

Государственный комитет СССР по народному образованию

Е. А. ЧЕРДАКОВ, А. Н. ЧЕКАНОВ, А. В. ЕЛАНЦЕВ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ
И КОМПОНОВКА ГИС С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ
РЕЖИМОВ**

Издательство МГТУ
1989

Государственный комитет СССР по народному образованию

Е. А. ЧЕРДАКОВ, А. Н. ЧЕКАНОВ, А. В. ЕЛАНЦЕВ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ
И КОМПОНОВКА ГИС С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ
РЕЖИМОВ**

Издательство МГТУ

1989

Государственный комитет СССР по народному образованию
Е.А.Чердаков, А.Н.Чеканов, А.В.Еланцев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ
И КОМПОНОВКА ГИС С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Методические указания
к курсовому и дипломному проектированию

Под редакцией Е.А.Чердакова



Издательство МГТУ

1989

ББК 32.844-02

Е48

Е48 Чердаков Е.А., Чеканов А.Н., Еланцев А.В. Проектирование и компоновка ГИС с учетом тепловых режимов: Методические указания к дипломному проектированию/ Под ред. Е.А.Чердакова. -М.: Изд-во МГТУ, 1989. - 46 с., ил.

ISBN 5-7038-0192-3

Методические указания включают оценку тепловых режимов элементов и компонентов ИС и рекомендации по устранению вредного влияния от их перегрева. Содержат справочные материалы, необходимые как для выполнения расчетов, так и для проектирования ГИС. Даны рекомендации по применению ЭВМ при выполнении трудоемких работ, связанных с проведением необходимых расчетов.

Методические указания полезны студентам при выполнении комплексного задания, курсовых проектов по курсам "Микроминиатюризация ЭВС (РЭС)", "Конструирование ЭВС (РЭС)", а также при выполнении дипломных проектов.

Рецензент В.Г.Ковалев

ББК 32.844-02

ISBN 5-7038-0192-3

(с) МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1989

ВВЕДЕНИЕ

По мере дальнейшей микроминиатюризации электронных вычислительных (ЭВС) и радиоэлектронных средств (РЭС) повышения степени интеграции увеличиваются мощности рассеяния гибридных интегральных схем (ГИС). При разработке конструкции интегральных схем (ИС) все большее внимание уделяют обеспечению нормального теплового режима элементов и компонентов, непосредственным образом связанного с надежностью ИС.. Пленочные элементы и полупроводниковые компоненты рассеивают тепло, которое передается через тепловод (подложку, элементы корпуса и т.д.) в окружающую среду.

I. Конструкции ГИС. Выбор тепловой модели

Гибридной интегральной схемой (ГИС) называют интегральную микросхему, в которой имеются пленочные элементы и компоненты. Существующие ГИС подразделяют на корпусные и бескорпусные.

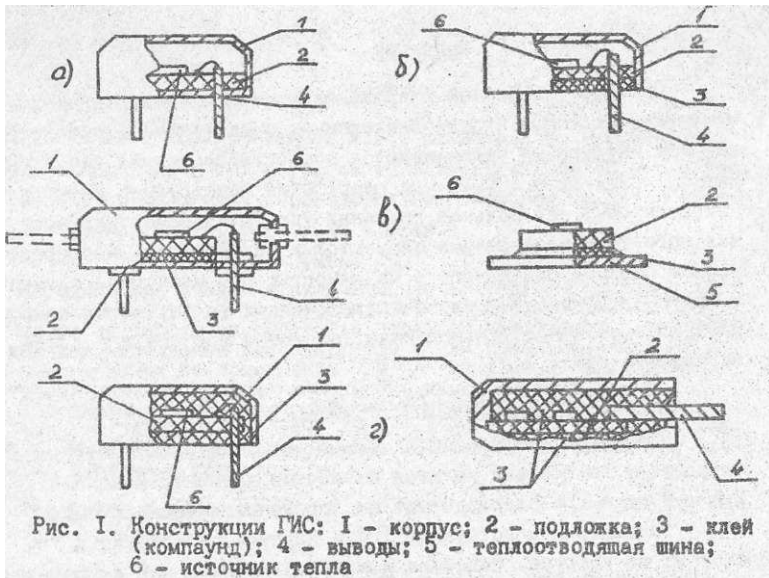
Рассмотрим конструкцию ГИС в корпусе. Конструкция ГИС состоит из корпуса, подложки и материала (клея или компаунда), приклеивающего подложку к корпусу.

Подложки ГИС имеют толщину $(0,5...0,6) \cdot 10^{-3}$ м. Теплообмен между элементами и наружной поверхностью ГИС осуществляется преимущественно кондукцией.

Рассмотрим конструкции ГИС, в которых кондуктивный теплообмен осуществляется с одной или обеих больших поверхностей подложки в любой комбинации с торцами (рис. 1). Можно выделить четыре типа конструкций: с корпусом-подложкой (рис. 1а); метал- лополимерные /компаунд используется только для герметизации выводов (рис. 1б)/; металлостеклянные и бескорпусные /подложка приклеивается к основанию корпуса или к теплоотводящей шине (рис. 1в)/; металлополимерные и металлостеклянные (внутренний объем залит компаундом (рис. 1г)).

Расчет теплового режима залитых ГИС (рис. 1г) может быть сведен к расчету конструкций, показанных на рис. 1б,в.

Конструкцию на рис. 1а можно рассматривать как частный случай конструкций (рис. 1б,в) при нулевой толщине слоя компаунда (клея). Таким образом, конструкции на рис. 1б,в являются основными с точки зрения тепловых режимов.



1. При выборе тепловой модели ГИС принимает следующие допущения [1]:

2. Влиянием теплопроводности и толщины тонких пленок на температурное поле ГИС можно пренебречь. Пленочные тепловыделяющие элементы заменяются плоскими источниками тепла. Такие допущения являются правомерными, так как тонкопленочные элементы имеют толщину от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м, что на 3...7 порядков меньше толщины подложки и, следовательно, теплопроводность подложки с учетом пленки будет отличаться от теплопроводности без учета пленки меньше, чем на 1%.

3. Навесные тепловыделяющие элементы заменяются плоскими источниками тепла с той же рассеиваемой мощностью с учетом дополнительного теплового сопротивления между критической зоной элемента (например, p-p переходом) и поверхностью подложки,

4. Корпус (основание) ГИС изотермичен.

5. Влиянием выводов на избыточное температурное поле (относительно температуры корпуса) ГИС можно пренебречь.

6. При планарном расположении, а в некоторых случаях и при торцевом (вертикальном), выводы ГИС не имеют непосредственного 4

контакта с подложкой. Тепловые сопротивления золотых проводников ($\tau_{\text{гпр}} > 1 \cdot 10^4 \text{ K/Вт}$) диаметром 30 мкм, длиной более 2 мм, с помощью которых осуществляется коммутация, значительно превышают (больше $1 \cdot 10^4 \text{ K/Вт}$) тепловые сопротивления между элементами и корпусом ($0,1 \dots 1,3 \cdot 10^3 \text{ K/Вт}$) и по этой причине не принимаются во внимание.

Вертикальные (торцевые) выводы ГИС, как правило, имеют либо непосредственный контакт с подложкой, либо расположены вблизи нее, при этой часто отделены изолятором от корпуса. Размещение элементов ГИС вблизи выводов не допускается, поэтому влияние последних на избыточное температурное поле (относительно температуры корпуса) незначительно.

Таким образом, общей тепловой моделью для большинства конструкций ГИС будет двухслойный прямоугольный параллелепипед, на одной из больших граней которого находятся плоские прямоугольные источники тепла (рис. 2). Первый слой собственно подложка, второй - слой клея (компаунда).

При математической постановке задачи принимают:

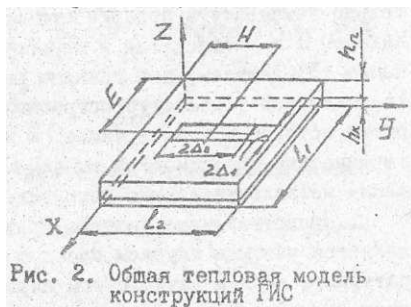
1) коэффициенты теплопроводности материалов подложки $\lambda_{\text{п}}$ и компаунда (или клея) $\lambda_{\text{к}}$ постоянными в исследуемом диапазоне температур;

2) теплоотдачей через газовую прослойку внутри ГИС можно пренебречь, полагая, что суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности подложки $\alpha = 0$.

Влияние теплоотдачи через газовую прослойку на тепловой режим ГИС может быть оценено с помощью электромоделирования. Исследование конструкции на рис. 1в (ситалл - 0,6 мм, клей - 0,1 мм) при $\alpha = 14 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ показало, что перегрев элементов уменьшается менее чем на 0,5% по сравнению со случаем, когда $\alpha = 0$

Решение поставленной задачи можно найти, используя метод суперпозиции. При этом температурное поле на поверхности подложки определяется как суперпозиция температурных полей, создаваемых элементами ГИС (прямоугольными плоскими источниками тепла).

Температурное поле, создаваемое прямоугольным источником



тепла, оценивается системой уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} = 0, & (1) \\ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2} = 0, & (2) \end{cases}$$

и граничными условиями, определяемыми особенностями конструкций ГИС и тепловыми свойствами применяемых материалов.

$$\theta_1|_{z=h_k} = \theta_2|_{z=h_k}; \lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=h_k} = \lambda_k \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=h_k} \quad (3)$$

В этих уравнениях $\theta(x, y, z) = T(x, y, z) - T_k$ - температура нагрева точки модели с координатами x, y, z относительно температуры поверхности изотермического корпуса T_k . Индексы 1 и 2 относятся к первому и второму слоям модели. Уравнение (3) записано для границу раздела двух областей, определяет равенство температур пограничных слоев и указывает на отсутствие истоков и стоков тепла. В конструкциях микросхем роль изотермических поверхностей выполняют металлические кромки и основания металлокерамических корпусов.

Представленная система уравнений с граничными условиями является частным случаем более общей задачи определения температурного поля в двухслойном параллелепипеде при $\alpha \neq 0$ и толщине элемента ГИС, рассеивающего тепло $h_2 \neq 0$.

Решение системы уравнений при различных граничных условиях и упрощениях приведено в [1].

2. Оценка тепловых режимов ГИС

С учетом теоретических допущений, приведенных выше, и результатов решения системы уравнений при различных граничных условиях расчет тепловых режимов элементов, учитываемых как при проектировании ГИС, так и при оценке тепловых режимов уже существующих разработок, проводят в следующем порядке.

1. Определяют полное термическое сопротивление подложки и основания корпуса τ_T и коэффициент k_L [1]:

для конструкций ГИС, показанных на рис. 1а, у которых подложка крепится к основанию (корпусу) методом стеклоспая или пайкой, $k_L = 1, \tau_T = \frac{h_d}{\lambda_n}$,

где h_n - толщина подложки, м; λ_n - коэффициент теплопроводности подложки, Вт/(м*С);

для конструкций, показанных на рис. 1б,

$$\alpha_T = \frac{h_n}{\lambda_n} + \frac{h_k}{\lambda_k} = \frac{h}{\lambda_n \cdot a_S}, \quad a_S = \frac{S_1}{S_1 + S_2 - S_1 S_2}; \quad S_2 = \frac{h_k}{h};$$

$$S_1 = \frac{\lambda_k}{\lambda_n}, \quad K_L = h \left[\sqrt{h_n^2 + h_k^2 + h_n \cdot h_k \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_k} + \frac{\lambda_k}{\lambda_n} \right)} \right]^{-1/2};$$

для конструкций, показанных на рис. 1в /подложка приклеивается к корпусу (основанию)/, α_T рассчитывается так же, как и для конструкций на рис. 1б.

$$K_L = \frac{h}{h_n + h_k \frac{\lambda_n}{\lambda_k}},$$

где h_k , λ_k - толщина клея (компаунда), коэффициент теплопроводности клея.

2. Кроме того, для каждого тепловыделяющего i -элемента находят

$$S_{1i} = \frac{l_{xi}}{2h}; \quad S_{2i} = \frac{l_{yi}}{2h}; \quad K_w = \frac{W_i}{W_{max}}; \quad \theta_{mi} = \alpha_T \cdot W_i,$$

где $h = h_k + h_n$, l_{xi} , l_{yi} - ширина и длины i -элемента;

$W_i = \frac{\rho \cdot l_{xi} \cdot l_{yi}}{l_{xi} \cdot l_{yi}}$ - удельная мощность рассеяния (ρ - мощность, рассеиваемая в источнике тепла).

