

Рисунок 6 – Графики зависимостей температур печатных узлов от времени при нестационарном тепловом режиме

**Анализ результатов.** Как видно из результатов моделирования наиболее «трудными» участками рассматриваемого блока являются печатные узлы ПУ1, ПУ2, ПУ3 и ПУ4 (особенно ПУ4, температура которого достигает  $89\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Однако их температуры не достигают критических значений. Поэтому заданная конструкция блока является приемлемой с точки зрения тепловых процессов. Полученные в подсистеме АСОНИКА-Т температуры узлов МТП блока будут использоваться для дальнейшего моделирования печатных узлов и задания граничных условий в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

**Выводы.** По итогам моделирования блока были сделаны следующие выводы:

Система АСОНИКА позволяет провести на предварительных этапах проектирования моделирование блоков на тепловые воздействия при стационарном и нестационарном тепловых режимах;

Моделирование позволило выявить сложные участки блока;

Конструкция блока является приемлемой с точки зрения тепловых процессов;

Полученные результаты можно применять при дальнейшем моделировании печатных узлов в подсистеме АСОНИКА-ТМ.

#### 4.6. Математические модели и надежность радиоэлектронных средств при тепловых воздействиях

Надежность создаваемой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), которая определяет ее конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынке, в значительной мере зависит от эффективности и качества проектирования. Постоянное усложнение РЭА, рост предъявляемых к ней требований и сокращение сроков проектирования обуславливает необходимость широкого использования методов комплексного математического моделирования физических процессов, протекающих в аппаратуре. Лидером данного направления является автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры - АСОНИКА. Она является единым средством, позволяющим сделать полный расчет показателей надежности РЭА.

Надёжность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Количественно, надёжность оборудования есть величина, обратная интенсивности отказов на заданном интервале времени. Показатели надёжности количественно характеризуют, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надёжность. Показатели бывают единичные и комплексные. Единичные показатели: безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости. Комплексные показатели надёжности: например, коэффициент готовности и прочее.

Показатели: безотказности: вероятность безотказной работы  $P(t)$ ; средняя наработка до отказа  $T_{ср}$ ; средняя наработка на отказ  $T_o$ ; гамма-процентная наработка до отказа  $T_\gamma$ ; интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ; параметр потока отказов  $\omega(t)$ ; средняя доля безотказной наработки  $I(t)$ ; плотность распределения времени безотказной работы  $f(t)$ ; показатели: безотказности, долговечности например, средний ресурс и пр.

За базовую модель зависимости одного из основных показателей надёжности – интенсивности отказов от температуры и принимается уравнение шведского химика Сванте Аррениуса (Arrhenius equation). Оно приближенно описывает зависимость константы скорости химической реакции  $k$  от температуры многих медленных процессов разрушения и отказы, в том числе ионный дрейф, диффузию примесей, образование интерметаллических соединений, ползучесть, кристаллографические микроперестроения конструкционных материалов.

$$k = A e^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)},$$

где,  $A$  - фактор частоты (для бимолекулярных (двухкомпонентных) реакций  $A \approx 10^{11}$ ), характеризует частоту столкновений реагирующих молекул,  $R=8.31441$  - универсальная газовая постоянная,  $E_A$  – энергия активации,  $T$  - температура, в градусах Кельвина,  $K$ .

Фактор частоты  $A$  слабо зависит от температуры  $A = const \sqrt{T}$ , изменение температуры от 200 °С до 300 °С приводит к изменению частоты столкновений на 10 % и обычно не учитывается. Энергия активации - это минимальное количество энергии, которое требуется сообщить системе (в химии выражается в джоулях на моль), чтобы произошла реакция. Энергия активации для некоторых радиоэлементов укладывается в диапазон от 0.1 до 0.7 электронвольт (9600...67500 Дж/моль) и приведена в следующей таблице.

Таблица 1.

Энергия активации радиоэлементов

Тип радиоэлемента	Энергия активации	
	эВ	Дж/моль
ИС биполярные, цифровые	0.4	38600
МОП, цифровые	0.7	67500
Транзистор	0.4	38600
Диоды	0.15	14500
Стабилитроны	0.12	11600
Конденсаторы: - электролитические	0.17	16400
-не электролитические	0.25	24100
Резисторы :- углеродистые	0.36	34700
- пленочные	0.12	11600
- проволочные	0.1	9600

При необходимости энергия активации определяется на основе идентификации. Берутся две выборки изделия, проработавшие заданное время при температуре  $T_1$  и  $T_2$ . Полученные интенсивности отказов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  позволяют идентифицировать энергию активации, используя математическую модель вида:

$$Ea = 8,617 \times 10^{-5} \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \text{ эВ}$$

