

ТЕМАТИЧЕСКОЕ  
ПРИЛОЖЕНИЕ  
К ЖУРНАЛУ  
КОМПОНЕНТЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ

№ 4'2014  
АВГУСТ

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ISSN 2079-9322

## TRACO POWER

- DC/DC и AC/DC-преобразователи мощностью от 150 Вт до 22 кВт
- Инверторы, преобразователи частоты от 200 ВА до 30 кВА
- Монтаж на шасси, стену, в 19" ячейку
- Контроль входных/выходных параметров

## МОЩНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ МОЩНЫХ СИСТЕМ

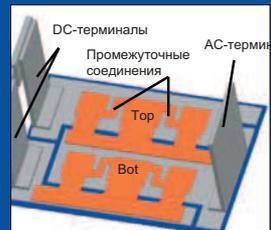
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СЕРИЙ TSC/TSD

В НАЛИЧИИ НА СКЛАДЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СЕРИЙ: TCL, TEN, TER, TES, TMA, TME, TMH, TMV И TSR

**pt** ELECTRONICS  
Innovations & Technologies

Единый телефон: 8-800-333-63-50  
office@ptelectronics.ru  
www.ptelectronics.ru

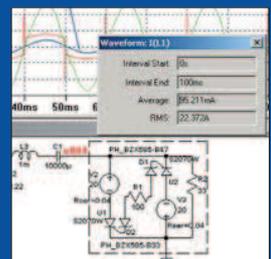
Офисы компании: Санкт-Петербург, Москва, Чебоксары, Нижний Новгород,  
Екатеринбург, Новосибирск, Ижевск, Таганрог, Пермь, Киев



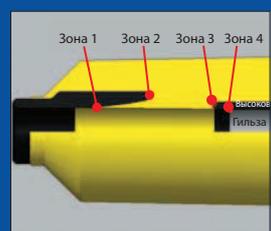
**Многослойная  
SKiN-технология:**  
прорыв в «третье измерение»  
силовой электроники



**IGBT-модули большой  
мощности Mitsubishi Electric  
и их интеграция  
с драйверами затворов  
Isahaya Electronics**



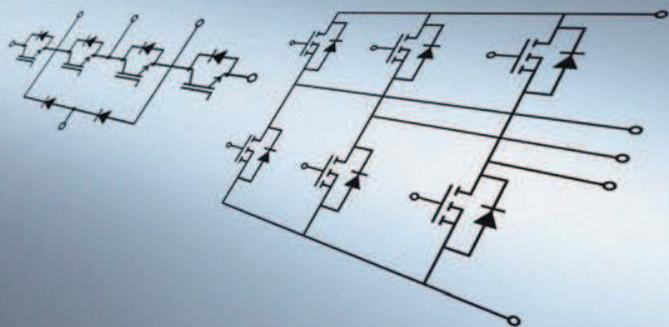
**Продвинутые источники  
сварочного тока**



**Некоторые аспекты  
конструирования  
соединительных муфт  
высокого напряжения**

# КРИСТАЛЛЫ КАРБИДА КРЕМНИЯ В МОДУЛЯХ SEMİKRON

Передовая технология для высокой эффективности преобразования



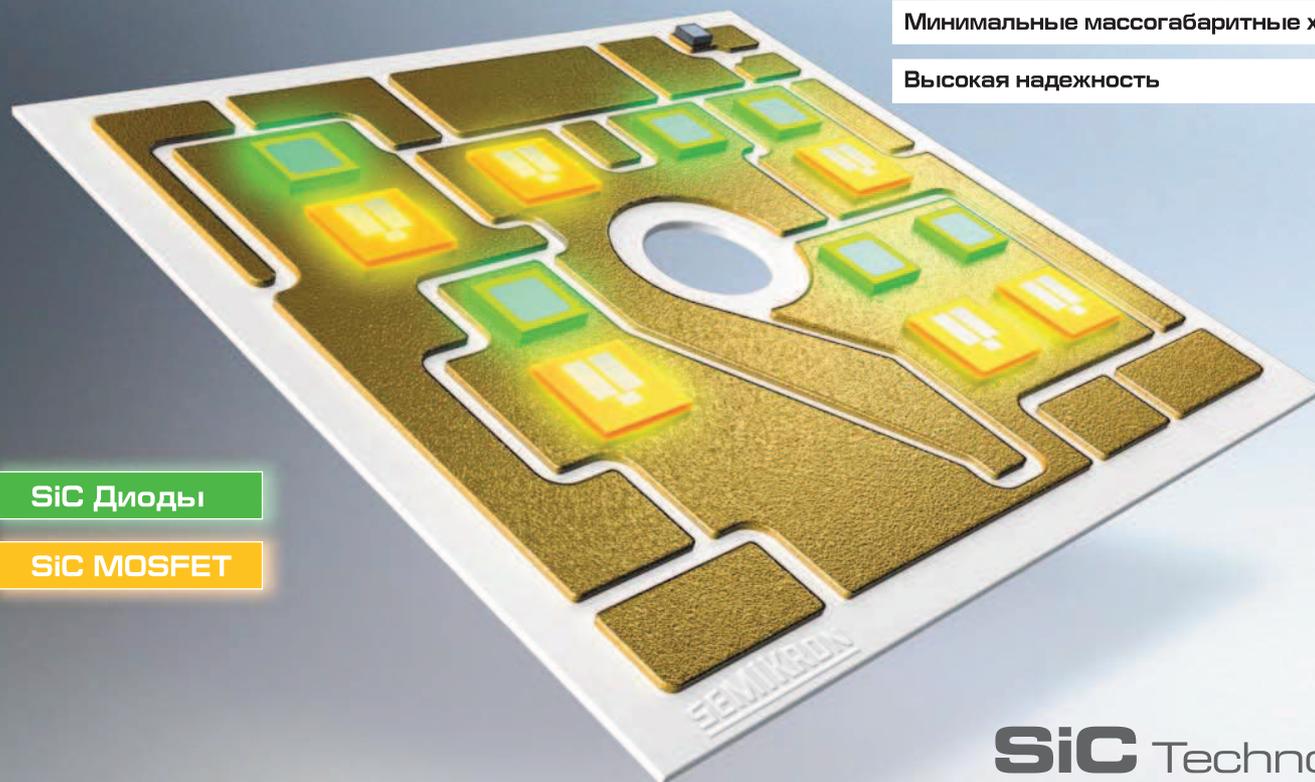
Инверторы солнечных батарей, привода, UPS

Высокая плотность мощности

Высокая частота коммутации

Минимальные массогабаритные характеристики

Высокая надежность



SiC Диоды

SiC MOSFET

**SiC** Technology

**SEMİKRON**

197101, Санкт-Петербург,  
ул. Большая Пушкарская, д. 41  
Тел.: +7 (812) 232-9825  
E-mail: andrey.kolpakov@semikron.com

**КОМПЭЛ**

Москва  
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2131  
Михаил Шведов  
E-mail: m.shvedov@compel.ru

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 327-9404, доб. 4337  
Ващилов Анатолий  
E-mail: vashchilov.spb@compel.ru

**PT Electronics**

[www.ptelectronics.ru](http://www.ptelectronics.ru)  
Санкт-Петербург  
Тел. +7 (812) 324-63-50  
E-mail: semikron@ptelectronics.ru

Москва  
Тел. +7 (495) 517-92-56  
E-mail: moscow@ptelectronics.ru

**ДИАЛ**

**IXYS**

**KEMET**  
CHARGED.

**VISHAY**

**FUJI**  
ELECTRIC

**TDK-EPC**

**ELECTRONICON**  
*always in charge*

**MITSUBISHI**  
**ELECTRIC**

Центральный офис: «ДИАЛ - Компонент»  
127411, г. Москва, Дмитровское шоссе, д.157, строение 12-1, Бизнес центр «Гефест»  
Тел./факсы: +7 (495) 777-03-27, 995-20-20, 739-55-33 E-mail: sales@dialcomponent.ru

