А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4 1971

УДК 621.317.799 : 621.382.83

В. В. КУРОЧКИН, Г. Г. МАТУШКИН
(НОВОСИБИРСК)

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК САМОПРОГРЕВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Характеристика самопрогрева является одной из весьма важных и информативных характеристик, позволяющих не только оценивать качество изготовления микросхем, но и прогнозировать надежность их работы [1]. Это объясняется тем, что эти характеристики определяются во многом конструктивными и технологическими особенностями микросхемы, например качеством приклейки активных элементов к подложке, тепловым контактом между подложкой и корпусом и т. п. Плохой тепловой контакт между конструктивными элементами микросхемы приводит к повышению температуры активных элементов, что в свою очередь снижает надежность микросхемы.

Характеристика самопрогрева микросхемы, т. е. изменение ее теплового режима со временем после включения, может быть определена рядом способов, поскольку температурозависящими являются несколько внешних параметров микросхемы. Для гибридных микросхем в качестве температурозависящего параметра наиболее целесообразно выбирать выходное напряжение при работе в активном режиме, поскольку в активном режиме работы по сравнению с ключевым на транзисторе логической микросхемы выделяется большая мощность и происходит ее наибольший разогрев (это напоминает ускоренные испытания микросхем). По характеру изменения выходного напряжения во время самопрогрева можно получить представление о процессе распространения тепла в микросхеме.

В настоящее время изменение выходного напряжения микросхемы от самопрогрева определяется путем измерения выходного напряжения через заданные интервалы времени, т. е. по точкам, используя для этого быстродействующие автоматические цифровые приборы с регистрацией результатов измерений [2]. Однако для достаточно точного восстановления характера изменения выходного напряжения требуется большое количество точек измерения. Кроме того, сравнение микросхем по характеристике, измеренной таким способом, довольно затруднительно.

Рассмотренный ниже способ определения характеристик самопрогрева позволяет сократить число измерений, уменьшить время получения характеристики, а также облегчить сравнение микросхем между собой. Наряду с этим появляется возможность непосредственно связать полученные числовые характеристики с физическими процессами распространения тепла в микросхеме, что, в свою очередь, позволяет опре-

делить некоторые дефекты изготовления микросхем и, следовательно, прогнозировать их надежность более эффективным образом.

Суть предлагаемого способа заключается в том, что изменяющееся выходное напряжение измеряют всего четыре раза в моменты времени, предварительно определяемые для каждого типа микросхем отдельно. Значения выходного напряжения, полученные в этих точках, поступают на блоки обработки. В результате обработки получаются четыре коэффициента, которые определяют характер изменения выходного напряжения, и, кроме того, каждый коэффициент непосредственно характеризует либо температуру источника нагрева p—n переходов активных элементов, либо материал и технологию изготовления данной микросхемы.

Рассматриваемый способ измерения основывается на следующем. Эксперименты показывают, что изменение выходного напряжения микросхемы под влиянием проходящего тока определяется в основном двумя факторами: 1) разогревом кристаллов транзисторов и диодов за счет выделения тепла на p—n переходах; 2) дополнительным разогревом кристаллов за счет выделения тепла на резисторах и внутренних соединениях микросхемы.

Следовательно, характер изменения выходного напряжения определяется главным образом закономерностью распространения тепла в кристаллах транзисторов и диодов, а также в подложке микросхемы.

Из теории теплопроводности известно, что при соответствующих начальных условиях для точечного источника закон распространения тепла может быть описан уравнением [3]

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-z^2} dz = \frac{t_0 - t(x, \tau)}{t_0 - t_{ср}}, \qquad (1)$$

где $\xi = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$; $t(x, \tau)$ — температура в точке пространства с расстоянием от источника тепла x в момент времени τ; t_0 — температура источника тепла; $t_{ср}$ — температура окружающей среды; $a = \frac{\lambda}{C}$; λ — скорость распространения тепла; C — теплоемкость объема. Выражение (1) можно привести к другому виду

$$t(\tau)_{x = x_0 = \text{const}} = t_0 - (t_0 - t_{ср})\,\Phi(\xi),$$

а процесс изменения температуры в фиксированной точке x_0 можно описать выражением

$$\Delta t(\tau) = t(\tau)_{x = \text{const}} - t_0 = (t_0 - t_{ср})\,\Phi(\xi).$$