Для первого приближения оценки зависимости интенсивности отказов от температуры можно использовать правило Вант-Гоффа, которое гласит, что повышение температуры на  $10^\circ\text{C}$  приводит к увеличению скорости реакции от 2 до 4 раз:  $\frac{k_2}{k_1} = \gamma^{\left(\frac{T_2 - T_1}{10}\right)}$

где,  $k_1, k_2$  – скорости реакций при температурах  $T_1$  и  $T_2$ ,  $\gamma$  – температурный коэффициент реакции

Подставив в это уравнение выражения для скоростей реакции из уравнения Аррениуса, проведя элементарные преобразования и прологарифмировав, получим выражения для энергии активации  $Ea = R \ln(\gamma) (T(T + 10))/10 = 0,83 \ln(\gamma) T(T + 10)$ , которое отобразим графически для  $\gamma = 2$  и  $\gamma = 4$ .

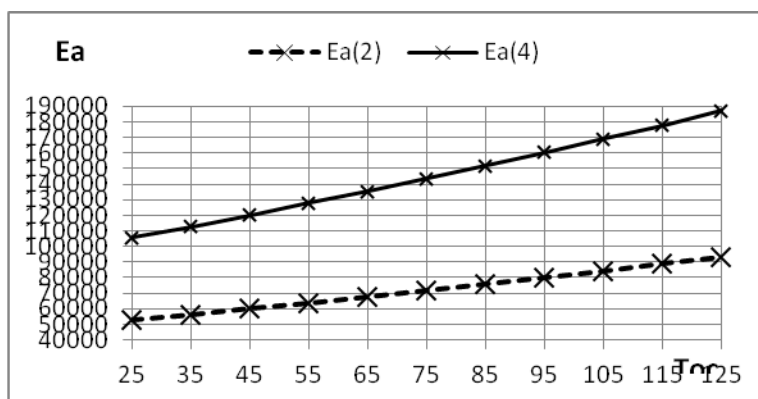


Рисунок 1 – Зависимость граничной энергии активации Ea для  $\gamma = 2$  и  $\gamma = 4$

Очевидно (см. предыдущую таблицу), для большинства реальных радиоэлементов энергия активации ниже 50000 Дж/моль и увеличение скорости реакции меньше 2. Поэтому для ЭРИ, по правилу Вант-Гоффа, считают  $\gamma = 2$ , да и это значения часто является завышенным. Поэтому для более точного расчета скорости реакции лучше использовать уравнение Аррениуса. Оценим по нему скорость реакции для двух температур 25 и 50 °C.

Очевидно, что скорость реакции  $k$  падает с повышением энергии активации и растет с повышением температуры. Причем чем выше энергия активации, тем сильнее температурная зависимость скорости реакции.

Построим графики относительной скорости реакции (отнесенной к  $25^\circ\text{C}$ ) для резисторов ( $Ea = 0.1$  эВ), биполярных транзисторов и ИС ( $Ea = 0.4$  эВ), МОП ИС ( $Ea = 0.7$  эВ).

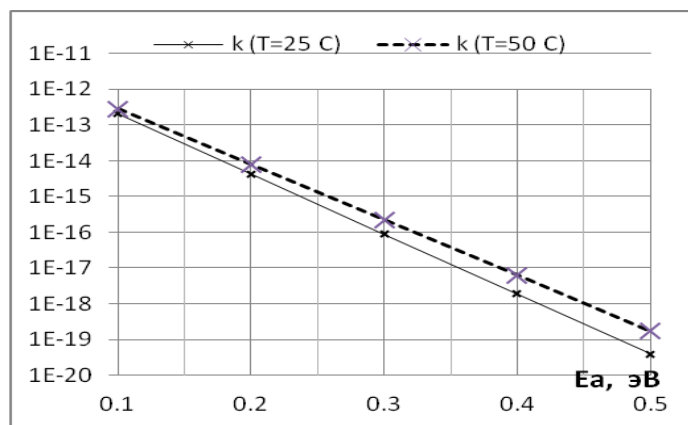


Рисунок 2 – Зависимость скорости химической реакции  $k$  (логарифмическая шкала) от энергии активации при температурах 25 и 50 °C

