для некоторых ЭРЭ /в Дж/(К•г)/: конденсаторы: керамические – 1,4; электролитические – 0,5; металlobумажные – 1,13; полиэтилентерефталатные – 2,0; оксиднополупроводниковые – 0,5; полистирольные – 2,0; резисторы – 0,8; транзисторы и диоды – 0,5; микросхемы – 0,7.

Таблица П2.1

ГПТФ транзисторов

| Марка транзистора | $R_{тв}$ (R «переход-корпус»), К/Вт | $T_{таж доп}$ $p-n$ -перехода (корпуса), °C | $S_{пэ}, мм^2$ | | $R_{тк} (R_{кон}),$ К/Вт | | $C_э, Дж/К$ | |
|-------------------|--|---|-------------------|------|-----------------------------|-------|-------------|-----|
| | | | Вариант установки | | | | | |
| | | | 1-й | 2-й | 1-й | 2-й | | |
| КТ351А,Б | - | 150 (100) | 168 | - | 75 | - | 0,45 | |
| КТ1307А-Л | - | 150 (100) | 168 | - | 75 | - | 0,45 | |
| КТ350А | - | 150 (100) | 168 | - | 75 | - | 0,45 | |
| КТ352А,Б | - | 150 (100) | 168 | - | 75 | - | 0,45 | |
| КТ363БМ | - | 150 (100) | 168 | - | 75 | - | 0,45 | |
| КТ315Б-Ж | - | 120 | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| КТ361В,Д | - | 120 | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| КП103МР | - | (110) | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| 2П103АР,ГР | - | (110) | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| 2П103А | - | (110) | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| 2П113А-В | - | (110) | 165 | 135 | 44 | 6,0 | 0,25 | |
| 2Т6256М-2 | 100 | 135 (85) | 340 | 250 | 42 | 2,5 | - | |
| КТ603А-Г | - | 120 (85) | 360 | - | 93 | - | - | |
| 2Т603А-И | - | 150 (125) | 360 | - | 93 | - | 1,5 | |
| КТ814А-Г | 10 | 125 (100) | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 1,5 | |
| КТ816А-Г | 5 | 125 (100) | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ646А,Б | - | 150 | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| ГТ346А-В | - | 165 | 130 | - | 77 | - | 0,5 | |
| 2Т368А,Б | - | 150 | 130 | - | 77 | - | 0,5 | |
| КТ316А-Д | - | 150 | 130 | - | 77 | - | 0,5 | |
| КТ339А-Д | - | 165 | 130 | - | 77 | - | 0,5 | |
| КТ368Д,Б | - | 150 | 1303 | -240 | 77 | - | 0,5 | |
| КТ639А-Ж | 10 | 150 | 20 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ943 | 5 | 150 | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ940А-В | 10 | 150 | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ626А-Г | 10 | 125 | 320 | 240 | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ961А-В | 10 | 150 | 320 | - | 35 | (2,2) | 0,5 | |
| КТ3102А-Г | - | 125 | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| КТ342А-В | - | 150 (100) | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| | - | 150 (100) | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| | - | 150 (100) | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| | - | 150 (100) | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| | - | 150 (130) | 130 | - | 102 | - | 0,3 | |
| | КТ326А | - | 150 (130) | 130 | - | 102 | - | 0,3 |
| | 2Т326Б | - | 175 (150) | 130 | - | 102 | - | 0,3 |
| | КП302АМ-ГМ | - | (125) | 130 | - | 102 | - | 0,3 |
| | КТ805АМ-ВМ | 3,3 | 150 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | КТ943В,Г | - | 150 (85) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | 2Т882А-В | 12,5 | 150 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | КТ837А-У | 3,33 | 125 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | КТ851А,Б | - | 150 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | КТ819А-Г | 1,67 | 125 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |
| | 2Т818А-2,Б-2 | 3,13 | 150 (100) | 600 | 440 | 22 | (1,1) | 1,3 |

Таблица П2.2

ГПТФ диодов

| Марка диода | $T_{\text{max доп}}$ корпуса, °C | $S_{\text{пэ}}, \text{мм}^2$ | $R_{\text{тк}}, \text{К/Вт}$ | $C_{\text{э}}, \text{Дж/К}$ | Примечание |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Д312А,Б | 85 | 80 | 106 | 0,35 | Сухой контакт (СК) |
| Д102 | 125 | 310 | 86 | 0,65 | |
| Д103А | 125 | 310 | 86 | 0,65 | |
| Д815, Д816 | 130 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| КС605А | 125 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| КС630А | 125 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| КС620А | 125 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| КС680А | 125 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| Д817 | 130 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| 2С930 | 130 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| 2С980А | 130 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| 2С920А | 130 | 560 | 3,4 | 3,0 | |
| Выпрямительные сборки: | | | | | |
| КЦ410А-В | 110 | 3160 | 14,6 | - | На клею |
| 2Д906А,В | 140 | 153 | 9,0 | 0,3 | |
| КД906А,Г | 100 | 153 | 9,0 | 0,3 | На клею |
| КЦ405А-Е | 100 | 1590 | 63,0 | 8,5 | |
| 2Д222АС-ДС | 140 | 2066 | 11,0 | 3,0 | СК; $R_{\text{пк}}=3,5$ |
| 2Д202, КД202 | 135 | 520 | 1,7 | 2,6 | |
| 2Д204А-В | 100 | 490 | 2,1 | 3,75 | СК |
| КД204А-В | 100 | 490 | 2,1 | 3,75 | СК |
| 2Д212, КД212 | 100 | 260 | 38,0 | 0,8 | $R_{\text{пк}}=3,5$ |
| 2Д213А-6, Б-6 | 100 | 190 | 4,2 | 0,76 | На клею |
| 2Д213А-Г | 100 | 400 | 1,9 | 0,8 | На клею |
| КД213Г | 100 | 400 | 1,9 | 0,8 | |
| КД208А | 100 | 194 | 64 | 0,30 | |
| КД105Б-Г | 100 | 194 | 64 | 0,30 | |
| КД209А-В | 100 | 194 | 64 | 0,30 | |
| КД226А-Д | 105 | 260 | 32,6 | 0,40 | |
| КД223А | 105 | 260 | 32,6 | 0,40 | |
| 2Д510А | 140 | 35 | 121 | 0,08 | |
| КД510А | 100 | 35 | 121 | 0,08 | |
| КД513А | 100 | 35 | 121 | 0,08 | |
| КД521В | 140 | 35 | 121 | 0,08 | |
| 2Д522Б | 140 | 35 | 121 | 0,08 | |
| КД522Б | 100 | 35 | 121 | 0,08 | |
| 2С62А | 150 | 140 | 76 | 0,15 | |
| КС162А | 125 | 140 | 76 | 0,15 | |
| 2С111А,В | 150 | 140 | 76 | 0,15 | |
| 2С170А | 150 | 140 | 76 | 0,15 | |
| КС170А | 100 | 140 | 76 | 0,15 | |
| 2С182А | 150 | 140 | 76 | 0,15 | |
| КС182А | 125 | 140 | 76 | 0,15 | |



Окончание табл. П2.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-----|-----|-----|------|---|
| 2С112А | 150 | 140 | 76 | 0,15 | |
| 2С108А-М | 150 | 83 | 152 | 0,10 | |
| 2С164Н,П,Р,Т | 150 | 83 | 152 | 0,10 | |
| 2С166А-К | 150 | 83 | 152 | 0,10 | |
| КД106А | 100 | 172 | 53 | 0,35 | |
| 2Д106А | 150 | 172 | 53 | 0,35 | |
| 2Д236А,Б | 175 | 172 | 53 | 0,35 | |
| Д219С | 140 | 180 | 106 | 0,35 | |
| Д220С | 140 | 180 | 106 | 0,35 | |
| Д223С | 140 | 180 | 106 | 0,35 | |
| Д902 | 125 | 180 | 106 | 0,35 | |
| 2Д504А | 130 | 180 | 106 | 0,35 | |
| КД504А | 110 | 180 | 106 | 0,35 | |

Таблица П2.3

ГТФП резисторов

| Типономинал резистора | Номинальная мощность, Вт | $T_{\text{max доп}}$ корпуса, °С | $S_{\text{пэ}}$, мм ² | $R_{\text{тк}}$, К/Вт | $C_{\text{э}}$, Дж/К |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| МЛТ, ОМЛТ, С2-33, С2-33Н | 0,125 | 110 (МЛТ) | 50 | 106 | 0,12 |
| | 0,25 | 110 (ОМЛТ) | 88 | 128 | 0,20 |
| | 0,5 | 175 (С2-33) | 117 | 76 | 0,80 |
| | 1,0 | 125 (С2-33Н) | 361 | 84 | 1,6, |
| | 2,0 | | 662 | 60 | 2,80 |
| МТ | 0,125 | 175 | 50 | 106 | 0,12 |
| | 0,25 | 175 | 88 | 128 | 0,20 |
| | 0,5 | 175 | 117 | 76 | 0,80 |
| С2-23 | 0,062 | 110 | 32 | 165 | 0,096 |
| | 0,125 | 110 | 50 | 106 | 0,12 |
| | 0,25 | 110 | 88 | 128 | 0,20 |
| | 0,5 | 110 | 182 | 61 | 0,80 |
| | 1,0 | 110 | 371 | 84 | 1,60 |
| | 2,0 | 110 | 645 | 60 | 2,80 |
| С2-11 | 0,125 | 140 | 60 | 84 | 0,12 |
| | 0,25 | 140 | 90 | 84 | 0,20 |
| ММТ-1 | 1,0 | 140 | 100 | 110 | - |
| КМТ-1 | 0,6 | 200 | 100 | 110 | - |
| С2-34 | 0,062 | 110 | 56 | 106 | 0,12 |
| | 0,125 | 110 | 88 | 128 | 0,20 |
| | 0,25 | 110 | 182 | 61 | 0,80 |
| | 0,5 | 110 | 361 | 84 | 1,60 |
| | 1,0 | 110 | 662 | 60 | 2,80 |
| С2-50 | 0,25 | 110 | 50 | 106 | 0,12 |
| | 0,33 | 110 | 98 | 131 | 0,24 |
| | 0,70 | 110 | 182 | 61 | 0,80 |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 489 |
|---|---|---|--------------|-----|

Окончание табл. П2.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-------|-------|------|-------|------|
| C5-5B | 1,0 | 130 | 460 | 94 | 1,20 |
| | 2,0 | 130 | 590 | 96 | 1,60 |
| | 5,0 | 130 | 1390 | 77 | 7,20 |
| C5-16MB | 1,0 | 140 | 690 | 65 | 2,80 |
| | 2,0 | 140 | 1050 | 73 | 4,80 |
| | 5,0 | 140 | 1330 | 79 | 6,40 |
| СП5-16BA | 0,125 | 110 | 400 | 23 | 1,5 |
| | 0,5 | 110 | 500 | 23 | 1,8 |
| | 1,0 | 110 | 680 | 23 | 2,6 |
| СП5-16BB | 0,125 | 0,125 | 200 | 60 | 0,8 |
| СП5-16BG | 0,05 | 0,05 | 110 | 60 | 0,4 |
| СП3-16B | 0,125 | 125 | 640 | 21 | 4,5 |
| СП5-22 | 1,0 | 110 | 1050 | 30 | 3,6 |
| СП5-14 | 1,0 | 110 | 1050 | 30 | 3,2 |
| СП5-2B | 1,0 | 125 | 500 | (1,2) | 2,4 |
| СП5-2BA | 0,5 | 125 | 465 | (1,2) | 1,3 |
| СП5-2BB | 0,5 | 125 | 390 | (1,2) | 1,4 |
| СП5-3 | 1,0 | 125 | 450 | (1,3) | 1,9 |
| СП5-3B | 1,0 | 125 | 480 | (1,3) | 2,2 |
| СП5-3BA | 0,5 | 125 | 320 | (2,2) | 1,3 |
| РП1-53 | 0,25 | 85 | 720 | 37 | 2,4 |
| РП1-48 | 0,25 | 110 | 150 | 40 | 0,8 |

Таблица П2.4

Теплофизические параметры микросхем



| Типономинал микросхемы | Шифр корпуса микросхемы | $P_{\text{пот}}$, мВт | $T_{\text{max лоп}}$ корпуса, °C | C_p , Дж/К |
|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| K174УР3 | 201.14-1 | 72 | 105 | 0,7 |
| K174УН3 | 201.14-1 | - | 105 | 0,7 |
| K174УН11 | 201.14-1 | 3000 | 105 | 0,7 |
| K174УПС1 | 201.14-1 | - | 105 | 0,7 |
| 114ИЛ1А | "ТРОПА" | 2,9 | 105 | 1,12 |
| K114ИЛ1А | "ТРОПА" | 2,9 | 90 | 1,12 |
| K114ИЛ1Б | "ТРОПА" | 4 | 90 | 1,12 |
| K114ИР1А | "ТРОПА" | 4,85 | 90 | 1,12 |
| K114ИР1Б | "ТРОПА" | 7,25 | 90 | 1,12 |
| K114ТР1А | "ТРОПА" | 2,42 | 90 | 1,12 |
| K114ТР1Б | "ТРОПА" | 3,65 | 90 | 1,12 |
| K114ЛП1А | "ТРОПА" | 2,3 | 90 | 1,12 |
| K114ЛП2А | "ТРОПА" | 1,15 | 90 | 1,12 |
| K114ЛП1Б | "ТРОПА" | 3,4 | 90 | 1,12 |
| 114ИЛ1Б | "ТРОПА" | 4 | 105 | 1,12 |
| 114ИР1А | "ТРОПА" | 4,85 | 105 | 1,12 |
| 114ИР1Б | "ТРОПА" | 7,25 | 105 | 1,12 |
| 114ТР1А | "ТРОПА" | 2,42 | 105 | 1,12 |

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|----------|------|-----|-------|
| 114ТР1Б | "ТРОПА" | 3,65 | 105 | 1,12 |
| 114ЛП1А | "ТРОПА" | 2,3 | 105 | 1,12 |
| 114ЛП1Б | "ТРОПА" | 3,4 | 105 | 1,12 |
| 114ЛП2А | "ТРОПА" | 1,15 | 105 | 1,12 |
| 114ЛП2Б | "ТРОПА" | 7,25 | 105 | 1,12 |
| К114ЛП2Б | "ТРОПА" | 7,25 | 90 | 1,12 |
| 114ЛП3А | "ТРОПА" | 7,25 | 105 | 1,12 |
| 114ЛЕ1Б | "ТРОПА" | 25,6 | 105 | 1,12 |
| 114ЛП3Б | "ТРОПА" | 25,6 | 105 | 1,12 |
| К114ЛЛ1А | "ТРОПА" | 25,6 | 90 | 1,12 |
| К114ЛЛ2Б | "ТРОПА" | 65 | 90 | 1,12 |
| К114ЛЛ2А | "ТРОПА" | 65 | 90 | 1,12 |
| 114ЛЛ1Б | "ТРОПА" | 65 | 105 | 1,12 |
| 114ЛЛ2А | "ТРОПА" | 65 | 105 | 1,12 |
| 114ЛЛ2Б | "ТРОПА" | 65 | 105 | 1,12 |
| 115ЛЕ1 | 401.14-2 | 65 | 105 | 0,7 |
| 115ЛП1 | 401.14-2 | 65 | 105 | 0,7 |
| 115ЛС1 | 401.14-2 | 65 | 105 | 0,7 |
| К115ЛЕ1 | 401.14-2 | 65 | 90 | 0,7 |
| К115ЛС1 | 401.14-2 | 65 | 90 | 0,7 |
| 115ТР1 | 401.14-2 | 65 | 105 | 0,7 |
| 115ЛЕ3 | 401.14-2 | 100 | 105 | 0,7 |
| 115ЛЕ4 | 401.14-2 | 9 | 105 | 0,7 |
| К115ЛЕ4 | 401.14-2 | 5,5 | 90 | 0,7 |
| 128ЛС1А | 401.14-2 | 10 | 145 | 0,7 |
| К128ЛС1А | 401.14-2 | 9 | 105 | 0,7 |
| К128ЛС1Б | 401.14-2 | 1,2 | 105 | 0,7 |
| К128ЛС1В | 401.14-2 | 0,6 | 105 | 0,7 |
| 128ЛС1Б | 401.14-2 | 40 | 145 | 0,7 |
| 128ЛР1А | 401.14-2 | 102 | 145 | 0,7 |
| 128ЛС1В | 401.14-2 | 88 | 145 | 0,7 |
| 128ЛР1Б | 401.14-2 | 44 | 145 | 0,7 |
| 128ЛР1В | 401.14-2 | 176 | 145 | 0,7 |
| К128ЛР1Б | 401.14-2 | 132 | 105 | 0,7 |
| К128ЛР1В | 401.14-2 | 121 | 105 | 0,7 |
| К128УП1 | 401.14-2 | 58 | 105 | 0,7 |
| К128ЛС3 | 401.14-2 | 142 | 105 | 0,7 |
| К128ЛС4 | 401.14-2 | 22 | 105 | 0,7 |
| К128ЛС5 | 401.14-2 | 100 | 105 | 0,7 |
| К128ЛК1 | 401.14-2 | 7,25 | 105 | 0,7 |
| К128ЛД3 | 401.14-2 | 7,25 | 105 | 0,7 |
| К128ЛД4 | 401.14-2 | 7,25 | 105 | 0,7 |
| К128ИР1 | 401.14-2 | 25,6 | 105 | 0,7 |
| 130ЛР3 | 401.14-2 | 25,6 | 145 | 0,315 |

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------|----------|------|-----|-------|
| 130ЛА1 | 401.14-2 | 25,6 | 145 | 0,315 |
| К130ЛА2 | 401.14-2 | 50 | 90 | 0,315 |
| К130ЛА3 | 401.14-2 | 200 | 90 | 0,315 |
| К130ЛА4 | 401.14-2 | 152 | 90 | 0,315 |
| К130ЛА6 | 401.14-2 | 137 | 90 | 0,315 |
| К131ЛА1 | 201.14-1 | 84 | 90 | 0,7 |
| К131ЛА2 | 201.14-1 | 42 | 90 | 0,7 |
| К131ЛА3 | 201.14-1 | 178 | 90 | 0,7 |
| К131ЛА4 | 201.14-1 | 125 | 90 | 0,7 |
| К131ЛА6 | 201.14-1 | 115 | 90 | 0,7 |
| КР140УД1 | 201.14-1 | 201 | 120 | 0,7 |
| КР140УД5 | 201.14-1 | 304 | 120 | 0,7 |
| КР140УД14 | 201.14-1 | 18 | 120 | 0,7 |
| КР140УД20 | 201.14-1 | 84 | 120 | 0,7 |
| К1401УД1 | 201.14-1 | 255 | 105 | 0,7 |
| К1401УД2 | 201.14-1 | 90 | 105 | 0,7 |
| К1401УД3 | 201.14-1 | 75 | 105 | 0,7 |
| К1401УД4 | 201.14-1 | 330 | 105 | 0,7 |
| К1408УД1 | 201.14-1 | 135 | 105 | 0,7 |
| К157УД1 | 201.14-1 | 270 | 105 | 0,7 |
| К553УД1 | 201.14-1 | 180 | 105 | 0,7 |
| К553УД2 | 201.14-1 | 255 | 105 | 0,7 |
| КМ551УД1 | 201.14-8 | 150 | 105 | 0,7 |
| 1416УД1 | 402.16-6 | 96 | 120 | 1,05 |
| 133ЛА1 | 401.14-2 | 52 | 145 | 0,315 |
| К133ЛА1 | 401.14-2 | 63 | 90 | 0,315 |
| К133ЛА2 | 401.14-2 | 34 | 90 | 0,315 |
| К133ЛА3 | 401.14-2 | 116 | 90 | 0,315 |
| 133ЛА2 | 401.14-2 | 26 | 145 | 0,315 |
| 133ЛА3 | 401.14-2 | 100 | 145 | 0,315 |
| 133ЛА3 | 401.14-2 | 80 | 145 | 0,315 |
| 133ЛР4 | 401.14-2 | 72 | 145 | 0,315 |
| К133ЛР4 | 401.14-2 | 63 | 90 | 0,315 |
| 133ЛД1 | 401.14-2 | 22 | 145 | 0,315 |
| 133ЛД3 | 401.14-2 | 22 | 145 | 0,315 |
| 133ЛР3 | 401.14-2 | 55 | 145 | 0,315 |
| К133ЛР3 | 401.14-2 | 71 | 90 | 0,315 |
| К133ЛД1 | 401.14-2 | - | 90 | 0,315 |
| К133ЛД3 | 401.14-2 | - | 90 | 0,315 |
| К133ЛА6 | 401.14-2 | 95 | 90 | 0,315 |
| К133ЛР1 | 401.14-2 | 76 | 90 | 0,315 |
| К133ЛА7 | 401.14-2 | 84 | 90 | 0,315 |
| 133ЛА6 | 401.14-2 | 82 | 145 | 0,315 |
| 133ЛА7 | 401.14-2 | 82 | 145 | 0,315 |
| 133ЛА8 | 401.14-2 | 100 | 145 | 0,315 |



| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 492 |
|---|---|---|--------------|-----|

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|----------|------|-----|-------|
| 133ЛР1 | 401.14-2 | 69 | 145 | 0,315 |
| 133ТВ1 | 401.14-2 | 110 | 145 | 0,315 |
| К133ТВ1 | 401.14-2 | 110 | 90 | 0,315 |
| 133ТМ2 | 401.14-2 | 160 | 145 | 0,315 |
| К133ТМ2 | 401.14-2 | 160 | 90 | 0,315 |
| КР521СА4 | 201.14-1 | 100 | 90 | 0,7 |
| КР554СА1 | 201.14-1 | 80 | 90 | 0,7 |
| КР554СА2 | 201.14-1 | 77 | 90 | 0,7 |
| КР554СА3 | 201.14-1 | 75 | 90 | 0,7 |
| КР140МА1 | 201.14-1 | 148 | 90 | 0,7 |
| КМ525ПС3 | 201.14-1 | 144 | 105 | 0,7 |
| КР525ПС3 | 201.14-1 | 144 | 90 | 0,7 |
| К157ХА1 | 201.14-1 | 16,5 | 105 | 0,7 |
| К157ХА2 | 201.14-1 | 20 | 105 | 0,7 |
| К157УН1 | 201.14-1 | 65 | 105 | 0,7 |
| К1100СК2 | 201.14-1 | 130 | 105 | 0,7 |
| К1100СК3 | 201.14-1 | 120 | 105 | 0,7 |
| К190КТ1П | 201.14-1 | - | 105 | 0,7 |
| К190КТ2П | 201.14-1 | 0,1 | 105 | 0,7 |
| 134ХЛЗ | 401.14-1 | 8 | 145 | 0,7 |
| К134ТМ2 | 401.14-1 | 6 | 105 | 0,7 |
| 134ЛА8А | 401.14-1 | 6 | 145 | 0,7 |
| 134ЛА8Б | 401.14-1 | 6 | 145 | 0,7 |
| 134ЛА2А | 401.14-1 | 2 | 145 | 0,7 |
| К134ЛР1 | 401.14-1 | 5 | 105 | 0,315 |
| 134ЛР1А | 401.14-1 | 5 | 145 | 0,315 |
| 134ЛР2А | 401.14-1 | 4 | 145 | 0,315 |
| К134ЛР2 | 401.14-1 | 4 | 105 | 0,315 |
| 134ЛР4А | 401.14-1 | 2,5 | 145 | 0,315 |
| 136ЛА1 | 401.14-1 | 8 | 145 | 0,315 |
| 136ЛА2 | 401.14-1 | 4 | 145 | 0,315 |
| 136ЛА3 | 401.14-1 | 22 | 145 | 0,315 |
| 136ЛА4 | 401.14-1 | 12 | 145 | 0,315 |
| 136ЛР1 | 401.14-1 | 11 | 145 | 0,315 |
| 136ЛН1 | 401.14-1 | 18 | 145 | 0,315 |
| К136ЛА1 | 401.14-1 | 9 | 90 | 0,315 |
| К136ЛР3 | 401.14-1 | 13 | 90 | 0,315 |
| 155ЛА1 | 201.14-1 | 52 | 90 | 0,7 |
| К155ЛА1 | 201.14-1 | 39 | 90 | 0,7 |
| КМ155ЛА1 | 201.14-8 | 39 | 105 | 0,7 |
| 155ЛА2 | 201.14-1 | 26 | 90 | 0,7 |
| КМ155ЛА2 | 201.14-8 | 21 | 105 | 0,7 |
| 155ЛА3 | 201.14-1 | 110 | 90 | 0,7 |
| К155ЛА3 | 201.14-1 | 78 | 90 | 0,7 |
| КМ155ЛА3 | 201.14-8 | 78 | 105 | 0,7 |
| 155ЛА4 | 201.14-1 | 80 | 90 | 0,7 |