Представительство в Санкт-Петербурге: «ДИАЛ-Нева»  
198095, Россия, Санкт-Петербург, Химический пер., д.1, Лит.АВ, оф.47.  
Тел./факсы: +7 (812) 600-17-55, 493-39-24 E-mail: spb@dialcomponent.ru

**Главный редактор**  
Павел Правосудов pavel@fsmedia.ru

**Зам. главного редактора**  
Анна Соснина a.sosnina@mtu-net.ru

**Выпускающий редактор**  
Елена Якименко elena.yakimenko@fsmedia.ru

**Технический консультант**  
Андрей Колпаков

**Новостной редактор**  
Наталья Новикова natalia.novikova@fsmedia.ru

**Литературный редактор**  
Екатерина Трофимова

**Дизайн и верстка**  
Дмитрий Никаноров dmitry.nikanorov@fsmedia.ru

**Отдел рекламы**  
Ольга Зайцева olga\_z@fsmedia.ru  
Ирина Миленина irina@fsmedia.ru

**Отдел подписки**  
Наталья Виноградова podpiska@fsmedia.ru

**Москва**  
105120, Москва,  
Нижняя Сыромятническая ул., 10, стр. 4, офис 218  
Тел./факс: (495) 987-3720

**Санкт-Петербург**  
197101, Санкт-Петербург,  
Петроградская наб., 34, лит. Б  
Тел. (812) 438-1538  
Факс (812) 346-0665  
E-mail: compitech@fsmedia.ru  
www.power-e.ru

**Республика Беларусь**  
«ПремьерЭлектрик»  
Минск, ул. Маяковского, 115, 7-й этаж  
Тел./факс: (10-37517) 297-3350, 297-3362  
E-mail: murom@premier-electric.com

**Подписной индекс**  
Каталог агентства «Роспечать» 20370  
Агентство KSS 27039  
Тел. в Киеве: (044) 270-6220, 270-6222

Подписано в печать 08.08.14  
Тираж 4000 экз.  
Свободная цена

Журнал «Силовая электроника» зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору в сфере связи  
и массовых коммуникаций. Свидетельство  
о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-34160 от 26 ноября 2008 года.

**Учредитель:** ЗАО «Медиа Группа Файнстрит»  
**Издатель, редакция:** ООО «Медиа КиТ»  
197101, г. Санкт-Петербург,  
Петроградская наб., 34Б  
Отпечатано в типографии ООО «Акцент Групп»,  
194044, Санкт-Петербург,  
Б. Сампсониевский пр., д. 60 лит. И

Редакция не несет ответственности за информацию,  
приведенную в рекламных материалах.  
Полное или частичное воспроизведение  
материалов допускается с разрешения  
ООО «Медиа КиТ».

Журнал включен в Российский индекс научного  
цитирования (РИНЦ).

На сайте Научной электронной библиотеки  
eLIBRARY.RU (www.elibrary.ru) доступны полные  
тексты статей. Статьи из номеров журнала  
текущего года предоставляются на платной основе.

# В номере:

## РЫНОК

**Валерий Мелешин**

Симпозиум по Smart Grids:  
настоящее и будущее глазами специалистов . . . . .6

## Силовая элементная база

**Хайнц-Ульрих Хаас (Heinz Ulrich Haas)**

**Перевод: Виктор Вертелкин**

Защита при коротком замыкании  
в гелиоэнергетических установках . . . . .10

**Питер Беккдаль (Peter Beckedahl),**

**Матиас Спанг (Matthias Sprang) Оливер Тамм (Oliver Tamm)**

**Перевод и комментарии: Андрей Колпаков**

Многослойная SKiN-технология:  
прорыв в «третье измерение» силовой электроники . . . . .12

**Юрий Петропавловский**

Новые IGBT-модули большой мощности Mitsubishi Electric  
и их интеграция с драйверами затворов  
компании Isahaya Electronics . . . . .19

**Томас Грассхоф (Thomas Grasshoff), Рейнгард Неллдорфер (Reinhard Helldörfer)**

**Перевод и комментарии: Андрей Колпаков**

SKiP-X — силовой интеллектуальный модуль XXI в. . . . .28

**Мишель Жиларди (Michel Ghilardi),**

**Марк Шеррер (Marc Schaerrer), Штефан Роллер (Stéphane Rollier)**

**Перевод: Владимир Рентюк**

Особенности измерения токов с классом точности R  
на железнодорожном транспорте . . . . .32

**Анатолий Коршунов**

Плавное регулирование емкости конденсаторов . . . . .36

**Константин Петросянц, Петр Козынок, Никита Рябов, Игорь Харитонов,**

Электротепловое проектирование «разумных»  
мощных микросхем с использованием системы Mentor Graphics . . .42

## Приводы

**Норик Петросян, Петуш Ширинян**

Контроллер микрошагового управления двухфазным  
шаговым двигателем с электрическим дроблением основного шага. . . .50

## Источники питания

**Олег Костылев, Елена Розенкова**

Правильное питание видеооборудования . . . . .56

**Юрий Карпиленко, Сергей Карлов**

Источник бесперебойного питания ИСТОК серии ИДП-3М. . . . .60

# Электротепловое проектирование «разумных» мощных микросхем

## с использованием системы Mentor Graphics

**В статье представлены методология, программное обеспечение и примеры электротеплового проектирования различных частей «разумных» мощных микросхем в рамках системы Mentor Graphics.**

**Константин Петросянц,**  
Д. Т. Н.

**Петр Козылко,**  
К. Т. Н.

**Никита Рябов,**  
К. Т. Н.

**Игорь Харитонов,**  
К. Т. Н.

eande@miem.edu.ru

### Введение

«Разумные» мощные интегральные схемы (ИС), гибридные схемы и модули являются перспективной компонентной базой для создания систем промышленной автоматизации, автомобильной электроники, систем авиа- и космического назначения, телекоммуникаций, преобразователей питания и др. Для этих схем характерны следующие особенности [1, 2]:

- совмещение на одном кристалле (корпусе) мощных силовых транзисторов и маломощных цифро-аналоговых схем обработки информации, управления, защиты силовых схем и др.;
- работа силовых транзисторов при высоких плотностях токов и мощности в пределах одной микросхемы и, как результат, при высоких рабочих температурах, влияющих на них самих и на остальные элементы ИС;
- растущие требования по линейности характеристик для аналоговых и по скорости обработки информации для цифровых блоков при увеличении рабочих температур микросхем.

Поскольку все параметры полупроводниковых приборов, включая надежность, сильно зависят от их температуры, то обеспечение правильной и надежной работы мощных ИС на этапе проектирования невозможно без оптимизации топологии мощных и управляющих элементов, их взаимного расположения, обеспечения правильной работы схем контроля температуры и защиты мощных выходных элементов.

В отличие от маломощных ИС, при проектировании «разумных» мощных ИС важное значение приобретает этап электротеплового проектирования [4], которое позволяет проанализировать влияние электрического режима работы элементов на их температуру с учетом топологических особенностей и теплоотвода корпуса и при этом оценить обратное влияние полученной температуры на электрические параметры и режим работы элементов.