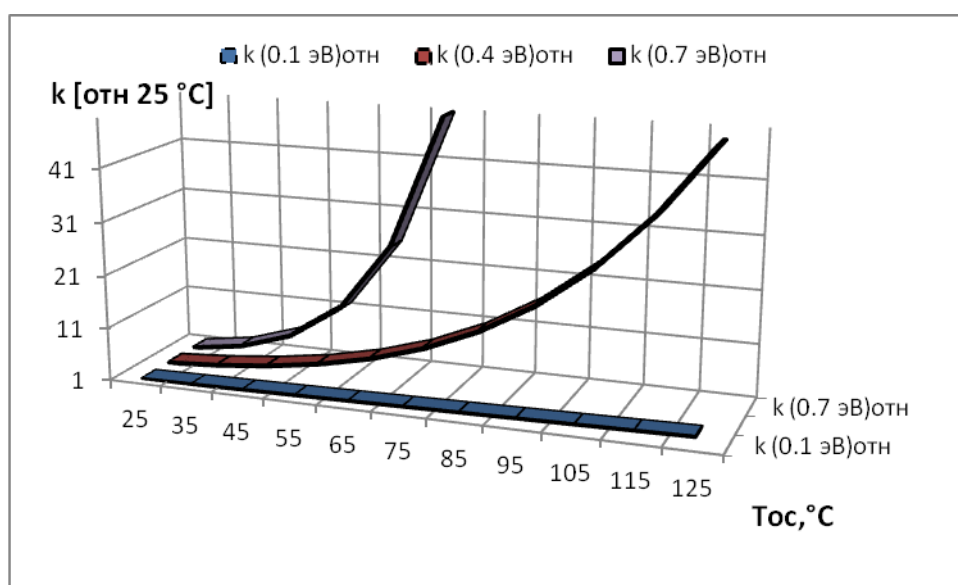


Рисунок 3 – Зависимость относительной скорости химической реакции  $k$  (приведенной к 25 °C) от температуры для энергии активации 0.1, 0.4, 0.7 эВ

Чем выше энергия активации, тем сильнее зависимость скорости реакции от температуры.

Все вышеприведенное относится к теоретическим оценкам скорости химической реакции по формуле Аррениуса. На практике используют экспериментальные данные, сведенные в справочники по надежности. Согласно справочнику для отечественных изделий [ математическая модель (ММ) расчета интенсивность отказов электрорадиоизделий (ИО ЭРИ) имеет следующий вид:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda'_0 \times K_p \times \prod_{i=1}^n K_i,$$

где:  $\lambda'_0$  - исходная (т.н. базовая) интенсивность отказа (1/час) типа (группы) ЭРИ приведенная к условиям номинальная электрическая нагрузка при температуре окружающей среды  $t_{\text{окр}}=25$  °C;  $K_i$  - коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной ИО в зависимости от различных факторов, в том числе и температуру;  $n$  - число учитываемых факторов.

Коэффициент режима  $K_p$  ( $K_t$ ,  $K_{c.m.}$ ) – определяется величиной электрической нагрузки и (или) температуры окружающей среды (корпуса изделия) и служит для пересчета исходной интенсивности отказов к фактическим режимам применения ЭРИ в аппаратуре. Эти величины приводятся в справочнике в аналитическом виде. Интересно, но эти зависимости даются только для ЭРИ, а для соединений – пайки, металлизации сквозных отверстий и прочего таких зависимостей не дается. В дальнейшем рассмотрим зависимости  $K_p$  от температуры, как определяющие зависимость интенсивности отказов от температуры для ЭРИ.

Все ЭРИ можно разбить, с точки зрения тепловыделения, на две категории: активные (транзисторы, диоды, ИС и пр.) и пассивные (не имеющие внутренних источников тепловыделения) конденсаторы и пр. Температура пассивных в основном определяется температурой окружающей среды и нагревом от других активных элементов. Активные ЭРИ имеют перегрев от собственного тепловыделения относительно окружающей среды и для еще актуальней проведение моделирование теплового режима. Основным тепловым ограничением для пассивных ЭРИ являются  $T_{oc}$  - максимально допустимая температура окружающей среды, для активных возможны варианты: или  $T_{oc}$ , или  $T_k$  - корпуса или  $T_{пер.макс.}$  - температура р-п перехода (активной зоны)

Оценим изменение температуро зависимого  $K_p$  типичных видов ЭРИ: активных - ИС, транзистор, резистор и пассивных - конденсатор. Расчетные формулы для коэффициента режима возьмем из справочника по надежности ЭРИ и сведем их в таблицу.

Таблица 2.

Математические модели коэффициентов режима  $K_p$  для типичных ЭРИ

Математическая модель	Описание переменных ( $t$ – температура окружающей среды, °C)
Интегральная микросхема (ИС)	
$K_{D.} = Ae^{B(t+273)}$	где А и В – постоянные табулированные коэффициенты модели, зависящие от типа ИС
Конденсаторы керамические, тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	
$K_{D.} = A \left[ \left( \frac{U / U_t}{N_s} \right)^H + 1 \right] e^{B \left( \frac{t+273}{N_t} \right)^G}$	где: А, В, $N_t$ , G, H, $N_s$ – постоянные коэффициенты модели; U – рабочее напряжение, В; $U_n$ – номинальное напряжение, В.
Резистор постоянный непроволочный: металлодиэлектрический, металлизированный	
$K_{D.} = Ae^{B \left( \frac{t+273}{N_t} \right)^G} e^{\left[ \frac{P / P_t}{N_s} \left( \frac{t+273}{273} \right)^J \right]^H}$	где: А, В, $N_t$ , G, $N_s$ , J, H – постоянные коэффициенты модели; P – рабочая мощность рассеяния резисторов, Вт; $P_n$ – номинальная мощность рассеяния резисторов, Вт.
Транзистор среднемощный кремниевый 2Т504А	

