АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ
№ 4 1968

УДК 621.317.7.003.3621+396.019.3

А. А. СТУПАЧЕНКО
(Ленинград)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ СХЕМ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Современные методы синтеза схем различных измерительных приборов и систем предполагают широкое использование информации об изменении величин параметров элементов под воздействием времени и внешних факторов.

Задачи, которые разработчики радиоэлектронных устройств (р. э. у.) решают с помощью информации об эксплуатационных свойствах радиоэлементов, можно разделить на два класса:

1) задачи, обусловленные возникновением экстремальных значений приращения величин параметров у отдельных образцов элементов; имеются в виду приращения, приводящие к полному или условному отказу р. э. у. (проблемы надежности, долговечности, сохраняемости р. э. у., решаемые методами резервирования, дублирования и т. п.);

2) задачи, обусловленные закономерными значениями приращения величин параметров; имеются в виду приращения, влияющие на точность или устойчивость работы схем р. э. у. (проблемы, решаемые методами автокомпенсации, регулирования, поверок и т. п.).

Информация об эксплуатационных свойствах радиоэлементов должна обеспечивать решение следующих типовых задач:

1) определение надежности элемента по данному i-му параметру r_i при выбранных (установленных) значениях критерия отказа по данному параметру A_i, уровней факторов внешнего воздействия $z_1, \ldots, z_m$ (тепловая, электрическая и пр. нагрузки), продолжительности работы τ_j, уровня доверительной вероятности $P_д$:

$$r_i = f(A_i, \tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д);$$

2) определение долговечности элемента $\tau_{д\,i}$ при выбранных значениях критерия долговечности $D_i, A_i, z_1, \ldots, z_m, P_д$:

$$\tau_{д\,i} = f(D_i, A_i, z_1, \ldots, z_m, P_д);$$

3) определение сохраняемости элемента $\tau_{c\,i}$ при выбранных значениях критерия сохраняемости $C_i, A_i, z_1, \ldots, z_q, P_д, q < m$:

$$\tau_{c\,i} = f(C_i, A_i, z_i, \ldots, z_q, P_д);$$

4) определение предельно допустимых уровней отдельных воздей-

ствующих факторов $\max z_j\ (1 \leqslant j \leqslant m)$ при выбранных значениях $r_i, A_i, \tau_j, z_1, \ldots, z_{(j-1)}, z_{(j+1)}, \ldots, z_m, P_д$:

$$\max z_j = f(r_i, A_i\ \tau_j, z_1, \ldots, z_{(j-1)}, z_{(j+1)}, \ldots, z_m, P_д);$$

5) определение предельного (наиболее жесткого) уровня критерия отказа по данному i-му параметру $\underline{A}_i$ при выбранных значениях: $r_i, \tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д$:

$$\underline{A}_i = f(r_i, \tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д);$$

6) определение среднего приращения величины i-го параметра $\overline{\Delta x_i}$ при выбранных значениях $\tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д$:

$$M_{\Delta x_i} = f(\tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д);$$

7) определение дисперсии приращения величины параметра

$$S^2_{\Delta x_i} = f(\tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д);$$

8) определение функции распределения приращения величины параметра $P\{\Delta x_i\} = f(\tau_j, z_1, \ldots, z_m, P_д)$, если последняя плохо описывается посредством $M_{\Delta x_i}$ и $S_{\Delta x_i}$.

Анализ перечисленных выше задач показывает, что содержание искомой информации должны составлять количественные соотношения, связывающие между собой величины четырех групп параметров:

а) параметра x_i, реализуемого у элемента в схемах р. э. у. (или его приращения Δx_i);

б) параметров, характеризующих состояние воздействующего окружения: $z_1, \ldots, z_m$;

в) продолжительности (времени) воздействия данного окружения на элемент τ_j;

г) параметров, характеризующих отличительные признаки элемента (номинальная мощность рассеяния и номинальное сопротивление резисторов; номинальное рабочее напряжение и номинальная емкость конденсаторов и т. п.): $y_1, \ldots, y_k\ (k \geqslant 1)$.