Такое совмещенное моделирование дает возможность оптимизировать схемотехнические решения, топологии и режимы работы элементов на кристалле и их взаимное расположение для:

- уменьшения температур нагретых элементов;
  - уменьшения нежелательного взаимного влияния;
  - обеспечения правильной работы датчиков температуры силовых элементов.
- Соответственно, процесс электротеплового проектирования мощных ИС включает в себя решение следующих задач:
- расчеты температурных полей внутри мощных элементов ИС с учетом их нагрева;
  - расчеты температурных полей на кристалле силовой ИС в зависимости от топологических вариантов, конструкции корпуса, условий теплоотвода, мощности элемента, получение тепловых сопротивлений между компонентами ИС и их тепловых емкостей;
  - формирование библиотеки электротепловых (Spice) и логико-тепловых (VHDL-AMS) моделей элементов ИС по результатам измерений (или расчета) характеристик элементов, их тепловых сопротивлений и емкостей;
  - логико-тепловой расчет цифровых блоков ИС;
  - электротепловой расчет отдельных фрагментов (силовых элементов и аналоговых схем) и всей ИС с учетом взаимного влияния электрического и температурного режимов работы;
  - анализ электротеплового взаимодействия между элементами на кристалле, оптимизация взаимного расположения термозависимых компонентов;
  - определение оптимальной конструкции и расположения датчиков температуры мощных элементов.

К сожалению, в распространенных системах проектирования ИС, в частности Mentor Graphics, отсутствует возможность совместного электротеплового расчета ИС и их компонентов.

**Подсистема электротеплового проектирования мощных микросхем**

Для решения описанных выше задач в рамках системы проектирования ИС фирмы Mentor Graphics авторами были разработаны маршрут и подсистема электротеплового проектирования мощных микросхем [5]. Они прошли отработку в ходе совместных работ с рядом промышленных предприятий, таких как ООО «НПП Томилинский электронный завод», ОАО «НПП «Пульсар» и др.

Структура подсистемы представлена на рис. 1. Стандартное программное обеспечение (ПО) обозначено черными прямоугольниками, разработанное авторами — синими.

На структурной схеме показано взаимодействие между частями подсистемы. Используется следующее ПО:

- стандартное для приборно-технологического моделирования тепловых полей в структурах полупроводниковых приборов — Synopsys TCAD [6];
- для расчетов распределений температуры по кристаллу, тепловых режимов и тепловых параметров (тепловых сопротивлений и тепловых емкостей) компонентов на кристалле — «Перегрев-МС» (разработано авторами) [7];
- для генерации моделей компонентов для электротеплового схмотехнического анализа схемы — Eth Model Generator (разработано авторами) [8];
- стандартное для схмотехнического — Eldo, System Vision и смешанного аналого-цифрового анализа схем — Questa ADMS системы Mentor Graphics;
- для организации взаимодействия между программными пакетами для схмотехнического и теплового моделирования — ETH SimCoupler (разработано авторами) [9];
- для коррекции коэффициентов излучения исследуемых объектов IR DataProc (разработано авторами) [10].

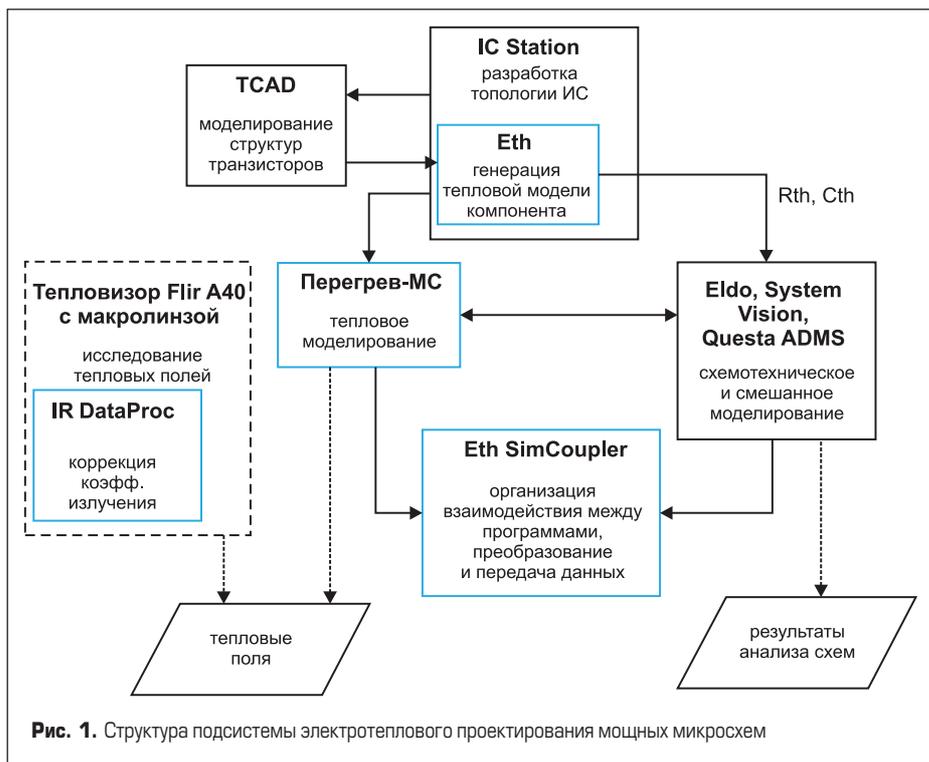


Рис. 1. Структура подсистемы электротеплового проектирования мощных микросхем

**Приборно-технологическое моделирование тепловых полей в структурах полупроводниковых приборов**

Известное ПО Synopsys TCAD [6, 11] используется для двух- или трехмерного численного моделирования электрических полей, токов и тепловых полей в структурах мощных элементов ИС. Данный вид расчета позволяет получить статические, динамические и тепловые характеристики компонента ИС (например, транзистора), по которым затем строится его электротепловая Spice-модель, используемая на этапе моделирования схемы. Важно отметить, что такое моделирование позволяет исследовать распределение температуры вну-

три полупроводникового прибора, которое нельзя получить другими способами.

На рис. 2 приведены смоделированные с помощью Synopsys TCAD часть сечения мощного ДМОП-транзистора (рис. 2а), входящего в состав мощной ИС, и распределение температуры в данном сечении (рис. 2б) для режимов работы транзистора: напряжение «сток-исток»  $V_{си} = 20$  В, плотность тока стока  $I_c = 2 \times 10^{-4}$  А/мкм. Видно, что максимальная температура (396,7 К) достигается в области стокового перехода транзистора. На рис. 2в приведены смоделированные выходные ВАХ данного транзистора с учетом (жирные линии) и без учета (тонкие линии) эффектов саморазогрева.