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|----------|-----|-----|-----|
| K155ЛА4 | 201.14-1 | 57 | 90 | 0,7 |
| KM155ЛА4 | 201.14-8 | 57 | 105 | 0,7 |
| 155ЛА6 | 201.14-1 | 86 | 90 | 0,7 |
| K155ЛА6 | 201.14-1 | 92 | 90 | 0,7 |
| KM155ЛА6 | 201.14-8 | 92 | 105 | 0,7 |
| 155ЛА7 | 201.14-1 | 82 | 90 | 0,7 |
| 155ЛА8 | 201.14-1 | 100 | 90 | 0,7 |
| 155ЛР1 | 201.14-1 | 73 | 90 | 0,7 |
| 155ЛР4 | 201.14-1 | 53 | 90 | 0,7 |
| 155ТВ1 | 201.14-1 | 100 | 90 | 0,7 |
| 155ТМ2 | 201.14-1 | 150 | 90 | 0,7 |
| K155ЛД1 | 201.14-1 | 20 | 90 | 0,7 |
| K155ЛА7 | 201.14-1 | 92 | 90 | 0,7 |
| K155ЛА8 | 201.14-1 | 79 | 90 | 0,7 |
| K155ЛР1 | 201.14-1 | 58 | 90 | 0,7 |
| K155ЛР3 | 201.14-1 | 47 | 90 | 0,7 |
| K155ЛР4 | 201.14-1 | 58 | 90 | 0,7 |
| K155ТВ1 | 201.14-1 | 105 | 90 | 0,7 |
| K155ТМ2 | 201.14-1 | 158 | 90 | 0,7 |
| K155КП5 | 201.14-1 | 230 | 90 | 0,7 |
| K155ЛБ1 | 201.14-1 | 39 | 90 | 0,7 |
| K155ХЛ1 | 201.14-1 | 500 | 90 | 0,7 |
| K155ЛН1 | 201.14-1 | 173 | 90 | 0,7 |
| K155ЛБ2 | 201.14-1 | 21 | 90 | 0,7 |
| K155ЛП5 | 201.14-1 | 263 | 90 | 0,7 |
| K155ИП2 | 201.14-1 | 294 | 90 | 0,7 |
| K155ЛБ3 | 201.14-1 | 78 | 90 | 0,7 |
| K155ЛБ4 | 201.14-1 | 57 | 90 | 0,7 |
| KM155ЛБ6 | 201.14-1 | 92 | 90 | 0,7 |
| KM155ЛА7 | 201.14-1 | 79 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛА8 | 201.14-1 | 79 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛР1 | 201.14-1 | 58 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛР3 | 201.14-1 | 47 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛР4 | 201.14-1 | 58 | 105 | 0,7 |
| KM155ТВ1 | 201.14-1 | 105 | 105 | 0,7 |
| KM155ТМ2 | 201.14-1 | 158 | 105 | 0,7 |
| KM155КП5 | 201.14-1 | 230 | 105 | 0,7 |
| KM155КП7 | 201.14-1 | 260 | 105 | 0,7 |
| KM155ИД1 | 201.14-1 | 132 | 105 | 0,7 |
| KM155ХЛ1 | 201.14-1 | 500 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛП5 | 201.14-1 | 263 | 105 | 0,7 |
| KM155ИП2 | 201.14-8 | 294 | 105 | 0,7 |
| KM155ЛБ7 | 201.14-8 | 79 | 105 | 0,7 |
| KM155ИП4 | 201.14-8 | 378 | 105 | 0,7 |
| KM155КП2 | 201.14-8 | 315 | 105 | 0,7 |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 494 |
|---|---|---|--------------|-----|

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|----------|------|-----|-------|
| 156ЛА4А | 401.14-2 | 17 | | 0,315 |
| 156ЛА4Б | 401.14-2 | 17 | 145 | 0,315 |
| 156ЛА4В | 401.14-2 | 17 | 145 | 0,315 |
| 156ЛА2А | 401.14-2 | 34 | 145 | 0,315 |
| 156ЛА2Б | 401.14-2 | 34 | 145 | 0,315 |
| 156ЛД1А | 401.14-2 | 34 | 145 | 0,315 |
| 156ЛА2В | 401.14-2 | 35 | 145 | 0,315 |
| 156ЛД1Б | 401.14-2 | 35 | 145 | 0,315 |
| 156ЛД1В | 401.14-2 | 35 | 145 | 0,315 |
| 156АГ1А | 401.14-2 | 65 | 145 | 0,315 |
| 156АГ1Б | 401.14-2 | 65 | 145 | 0,315 |
| 156АГ1В | 401.14- | 65 | 145 | 0,315 |
| 156ЛА1 | 401.14-2 | 25 | 145 | 0,315 |
| К158ТВ1 | 201.14-1 | 40 | 90 | 0,7 |
| К158ЛА1 | 201.14-1 | 9,45 | 90 | 0,7 |
| К158ЛА2 | 201.14-1 | 4,98 | 90 | 0,7 |
| К158ЛА3 | 201.14-1 | 19,4 | 90 | 0,7 |
| К158ЛА4 | 201.14-1 | 14,5 | 90 | 0,7 |
| К158ЛР1 | 201.14-1 | 13,6 | 90 | 0,7 |
| К158ЛР3 | 201.14-1 | 13,1 | 90 | 0,7 |
| К158ЛР4 | 201.14-1 | 6,82 | 90 | 0,7 |
| 201ЛБ1 | "ТРОПА" | 15 | 90 | 1,12 |
| К201ЛБ1 | "ТРОПА" | 15 | 70 | 1,12 |
| 201ЛБ2 | "ТРОПА" | 30 | 90 | 1,12 |
| К201ЛБ6 | "ТРОПА" | 38 | 70 | 1,12 |
| 201ЛБ7 | "ТРОПА" | 38 | 90 | 1,12 |
| К201ЛБ7 | "ТРОПА" | 38 | 70 | 1,12 |
| 201ЛС1 | "ТРОПА" | 30 | 90 | 1,12 |
| К201ЛС1 | "ТРОПА" | 30 | 70 | 1,12 |
| К201ЛБ2 | "ТРОПА" | 30 | 70 | 1,12 |
| К201ЛБ3 | "ТРОПА" | 30 | 70 | 1,12 |
| 201ЛБ3 | "ТРОПА" | 30 | 90 | 1,12 |
| 201ЛБ4 | "ТРОПА" | 25 | 90 | 1,12 |
| К201ЛБ4 | "ТРОПА" | 25 | 70 | 1,12 |
| 201ЛБ5 | "ТРОПА" | 20 | 90 | 1,12 |
| К201ЛБ5 | "ТРОПА" | 20 | 70 | 1,12 |
| 201ЛБ6 | "ТРОПА" | 38 | 90 | 1,12 |
| 202ЛН1 | "ТРОПА" | 28 | 90 | 1,12 |
| 202ЛН2 | "ТРОПА" | 28 | 90 | 1,12 |
| 202УИ1 | "ТРОПА" | 41 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС1 | "ТРОПА" | 19 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС2 | "ТРОПА" | 19 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС3 | "ТРОПА" | 67 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС4 | "ТРОПА" | 67 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС5 | "ТРОПА" | 19 | 90 | 1,12 |
| 202ЛС6 | "ТРОПА" | 19 | 90 | 1,12 |

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|------------|------|----|------|
| 204ТК1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 37 | 90 | 0,77 |
| К204ТК1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 37 | 75 | 0,77 |
| 204ЛБ1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 68 | 90 | 0,77 |
| К204ЛБ1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 68 | 75 | 0,77 |
| 204ЛБ2 | "ТРАПЕЦИЯ" | 56 | 90 | 0,77 |
| К204ЛБ2 | "ТРАПЕЦИЯ" | 56 | 75 | 0,77 |
| 204ЛИ1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 18 | 90 | 0,77 |
| К204ЛИ1 | "ТРАПЕЦИЯ" | 18 | 75 | 0,77 |
| 217ЛД1 | "ПОСОЛ" | 18,5 | 90 | 1,05 |
| К217ЛД1 | "ПОСОЛ" | 18,5 | 90 | 1,05 |
| 217ЛД2 | "ПОСОЛ" | 9 | 90 | 1,05 |
| 218ЛН2 | 151.15-2 | 27,8 | 90 | 1,26 |
| К218ЛН2 | 151.15-2 | 27,8 | 95 | 1,26 |
| 218ЛН3 | 151.15-2 | 27,8 | 90 | 1,26 |
| К218ЛН3 | 151.15-2 | 27,8 | 95 | 1,26 |
| 230ИЕ1А | 421.50-1 | 1200 | 90 | 8,4 |
| К230ИЕ1А | 421.50-1 | 1200 | 90 | 8,4 |
| 230ИЕ1Б | 421.50-1 | 1200 | 90 | 8,4 |
| К230ИЕ1Б | 421.50-1 | 1200 | 90 | 8,4 |
| 230ИЕ2А | 421.50-1 | 1400 | 90 | 8,4 |
| К230ИЕ2А | 421.50-1 | 1400 | 90 | 8,4 |
| К230ИР1Б | 421.50-1 | 1700 | 90 | 8,4 |
| 230ИР2А | 421.50-1 | 1000 | 90 | 8,4 |
| К230ИР2А | 421.50-1 | 1000 | 90 | 8,4 |
| 230ИР2Б | 421.50-1 | 1000 | 90 | 8,4 |
| К230ИР2Б | 421.50-1 | 1000 | 90 | 8,4 |
| 230ИП1А | 421.50-1 | 1500 | 90 | 8,4 |
| К230ИП1А | 421.50-1 | 1500 | 90 | 8,4 |
| 230ИК1 | 421.50-1 | 600 | 90 | 8,4 |
| К230ИК1 | 421.50-1 | 600 | 90 | 8,4 |
| 243ЛА1 | 421.50-1 | 19,1 | 90 | 1,12 |
| 243ЛА2 | 421.50-1 | 40 | 90 | 1,12 |
| 243ЛА3 | 421.50-1 | 24 | 90 | 1,12 |
| 243ЛА4 | 421.50-1 | 43 | 90 | 1,12 |
| 243ЛА5 | "ТРОПА" | 28,6 | 90 | 1,12 |
| 243ЛА6 | "ТРОПА" | 33 | 90 | 1,12 |
| 243ЛН1 | "ТРОПА" | 25 | 90 | 1,12 |
| 243ЛН2 | "ТРОПА" | 65 | 90 | 1,12 |
| 243ЛН3 | "ТРОПА" | 50 | 90 | 1,12 |
| 243РП1 | "ТРОПА" | 19 | 90 | 1,12 |
| 243УП1 | "ТРОПА" | 65 | 90 | 1,12 |
| 243ЛП1 | "ТРОПА" | 70 | 90 | 1,12 |
| 228УВ2 | "ТРОПА" | 70 | 90 | 1,26 |
| 228УВ3 | "ТРОПА" | 70 | 90 | 1,26 |
| К228СА1 | "ТРОПА" | 65 | 90 | 1,26 |
| К228КН1 | "ТРОПА" | 100 | 90 | 1,26 |

Продолжение табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|----------|-----|-----|------|
| K228УВ1 | 151.15-2 | 70 | 90 | 1,26 |
| K228УВ2 | 151.15-2 | 70 | 90 | 1,26 |
| K228УВ3 | 151.15-2 | 85 | 90 | 1,26 |
| 265УВ7 | 151.15-2 | 206 | 90 | 1,26 |
| 265ПП2 | 151.15-2 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УВ1 | 151.15-2 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УВ2 | 151.15-2 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УВ3 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УВ4 | 151.15-4 | 89 | 90 | 1,26 |
| 265УВ5 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УВ6 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| 265УД1 | 151.15-4 | 50 | 90 | 1,26 |
| 265КН1 | 151.15-4 | 111 | 90 | 1,26 |
| K265УВ7 | 151.15-4 | 206 | 90 | 1,26 |
| K265ПП2 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| K265УВ1 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| K265УВ2 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| K265УВ3 | 151.15-4 | 70 | 90 | 1,26 |
| K265УВ4 | 151.15-4 | 89 | 89 | 1,26 |
| K265УВ5 | 151.15-4 | 70 | 70 | 1,26 |
| K265УВ6 | 151.15-4 | 70 | 70 | 1,26 |
| K265УД1 | 151.15-4 | 50 | 50 | 1,26 |
| K265КН1 | 151.15-4 | 111 | 111 | 1,26 |
| 564ПУ4 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564СА1 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ТВ1 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ТР2 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ТМ2 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ТМ3 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564КТ3 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564КП1 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564КП2 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ЛН1 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ЛН2 | 401.14-5 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ЛА7 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛА8 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛА9 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛС2 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛЕ5 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛЕ6 | 401.14-5 | 60 | 60 | 1,05 |
| 564ЛЕ10 | 401.14-5 | 60 | 60 | 1,05 |
| 564ЛП13 | 401.14-5 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ЛП2 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ИР2 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ИР6 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ИР9 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ИР11 | 402.16-6 | 200 | 200 | 1,05 |
| 564ИР12 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |

Окончание табл. П2.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|----------|-----|-----|------|
| 564ИЕ9 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ИЕ10 | 402.16-6 | 150 | 150 | 1,05 |
| 564ИЕ11 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИД1 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИМ1 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИК1 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИП2 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИП3 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИП4 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564ИП5 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |
| 564РУ2 | 402.16-6 | 200 | 90 | 1,05 |

Таблица П2.5

$R_{\text{тк}}$ корпусов микросхем

| Шифр корпуса микросхемы | $R_{\text{тк}}, \text{ К/Вт}$ | | |
|-------------------------|-------------------------------|------|-----|
| | Вариант установки | | |
| | 1-й | 2-й | 3-й |
| "ПОСОЛ" | 1,5 | 0,45 | - |
| "ТРОПА" | 1,1 | 0,35 | - |
| "ТРАПЕЦИЯ" | 2,8 | 0,10 | - |
| 151.15-2 | 1,95 | 0,65 | - |
| 151.15-4 | 1,3 | 0,40 | - |
| 201.14-1,8 | 14,0 | 1,70 | 1,6 |
| 401.14-1,2 | 19,0 | 5,40 | 5,0 |
| 402.14-5 | 19,0 | 5,40 | 5,0 |
| 402.16-6 | - | 4,15 | 3,9 |
| 421.50-1 | - | 0,32 | 0,3 |



Таблица П2.6

Номера типоразмеров корпусов конденсаторов

| Номера типовых размеров корпусов конденсаторов | | | | | |
|--|----------------------|------------|-------------|---------------------------------|---------------|
| Типономинал конденсатора | $U_{\text{ном}}$, В | Группа ТКЕ | C_n , мкФ | $T_{\text{таждоп}}$ корпуса, °С | Номер корпуса |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| K10-47 | 25 | H30 | 0,68 | 150 | 39 |
| | | | 1,5 | | 40 |
| | | | 2,2 | | 41 |
| | 100 | | 0,033 | | 37 |
| | | | 0,068 | | 38 |
| | | | 0,15 | | 39 |
| | | | 0,33 | | 40 |
| | | | 0,68 | | 41 |
| | | | 250 | | 0,0068 |
| | 0,015 | 38 | | | |
| | 0,047 | 39 | | | |
| | 0,068 | 40 | | | |
| | 25 | H80 | 0,1 | | 41 |
| 2,2 | | | 39 | | |
| 3,3 | | | 40 | | |
| 50 | 6,8 | | 41 | | |
| | 1,5 | | 40 | | |
| | 2,2 | 41 | | | |
| K53-4A | 6,3 | - | 4,7 | 110 | 21 |
| | | | 10 | | 22 |
| | | | 22 | | 23 |
| | | | 47 | | 24 |
| | | | 100 | | 25 |
| | | | 150 | | 26 |
| | | | 220 | | 27 |
| | | | 330 | | 28 |
| | | | 16 | | 3,3 |
| | 6,8 | | | | 22 |
| | 15 | | | | 23 |
| | 33 | | | | 24 |
| | 68 | | | | 25 |
| | 100 | | | | 26 |
| | 150 | | | | 27 |
| | 220 | | | | 28 |
| | | | | | |
| | | | | | |

Продолжение табл. П2.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-----|----|------|-----|----|
| K53-4A | 20 | - | 2,2 | 110 | 21 |
| | | | 4,7 | | 22 |
| | | | 10 | | 23 |
| | | | 22 | | 24 |
| | | | 47 | | 25 |
| | 30 | | 1,0 | | 21 |
| | | | 2,2 | | 22 |
| | | | 6,8 | | 23 |
| | | | 15 | | 24 |
| | | | 33 | | 25 |
| | 40 | | 0,33 | | 21 |
| | | | 1,5 | | 22 |
| | | | 3,3 | | 23 |
| | | | 10 | | 24 |
| | 50 | | 0,68 | | 21 |
| | | | 1,0 | | 22 |
| 2,2 | | 23 | | | |
| 6,8 | | 24 | | | |
| K71-7 | 250 | - | 0,03 | 110 | 29 |
| | | | 0,05 | | 30 |
| | | | 0,10 | | 31 |
| | | | 0,15 | | 32 |
| | | | 0,20 | | 33 |
| | | | 0,30 | | 34 |
| | | | 0,40 | | 35 |
| | | | 0,50 | | 36 |
| K73-16 | 63 | - | 0,1 | 100 | 1 |
| | | | 0,15 | | 2 |
| | | | 0,18 | | 3 |
| | | | 0,33 | | 4 |
| | | | 0,39 | | 5 |
| | | | 0,47 | | 6 |
| | | | 0,56 | | 7 |
| | | | 0,68 | | 8 |
| | | | 0,82 | | 9 |
| | | | 1,0 | | 10 |
| | | | 1,2 | | 11 |
| | | | 1,8 | | 12 |
| | | | 2,2 | | 13 |
| | | | 3,3 | | 14 |
| | | | 3,9 | | |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 500 |
|---|---|---|--------------|-----|



Окончание табл. П2.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|-----|---|------|-----|----|
| | | | 5,6 | | 14 |
| | | | 6,8 | | 15 |
| | | | 8,2 | | 16 |
| | | | 12 | | 17 |
| | | | 15 | | 18 |
| | | | 22 | | 19 |
| К73-16 | 100 | - | 0,12 | 100 | 2 |
| | | | 0,15 | | 3 |
| | | | 0,18 | | 4 |
| | | | 0,22 | | 4 |
| | | | 0,33 | | 5 |
| | | | 0,39 | | 6 |
| | | | 0,47 | | 7 |
| | | | 0,56 | | 8 |
| | | | 0,68 | | 20 |
| | | | 0,82 | | 9 |
| | | | 1,0 | | 10 |
| | | | 1,5 | | 11 |
| | | | 2,2 | | 12 |
| | | | 2,7 | | 13 |
| | | | 3,3 | | 14 |
| | | | 3,9 | | 15 |
| | | | 5,6 | | 16 |
| | | | 6,8 | | 17 |
| | | | 8,2 | | 1 |

Таблица П2.7

ГТФП корпусов конденсаторов

| Номер корпуса | $S_{пэ}$, мм ² | $R_{тк}$, К/Вт | S_3 , Дж/К | Номер корпуса | $S_{пэ}$, мм ² | $R_{тк}$, К/Вт | S_3 , Дж/К |
|---------------|-------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|--------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 396 | 151 | 4 | 22 | 151 | 135 | 0,5 |
| 2 | 473 | 158 | 5 | 23 | 188 | 135 | 0,6 |
| 3 | 517 | 158 | 7 | 24 | 353 | 91 | 1,8 |
| 4 | 603 | 95 | 8 | 25 | 443 | 91 | 2 |
| 5 | 692 | 100 | 10 | 26 | 594 | 6,3 | 3,8 |
| 6 | 785 | 104 | 12 | 27 | 735 | 6,3 | 5,4 |
| 7 | 881 | 109 | 12 | 28 | 942 | 6,6 | 7 |
| 8 | 980 | 114 | 14 | 29 | 768 | 1,3 | 12 |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 501 |
|---|---|---|--------------|-----|

Окончание табл. П2.7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|------|-----|-----|----|------|------|-----|
| 9 | 1032 | 100 | 11 | 30 | 1002 | 1,0 | 16 |
| 10 | 1162 | 104 | 12 | 31 | 1216 | 0,8 | 20 |
| 11 | 1296 | 109 | 14 | 32 | 1394 | 0,7 | 24 |
| 12 | 1565 | 104 | 20 | 33 | 1484 | 0,7 | 28 |
| 13 | 1849 | 109 | 20 | 34 | 1824 | 0,6 | 38 |
| 14 | 2036 | 114 | 22 | 35 | 2240 | 0,5 | 46 |
| 15 | 2226 | 118 | 26 | 36 | 1992 | 0,45 | 56 |
| 16 | 2419 | 123 | 30 | 37 | 170 | 0,7 | 1,6 |
| 17 | 2815 | 85 | 38 | 38 | 235 | 5,2 | 2,0 |
| 18 | 3644 | 97 | 58 | 39 | 342 | 3,0 | 3,5 |
| 19 | 4078 | 103 | 70 | 40 | 419 | 2,2 | 5 |
| 20 | 905 | 90 | 10 | 41 | 530 | 1,6 | 6,3 |
| 21 | 91 | 128 | 0,3 | | | | |

Таблица П2.8

**Геометрические и теплофизические параметры бескорпусных
и микрокорпусных ЭРЭ**

| Типономинал ЭРЭ | $R_{п-к}$, К/Вт | $T_{\text{max доп}}$ р-п перехода, °С | Линейные размеры кристалла или микро- корпуса, мм |
|------------------------------|------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Диоды: | | | |
| 2С133 Д-1 | - | 125 | $1,7 \times 1,7$ |
| КД907 А-1...Г-1 | 22 | 105 | $1,0 \times 1,0$ |
| КД918 А-1...Г-1 | 22 | 105 | $1,0 \times 1,0$ |
| КД904 А-1...В-1 | - | 105 | $1,0 \times 1,0$ |
| 2Д910 А-1...В-1 | - | 105 | $1,0 \times 1,0$ |
| 2С136 Д-1 | - | 150 | $1,7 \times 1,7$ |
| 2С164 М-1, М-9 | 4 | 150 | $1,7 \times 1,7$ |
| 2С182 К-1 | - | 150 | $1,7 \times 1,7$ |
| Транзисторы и сборки: | | | |
| 2Т214 Б-1, Г-1 | - | 125 | $1,2 \times 1,2$ |
| 2Т215 Е-1 | 100 | 125 | $1,2 \times 1,2$ |
| КТ215 А-1...Д-1 | 100 | 125 | $1,2 \times 1,2$ |
| 2Т354 А-1,Б-1 | - | 150 | $1,2 \times 1,0$ |
| 2Т360 А-1...В-1 | - | 125 | $0,7 \times 0,7$ |
| 2Т378 А-2, Б-2 | - | 150 | $2,0 \times 2,0$ |
| КТ379 | 100 | 100 | $0,7 \times 0,7$ |
| КТ380 | 100 | 100 | $1,0 \times 1,0$ |
| 2Т384 А-2 | 100 | 135 | $1,9 \times 1,9$ |
| КТ384 | 100 | 120 | $1,9 \times 1,9$ |
| КТ384 АМ | 100 | 120 | $3,0 \times 1,0$ |
| КТ385 | 110 | 120 | $1,9 \times 1,9$ |
| КТ385 АМ | 110 | 120 | $3,0 \times 7,0$ |
| 2Т388 АМ-2 | - | 135 | $1,2 \times 2,5$ |

Окончание табл. П2.8

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|------|-----|-----------|
| КТ624 А-2 | 50 | 120 | 1,9 × 1,9 |
| 2Т384 АМ-2 | 110 | 135 | 3,0 × 1,0 |
| 2Т385 А-2 | 110 | 135 | 1,9 × 1,9 |
| 2Т385 АМ-2 | 110 | 135 | 3,0 × 1,0 |
| 2Т624 А-2 | 50 | 135 | 1,9 × 1,9 |
| 2Т624 АМ-2 | 50 | 135 | 3,0 × 1,0 |
| КТ624 А-2 | 50 | 120 | 1,9 × 1,9 |
| КТ624 АМ-2 | 50 | 120 | 3,0 × 1,0 |
| КТ625 | 50 | 120 | 1,9 × 1,9 |
| КТ625 АМ-2, БМ-2 | 50 | 120 | 3,0 × 1,0 |
| 2Т625 АМ-2, БМ-2 | 50 | 135 | 3,0 × 1,0 |
| 2Т625 А-2, Б-2 | 50 | 135 | 1,9 × 1,9 |
| 2Т629 А-2 | 55 | 135 | 1,9 × 1,9 |
| КТ820 А-1 | 10 | 125 | 1,8 × 1,8 |
| КТ821 А-1...Б-1 | 10 | 125 | 1,8 × 1,8 |
| КТ822 А-1...Б-1 | 5 | 125 | 1,8 × 1,8 |
| КТ823 А-1, Б-1 | 5 | 125 | 2,2 × 2,2 |
| 2Т990 А-2 | 7 | 175 | - |
| 2Т381 А-1, Б-1 | 4000 | 90 | 1,1 × 1,1 |
| 2П201 А-1, Б-1 | - | 105 | 0,8 × 0,8 |
| 2П202 Д-1, Е-1 | - | 150 | 0,8 × 0,8 |
| КП202 Д-1, Е-1 | - | 105 | 0,8 × 0,8 |
| 2Т324 А-1, Б-1 | - | 100 | 0,6 × 0,6 |
| 2Т370 А-1, Б-1 | - | 125 | 0,6 × 0,6 |
| 2Т364 А-2, Б-2 | - | 125 | 3,0 × 1,0 |
| 2ПС202 | 75 | 125 | 1,0 × 2,0 |
| КТС394 | 10 | 150 | 1,2 × 2,5 |
| КТС395 | 10 | 150 | 1,2 × 2,5 |
| 2ТС303 А-2 | - | 150 | 4,0 × 4,0 |
| 2ТС941 А-2 | - | 150 | 4,0 × 4,0 |
| Микросхемы: | | | |
| 740 УД4-1 | 20 | 135 | - |
| К140 УД6-1 | 15 | 135 | - |
| 703 ТВ1 | 25 | 150 | - |
| 703 ЛА1 | 25 | 150 | - |
| 703 ЛР1 | 25 | 150 | - |