Анализ ряда исследований [1—3] показывает, что в общем случае разработчикам р. э. у. целесообразно раздельно представлять информацию: а) о полных отказах элемента; б) об условных отказах элемента по реализуемому параметру; в) о закономерных изменениях величины реализуемого параметра элемента. При этом под полным отказом следует понимать такие изменения (приращения) величины параметра, которые приводят к отказу любые схемы р. э. у., реализующие данное свойство элемента. Критерии полных отказов элементов должны устанавливаться разработчиками р. э. у. по согласованию с разработчиками радиоэлементов.

Под областью закономерных изменений величины i-го параметра элемента обычно понимают совокупность таких значений $x_i\ (\Delta x_i)$, которые обусловлены конструкцией, а также технологией изготовления изделия и принадлежат образцам, не содержащим существенные дефекты, вносимые сферой производства. Границы области закономерных значений $x_i\ (\Delta x_i)$ должен устанавливать разработчик элементов, который может учесть специфику данного изделия и прежде всего природу и механизм процессов в веществе материалов конструкции последнего.

К области условных отказов должны быть отнесены все значения $x_i\ (\Delta x_i)$, находящиеся вне области закономерных значений и области полных отказов. Выше уже отмечалось, что одна из границ области условных отказов составляет компетенцию разработчиков радиоэлементов, другая — разработчиков р. э. у.

Математическая форма отображения временных процессов в радиоэлементах должна обладать следующими свойствами: а) учитывать вероятностный (точнее, статистический) характер связи между $\Delta x_i, \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m$; б) быть пригодным для приближения элементарными функциями (поскольку истинные математические формы связи между величинами $\Delta x_i, \tau_j, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m$ нам в общем случае не известны); в) разрешаться относительно $\Delta x_i, \tau_j, z_1, \ldots, z_m$.

ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ

Определим приращение величины i-го параметра элемента условием $\Delta x_i = \frac{x_{ij} - x_{i0}}{x_{i0}}$, где x_{i0} — исходное, а x_{ji} — некоторое последующее во времени значение, полученное под воздействием внешних факторов. Рассмотрим M_i — множество возможных значений Δx_i. С учетом отмеченных выше положений на M_i следует выделять три подмножества: $M_i = T_{i1} \cup T_{i2} \cup K_i$, где T_{i1} — область полных отказов; T_{i2} — область условных отказов; K_i — область закономерных изменений величин параметров элементов. В наиболее общем случае, когда возможно $\Delta x_i > 0$ и $\Delta x_i < 0$, подмножества T_{i1} и T_{i2} разбиваются на две части: $T_{i1} = T'_{i1} \cup T''_{i1}$ и $T_{i2} = T'_{i2} \cup T''_{i2}$ (рис. 1).

В качестве математической формы отображения временных процессов в радиоэлементах целесообразно использовать [4—6] семейство функций распределения вероятностей

$$P_{\tau, y_1, \ldots, y_k z_1, \ldots, z_m, P_д} \{\Delta x_{ia}\} = \\ = \varphi(\Delta x_{ia}, \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д) \quad (1)$$

определенное на множестве G пространства действующих факторов E_n. При этом $P\{\Delta x_{ia}\} = P\{\Delta x_i \leqslant \Delta x_{ia}\}$; остальные обозначения определены выше.

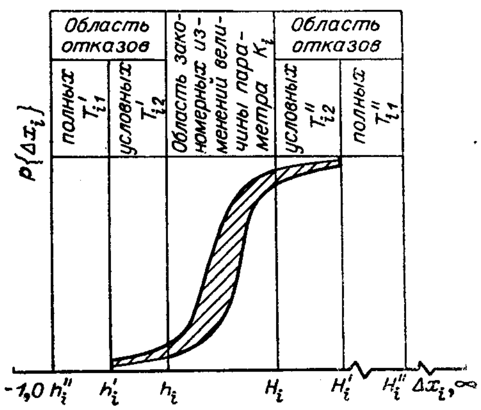


Рис. 1. Функции распределения $P\{\Delta x_i\}$ на множестве $\Delta x_i\}$.

В силу принятого выше определения в области полных отказов нас интересует только вероятность попадания значения Δx_i на подмножество T_{i1}, поэтому

$$P\{\Delta x_i \in T_{i1} \mid \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д\} = \\ = \varphi(h'_i, H'_i, \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д), \quad (2)$$

где h'_i и H'_i — соответственно внутренние границы подмножеств T'_{i1} и T''_i (см. рис. 1).