3. На топологическом чертеже (рис. 3) строят зоны влияния.

Величины A_{1i} , A_{2i} определяют по формулам:

$$A_{1i} = \frac{a_{xi} \cdot h}{K_L}; \quad A_{2i} = \frac{a_{yi} \cdot h}{K_L},$$

где a_{xi} и a_{yi} находят по графику (рис. 4).

Зоной влияния элемента называют часть поверхности подложки, за пределами которой перегревы, создаваемые рассматриваемым

элементом, не превышают некоторой достаточно малой наперед заданной величины и могут не приниматься во внимание. Для упрощения геометрических построений устанавливают прямоугольную форму зон влияния.

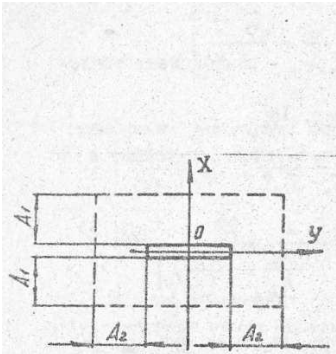


Рис. 3. Зона влияния элемента ГИС

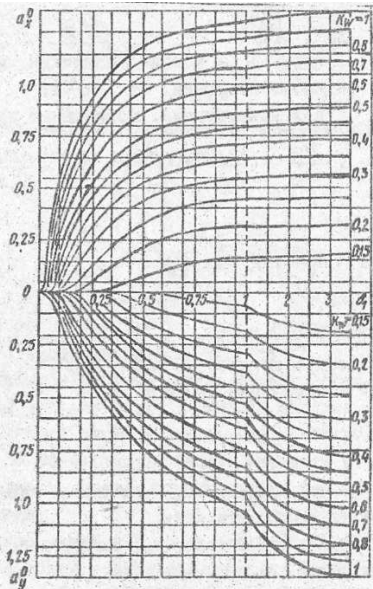


Рис. 4. Зависимость коэффициентов зон влияния от расположения и относительной мощности источников

4. Для каждого i -тепловыделяющего элемента определяют перегревы θ'_i по формулам (4) или (8). Значения функции γ^0 находят по графикам (рис.5).

Перегрев θ'_i вызван действием выделяемой в элементе мощности. Он характеризуется температурой в центре элемента

$$\theta'_i = \theta_{yi} + \theta_{ii} = \theta_{mi} \cdot \gamma^0 (K_L \cdot \delta_{Li}, K_i \cdot \delta_{2i}) + \theta_{ii}, \quad (4)$$

здесь $\theta_{mi} = \alpha \cdot W_i$, где θ_{ii} - температура центра элемента ($x = 0, y = 0$); θ_{ii} - величина, определяемая влиянием размеров подложки l_1 и l_2 на температурное поле источника.

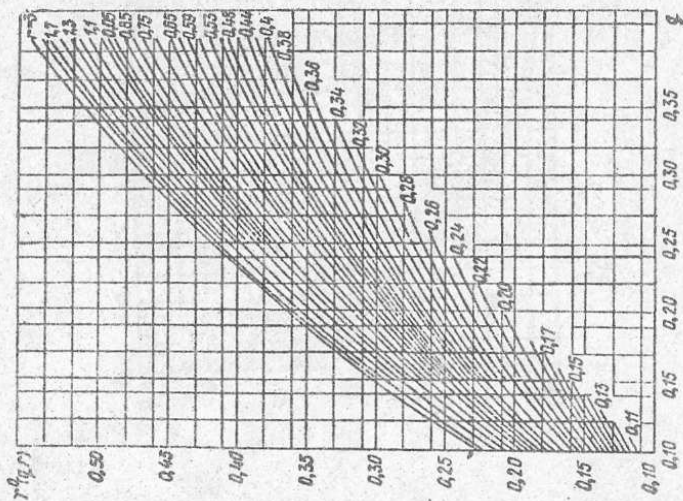
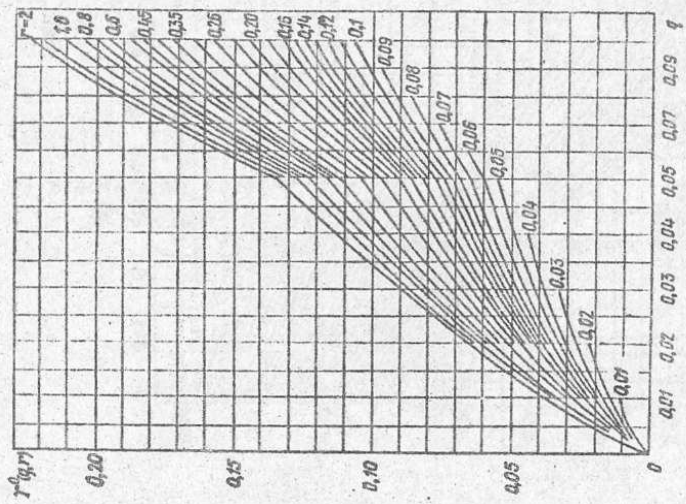


Рис. 5. Зависимость γ от q и τ :

а) $q = 0 - 0,1$; б) $q = 0,1 - 0,4$; в) $q = 0,4 - 1,0$; г) $q = 1,0 - 4,0$

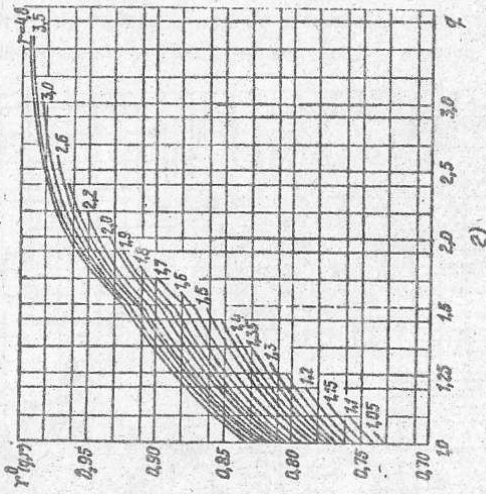
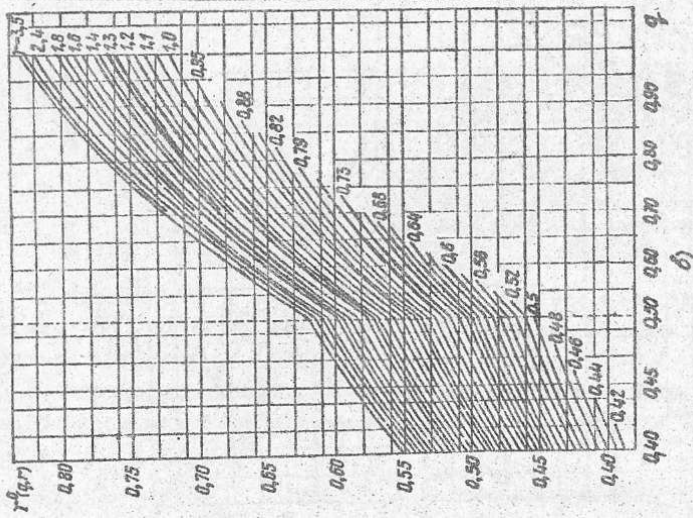


Рис. 5. (окончание)

Величину θ_{ii} рассчитывают по формулам:

а) если $A_1 \leq (A_x - \Delta_1) / 2$ (рис. 6а), тогда

$$\theta_{ii} = \pm 0,5 \theta_{mi} \sum_{m=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi}) \Upsilon(|q'_{mi}|, \kappa_L \delta_{2i}), \quad (5)$$

где $q'_{mi} = \kappa_L [\delta_{2i} + (-1)^{m+1} (2a_{2i} + 2\delta_{2i})]$;

б) если $A_2 \leq (A_y - \Delta_2) / 2$ (рис. 6б), тогда

$$\theta_{ii} = \pm 0,5 \theta_{ni} \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{ni}) \Upsilon(\kappa_L \delta_{1i}, |q'_{ni}|), \quad (6)$$

где $q'_{ni} = \kappa_L [\delta_{1i} + (-1)^{n+1} (2a_{1i} + 2\delta_{1i})]$;

в) если и (рис. 6в), тогда $A_1 \leq (A_x - \Delta_1) / 2$ $A_2 \leq (A_y - \Delta_2) / 2$.

$$\theta_{ii} = 0,5 \theta_{mi} \left[\pm \sum_{m=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi}) \Upsilon(|q'_{mi}|, \kappa_L \delta_{2i}) \pm \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{ni}) \Upsilon(\kappa_L \delta_{1i}, |q'_{ni}|) + 0,5 \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgn}(q'_{mi} \cdot q'_{ni}) \times \Upsilon(|q'_{mi}|, |q'_{ni}|) \right]; \quad (7)$$

г) в остальных случаях $\theta_{ii} = 0$.

Для двухслойной модели ГИС $\kappa_L = 1$, а для изотропной модели $\kappa_L \neq 1$ и функция Υ заменяется функцией Υ^0

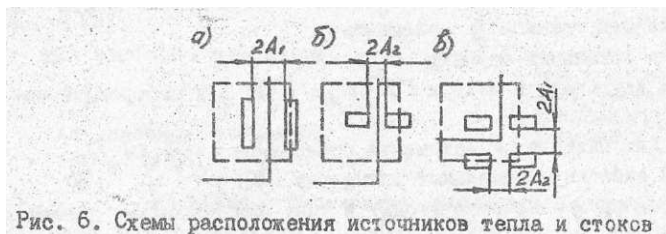


Рис. 6. Схемы расположения источников тепла и стоков

В формулах (5)...(7) знак "+" соответствует конструкции ГИС (рис. 1в), а знак "-" конструкции ГИС (рис. 1б). Но так как в современных конструкциях ГИС размещение элементов вблизи края подложки не допускается, то значение θ_{ii} незначительно и определяется только в исключительных случаях. Поэтому

$$\theta'_{ii} = \theta_{ci} = \theta_{mi} \cdot \gamma^0(K_L \delta_{1i}, K_L \delta_{2i}), \quad (8)$$

5. Для каждого i -тепловыделяющего элемента определяют перегревы θ_{ij} , создаваемые им на остальных j -элементах ГИС:

а) центр j -элемента входит в зону влияния i -элемента и $\frac{w_i}{w_j} \leq 2$, тогда

$$\theta_{ij} = 0,25 \theta_{mi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgr}(q_{mi} \cdot \chi_{ni}) \cdot \gamma^0(|q_{mi}|, |\chi_{ni}|), \quad (9)$$

где $q_{mi} = K_L [\delta_{1i} + (-1)^{m+1} |x_{ij}|]$;
 $\chi_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} |y_{ij}|]$;

б) j -элемент входит в зону влияния i -элемента и $\frac{w_i}{w_j} > 2$, тогда

$$\theta_{ij} = 0,25 \theta_{mi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \operatorname{sgr}(q_{mi} \cdot \chi_{ni}) \cdot \gamma^0(|q_{mi}|, |\chi_{ni}|) - 0,12 \theta_{ij}, \quad (10)$$

здесь $q_{mi} = K_L [\delta_{1i} + (-1)^{m+1} |x_{kj}|]$;
 $\chi_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} |y_{kj}|]$.

где x_{ij}, y_{ij} - координаты центра, j -элемента относительно

центра i -элемента; x_{kj}, y_{kj} - координаты ближайшей к

центру j -элемента точки относительно центра i -элемента (или принадлежавшей границе j -элемента):

в) в остальных случаях $K_L = 1$,

Для двухслойной модели ГИС $\theta_{ij} = 0$ для изотропной модели $K_L \neq 1$.

6. Для каждого j -элемента определяют перегрев, вызванный действием остальных элементов ГИС: θ_{0j}

а) центр j -элемента входит в одну или несколько зон влия-

ния группы i -элементов, у которых $\frac{W_i}{W_j} < 2$ (рис. 7а) или часть j -элемента входит в зону влияния группы i -элементов, у которых $\frac{W_i}{W_j} > 2$ (рис. 7б), тогда

$$\theta_{vj} = \sum_{k=1}^m \theta_{ikj}$$

где i_k - индекс влияющего элемента; m - количество влияющих элементов.