$K_p = A \cdot e^{\left( \frac{Nt}{273+t+(175-ti \text{ äđ.ì àèñ.})+\square t \cdot \hat{E}y\ddot{e}} \left( \frac{ti \text{ äđ.ì àèñ}-tñí \text{ è} \alpha}{150} \right) \right)} \times$ $\cdot e^{\left( \frac{273+t+(175-ti \text{ äđ.ì àèñ.})+\square t \cdot \hat{E}y\ddot{e}}{T_i} \cdot \left( \frac{ti \text{ äđ.ì àèñ}-tñí \text{ è} \alpha}{150} \right) \right)^L}$	где $A, Nt, T_m, L, \Delta t$ – табличные постоянные модели
СВЧ транзистор на основе AsGa	
$K_{\delta} = A \cdot e^{\left( \frac{Nt}{273+t+\square t + \hat{E}y\ddot{e}} \right)}$	См. выше

А теперь построим графики для соответствующих ЭРИ (рис 4.).

Таким образом, при изменении температуры окружающей среды на 10 градусов от 25 до 35 градусов интенсивность отказов конденсаторов возросла на 42 % для обоих коэффициентов нагрузки (КН=0.1 и для КН=0.5). Для резисторов ИО возросла на 5 % для КН=0.1 и 8 % для КН=0.8.

Рассмотрим зависимости  $K_p$  от температуры окружающей среды для логических микросхем разной степени сложности: 10-100 элементов ( $A=20^{-3}$  и  $B=20.7^{-3}$ ), и 1000-5000 ( $A=16^{-3}$  и  $B=20.7^{-3}$ ) элементов.

Теперь приведем результаты расчета, представленные выше в виде графиков в табличном виде. В столбце Кст10(норм) и Кст1000(норм) приведены значения Кст10 и Кст1000 нормированные к температуре 25 °С, т.е для этой температуры Кст10(норм) = Кст1000(норм) = 1.0.

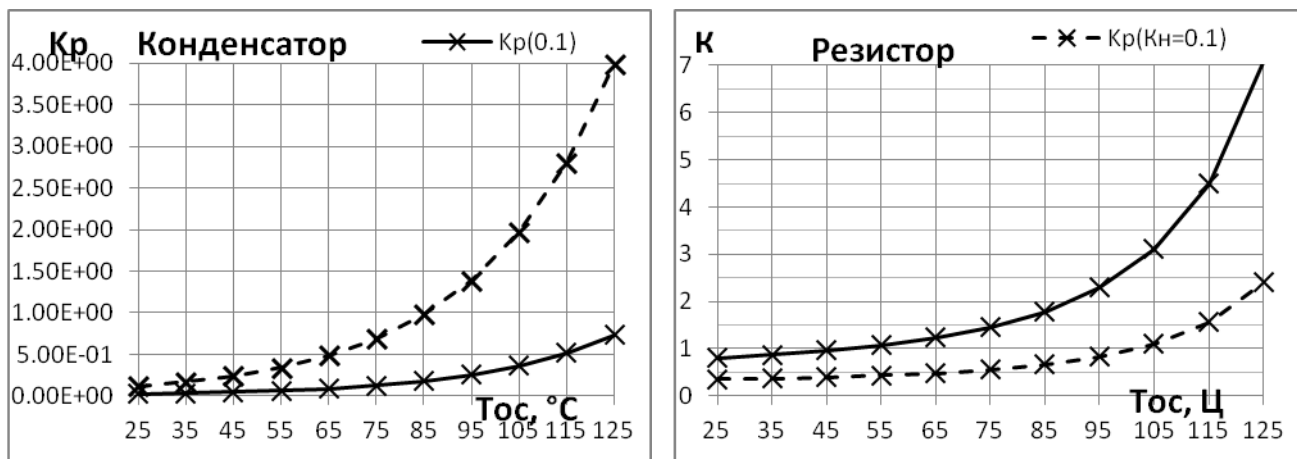


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента режима  $K_p$  от  $T_{ос}$  для конденсаторов и резисторов при коэффициенте нагрузки для конденсаторов КН= 0.1 и 0.5, и для резисторов КН=0.1 и 0.8

Таким образом, при изменении температуры окружающей среды от 25 до 35 градусов интенсивность отказов возросла на 23 % для обоих типов микросхем.