В области условных отказов

$$P\{\Delta x_i \in T_{i2} \mid \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д\} = \\ = \varphi(\Delta x_i, \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д). \quad (3)$$

В области закономерных значений Δx_i — на подмножестве K_i — функции распределения (1) целесообразно представлять рядом Грама — Шарлье. В зависимости от характера задачи потребитель информации сможет использовать для решения только момент 1-го порядка, либо моменты 1-го и 2-го порядка, либо в предельном случае моменты и более высоких порядков. Таким образом, на K_i

$$P\{\Delta x_i \in k_i \mid \tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д\} = \varphi(\mu_{ij}); \tag{4}$$

$$\mu_{ij} = \varphi_j(\tau, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д) \qquad (1 \leqslant j \leqslant 4). \tag{5}$$

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ

Значения функций (2) — (5) на отдельных точках G могут быть определены в результате экспериментального исследования.

Для построения плана эксперимента должны быть использованы математические методы [7]. Некоторая модификация ротатабельных планов 2-го и 3-го порядка обычно удовлетворяет требованиям данной задачи.

После реализации эксперимента построение математических моделей сводится к задаче приближения функций многих переменных (2) — (5), заданных таблично. Множество G замкнуто и ограничено (случай $\tau = \infty$ практического смысла не имеет); функции (2) — (5) непрерывны и ограничены.

Функции, приближающие (2) и (3) на G, должны удовлетворять условиям физической реализуемости:

$$P\{\Delta x_i\} = 1{,}0 \text{ при } \tau = 0;$$

$$P\{\Delta x_i\} = 0 \text{ при } \begin{cases} \tau = \infty; \\ z_j = \infty \qquad (1 \leqslant j \leqslant m). \end{cases}$$

Поскольку в общем случае надежность элементов $r_i = \exp[-\lambda\tau]$, семейства (2) и (3) целесообразно приближать экспоненциальной функцией с показателем степени в виде произведения последовательности обыкновенных алгебраических многочленов

$$\lambda_{l_1, \ldots, l_n}(\Delta x_{ia}, y_1, \ldots, y_k, z_1, \ldots, z_m, P_д) = \\ = \sum_{k_1=0}^{l_1} \sum_{k_2=0}^{l_2} \cdots \sum_{k_n=0}^{l_n} a_{k_1, \ldots, k_n} \Delta x_i^{k_1}, y_1^{k_2}, \ldots, P_д^{k_n} \tag{6}$$

на полином 1—3-й степени по переменной τ:

$$\varphi(\tau) = \sum_{i=0}^{3} b_i \tau^i. \tag{7}$$

Поскольку потребителей элементов интересуют гарантируемые значения надежности, долговечности и других показателей эксплуатационных свойств элементов, для функций (2) и (3) должна определяться верхняя граница соответствующего доверительного интервала. Последнее требование приводит к необходимости использовать взвешенное равномерное (чебышевское) приближение для определения неизвестных параметров (6) и (7).

Численные способы построения чебышевских приближений на множествах n-мерного пространства разработаны достаточно полно [8].

верительного интервала.

Ниже в качестве примера описания эксплуатационных свойств элементов приводятся математические модели временны́х процессов в резисторах типа *М* и полярных конденсаторах типа *К*. Модели построены по результатам специально спланированных экспериментов. Описание эксплуатационных свойств конденсаторов дано только для области полных отказов.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОСТОЯННЫХ НЕПРОВОЛОЧНЫХ РЕЗИСТОРАХ ТИПА М

Реализуемый параметр — сопротивление резистора. Принятые обозначения, размерности и численные значения постоянных коэффициентов:

r — вероятность безотказной работы; λ — интенсивность отказов в $1/ч$; τ — наработка (продолжительность работы) в *ч*; $\tau_д$ — технический ресурс (долговечность) в *ч*; τ_c — ресурс при хранении (сохраняемости) в *ч*; D — критерий долговечности (значение доли изделий, которые могут утратить состояние работоспособности); C — критерий сохраняемости (значение доли изделий, которые могут утратить состояние работоспособности); $R_н$ — номинальное значение сопротивления в *ком*; R_0 — исходное (до начала работы в составе схемы устройств) значение сопротивления в *ком*; $\frac{\Delta R}{R_0}$ — приращение изменения величины сопротивления резисторов по отношению к его исходному значению в %; A — критерий отказа резисторов по изменению величины сопротивления в %; $P_н$ — номинальная мощность в *вт*; P — электрическая нагрузка (мощность), рассеиваемая на резисторе в схеме устройства в *вт*; $k=\frac{P}{P_н}$ — отношение рассеиваемой мощности к номинальной мощности резистора; t — уровень тепловой нагрузки (температуры окружающей среды), воздействующей на резистор в устройстве в °С; $P_д$ — доверительная вероятность; $B = P_д - 0{,}9$;