Величину θ_{vj} находят по формулам (9), (10);

б) различные части j -элемента входят в зоны влияния нескольких групп i -элементов (рис. 7в), тогда для каждой части j -элемента, входящего в зону

влияния одной группы i -элементов, определяют θ_{vj} по формуле

$$\theta_{vj} \approx \theta_{kij} + 0,88\theta_{цj} \quad (II)$$

и наибольшее из этих значений принимают за θ_{vj} ;

где θ_{kij} - перегрев в точке x_{kij} , ближайшей к центру j -элемента y_{kij} или принадлежащей границе этого элемента, определяемый по (9).

$$\theta_{vj} = \max\{\theta_{vj1}, \dots, \theta_{vjn}\},$$

где n - количество зон влияния групп элементов;

в) в остальных случаях $\theta_{vj} = 0$

7. Определяют температуру T_j элементов ГИС:

для пленочных элементов

$$T_j = \theta_j' + \theta_{vj} + T_k,$$

для навесных элементов

$$T_j = \theta_j' + \theta_{vj} + R_{т.вн} \cdot P_j + T_k$$

где $R_{т.вн}$ - тепловое сопротивление навесного элемента. Для

бескорпусных полупроводниковых приборов в справочной литературе

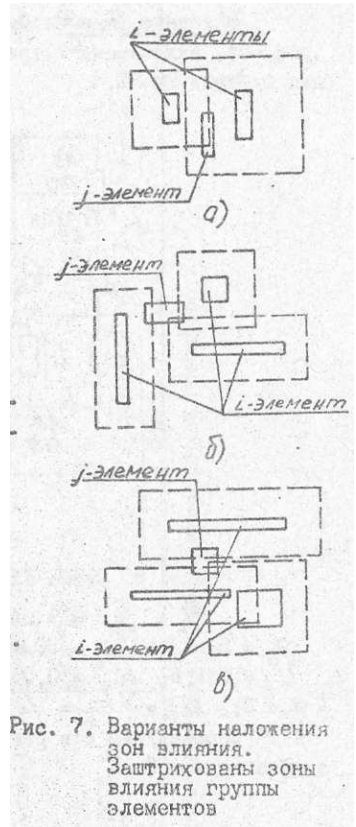


Рис. 7. Варианты наложения зон влияния. Заштрихованы зоны влияния группы элементов

приводятся данные для внутреннего теплового сопротивления с учетом

теплового сопротивления клеевой прослойки $R_{ТВН} \approx 200$...

1600 К/Вт (табл. I); T_k - температура не влияющих и не подверженных влиянию элементов ГИС.

3. Расчет температуры элементов ГИС и определение их взаимовлияния

В качестве примера рассчитывают тепловые режимы элементов ГИС на этапе ее проектирования.

Исходные данные. Схема электрическая принципиальная (рис. 8), включающая 7 транзисторов, 9 резисторов и реализующая функция ЗИ-НЕ.

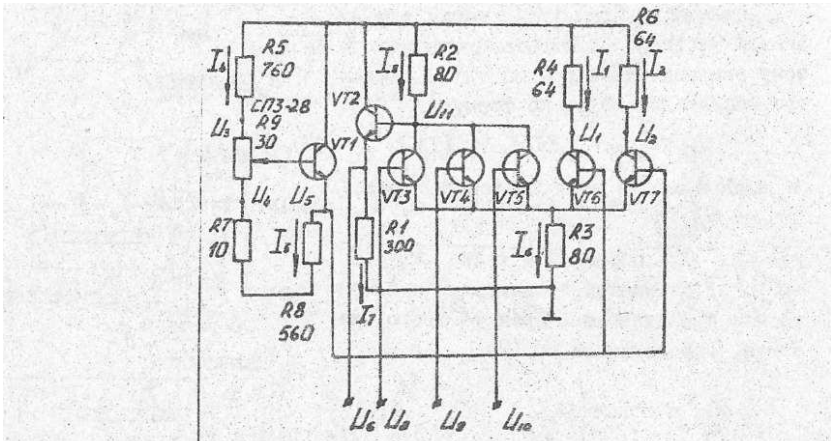


Рис. 8. Схема электрическая принципиальная

$$\begin{aligned}
 & I_1 = I_2 = 9 \text{ мА}; \quad I_3 = 11,25 \text{ мА}; \quad I_4 = 5 \text{ мА}; \\
 & I_5 = 5 \text{ мА}; \quad I_6 = 30 \text{ мА}; \quad I_7 = 8,3 \text{ мА}; \quad U_1 = U_2 = 3,4 \text{ В}; \\
 & U_3 = 0,2 \text{ В}; \quad U_4 = 0,05 \text{ В}; \quad U_5 = 2,8 \text{ В}; \quad U_6 = 2,5 \text{ В}; \quad U_7 = \\
 & = 2,4 \text{ В}; \quad U_8 = U_9 = U_{10} = 3 \text{ В}; \quad U_{11} = 3,1 \text{ В}; \quad U_{12} = 4 \text{ В}.
 \end{aligned}$$

Справедливы для режима схемы, когда на входах - 1; 1; а на выходе - 0.

Таблица I

Характеристики бескорпусных полупроводниковых приборов

Наименование транзистора	Обозначение	Масса, не более, мг	Максимальная рассеиваемая мощность P_{max} , мВт при $t = +20^{\circ}\text{C}$	Внутреннее тепловое сопротивление R_{th} , К/Вт	Максимальная температура переходов T , $^{\circ}\text{C}$	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	Габаритный чертеж на рисунках
Биполярный $n-p-n$	2Т625-2	15	1000	80	150	-60...+85	9г
Биполярный $n-p-n$	КТС395	50	300	100*	150	-60...+85	9д
Биполярный $p-n-p$	КТС394	50	300	100*	150	-60...+85	9д
Биполярный $p-n-p$	2Т360	3	10	650	115	-40...+85	9е
Биполярный $n-p-n$	2Т354	3	30	500	150	-60...+85	9ж
Биполярный $n-p-n$	КТ379	10	25	1500	105	-40...+85	9з
Биполярный $p-n-p$	КТ380	10	25	1500	105	-40...+85	9з
Полевой n -канал	2П201	5	60	550	135	-40...+85	9и
Полевой p -канал	2ПС202	2	30	750	135	-60...+85	9к
Диодная матрица с общим катодом	КД907А-Г	10	30	224	105	-60...+85	9л
Диодная матрица с общим анодом	КД918А-Г	10	30	224	105	-60...+85	9л

* При пайке кристалла к металлизированной поверхности

Расчет мощностей, рассеиваемых на элементах:

$$\begin{aligned}
 P_{R1} &= I_1^2 \cdot R_1 = 20,8 \text{ мВт}, \\
 P_{R2} &= I_2^2 \cdot R_2 = 10,13 \text{ мВт}, \\
 P_{R3} &= I_3^2 \cdot R_3 = 72 \text{ мВт}, \\
 P_{R4} &= I_4^2 \cdot R_4 = 5,4 \text{ мВт}, \\
 P_{R5} &= I_5^2 \cdot R_5 = 19 \text{ мВт}, \\
 P_{R6} &= I_6^2 \cdot R_6 = 5,4 \text{ мВт}, \\
 P_{R7} &= I_7^2 \cdot R_7 = 0,025 \text{ мВт}, \\
 P_{R8} &= I_8^2 \cdot R_8 = 1,3 \text{ мВт}, \\
 P_{R9} &= (U_3 - U_4) \cdot I_9 = 0,7 \text{ мВт}; \\
 I_{KV1} &= I_{KV1} \cdot \alpha = 4,98 \text{ мА}, \\
 P_{VT1} &= I_{KV1} \cdot U_{KV1} = 5,98 \text{ мВт}, \\
 I_{KV2} &= I_{KV2} \cdot \alpha = 8,26 \text{ мА}, \text{ где } \alpha = 0,99 \dots 0,995, \\
 P_{VT2} &= I_{KV2} \cdot U_{KV2} = 12,4 \text{ мВт}; \\
 I_{KV3} &= I_{KV4} = I_{KV5} = \frac{I_3}{3} = \frac{11,25}{3} = 3,75 \text{ мА}, \\
 P_{VT3} &= I_{KV3} \cdot U_{KV3} = 2,63 \text{ мВт}; \\
 P_{VT4} &= P_{VT5} = I_K \cdot U_{K3} = 2,63 \text{ мВт}, \\
 P_{VT6} &= (U_1 - U_6 \cdot R_3) \cdot I_1 = 9 \text{ мВт}, \\
 P_{VT7} &= (U_2 - U_6 \cdot R_3) \cdot I_2 = 9 \text{ мВт}.
 \end{aligned}$$

В качестве транзисторов VT3, VT 4, VT5 используют навесные элементы КТ324 (рис. 9а); VT6 и VT7 - элементы КТ332 (рис. 9б); VT1 - элементы КТ354 (рис. 9ж); VT2 - элементы КТ331 (рис. 9б).

Роль подстроечного сопротивления R_9 выполняет элемент СПЗ-28 (рис. 9в).

В качестве подложки используют ситалл СТ50-1 с толщиной $h_{r1} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, коэффициентом теплопроводности материала $\lambda_{r2} = 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{)} (табл. 2).$

Для тонкопленочных резисторов используют тантал ТВЧ с удельным поверхностным сопротивлением резистивной пленки $\rho_{\square} = 10 \text{ Ом/}\square$ / материал контактных площадок - тантал, диапазон номинальных значений сопротивлений = 10...15000 Ом (табл. 3)/.

Расчет геометрических параметров резисторов.

Высокоомные резисторы выполняют в форме меандра (рис. 10). Методика определения размеров резисторов описана в [2, стр. 22...28], [3, стр. 6...13] .

Пусть $a = b = 0,3 \text{ мм}$, n - необходимое число звеньев; $K_{\text{фос}} = 4$ - коэффициент формы П-образного элемента сопряжения.

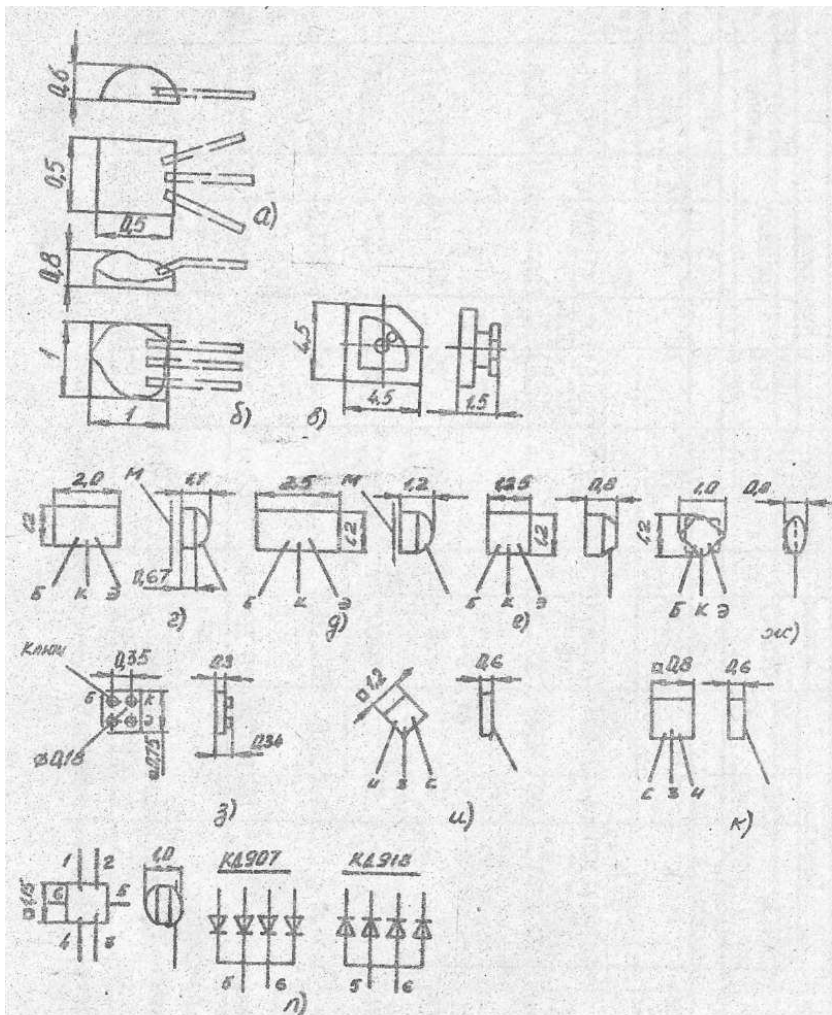


Рис. 9. Габаритные и установочные размеры бескорпусных приборов ГИС: а) КТ324; б) КТ331, КТ332; в) подстроечное сопротивление СПЗ-28; г) 2Т625-2 (М-металлизированная поверхность контакта к коллектору); д) КТС394; КТС395; е) КТ360; ж) КТ354; з) КТ379; КТ380; и) 2Л201; к) 2ПС202; л) КД907, КД918.