Поскольку можно считать, что в практически наблюдаемом диапазоне температур изменение напряжения на выходе микросхемы пропорционально изменению температуры p—n переходов, имеем:

$$\Delta U'_{вых} = k'_1 \Delta t_1 = k'_1 (t'_0 - t_{ср})\,[1 - \Phi(\xi_1)]; \qquad (2)$$

$$\Delta U''_{вых} = k'_2 \Delta t_2 = k'_2 (t''_0 - t_{ср})\,[1 - \Phi(\xi_2)], \qquad (3)$$

где $\Delta U'_{вых}$ — составляющая изменения выходного напряжения под воздействием тепла на p—n переходах транзисторов и диодов; $\Delta U''_{вых}$ — составляющая изменения выходного напряжения под воздействием тепла, выделенного на пассивных элементах микросхемы.

В целом процесс изменения напряжения на выходе микросхемы при условии независимости составляющих может быть представлен в виде

$$\Delta U_{\text{вых}} = k_1' (t_0' - t_{\text{ср}}) [1 - \Phi(\xi_1)] + k_2' (t_0'' - t_{\text{ср}}) [1 - \Phi(\xi_2)] = \\ = A_1 [1 - \Phi(\xi_1)] + A_2 [1 - \Phi(\xi_2)], \quad (4)$$

где

$$A_1 = k_1' (t_0' - t_{\text{ср}}); \quad (5)$$

$$A_2 = k_2' (t_0'' - t_{\text{ср}}). \quad (6)$$

Известно, что при малых значениях τ составляющая $\Delta U_{\text{вых}}''$ примерно равна нулю, т. е. изменение напряжения на выходе микросхемы определяется в основном влиянием выделения тепла на p—n переходах транзисторов и диодов. Поэтому можно считать, что

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx \Delta U_{\text{вых}}' = A_1 [1 - \Phi(\xi_1)]. \quad (7)$$

При достаточно больших значениях τ, когда значение $\Delta U_{\text{вых}}'$ стремится к установившемуся значению A_1, изменение выходного напряжения определяется в основном второй составляющей уравнения (4):

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx A_1 + \Delta U_{\text{вых}}'' = A_1 + A_2 [1 - \Phi(\xi_2)]. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) существенно упрощаются, если величина ξ лежит в пределах 0—0,5, поскольку в этом случае функцию Лапласа $\Phi(\xi)$ можно заменить ее аргументом:

$$\Phi(\xi) \approx \xi = \frac{x_0}{2\sqrt{a}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} = k \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad (9)$$

где $k = \frac{x_0}{2\sqrt{a}}$. С учетом выражения (9) уравнения (7) и (8) можно представить в следующем виде:

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx \Delta U_{\text{вых}}' = A_1 \left(1 - \frac{k_1}{\sqrt{\tau}}\right); \quad (10)$$

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx A_1 + \Delta U_{\text{вых}}'' = A_1 + A_2 \left(1 - \frac{k_2}{\sqrt{\tau}}\right). \quad (11)$$

Здесь величины k_1 и k_2 определены как $k_1 = \frac{x_0'}{2\sqrt{a'}}$; $k_2 = \frac{x_0''}{2\sqrt{a''}}$ и зависят в идеализированном уравнении (1) от эквивалентных расстояний от источников тепла x_0' и x_0'', а также от скоростей распространения тепла λ' и λ'' и теплоемкостей объемов C' и C''.

Имея два последовательных во времени значения $\Delta U_{\text{вых}}$ непосредственно после включения микросхемы (обозначим их $\Delta U_{\text{вых}_1}$ и $\Delta U_{\text{вых}_2}$) и два значения $\Delta U_{\text{вых}}$ в моменты времени, когда составляющая $\Delta U_{\text{вых}}'$ стремится к своему установившемуся значению (обозначим их $\Delta U_{\text{вых}_3}$ и $\Delta U_{\text{вых}_4}$), и используя уравнения (10) и (11), можно записать:

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{вых}_1} = A_1 \left(1 - \frac{k_1}{\sqrt{\tau_1}}\right); \ \Delta U_{\text{вых}_2} = A_1 \left(1 - \frac{k_1}{\sqrt{\tau_2}}\right); \\ \Delta U_{\text{вых}_3} = A_1 + A_2 \left(1 - \frac{k_2}{\sqrt{\tau_3}}\right); \ \Delta U_{\text{вых}_4} = A_1 + A_2 \left(1 - \frac{k_2}{\sqrt{\tau_4}}\right). \end{cases}$$