$a_1=0{,}53466\cdot10^{-4}$;	$a_8=0{,}86800\cdot10^{-5}$;	$a_{15}=-0{,}14701\cdot10^{-1}$;
$a_2=0{,}47391\cdot10^{-7}$;	$a_9=0{,}39292$;	$a_{16}=0{,}38502\cdot10^{-4}$;
$a_3=0{,}34550\cdot10^{-8}$;	$a_{10}=-0{,}33568\cdot10^{-1}$;	$a_{17}=0{,}68862$;
$a_4=0{,}36149\cdot10^{-18}$;	$a_{11}=0{,}62360\cdot10^{-3}$;	$a_{18}=-0{,}19231\cdot10^{-2}$;
$a_5=0{,}11391\cdot10^{-14}$;	$a_{12}=-0{,}41436\cdot10^{-2}$;	$a_{19}=-0{,}11711\cdot10^{-1}$;
$a_6=0{,}41908\cdot10^{-18}$;	$a_{13}=-0{,}36155\cdot10^{-3}$;	$a_{20}=0{,}28468\cdot10^{-3}$;
$a_7=0{,}77504\cdot10^{-16}$;	$a_{14}=0{,}28995\cdot10^{-1}$;	$a_{21}=0{,}37090\cdot10^{-1}$;
		$a_{22}=0{,}41181\cdot10^{-3}$.

Область применения моделей:

$P_н = 0{,}25 \div 2{,}0$ *вт*; $R_н = 10^{-1} \div 10^4$ *ком*; $500 \leqslant \tau \leqslant 30\,000$ *ч*;

$0 \leqslant k \leqslant 1{,}0$; $-60°\ C \leqslant t \leqslant +200°\ C$; $10\% \leqslant |A| \leqslant 30\%$;

$$0.9 \leqslant P_д \leqslant 0{,}99.$$

А. *Описание эксплуатационных свойств резисторов в области полных условных отказов*:* $10\% < \left|\frac{\Delta R}{R_0}\right| \leqslant 30\%$.

---

* Эксплуатационные свойства резисторов типа *М* в области отказов оказались не зависящими от $R_н$ и $P_н$.