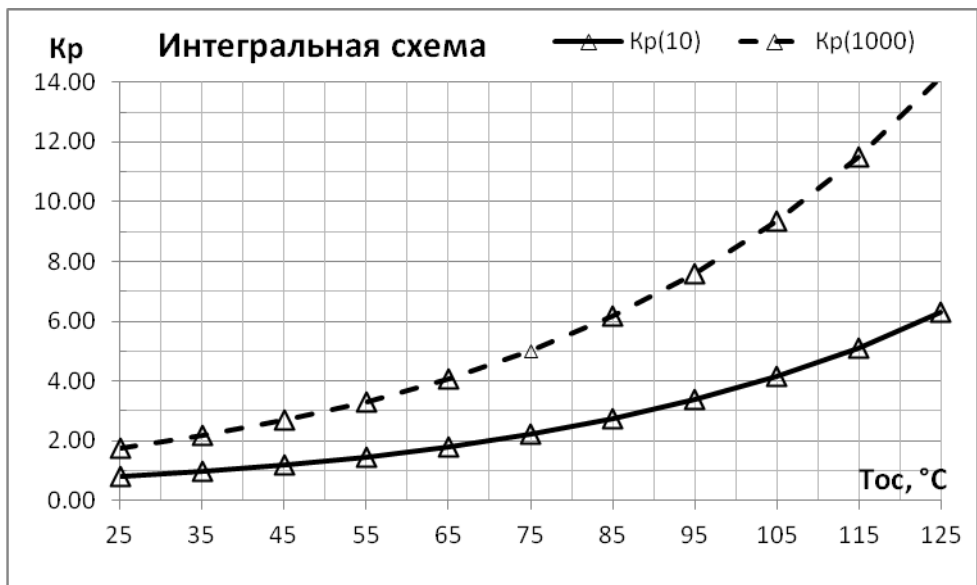


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента режима Кр от температуры окружающей среды для интегральных микросхем разной степени сложности

Транзистор среднемощный кремниевый 2Т504А . \*t – температура окружающей среды (для отдельных приборов в соответствии с ТУ берется температура корпуса); Кэл – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой при температуре, равной tсниж.; tсниж. – максимальная температура окружающей среды, для которой при 100% электрической нагрузке температура перехода не превышает максимально допустимую tпер. макс.

Таблица 3.

Зависимость коэффициента режима Кст и Кст нормализованного к 25 градусам от температуры окружающей среды для ИС разной степени сложности (для 10 элементов и для 1000 элементов).

Тос	Кст10	Кст1000	Кст10(норм)	Кст1000(норм)
25	0.78714	1.77106	1.00	1.00
35	0.96913	2.18055	1.23	1.23
45	1.19321	2.68473	1.52	1.52
55	1.46910	3.30547	1.87	1.87
65	1.80877	4.06974	2.30	2.30
75	2.22698	5.01071	2.83	2.83
85	2.74189	6.16926	3.48	3.48
95	3.37585	7.59567	4.29	4.29
105	4.15640	9.35189	5.28	5.28
115	5.11741	11.51417	6.50	6.50
125	6.30062	14.17640	8.00	8.00

Если температура окружающей среды превысит значение t сниж., электрическая нагрузка на прибор должна быть снижена, т.к. в противном случае температура перехода превышает максимально допустимую.

Таким образом, при изменении температуры окружающей среды от 25 до 35 градусов интенсивность отказов возросла на 12 % для КН=0.1 и 16 % для КН=0.6. Т.е. для теплонагруженного элемента зависимость надежности от температуры немного выше.

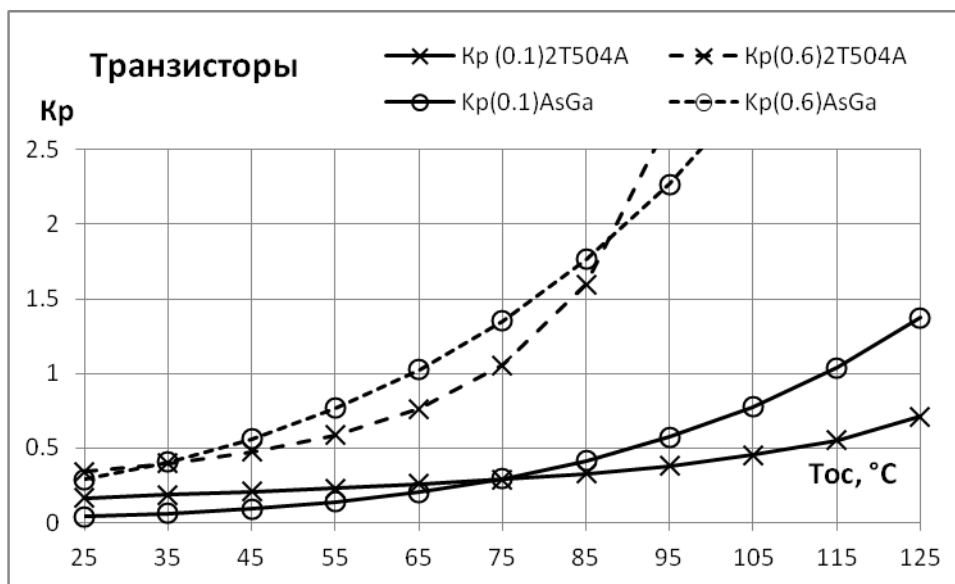


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента режима Кр от температуры окружающей среды для 2Т504А и AsGa СВЧ транзисторов при коэффициенте нагрузки КН= 0.1 и КН= 0.6

Очевидно для транзистора 2Т504А при коэффициенте нагрузки 0.6 температуре окружающей среды более 85 °С является недопустимой и для работе необходимо снизить коэффициент нагрузки.