Таблица П2.9

Значения тепловых сопротивлений крепления бескорпусных и микрокорпусных ЭРЭ

| Тип ЭРЭ | R_{TK} (в К/Вт) при использовании различных материалов крепления ЭРЭ | | | | | |
|--|--|-----------|------------------|-----------|-----|-------|
| | Клеи | | | Компаунды | | |
| | ВК-9 | ВК-32-100 | ЭЛАСТОСИЛ 137-83 | К1 | К2 | КТЭ-2 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2Т215 Е-1 КТ215 Е-1, Д-1 | 204 | 420 | 180 | 79 | 124 | 133 |
| 2Т625 А-2, Б-2 2Т624 А-2 КТ624 А-2 2Т385 А-2 | 81,5 | 288 | 71 | 31 | 50 | 53 |
| 2Т324 А-1...Е-1 КТ324 А-1...Е-1 2Т370 А-1, Б-1 КТ370 В-1, Б-1 | 816 | 2020 | 715 | 316 | 496 | 533 |
| 2П201 А-1...Ж-1 2П202 А-1...Л-1 КП202 Д1, Е-1 | 460 | 1680 | 402 | 178 | 279 | 300 |
| 2Т381 | 243 | 860 | 213 | 94 | 147 | 158 |
| 2Т364 А-2 2Т625 АМ-2 КТ624 АМ-2 | 93 | 331 | 82 | 36 | 57 | 61 |
| КТ820 А-1 КТ821 А-1 КТ822 А-1 | 91 | 321 | 80 | 35 | 55 | 59 |
| КТ823 А-1 | 61 | 215 | 53 | 23 | 37 | 40 |
| КТС394 КТС395 | 78 | 278 | 69 | 30 | 47 | 51 |
| 2С130 Д-1 2С127 А-1 2С133 Д-1 2С136 Д-1 2С139 Д-1 2С143 Д-1 2С147 Т-1 2С156 Т-1 2С162 Б-1 2С168 К-1 2С175 К-1 2С182 К-1 2С191 К-1 2С210 К-1 2С211 К-1 2С212 К-1 | 100 | 350 | 89 | 39 | 62 | 66 |

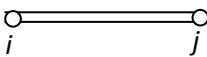
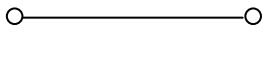
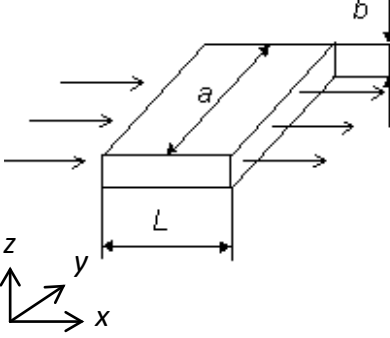
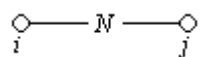
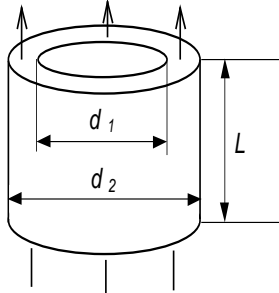
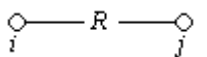
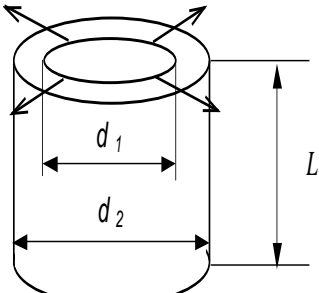
Окончание табл. П2.9

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 2Д901 А-1 КД901А-1 2Д904 А-1 КД904 А-1 КД907 А-1 КД910 А-1 2Д910 А-1 2Д918 А-1 | 290 | 1040 | 258 | 114 | 178 | 192 |

Приложение 3. Компоненты топологических моделей тепловых процессов

Таблица П3.1


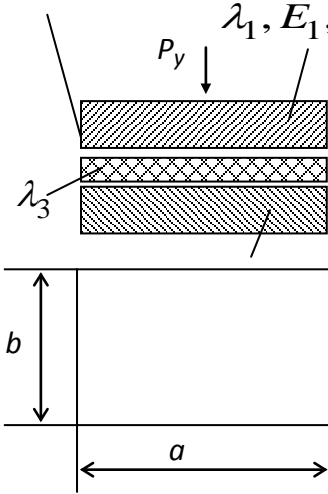
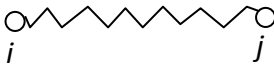
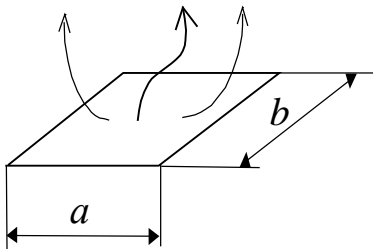
Компоненты топологических моделей тепловых процессов и аналитические модели для вычисления их параметров

| Вид теплообмена, обозначения ветви топологической модели (тип ветви – номер аналитической модели) | Графическое пояснение | Аналитическая модель для вычисления параметра ветви топологической модели (система СИ) |
|--|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| <p>(1) Заданное значение теплового сопротивления</p>  | <p>Например тепловое сопротивление R_T «переход – корпус» у полупроводникового прибора и т. п.</p> | $X_{ij}^T = \frac{1}{R_T}$ |
| <p>(2) Кондукция в декартовой системе координат</p>  |  | $X_{ij}^T = \frac{\lambda ab}{L},$ <p>где λ – коэффициент теплопроводности материала.</p> $X_{ij}^T(x) = \frac{\lambda ab}{L}; \quad X_{ij}^T(y) = \frac{\lambda bL}{a};$ $X_{ij}^T(z) = \frac{\lambda La}{b}$ |
| <p>(3) Кондукция в цилиндрической системе координат (нормальное направление)</p>  |  | $X_{ij}^T = \frac{\pi\lambda(d_2^2 - d_1^2)}{4L}$ |
| <p>(4) Кондукция в цилиндрической системе координат (радиальное направление)</p>  |  | $X_{ij}^T = \frac{2\pi\lambda L}{\ln(d_2 / d_1)}$ |

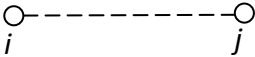
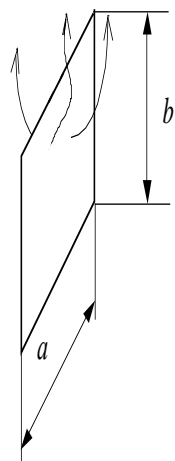
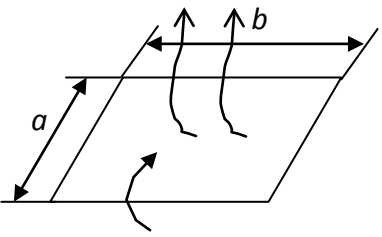
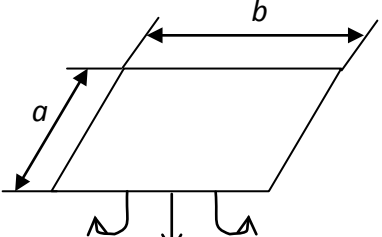
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|
| <p>(5)</p> <p>Кондукция в цилиндрической системе координат (рокадное направление)</p> <p>$i \text{ --- } \mathbf{D} \text{ --- } j$</p> | | $X_{ij}^T = \frac{L\lambda \cdot (d_2 + d_1)}{\pi \cdot (d_2 - d_1)}$ |
| <p>(7)</p> <p>Кондукция в сферической системе координат</p> <p>$i \text{ --- } \mathbf{S} \text{ --- } j$</p> | | $X_{ij}^T = \frac{4\pi\lambda}{r_1^{-1} - r_2^{-1}}$ |
| <p>(11)</p> <p>Контактный теплообмен (1-й вариант)</p> <p>$i \text{ --- } \text{---} j$</p> | | <p>Для прямоугольного пятна:</p> $X_{ij}^T = \frac{a \cdot b}{0,0022 \cdot k_c};$ <p>где k_c – коэффициент смазки; $k_c = 1,0$ – сухой контакт; $k_c = 0,2$ – межконтактная среда – паста КПТ-8; $k_c = 0,4$ – межконтактная среда – глицерин.</p> <p>Для круглого пятна:</p> $X_{ij}^T = \frac{d^2}{0,0002 k_c}$ |

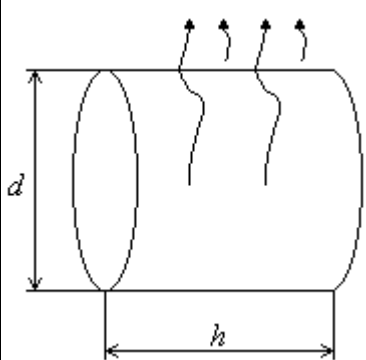
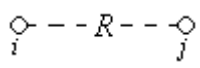
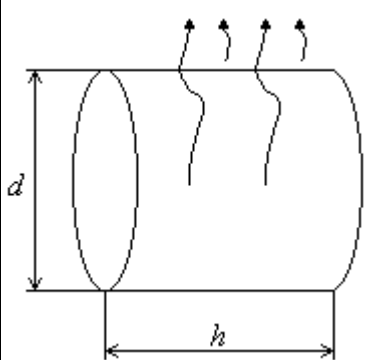
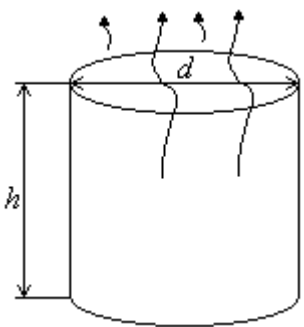
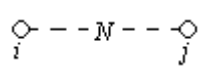
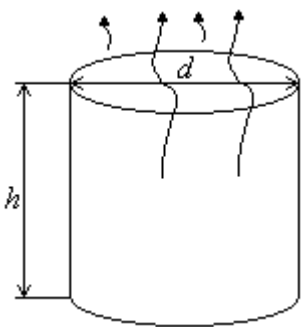
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| <p>(13)</p> <p>Контактный теплообмен (2-й вариант – частный случай)</p>  | <p>Межконтактная среда</p>  <p>λ, E, R_z – коэффициент теплопроводности материала, модуль упругости (модуль Юнга) материала, средняя высота микронеровностей (1-60 мкм), $P_{y\partial}$ – удельное давление в области контакта ($3 \cdot 10^4 - 10^6 \text{ Н/м}^2$)</p> | $X_{ij}^T = (X_{\phi}^T + X_{cp}^T) \cdot S$ <p>X_{ϕ}^T – удельная тепловая проводимость фактического контакта; X_{cp}^T – удельная тепловая проводимость межконтактной среды; $S = a \cdot b$ – площадь контакта;</p> $E_{II} = 2E_1 E_2 / (E_1 + E_2) -$ $\lambda_{II} = 2\lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) - \text{приведенные значения модуля Юнга и коэффициента теплопроводности};$ $B_n = 34,75 - 7,68 \cdot (R_{z1} + R_{z2})^{0,26};$ $X_{\phi}^T = \frac{2,12 \cdot \lambda_{II} \cdot (P_{y\partial} / (E_{II} \cdot B_n))^{0,8}}{0,0001};$ $X_{cp}^T = \lambda_3 / [(R_{z1} + R_{z2}) \cdot m];$ $m = 0,4 + 4,06 \cdot 10^{-2} \cdot (R_{z1} + R_{z2})^{0,353}$ <p>(для поверхностей с чистотой обработки $\nabla 3 - \nabla 10$ из материалов с $E > 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $B_n = f(h_1 + h_2)$, где h_1, h_2 – высоты микронеровностей поверхностей)</p> |
| <p>(16)</p> <p>Тепловое излучение с гладкой (неразвитой) поверхности тела</p>  |  | $X_{ij}^T = \alpha_n S, \quad S = ab,$ <p>где $\alpha_n = \varepsilon \cdot \xi \cdot f(T)$ – коэффициент лучистой теплоотдачи; $f(T) = 0,567 \cdot 10^{-7} \cdot$ $\cdot [(T_i^2 + T_j^2) \cdot (T_i + T_j)];$ T_i и T_j – температуры тел (по шкале Кельвина), участвующих в излучении; ε – приведенный коэффициент черноты поверхностей тел; ξ – приведенный коэффициент облученности</p> |

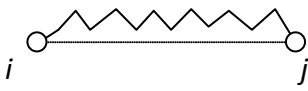
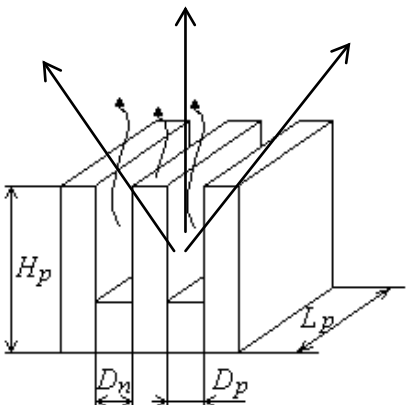
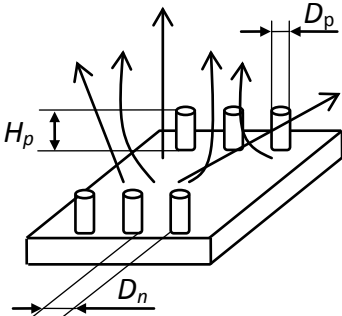
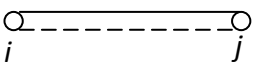
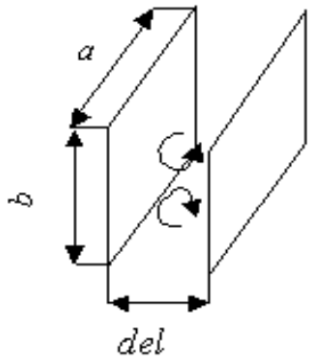
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|---|
| <p>(26)</p> <p>Естественная конвекция с плоской неразвитой поверхностью во окружающую среду</p>  | <p>Вертикальная поверхность:</p>  <p>$L_0 = b$ – определяющий размер;</p> <p>$k_{op} = 1,0$ – коэффициент ориентации;</p> <p>Горизонтальная поверхность:</p>  <p>Нагретая зона вверх:</p> <p>$L_0 = \min(a, b);$</p> <p>$k_{op} = 1,3;$</p>  <p>Нагретая зона внизу:</p> <p>$L_0 = \min(a, b);$</p> <p>$k_{op} = 0,7$</p> | <p>$X_{ij}^T = \alpha_k S, S = ab,$</p> <p>$\alpha_k = (\lambda_{хл} \cdot Nu / L_0) \cdot (P_{oc} / 760)^{0,5} \cdot K_{op}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи; P_{oc} – давление окружающей среды; $\lambda_{хл}$ – коэффициент теплопроводности хладоносителя;</p> <p>$T_m = \frac{T_i + T_j}{2},$ T_i и T_j – температуры тела и окружающей среды;</p> <p>Nu – число Нуссельта; Pr – число Прандтля; Gr – число Грасгофа;</p> <p>$Pr = \nu / k_a;$</p> <p>ν – коэффициент кинематической вязкости хладоносителя;</p> <p>k_a – коэффициент теплопроводности хладоносителя;</p> <p>$Gr = 9,8 \cdot \beta \cdot (T_i - T_j) / (L_0^3 / \nu^2);$</p> <p>$\beta$ – коэффициент объемного расширения хладоносителя;</p> <p>$Nu = 0,45$ при $Gr < 10^{-3};$</p> <p>$Nu = 1,18(GrPr)^{0,125}$ при $10^{-3} \leq Gr < 10^2;$</p> <p>$Nu = 0,54(GrPr)^{0,25}$ при $10^2 \leq Gr < 2 \cdot 10^7;$</p> <p>$Nu = 1,18(GrPr)^{0,125}$ при $Gr > 2 \cdot 10^7$</p> |

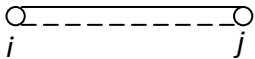
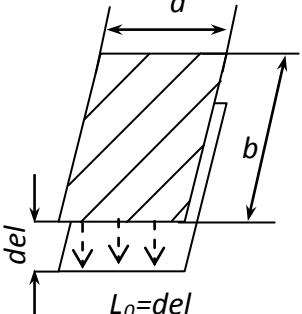
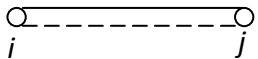
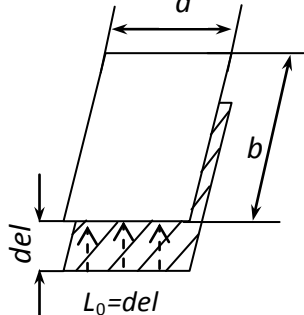
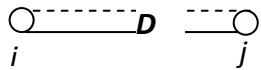
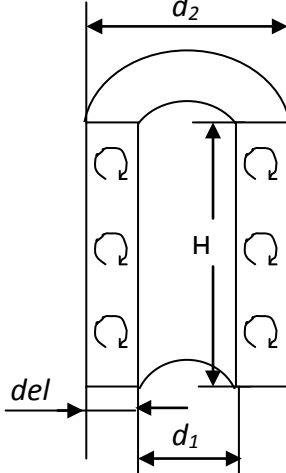
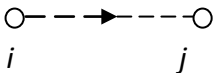
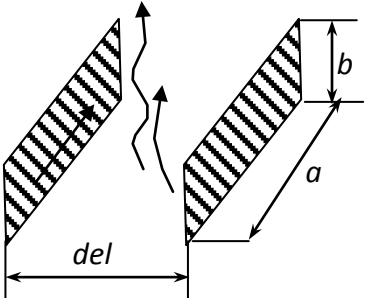
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|--|
| <p>(27)</p> <p>Естественная конвекция с неразвитой горизонтальной цилиндрической поверхности в окружающую среду</p> <p></p> <p>$L_0 = d;$ $k_{op}=1$</p> <p></p> | <p></p> <p>$L_0 = d;$ $k_{op}=1$</p> | <p>$X_{ij}^T = \alpha_k S,$ $S=2\pi r^2 h; r=d/2;$ $\alpha_k = (\lambda_{xл} Nu / L_0)(P_{oc} / 760)^{0,5} \cdot K_{op};$ $Nu = 0,54 (Gr Pr)^{0,25}$ $при Gr Pr < 10^4;$ $Nu = 0,547 (Gr Pr)^{0,25}$ $при 10^4 \leq Gr Pr \leq 10^9;$ $Nu=0,1(Gr Pr)^{0,33}$ $при Gr Pr > 10^9$</p> |
| <p>(28)</p> <p>Естественная конвекция с неразвитой вертикальной цилиндрической поверхности в окружающую среду</p> <p></p> <p>$L_0 = h,$ $k_{op}=1$</p> <p></p> | <p></p> <p>$L_0 = h,$ $k_{op}=1$</p> | <p>$X_{ij}^T = \alpha_k S, S = 2\pi r^2 h, r = d / 2$ $\alpha_k = (\lambda_{xл} Nu / L_0) \cdot (P_{oc} / 760)^{0,5} \cdot K_{op};$ 1. $\frac{d}{h} < Gr^{-0,25};$ $Nu = 0,54 (Gr Pr)^{0,25}$ $при Gr Pr < 10^4;$ $Nu = 0,547 (Gr Pr)^{0,2};$ $при Gr Pr \geq 10^4;$ 2. $\frac{d}{h} \geq Gr^{-0,25};$ $Nu = 0,54 (Gr Pr)^{0,25}$ $при Gr Pr < 10^4;$ $Nu = 0,516 (Gr Pr)^{0,25}$ $при 10^4 \leq Gr Pr \leq 10^9;$ $Nu = 0,021 (Gr Pr)^{0,4}$ $при Gr Pr \geq 10^9$</p> |

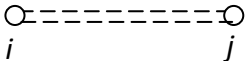
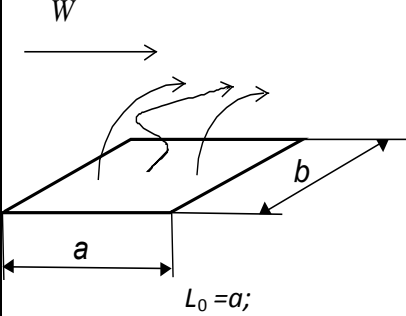

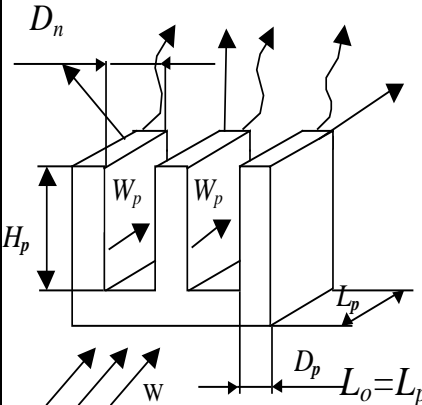
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| <p>(36/37)</p> <p>Конвективно – лучистая теплоотдача с оребренной (развитой) поверхности (оребрение пластинчатое)</p>  |  <p>$L_0 = L_p;$ $k_{op} = 1,3$</p>  | $X_{ij}^T = (\alpha_l + \alpha_k) \cdot (S_n + \eta_p \cdot S_p)$ <p>α_l – см. лучистый теплообмен; $\xi_0 = D_n / (2H_p + D_n);$ S_p – площадь ребер; S_n – площадь пазов;</p> $\alpha_k = (\lambda_g \cdot Nu / L_0) \cdot (P_{oc} / 760)^{0,5} K_{op};$ $Nu = 1,4 \cdot \sqrt{\left(1 + 0,113 \cdot Gr \cdot \frac{Dr}{2L}\right)}$ <p>при $Gr \cdot \frac{D_n}{2L} < 7;$</p> $Nu = 0,5 \cdot Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p}$ <p>при $7 \leq Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p} \leq 20;$</p> $Nu = 0,5 \cdot Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p}$ <p>при $Gr \cdot \frac{D_n}{2L_p} > 20;$</p> <p>$\eta_p = th \cdot (m \cdot H_p) / (m \cdot H_p)$ – эффективность ребра, $m = \sqrt{((a_l + a_k) \cdot P_p) / (\lambda_p \cdot F_p)},$ где P_p – периметр сечения ребра; F_p – площадь сечения ребра; λ_p – коэффициент теплопроводности материала ребра</p> |
| <p>(41)</p> <p>Конвективно-кондуктивный теплоперенос через плоские воздушные прослойки</p>  |  | <p>$del < 0,005:$</p> $X_{ij}^T = (\lambda_{xl} ab) / del;$ <p>$del \geq 0,005:$</p> $X_{ij}^T = \alpha_k S, \quad S = ab$ $\alpha_k = 0,45 \left(\frac{ T_i - T_j }{del} \right)^{0,5} \cdot (P_{oc} / 760)^{0,5}$ |


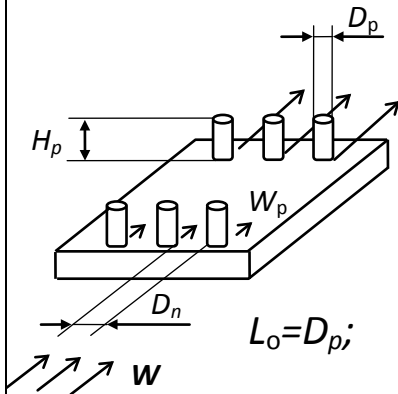
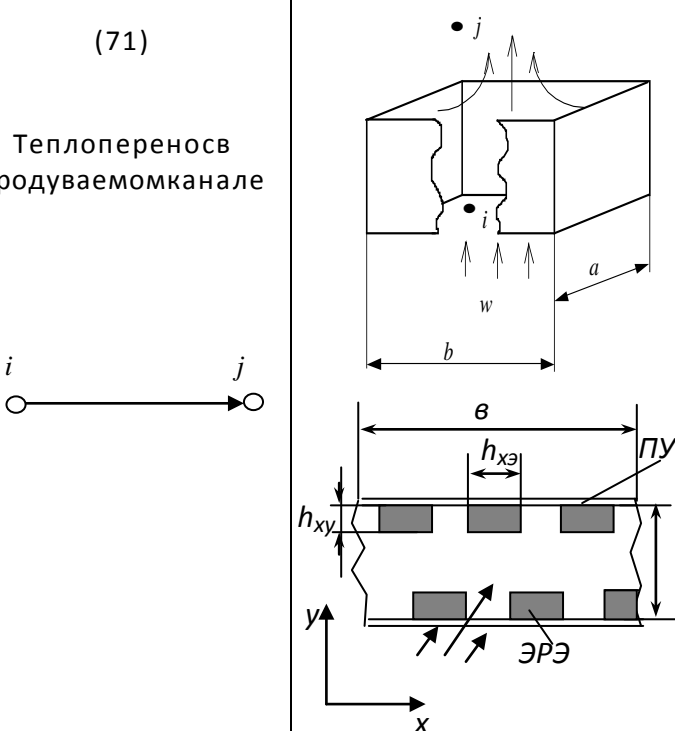
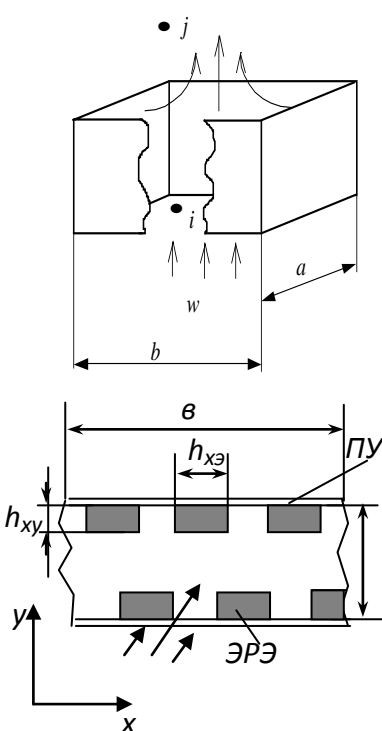
Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| <p>(42)</p> <p>Естественная конвекция между двумя плоскими неразвитыми поверхностями (верхняя горячая)</p>  |  | $X_{ij}^T = \alpha_k S, S = ab,$ $\alpha_k = (\lambda_{\text{chl}} \text{Nu} / L_0) (P_{oc} \cdot 760)^{0.5};$ $\text{Nu} = 0,27 \text{Gr}^{0.25}$ |
| <p>(43)</p> <p>Естественная конвекция между двумя плоскими неразвитыми поверхностями (нижняя горячая)</p>  |  | $X_{ij}^T = \alpha_k S, S = ab,$ $\alpha_k = (\lambda_{\text{chl}} \text{Nu} / L_0) (P_{oc} \cdot 760)^{0.5} \cdot K_{op};$ $\text{Nu} = 0,2126 \cdot \text{Gr}^{0.25}$ <p>при $\text{Gr} < 4 \cdot 10^5$;</p> $\text{Nu} = 0,076 \cdot \text{Gr}^{0.33}$ <p>при $\text{Gr} \text{Pr} \geq 4 \cdot 10^5$</p> |
| <p>(44)</p> <p>Конвективно-кондуктивный теплоперенос через цилиндрические воздушные прослойки</p>  |  | $X_{ij}^T = 2\pi \cdot \lambda_{\text{chl}} \cdot H / l_n \frac{d_2}{d_1}$ <p>при $\text{del} < 0,005$;</p> $X_{ij}^T = 0,91\pi \cdot H \cdot \text{del} \times$ $\times \left(\left(\frac{ T_i - T_j }{\text{del}} \right)^{0.25} / l_n \frac{d_2}{d_1} \right)$ <p>при $\text{del} \geq 0,005$</p> |
| <p>(45)</p> <p>Естественная конвекция между двумя вертикальными неразвитыми поверхностями</p>  |  <p>$L_0 = \text{del};$ $K_{op} = 1$</p> | $X_{ij}^T = \alpha_k S, S = ab,$ $\alpha_k = (\lambda_B \text{Nu} / L_0) (P_{oc} \cdot 760)^{0.5} \cdot K_{op};$ $\text{Nu} = 0,196 \cdot \left(\frac{1}{b} \right)^{-0.11} \cdot \text{Gr}^{0.25}$ <p>при $\text{Gr} < 2 \cdot 10^5$;</p> $\text{Nu} = 0,073 \cdot b^{0.11} \cdot \text{Gr}^{0.33}$ <p>при $\text{Gr} \geq 2 \cdot 10^5$</p> |