Таблица 2

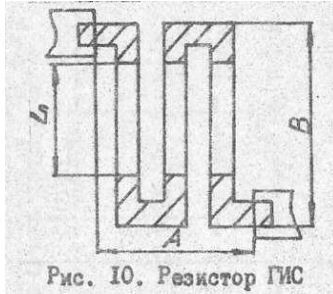
Электрофизические параметры материалов подложек

Параметры	Стекло		Ситалл СГ50-1	Плавлен- ный кварц	Керамика			Глазуро- ванная	99,5% BeO
	СЧ-1	СЧ8-3			22ХС (96% Al ₂ O ₃)	Поликор	7		
I	2	3	4	5	6	7	8	9	
Класс чистоты об- работки поверх- ности КСР, %	14	14	13...14	14	12	12...14	14	14	Высота неровнос- тей 0,45 мкм 70·10 ⁻⁷
(в интервале тем- ператур °С)	(41±2)·10 ⁻⁷ (20 300)	(48±2)·10 ⁻⁷ (20 300)	(50±2)·10 ⁻⁷ (20 300)	55·10 ⁻⁷	(50±5)·10 ⁻⁷ (20-200) ⁷ (20±5)·10 ⁻⁷ (20-500) ⁷ (75±5)·10 ⁻⁷ (20-900)	(70 75)·10 ⁻⁷ (20 800)	(73,75· 10 ⁻⁷) до 400		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	I	1,5	1,5	7...15	10	30...45	12 1,7	210	
Температура раз- мещения, °С	-	750	620	1000	1500	-	1900	1000	
Диэлектрическая проницаемость при f = 10 Гц, T = +20°С	7,5	3,2...8	5...8,5	3,8	10,3	10,5	13...16	6,4 9,5	
Тангенс угла диспе- рсии при f = 10 ⁶ Гц, T = +20°С	20·10 ⁻⁴	15·10 ⁻⁴	20·10 ⁻⁴	-	6·10 ⁻⁴	18·10 ⁻⁴	18·10 ⁻⁴	16·10 ⁻⁴	
Объемное сопротивление, Ом·см при T = +25°С	10 ¹⁴	-	-	10 ¹⁵	-	-	-	10 ¹	
Электрическая проч- ность, кВ/мм	40	-	-	-	50	-	50	20	

Таблица 3

Основные параметры материалов тонкопленочных резисторов

Материал для напыления резистивной пленки	Материал конструктивных слоев	Удельное сопротивление пленки ρ_p , Ом/□	Диапазон номинальных сопротивлений, Ом	Удельная мощность рассеяния, Вт/см ²	ТСК, °С в интервале температур 60...+125 °С
Нихром, проволока Х20Н80 (ГОСТ 12766-67)	Медь	300	50...30000	—	1·10 ⁻⁴
Нихром проволока (ГОСТ 8803-66)	Золото с подслоем хрома	10	1...10000	—	-2,25·10 ⁻⁴
		50	5...50000	—	
Сплав МЛТ-3М (ГОСТ 028.005ТУ)	Медь с подслоем ванадия (луженая)	500	50...50000	2	2·10 ⁻⁴
		—	—	—	
Хром (ГОСТ5905-67) Нержмет К-50С (ЕГО.021.013ТУ)	Золото с подслоем хрома (нихрома)	500	50...30000	1	0,6·10 ⁻⁴
		3000	1000...10000	—	
		5000	500...200000	2	
Тантал ТРЧ дента (ГОСТ 1244-67)	Алюминий с подслоем ванадия (Мель с подслоем нихрома тантал)	10000	1000...10000000	—	-5·10 ⁻⁴
		20...100	100...10000	3	
		100	50...100000	—	
Сплав РС-3001 (ЕГО.021.019ТУ) Сплав РС-3710 (ЕГО.021.034ТУ)	Золото с подслоем хрома (нихрома)	10	10...100000	—	—
		1000	100...50000	—	
		2000	200...100000	2	
—	—	3000	1000...200000	2	-3·10 ⁻⁴



Сопротивление занимает площадь, имеющую форму квадрата. Тогда $A = B$

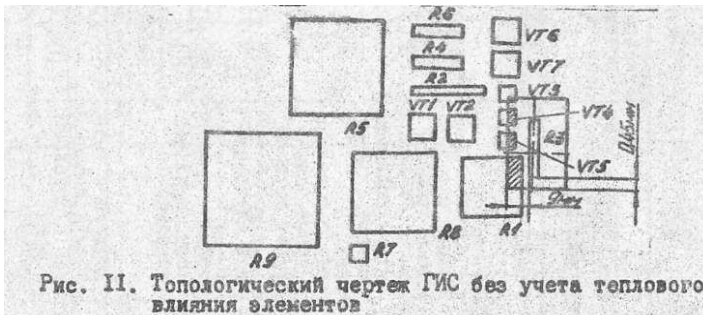
$$r_2 = \sqrt{\frac{K_{\text{ф}}}{1 + \frac{a}{\delta}} \cdot \frac{A}{B}} = \sqrt{\frac{K_{\text{ф}}}{2}},$$

$$l_n = \left(\frac{R}{\rho_0 \cdot r_2} - K_{\text{фс}} \right) = 0,3 \left(\frac{K_{\text{ф}}}{r_2} - K_{\text{фс}} \right),$$

$$A = n(a+b) = n \cdot 0,6, \quad B = l_n + 4b = l_n + 1,2.$$

Первоначальный топологический чертеж без учета теплового влияния приведем на рис.

II.



Расчет теплового режима схемы проводят так же, как и расчет тепловых режимов элементов.

Для выбранного корпуса (рис. 1в) с толщиной подложки

$h_n = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, коэффициентом теплопроводности $\lambda_n = 1,5$ В/(м*К),
 толщиной слоя клея $h_k = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м, коэффициентом теплопроводности клея λ_k
 = 0,3 Вт/(м*К) внутреннее тепловое сопротивление навесных элементов = 800 К/Вт.

Определяют $R_{ТВН}$

$$\alpha_T = \frac{h_n}{\lambda_n} + \frac{h_k}{\lambda_k} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,5} + \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 0,667 \cdot 10^{-3} \left(\frac{м^2}{Вт} \right)$$

$$K_L = \frac{h}{h_n + h_k \frac{\lambda_n}{\lambda_k}} = \frac{(0,5 + 0,1) \cdot 10^{-3}}{10^{-3} (0,5 + 0,1 \cdot \frac{1,5}{0,3})} = 0,6$$

В данном случае ненулевую зону влияния практически имеет только элемент R3. Эта зона влияния захватывает элементы VT3, VT4, VT5 и R1.

Зона влияния VT2 не захватывает остальные элементы.

Рассчитывают перегревы, создаваемые элементом R3 на элементы микросхемы, входящие θ_{ij} в его зону влияния (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расчета перегревов

i- элемент	j- элемент	$f_w = \frac{W_i}{W_j}$	$x_k \cdot 10^{-3}, м$	$y_k \cdot 10^{-3}, м$	$\theta_{ij}, К$
R3	VT3	2	0,9	1,65	1,46
R3	VT4	2	0,9	1,1	3,54
R3	VT5	2	0,9	0,3	5,03
R3	R1	2	0,9	1,65	1,43

Для примера рассчитывают перегрев, создаваемый элементом R3 на VT4.

$$\theta_{ij} = 0,25 \theta_{mi} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 S_{gr}(q_{mi}, \alpha_{ni}) r^n (|r_{mi}|, |\alpha_{ni}|) -$$

$$- 0,12 \theta_{uj},$$

$$q_{mi} = K_L [\delta_{ic} + (-1)^{m+1} |x_{kj}|],$$

$$z_{ni} = K_L [\delta_{2i} + (-1)^{n+1} |y_{kj}|]$$

При $m=1, n=1$ $q_{mi} = 0,6(0,25 + 0,9) = 0,69,$
 $z_{ni} = 0,6(2 + 1,1) = 1,86,$
 $\text{Sgn}(q_{mi} \cdot z_{ni}) = +1.$

При $m=1, n=2$ $q_{mi} = 0,6(0,25 + 0,9) = 0,69,$
 $z_{ni} = 0,6(2 - 1,1) = 0,54,$
 $\text{Sgn}(q_{mi} \cdot z_{ni}) = +1.$

При $m=2, n=1$ $q_{mi} = 0,6(0,25 - 0,9) = -0,39,$
 $z_{ni} = 1,86,$
 $\text{Sgn}(q_{mi} \cdot z_{ni}) = -1.$

При $m=2, n=2$ $q_{mi} = -0,39,$
 $z_{ni} = 0,54,$
 $\text{Sgn}(q_{mi} \cdot z_{ni}) = -1.$

$$r^{\circ}(|q_{1i}|, |z_{1i}|) = r(0,69, 1,86) = 0,70;$$

$$r^{\circ}(|q_{1i}|, |z_{2i}|) = r(0,69, 0,54) = 0,47;$$

$$r^{\circ}(|q_{2i}|, |z_{1i}|) = r(0,39, 1,86) = 0,53,$$

$$r^{\circ}(|q_{2i}|, |z_{2i}|) = r(0,39, 0,54) = 0,415,$$

Здесь

$$\begin{aligned}0,12 \theta_{\text{ч}} &= 0,12 \theta_j' = 0,12 \cdot 1,76 = 0,21 \text{ К}, \\ \theta_{\text{тс}} &= 66,7, \\ \theta_{\text{ч}} &= 0,25 \cdot 66,7 [0,7 + 0,47 + (-0,53) - 0,415] - 0,21 = 3,54 \text{ К}.\end{aligned}$$

Расчет температур элементов ГИС согласно принципиальной электрической схеме (см. рис. 8):

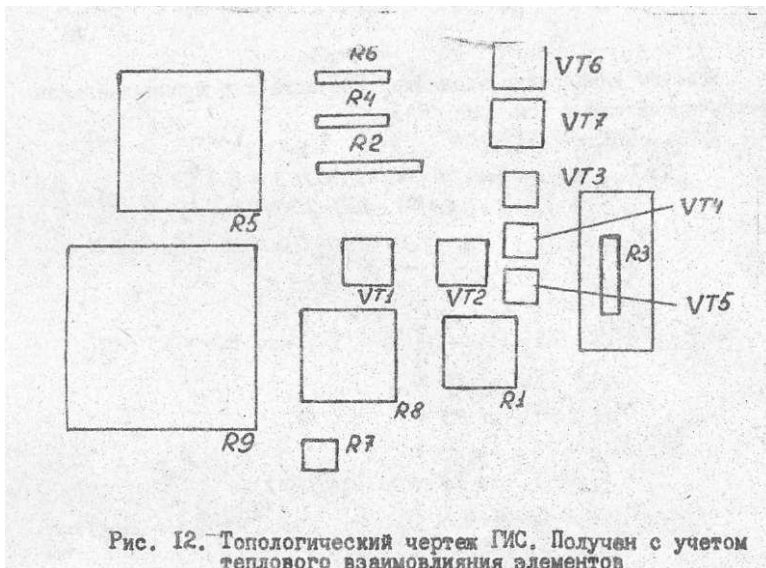
$$\begin{aligned}T_{R3} &= T_K + 1,3 \text{ К}, \\ T_{VT3} &= T_K + 1,76 + 1,46 + 800 \cdot 0,00263 = T_K + 5,3 \text{ К}, \\ T_{VT4} &= T_K + 1,76 + 3,54 + 800 \cdot 0,00263 = T_K + 7,4 \text{ К}, \\ T_{VT5} &= T_K + 1,76 + 5,03 + 800 \cdot 0,00263 = T_K + 8,9 \text{ К}, \\ T_{R1} &= T_K + 2 + 1,43 = T_K + 3,43 \text{ К}, \\ T_{R2} &= T_K + 2,4 \text{ К}, \\ T_{R4} &= T_K + 1,63 \text{ К}, \\ T_{R5} &= T_K + 0,86 \text{ К}, \\ T_{R6} &= T_K + 1,63 \text{ К}, \\ T_{R8} &= T_K + 1,83 \text{ К}, \\ T_{VT1} &= T_K + 1,66 + 800 \cdot 0,00597 = \\ &= T_K + 6,44 \text{ К}, \\ T_{VT2} &= T_K + 5,65 + 800 \cdot 0,0124 = \\ &= T_K + 15,57 \text{ К}, \\ T_{VT6} &= T_K + 2,64 + 800 \cdot 0,009 = \\ &= T_K + 9,84 \text{ К}, \\ T_{VT7} &= T_K + 2,64 + 800 \cdot 0,009 = \\ &= T_K + 9,84 \text{ К}, \\ T_{R7} &= T_R = T_K,\end{aligned}$$

так как перегрев элементов R7 и R9 практически равен 0 (см. табл. 5), где T_K - температура не влияющих и не подверженных влиянию элементов ГИС.