По полученным значениям максимальной температуры структуры транзистора в зави-

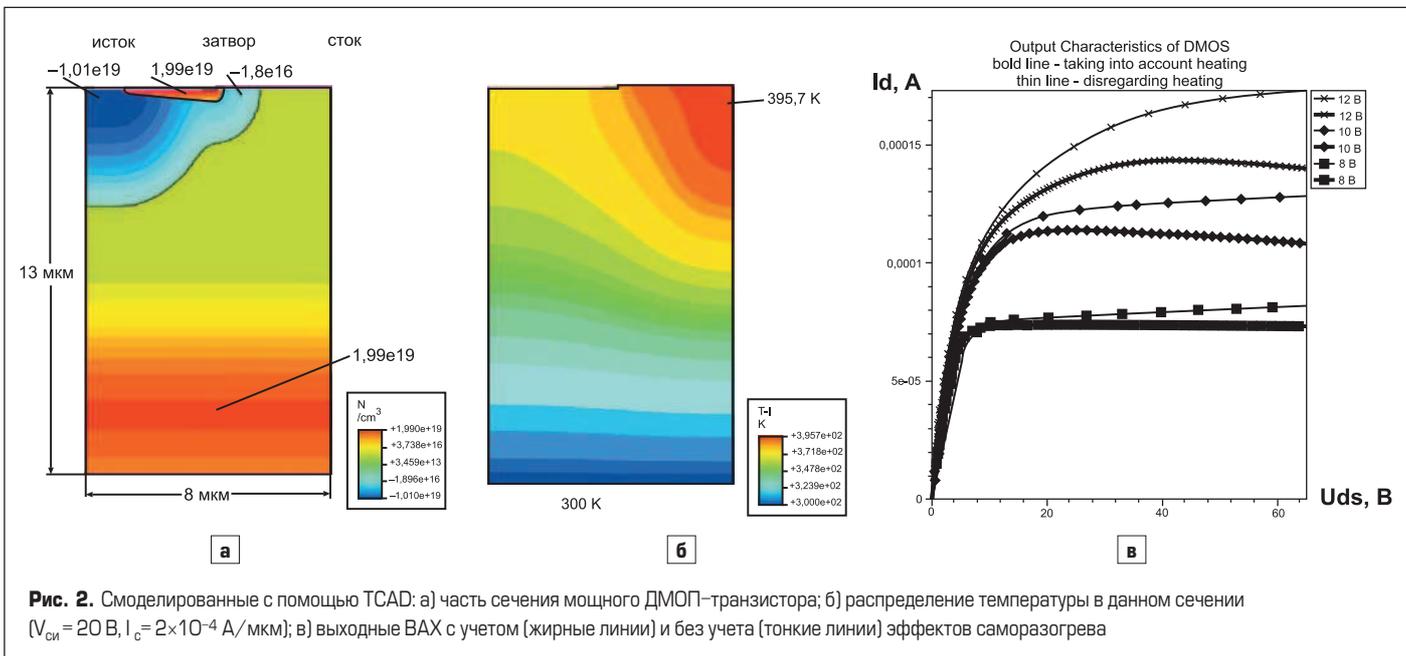
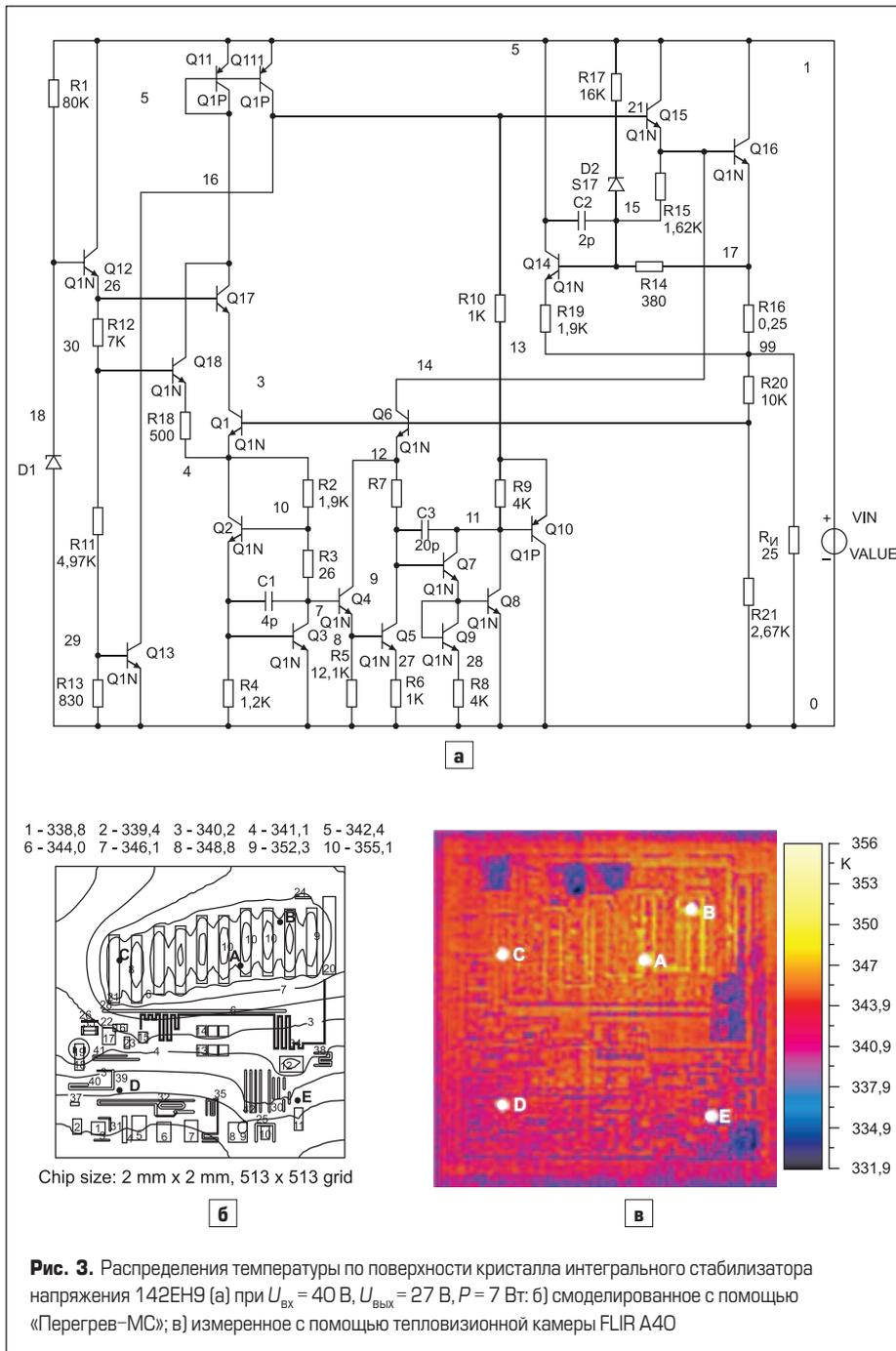


Рис. 2. Смоделированные с помощью TCAD: а) часть сечения мощного ДМОП-транзистора; б) распределение температуры в данном сечении ( $V_{си} = 20$  В,  $I_c = 2 \times 10^{-4}$  А/мкм); в) выходные ВАХ с учетом (жирные линии) и без учета (тонкие линии) эффектов саморазогрева



симости от его режимов работы, изменениям его характеристик с ростом температуры были определены параметры его электротепловой Spice-модели для этапа расчета всей схемы ИС.

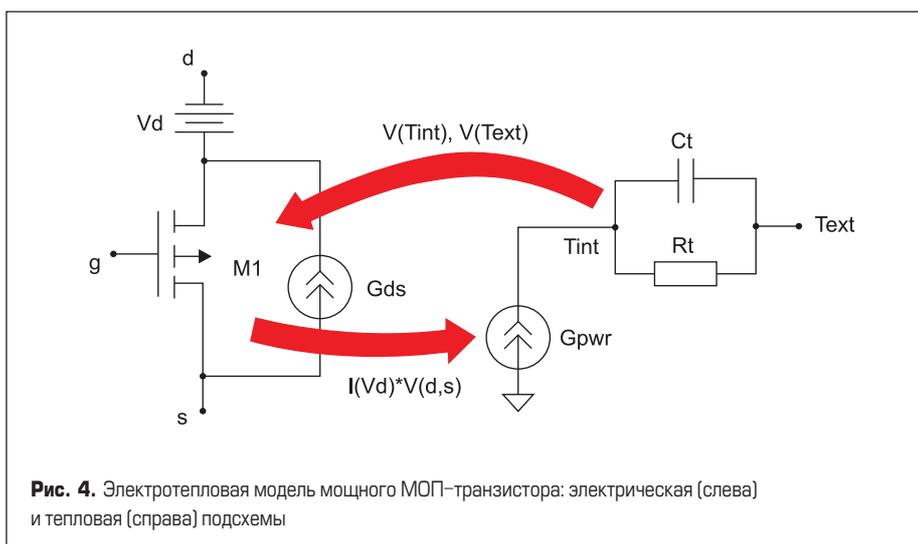
**Моделирование распределений температуры по кристаллу ИС, тепловых режимов и тепловых параметров компонентов на кристалле**

Разработанное авторами ПО «Перегрев-МС» используется для трехмерного расчета температурных полей в кристалле микросхемы с учетом конструкции корпуса микросхемы и теплоотвода. Результатом моделирования являются распределения температуры по поверхности кристалла, тепловые сопротивления между компонентами и окружающей средой и их тепловые емкости. Полученные значения тепловых параметров компонентов используются затем в пакете схемотехнического Spice-моделирования для проведения электротепловых расчетов ИС. В качестве примера на рис. 3 представлены смоделированное с помощью программы «Перегрев-МС» (рис. 3б) и измеренное с помощью тепловизионной камеры FLIR A40 (рис. 3в) распределения температуры по поверхности кристалла интегрального стабилизатора напряжения 142ЕН9 для типового режима работы:  $U_{\text{вх}} = 40 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вых}} = 27 \text{ В}$ ,  $P = 7 \text{ Вт}$ . Видно, что погрешность моделирования температуры не превышает 10%.