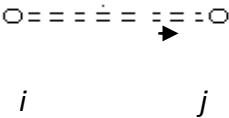
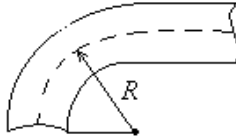
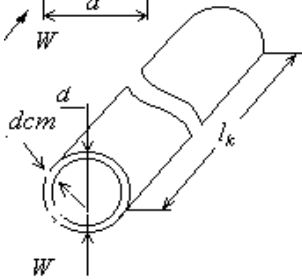
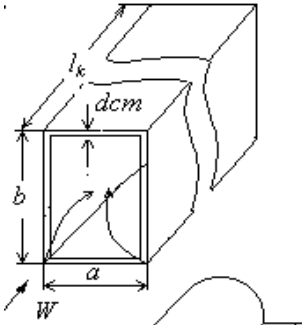
Продолжение табл. ПЗ.1



| 1 | 2 | 3 |
|---|--|--|
| <p>(51)</p> <p>Обдув неразвитой плоской поверхности воздушным поток</p>  |  <p>$L_0 = a;$</p> | $X_{ij}^T = \alpha_k S, S = ab,$ $\alpha_k = (\lambda_{x,l} \cdot Nu / L_0) \cdot (P_{oc} / 760)^{0.5},$ $Nu = 0,66 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}$ <p>при $Re < 5 \cdot 10^4;$</p> $Nu = 0,037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43}$ <p>при $Re \geq 5 \cdot 10^4,$</p> <p>Re – число Рейнольдса: $Re = (W \cdot L_0) / \nu,$ W – скорость хладоносителя; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха f [T];</p> |
| <p>(53)</p> <p>Обдув развитой поверхности (пластинчатое оребрение)</p>  |  $W_p = W \cdot \left(1 + \frac{D_p}{(D_p + D_n) - D_p} \right)$ | $X_{ij}^T = (\alpha_n + \alpha_k)(S_N + \eta_p S_p);$ $\alpha_n = \varepsilon \frac{D_n}{2H_p + D_n} \cdot f(\varphi^T),$ <p>$f(\varphi^T)$ – см. лучистый теплообмен.</p> $\alpha_k = f(N_v, \lambda_b, L_0, P_{oc});$ $Nu = 0,66 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.43}$ <p>при $Re \leq 5 \cdot 10^5;$</p> $Nu = 0,32 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43}$ <p>при $Re > 5 \cdot 10^5;$</p> $Nu = f(Re);$ $Re = f(W_p, L_0, \nu)$ |

Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| <p>(54)</p> <p>Обдув развитой поверхности (игльчато-штырьевое оребрение)</p>  |  | $X_{ij}^T = (\alpha_{\text{л}} + \alpha_k)(S_N + \eta_p S_p);$ $\alpha_{\text{л}} = \xi_0 [D_n / (2H_p + D_n)];$ <p>$f(\varphi^T)$ – см. лучистый теплообмен.</p> $\alpha_k = f(N_v, \lambda_b, L_0, P_{oc});$ $Nu = 0,437 \cdot Re^{0,895}$ <p>при $10^{-4} \leq Re \leq 10^{-3}$;</p> $Nu = 0,8 \cdot Re^{0,28},$ <p>при $10^{-3} \leq Re \leq 1$;</p> $Nu = 0,795 \cdot Re^{0,384},$ <p>при $1 \leq Re \leq 35$;</p> $Nu = 0,148 \cdot Re^{0,633}$ <p>при $35 \leq Re \leq 5 \cdot 10^4$;</p> $Nu = 0,0208 \cdot Re^{0,814}$ <p>при $Re \geq 5 \cdot 10^4$;</p> $Nu = f(Re);$ $Re = f(W_p, L, \nu).$ |
| <p>(71)</p> <p>Теплоперенос в продуваемом канале</p>  |  | $X_{ij}^T = abW(1 - K_3^{0,7}) \cdot \rho_{\text{хл}} \cdot C_{\text{хл}},$ <p>где K_3 – коэффициент заполнения канала монтажом ЭРЭ; $C_{\text{хл}}$ – теплоемкость хладоносителя; $\rho_{\text{хл}}$ – плотность хладоносителя;</p> $K_3 = \left[\sum_{i=1}^N (h_{x\text{э}} \cdot h_{xy})_i \right] / (a \cdot b);$ $\rho_{\text{хл}} = \frac{0,4646 P_{oc}}{T_m + 273} \text{ (для воздуха);}$ <p>P_{oc} – давление (барометрическое) окружающей среды</p> |

Продолжение табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|---------|------|------|------|------|-----------|----|----|-----------|--|--|--------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|---|--|--|----|----------|------------------|------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|------------------|------|
| <div>(61)</div> <div>Вынужденная конвекция в каналах</div> <div></div> | <div>$d_3 = \frac{4S}{((b-2d_{cm}) \cdot 2) + ((a-2d_{cm}) \cdot 2)};$$S = ((b-2d_{cm}) \cdot 2l_k) + ((a-2d_{cm}) \cdot 2l_k).$</div> <div></div> <div>$S = 2\pi r l_k;$$r = (d - 2d_{cm}) / 2;$$d_3 = d - 2d_{cm}.$</div> | <div>$X_{ij}^T = \alpha_k S; \quad S = [(b \cdot l_k) \cdot 2];$$\alpha_k = (\alpha_B Nu / L_0)(P_{oc} / 760)^{0.5};$$L_0 = (a \cdot b \cdot 4) / (2b + 2a) \text{ или } L_0 = d \text{ (для трубы).}$</div> <div>Ламинарный режим($Re < 2000$): $Nu = 0,15 Re^{0,33}$<table><tr><td>l_k/d</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>30</td><td>≥ 50</td><td></td><td></td></tr><tr><td>ε_{0L}</td><td>1,9</td><td>1,7</td><td>1,44</td><td>1,28</td><td>1,17</td><td>1,13</td><td>1,05</td><td>1</td><td></td><td></td></tr></table></div> <div>Pr, Re - вычисляется при средней температуре холодоносителя (воздух, вода и т. д.); $Nu = k Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr(T_M)} \right)^{0,25} \varepsilon_{0L} \varepsilon_R;$$k = 8,22 - [2700 / (Re - 1750)]$<p>при $2200 < Re < 3000$; $k = 0,045 Re - 7,5$ при $3000 < Re < 6000$; $k = 0,035 Re - 1,5$ при $6000 < Re < 10000$.</p><div>Турбулентный режим($Re \geq 10000$): $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr(T_M)} \right)^{0,25} \varepsilon_{0L} \varepsilon_R;$$\varepsilon_L = 1 + [0,432 \exp(-0,096 \cdot (l_k / d)) + (0,2591 \cdot (l_k / d))] / \gamma$<table><tr><td>Re</td><td>γ</td></tr><tr><td>$< 7 \cdot 10^3$</td><td>0,75</td></tr><tr><td>от $7 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$</td><td>1</td></tr><tr><td>от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$</td><td>1,25</td></tr><tr><td>от $4 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^4$</td><td>1,92</td></tr><tr><td>от $7 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$</td><td>2,32</td></tr><tr><td>$> 4 \cdot 10^5$</td><td>4,84</td></tr></table>$\varepsilon_R = 1 + 1,77 d_3 / R;$</div><div>$Pr_{(T_M)}$ — значение критерия Pr при средней температуре поверхности</div></div> | l_k/d | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | ≥ 50 | | | ε_{0L} | 1,9 | 1,7 | 1,44 | 1,28 | 1,17 | 1,13 | 1,05 | 1 | | | Re | γ | $< 7 \cdot 10^3$ | 0,75 | от $7 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ | 1 | от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$ | 1,25 | от $4 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^4$ | 1,92 | от $7 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$ | 2,32 | $> 4 \cdot 10^5$ | 4,84 |
| l_k/d | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | ≥ 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ε_{0L} | 1,9 | 1,7 | 1,44 | 1,28 | 1,17 | 1,13 | 1,05 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Re | γ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $< 7 \cdot 10^3$ | 0,75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| от $7 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$ | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| от $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$ | 1,25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| от $4 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^4$ | 1,92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| от $7 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$ | 2,32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $> 4 \cdot 10^5$ | 4,84 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 515 |
|---|---|---|--------------|-----|

Окончание табл. ПЗ.1

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| Скорость движения хладоносителя в каналах (ветви №№ 45, 61, 71) вычисляется как | | |

$$W = \frac{\sqrt{\Delta p / R_g}}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения канала; Δp – перепад давлений хладоносителя между входом и выходом в канал; $R_g = \frac{1}{X_{ij}^a}$ – аэродинамическое (гидравлическое) сопротивление канала (см. табл. П2.5)

Таблица ПЗ.2

Аппроксимация теплофизических параметров различных хладоносителей

| Теплофизические параметры | Хладоноситель | | | |
|--|--|--|--|------------------------------------|
| | Вода | Машинное масло | Воздух | Гелий |
| Коэффициент теплопроводности $\lambda_{хл}, Вт / м \cdot К$ | $(0,551 + 0,0014 \cdot T_m) \cdot 10^{-7}$ | $(0,147 - 0,0001 \cdot T_m) \cdot 10^{-7}$ | $(2,44 + 0,007 T_m) \cdot 10^{-7}$ | $(13,2 + 0,045 T_m) \cdot 10^{-7}$ |
| Коэффициент температуропроводности $k_a, м^2 / с \cdot 10^{-7}$ | – | – | $(18,8 + 0,14 T_m) \cdot 10^{-6}$ | – |
| Коэффициент кинематической вязкости $\nu, м^2 / с \cdot 10^{-5}$ | $1,434 \cdot \exp(-0,016 T_m)$ | – | $(13,28 + 0,0921 T_m) \cdot 10^{-6}$ | $(116 + 0,7 T_m) \cdot 10^{-6}$ |
| Плотность $\rho_{хл}, кг/м^3$ | $0,551 + 0,0018 T_m$ | $0,9 - 0,0006 T_m$ | $1,28 - 0,00374 T_m \cdot (0,4646 P_{oc}) / (T_m + 273)$ | $0,186 \cdot \exp(-0,031 T_m)$ |
| Теплоемкость $C_{хл}, Дж/кг \cdot К \cdot 10^3$ | $4,154 \cdot \exp(1,59 \cdot 10^{-4}) \cdot T_m$ | $1,8 - 0,0042 T_m$ | $1002 + 0,084 T_m$ | $5200 + 10^{-14} T_m$ |
| Коэф-т объемного расширения $\beta, 1/К \cdot 10^{-4}$ | $0,01 + 0,075 T_m$ | – | $1/(T_m + 273)$ | – |

$$T_m = (T_i + T_j) / 2$$

Критерии подобия:

$Gr = g \beta \cdot (T_i - T_j) \cdot (L_0^3 / \nu^2)$ – критерий Грасгофа;

$Re = (W \cdot L_0) / \nu$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = C_{хл} \mu / \nu$ или $Pr = \nu / Ka$ – критерий Прандля;

μ – коэффициент динамической вязкости хладоносителя;

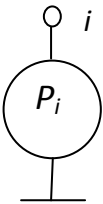
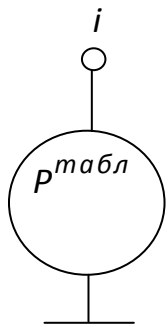
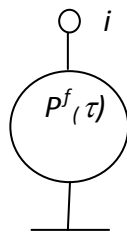
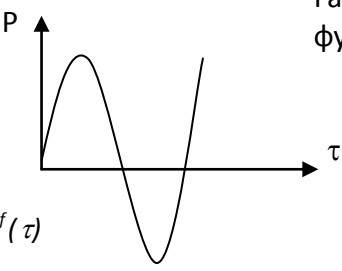
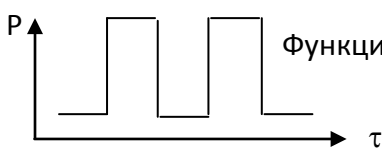
$Nu = \alpha L_0 / \lambda_{хл}$ – критерий Нуссельта;

$Ra = Gr \cdot Pr$ или $Ra = g \beta \Delta T \frac{L_0^3}{\nu Ka}$ – критерий Релея;

$Pe = Re \cdot Pr$ или $Pe = W L_0 / Ka$ – критерий Пекле.

Таблица П3.3

Источники потокового и потенциального теплового воздействия и аналитические модели для вычисления их параметров

| Моделируемый источник | Аналитическое выражение для вычисления параметра ветви | | | | | | | | |
|--|---|----------|--------------|----------|-------|-------|--------------|----------|---|
| 1 | 2 | | | | | | | | |
| <p>Постоянная тепловая мощность P</p>  | $P_i = P, \quad \tau_1 < \tau < \tau_2 $ <p>где τ_1 – начальное время работы; τ_2 – конечное время работы РЭС</p> | | | | | | | | |
| <p>Таблично заданная тепловая мощность</p> <p>Таблица:</p> <table border="1" data-bbox="188 1025 438 1198"> <tr> <td>$P_1^{таб.}$</td><td>τ_1</td></tr> <tr> <td>$P_2^{таб.}$</td><td>τ_2</td></tr> <tr> <td>.....</td><td>.....</td></tr> <tr> <td>$P_m^{таб.}$</td><td>τ_m</td></tr> </table>  | $P_1^{таб.}$ | τ_1 | $P_2^{таб.}$ | τ_2 | | | $P_m^{таб.}$ | τ_m | $P_i^{таб.} = P(\tau_1), \quad \tau_1 < \tau $ $P_i^{таб.} = P(\tau_M), \quad \tau \leq \tau_M $ $P_i^{таб.} = (P_{m+1} - P_m) \cdot \tau_m < \tau < \tau_{m+1} \cdot (\tau_m - \tau_{m+1}) / (\tau_m - \tau),$ <p>где $P(\tau_m)$ – вектор мощностей в заданные моменты времени τ_m ($1 < m < M$); M – количество моментов времени; τ – текущее время</p> |
| $P_1^{таб.}$ | τ_1 | | | | | | | | |
| $P_2^{таб.}$ | τ_2 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| $P_m^{таб.}$ | τ_m | | | | | | | | |
| <p>Мощность, заданная в виде функции от времени $P^f(\tau)$</p>  | <p>1. $P^f(\tau)$:</p>  <p>Гармоническая функция</p> <p>2. $P^f(\tau)$</p>  <p>Функция «Меандр»</p> | | | | | | | | |

Окончание табл. ПЗ.3

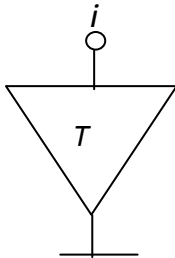
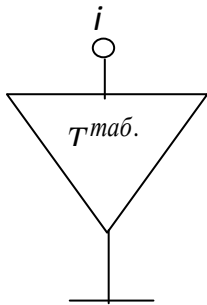
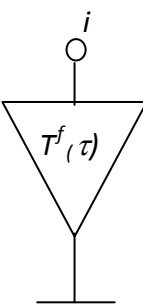
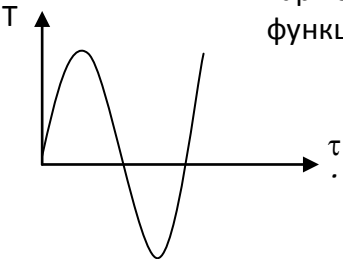
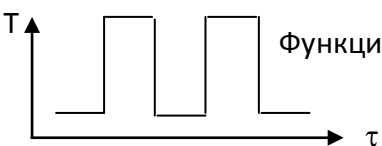
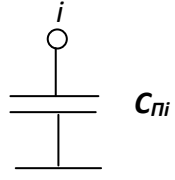
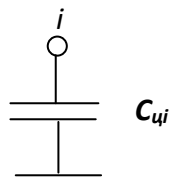
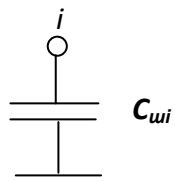
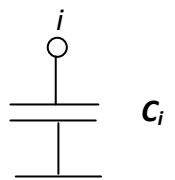
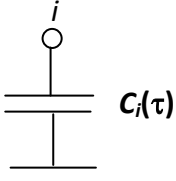
| 1 | 2 | | | | | | | | |
|--|---|----------|--------------|----------|-------|-------|--------------|----------|---|
| <p>Постоянная температура T</p>  | $T_i \Big _{\tau_1 < \tau < \tau_2} = T,$ <p>где τ_1 – начальное время работы; τ_2 – конечное время работы РЭС.</p> | | | | | | | | |
| <p>Таблично заданная температура</p>  <p>Таблица:</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>$T_1^{таб.}$</td><td>τ_1</td></tr> <tr> <td>$T_2^{таб.}$</td><td>τ_2</td></tr> <tr> <td>.....</td><td>.....</td></tr> <tr> <td>$T_m^{таб.}$</td><td>τ_m</td></tr> </tbody> </table> | $T_1^{таб.}$ | τ_1 | $T_2^{таб.}$ | τ_2 | | | $T_m^{таб.}$ | τ_m | $T_i^{таб.} \Big _{\tau < \tau_1} = T(\tau_1),$ $T_i^{таб.} \Big _{\tau < \tau_m} = T(\tau_m);$ $T_i^{таб.} \Big _{\tau_m < \tau < \tau_{m+1}} = (T_{m+1} - T_m) \cdot (\tau_m - \tau_{m+1}) / (\tau_m - \tau),$ <p>где $T(\tau_m)$ – вектор температур в заданные моменты времени τ_m ($1 < m < M$); M – количество моментов времени; τ – текущее время</p> |
| $T_1^{таб.}$ | τ_1 | | | | | | | | |
| $T_2^{таб.}$ | τ_2 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| $T_m^{таб.}$ | τ_m | | | | | | | | |
| <p>Температура, заданная в виде функции от времени $T^f(\tau)$</p>  | <p>1. $T^f(\tau)$:  Гармоническая функция</p> <p>2. $T^f(\tau)$  Функция «Меандр»</p> | | | | | | | | |

Таблица П3.4

Аналитические модели для вычисления параметров ветвей топологических МТП, моделирующих теплоемкости

| Форма конструкции | Аналитическое выражение для вычисления параметра ветви | | | | | | | | |
|---|--|----------|--------------|----------|-------|-------|--------------|----------|---|
| <p>Прямоугольная</p>  | $C_{Pi} = xyzC_o \cdot \rho,$ <p>где x, y, z – размеры прямоугольника; ρ – плотность материала; C_o – удельная теплоемкость материала</p> | | | | | | | | |
| <p>Цилиндрическая</p>  | $C_{\psi i} = \pi(d_2^3 - d_1^3)H \cdot \rho \cdot C_o / 4,$ <p>где d_1 – меньший диаметр цилиндра; d_2 – больший диаметр цилиндра; H – высота цилиндра</p> | | | | | | | | |
| <p>Шарообразная</p>  | $C_{\omega i} = \pi(d_2^3 - d_1^3)\rho \cdot C_o / 6,$ <p>где d_1 – меньший диаметр шара; d_2 – больший диаметр шара</p> | | | | | | | | |
| <p>Произвольная</p>  | $C_i = m \cdot C_o = c,$ <p>где m – масса материала</p> | | | | | | | | |
| <p>Таблично заданная теплоемкость</p> <p>Таблица:</p> <table border="1" data-bbox="188 1780 438 1948"> <tr> <td>$C_1^{таб.}$</td><td>τ_1</td></tr> <tr> <td>$C_2^{таб.}$</td><td>τ_2</td></tr> <tr> <td>.....</td><td>.....</td></tr> <tr> <td>$C_m^{таб.}$</td><td>τ_m</td></tr> </table>  | $C_1^{таб.}$ | τ_1 | $C_2^{таб.}$ | τ_2 | | | $C_m^{таб.}$ | τ_m | $C_i^{таб.} = C(\tau_1) \tau_1 < \tau ,$ $C_i^{таб.} = C(\tau_m) \tau_m < \tau ,$ $C_i^{таб.} = \frac{(C_{m+1} - C_m) \cdot (\tau_m - \tau_{m+1})}{\tau_m - \tau},$ $ \tau_m < \tau < \tau_{m+1} $ <p>где $C(\tau_m)$ – вектор теплоемкостей в заданные моменты времени $\tau_m (1 < m < M)$; M – количество моментов времени; τ – текущее время</p> |
| $C_1^{таб.}$ | τ_1 | | | | | | | | |
| $C_2^{таб.}$ | τ_2 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| $C_m^{таб.}$ | τ_m | | | | | | | | |

Приложение 4. Варианты установки ЭРЭ, поддерживаемые при расчете их ГТФП программой *BoardEditor*

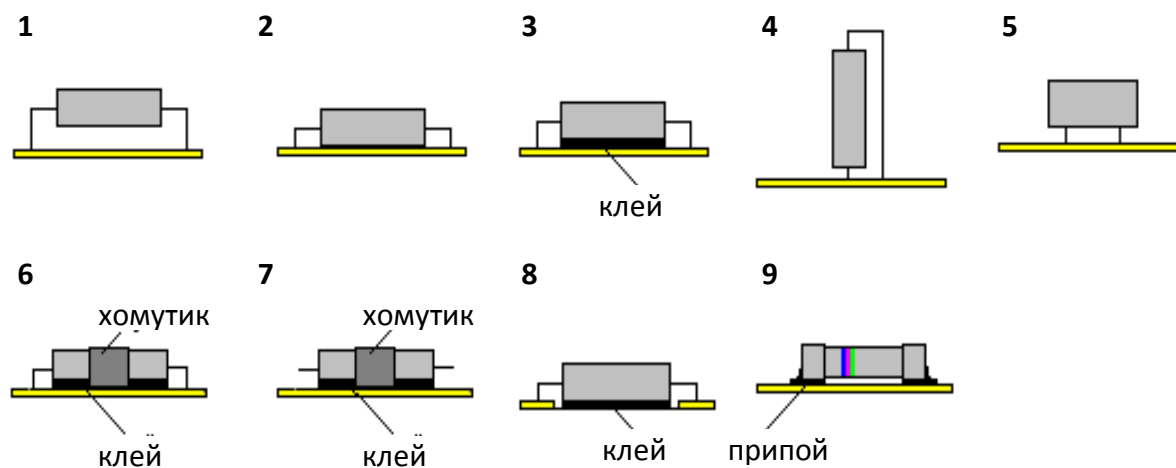


Рис. П4.1. Варианты установки **резисторов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

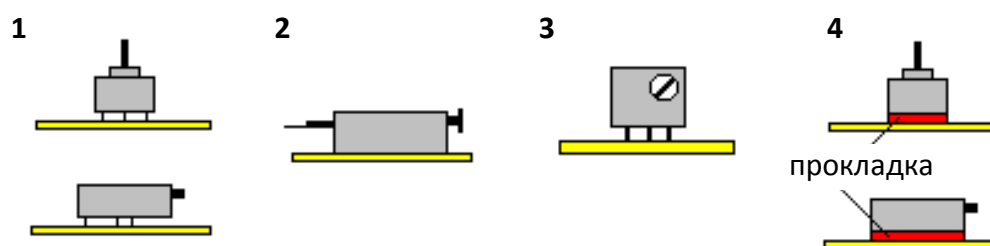


Рис. П4.2. Варианты установки **переменных резисторов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