Для СВЧ транзистора изменение температуры окружающей среды от 25 до 35 градусов Кр на 58 % для КН=0.1 и 43 % для КН=0.5. Т.е. для теплонагруженного элемента зависимость надежности от температуры немного ниже.

Для СВЧ транзистора при КН=0.1 максимальная температура окружающей среды 115 °С, для КН=0.5 максимальная температура окружающей среды 75 °С.

Таблица.4

Увеличение расчетной интенсивности отказов (%) при повышении температуры окружающей среды с 25 °С до 35 °С для разных ЭРИ при разных КН

	Транзистор	Транзистор СВЧ	Резистор	Конденсатор	ИС
<b>КН(мин)</b>	12 %	58 %	5 %	42 %	23 %
<b>КН(макс)</b>	16 %	43 %	8 %	42 %	23 %

Наиболее температурозависимыми оказались СВЧ транзисторы из арсенида галлия.

К сожалению, для полупроводниковых ЭРИ – транзисторов, диодов в ТУ есть разнобой в указании максимально допустимой температуры - это или окружающая среда Тос, или корпус Тк или кристалл (активная зона) Тпер.макс. Хотя очевидно, что главным ограничением является температура перехода, т.к. кристалл является самым нагретым и самым температуро - уязвимым элементом ЭРИ (рис.4.):

$$T_{пер.} = T_{ос} + \Delta t_{пер-корп} + \Delta t_{корп-ос} = T_{ос} + P \cdot R_{внут} + \Delta t_{корп-ос}$$

В качестве примера рассмотрим тепловой режим транзистора. Причем в начале рассмотрим тепловой режим транзистора без учета его установки на печатную плату (ПП) (висящий в воздухе- рис.4, 6, а во втором случае транзистор будет установлен на ПП).



Графически модель теплового режима (МТП) транзистора выполненная в подсистеме теплового расчета АСОНИКА-Т представлена ниже, а за ней представлена и расшифровка условных обозначений данной МТП.

Узлы топологической МТП : 1- кристалл транзистора, 2 - корпус транзистора, 3 – окружающая среда.

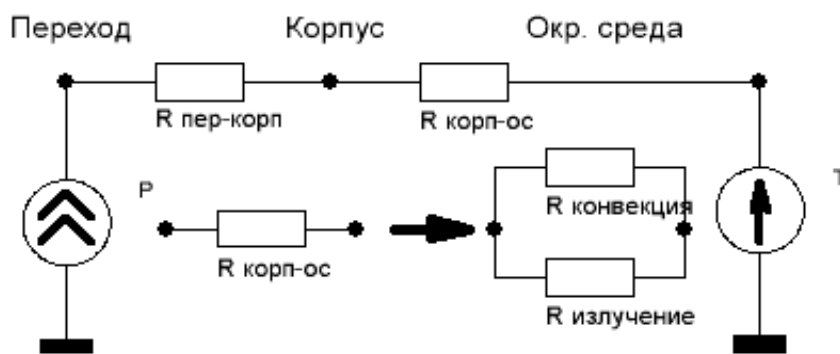
Ветвь 1-2 МТП моделирует тепловое сопротивление переход –корпус и обычно задается в ТУ на ЭРИ. Источник тепловыделения в 1 Вт - описывает тепловыделение в полупроводниковом переходе транзистора. Ветви 2-3 описывают излучение и конвекцию в окружающую среду с поверхности корпуса транзистора.

После построений МТП можно рассчитать в подсистеме АСОНИКА-Т температуры этих элементов. В данном конкретном случае были получены температуры переход  $T_{пер.} = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$ , корпус  $T_k = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при окружающей среде  $T_{ос} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  т.е. разность температуры между переходом и окружающей средой составила около  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Очевидно, что наибольшая температура будет на кристалле транзистора, чуть менее на корпусе и самая низкая – температура окружающей среды.

Построим МТП транзистора и резистора, установленных на печатной плате (ПП). Часть МТП от кристалла до корпуса аналогична. Узлы МТП 2-19 моделируют ПП. Узлы 18 и 19 - корпуса радиоэлементов на ПП. Узел 20 – кристалл транзистора. Узел 1 – окружающая среда, Тепловой поток с корпуса делится на две части – часть потока отдается конвекцией и излучением в окружающую среду, а часть через выводы (тепловое сопротивление крепления) стекает на печатную плату (ПП). По ПП тепло растекается и теплоотдачей передается в окружающую среду.