**Электротепловые Spice-модели компонентов мощных ИС**

Мощные транзисторы, используемые в выходных каскадах мощных ИС, работают при больших плотностях токов, больших напряжениях, больших рассеиваемых мощностях на единицу площади, что предъявляет специфические требования к их конструкциям и приводит к таким известным проблемам, как саморазогрев, тепловой пробой, сильная зависимость их параметров от температуры [12]. Это неизбежно приводит к изменению режимов их работы и должно учитываться на этапе схемотехнического Spice-моделирования. Вопросам рассмотрения моделей для мощных IGBT, биполярных и МОП-транзисторов посвящено достаточно много публикаций, но не все имеющиеся проблемы их моделирования решены. Особенно остро это чувствуется в отношении ИС отечественного производства, для которых их разработчики не предоставляют необходимые модели.

Авторами была разработана библиотека электротепловых Spice-моделей элементов мощных «разумных» ИС, учитывающих особенности их конструкций, и режимов работы [13]. Библиотека может использоваться не только с пакетами Eldo, System Vision (Mentor Graphics), но и с другими Spice-подобными симуляторами. Данные модели являются электротепловыми и позволяют учесть влияние эффектов саморазогрева на характеристики транзисторов. Пример такой модели для мощного МОП-транзистора приведен на рис. 4. Видно, что она состоит из электрической подсхемы (слева),



описывающей собственно транзистор с зависимостями параметров его модели от температуры транзистора, и тепловой подсхемы (справа), включающей тепловое сопротивление  $R_t$  до окружающей среды  $T_{ext}$  и тепловую емкость  $C_t$ . В тепловую подсхему передается мощность  $G_{pwr}$ , рассеиваемая на транзисторе (нижняя стрелка), а полученное из тепловой подсхемы значение температуры  $T_{int}$  передается обратно в модель транзистора ( $G_{ce}$ ), изменяя ее параметры (верхняя стрелка).

На рис. 5 приведены смоделированные с использованием электротепловой Spice-модели выходные ВАХ мощного МОП-транзистора мощной ИС с учетом и без учета эффектов саморазогрева. Наглядно видно уменьшение тока стока в области больших токов вследствие разогрева транзистора.

Значения собственных и взаимных тепловых сопротивлений и емкостей элементов ИС схемы получаются из программы «Перегрев-МС», используя результаты расчета температурных полей по площади кристалла ИС.

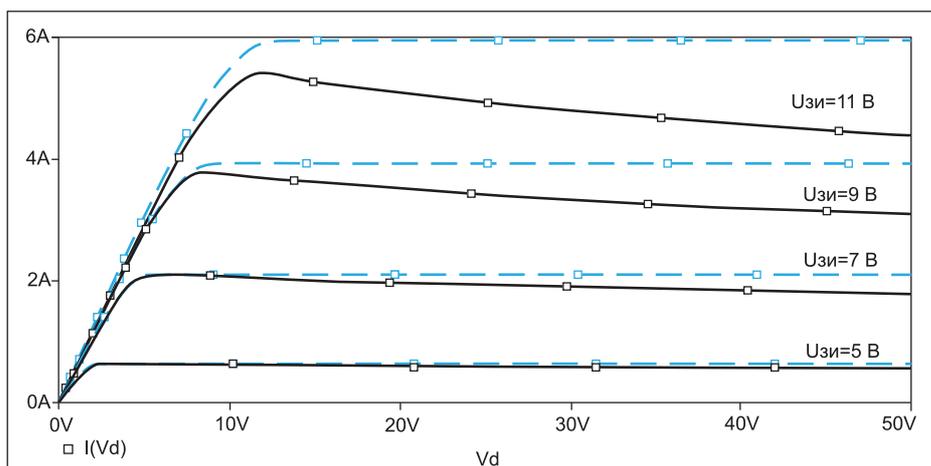
**Электротепловое моделирование аналоговых схем мощных ИС**

На рис. 6 приведены результаты расчета с помощью пакета «Перегрев-МС» распределения температуры по площади кристалла ИС мощного (4,5 Вт) операционного усилителя (ОУ), изготовленного по биполярной технологии. Видно, что наиболее сильно греются мощные выходные транзисторы Q45, Q46, Q52, Q53. Значения тепловых сопротивлений этих компонентов схемы до окружающей среды и между собой были рассчитаны с помощью пакета «Перегрев-МС» и переданы в пакет Eldo схемотехнического анализа для электротеплового моделирования схемы. В таблице 1 приведено сравнение значений токов, мощностей и температур мощных компонентов схемы, полученных с помощью обычного Spice-моделирования (без учета электротепловых эффектов) и с учетом результатов электротеплового Spice-моделирования. Сравнение результатов наглядно показывает, что, с учетом эффекта саморазогрева, токи, мощности и температуры мощных транзисторов оказываются существенно выше.

После разработки необходимых программ-конвертеров данная методика электротеплового расчета может быть реализована с использованием других пакетов Spice-моделирования схем.

**Логико-тепловое моделирование цифровой части мощных ИС**

Цифровая часть мощных ИС, являющаяся именно «разумной» составляющей мощного модуля, также нуждается в особом тепловом моделировании. Так как отдельные транзисторы, составляющие цифровой блок, являются маломощными, а количество этих транзисторов весьма велико даже в несложных схемах, то электротепловое моделирование на уровне транзисторов (описанное выше) становится



**Рис. 5.** Смоделированные с помощью электротепловой модели (рис. 4) выходные ВАХ мощного МОП-транзистора без учета (синий цвет) и с учетом эффектов саморазогрева (черный цвет)

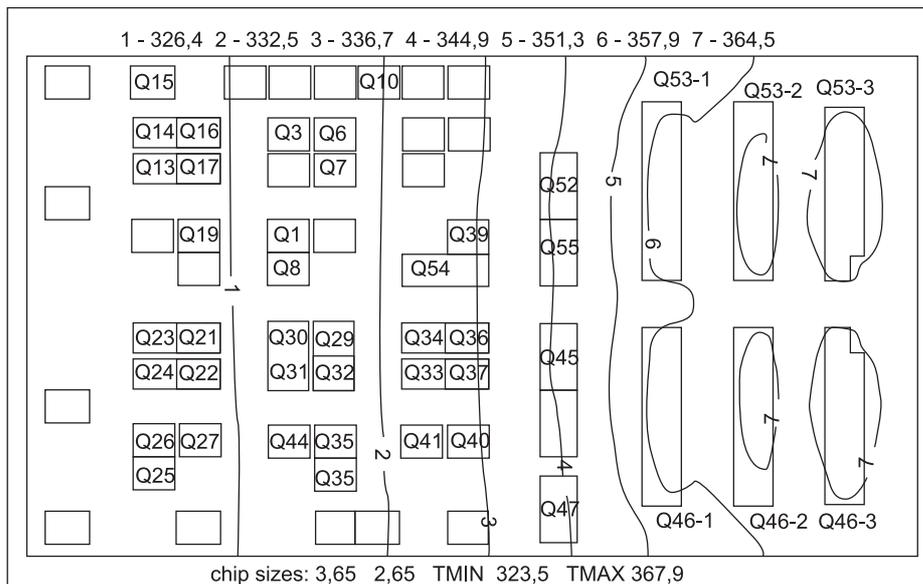
или мало полезным, или даже практически невозможным из-за возросшей сложности задачи. Поэтому для цифровых блоков применяется особый вид моделирования — логикотепловое [14]. В рассматриваемой подсистеме оно осуществляется с использованием известной среды смешанного (аналого-цифрового) моделирования Questa ADMS фирмы Mentor Graphics. Для каждого логического вентиля

строится тепловая подсхема (аналогичная той, что используется для мощных транзисторов, рис. 4). Для описания такой подсхемы на языке VHDL-AMS была разработана специальная библиотека логических элементов, имеющих дополнительные тепловые цепи.