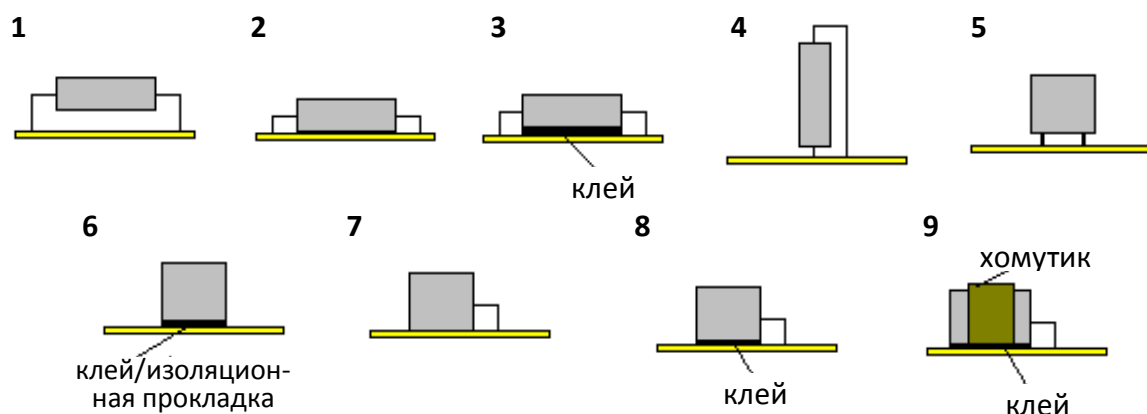


Рис. П4.3. Варианты установки **конденсаторов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

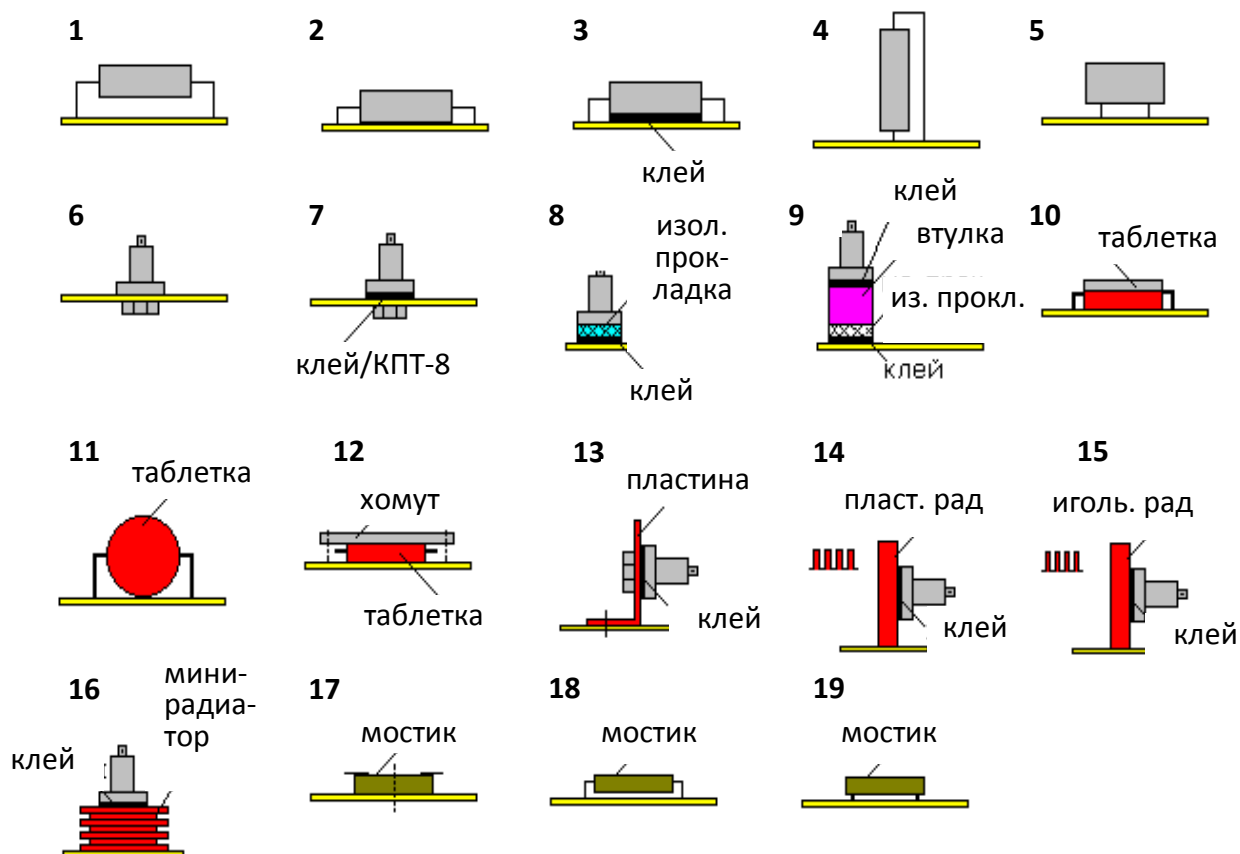


Рис. П4.4. Варианты установки **диодов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

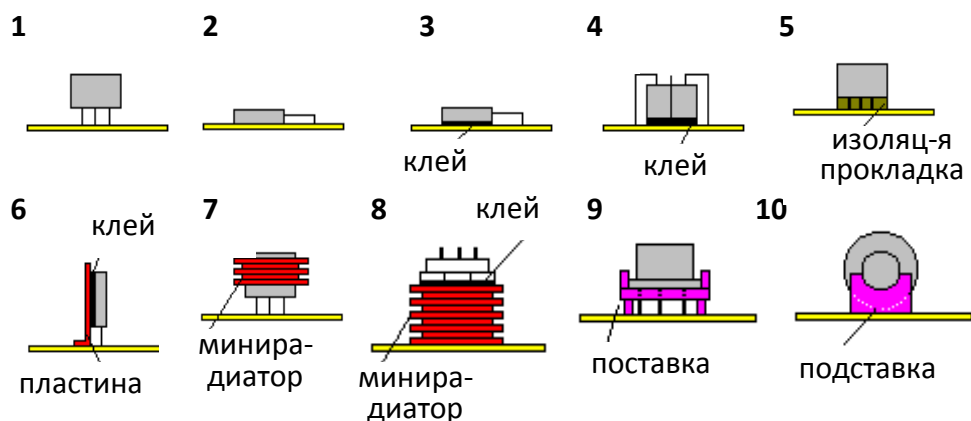


Рис. П4.5. Варианты установки **транзисторов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

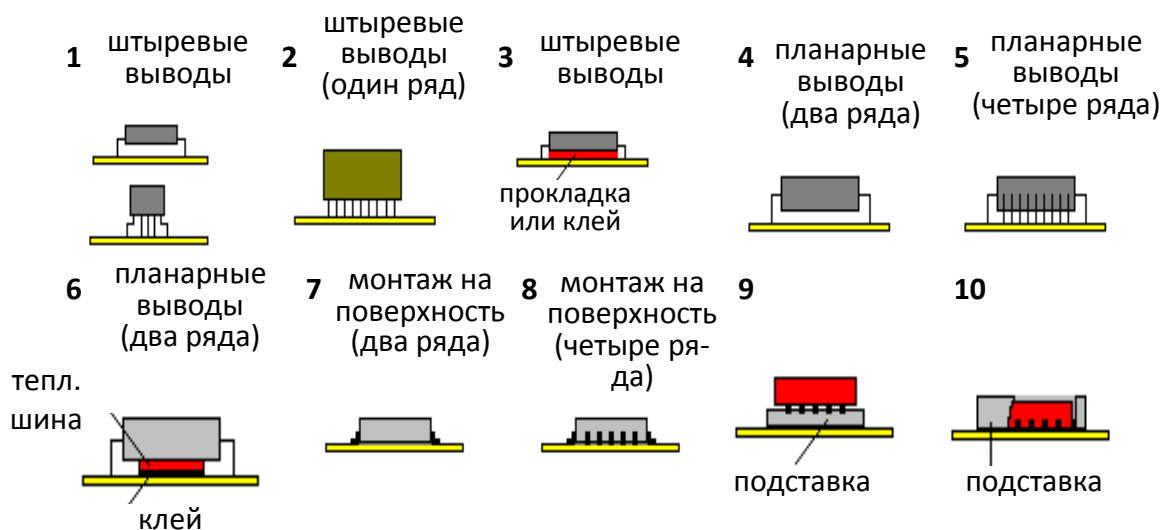


Рис. П4.6. Варианты установки **микросхем** на НК печатных узлов и функциональных ячеек

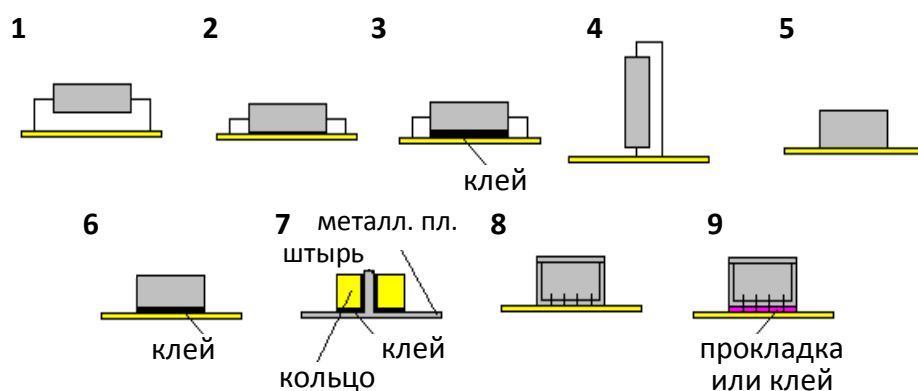


Рис. П4.7. Варианты установки **индуктивных элементов** на НК печатных узлов и функциональных ячеек



Рис. П4.8. Вариант установки **резисторов по технологии «монтаж на поверхность»**

Рис. П4.9. Варианты установки **микрокорпусных конденсаторов** на подложках, печатных платах и основаниях функциональных ячеек

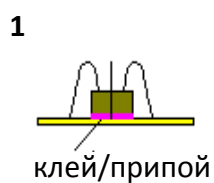


Рис. П4.10. Вариант установки **бескорпусных транзисторов** на подложках

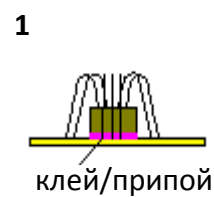


Рис. П4.11. Вариант установки **бескорпусных и микрокорпусных микросхем** на подложках

Приложение 5. Некоторые экранные формы для расчета ГТФП ЭРЭ, поддерживаемые программой *BoardEditor*

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Резистор постоянный

Типономинал ЭРЭ: C2-33-0.125 1

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 10

Размер по оси OY, мм: 2.2

Размер по оси OZ, мм: 3.2

Р_{тк}, К/Вт: 70.8

Р_{тв}, К/Вт: 0

Т_{мак}, °C: 150

К_{черн}, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 65

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 0.12

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 1

h[мм] B[мм] L[мм] C[мм] dL[мм] dB[мм] λ_B [Вт/м/К] кол-во выводов

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Высота (h), мм | 3.2 |
| Диаметр (B), мм | 2.2 |
| Длина корпуса (C), мм | 6 |
| Длина выводов (L), мм | 4 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 2 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .6 |
| Кэф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

Рис. П5.1. Экранная форма для расчета ГТФП резистора (вариант установки № 1 – см. [рис. П4.1](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Резистор постоянный

Типономинал ЭРЭ: C5-58 5

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 33

Размер по оси OY, мм: 8

Размер по оси OZ, мм: 9

Р_{тк}, К/Вт: 9.952

Р_{тв}, К/Вт: 0

Т_{мак}, °C: 100

К_{черн}, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 1191

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 3.20

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 5

кол-во выводов λ_B [Вт/м/К] B[мм] L[мм] C[мм] A[мм] h[мм] dB[мм]

| Наименование параметра | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Высота резистора (h), мм | 9 |
| Высота корпуса (B), мм | 8 |
| Ширина корпуса (A), мм | 8 |
| Длина корпуса (C), мм | 33 |
| Длина выводов (L), мм | 1 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .8 |
| Кэф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

Рис. П5.2. Экранная форма для расчета ГТФП резистора (вариант установки № 5 – см. [рис. П4.1](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Резистор постоянный

Типономинал ЭРЭ: МЛТ-0.5 8

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 15

Размер по оси OY, мм: 4.2

Размер по оси OZ, мм: 4.2

Ртк, К/Вт: 2.8

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 125

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 161

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 0.8

Расчёт параметров

Вариант 8

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Высота (h), мм | 4.2 |
| Диаметр (B), мм | 4.2 |
| Длина корпуса (C), мм | 10.8 |
| Длина выводов (L), мм | 4.5 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 2.1 |
| Диаметр выводов (dB), мм | 0.8 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.3. Экранная форма для расчета ГТФП резистора (вариант установки № 8 – см. [рис. П4.1](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Резистор постоянный

Типономинал ЭРЭ: МЛТ-2 6

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 22.5

Размер по оси OY, мм: 8.6

Размер по оси OZ, мм: 8.6

Ртк, К/Вт: 0.8

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 125

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 540

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 2.8

Расчёт параметров

вариант 6

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Высота (h), мм | 8.6 |
| Диаметр (B), мм | 8.6 |
| Длина корпуса (C), мм | 18.5 |
| Длина выводов (L), мм | 6.5 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 2 |
| Диаметр выводов (dB), мм | 1 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.4. Экранная форма для расчета ГТФП резистора (вариант установки № 6 – см. [рис. П4.1](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Резистор переменный

Типономинал ЗРЗ: СП-0,4А 1

Круглый ☒

Диаметр, мм: 16

Размер по оси OZ, мм: 26

Ртк, К/Вт: 2,381

Ртв, К/Вт: 0

Тмак, °C: 100

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 1046

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 5,12

Расчёт параметров

вариант 1

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Высота (h), мм | 26 |
| Диаметр (B), мм | 16 |
| Длина корпуса (C), мм | 12,5 |
| Длина выводов (L), мм | 1 |
| Ширина выводов (av), мм | 2 |
| Толщина выводов (bv), мм | .7 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.5. Экранная форма для расчета ГТФП переменного резистора (вариант установки № 1 – см. [рис. П4.2](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Резистор переменный

Типономинал ЗРЗ: РП1-64Б 3

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 16

Размер по оси OY, мм: 7.1

Размер по оси OZ, мм: 18

Ртк, К/Вт: 4.8

Ртв, К/Вт: 0

Тмак, °C: 100

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 999

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 2.56

Расчёт параметров

вариант 3

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 7.1 |
| Высота корпуса (C), мм | 16 |
| Ширина корпуса (A), мм | 16 |
| Длина выводов (L), мм | 2 |
| Ширина выводов (av), мм | 2 |
| Толщина выводов (bv), мм | .7 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.6. Экранная форма для расчета ГТФП переменного резистора (вариант установки № 3 – см. [рис. П4.2](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Конденсатор
 Типономинал ЗРЗ: K50-16-10m25v 5
 Круглый ☒
 Диаметр, мм: 7
 Размер по оси OZ, мм: 14

Ртк, К/Вт: 53,079
 Ртв, К/Вт: 0
 Tmax, °C: 100
 Кчерн, отн.ед.: 0,8
 Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 359
 Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 0,40

Расчёт параметров

вариант 5

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса (B), мм | 7 |
| Длина корпуса (C), мм | 14 |
| Длина выводов (L), мм | 3 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .6 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |
| Кол-во выводов (kolv), шт. | 2 |
| Масса конденсатора (Mel), г | .8 |

OK Отмена

Рис. П5.7. Экранная форма для расчета ГТФП конденсатора (вариант установки № 5 – см. [рис. П4.2](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Конденсатор
 Типономинал ЗРЗ: K50-16-1000m16v 9
 Круглый ☐
 Размер по оси OX, мм: 32
 Размер по оси OY, мм: 22
 Размер по оси OZ, мм: 17

Ртк, К/Вт: 4.231
 Ртв, К/Вт: 0
 Tmax, °C: 100
 Кчерн, отн.ед.: 0,8
 Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 2027
 Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 4

Расчёт параметров

вариант 9

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса (B), мм | 17 |
| Длина корпуса (C), мм | 27 |
| Длина выводов (L), мм | 14 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 5 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .9 |
| Коеф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |
| Кол-во выводов (kolv), шт. | 2 |

OK Отмена

Рис. П5.8. Экранная форма для расчета ГТФП конденсатора (вариант установки № 9 – см. [рис. П4.3](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Индуктивность

Типономинал ЗРЗ: L_РДВИ.671342.002 5

Круглый ☒

Диаметр, мм: 15

Размер по оси OZ, мм: 5

Ртк, К/Вт: 1,244

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 125

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 353

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 4,00

Расчёт параметров

вариант 5

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Диаметр (B), мм | 15 |
| Высота (C), мм | 5 |
| Масса элемента (Mel), г | 8 |
| Удельная теплоемкость элемента (Cud), Дж/К/г | .5 |
| Интенсивность отказов *E-6 (Lotk), 1/ч | .15 |
| Козф. жестк. крепления (Kg), отн.ед. | 1 |
| Допустим. уровень вибрации (Avd), g | 40 |

OK Отмена

Рис. П5.9. Экранная форма для расчета ГТФП индуктивности (вариант установки № 5 – см. [рис. П4.7](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Индуктивность

Типономинал ЗРЗ: TM5-1 8

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 17

Размер по оси OY, мм: 16

Размер по оси OZ, мм: 16

Ртк, К/Вт: 0,730

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 200

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 1483

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 4,50

Расчёт параметров

вариант 8

| Наименование параметра | Значение |
|---|----------|
| Высота корпуса (C), мм | 16 |
| Ширина корпуса (A), мм | 17 |
| Длина корпуса (B), мм | 16 |
| Длина корпуса с учетом гильзы (B1), мм | 16 |
| Длина выводов (L), мм | 3 |
| Диаметр выводов (dv), мм | .8 |
| Козф-т теплопр. выводов (LambV), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.10. Экранная форма для расчета ГТФП индуктивности (вариант установки № 8 – см. [рис. П4.7](#))

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Диод

Типономинал ЗРЗ: КД209Б 2

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 17,5

Размер по оси OY, мм: 5

Размер по оси OZ, мм: 4,5

Р_{тк}, К/Вт: 83,333

Р_{тв}, К/Вт: 0

Т_{макс}, °C: 110

К_{черн}, отн.ед.: 0,8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 233

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 0,25

Расчёт параметров

вариант 2

$\lambda_{в}$ [Вт/м/К] кол-во выводов

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Высота диода (h), мм | 4,5 |
| Высота корпуса (B), мм | 4,5 |
| Ширина корпуса (A), мм | 5 |
| Длина корпуса (C), мм | 8 |
| Длина выводов (L), мм | 9 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 4,75 |
| Ширина выводов (av), мм | 1,8 |

OK Отмена

Рис. П5.11. Экранная форма для расчета ГТФП диода (вариант установки № 2 – см. рис. П4.4)

Параметры ЗРЗ

Тип ЗРЗ: Диод

Типономинал ЗРЗ: КД202 9

Круглый ☒

Диаметр, мм: 9

Размер по оси OZ, мм: 21,5

Р_{тк}, К/Вт: 62,425

Р_{тв}, К/Вт: 3,5

Т_{макс}, °C: 130

К_{черн}, отн.ед.: 0,8

Площадь ЗРЗ, мм.кв.: 1166

Теплоемкость ЗРЗ, Дж/К: 3,50

Расчёт параметров

вариант 9

$\lambda_{вт}$ [Вт/м/К] $\lambda_{пр}$ [Вт/м/К]

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Высота диода (h), мм | 28 |
| Средний диаметр корпуса диода (B), мм | 9 |
| Диаметр контактного пятна (B1), мм | 9 |
| Длина основной части корпуса диода (C), мм | 14 |
| Внутренний диаметр гайки (d1), мм | 5 |
| Внешний диаметр гайки (d2), мм | 9 |
| Масса диода (Me), г | 7 |

OK Отмена

Рис. П5.12. Экранная форма для расчета ГТФП диода (вариант установки № 9 – см. рис. П4.4)

Параметры ЭРЗ

Тип ЭРЗ: Диод

Типономинал ЭРЗ: КД202 15

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 34,5

Размер по оси OY, мм: 40

Размер по оси OZ, мм: 40

Ртк, К/Вт: 4,358

Ртв, К/Вт: 3,5

Тмак, °C: 130

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЗ, мм.кв.: 459

Теплоемкость ЭРЗ, Дж/К: 3,50

Теплоемк. рад-ра, Дж/К: 7,99

Площадь ЭРЗ+рад-р, мм.кв.: 3986

Теплоемк. ЭРЗ+рад-р, Дж/К: 11,49

Масса радиатора, г: 6,77

Масса ЭРЗ+рад-р, г: 13,77

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 15

клей(kl): dkl[мм]
λkl[Вт/м/К]

гайка d2[мм]
d1[мм]
B[мм]

h[мм]
Lp[мм]
C[мм]

λp[Вт/м/К]

штырьков [шт]
plot [кг/м куб.]

В1[мм]

hш[мм]
dш[мм]
do[мм]
dp[мм]
hp[мм]

Наименование параметра

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Высота диода от радиатора (h), мм | 28 |
| Средний диаметр корпуса диода (B), мм | 9 |
| Диаметр контактного пятна (В1), мм | 9 |
| Длина основной части корпуса диода (C), мм | 14 |
| Внутренний диаметр гайки (d1), мм | 5 |
| Внешний диаметр гайки (d2), мм | 9 |
| Масса диода (Me), г | 7 |

Рис. П5.13. Экранная форма для расчета ГТФП диода (вариант установки № 15 – см. рис. П4.4)

Параметры ЭРЗ

Тип ЭРЗ: Диод

Типономинал ЭРЗ: КД202 16

Круглый ☒

Диаметр, мм: 21

Размер по оси OZ, мм: 54,5

Ртк, К/Вт: 1,801

Ртв, К/Вт: 3,5

Тмак, °C: 130

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЗ, мм.кв.: 459

Теплоемкость ЭРЗ, Дж/К: 3,5

Теплоемк. рад-ра, Дж/К: 14,79

Площадь ЭРЗ+рад-р, мм.кв.: 4515

Теплоемк. ЭРЗ+рад-р, Дж/К: 18,29

Масса радиатора, г: 12,53

Масса ЭРЗ+рад-р, г: 19,53

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 16

ребер [шт]

h[мм]
B[мм]
C[мм]
V1[мм]

λp[Вт/м/К]

plot [кг/м куб.]

hш[мм]
dp[мм]
hp[мм]

клей(kl): dkl[мм]
λkl[Вт/м/К]

Наименование параметра

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Высота диода от радиатора (h), мм | 28 |
| Средний диаметр корпуса диода (B), мм | 9 |
| Диаметр контактного пятна (В1), мм | 13 |
| Длина основной части корпуса диода (C), мм | 14 |
| Масса диода (Me), г | 7 |
| Удельная теплоемкость диода (Cud), Дж/К/Г | .5 |
| Толщина клеевого слоя (dkl), мм | .15 |

Рис. П5.14. Экранная форма для расчета ГТФП диода (вариант установки № 16 – см. рис. П4.4)

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Транзистор

Типономинал ЭРЭ: 2Т603 1

Круглый ☒

Диаметр, мм: 11,7

Размер по оси OZ, мм: 14,5

Ртк, К/Вт: 76,669

Ртв, К/Вт: 0

Тмак, °С: 150

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 547

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 1,00

Расчёт параметров

вариант 1

| Наименование параметра | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса (B), мм | 11,7 |
| Высота корпуса (C), мм | 8 |
| Длина выводов (L), мм | 6,5 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .6 |
| Кэф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |
| Колич-во выводов (kolv), шт. | 3 |
| Масса транзистора (Mel), г | 2 |

OK Отмена

Рис. П5.15. Экранная форма для расчета ГТП транзистора (вариант установки № 1 – см. [рис. П4.5](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Транзистор

Типономинал ЭРЭ: КТ603 4

Круглый ☒

Диаметр, мм: 16

Размер по оси OZ, мм: 12

Ртк, К/Вт: 0,927

Ртв, К/Вт: 0

Тмак, °С: 120

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 522

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 1,00

Расчёт параметров

вариант 4

клей (kl): λ_{kl} [Вт/м/К] dkl [мм]

| Наименование параметра | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса (B), мм | 11,7 |
| Высота корпуса (C), мм | 8 |
| Длина выводов (L), мм | 21 |
| Длина выводов над корпусом (dL), мм | 4 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .6 |
| Кэф. теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |
| Колич-во выводов (kolv), шт. | 3 |

OK Отмена

Рис. П5.16. Экранная форма для расчета ГТП транзистора (вариант установки № 4 – см. [рис. П4.5](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Транзистор

Типономинал ЭРЭ: KT805AM 6

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 10,8

Размер по оси OY, мм: 40

Размер по оси OZ, мм: 30

Ртк, К/Вт: 1,672

Ртв, К/Вт: 3,3

Тмак, °C: 125

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 511

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 1,25

Теплоемк. рад-ра, Дж/К: 8,76

Площадь ЭРЭ+рад-р, мм.кв.: 3181

Теплоемк. ЭРЭ+рад-р, Дж/К: 10,01

Масса радиатора, г: 7,43

Масса ЭРЭ+рад-р, г: 9,93

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 6

клей(kl): dkl[мм]
λkl[Вт/м/К]