Допустимый диапазон работы большинства транзисторов от -60 до +125°C. Поэтому перегрев на 15,57°C, например на VT2, существенно не влияет на работу элемента.

Если же перегрев не удовлетворяет допустимым значениям,

следует уменьшить влияние тепловыделяющих элементов. В этом случае можно изменить топологию. Например, расположить элементы на большем расстоянии друг от друга так, чтобы зона влияния тепловыделяющего элемента не захватывала соседние (рис. 12).

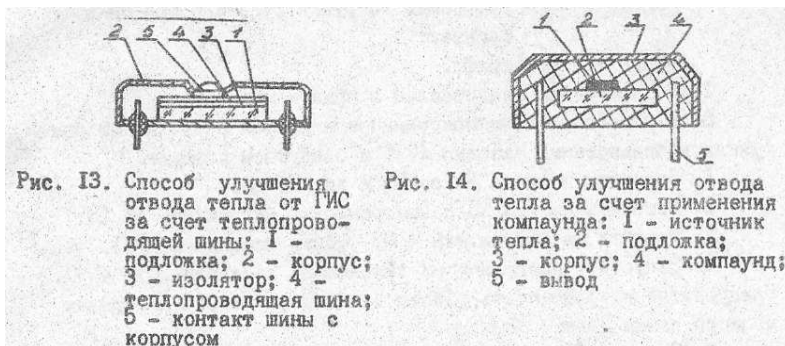


4. Методы улучшения теплового режима ГИС

С целью улучшения теплового режима элементов и компонентов ГИС рекомендуется [2]:

- а) применять подложки с большим коэффициентом теплопроводности (см. табл. 2);
- б) выбирать наибольшую удельную рассеиваемую мощность $10...20$ мВт/мм²;
- в) осуществлять хороший тепловой контакт навесных компонентов с подложкой;
- г) улучшать передачу тепла от подложки к крышке корпуса, применяя теплоотводящие шины, обеспечивающие тепловой контакт с крышкой (рис. 13), заполняя свободные промежутки компаундом (рис. 14);
- д) равномерно распределять по подложке источники тепла;

е) располагать чувствительные к температуре элементы и компоненты ГИС за пределами зон теплового влияния источников с повышенным тепловыделением.



Чтобы обеспечить хороший тепловой контакт полупроводниковых приборов с подложкой, их дополнительно покрывают лаком и компаундом (теплоотвод увеличивается до 30%), припаивают металлизированной торцевой частью к металлизированной области подложки - корпуса или используют принудительное газовое охлаждение конвективного или кондуктивного теплообменов в каналах подложки (материал подложки, например алюминий, диэлектрический слой которого получен путем глубокого анодирования).

5. Расчет тепловых режимов ГИС на ЭВМ

Расчет тепловых режимов ГИС и суммарного перегрева ее элементов автоматизирован с использованием микроЭВМ Мазовия-1016. Структурная схема обобщенного алгоритма расчета тепловых режимов ГИС представлена на рис. 15. Программа расчета реализована на алгоритмическом языке Бейсик, что позволяет осуществлять диалоговый режим работы с программой и в зависимости от полученных результатов принимать решение о конструктивно-технологических доработках, а также о пересчете по программе при новых исходных данных, что сокращает время получения конечного результата.

При расчете на микроЭВМ Мазовия-1016 использована операционная система MS-DOS версия 3.00. Программа записана на диск 5.25 (формат *MS-DOS*) с использованием файлов:

SOUR, EXE - программа расчета;

RUSS.COM- программа загрузки русского шрифта;
SOUR.BAS - исходный текст на языке Бейсик;
SOUR.DOC инструкция по эксплуатации;
LFONT.COM - программа загрузки русского шрифта в принтер;
FXBO.FNT - шрифт.

Текст программы представлен в приложении I.

Ввод и эксплуатация программы в микроЭВМ проводят по инструкции использования Мазовия-1016 в следующем порядке:

1. Включить питание микроЭВМ и дисковода,
2. Вставить диск 5,25 с программой в накопитель А: (В:).
3. Перейти на накопитель А В, набрав команду А:(В:).
4. Запустить программу на выполнение командой *SOUR* Предусмотрена возможность работы с интерпретатором алгоритмического языка Бейсик *Basica* .

1. Загрузить русский шрифт, набрав команду ? : *RUSS* , где ? - имя накопителя (А.В.С,.....).

2. Вызвать интерпретатор языка Бейсик , набрав команду *Basica*

3. Перейти в графический режим работы дисплея, набрав команду *SCREEN* № 2.

4. Запустить программу на выполнение, набрав команду *RUN ? : SOURLE BAS* , где ? - имя накопителя (А.В.С,.....)

5. После окончания расчетов для выхода в систему набрать команду *SYSTEM* .

Для получения результатов расчета на печатающем устройстве типа Д-100 необходимо:

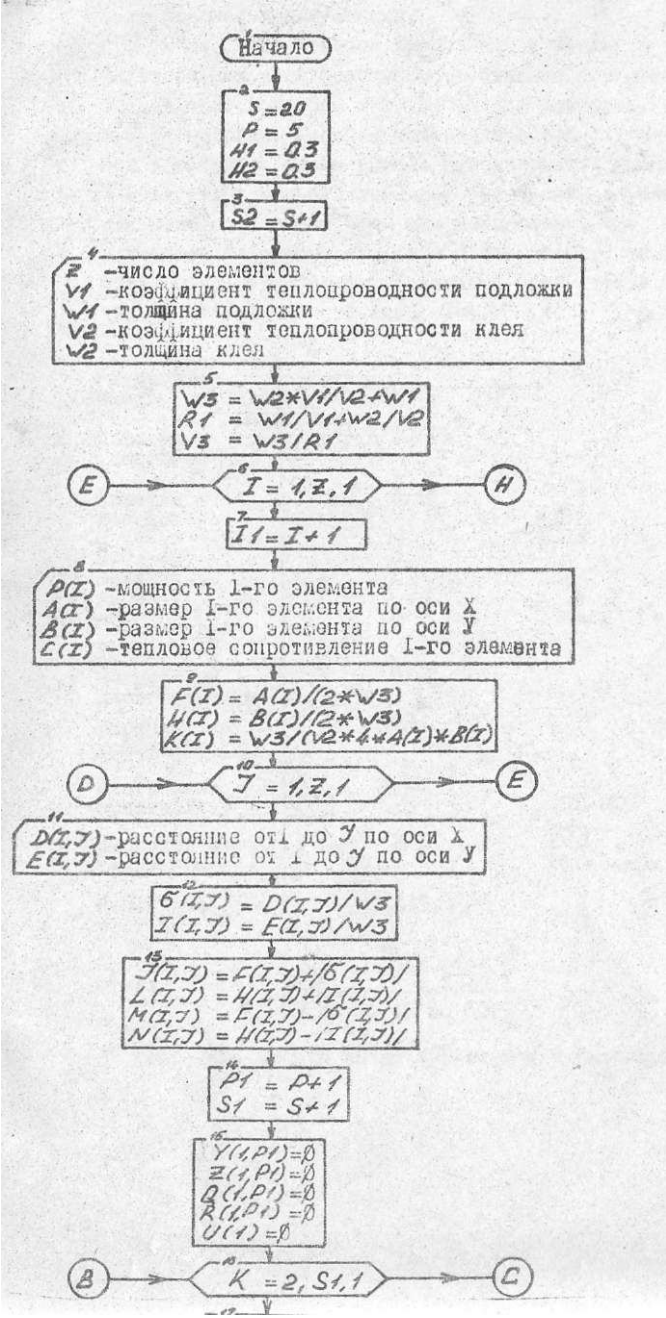
- а) вставить бумагу и включить печатающее устройство;
- б) загрузить в Д-100 русский шрифт;
- в) нажать одновременно клавиши *Ctrl* -I и *Prtsc* ;
- г) после окончания печати результатов расчета повторить п.в.

Контрольный пример расчете тепловых режимов ГИС на ЭВМ приведен в приложении 2.

6. Характеристики условий возникновения

отказов в ИС и МП

Отказы, возникающие в ИС и МП, могут быть вызваны следующими основными причинами:



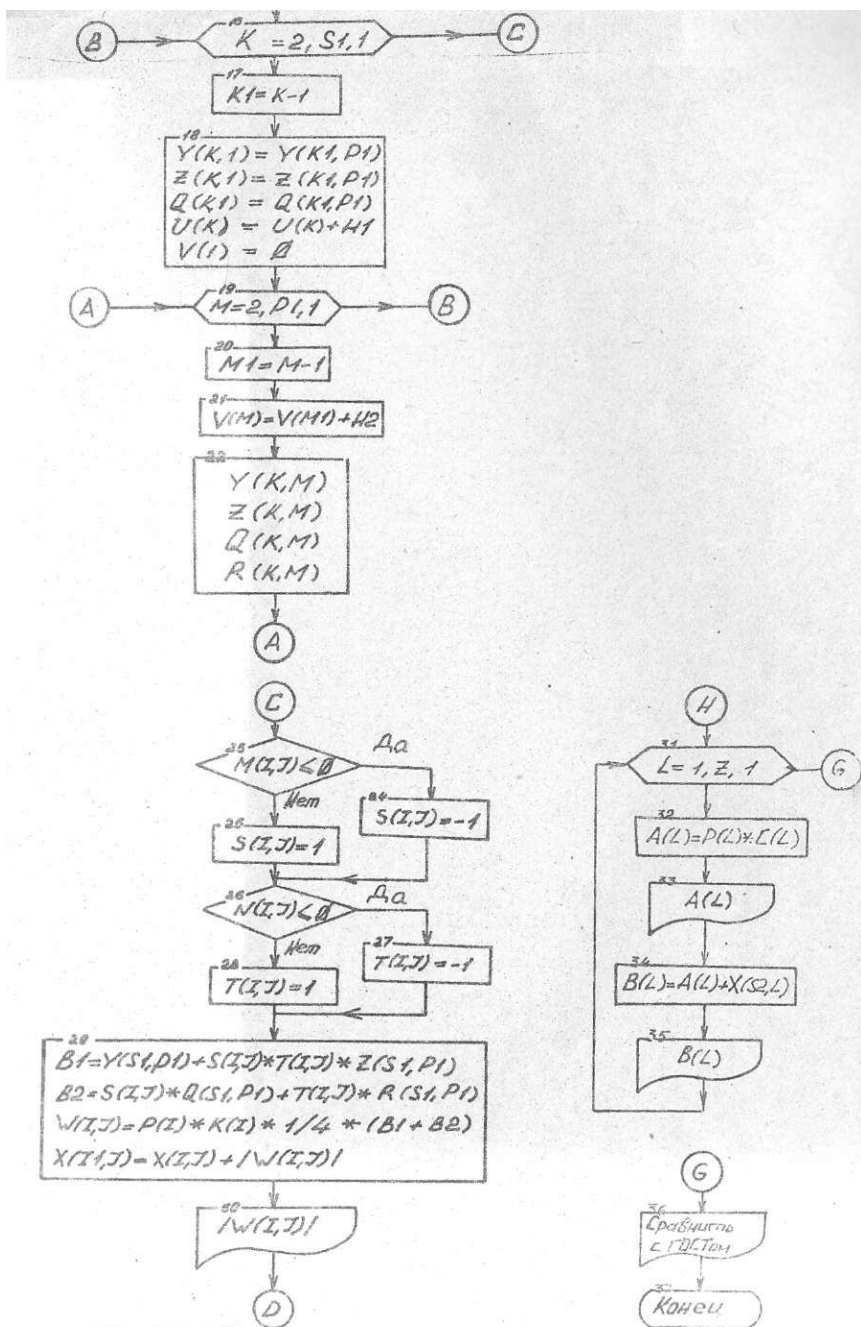
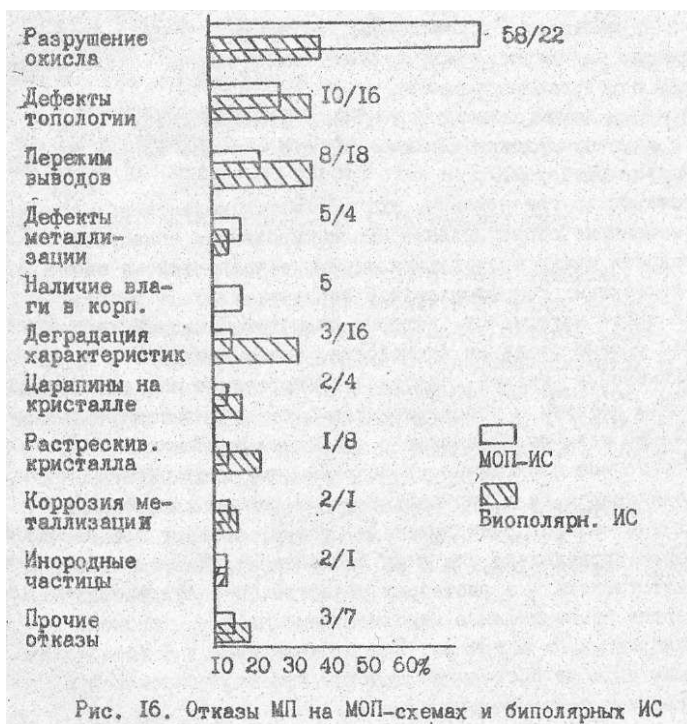