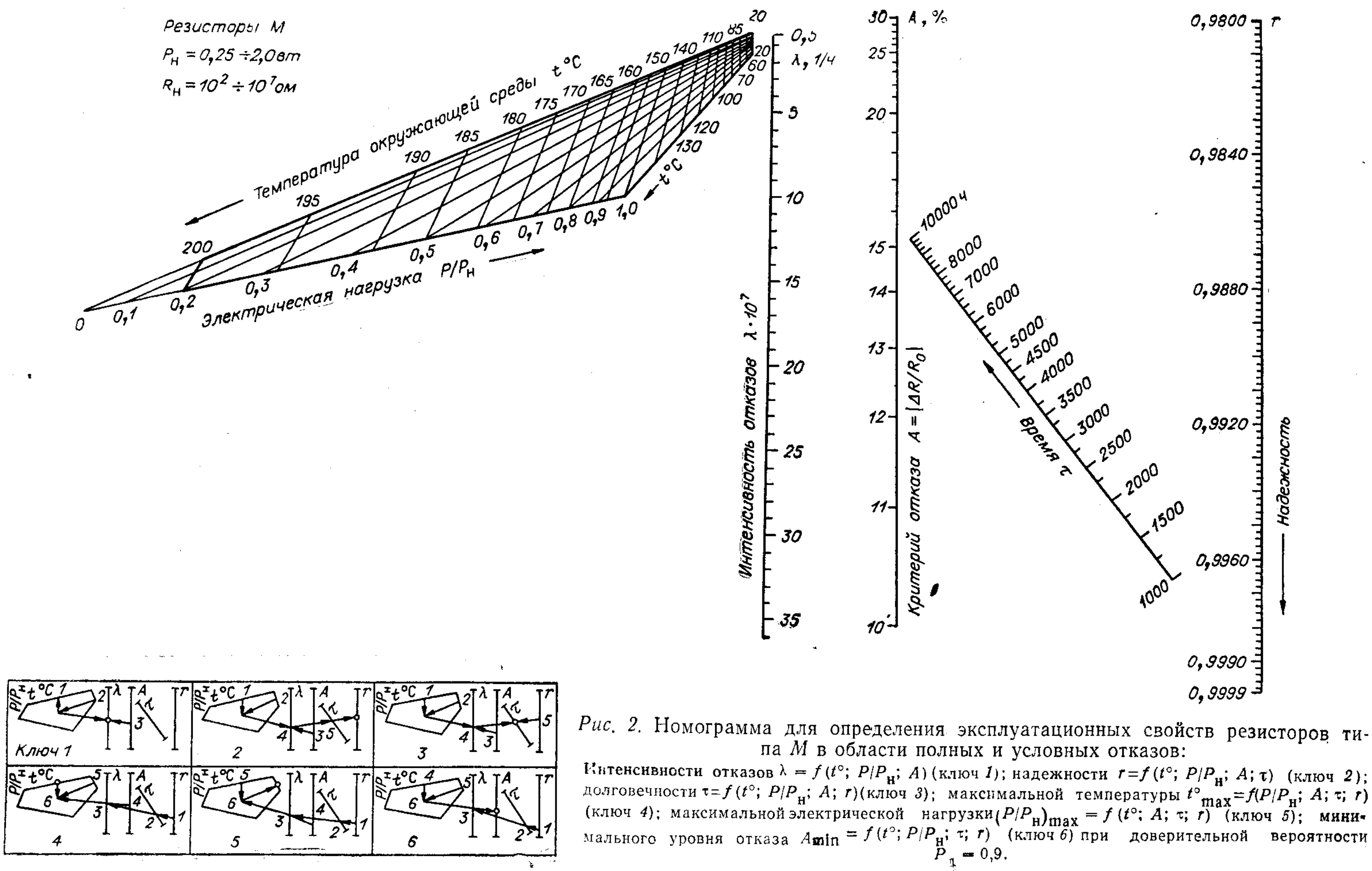


Рис. 2. Номограмма для определения эксплуатационных свойств резисторов типа *М* в области полных и условных отказов:

Интенсивности отказов $\lambda = f(t°;\ P/P_н;\ A)$ (ключ *1*); надежности $r = f(t°;\ P/P_н;\ A;\ \tau)$ (ключ *2*); долговечности $\tau = f(t°;\ P/P_н;\ A;\ r)$ (ключ *3*); максимальной температуры $t°_{max} = f(P/P_н;\ A;\ \tau;\ r)$ (ключ *4*); максимальной электрической нагрузки $(P/P_н)_{max} = f(t°;\ A;\ \tau;\ r)$ (ключ *5*); минимального уровня отказа $A_{min} = f(t°;\ P/P_н;\ \tau;\ r)$ (ключ *6*) при доверительной вероятности $P_1 = 0{,}9$.

Надежность:

$$r = P\left\{\left|\frac{\Delta R}{R_0}\right| > A \mid \tau,\ t,\ k,\ P_д\right\} = \exp\left[-\lambda\,(A,\ k,\ t,\ P_д)\ \tau\right];$$

$$r \geqslant \exp\left\{-\left[\frac{a_1}{A_2} + (a_2 + a_3 A)\,k^2 + \left(a_4 + \frac{a_5}{A^2}\right)t^5 + \left(a_6 + \frac{a_7}{A}\right) \times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times\, k^2 t^5\right]\left[1 + a_8\,(P_д - 0{,}9)^2\right]\tau\right\}.$$

Надежность только по полным отказам определяется при $A = 30\%$.
Технический ресурс:

$$\tau_д \geqslant \frac{-\ln(1 - D)}{\left[\frac{a_1}{A^2} + (a_2 + a_3 A)\,k^2 + \left(a_4 + \frac{a_5}{A^2}\right)t^5 + \left(a_6 + \frac{a_7}{A}\right)k^2\,t^5\right]\left[1 + a_8\,(P_д - 0{,}9)^2\right]}.$$