Как уже говорилось, в реальности ЭРИ обычно установлен на печатный узел, поэтому необходимо проводить расчет теплового режима ЭРИ в составе печатного узла (см. рис 7). Так как печатный узел является основным конструктивным узлом РЭА, то для его расчета существует подсистема АСОНИКА-ТМ предназначенная для расчета теплового и механических режимов печатных узлов. Хотя МТП в этом случае даже сложнее, чем в предыдущем случае, но для печатного узла, как типового узла, МТП строится автоматически и поэтому здесь не представлена, а представлен сразу результат расчета.

В качестве примера приведен расчет теплового режима печатного узла с установленными на нем различными элементами.



а)

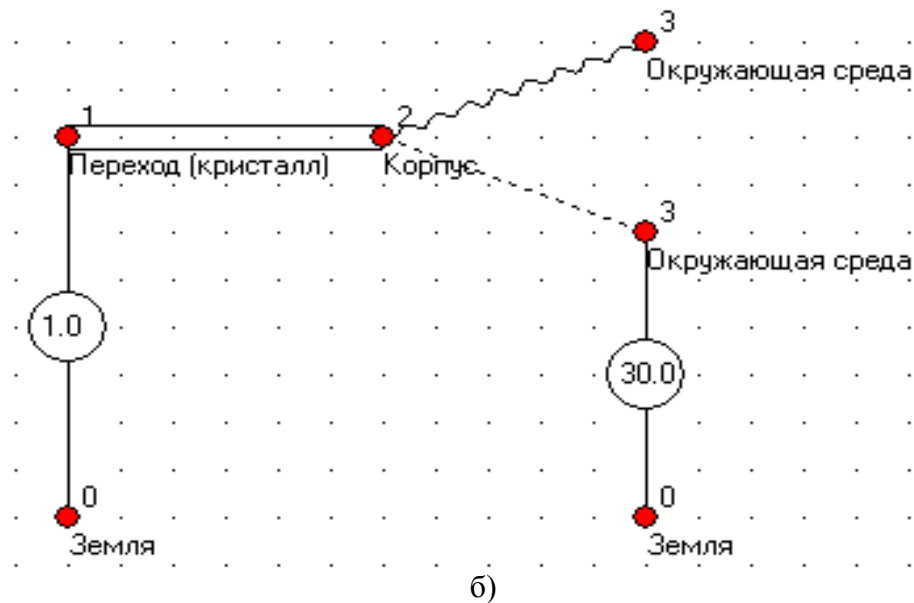


Рисунок 7 – Топологическая модель теплового процесса (МТП) обособленного транзистора а) в виде эквивалентной электрической цепи, б) модель в виде ненаправленного графа в подсистеме АСОНИКА- Т

Как видно при установке на ПУ перегрев транзистора снизился, что говорит о том, что ПП выполняет роль элемента дополнительного охлаждения.

Для мощных транзисторов при больших мощностях требуется использование радиатора и МТП станет еще сложнее. Так как не всегда есть возможность проводить тепловой расчет, то в справочнике по надежности даются рекомендации по пересчету этих температур друг в друга.