толщина корпуса (B) [мм]
ширина корпуса (A) [мм]
высота корпуса (C) [мм]
длина выводов (L) [мм]
ширина выводов (av) [мм]
толщина выводов (bv) [мм]
количество выводов

Наименование параметра

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 4,8 |
| Ширина корпуса (A), мм | 10,7 |
| Высота корпуса (C), мм | 15,9 |
| Длина выводов (L), мм | 6,5 |
| Ширина выводов (av), мм | 1,45 |
| Толщина выводов (bv), мм | ,75 |
| Коэф-т теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

Рис. П5.17. Экранная форма для расчета ГТФП транзистора (вариант установки № 6 – см. [рис. П4.5](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Бескорпусной транзистор

Типономинал ЭРЭ: 2Т378 1

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 10

Размер по оси OY, мм: 10

Размер по оси OZ, мм: 0,5

Ртк, К/Вт: 38,66

Ртв, К/Вт: 100

Тмак, °C: 150

Кчерн, отн.ед.: 0,8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 8

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 0,03

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 1

клей/припой: dkl[мм]
λkl[Вт/м/К]

дБ[мм]
λв[Вт/м/К]

количество выводов

Наименование параметра

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Высота кристалла (B), мм | ,5 |
| Ширина кристалла (A), мм | 2 |
| Длина кристалла (C), мм | 2 |
| Ширина зоны установки (d1), мм | 10 |
| Длина зоны установки (d2), мм | 10 |
| Масса транзистора (Me), г | ,05 |
| Удельная теплоемкость транз. (Cud), Дж/К/г | ,5 |

Рис. П5.18. Экранная форма для расчета ГТФП бескорпусного транзистора (вариант установки № 1 – см. [рис. П4.10](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Транзистор

Типономинал ЭРЭ: КТ3102 9

Круглый ☒

Диаметр, мм: 4.95

Размер по оси OZ, мм: 10.3

Ртк, К/Вт: 84.926

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 125

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 81

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 0.3

Расчёт параметров

Вариант 11

| Наименование параметра | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса (A), мм | 5.5 |
| Высота корпуса (C), мм | 5.3 |
| Диаметр подставки (B), мм | 4.95 |
| Высота подставки (Нподст.), мм | 3 |
| Длина выводов (hв), мм | 5 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .5 |
| Козф. теплопр. выводов (Lв), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.19. Экранная форма для расчета ГТП транзистора (вариант установки № 9 – см. [рис. П4.5](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Транзистор

Типономинал ЭРЭ: КТ3102 10

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 4.95

Размер по оси OY, мм: 6.3

Размер по оси OZ, мм: 5.475

Ртк, К/Вт: 60.216

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 150

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 112

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 0.3

Теплоемк. рад-ра, Дж/К: 0.29

Площадь ЭРЭ+рад-р, мм.кв.: 161

Теплоемк. ЭРЭ+рад-р, Дж/К: 0.59

Масса радиатора, г: 0.19

Масса ЭРЭ+рад-р, г: 0.79

Расчёт параметров

Вариант 14

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Диаметр корпуса малый (B), мм | 4 |
| Диаметр корпуса большой (D), мм | 4.95 |
| Высота корпуса1 (C), мм | 5.3 |
| Высота корпуса2 (A), мм | 1 |
| Длина выводов (Lв), мм | 5 |
| Диаметр выводов (Dв), мм | .5 |
| Козф. теплопр. выводов (LамB), Вт/м/К | 100 |

OK Отмена

Рис. П5.20. Экранная форма для расчета ГТП транзистора (вариант установки № 10 – см. [рис. П4.5](#))

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Микросхема

Типономинал ЭРЭ: K1409Д56 1

Круглый ☒

Диаметр, мм: 9.5

Размер по оси OZ, мм: 8.3

Ртк, К/Вт: 12.3

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 110

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 363

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 1.05

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 1

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Диаметр корпуса (B), мм | 9.5 |
| Высота корпуса (C), мм | 4.8 |
| Диаметр контура выводов (B1), мм | 9.5 |
| Высота установки (h), мм | 8.3 |
| Длина выводов (L), мм | 3.5 |
| Диаметр выводов (dB), мм | .55 |
| Козф. теплопр. выводов (LambB), Вт/м/К | 100 |

Рис. П5.21. Экранная форма для расчета ГТФП микросхемы (вариант установки № 1 – см. рис. П4.6)

Параметры ЭРЭ

Тип ЭРЭ: Микросхема

Типономинал ЭРЭ: KP1409Д14Б 1

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 8

Размер по оси OY, мм: 17.5

Размер по оси OZ, мм: 5

Ртк, К/Вт: 32.3

Ртв, К/Вт: 0

Тмах, °C: 105

Кчерн, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЭ, мм.кв.: 482

Теплоемкость ЭРЭ, Дж/К: 1.4

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 1

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 4 |
| Ширина корпуса (C), мм | 6.8 |
| Длина корпуса (A), мм | 17.5 |
| Высота установки (h), мм | 5 |
| Длина выводов (L), мм | 4 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | .6 |
| Ширина выводов (av), мм | .59 |

Рис. П5.22. Экранная форма для расчета ГТФП микросхемы (вариант установки № 1 – см. рис. П4.6)

Параметры ЭРЗ

Тип ЭРЗ: Микросхема

Типономинал ЭРЗ: TACT82302PB 5

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 30

Размер по оси OY, мм: 30

Размер по оси OZ, мм: 3.2

Р_{тк}, К/Вт: 1.4

Р_{тв}, К/Вт: 0

Т_{макс}, °C: 120

К_{черн}, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЗ, мм.кв.: 2362

Теплоемкость ЭРЗ, Дж/К: 3.71

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 5

λ_в[Вт/м/К] кол-во выводов

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 3.2 |
| Ширина корпуса (A), мм | 27 |
| Длина корпуса (C), мм | 27 |
| Высота установки (h), мм | 3.2 |
| Длина выводов (L), мм | 2.1 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 1.5 |
| Размер для пайки (upl), мм | 1 |

Рис. П5.23. Экранная форма для расчета ГТП микросхемы (вариант установки № 5 – см. рис. П4.6)

Параметры ЭРЗ

Тип ЭРЗ: Микросхема

Типономинал ЭРЗ: 1533АП5 6

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: 18.3

Размер по оси OY, мм: 14

Размер по оси OZ, мм: 2.97

Р_{тк}, К/Вт: 55.4

Р_{тв}, К/Вт: 0

Т_{макс}, °C: 120

К_{черн}, отн.ед.: 0.8

Площадь ЭРЗ, мм.кв.: 510

Теплоемкость ЭРЗ, Дж/К: 0.7

Р_{тк} ЭРЗ - шина, К/Вт: 2.2

Расчёт параметров

OK Отмена

вариант 6

λ_в[Вт/м/К]

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 1.97 |
| Ширина корпуса (A), мм | 10.5 |
| Длина корпуса (C), мм | 14 |
| Высота установки (h), мм | 2.97 |
| Длина выводов (L), мм | 6 |
| Длина проекции выводов на OX (dL), мм | 3.9 |
| Размер для пайки (upl), мм | 1 |

Рис. П5.24. Экранная форма для расчета ГТП микросхемы (вариант установки № 6 – см. рис. П4.6)

Параметры ЗРЭ

Тип ЗРЭ: **Микросхема**

Типономинал ЗРЭ: **NMC27C256BN** | **9**

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: **34**

Размер по оси OY, мм: **16**

Размер по оси OZ, мм: **9**

Ртк, К/Вт: **1.701**

Ртв, К/Вт: **0**

Тмах, °C: **120**

Кчерн, отн.ед.: **0.8**

Площадь ЗРЭ, мм.кв.: **844**

Теплоемкость ЗРЭ, Дж/К: **2.87**

Расчёт параметров

Вариант 9

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Толщина корпуса (B), мм | 3 |
| Ширина корпуса (C), мм | 16 |
| Длина корпуса (A), мм | 34 |
| Высота подставки (L), мм | 6 |
| Ширина выводов (ав), мм | .7 |
| Толщина выводов (bb), мм | .3 |
| Кэф-т теплопр. выводов (LamB), Вт/м/К | 100 |

OK **Отмена**

Рис. П5.25. Экранная форма для расчета ГТП микросхемы (вариант установки № 9 – см. [рис. П4.6](#))

Параметры ЗРЭ

Тип ЗРЭ: **Микросхема**

Типономинал ЗРЭ: **N80276-10** | **10**

Круглый ☐

Размер по оси OX, мм: **30**

Размер по оси OY, мм: **9**

Размер по оси OZ, мм: **30**

Ртк, К/Вт: **35.294**

Ртв, К/Вт: **0**

Тмах, °C: **120**

Кчерн, отн.ед.: **0.8**

Площадь ЗРЭ, мм.кв.: **2760**

Теплоемкость ЗРЭ, Дж/К: **3.22**

Расчёт параметров

Вариант 10

кол-во контактов Kk

| Наименование параметра | Значение |
|---------------------------|----------|
| Длина корпуса (A), мм | 30 |
| Толщина корпуса (B), мм | 8 |
| Ширина корпуса (C), мм | 30 |
| Длина подставки (A1), мм | 30 |
| Высота подставки (B1), мм | 8 |
| Ширина подставки (C1), мм | 30 |
| Ширина выводов (ав), мм | .5 |

OK **Отмена**

Рис. П5.26. Экранная форма для расчета ГТП микросхемы (вариант установки № 10 – см. [рис. П4.6](#))

Приложение 6. Интерактивный справочник по основным функциям ПК ТРИАНА

MTPEditor

- **Файл**
 - новый
 - открыть
 - закрыть
 - сохранить
 - сохранить как...
 - сохранить как файл данных
 - последний файл
 - выход

- **Редактор**
 - выбор объектов
 - отменить действие
 - удалить
 - вырезать
 - копировать
 - вставить
 - фиксировать номер
 - перенумеровать узлы

- **Вид**
 - увеличить
 - уменьшить
 - сетка
 - поворот меток
 - обозначение узлов
 - панель инструментов
 - панель элементов
 - панель сопротивлений

- **Элемент**
 - узел
 - **источник мощности**
 - [постоянный](#)
 - [зависящий от времени \(функ.\)](#)
 - [зависящий от времени \(табл.\)](#)



MTPEditor

- + источник температуры
 - [постоянный](#)
 - [зависящий от времени \(функ.\)](#)
 - [зависящий от времени \(табл.\)](#)
- + теплоемкость
 - [постоянная](#)
 - [вычисляемая](#)
- фрагмент
- соединение
- + кондукция
 - [в декартовой системе](#)
 - [в декартовой системе через многослойное тело](#)
 - + в цилиндрической системе
 - [нормальное направление](#)
 - [радиальное направление](#)
 - [покадрное направление](#)
 - [в сферической системе](#)
- + контактный теплообмен
 - [прямоугольное пятно](#)
 - [круглое пятно](#)
 - [с учетом механических давлений и шероховатости поверхностей](#)
- + излучение
 - [с неразвитой поверхности \(степ. черн. и коэфф. облуч. задаются\)](#)
 - [одинак. паралл. пластины \(ст. черн. и коэфф. обл. вычисляются\)](#)
 - [одинак. перп. пласт. с общ. стороной \(ст. черн. и коэфф. обл. выч.\)](#)
- + обдув
 - [неразвитой плоской поверхности](#)
 - + развитой поверхности
 - [с пластинчатым оребрением](#)
 - [с игольчато-штыревым оребрением](#)
- + теплоперенос
 - [в продуваемом воздушном канале](#)
 - [в прокачиваемом водяном канале](#)
 - [внутри перфорированного блока](#)
- + естественная конвекция
 - [с плоской неразвитой поверхности](#)
 - + с неразвитой цилиндрической поверхности
 - [горизонтальной](#)
 - [вертикальной](#)
 - + между 2-мя неразвитыми поверхностями
 - + [горизонтальными](#)

MTPEditor

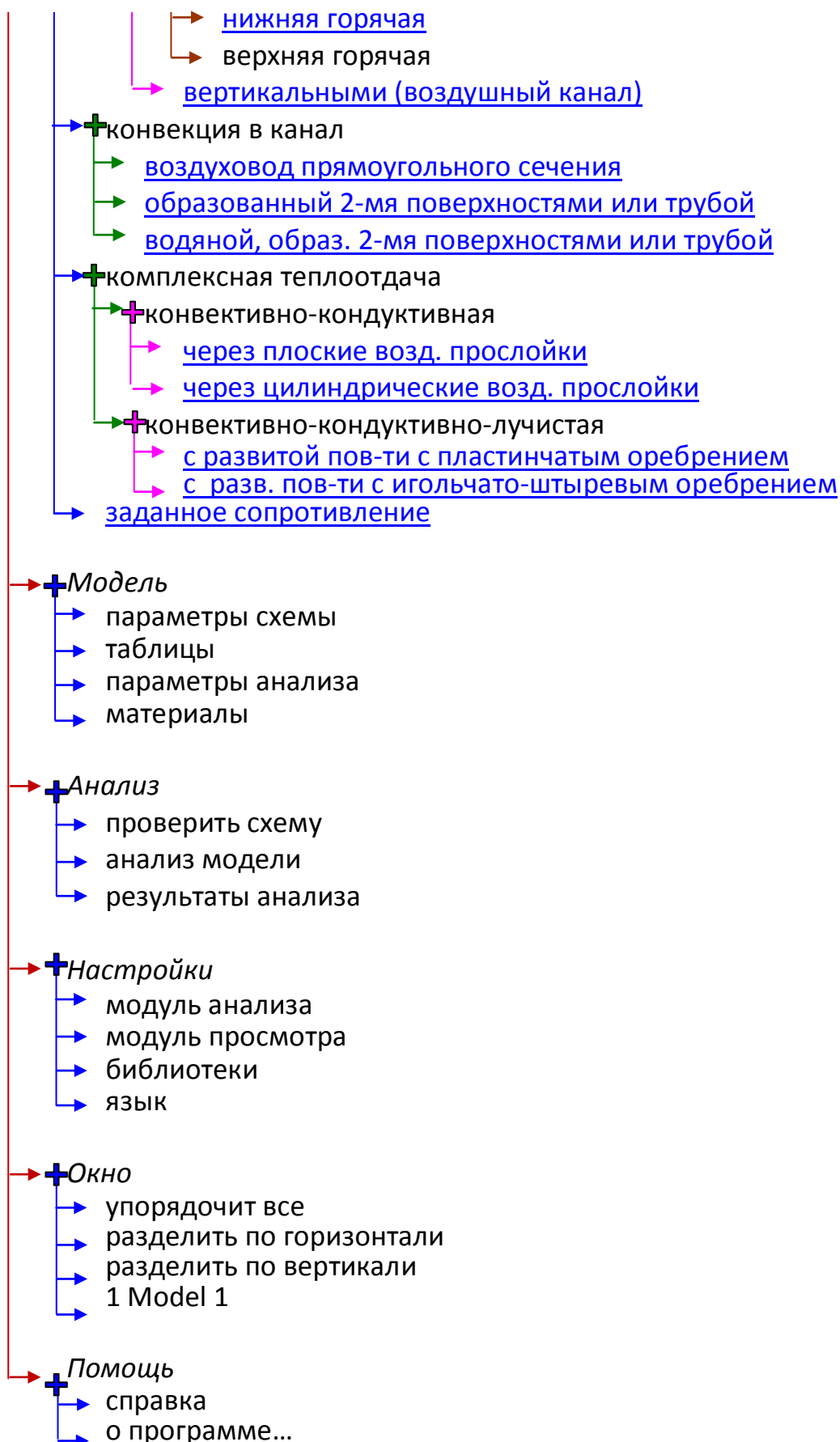


Таблица П6.1

Список по функциям *MTPEditor*

| | |
|---|--|
|  | Кондукция (декартова система) |
|  | Кондукция (декартова система, многослойное тело) |
|  | Кондукция (цилиндрическая система, нормальное направление) |
|  | Кондукция (цилиндрическая система, радиальное направление) |
|  | Кондукция (цилиндрическая система, рокадное направление) |
|  | Кондукция (сферическая система) |
|  | Контактный теплообмен (прямоугольное пятно) |
|  | Контактный теплообмен (круглое пятно) |
|  | Контактный теплообмен (мех.давл., шерх. пов-тей) |
|  | Излучение (неразвитая поверхность) |
|  | Излучение (параллельные пластины) |
|  | Излучение (перпендикулярные пластины) |
|  | Обдув (неразвитая поверхность) |
|  | Обдув (пластинчатое оребрение) |
|  | Обдув (игольчато-штыревое оребрение) |
|  | Теплоперенос (продуваемый воздушный канал) |
|  | Теплоперенос (прокачиваемый водяной канал) |
|  | Теплоперенос (перфорированный блок) |
|  | Конвекция (неразвитая поверхность) |
|  | Конвекция (2 горизонтальные поверхности, нижняя горячая) |
|  | Конвекция (2 горизонтальные поверхности, верхняя горячая) |
|  | Конвекция (воздушный канал) |
|  | Конвекция (горизонтальная цилиндрическая поверхность) |
|  | Конвекция (вертикальная цилиндрическая поверхность) |
|  | Конвекция (воздуховод) |
|  | Конвекция (2 пов-ти или труба) |
|  | Конвекция (водяной канал, 2 пов-ти или труба) |
|  | Комплексная теплоотдача (плоские прослойки) |
|  | Комплексная теплоотдача (цилиндрические прослойки) |
|  | Комплексная теплоотдача (пластинчатое оребрение) |
|  | Комплексная теплоотдача (игольчато-штыревое оребрение) |
|  | Заданное тепловое сопротивление |

BoardEditor



















- **+Файл;**
 - создать
 - открыть
 - закрыть
 - сохранить
 - сохранить как...
 - сохранить изображение конструктива
 - **+импорт**
 - импорт топологии
 - импорт термограмм
 - **+экспорт**
 - **+экспорт термограмм в**
 - комплекс ТЕРМИД РЭА
 - семантический анализ
 - выход
- **+Функциональное меню**
 - управляющая информация
 - размеры подложки
 - ТФП материала подложки
 - список радиоэлементов
 - список граничных условий
 - шаг внутренней сетки
 - шаг дискретизационной сетки
- **+Правка**
 - отменить
 - вырезать
 - копировать
 - вставить
 - удалить
 - объединить
 - разъединить
 - разместить
 - свойства
 - задать параметры
 - привязать к БД
- **+Вид**
 - СЛОИ
 - обновить

BoardEditor

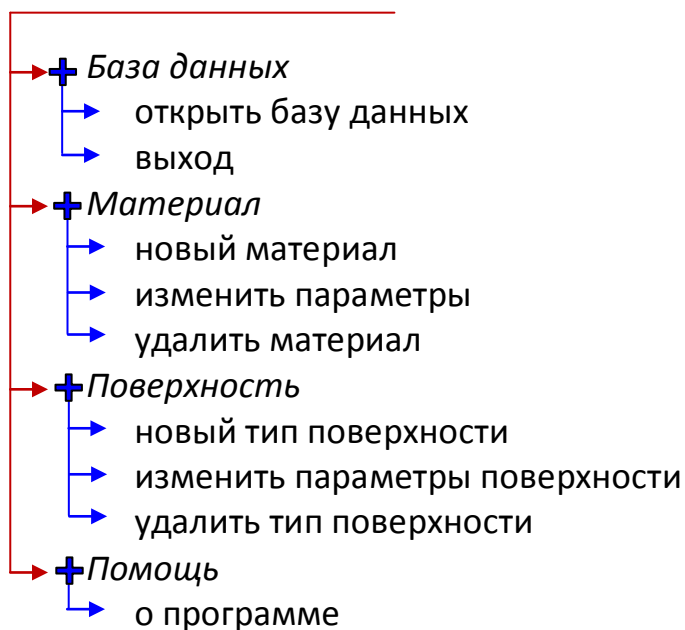
- - наложение сторон
 - координатная сетка
 - шаг координатной сетки ...
 - линейка
 - строка состояния
- **+Анализ**
 - тепловой анализ печатного узла
- **+Просмотр;**
 - температуры корпусов ЭРЭ
 - температуры активных зон ЭРЭ
 - совмещенные температуры ЭРЭ
 - перегревшиеся ЭРЭ
 - мощности ЭРЭ
 - коэфф. тепловой нагрузки ЭРЭ
 - изотермы
 - термограмма
 - тепловой режим радиоэлементов
- **+Сервис**
 - **+редактор**
 - файл данных
 - файл результатов
 - создать файл обмена
 - загрузить язык
 - загрузить цветовую палитру...
 - база данных «радиоэлементы»
 - настройки
- **+Помощь**
 - справка
 - о программе...

Таблица П6.2

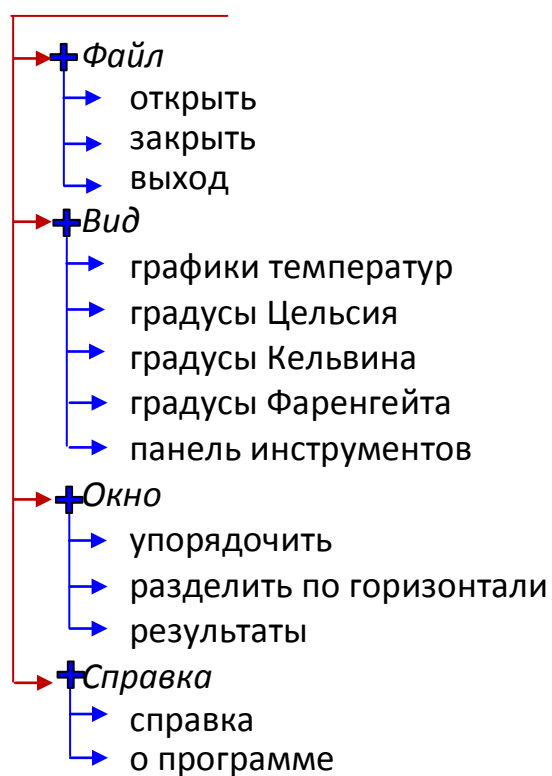
Список по функциям *BoardEditor*



| | |
|---|--------------------------------------|
|  | Управляющая информация |
|  | Линейные размеры несущей конструкции |
|  | ТФП несущей конструкции |
|  | Список ЭРЭ |
|  | Список вырезов |
|  | Список тепловых шин |
|  | Список граничных условий |
|  | Слои |
|  | Наложение сторон |
|  | Шаг внутренней сетки |
|  | Температуры ЭРЭ |
|  | Перегретшиеся ЭРЭ |
|  | Мощности ЭРЭ |
|  | Изотермы |
|  | Термограмма |
|  | Интегральные характеристики КУ |
|  | Тепловой режим радиоэлементов |
|  | Графики температур ЭРЭ |
|  | 3D-модель |
|  | Моделирование теплового режима |

Редактор баз данных




MTPViewer



| | | | | |
|---|---|--|---------------------|------------|
|  |  | <p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА</p> | <p>ПРИЛОЖЕНИЕ 6</p> | <p>544</p> |
|---|---|--|---------------------|------------|

Conv2Triana



| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 545 |
|---|---|---|--------------|-----|

Приложение 7. Программные средства, используемые для моделирования аэродинамических, гидравлических и тепловых процессов в РЭА

Таблица П7.1

Основные характеристики современных программных средств, применяемых для исследования тепловых характеристик РЭА

| № п/п | Название ПО (фирма-разработчик) | Функциональные возможности в области моделирования тепловых, аэродинамических и гидравлических процессов | Конвертация данных из/в другие CAE-, CAD-системы | Графический режим | Основа математического обеспечения | Режим формирования моделей | Примечание |
|-------|--|--|--|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | BETA soft /BETA soft-System, BETA soft-Board, BETA soft-Component/ («Dinamic Soft Analysis Inc.») | Моделирование стационарных и нестационарных тепловых процессов в стойках и блоках с регулярной структурой (крейтах), печатных узлах, интегральных схемах, мощных полупроводниковых приборах. Программа BETA soft-Board позволяет учитывать вырезы, теплостоки, отсутствие конвекции для космических РЭА; тепловыделения в печатных проводниках | Импорт данных из: PCAD, Tango, Allegro, OrCAD, Protel, Mentor, ACCEL, Veri Best, PADS, Cadence, Visula | 2D, 3D | Метод конечных элементов | Автоматический, полуавтоматический | В настоящее время разработка прервана, сайт программы не поддерживается |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 546 |
|---|---|---|--------------|-----|



Продолжение табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--|---|---|--------|---------------------------|------------------------------------|---|
| 2 | COLDPLATE («Electronic Packaging Analysis Company») | Программа анализа тепловых процессов в радиаторах воздушного и жидкостного охлаждения, применяемых в РЭА | — | 3D | Методы конечных разностей | Автоматический | http://www.mv.com/ipusers/epac/ |
| 3 | CoolIt, CoolItPCB (Daa Research Corp.) | Программы анализа тепловых и гидроаэродинамических процессов в РЭА. Моделирование на уровне блоков и печатных узлов. Программы интегрированы между собой для проведения иерархического анализа | Импорт данных из файлов формата <i>IDF</i> | 3D | — | Автоматический | http://www.daa.com/ |
| 4 | FloTHERM /FloTHERM PCB, FloTHERM IC/ («Mentor Graphics») | Программный модуль комплексного анализа тепловых и гидроаэродинамических процессов в РЭА, входящий в состав пакета программ <i>Mentor's mechanicalthermalsimulation-softwaretools</i> . Обеспечивает возможность моделирования на уровнях шкаф, блок, печатный узел, ЭРИ. Имеется возможность моделирования термоэлектрических охладителей. Формат применяемых моделей ЭРИ поддерживается многими производителями | Импорт/экспорт данных через <i>IDF</i> формат | 2D, 3D | Метод конечных элементов | Автоматический, полуавтоматический | http://www.mentor.com/products/mechanical/products/flotherm |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 547 |
|---|---|---|--------------|-----|