Ресурс при хранении:

$$\tau_c \geqslant \frac{-\ln(1 - C)}{\left[\frac{a_1}{A^2} + \left(a_4 + \frac{a_5}{A^2}\right)t^5\right]\left[1 + a_8\,(P_д - 0{,}9)^2\right]}.$$

Предельно допустимое значение уровня тепловой нагрузки:

$$t \leqslant \left\{-\frac{\dfrac{\ln r}{[1 + a_8\,(P_д - 0{,}9)^2]\,\tau} + \dfrac{a_1}{A^2} + (a_2 + a_3 A)\,k^2}{a_4 + a^5/A^2 + (a_6 + a_7/A)\,k^2}\right\}^{1/5}.$$

Предельно допустимое значение уровня электрической нагрузки:

$$k \leqslant \left\{-\frac{\dfrac{\ln r}{[1 + a_8\,(P_д - 0{,}9)^2]\,\tau} + \dfrac{a_1}{A^2} + (a_4 + a^5/A^2)\,t^5}{a_2 + a_3 A + (a_6 + a_7/A)\,t^5}\right\}^{1/2}.$$

Номографическая форма модели. Номограмма рис. 2 позволяет решать перечисленные выше задачи при доверительной вероятности $P_д = 0{,}9$. Правила пользования номограммой указаны ключами *1—6*.
Пример: определение надежности резистора.

1. На поле t и $P/P_н$ находим точку пересечения заданных значений t и $P/P_н$.

2. Проводим прямую, соединяя эту точку с выбранным значением критерия отказа на шкале A. На пересечении прямой со шкалой λ читаем промежуточный ответ (точка *4*).

3. Проводим прямую через точку *4* и точку на шкале τ, соответствующую заданной продолжительности работы, до пересечения со шкалой r. Читаем ответ.

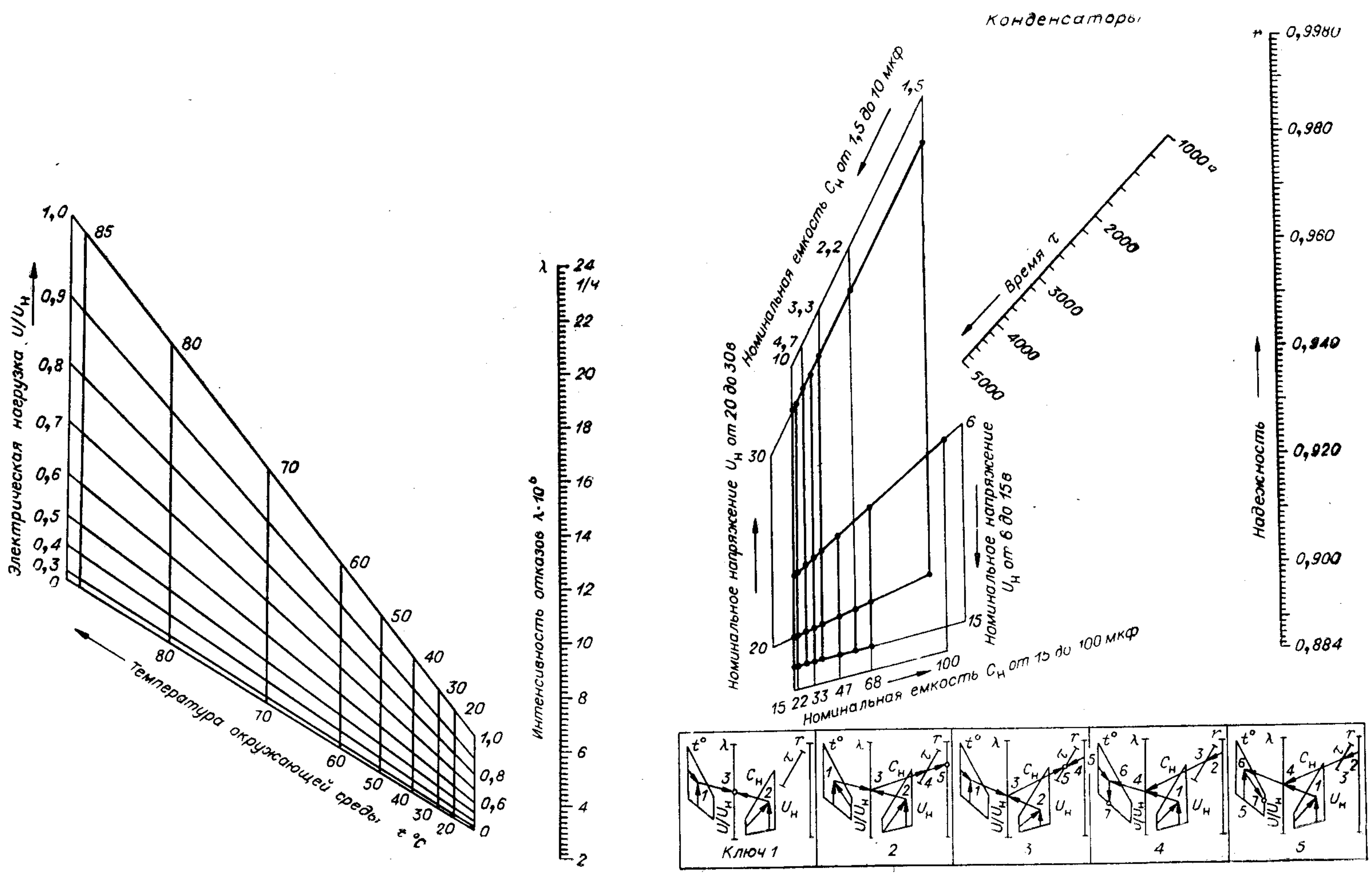
Б. *Описание эксплуатационных свойств резисторов в области закономерных значений:* $\left|\dfrac{\Delta R}{R_0}\right| \leqslant 10\%$.