Решая полученную систему уравнений относительно коэффициентов, имеем:

$$A_1 = \frac{\sqrt{\tau_2}}{\sqrt{\tau_2}-\sqrt{\tau_1}}\Delta U_{\text{вых}_2} - \frac{\sqrt{\tau_1}}{\sqrt{\tau_2}-\sqrt{\tau_1}}\Delta U_{\text{вых}_1} = c_1\Delta U_{\text{вых}_2} - c_2\Delta U_{\text{вых}_1}; \tag{12}$$

$$k_1 = \frac{\sqrt{\tau_2}}{A_1}[A_1 - \Delta U_{\text{вых}_2}] = \frac{c_3}{A_1}(A_1 - \Delta U_{\text{вых}_2}); \tag{13}$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{\tau_4}}{\sqrt{\tau_4}-\sqrt{\tau_3}}(\Delta U_{\text{вых}_4} - A_1) - \frac{\sqrt{\tau_3}}{\sqrt{\tau_4}-\sqrt{\tau_3}}(\Delta U_{\text{вых}_3} - A_1) =$$
$$= c_4(\Delta U_{\text{вых}_4} - A_1) - c_5(\Delta U_{\text{вых}_3} - A_1); \tag{14}$$

$$k_2 = \frac{\sqrt{\tau_4}}{A_2}[A_2 - (\Delta U_{\text{вых}_4} - A_1)] = \frac{c_6}{A_2}[A_2 - (\Delta U_{\text{вых}_4} - A_1)]. \tag{15}$$

Выбор моментов времени отсчета τ_1, τ_2, τ_3 и τ_4 определяется следующим образом. Прежде всего для всех моментов времени должно соблюдаться условие $\xi = \frac{x_0}{\sqrt{a\tau}} = 0 \div 0{,}5$, откуда $\tau = \frac{x_0^2}{(0 \div 1)a} = \frac{x_0^2}{a} \div \infty$, т. е. должно быть $\tau \geqslant \frac{x_0^2}{a}$. Таким образом, для моментов времени τ_1 и τ_2 ограничением снизу будет служить условие $\tau_{1,2} \geqslant \frac{(x_0')^2}{a'}$. С другой стороны, допустимый интервал выбора τ_1 и τ_2 ограничен сверху условием $\Delta U''_{\text{вых}} \approx 0$. При этом $1 - \Phi(\xi_2) \approx 0$, или $\Phi(\xi_2) \approx 1$. Это условие практически выполняется при $\xi_2 = \frac{x_0''}{2\sqrt{a''\tau_{1,2}}} \geqslant 2$ или $\tau_{1,2} \leqslant \frac{(x_0'')^2}{4a''}$. Следовательно, интервал времени для выбора двух первых точек отсчета заключен между $\frac{(x_0')^2}{a'}$ и $\frac{(x_0'')^2}{4a''}$, т. е. $\tau_{1,2} = \left[\frac{(x_0')^2}{a'} \div \frac{(x_0'')^2}{4a''}\right]$ с.

Значения моментов времени третьего и четвертого отсчетов ограничены снизу, во-первых, общим требованием, чтобы $\tau_{3,4} \geqslant \frac{(x_0')^2}{a''}$, а во-вторых, условием $\Delta U'_{\text{вых}} \approx A_1$. Практически достаточно, чтобы $\Delta U'_{\text{вых}} \approx 0{,}9 \cdot A_1$. Определим момент времени, при котором начинает выполняться это условие:

$$0{,}9 \cdot A_1 \leqslant A_1\left(1 - \frac{x_0'}{2\sqrt{a'\tau_{3,4}}}\right), \text{ откуда } \frac{x_0'}{2\sqrt{a'\tau_{3,4}}} \leqslant 0{,}1 \text{ или } \tau_{3,4} \geqslant 25\frac{(x_0')^2}{a'}.$$

Таким образом, выбор моментов времени τ_3 и τ_4 снизу ограничен величиной $25\frac{(x_0')^2}{a'}$ с.

Верхняя граница интервала времени, в котором можно выбрать τ_3 и τ_4, определяется главным образом требуемым быстродействием всего устройства и точностью восстановления кривой изменения выходного напряжения. Как правило, последнее измерение целесообразно проводить через 1—1,2 мин после вывода микросхемы в рабочую точку.