Продолжение табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--|---|---|----|--------------------------|------------------------------------|---|
| 5 | ANSYS/Icepak («Ansys Inc.») | Программный модуль комплексного анализа тепловых и гидроаэродинамических процессов в РЭА, входящий в состав пакета программ <i>ANSYS</i> . Позволяет проводить моделирование на уровне шкафов, блоков, печатных плат и ЭРИ (используется иерархический подход) в типовом и нетиповом исполнении. Имеет БД по геометрическим и рабочим характеристикам вентиляторов, радиаторов и термо-электрических охладителей некоторых производителей | Импорт геометрии из распространённых форматов <i>MCAD/ECA D</i> -систем: <i>IGES, STEP, IDF, MCM/BRD, TCB, Gerber</i> | 3D | Метод конечных элементов | Автоматический, полуавтоматический | http://www.ansys.com/products/icepak/ |
| 6 | NX Electronic System Cooling («Siemens») | Программный модуль, обеспечивающий комплексный анализ тепловых и аэродинамических процессов в РЭА с использованием решателей <i>TMG-Flow</i> и <i>TMG-Thermal</i> производства «МАЯНТТLtd». Имеет БД с более чем 2000 вентиляционных характеристик вентиляторов ведущих производителей. Обеспечивает возможность моделирования систем с термоэлектрическими охладителями | Импорт/экспорт данных с <i>PCB</i> - и <i>FPC</i> -системами: <i>Zuken, MentorGraphics, Cadence, VeriBest, OrCAD, Incases, Comtel</i> | 3D | Метод конечных элементов | Автоматический, полуавтоматический | http://www.mayahtt.com/products/cfd-analysis |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 548 |
|---|---|---|--------------|-----|



Продолжение табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--|---|---|----|------------------------------|----------------|--|
| 7 | Sauna («Thermal Solutions») | Программа анализа тепловых процессов в РЭА. Имеется возможность моделирования систем охлаждения с естественной и вынужденной конвекцией (коэффициенты конвективного теплообмена вычисляются автоматически). Основное назначение – моделирование радиаторов (в том числе с жидкостным охлаждением), печатных узлов, микросхем в BGA и QFP корпусах, мощных светодиодов | Экспорт моделей в программы <i>SINDA-85</i> и <i>SINDA/G</i> . Экспорт результатов из <i>SINDA</i> . Экспорт данных в программу схемотехнического анализа <i>Saber</i> | 3D | Эквивалентные тепловые схемы | Автоматический | http://www.thermalsoft ware.com/ |
| 8 | PCAnalyze («K&K Associates») | Программа анализа стационарных и нестационарных тепловых процессов в печатных узлах. При моделировании конвекции необходимо самостоятельно определять и задавать коэффициент конвективного теплообмена, что является недостатком по сравнению с основными конкурирующими программами. Изначально содержит небольшую БД основных компонентов, которая может самостоятельно пополняться пользователем | Импорт данных из файлов формата <i>IDF</i> | 2D | Методы конечных разностей | Автоматический | http://www.pcanalyze.com |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 549 |
|---|---|---|--------------|-----|


Продолжение табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|---|--|---|--------|---|-----------------------------|---|
| 9 | SINDA/FLUINT, Thermal Desktop («C&R Technologies») | Комплексный анализ стационарных и нестационарных тепловых и аэродинамических процессов. Формирование тепловых моделей осуществляется разработчиком. Программа позволяет описывать теплофизических свойств материалов в виде зависимостей от времени и температуры. Обеспечивает возможность моделирования изделий с термоэлектрическими охладителями и тепловыми трубками | Поддерживается совместимость с форматами: <i>TRASYS, Nevada, IDEASFE u FD, FE-MAP, NASTRAN, ANSYS, TSS, IGES, STEP, Iceboard, SAT/ACIS</i> | 2D, 3D | Метод конечных разностей и электротепловой аналогии | Ручной и полуавтоматический | http://www.crtech.com/ Область применения: космос, электроника, нефтехимия, биомедицина |
| 10 | SOLVIA («SOLVIA Engineering AB») | Анализ стационарного и нестационарного тепловых режимов нетиповых конструкций. Модели формируются с использованием одно-, двух- и трехмерных элементов. Программа позволяет описывать теплофизические свойства материалов в виде зависимостей от времени и температуры. Имеется возможность организации комплексного расчёта тепловых и механических процессов | Результаты анализа конвертируются в программу анализа механических процессов SOLVIA | 2D, 3D | Метод конечных элементов | Полуавтоматический | http://www.solvias.com/ |
| 11 | 6SigmaDS /6SigmaRoom, 6sigmaRack, 6SigmaET/ (Future Facilities Ltd.) | Программные модули анализа тепловых и аэродинамических процессов в помещениях, шкафах, блоках и печатных узлах (иерархический подход). Имеет БД по конструкциям шкафов, стоек, а так же параметрам ЭРИ (в том числе радиаторам, осевым и центробежным вентиляторам, тепловым трубкам и т.д.) | Импорт/экспорт данных через формат <i>IDF</i> | 2D, 3D | - | Автоматический | http://www.futurefacilities.com/ |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | 550 |
|---|---|---|--------------|-----|



Продолжение табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|---|--|---|-----------------------------|---|---|---|
| 12 | <p>Подсистема «АСОНИКА-Т» – подсистема анализа и обеспечения тепловых характеристик РЭА /в настоящее время представлена программным комплексом ТРиАНА): <i>Triana, MTPEditor, MTPViewer, BoardEditor, Conv2Triana, BlocEditor</i> (для версии 3.00), <i>AeroEditor</i> (для версии 3.00) /((Красноярский ГТУ /каф. «Приборостроение»/, МИЭМ /каф. РТУиС/, ФГУП НИИ АА им. акад. В.С. Семенихина)</p> | <p>Моделирование стационарных и нестационарных тепловых процессов в конструкциях РЭА, а также различных изделий электронной техники /микросхемы, микросборки, печатные узлы, функциональные ячейки, блоки, контактно-коммутационные изделия, трансформаторы и др./; реализованы алгоритмы восходящего и нисходящего иерархического моделирования; для версии 3.00 реализовано моделирование аэродинамических (гидравлических) процессов в конструкциях РЭА /блоки кассетного и этажерочного типов, воздухопроводы, нетиповые конструктивные узлы, элементы и конструкции в целом/. Учитываются особенности аэрокосмических РЭА /задание граничных условий в виде локальных зон, описание источников тепловых воздействий в виде различных функциональных зависимостей, задание граничных условий для условий невесомости, описание вырезов в однослойных и многослойных структурах, шин и контуров из шин, систем кондуктивных теплостоков/. Применение аппарата параметризации для описания топологических моделей тепловых и аэродинамических моделей. Библиотечная организация хранения параметризованных фрагментов моделей, макромоделей и полных моделей</p> | <p>Импорт из систем <i>PCAD, ACCEL, OrCAD, CADENCE</i>; импорт/экспорт <i>ТЕРМИД</i> (программно-аппаратный комплекс тепловизионных), проблемные подсистемы системы «АСОНИКА» («АСОНИКА-М», «АСОНИКА-ТМ», «АСОНИКА-К», «АСОНИКА-Д», <i>Pilot</i>)</p> | <p>2D, 3D (версия 3.00)</p> | <p>Методы конечных разностей и электротепловой аналогии</p> | <p>Автоматический, и полуавтоматический</p> | <p>Программа <i>Triana</i> – математическое ядро 2-го поколения (реализует функции автоматического синтеза моделей на основе формализованного описания геометрических моделей конструкций РЭА, формирует и анализирует математическую модель)</p> |

| | | | | | | | |
|---|---|---|--------------|--|--|--|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 7 | | | | 551 |
|---|---|---|--------------|--|--|--|-----|

Окончание табл. П7.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|--|--|---|--------|--|-------------------------------------|---|
| 13 | <p>Подсистема «АСОНИКА-ТМ» - подсистема моделирования тепловых и механических процессов в РЭА (МИЭМ /каф. РТУ-иС/, КГТА /каф. ПМиСАПР/)</p> | <p>Моделирование тепловых и механических процессов в конструкциях РЭА: моделирование стационарного и нестационарного тепловых режимов в печатных узлах, функциональных ячейках, микросборках и нетиповых конструкциях РЭА. Графы моделей нетиповых конструкций РЭА строятся разработчиком из набора компонентов топологических тепловых моделей (проводимостей, теплоемкостей, источников с заданной мощностью тепловыделения и температурой). Модели тепловых процессов типовых конструкций формируются в автоматическом режиме при помощи специальных генераторов сеточных моделей, входящих в состав математического ядра. В качестве математического ядра используется математическое ядро 1-го поколения <i>CHAPAR</i> ПК <i>ТРИАНА</i></p> | <p>Импорт из систем <i>PCAD, ACCEL, OrCAD</i>; импорт/экспорт в проблемные подсистемы системы «АСОНИКА» («АСОНИКА-М», «АСОНИКА-Т», «АСОНИКА-К», <i>Pilot</i>)</p> | 2D, 3D | Методы конечных разностей (МКР) и электротепловой аналогии | Автоматический и полуавтоматический | |
| 14 | <p>Qfin (<i>Qfinsoft Technology Inc</i>)</p> | <p>Программа комплексного анализа тепловых и гидроаэродинамических процессов в РЭА. Позволяет проводить моделирование на уровне шкафов, блоков, печатных узлов и ЭРИ (используется иерархический подход) в типовом и нетиповом исполнении. Имеет БД с характеристиками типовых вентиляторов, радиаторов и термоэлектрических охладителей. Обеспечивается возможность моделирования тепловых трубок</p> | — | 3D | Метод конечных элементов | Автоматический | http://www.qfin.net/drupal/ |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 8 | 552 |
|---|---|---|--------------|-----|



Приложение 8. Руководство по инсталляции

Программный комплекс (ПК) **ТРИАНА** [www.triana.su] предназначен для моделирования на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкциях радиоэлектронных средств (РЭА), таких как стоечные конструкции, блоки с регулярной и нерегулярной структурами, печатные узлы (ПУ), функциональные ячейки (ФЯ), микросборки (МСБ). ПК рассчитан на инженеров-конструкторов промышленных предприятий, НИИ, КБ, занимающихся разработкой радиоэлектронной аппаратуры.

Целью моделирования является получение тепловых полей конструкций РЭА 3-го и 4-го уровней конструктивной иерархии (температур конструктивных узлов, элементов и потоков хладоносителя в сети каналов конструкции стойки или блока), тепловых полей конструктивных узлов 2-го уровня конструктивной иерархии (тепловых полей оснований функциональных ячеек, печатных плат, подложек, температур активных зон и корпусов электрорадиоэлементов /ЭРЭ/).

ПК **ТРИАНА** состоит из набора взаимосвязанных программных единиц. В состав данной версии ПК **ТРИАНА** входят:

- *графический редактор топологических моделей тепловых процессов (МТП)*, позволяющий: формировать МТП конструкций РЭА с параметрическим описанием их компонентов, использующих геометрические и теплофизические параметры графических образов исследуемых узлов и/или конструкций РЭА в целом; отображать результаты моделирования непосредственно на топологической модели;
- *графический редактор конструкций РЭА типа «печатный узел», «функциональная ячейка», «гибридно-интегральная схема или микросборка»*, который позволяет создавать геометрические модели конструкций ПУ, ФЯ, МСБ с позиций исследования в них тепловых процессов; вести базу данных по геометрическим и теплофизическим параметрам электрорадиоэлементов; отображать результаты моделирования на геометрической модели исследуемого конструктивного узла;
- *конвертор топологий печатных плат*, реализующий функции автоматического преобразования основных параметров несущей конструкции (НК) ПУ, ФЯ или МСБ, а также схемы размещения ЭРЭ на НК из форматов систем топологического проектирования печатных плат (*PCAD, ACCEL, PROTEL DXP, Altium Designer* и др.) в формат ПК **ТРИАНА**;

| | | | | |
|---|---|--|---------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТриАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 8 | 553 |
|---|---|--|---------------------|------------|

- *математическое ядро*, включающее в свой состав: набор специализированных программ, реализующих функции автоматического синтеза моделей тепловых процессов конструктивных узлов РЭА на основе их геометрической модели и температурных условий их эксплуатации (граничные и начальные условия); набор модулей, выполняющих функции: формирования математических моделей для моделирования тепловых процессов исследуемой конструкции в стационарном и нестационарном режимах; анализа математической модели, которая может быть сформирована в виде системы линейных алгебраических уравнений, системы нелинейных алгебраических уравнений или системы обыкновенных дифференциальных уравнений; библиотеку аналитических моделей (набор критериальных уравнений) для анализа различных видов теплообмена и их модификаций (в библиотеке содержится около 70 разделов).

Перечисленные компоненты ПК могут работать как автономно, так и комплексироваться в группы.

МИНИМАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ

Для нормального функционирования программного комплекса требуются:

- установленная операционная система *Microsoft Windows 9X/NT/2000/XP*;
- оперативная память 64 Мб;
- процессор с частотой не менее 300 МГц;
- свободное дисковое пространство 30 Мб.

ИНСТАЛЛЯЦИЯ

Для инсталляции поместите инсталляционный диск в привод *CD-ROM*. Если у Вас включена опция *Windows* «Автоматическое распознавание диска», то *Windows* сам запустит файл инсталляции, в противном случае Вам придется найти с помощью любого менеджера файлов (*Explorer*, *Far* и т. п.) файл ***setup.exe*** и произвести его запуск.

Если Вы все сделали правильно, то Вы увидите приглашение к установке программного комплекса (см. [рис. П8.1](#)).

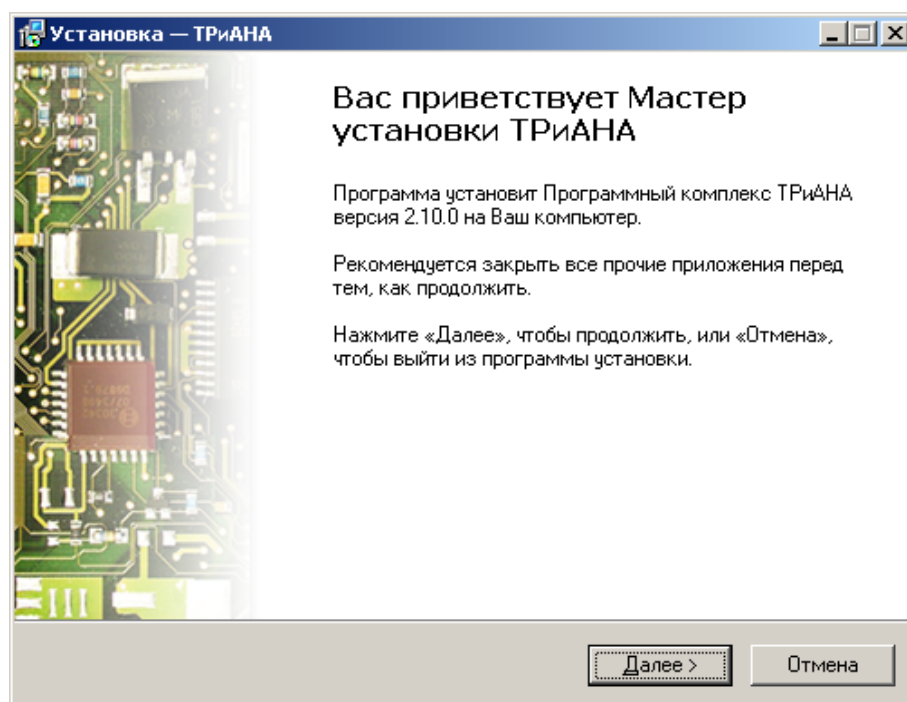


Рис. П8.1. Начало установки ПК ТриАНА

Для продолжения установки активизируйте кнопку «Далее». После этого Вы должны увидеть экранную форму, вид которой приведен на [рис. П8.2](#).

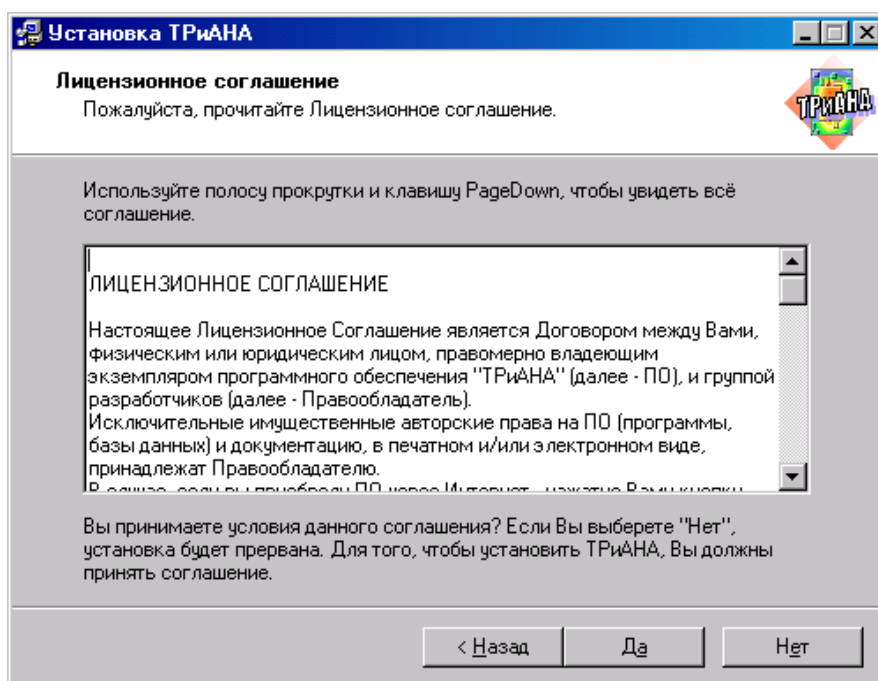


Рис. П8.2. Лицензионное соглашение

Прочитайте внимательно *Лицензионное Соглашение*. Если Вы не согласны с каким-либо пунктом, не рекомендуется продолжать инсталляцию. **Помните! Нарушение условий *Лицензионного Соглашения* ведет к административ-**

ной и уголовной ответственности. Если Вы принимаете условия *Лицензионного Соглашения*, активизируйте кнопку «Да».

На следующем этапе программа инсталляции потребует ввести серийный номер продукта (рис. П8.3). Серийный номер будет получен Вами при покупке программного комплекса.

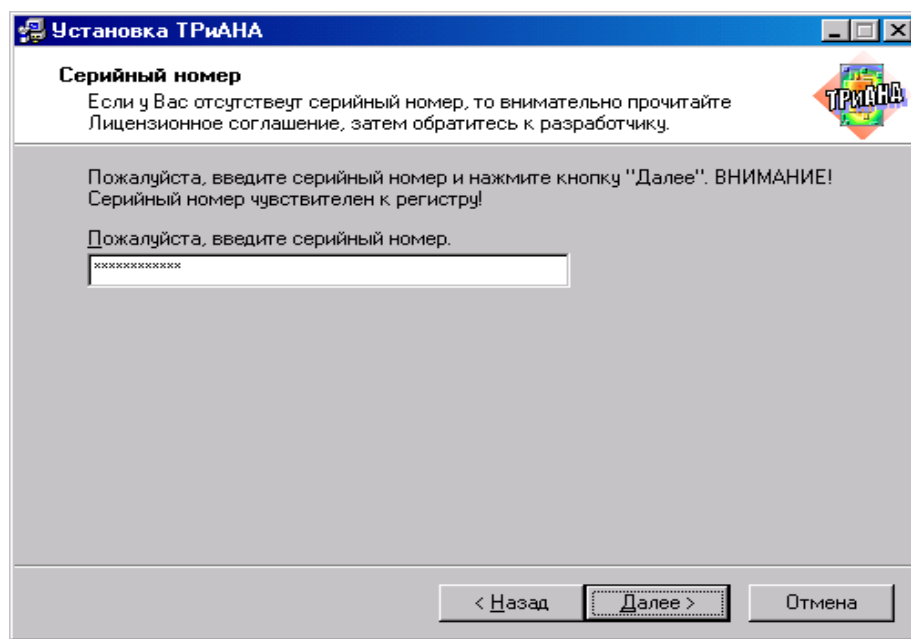


Рис. П8.3. Ввод серийного номера продукта

Введите серийный номер в поле ввода и активизируйте кнопку «Далее». Если Вы ввели неверный номер, то программа инсталляции проинформирует Вас об этом и попросит ввести серийный номер повторно.

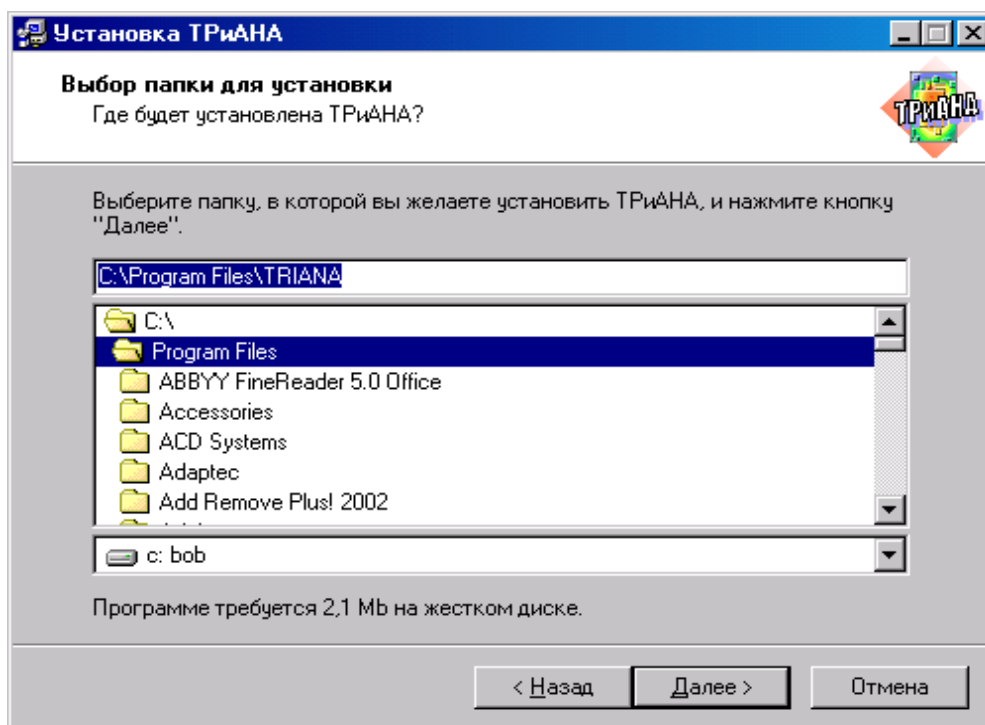


Рис. П8.4. Выбор каталога для установки программного комплекса

Далее программа инсталляции предложит выбрать каталог, в который будет устанавливаться программный комплекс. При установке будет автоматически предложен стандартный каталог, изменить который Вы можете посредством выбора в списке каталогов или ввода его имени непосредственно с клавиатуры. Диалоговое окно выбора каталога представлено на [рис. П8.4.](#)

На следующем шаге программа инсталляции предложит выбрать компоненты программного комплекса, которые будут устанавливаться в указанный каталог.

Выбор компонентов может быть сделан посредством определения типа конфигурации программного комплекса («Инсталляция полной конфигурации ПК», «Инсталляция минимальной конфигурации ПК»), тогда набор компонентов определяется программой инсталляции автоматически, или посредством ручного выделения требуемых компонентов. В этом случае программа инсталляции выполнит установку ПК по схеме «Инсталляция выборочной конфигурации ПК», т. е. в ПК будут включены только выбранные Вами компоненты. Диалог выбора конфигурации и компонентов программного комплекса представлен на [рис. П8.5.](#)

После выбора компонентов ПК активизируйте кнопку «Далее».

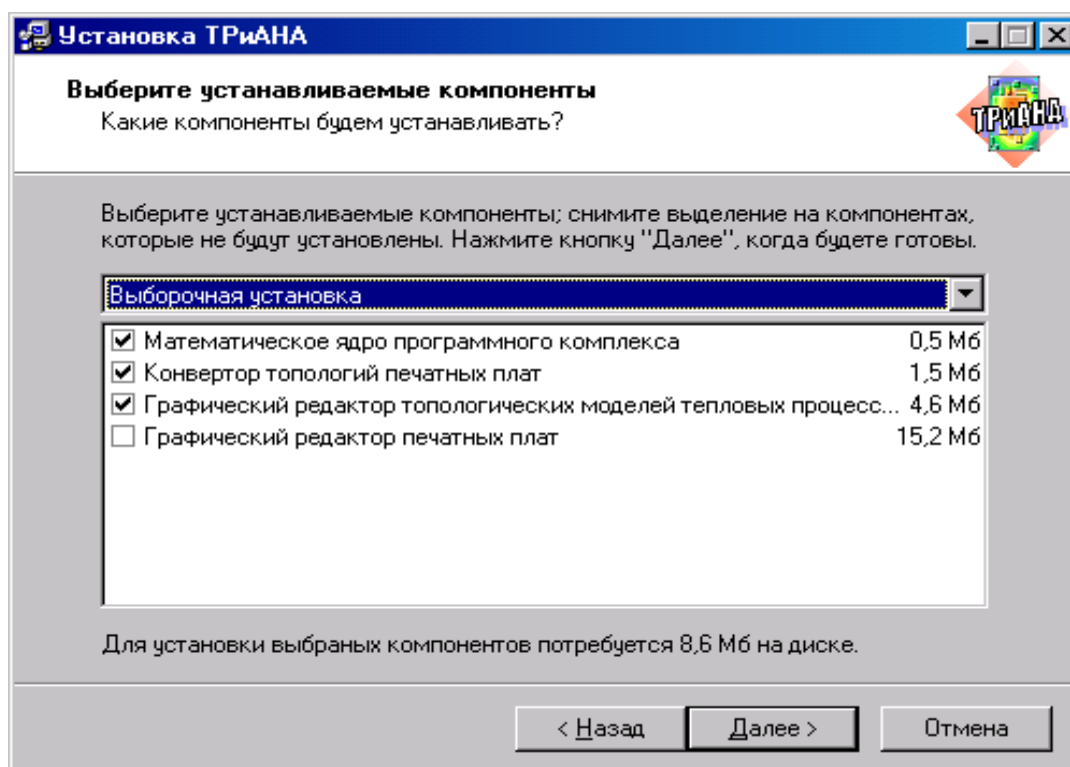


Рис. П8.5. Выбор компонентов для установки

Далее для установки программного комплекса на Ваш компьютер потребуется ввести программную группу.