Среднее приращение величины сопротивления:

$$M_{\Delta R/R_0} = \sqrt{\frac{P_н}{R_н + \dfrac{a_9}{R_н}}}\ \sqrt{\tau}\ \left[a_{10} + a_{11}\,t + a_{12}\,k + a_{13}\,tk + a_{14}\,k^2\right].$$

Стандартное отклонение распределения приращения величины сопротивления:

$$S_{\Delta R/R_0} = \frac{P_н}{R_н}\left\{1 - \exp\left[-(a_{15} + a_{16}\,t + a_{17}\,k + a_{18}\,kt)\,\tau\right]\right\} \times$$
$$\times\,(a_{19} + a_{20}\,t + a_{21}\,k + a_{22}\,kt).$$



Конденсаторы
Электрическая нагрузка $U/U_н$
Температура окружающей среды t °C
Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6$
1/ч
Номинальная емкость $C_н$ от 1,5 до 10 мкф
Номинальное напряжение $U_н$ от 20 до 30 в
Номинальное напряжение $U_н$ от 6 до 15 в
Номинальная емкость $C_н$ от 15 до 100 мкф
Время τ
1000 ч
Надежность
Ключ 1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ ТИПА *К*

Реализуемые параметры: электрическая прочность, емкость, ток утечки, угол диэлектрических потерь.

Принятые обозначения, размерности и численные значения постоянных коэффициентов:

$U_н$ — номинальное напряжение конденсатора в *в*; $k = \frac{U_p}{U_н}$ — отношение приложенного электрического напряжения к номинальному; $C_н$ — номинальное значение емкости конденсатора в *мкф*; C_0 — исходное значение емкости конденсатора в *мкф*; $\Delta C/C_0$ — приращение исходной емкости конденсатора в %; $E_{пр}$ — электрическая прочность конденсатора в *в*; $tg\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; $I_{ут}$ — ток утечки конденсатора в *ма*;

$b_0=0{,}160$;	$b_3=-0{,}6\cdot10^{-3}$;	$b_6=0{,}34\cdot10^{-2}$;	$b_9=0{,}52\cdot10^{+1}$.
$b_1=0{,}644\cdot10^{-1}$;	$b_4=0{,}13\cdot10^{+1}$;	$b_7=0{,}83\cdot10^{+1}$;	
$b_2=0{,}15\cdot10^{-2}$;	$b_5=0{,}1\cdot10^{-7}$;	$b_8=-0{,}122\cdot10^{+2}$;	

Область применения моделей:

$$0 \leqslant U_p/U_н \leqslant 1{,}0;\quad U_н = 6 \div 30\ в;\quad C_н = 1{,}0 \div 100\ мкф;\ 250\ ч \leqslant \tau \leqslant 5000\ ч;\ +20°C \leqslant t \leqslant +85°C;\quad P_д = 0{,}9.$$

Описание эксплуатационных свойств конденсаторов типа К в области полных отказов: $E_{пр} \leqslant U_p$; $\left|\frac{\Delta C}{C_0}\right| > 50\%$; $I_{ут} \geqslant 10$ *ма*; $tg\,\delta > 0{,}5$.