Рис. 15. Структурная схема обобщенного алгоритма расчета тепловых режимов ГЭС

технологические факторы;
 ошибки проектирования;
 физические особенности материалов;
 условия эксплуатации.

Общая доля отказов, связанных с влиянием технологических факторов, из всей совокупности отказов достигает 65...70% для биполярных приборов и 50...55% для приборов, выполняемых по МОП-технологии, Главная причина в обоих случаях [4] - отклонения в толщинах слоев окисла и поликристаллического кремния. В областях с меньшей толщиной слоев схем глубина травления оказывается большей, чем это необходимо, что, например, приводит к меньшей толщине затворов в МОП-приборах, вследствие чего транзисторы не отключаются, возникают токи утечки и прочие отклонения работоспособности (рис. 16).



Учитывая общую тенденцию к уменьшению толщины окисных слоев, вызванную уменьшением размеров МС, БИС и СБИС, следует считать, что указанная причина отказов будет в дальнейшем иметь все возрастающее значение.

Следующей причиной отказов является нестабильность уровня легирования, вызывающая отклонения сопротивления контактов, параметров диэлектрических слоев и т.д.

Погрешности размеров элементов при литографическом формировании топологии схемы и совмещения фотомасок с элементами схем, сформированных на предыдущих этапах технологического процесса, приводят к отклонениям выходных параметров приборов. Аналогичные отказы вызывают и отклонения в размерах пластин кремния, достигающие $2 \cdot 10^{-3} \%$ от размеров пластины.

Основной причиной возникновения отказов, связанных с ошибками проектирования, является недостаточно точный учет возможного отклонения параметров. Так, например, отклонения уровня легирования подложки или дозы ионной имплантации, толщины окисла затвора изменяют пороговое напряжение.

Отклонения длины затвора и глубины перехода истока и стока приводят к изменению длины канала, что существенно влияет на быстродействие приборов.

Существуют другие причины, которые могут вызвать появление отказов: изменение сопротивления имплантированных областей, отклонения емкости между проводящими слоями и подложкой, а также вариация контактных сопротивлений и токов утечки.

Особенности материалов, которые не могут быть учтены при современном уровне развития технологии, также могут быть причинами возникновения отказов. Наиболее существенное влияние оказывают точечные дефекты - несовершенства областей пластин, размеры которых весьма малы по сравнению с размерами кристаллов.

Недостаточное соблюдение требований вакуумной гигиены приводит к появлению пыли в производственных помещениях, а пыль, размеры частиц которой составляют 1...3 мкм, создает предпосылки к разрывам проводников или к их отслаиванию. Твердые частицы могут присутствовать и в растворах резистов, в результате в схемах появляются изолированные окислительные дефекты, проколы в диэлектрических слоях и прочее. Присоединившиеся к фотомаскам частицы пыли создают постоянные дефекты при экспонировании и других операциях фотолитографирования.

Перечисленные выше дефекты, заложенные в МС, БИС и СБИС, из-за несовершенства технологических процессов, ошибок проектирования и физических особенностей используемых материалов в большинстве случаев не выявляются при процессах контроля, проверки выходных параметров и термотренировок приборов. Однако при достаточно длительной эксплуатации изделий заложенные в них дефекты реализуются в виде отказов.

Например, уменьшение толщины окисла затвора ($\delta = 20 \dots 25 \text{ нм}$) приводит к его пробоям при напряжениях более 20 В (человек генерирует заряды статического электричества до 16...20 кВ).

Загрязнение примесями обуславливает появление примесных ионов, дрейфующих под действием электрического тока и повышения температуры. Пережим выводов при сварке приводит к их отслаиванию под влиянием циклических механических нагрузок. Низкое качество металлизированных слоев - к разрывам проводников на ступеньках окисла, коррозии и электромиграции частиц.

Кроме необратимых отказов в схемах могут реализовываться и самовосстанавливаемые отказы - сбои, вызываемые α -частицами за счет генерации электронно-дырочной плазмы вдоль траектории частицы, приводящие к потере информации. Например, в памяти емкостью 16 Кбайт происходит до одного сбоя на 1000 ч работы ИС.




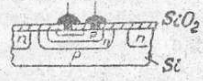

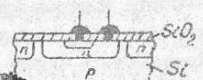
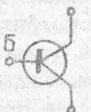
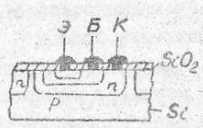

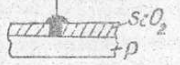


7. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

При расчетах надежности относительно небольших ИС, в состав которых входят несколько десятков активных элементов, допустимо пользоваться стандартными методами расчета электронных схем, в соответствии с которыми схема представляется в виде совокупности дискретных ЭРЭ, образованных по правилам, вытекающим из элементарных схем, приведенных в табл. 6. Ориентировочные данные об интенсивностях отказов элементарных ЭРЭ и коммутирующих элементов приведены также в табл. 6.

Некоторые уточнения характеристик интенсивностей отказов можно получить, используя данные табл. 7 из [6], которые справедливы для температуры $t^{\circ} = 65^{\circ}\text{C}$ и коэффициента электрической нагрузки $k_H = 0,7$.

Таблица 6

Интенсивности отказов ЭРЭ в твердотельном исполнении

Наименование элемента схемы	Условное обозначение	Схематическое изображение в твердотельном исполнении	Интенсивность отказов
Резистор			$3 \cdot 10^{-9}$
Конденсатор			$5 \cdot 10^{-9}$
Диод			$3 \cdot 10^{-8}$
Транзистор			$5 \cdot 10^{-8}$
Вход питания			$1 \cdot 10^{-9}$
Вход сигнала			$2 \cdot 10^{-9}$

Примечание. На каждый дополнительный эмиттер транзистора интенсивность отказов увеличивается на $2 \cdot 10^{-8} I/\text{ч}$

Таблица 7

Расчетные интенсивности отказов компонентов ЭРЭ

Вид ЭРЭ	Интенсивность отказов	Вид ЭРЭ	Интенсивность отказов
1	2	3	4
Тонкопленочные и толстопленочные резисторы	$1 \cdot 10^{-9}$	Керамические подложки	$5 \cdot 10^{-6}$
Танталовые конденсаторы	$8 \cdot 10^{-9}$	Нихромовые пленки	$1 \cdot 10^{-7}$

1	2	3	4
Кремниевые конденсаторы	$1 \cdot 10^{-8}$	Нитридтанталовые пленки	$7 \cdot 10^{-12}$
Навесные керамические конденсаторы	$5 \cdot 10^{-10}$	Анодированные пленки из нитридтантала	$5 \cdot 10^{-10}$
Полистироловые конденсаторы	$7 \cdot 10^{-9}$		

Полученные по стандартным методам интенсивности отказов интегральных микросхем находятся в пределах $10^{-6} \dots 10^{-8} 1/ч$, что довольно точно совпадает с данными анализа результатов эксплуатации и специально поставленных экспериментов [5]. Основные отклонения объясняются тем, что указанная выше методика расчета не учитывает дополнительные виды отказов: обрывы соединительных проводников, сколы шариков кофара и прочие нарушения работоспособности, которые не имеют четких количественных оценок.

Однако в общем потоке отказов, интервальная оценка которого также выражается λ -характеристикой, приведенные оценки имеют относительно стабильную устойчивость. Это свойство и положено в основу излагаемых далее методов расчета надежности ВИС, СБИС и МПС.

8. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ МПС

Количественные характеристики надежности микроэлектронной аппаратуры (МЭА), выполняемой на основе больших (БИС) и сверх больших (СБИС) интегральных схем, существенно зависят от схемотехнических, конструктивно-технологических и технологических решений.

Методы прогнозирования характеристик надежности МЭА, в частности микропроцессоров (МП), должны учитывать: физическую природу возникающих отказов, сложность МЭА, особенности технологических процессов изготовления и сборки МЭА, надежность отдельных конструктивных элементов ЭРЭ и ИС, входящих в состав микросборки и результаты испытаний тестовых структур. Однако последнее требование весьма трудно реализовать в реальном масштабе времени из-за высоких уровней надежности современной МЭА.

Высокие степени интеграции современных БИС и СБИС, насчитывающих в своем составе от 10^3 до 10^7 вентилях, практически исключают расчет надежности, проводимый на моделях, состоящих из отдельных диодов, транзисторов, резисторов и прочее. В соответствии с особенностями современной технологии изготовления МЭА, большинство ее компонентов, таких как кристалл, корпус, контактные узлы к другим выполняются замкнутыми технологическими циклами и характеризуются физически независимыми видами отказов. Это позволяет ввести количественные характеристики надежности для компонентов МЭА в виде интенсивностей отказов, корректируемых соответствующими коэффициентами, учитывающими сложность, конструктивные особенности и виды технологических процессов изготовления МЭА,

В [4] предложена модель расчета надежности МЭА (рис. 17), которая может быть использована для прогнозирования характеристик надежности широкой номенклатуры БИС, СБИС и главным образом МП, поскольку в ней отражены существенные схмотехнические особенности организации МП, а именно принципы построения и технологической реализации постоянных запоминающих устройств ПЗУ.