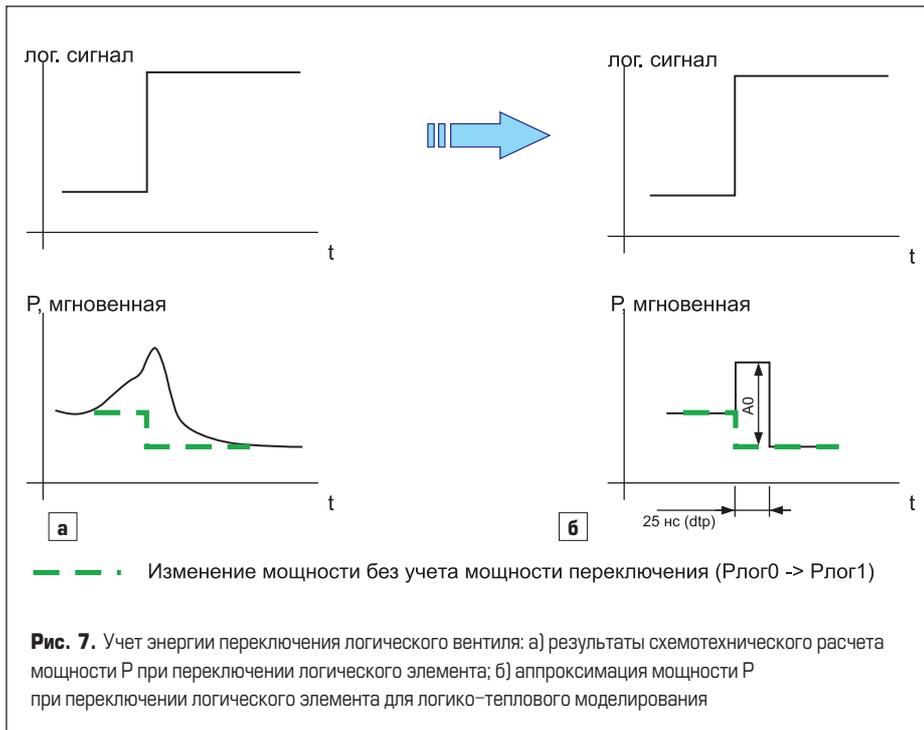
Тепловые сопротивления и емкости логических элементов (так же, как и для других частей мощных «разумных» схем) рассчитыва-

**Таблица 1.** Сравнение значений токов, мощностей и температур наиболее нагретых мощных компонентов схемы мощного ОУ, полученных с помощью обычного Spice-моделирования (без учета электротепловых эффектов) и с учетом результатов электротеплового Spice-моделирования

Транзистор	Обычное Spice-моделирование ( $R_n = 85 \text{ Ом}; T_{корп} = 300 \text{ К}$ )			Электротепловое Spice-моделирование ( $R_n = 85 \text{ Ом}; T_{корп} = 300 \text{ К}$ )		
	Ток коллектора, А	Мощность транзистора, Вт	Температура транзистора, К	Ток коллектора, А	Мощность транзистора, Вт	Температура транзистора, К
Q52	$6,5 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{-2}$	300	$1,62 \times 10^{-3}$	$4,21 \times 10^{-2}$	345
Q45	$6,4 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{-2}$		$1,66 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-2}$	347
Q53	$1,37 \times 10^{-2}$	0,274		0,145	1,75	369,3
Q46	$1,27 \times 10^{-2}$	0,254		0,148	1,8	370



**Рис. 6.** Смоделированное с помощью программы «Перегрев-МС» распределение температуры по поверхности кристалла мощного (4,5 Вт) ОУ



ются с помощью программы «Перегрев-МС» по информации о топологии элементов.

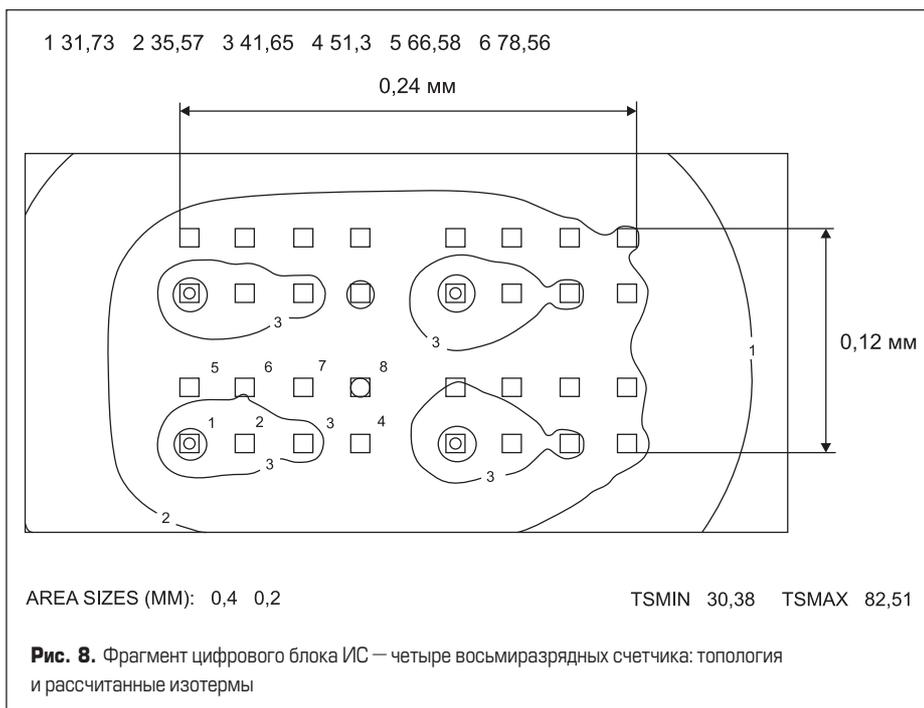
Для расчета мощности, выделяемой логическим вентиляем, он должен быть предварительно промоделирован в программе схемотехнического расчета, в результате чего определяются статические мощности элемента в состояниях логических «0» и «1» и энергия логического переключения (рис. 7).

Энергия логического переключения, определяемая как площадь под графиком мгновенной мощности (рис. 7а), учитывается при логико-тепловом моделировании в виде прямоугольного импульса длительностью *dtp* (задается пользователем, по умолчанию — 25 нс) (рис. 7б), высота (*A0*) этого импульса под-

бирается автоматически так, чтобы площади под кривой Р (рис. 7а) и под прямоугольным импульсом Р (рис. 7б) были равны.

При соблюдении этих условий температуры разных частей цифрового блока «разумной» ИС могут быть рассчитаны в зависимости от временной диаграммы работы блока, что дает возможность моделировать тепловые режимы непосредственно реализуемых аппаратурой алгоритмов, а не средние или худшие варианты.

Для примера на рис. 8 приведен фрагмент топологии цифровой ИС с рассчитанными изотермами. Фрагмент состоит из четырех восьмибитных счетчиков. Размеры каждого разряда счетчиков 10×10 мкм<sup>2</sup>, расстояние



**Таблица 2.** Рассчитанные с помощью пакета Questa-ADMS температуры разрядов первого счетчика

Номер разряда	Температура разряда, °С
1	74,01
2	57,72
3	48,32
4	43,53
5	41,82
6	41,13
7	41,35
8	40,58

между разрядами 20 мкм, между счетчиками — 40 мкм. Мощность каждого разряда при переключении 2,56 мВт, мощность в установившемся режиме равна нулю. Параметры входного импульса: период — 20 нс, длительность — 10 нс, длительность переднего и заднего фронтов *dtp* = 1 нс.