Отсюда следует, что интервал времени, в котором могут выбираться значения τ_3 и τ_4 для определения A_2 и k_2, будет находиться в диапазоне

$$\tau_{3,4} = \left[25\frac{(x_0')^2}{a'} \div 70\right] \text{с}.$$

Поскольку погрешность определения коэффициентов будет тем меньше, чем больше интервал времени между отсчетами, то ясно, что τ_1, τ_2, τ_3, τ_4 целесообразно выбирать близкими к соответствующим границам допустимых интервалов, т. е. τ_1 выбирать близким к $\frac{(x_0')^2}{a'}$, τ_2 — близким к $\frac{(x_0'')^2}{4a''}$, τ_3 — близким к $25\frac{(x_0')^2}{a'}$, наконец, τ_4 — примерно равным 70 с.

Определять значения τ_1, τ_2, τ_3 и τ_4 по приведенным выше выражениям довольно сложно, поэтому более целесообразно получать их значения экспериментальным путем для каждого данного типа микросхем. Экспериментально они определяются по предварительно снятым характеристикам изменения во времени выходного напряжения микросхемы как точки, при которых, во-первых, экспериментальная зависимость может быть с достаточной степенью точности аппроксимирована зависимостью вида

$$\Delta U_{\text{вых}} = A_1[1 - \Phi(\xi_1)] + A_2[1 - \Phi(\xi_2)]$$

и, во-вторых, при которых справедливы следующие условия: а) в моменты времени τ_1 и τ_2 разогревом p—n переходов от тепла, выделяемого пассивными элементами микросхемы, можно пренебречь ($\Delta U''_{\text{вых}} \approx 0$); б) в моменты времени τ_3 и τ_4 выделение тепла на p—n переходах принимает установившийся характер ($\Delta U'_{\text{вых}} \approx A_1$).

При определении моментов времени отсчета для упрощения вычислительных операций и устройства, их осуществляющего, следует также величины их выбирать таким образом, чтобы корень квадратный из них был равен целому числу. Так, для микросхем типа 10МД2 целесообразно выбирать $\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 4$ с, $\tau_3 = 36$ с, $\tau_4 = 64$ с.

Так как коэффициенты A_1 и A_2 зависят от температуры источников тепла, что следует из уравнения (4), а коэффициенты k_1 и k_2 определяются материалом и технологией изготовления микросхем [см. (10), (11)], то такое представление результатов измерения характеристик самопрогрева не только облегчает сравнение микросхем между собой, но и дает возможность прогнозировать срок их службы.

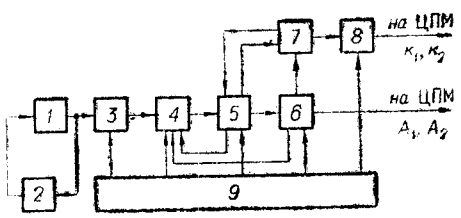

Рис. 1.

Устройство, реализующее описываемый способ, представлено на рис. 1, где *1* — испытуемая микросхема; *2* — блок вывода в рабочую точку; *3* — аналого-цифровой преобразователь; *4* — первый сумматор; *5* — второй сумматор; *6* — регистр значений k_1 и k_2; *7* — матричное устройство деления; *8* — регистр значений A_1 и A_2; *9* — программирующий блок.

После вывода в рабочую точку микросхемы *1* с помощью блока вывода *2* АЦП *3*, представляющий собой двухразрядный двоично-деся-

тичный аналого-цифровой преобразователь, измеряет значение напряжения на выходе микросхемы в момент времени τ_1, которое запоминается в сумматоре *4*; после этого командой из программирующего блока оно передается c_2 раз в сумматор *5* с отрицательным знаком, образуя произведение $c_2 \Delta U_{вых_1}$ (пользуясь тем, что c_1, c_2, c_3 и c_4 всегда можно сделать равными целым числам). В момент времени τ_2 измеряется $\Delta U_{вых_2}$ и подобным же образом суммируется в сумматоре *5* c_1 раз с положительным знаком. При этом в сумматоре *5* образуется значение A_1, которое следующим тактом передается в регистр *6* и с обратным знаком в сумматор *4*, оставаясь в то же время в сумматоре *5*. Поскольку в сумматоре *4* хранилось значение $\Delta U_{вых_2}$ в прямом коде, т. е. с положительным знаком, то оно суммируется с $(-A_1)$, что дает в результате $\Delta U_{вых_2} - A_1$. По очередной команде программирующего блока этот результат с обратным знаком суммируется c_3 раз в сумматоре *5*, где образуется значение $c_3 (A_1 - \Delta U_{вых_2})$. Поскольку при этом в регистре *6* хранят значение A_1, то по следующей команде программирующего устройства матричное устройство деления образует конечный результат $\frac{c_3 (A_1 - \Delta U_{вых_2})}{A_1} = k_1$, который хранится в регистре *8*. Следующим тактом полученные значения A_1 и k_1 передаются на цифропечатающую машину (ЦПМ), причем значение A_1 переписывается в сумматор *4* с обратным знаком, в то же время оставаясь в регистре *6*, а все остальные устройства приводятся в свои исходные состояния. Последующие такты устройства после измерения $\Delta U_{вых_3}$ в моменты времени τ_3 и τ_4 аналогичны описанным, с тем лишь отличием, что в сумматоре *4* после окончания очередного измерения формируют сразу же значение $\Delta U_{вых_{3,4}} - A_1$. После окончания этого цикла с регистров *6* и *8* на ЦПМ выдаются значения A_2 и k_2, и процесс получения обобщенных характеристик заканчивается.