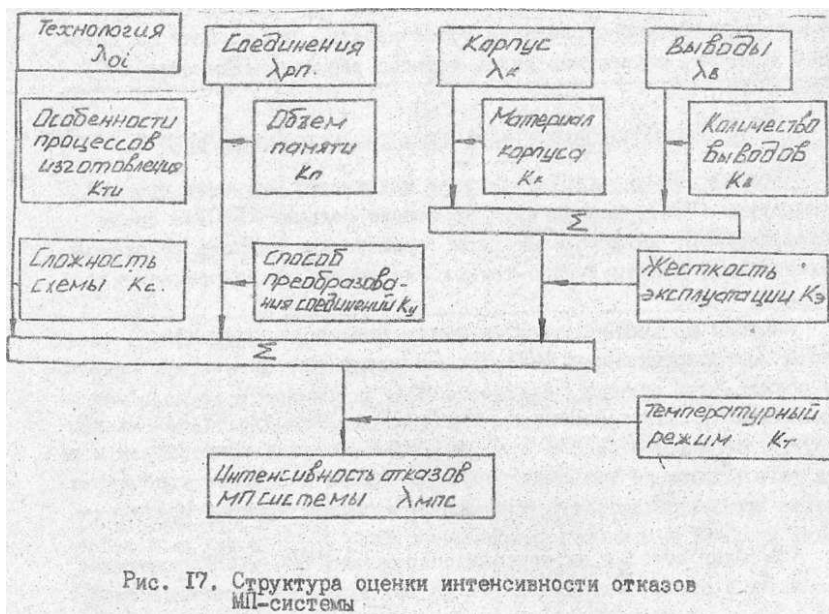


Рис. 17. Структура оценки интенсивности отказов МП-системы

Этим, в основном, отличаются МП от МЭА на БИС и СБИС другого функционального назначения, так как в их составе обязательно присутствуют цифровые устройства с жесткой логической структурой, программно-управляемые одной БИС,

Структура модели прогнозирования надежности (рис, 17), которая представляет выражение для оценки интенсивности отказов всего МП, состоит из трех основных групп λ -характеристик; интенсивностей отказов главных конструктивных элементов (корпуса λ_k и выводов λ_B), интенсивностей отказов, учитывающих особенности технологии изготовления кристалла λ_T , методов создания $\lambda_{\text{ЭН}}$ или разрушения перемычек $\lambda_{\text{РП}}$

Выражение, позволяющее оценить интенсивность отказов МП, можно записать в следующем виде :

$$\lambda_{\text{МП}}(t) = [\lambda_{\text{ОИ}}(t) k_{\text{ТИИ}} k_{\text{СП}} + \lambda_{\text{РП}} k_{\text{П}} k_{\text{УР}} + \lambda_{\text{СЭ}} k_{\text{СЭ}} + (\lambda_B k_B + \lambda_k k_k) k_T] k_{\text{Э}}, \quad (12)$$

где кроме λ -характеристик используются коэффициенты, учитывающие:

$k_{\text{ТИИ}}$ - сложность изготовления МП различными технологическими процессами;

$k_{\text{СП}}$ - конструктивную сложность МП в зависимости от степени интеграции;

$k_{\text{П}}$ - количество перемычек, которые необходимо удалить в процессе программирования памяти;

$k_{\text{УР}}$ - влияние метода удаления перемычек;

$k_{\text{СЭ}}$ - количество соединений, которые необходимо создать в процессе программирования памяти;

$k_{\text{СП}}$ - влияние метода создания перемычек;

k_B - количество контактных выводов;

k_k - конструктивные и технологические особенности изготовления корпуса МП;

$k_{\text{Э}}$ - жесткость условий эксплуатации МП;

k_T - тепловой режим МП.

Аналитические выражения отдельных слагаемых (компонентов ненадежности) в (12) приводятся ниже.

1. Критерии, отражающие влияние технологии изготовления кристаллов МП.

Сложность современных процессов изготовления и

контроля МП, определяющую его ненадежность, можно охарактеризовать следующим выражением:

$$\lambda_{\text{техн}} = \lambda_{oi}(t) k_{\text{ти}i} k_{\text{сн}}, \quad (13)$$

где λ_{oi} - базовая интенсивность отказов кристаллов МП, выполненных по i-й технологии. В [5] приводится выражение, позволяющее оценить базовую интенсивность отказов в зависимости от времени отработки МП

$$\lambda_{oi} = \lambda_{yi} + 2,045 \cdot 10^{-6} \exp(t - 1,28t), \quad (14)$$

где λ_{yi} - установившееся значение интенсивности отказов, характерное для данной технологии, определяется по табл. 7.

t - календарное время, годы.

Количественные значения критериев в зависимости от типов транзисторов, отражающие основные особенности технологии для МОП-схем (p - МОП, n - МОП, КМОП), и биполярных схем (ИИЛ, ТТЛШ, ЭСЛ) представлены в табл. 8.

Таблица 8

Зависимость параметров МП от технологии изготовления

Технология изготовления	Минимальная сложность r , шт.	Коэффициент $k_{\text{ти}}$	Установившееся значение λ_{yi} , 1/ч
p-МОП	$2 \cdot 10^3$	1,0	0,1
n-МОП	$3 \cdot 10^3$	1,2	0,01
КМОП	$1 \cdot 10^3$	2,5	0,018
ТТЛШ	$3 \cdot 10^2$	2,0	0,18
ЭСЛ	$5 \cdot 10^2$	3,5	0,2
ИИЛ	$3 \cdot 10^3$	1,8	0,2

Таким образом, необходимое для вычислений по зависимости (11) значение коэффициента $k_{\text{ти}}$ и установившееся значение интенсивности отказов λ_{yi} для наиболее известных технологий полностью определяются данными табл. 8.

Для определения коэффициента сложности $k_{\text{сн}}$, учитывая своеобразие зависимости интенсивности отказов от степени интег-

рации [5] , методами сплайн-функций получили системы полиномов, позволяющие

оценивать $K_{сн} = S_{сн}$, исходя из интерполяционных уравнений;

$$\begin{aligned}
 & - 1,3 x_i^3 + 3,9 x_i^2 + 1,4 x_i - 3,0 \quad \text{при } 0,4 \cdot 10^3 \dots 1,8 \cdot 10^3 \\
 & 4,37 x_i^3 - 30,12 x_i^2 + 69,57 x_i - 48,62 \quad \text{при } 2 \cdot 10^3 \dots 9 \cdot 10^3 \\
 & - 3,07 x_i^3 + 38,84 x_i^2 - 131,3 x_i + 152,2 \quad \text{при } 10 \cdot 10^3 \dots 45 \cdot 10^3
 \end{aligned}$$

Необходимые для вычислений по одному из уравнений (13) значения x_i находят по табл. 9 в зависимости от степени интеграции (числа активных элементов n в МП).

Таблица 9

Значения коэффициентов интерполяционных уравнений

Поколения МП	Степень интеграции микропроцессоров							
	Число активных элементов $n \cdot 10^3$				Интерполяционные точки x_i			
БИС (I)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,12	1,25	1,37
	1,2	1,4	1,6	1,8	1,5	1,62	1,75	1,87
СБИС (II)	2,0	3,0	4,0	5,0	2,0	2,12	2,25	2,37
	6,0	7,0	8,0	9,0	2,5	2,62	2,75	2,87
СВБИС (III)	10	15	20	25	3,0	3,15	3,25	3,37
	30	35	40	45	3,5	3,62	3,75	3,87

2. Критерии, учитывающие особенности технологии изготовления ЗУ. Вид запоминающего устройства (ЗУ) определяется конструктивными особенностями запоминающих элементов и способами записи или стирания информации. Так для постоянных ЗУ (ПЗУ), использующих в качестве запоминающих элементов диоды и биполярные транзисторы, запись информации осуществляется, главным образом, созданием внутрисхемных соединений с помощью металлизации через фотошаблоны.

В программируемых постоянных ЗУ (ППЗУ), использующих элементы с индуцированным каналом (КМОП-элементы), информация заносится путем пережигания плавких перемычек электрическим током, лучом лазера или электрическим пробоем соответствующих диодов.

В репрограммируемых ПЗУ (РПЗУ) запись информации осуществляется путем лавинной инжекции, при этом запоминающими элемен-

тами являются МНОП-структуры и МОП-транзисторы с плавающим затвором.

Интенсивность отказов, характеризующая надежность технологических процессов программирования памяти методами разрушения соединений, оценивается зависимостью

$$\lambda_p = \lambda_{pr} k_n k_{yr}, \quad (16)$$

где λ_{pr} - базовая интенсивность отказов, связанная с возможностью восстановления разрушенных перемычек, определяется особенностями конструкции ЗУ (табл. 10);

k_{yr} коэффициент, учитывающий способ удаления перемычек (пережог током, удаление лазером, электронным лучом и пр.), определяется по табл. 10;

k_n коэффициент, зависящий от количества удаляемых перемычек, определяется методом сплайн-функций [5] (в первом приближении можно принять $k_n = k_{cn}$).

Для учета особенностей технологических процессов создания перемычек в процессе формирования ЗУ в расчеты надежности МП вводят интенсивность отказов λ_c , характеризующую возможность самопроизвольного разрушения образованных различными технологическими приемами перемычек:

$$\lambda_c = \lambda_{cn} k_{cn}, \quad (15)$$

где λ_{cn} - базовая интенсивность отказов, характеризующая местоположение и конструктивные особенности создаваемой перемычки, определяется по табл. II;

k_{cn} коэффициент, учитывающий количество образованных перемычек (приближенно $k_{cn} = k_{cn}$).

3. Критерии, учитывающие конструктивные особенности МП. Важнейшими составляющими интенсивности, отказов λ_{mr} , зависящими от конструктивных особенностей МП, являются интенсивности отказов корпуса λ_k и выводов λ_b

В общем случае вероятности отказов корпусов различных конструкций для металлических и металлокерамических корпусов зависят от длины сварных (паяных) швов, для пластмассовых корпусов - от площади их поверхности. Этими условиями и определяется интенсивность диффузии воздушных паров внутрь корпусов, являющаяся главной причиной возникновения отказов.

Таблица 10

Программирование памяти МП методами разрушения соединений

Тип ЗУ	Постоянное ЗУ (ПЗУ)	Программируемое ЗУ (ППЗУ)	Репрограммируемое ЗУ (РПЗУ)
Элемент программирования	Металлизированное соединение	Плавкая перемычка	Подзатворный диэлектрик
Способ записи	Фотошаблон, контактное окно $K_{y/r} = 0,5$	Пережог током $K_{y/r} = 2,0$ Пережог лазером $K_{y/r} = 1,0$ Электрический пробой диодов $K_{y/r} = 2,5$ Пережог электронным лучом $K_{y/r} = 3,0$	Лавинная инжекция $K_{y/r} = 1,5$ Плавающий затвор $K_{y/r} = 1,8$
Интенсивность отказов из-за восстановления перемычек λ_{pr}	$1 \cdot 10^{-9}$	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Таблица II

Программирование памяти методами образования соединений

Метод образования соединений	Интенсивность отказов $\lambda_{ст}$
Замыкаемые лазером контакты:	
между уровнями металлизации	$1,5 \cdot 10^{-8}$
в зазорах металлизации	$0,8 \cdot 10^{-8}$
между металлом и диффузионной областью	$1 \cdot 10^{-8}$
Программируемые электронным лучом плавкие перемычки из поликремния	$0,5 \cdot 10^{-8}$

На практике для всех типов корпусов принимают одинаковую базовую интенсивность отказов $\lambda_{к} = 4,8 \cdot 10^{-8}$ 1/ч. Учет влияния

конструкции корпуса характеризуют коэффициентом k_k , определяемым по табл. 12,

Таблица 12

Значения коэффициента качества корпуса k_k

Тип корпуса	
Плоский с числом выводов менее 16	1,3
Металлокерамический с двухрядным расположением выводов	1,5
Керамический	2,0
Пластмассовый	3,0

Интенсивность отказов выводов определяют базовым значением

$\lambda_B = 3,7 \cdot 10^{-9} \text{ I/ч}$ и коэффициентом k_B , учитывающим число выводов. Обычно

принимают, что k_B равно числу выводов n .

Физико-химические процессы деградации конструкции МП, связанные главным образом с влиянием температуры, принято учитывать отношением интенсивностей отказов λ_p МС, соответствующих рабочей температуре и интенсивности λ_{op} той же МС, установленной для температуры, принимаемой за базовую, обычно 20°C

$k_T = \lambda_p / \lambda_{op}$ (рис. 18).