Надежность:

$$r = P\left\{(E_{пр} \leqslant U_p) \cup \left(\left|\frac{\Delta C}{C_0}\right| > 50\%\right) \cup (I_{ут} \geqslant 10\ ма) \times \times \cup (tg\,\delta > 0{,}5) \mid \tau;\ t;\ k;\ U_н;\ C_н\right\};$$

$$r = \exp\{-[(b_0 + b_1 k + b_2 t + b_3 kt)(b_4 + b_5 U_н + b_6 U_н^2) \times \times (b_7 + b_8 \lg C_н + b_9 (\lg C_н)^2)]\,\tau\}.$$

Остальные модели могут быть получены преобразованием модели надежности.

Номографическая форма моделей. Номограмма рис. 3 позволяет определять все эксплуатационные свойства конденсаторов в области полных отказов (ключи *1—5*).

Пример: Определение интенсивности отказов конденсатора (ключ *1*). На бинарных полях t, $U/U_н$ и $C_н$, $U_н$ находим точки, соответствующие заданным значениям t, $U/U_н$, $C_н$ и $U_н$. Соединяем указанные точки прямой и на шкале λ читаем результат.

Рис. 3. Номограмма для определения эксплуатационных свойств конденсаторов типа *К* в области полных отказов:

интенсивности отказов $\lambda = f(t°;\ U/U_н;\ U_н;\ C_н)$ (ключ *1*); надежности $r = f(t°;\ U/U_н;\ U_н;\ C_н;\ \tau)$ (ключ *2*); долговечности $\tau = f(t°;\ U/U_н;\ U_н;\ C_н;\ r)$ (ключ *3*); максимальной температуры $t°_{max} = f(U/U_н;\ U_н;\ C_н;\ \tau;\ r)$ (ключ *4*): максимальной электрической нагрузки $(U/U_н)_{max} = f(t°;\ U_н;\ C_н;\ \tau;\ r)$ (ключ *5*); при полном отказе изделия ($E_{пр} \leqslant U_{раб}$; $|\Delta C/C_0| > 50\%$; $I_{ут} \geqslant 10$ *ма*; $tg\,\delta > 0{,}5$) и доверительной вероятности $P_д = 0{,}9$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математические модели по сравнению с другими формами представления содержат больше информации о свойствах элементов. Модели удобны для ручного (номографическая форма) и машинного (аналитическая форма с описанием алгоритма на АЛГОЛ-60) использования при разработке радиоэлектронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Половко. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964.
2. Н. Г. Бруевич, В. П. Грабовецкий. Об основных направлениях теории надежности.— В сб. «Кибернетика на службе коммунизма», т. 2. М., «Энергия», 1964.
3. Б. В. Карпюк, Н. Ф. Шмойлов. Об определении оптимальных значений параметров элементов измерительных систем.— Автометрия, 1966, № 4.
4. В. И. Пампуро. Определение погрешности аналоговых приборов во времени при больших изменениях средних значений параметров элементов.— Автометрия, 1966, № 4.
5. А. А. Ступаченко. Математические модели временных процессов в радиоэлементах.— Электронная техника, 1966, серия 8, № 4.
6. А. А. Ступаченко. Построение математических моделей временных процессов в постоянных резисторах.— Электронная техника, 1967, серия 8, № 1.
7. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
8. С. И. Зуховицкий, Л. И. Авдеева. Линейное и выпуклое программирование. М., «Наука», 1964.
9. H. H. Rosenbrock. An automatic method for finding the greatest of the least values of a function.— The Computer Journal, 1960, v. 3, № 3.
10. M. Powell. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives.— The Computer Journal, v. 7, № 2.

Поступила в редакцию
5 мая 1967 г.,
окончательный вариант —
28 сентября 1967 г.