Номера и значения изотерм даны в верхней строке рис. 8, температура указана в °С. Расчет сделан с помощью программы «Перегрев-МС».

Результаты логико-теплового расчета (рис. 8, табл. 2) показали, что температура разряда счетчика определяется частотой переключения и местоположением данного разряда: младшие разряды (имеющие меньший номер в таблице 2) счетчиков переключаются чаще всего и поэтому сильно греются и греют окружающие области кристалла, тогда как старшие разряды переключаются редко, выделяют мало тепла и их температура определяется растеканием тепла от младших разрядов. Время установления стационарной температуры составило от 0,12 до 0,18 мс для различных разрядов.

### Электротепловое проектирование сенсоров — датчиков температуры мощных транзисторов

Преимущества «разумных» ИС реализуются во многом благодаря созданию схем температурной защиты силовых элементов схемы. Базовыми элементами таких схем являются датчики температуры, встраиваемые в конструкции мощных приборов.

В качестве сенсоров температуры могут использоваться как биполярные, так и МОП-транзисторы с малыми размерами. В практических схемах чаще применяются приборы на основе *p-n*-перехода (биполярные транзисторы, диоды). Они имеют существенные преимущества перед МОПТ по таким параметрам, как чувствительность и стабильность в широком диапазоне температур [17].

Наиболее часто встречаются сенсоры двух конфигураций: точечные (в виде окружностей или квадратов) и прямоугольники малого размера) и полосковые (в виде длинных узких полос). Для точечного сенсора в качестве основной выходной информационной электрической величины, определяющей температуру, используется напряжение *V<sub>БЭ</sub>* прямо-смещенного эмиттерного *p-n*-перехода.

Размещение сенсоров температуры в конструкциях мощных элементов ИС является,

как правило, нетривиальной задачей [17]. Желательно разместить  $p-n$ -переход — сенсор на локальном участке полупроводникового кристалла с максимальной температурой. Исходной информацией для размещения и анализа работы тепловых сенсоров служит распределение температуры в кристалле ИС, полученное методами, описанными выше. Полосковые сенсоры обеспечивают большую точность измерения температуры мощного элемента, чем точечные, но при их размещении и анализе работы необходимо учитывать ряд эффектов:

- падение напряжения на  $p-n$ -переходе от токов базы и эмиттера, протекающих вдоль полосы эмиттера — сенсора;
- возникновение дополнительной термо-ЭДС, обусловленной градиентом температуры вдоль полосы сенсора, так называемый эффект Зеебека [17].

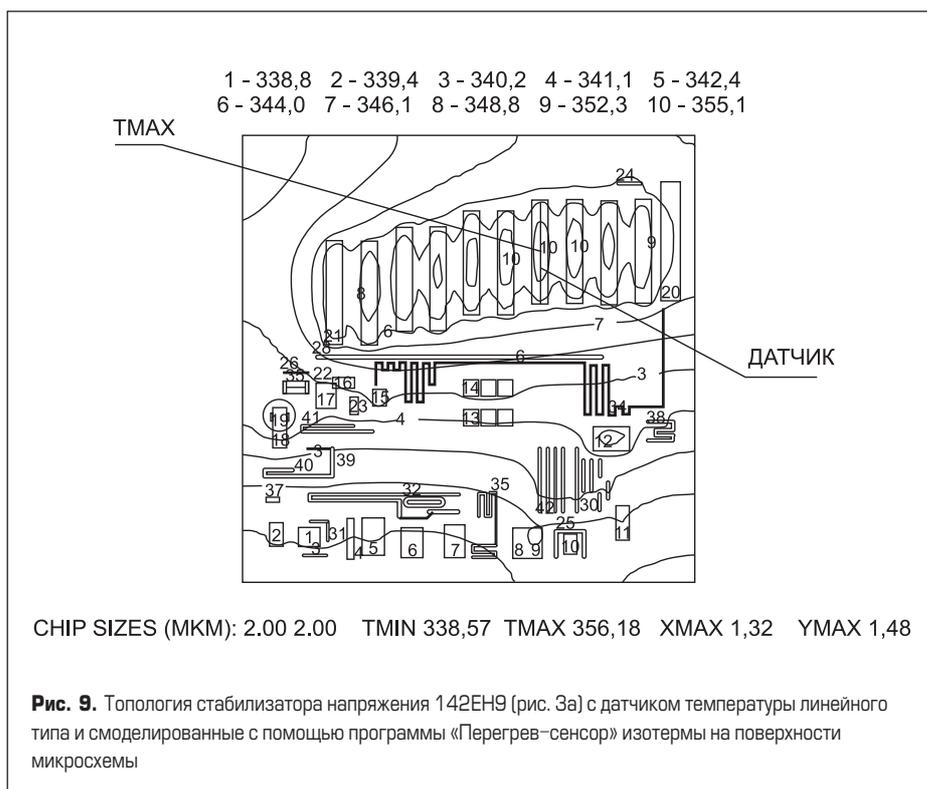
Для учета указанных эффектов необходимо использовать электротепловую модель участка ИС с сенсором температуры. Для решения этой задачи и целей оптимизации расположения сенсоров температуры с учетом указанных эффектов авторами была создана программа «Перегрев-сенсор» [18, 19].

На рис. 9 показана топология стабилизатора напряжения 142ЕН9, упоминавшегося выше, и рассчитанные изотермы на поверхности микросхемы. Полосковый датчик температуры размещен внутри мощного выходного транзистора. Результаты моделирования показывают, что максимальная температура достигается в середине датчика. Это подтверждает его правильное месторасположение. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами тепловизионного анализа данной микросхемы, приведенными на рис. 3в.

### Верификация результатов электротеплового и логико-теплого проектирования мощных ИС с помощью тепловизионной камеры

Экспериментальное исследование тепловых режимов и полей в ИС в рамках данной подсистемы производится с помощью тепловизионной камеры А-40 фирмы FLIR с использованием макролинзы с разрешением 17 мкм [21]. Известно, что для точного определения температуры объекта необходимо знание коэффициента излучения его поверхности. Фирменное ПО указанного тепловизора не позволяет определить коэффициент излучения каждой точки тепловизионного изображения.

Нами была разработана программа IgDataProc коррекции результатов тепловизионного исследования электронных компонентов за счет учета реальных коэффициентов излучения исследуемых объектов [10]. Вначале исследуемый объект (кристалл микросхемы) в выключенном состоянии фиксируется при заданной температуре за счет обдува воздухом с этой температурой. Снимается его тепло-



визионное изображение, программе указывается фиксированная температура, и программа рассчитывает свой коэффициент излучения для каждой точки изображения. Эта карта коэффициентов излучения сохраняется и используется на следующем этапе, когда исследуемый объект включается в свой рабочий режим и снимается его тепловизионное изображение. Поскольку для каждой точки изображения установлен реальный коэффициент излучения, то точность определения температуры различных областей объекта при этом существенно повышается. Пример тепловизионного изображения кристалла интегрального стабилизатора напряжения был приведен на рис. 3в.

При необходимости данная подсистема может быть реализована с использованием других систем топологического и схемотехнического проектирования за счет написания соответствующих вспомогательных программ-трансляторов.