Для иллюстрации предлагаемого способа аппроксимации на рис. 2 приведены две экспериментальные кривые самопрогрева микросхем, измеренные по точкам. Для расчета коэффициентов функций, описывающих процесс самопрогрева, выбрано [2]: $\tau_1 = 1$ с; $\tau_2 = 4{,}5$ с; $\tau_3 = 32{,}5$ с; $\tau_4 = 62{,}5$ с. Тогда соответственно для этих величин можно определить коэффициенты: $c_1 = 1{,}9$; $c_2 = 0{,}89$; $c_3 = 1$; $c_4 = 3{,}6$; $c_5 = 2{,}6$; $c_6 = 5{,}7$.

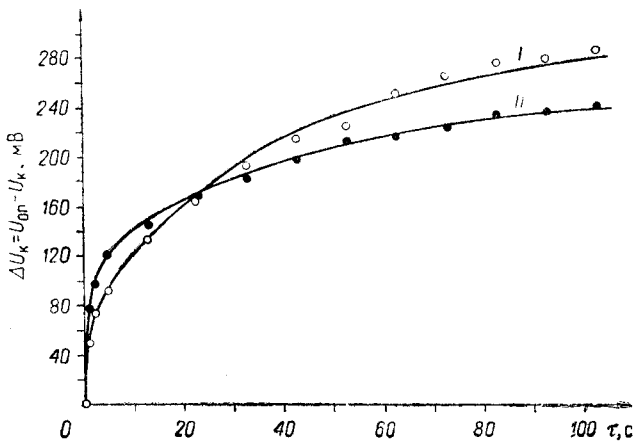

Рис. 2.

Таблица 1

τ, с	0	1	2	4,5	12,5	22,5	32,5	42,5	52,5	62,5	72,5	82,5	92,5	102,5
$1/\sqrt{\tau}$	—	1	0,707	0,471	0,283	0,211	0,175	0,153	0,138	0,126	0,117	0,110	0,104	0,097
$k_1/\sqrt{\tau}$	—	0,62	0,438	0,292	0,175	0,131	0,108	0,095	0,086	0,078	0,073	0,068	0,065	0,060
$k_2/\sqrt{\tau}$	—	4,23	2,990	1,990	1,200	0,895	0,741	0,643	0,585	0,533	0,495	0,466	0,440	0,410
Φ_1	1	0,619	0,464	0,320	0,195	0,147	0,121	0,107	0,097	0,088	0,082	0,077	0,073	0,068
Φ_2	1	1	1	0,995	0,910	0,794	0,705	0,637	0,592	0,549	0,516	0,490	0,466	0,438
$A_1(1-\Phi_1)$	0	51	71	90	107	113	117	119	120	121	122	123	124	124
$A_2(1-\Phi_2)$	0	0	0	1,4	25	58	83	103	115	127	136	144	150	158
F_{I}	0	51	71	91	132	171	200	222	235	248	258	267	273	282
F'_{I}	0	51	73	93	133	165	193	216	225	251	265	276	280	286
Δ	0	+1	−2	−2	−1	+6	+7	+6	+10	−3	−7	−9	−7	−4