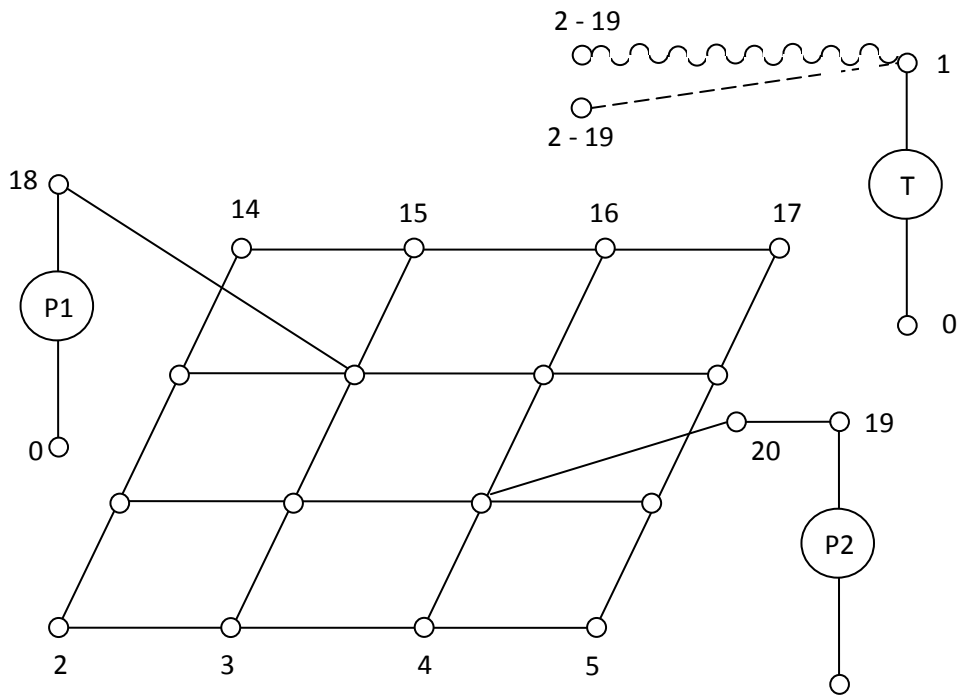


Рисунок 8 – Модель теплового процесса (МТП) транзистора с учетом печатной платы

Для ряда изделий в ТУ или справочной литературе не приведены значения  $T_{пер. макс.}$ , в графе «Тпер. макс.» для таких изделий приводятся значения максимально допустимой по ТУ температуры окружающей среды  $T_{ос}$  или корпуса  $T_{к}$ , в дальнейшем  $T_1$ . В этом случае

для определения ориентировочных значений  $T_{\text{пер.макс.}}$  можно использовать вспомогательные выражения:  $T_{\text{пер.макс.}} = (T_1 - \text{для изделий малой мощности}) \& (T_1 + 20\text{ }^\circ\text{C} - \text{для изделий средней мощности}) \& (T_1 + 50\text{ }^\circ\text{C} - \text{для изделий большой мощности}) \& (T_1 + 100\text{ }^\circ\text{C} \text{ для транзисторов биполярных мощных СВЧ}).$

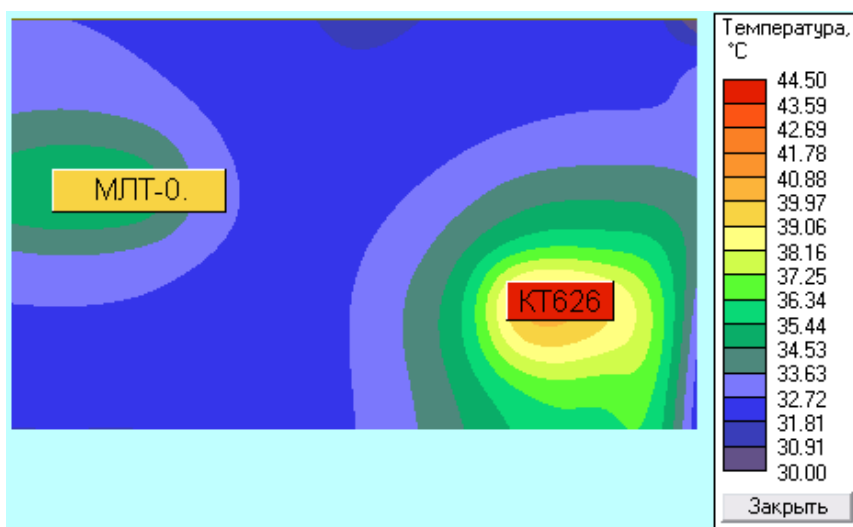


Рисунок 9 – Пример расчет теплового режима ПП с ЭРИ в АСОНИКА-ТМ

Для данных типов микросхем, резисторов, конденсаторов рабочей является практически вся температура.

Для средне - мощного транзистора при повышении коэффициента нагрузки резко падает максимальная рабочая температура окружающей среды.

Ограничение рабочей температуры ЭРИ необходимо делать уже на этапе до расчета надежности, т.к. в модели надежности их можно не отследить.

Широко используемое правило Вант-Гоффа, что интенсивность отказов РЭС растет в два раза при повышении температуры на 10 градусов дает завышенную оценку.

Для уточнения температурных условий эксплуатации можно рекомендовать использовать подсистему анализа тепловых процессов АСОНИКА-Т, ТМ.

Для автоматизированного расчета надежности можно использовать подсистему обеспечения надежности и качества АСОНИКА-К.

#### 4.7. МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ВИБРОУДАРОИЗОЛЯЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Механические воздействия вызывают от 30 до 50% отказов РЭС. Подавляющее большинство отказов РЭС из-за механических воздействий связано с выходом за пределы, установленные нормативно-технической документацией, механических характеристик конструкций РЭС - ускорений, перемещений, напряжений, что приводит к нарушению прочности и устойчивости работы аппаратуры. При этом ускорение на каждом электрорадиоизделии (ЭРИ) не должно превышать допустимое по техническим условиям на него значение. Кроме того, к нарушениям прочности ЭРИ часто приводит накопление усталостных повреждений в их выводах.

Кроме вибрации, РЭС может подвергаться ударным воздействиям, возникающим при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т.д. В процессе ударного воздействия большие перегрузки к элементам РЭС прикладываются в течение короткого промежутка времени. Вследствие этого возникающие ускорения, перемещения и