### Заключение

Реализованная в рамках системы проектирования ИС фирмы Mentor Graphics подсистема электротеплового проектирования мощных «разумных» ИС имеет следующие возможности:

- расчет тепловых полей внутри компонентов ИС и по поверхности кристалла ИС, получение тепловых параметров (тепловых сопротивлений и емкостей) компонентов ИС;
- формирование электротепловых Spice-моделей мощных транзисторов и логико-тепловых VHDL-AMS моделей цифровых элементов, изготовленных по биполярной, МОП, ДМОП и др. технологиям, с учетом

их расположения на кристалле и конструкции кристалла;

- электротепловой расчет аналоговых фрагментов и мощных элементов схемы ИС;
- логико-тепловой расчет цифровой части схемы ИС;
- тепловой расчет всей ИС;
- верификация результатов проектирования за счет использования средств тепловизионного анализа.

Такой электротепловой расчет мощных ИС позволяет повысить качество их проектирования, дает возможность оптимизировать схемотехнические решения, топологии и режимы работы элементов на кристалле и их взаимное расположение.

### Литература

1. Pribyl W. Integrated Smart Power Circuits: Technology, Design and Application // Proc. of the 22 European IEEE Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC '96). 1996.
2. Murari B., Bertontti F. F., Vignola G.A. Smart Power ICs // Springer. 2002.
3. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: от настоящего к будущему // Силовая электроника. 2009. № 4.
4. März M., Nance P. Thermal Modeling of Power-electronic Systems. Infineon Technologies. Application Note.
5. Петросянц К. О., Рябов Н. И., Харитонов И. А., Козынько П. А. Реализация процесса электротеплового моделирования в САПР БИС MENTOR GRAPHICS // Труды всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС-2008)». М.: ИПИМ РАН. 2008.

6. [www.synopsys.com/Tools/TCAD/DeviceSimulation/Pages/default.aspx](http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/DeviceSimulation/Pages/default.aspx)
7. Петросянц К. О., Рябов Н. И. Программа для ЭВМ «Перегрев МС». Свидетельство № 2007613306 от 6.08.2007 об официальной регистрации программы для ЭВМ.
8. Петросянц К. О., Козынько П. А. Программа для ЭВМ «ETh Model Generator». Свидетельство № 2008615887 от 9.12.2008 об официальной регистрации программы для ЭВМ.
9. Петросянц К. О., Рябов Н. И., Козынько П. А., Батраков Ю. Ю. Программа для ЭВМ Eth SimCoupler. Свидетельство № 2008615886 от 9.12.2008 об официальной регистрации программы для ЭВМ.
10. Харитонов И. А., Бурьгин А. А. Программа для ЭВМ IR DataProc. Свидетельство № 2008615885 от 9.12.2008 об официальной регистрации программы для ЭВМ.
11. Wong H., Braga N., Tian Sh., Borges R. Simulations enhance the development of power devices. Angel Business Communications. 2011. [www.compoundsemiconductor.net/article/-Simulations-enhance-the-development-of-power-devices.html](http://www.compoundsemiconductor.net/article/-Simulations-enhance-the-development-of-power-devices.html)
12. Laprade A., Pearson S., Benczkowski S., Dolny G., Wheatley F. A New PSpice Electro-Thermal Subcircuit For Power MOSFETs. Fairchild Semiconductor Corporation. Application Note 7534. 2004.
13. Kharitonov I. A. Compact Power BJT and MOSFET models parameter extraction with account for thermal effects // Proc. of the 9-th IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS – 2011). Sevastopol, Ukraine. 2011.
14. Szekely V., Poppe A., Pahi A., Csendes A., Hajas G., Rencz M. Electro-Thermal and Logi-Thermal Simulation of VLSI Designs // IEEE transactions on vlsi systems. V. 5. № 3. 1997.
15. Nady G., Horvarth G., Poppe A. Consideration of Thermal Effects in Logic Simulation. EDA Publishing. THERMINIC. 2008.
16. Petrosyants K. O., Rjabov N. I. Logi-Thermal Analysis of Digital Circuits Using Mixed-Signal Simulator Questa ADMS // Proc. of the 10-th IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS – 2012). Kharkov, Ukraine. 2012.
17. Widlar R. J., Yamatake M. Dynamic Safe-Area Protection for Power Transistors Employs Peak-Temperature Limiting // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1987. V. SC-22. № 1.
18. Петросянц К. О., Рябов Н. И. Программа для ЭВМ «Перегрев-сенсор». Свидетельство № 2012611449 от 07.02.2012 о государственной регистрации программы для ЭВМ.
19. Petrosyants K., Rjabov N. Temperature Sensors Modeling for Smart Power IC // Proc. of 27-th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose, USA. 2011.
20. Жильбер Госсорг. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М: Издательство «МИР». 1988.
21. [www.flir.com](http://www.flir.com)
22. Petrosyants K., Kharitonov I. A., Kozynko P. A., Popov A. Electronic components thermal regimes investigation by IR thermography // Proc. of the 12-th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications. Torino: Politecnico di Torino. 2013.

## Мощные AC/DC-источники питания серии RST-5000 от Mean Well



Компания Mean Well продолжает расширение линейки мощных источников питания для промышленного применения и в дополнение к существующим сериям источников питания 1000, 1500, 2000, 2400 и 3000 Вт представляет новую серию мощностью 5000 Вт — RST-5000.

Источники питания обладают входным напряжением 196–305 В (3 фазы, 3 провода/«треугольник») или 340–530 В (3 фазы, 4 провода/«звезда»). Модели источников питания данной серии имеют два варианта выходных напряжений, являющихся наиболее популярными в промышленных приложениях, — 24 и 48 В.

В источниках питания серии RST-5000 предусмотрена возможность регулировки выходного напряжения и тока с помощью внешнего управляющего сигнала:

- регулировка выходного напряжения: диапазон 20–120% от номинального значения, управляющий сигнал 1–6 В постоянного напряжения;

- регулировка выходного тока: диапазон 20–100% от номинального значения, управляющий сигнал 1–5 В постоянного напряжения.

Данная возможность позволяет в значительной степени расширить область использования новых источников питания.

Источники серии RST-5000 оснащены встроенным активным корректором мощности. Кроме того, в данных источниках применена новая схемотехника, что позволяет получить КПД до 91%. Высокий КПД обеспечивает полную мощность при температурах окружающей среды до 50 °С с применением встроенного вентилятора.

Серия RST-5000 снабжена функцией параллельного подключения до трех источников питания. Таким образом, пользователь получает суммарную мощность до 15 000 Вт.

Предлагается (на выбор) два типа защиты источников питания от перегрузки:

- режим токоограничения;
- токоограничение с задержкой отключения пять секунд.

Данная возможность позволяет источникам питания эффективно работать с различными типами нагрузок (например, индуктивными, емкостными, для зарядки аккумуляторных батарей).

Основные области применения источников питания: автоматизированное оборудование, промышленные средства управления, лазерная графика, системы телекоммуникаций.

Технические характеристики:

- входное напряжение 196–305 В (3 фазы, 3 провода/«треугольник») или 340–530 В (3 фазы, 4 провода/«звезда»);
- встроенный активный корректор мощности;
- КПД до 91%;
- регулировка выходного напряжения: диапазон 20–120% от номинального значения, управляющий сигнал 1–6 В постоянного напряжения;
- регулировка выходного тока: диапазон 20–100% от номинального значения, управляющий сигнал 1–5 В постоянного напряжения;
- возможность параллельного подключения;
- охлаждение с помощью встроенного вентилятора с функцией дистанционного управления;
- функция компенсации падения напряжения на длине провода;
- дистанционное включение/выключение;
- дополнительный выход питания (12 В; 0,1 А);
- предупреждающие сигналы: ошибка по входному напряжению, неисправность вентилятора, наличие выходного напряжения;
- защита от короткого замыкания, перенапряжения, перегрева, перегрузки (режим токоограничения или токоограничение с задержкой отключения пять секунд);
- сертификаты: UL/CUL/TUV/CB/CE;
- размеры (Д×Ш×В): 480×211×83,5 мм.

[www.aviton.spb.ru](http://www.aviton.spb.ru)