Таблица 2

τ, с	0	1	2	4,5	12,5	22,5	32,5	42,5	52,5	62,5	72,5	82,5	92,5	102,5
$1/\sqrt{\tau}$	—	1	0,707	0,471	0,283	0,211	0,175	0,153	0,138	0,126	0,117	0,110	0,104	0,097
$k_1/\sqrt{\tau}$	—	0,52	0,368	0,244	0,147	0,110	0,091	0,079	0,072	0,065	0,061	0,057	0,054	0,050
$k_2/\sqrt{\tau}$	—	4,3	3,04	2,02	1,215	0,907	0,752	0,658	0,592	0,542	0,503	0,473	0,447	0,417
Φ_1	1	0,538	0,397	0,270	0,165	0,124	0,105	0,089	0,081	0,073	0,069	0,064	0,060	0,056
Φ_2	1	1	1	0,996	0,914	0,800	0,712	0,648	0,598	0,557	0,523	0,496	0,473	0,444
$A_1(1-\Phi_1)$	0	75	98	103	135	141	145	147	148	150	151	152	152	153
$A_2(1-\Phi_2)$	0	0	0	0,6	13	31	45	55	63	70	75	79	83	87
F_{II}	0	75	98	122	148	172	190	202	211	220	226	231	235	240
F'_{II}	0	77	97	121	147	168	184	199	212	217	226	234	236	240
Δ	0	−2	+1	+1	+1	+4	+6	+3	−1	+3	0	−3	−1	0

Коэффициенты A_1 и k_1, соответствующие разогреву полупроводниковых кристаллов, определяются из уравнений (12) и (13)

для кривой I

$$A_1^{I} = 1{,}9 \cdot 93 - 0{,}89 \cdot 50 = 133; \; k_1^{I} = \frac{133 - 50}{133} = 0{,}62;$$

для кривой II

$$A_1^{II} = 1{,}9 \cdot 121 - 0{,}89 \cdot 77 = 162; \; k_1^{II} = \frac{162 - 77}{162} = 0{,}52.$$

Так как функция $\left[1 - \Phi\left(\frac{k_1}{\sqrt{\tau}}\right)\right]$ в интервале $\tau = (32{,}5 \div 62{,}5)$ с имеет значение, равное в среднем 0,9, то в формулы (14) и (15) величину A_1 необходимо подставлять равной $0{,}9 \cdot A_1$. Тогда коэффициенты A_2 и k_2, определяющие процесс разогрева микросхемы за счет пассивных элементов, для обоих кривых можно определить следующим образом:

$$A_2^{I} = 3{,}6\,(251 - 0{,}9 \cdot 133) - 2{,}6\,(193 - 0{,}9 \cdot 133) = 282;$$

$$k_2^{I} = 5{,}7\,\frac{282 + 0{,}9 \cdot 133 - 193}{282} = 4{,}23;$$

$$A_2^{II} = 3{,}6\,(217 - 0{,}9 \cdot 162) - 2{,}6\,(184 - 0{,}9 \cdot 162) = 157;$$

$$k_2^{II} = 5{,}7\,\frac{157 + 0{,}9 \cdot 162 - 184}{157} = 4{,}3.$$

Окончательно функции, описывающие кривые I и II, можно записать в виде:

$$F_{I} = 133\left[1 - \Phi\left(\frac{0{,}62}{\sqrt{\tau}}\right)\right] + 282\left[1 - \Phi\left(\frac{4{,}23}{\sqrt{\tau}}\right)\right];$$

$$F_{II} = 162\left[1 - \Phi\left(\frac{0{,}52}{\sqrt{\tau}}\right)\right] + 157\left[1 - \Phi\left(\frac{4{,}3}{\sqrt{\tau}}\right)\right].$$

Сравнение экспериментальных характеристик самопрогрева F'_{I} и F'_{II} с кривыми F_{I} и F_{II} приведено в табл. 1 и 2, по которым построены кривые рис. 2 (см. сплошные линии).

Приведенную погрешность аппроксимации характеристик самопрогрева можно определить как отношение максимального отклонения экспериментальной и теоретической кривых к максимальному значению изменения выходного напряжения:

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta U_{к\,max}} \cdot 100\%.$$

Рассчитанная по этой формуле приведенная погрешность аппроксимации для кривой I составляет величину $\delta_{пр\,I} = \pm 3{,}5\%$, а для кривой II — $\delta_{пр\,II} = \pm 2{,}5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Луцкий, А. И. Коекин, В. Л. Глухман, Л. П. Удалова. О контроле качества гибридных микросхем на этапе освоения производства.— Электронная техника, 1969, серия VI, вып. 1 (16).
2. А. И. Ильенков, В. В. Курочкин, Е. А. Фигуровский. Цифровой измеритель характеристик самопрогрева микросхем.— Автометрия, 1970, № 2.
3. Г. М. Кондратьев. Тепловые измерения. М.— Л., Машгиз, 1957.

Поступила в редакцию
7 сентября 1970 г.