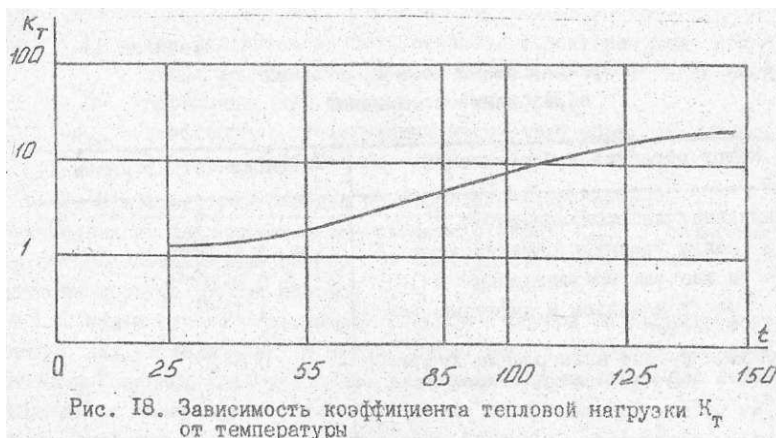


Рис. 18. Зависимость коэффициента тепловой нагрузки k_T от температуры

Все перечисленные составляющие интенсивности отказов МП существенно зависят от уровня механических воздействий и, в неко-

торой степени, от своеобразия климатических факторов, свойственных определенным носителям аппаратуры. К таким, например, можно отнести состав атмосферы - наличие активных газообразных соединений, солей и пр. Принято оценивать влияние подобных факторов и уровня механических воздействий при помощи коэффициента эксплуатации $k_э$, значение которого определяют по табл. 13.

Таблица 13

Значение коэффициента жесткости эксплуатации $k_э$

Условия эксплуатации	$k_э$
Лабораторные	0,2
Космический полет по стационарной орбите	0,45
Наземная аппаратура	1,0
Авиационная пилотируемая аппаратура	6,2
Корабельная аппаратура в отсеках	8,0
Авиационная непилотируемая аппаратура	8,6
Корабельная незащищенная аппаратура	8,8
Запуск спутника или ракеты	20,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. - М.: Сов.радио, 1976. - 232 с.
2. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. - М.: Радио и связь, 1982.-С 22-28.
3. Чердаков Е.А. Гибридные интегральные схемы: Методические указания к курсовому проектированию по курсу "Конструирование и технология микросхем" .-М.; МВТУ, 1985,-С. 6-13.
4. Технология СВИС: Пер.с англ./Под ред. С.Зи.-М.: Мир, 1986-534с.
5. Петров Б.М. Методы расчета и обеспечения надежности микропроцессорных систем.- М.:Знание, 1986. - 145 с.
6. Казеннов Г.Г., Кремнев В.Я. Полупроводниковые интегральные схемы. Сер. микроэлектроника, вып. 2.- М.: Высшая школа, 1987.- С. ПЗ-П15.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРОГРАММА ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА

```

10 DIM A(16),B(16),C(16),F(16),K(16),H(16),P(16),U(21)
20 DIM V(21),D(16,16),N(16,16),E(16,16),G(16,16),I(16,16)
25 DIM J(16,16)
30 DIM L(16,16),M(16,16),S(16,16),T(16,16),W(16,16)
40 DIM X(17,16),Y(21,21),Z(21,21),Q(21,21),R(21,21)
50 PRINT "ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ ГИС ";
60 INPUT Z
62 S2=Z+1
70 S=20
90 P=5
100 H1=.3
120 H2=H1
130 PRINT "ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ"
140 PRINT "ПОДЛОЖКИ ";
150 INPUT V1
160 PRINT "ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ ПОДЛОЖКИ ";
170 INPUT W1
180 PRINT "ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ"
190 PRINT "КЛЕЯ ";
200 INPUT V2
210 PRINT "ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ СЛОЯ КЛЕЯ ";
220 INPUT W2
230 W3=W2*V1/V2+W1
240 R1=W1/V1+W2/V2
250 V3=W3/R1
260 FOR I=1 TO Z
261 I1=I+1
270 PRINT "ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА "; I;
280 INPUT P(I)
290 PRINT "ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА "; I; " ПО ОСИ X ";
300 INPUT A(I)
310 PRINT "ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА "; I; " ПО ОСИ Y ";
320 INPUT B(I)
330 PRINT "ВВЕДИТЕ ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ"
340 PRINT "ЭЛЕМЕНТА "; I;
350 INPUT C(I)

```

```

360 F(I)=-A(I)/(2*W3)
370 H(I)=-B(I)/(2*W3)
380 K(I)=-W3/(V2*4*A(I)*B(I))
390 FOR J=1 TO Z
400 PRINT "ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА ";I;" ДО"
410 PRINT "ЭЛЕМЕНТА ";J;" ПО ОСИ X ";
420 INPUT D(I,J)
430 PRINT "ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА ";I;" ДО"
440 PRINT "ЭЛЕМЕНТА ";J;" ПО ОСИ Y ";
450 INPUT E(I,J)
460 G(I,J)=D(I,J)/W3
470 I(I,J)=E(I,J)/W3
480 J(I,J)=F(I)+ABS(G(I,J))
490 L(I,J)=H(I)+ABS(I(I,J))
500 M(I,J)=F(I)-ABS(G(I,J))
510 N(I,J)=H(I)-ABS(I(I,J))
520 P1=P+1
530 S1=S+1
540 Y(1,P1)=0
550 Z(1,P1)=0
560 Q(1,P1)=0
570 R(1,P1)=0
580 U(1)=0
590 FOR K=2 TO S1
600 K1=K-1
610 Y(K,1)=Y(K1,P1)
620 Z(K,1)=Z(K1,P1)
630 Q(K,1)=Q(K1,P1)
640 R(K,1)=R(K1,P1)
650 U(K)=U(K1)+H1
660 V(1)=0
670 FOR M=2 TO P1
680 M1=M-1
690 V(M)=V(M1)+H2
700 A1=-SQR(U(K)*U(K)+V(M)*V(M))
701 A2=A1*U(K)*V(M)
702 A3=4/(3.1459*3.1459*A2)
703 A4=(SIN(U(K)*L(I,J)))*(SIN(V(M)*J(I,J)*A1))
704 B5=SIN(U(K)*ABS(N(I,J)))

```

```

706 A6=SIN(U(K)*L(I,J))
708 A7=A6*(SIN(V(M)*ABS(M(I,J))*A1))
707 A8=SIN(U(K)*ABS(N(I,J)))
708 A9=A8*(SIN(V(M)*M(I,J))*A1)
709 Y(K,M)=Y(K,M1)+A4*A3*H1*H2
711 B6=SIN(V(M)*ABS(M(I,J))*A1)
712 A5=B5*B6
713 Z(K,M)=Z(K,M1)+A5*A3*H1*H2
720 Q(K,M)=Q(K,M1)+A7*A3*H1*H2
730 R(K,M)=R(K,M1)+A9*A3*H1*H2
840 NEXT M
850 NEXT K
860 IF M(I,J)<=0 THEN 890
880 GOTO 930
890 S(I,J)=-1
891 GOTO 950
930 S(I,J)=1
950 IF N(I,J)<=0 THEN 970
960 GOTO 1010
970 T(I,J)=-1
980 GOTO 1020
1010 T(I,J)=1
1020 B1=Y(S1,P1)+S(I,J)*T(I,J)*Z(S1,P1)
1025 B2=S(I,J)*Q(S1,P1)+T(I,J)*R(S1,P1)
1030 W(I,J)=P(I)*K(I)*.25*(B1+B2)
1040 X(I1,J)=X(I,J)+ABS(W(I,J))
1041 PRINT "ОСНОВНОЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА ";J;" ОТ ЭЛЕМЕНТА ";I;
1042 PRINT "РАВЕН ";ABS(W(I,J));"ГРАД.С"
1050 NEXT J
1060 NEXT I
1070 FOR L=1 TO Z
1080 A(L)=P(L)*C(L)
1090 PRINT "ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА ";L;
1100 PRINT "РАВЕН ";A(L);"ГРАД.С"
1110 B(L)=A(L)+X(S2,L)
1120 PRINT "СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА ";L;
1130 PRINT "РАВЕН ";B(L);"ГРАД.С"
1133 PRINT "СРАВНИТЕ СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА ";L
1134 PRINT "С ДОПУСТИМЫМ ПО ГОСТ. НА ДАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ. "

```

1136 NEXT L
 1137 PRINT "ПРИ ПРЕВЫШЕНИИ ДОПУСТИМОГО НАГРЕВА "
 1138 PRINT "НЕОБХОДИМО УМЕНЬШИТЬ МОЩНОСТЬ РАССЯНИЯ "
 1139 PRINT "ИЛИ УВЕЛИЧИТЬ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ НИМИ "
 1140 PRINT "*****"

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИМЕР

```

Run
ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ ПИС ? 3
ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПОДЛОЖКИ ? 1.7
ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ ПОДЛОЖКИ ? 6e-4
ВВЕДИТЕ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
КЛЕЯ ? 0.3
ВВЕДИТЕ ТОЛЩИНУ СЛОЯ КЛЕЯ ? 1e-4
ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ РАССЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА 1 ? 0.5
ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ X ? 1.8e-3
ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ Y ? 1.8e-3
ВВЕДИТЕ ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТА 1 ? 5
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ X ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ Y ? 0
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1 ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 РАВЕН 79.45987 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ X ? 3e-3
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ Y ? -2e-3
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2 ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 РАВЕН 51.50027 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ X ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ Y ? -2e-3
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3 ОТ ЭЛЕМЕНТА 1 РАВЕН 4.398346 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ РАССЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА 2 ? 0.15
ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ X ? 1.8e-3
ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ Y ? 1.8e-3
ВВЕДИТЕ ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТА 2 ? 5
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ X ? -3e-3
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ Y ? 2e-3
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1 ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 РАВЕН 15.45008 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ X ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ Y ? 0
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2 ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 РАВЕН 23.83796 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ X ? -3e-3
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ Y ? 0
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3 ОТ ЭЛЕМЕНТА 2 РАВЕН 12.51097 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ МОЩНОСТЬ РАССЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА 3 ? 0.311
ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ X ? 3.9e-3
  
```

ВВЕДИТЕ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ Y ? $3.9e-3$
ВВЕДИТЕ ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ЭЛЕМЕНТА 3 ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ X ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 1 ПО ОСИ Y ? $3e-3$
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1 ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 РАВЕН .6650502 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ X ? $4e-3$
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 2 ПО ОСИ Y ? 0
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2 ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 РАВЕН 5.901263 ГРАД.С
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ X ? 0
ВВЕДИТЕ РАССТОЯНИЕ ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 ДО
ЭЛЕМЕНТА 3 ПО ОСИ Y ? 0
ФОНОВЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3 ОТ ЭЛЕМЕНТА 3 РАВЕН 13.47592 ГРАД.С
ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1 РАВЕН 2.5 ГРАД.С
СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1 РАВЕН 98.075 ГРАД.С
СРАВНИТЕ СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 1
С ДОПУСТИМЫМ ПО ГОСТ. НА ДАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ.
ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2 РАВЕН .75 ГРАД.С
СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2 РАВЕН 81.9895 ГРАД.С
СРАВНИТЕ СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 2
С ДОПУСТИМЫМ ПО ГОСТ. НА ДАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ.
ВНУТРЕННИЙ ТЕПЛОВОЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3 РАВЕН 0 ГРАД.С
СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3 РАВЕН 30.38524 ГРАД.С
СРАВНИТЕ СУММАРНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ЭЛЕМЕНТА 3
С ДОПУСТИМЫМ ПО ГОСТ. НА ДАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ.
ПРИ ПРЕВЫШЕНИИ ДОПУСТИМОГО НАГРЕВА
НЕОБХОДИМО УМЕНЬШИТЬ МОЩНОСТЬ РАССЕЯНИЯ
ИЛИ УВЕЛИЧИТЬ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ НИМИ

Ok

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Конструкции ГИС. Выбор тепловой модели	3
2. Оценка тепловых режимов ГИС	5
3. Расчет температуры элементов ГИС и определение их взаимовлияния	14
4. Методы улучшения теплового режима ГИС	24
5. Расчет тепловых режимов ГИС на ЭВМ	25
6. Характеристики условий возникновения отказов в ИС и МП	26
7. Расчет надежности интегральных схем	29
8. Прогнозирование характеристик надежности МПС	31
Литература.....	39
Приложения	40

Редакция заказной литературы
Евгений Александрович Чердаков
Анатолий Николаевич Чеканов
Алексей Викторович Еланцев

Проектирование топологии
и компоновка ГИС с учетом тепловых режимов

Заведующая редакцией Н.Г.Ковалевская
Редактор Г.А.Нилова Корректор
Л.И.Малютина

Подписано в печать 05.01.90. Формат 60x90/16. Бумага типограф. № 2. Усл.печ.л. 3,0.
Уч.-изд.л. 2,6 + 2 вкл. Тираж 500 экз.Изд.№ 119.

Издательство МГТУ, типография МГТУ 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5