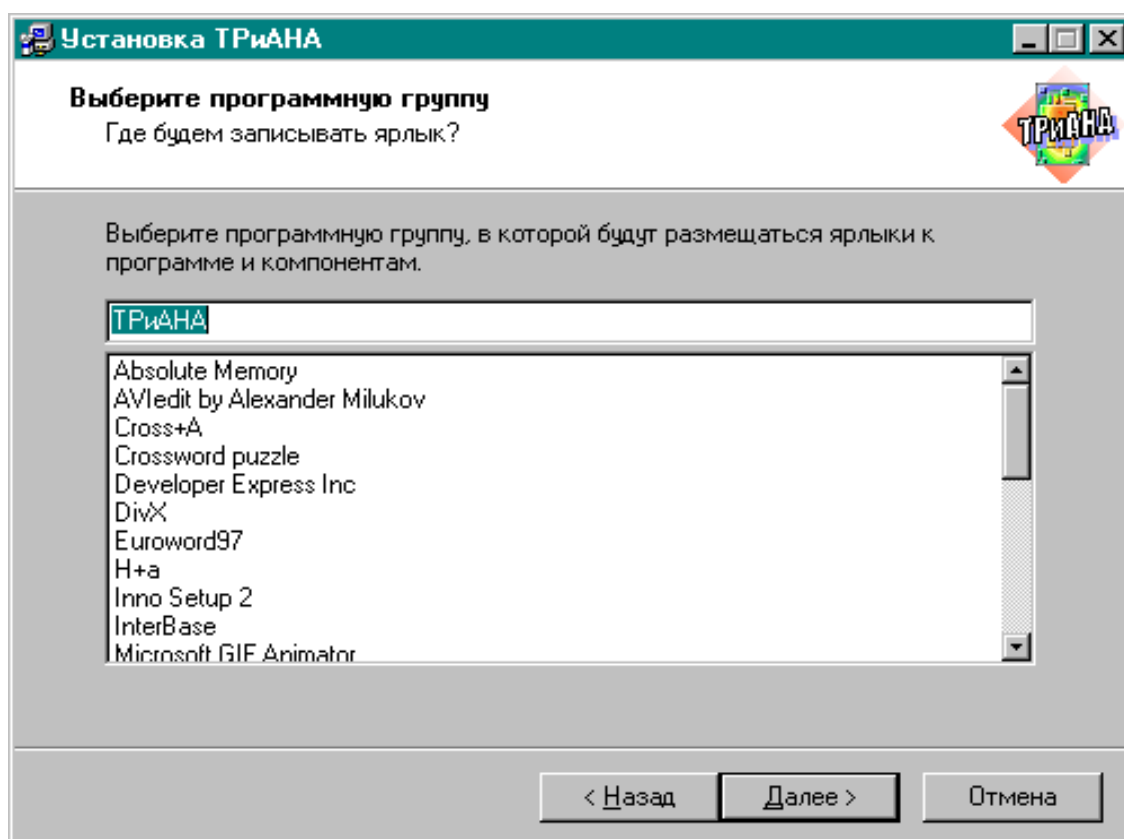


Рис. П8.6. Выбор программной группы

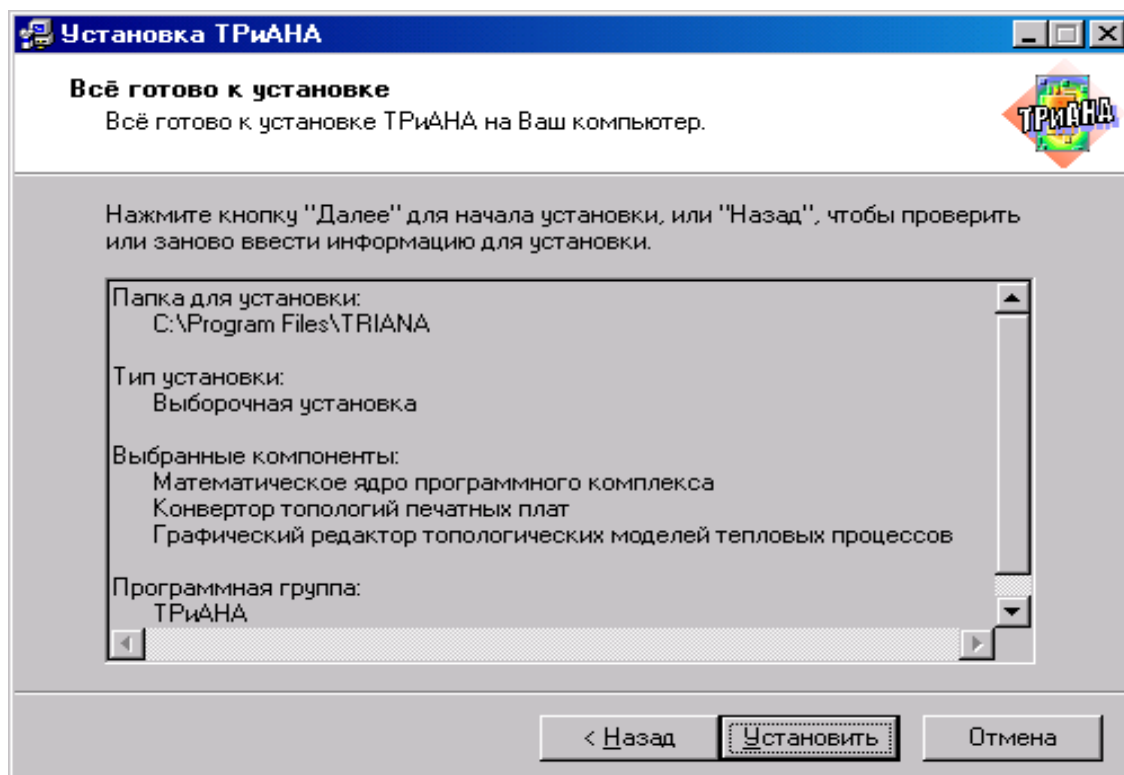


Рис. П8.7. Параметры и готовность инсталляции

Программная группа содержит ярлыки ко всем компонентам ПК, которые

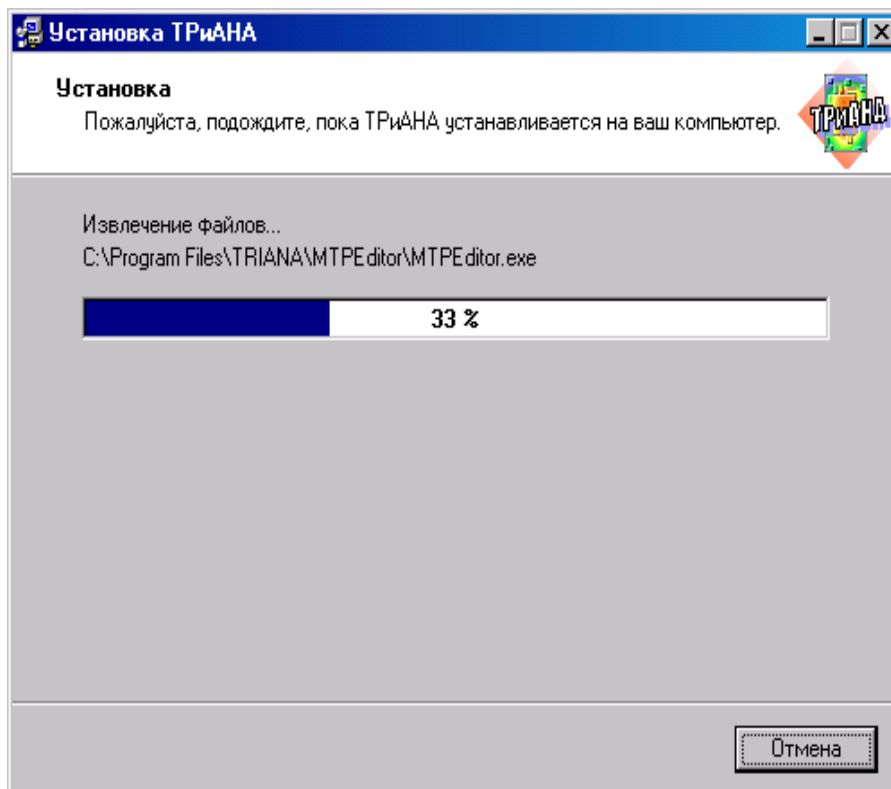


Рис. П8.8. Процесс инсталляции

были выбраны Вами в процессе его установки, и помещается в меню, вызываемое по активации кнопки «Пуск» операционной системы *Windows*.

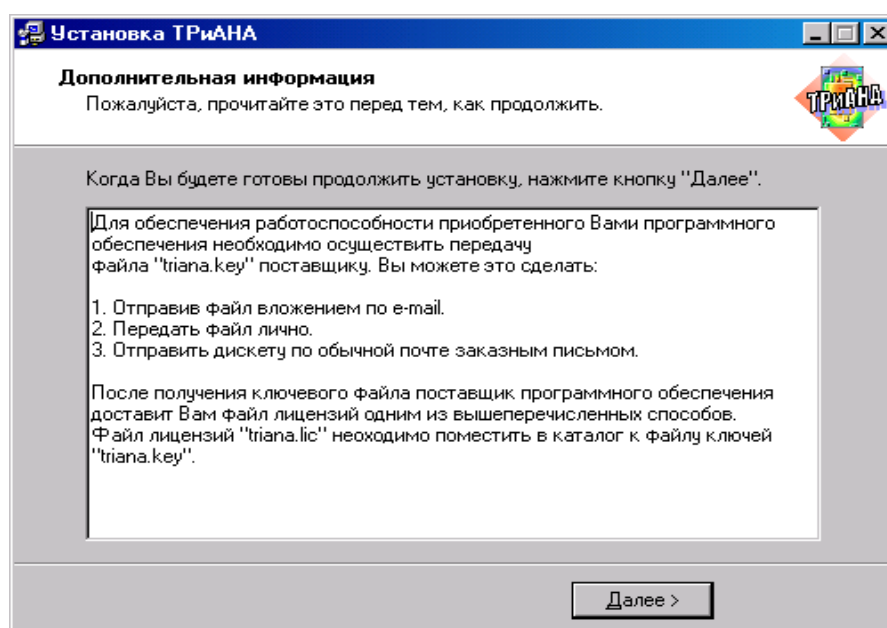



Рис. П8.9. Информация о регистрации

| | | | | |
|---|---|---|----------------------------|-------------------|
|  |  | <p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА</p> | <p>ПРИЛОЖЕНИЕ 8</p> | <p>559</p> |
|---|---|---|----------------------------|-------------------|

Программную группу Вы можете ввести с клавиатуры или использовать заданную по умолчанию. Диалог выбора программной группы представлен на [рис. П8.6](#). После ввода программной группы активизируйте кнопку «Далее».

Если все предыдущие шаги по инсталляции были сделаны правильно, программа инсталляции предложит Вам просмотреть параметры инсталляции (см. [рис. П8.7](#)).

Если вы согласны с введенными Вами параметрами, активизируйте кнопку «Я Готов», в противном случае посредством активизации кнопки «Назад» вернитесь на нужный этап инсталляции и задайте новые параметры. После активизации кнопки «Я Готов» начинается инсталляция ([рис. П8.8](#)).

После инсталляции компонентов ПК Вам будет предложена информация о порядке регистрации программного продукта (см. [рис. П8.9](#)).

Активизируйте кнопку «Далее».

На этом инсталляция программного комплекса окончена.

Активизируйте кнопку «Готово» для выхода из программы инсталляции ([рис. П8.10](#)).

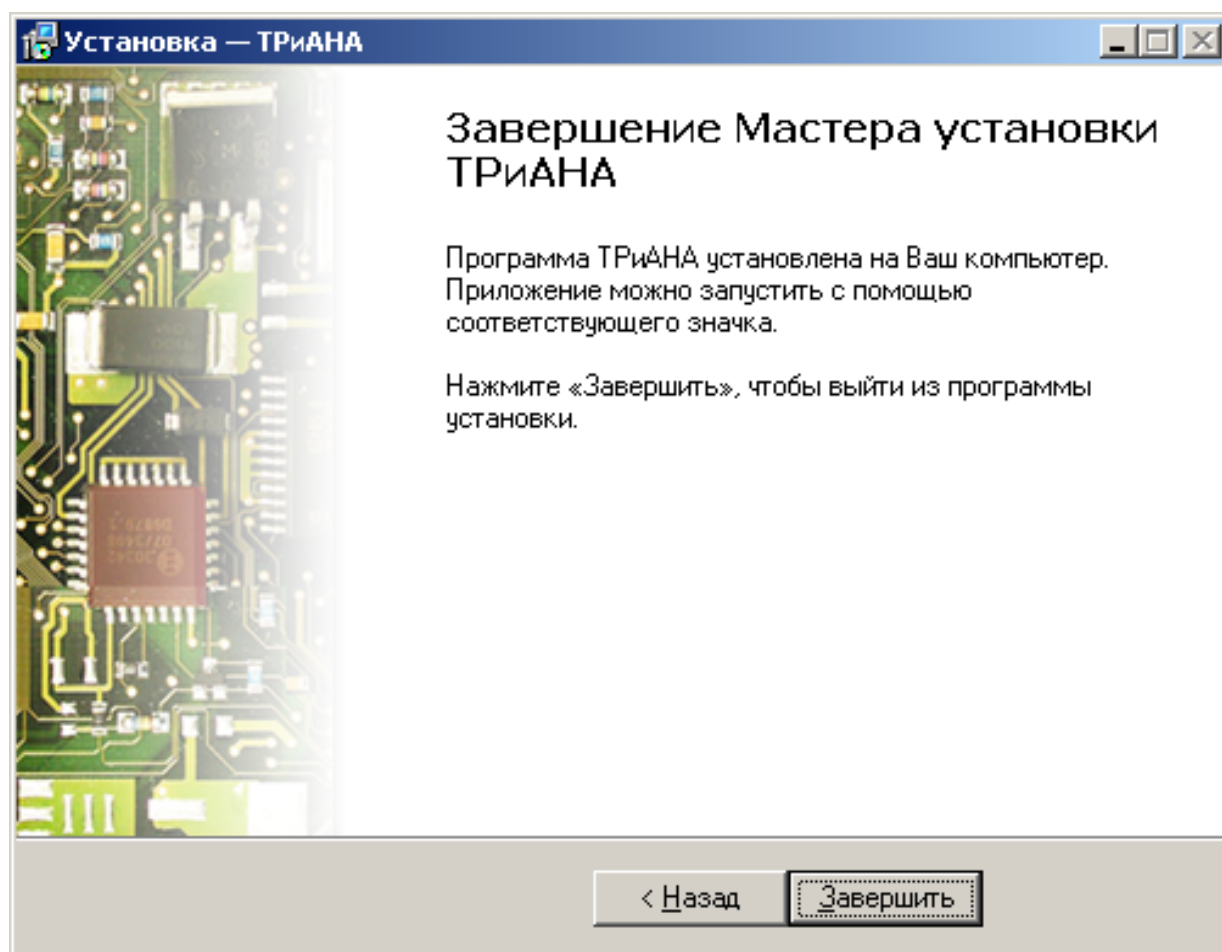




Рис. П8.10. Диалоговое окно процесса завершения инсталляции

| | | | | |
|---|---|--|---------------------|------------|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 8 | 560 |
|---|---|--|---------------------|------------|

Для обеспечения работоспособности приобретенного Вами программного обеспечения необходимо осуществить передачу файла « *triana.key*» поставщику. Вы можете это сделать:

- Отправив файл вложением по *e-mail*.
- Передать файл лично.
- Отправить дискету по обычной почте заказным письмом.

После получения ключевого файла поставщик программного обеспечения доставит Вам файл лицензий одним из вышеперечисленных способов. Файл лицензий « *triana.lic*» необходимо поместить в каталог к файлу ключей « *triana.key*».

ВНИМАНИЕ! Во избежание возникновения ошибок следует предварительно удалить все старые версии программного комплекса, находящиеся в соответствующих каталогах, в которые были установлены удаляемые версии программного комплекса, используя функции деинсталляции.

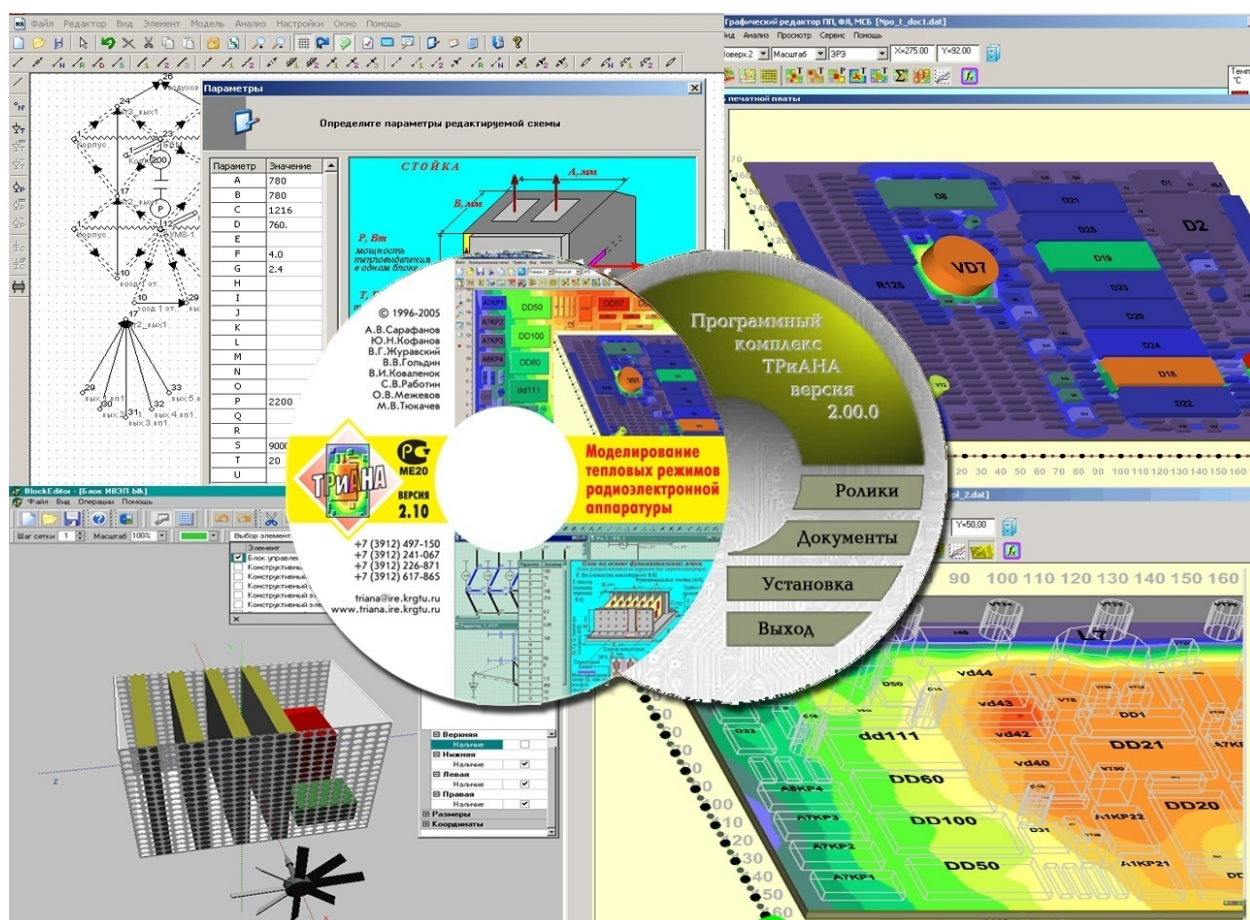
* * *

Эксплуатационная документация на ПК *TPuANA* поставляется в формате *PDF* для программного пакета *Adobe Acrobat Reader*. Если на Вашем компьютере не установлен *Adobe Acrobat Reader 5* или выше, рекомендуем Вам установить его. Для установки перейдите в каталог *Acrobat Reader* на Вашем установочном диске и произведите установку, запустив файл *ar501eng.exe*.

* * *

Для обеспечения полнофункционального режима работы ПК *TPuANA* с базами данных целесообразно установить *Microsoft Access* и *MDAC* версии не ниже 2.6. Вы сможете найти файл установки *MDAC* на официальном сайте фирмы *Microsoft* www.microsoft.com или на Вашем установочном диске в директории *MDAC*.

Программный комплекс *TPuANA-2.00* предназначен для моделирования на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в стойках, блоках, печатных узлах, функциональных ячейках и микросборках радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).



ПК *ТриАНА-2.00* направлен на решение следующих основных проектных задач:



- определение тепловых режимов работы радиокомпонентов и несущих конструкций РЭА с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей РЭА различного назначения (авиационной, космической, морской, автомобильной и др.) и внесение изменений в конструкцию с целью обеспечения необходимого (с точки зрения стабильности электрических характеристик, показателей безотказности и т. п.) теплового режима работы РЭА;
- выбор из нескольких имеющихся лучшего, с точки зрения тепловых характеристик, варианта конструкции РЭА;
- обоснование необходимости дополнительной защиты РЭА от температурных воздействий; повышение эффективности программ испытаний аппаратуры на тепловые воздействия за счет выбора параметров испытательных воздействий, наиболее удобного расположения мест установки регистрирующих датчиков и т. п.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРСИЙ ПК ТРИАНА–2.00.0

Версии ПК имеют функциональные возможности, параметры которых представлены в таблице.

Таблица П8.1

| Название компонента ПК ТРИАНА-2.00.0 | Характеристика полной версии (Release) | Характеристики демоверсии |
|---|--|--|
| Математическое ядро <i>triana.exe</i> | Размерность модели тепловых процессов – 15000 узлов и 120000 ветвей. Возможность организации работы в режиме <<клиент-сервер>>, поддерживающем <<плавающую>> схему лицензирования | Для анализа модели тепловых процессов (МТП), построенной пользователем, размерность МТП – 14 узлов и 40 ветвей. Для анализа моделей печатных узлов, функциональных ячеек и микросборок размерность МТП – 200 узлов и 2000 ветвей. Отключен крейт анализа тепловых шин и контуров из шин. |
| Графический редактор топологических МТП <i>MTPEditor.exe</i> | Размерность модели тепловых процессов – 15000 узлов и 120000 ветвей. Возможность параметризации параметров модели (вместо числовых значений записываются математические выражения) | <i>Размерность модели тепловых процессов – 14 узлов (включая узлы с одинаковым номером) и 35 ветвей.</i> В библиотеку возможна запись только одного фрагмента. Возможность параметризации параметров модели (вместо числовых значений записываются математические выражения) |
| Графический редактор печатных плат <i>BoardEditor.exe</i> | Количество электрорадиоэлементов – 1500 ; количество зон с граничными условиями – 30 | Количество электрорадиоэлементов – 19 ; количество зон с граничными условиями – 4 |
| Конвертор топологий печатных плат <i>Conv2triana.exe</i> | Поддерживаемые форматы – PCB , PDF систем <i>PCAD</i> , <i>ACCEL</i> , <i>AltiumDesigner</i> и др. Количество электрорадиоэлементов – 1500 | Поддерживаемые форматы – PDF <i>PCAD–4.5</i> , <i>AltiumDesigner</i> Количество электрорадиоэлементов – 19 |

| | | | | |
|---|---|---|--------------|-----|
|  |  | Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА | ПРИЛОЖЕНИЕ 8 | 563 |
|---|---|---|--------------|-----|

СТРУКТУРА КАТАЛОГОВ

TRIANA DEMO 2

- **BoardEditor** – в каталоге находится графический редактор конструктивных узлов РЭА (ПУ, ФЯ, МСБ)
- **Conv2Triana** – в каталоге находится конвертор топологий печатных плат
- **Documents** – в каталоге находится комплект рабочих документов
- **Kernel** – в каталоге находится математическое ядро (для демоверсии *trianaBoard.exe*/для редактора топологий ПП/ и *trianaMTP.exe*/для редактора МТП/)
- **MTPEditor** – в каталоге находится графический редактор топологических моделей тепловых процессов
- **Samples** – в каталоге находятся примеры (в соответствующих подкаталогах) для программных единиц комплекса *TRuANA*
- **Unins000.exe** – программа деинсталляции (удаления) ПК ТРИАНА