

Я. Т. ЗАГОРСКИЙ, И. Н. КОЗЛЯЕВА

(Новосибирск)

### МЕТОД АНАЛИЗА НЕСТАБИЛЬНОСТИ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ НА ПОЛЕВЫХ ТРИОДАХ

Структурно-функциональный метод связан с задачами воспроизведения сложных элементов, которые находятся между собой в многообразных взаимосвязях, составляющих структуру данной системы, и выполняют в ней определенные функции.

В основу рассматриваемого метода положен способ анализа неустойчивости транзисторных усилительных цепей с переменными параметрами [1]. Обеспечивая возможность учета любых внешних воздействий, этот метод позволяет:

- 1) наиболее полно учесть причинно-следственные связи в усилителе на полевых триодах (ПТ) при влиянии внешних воздействий;
- 2) обеспечить наглядность и сравнительную простоту анализа;
- 3) производить расчет не только неустойчивости характеристик переменному току (коэффициентов усиления, входного и выходного сопротивлений и др.), но и неустойчивости режима питания отдельных триодов в усилительной схеме;
- 4) получить пригодные для инженерных расчетов конечные выражения, связывающие внешнее воздействие и характеристики усилителя;
- 5) рассчитывать неустойчивость сложных усилительных цепей с помощью ЭВМ.

Указанное достигается представлением причинно-следственных связей в усилителе в виде структурной схемы [1]. При этом принимается ряд допущений, а именно, независимость 1) внешних воздействий друг от друга; 2) статических параметров от изменения режима питания триода, а динамических — от величины сигнала; 3) сопротивлений резисторов в усилителе от внешних воздействий; 4) связей между узлами друг от друга.

В отличие от усилителей на биполярных транзисторах в усилителях на ПТ наблюдается зависимость связей между узлами от самих узловых величин, а также зависимость связей от внешних условий. Это усложняет расчет неустойчивости и в ряде случаев требует применения ЭВМ.

**А. Структурная схема усилителя для анализа температурной неустойчивости.** Структурная схема  $n$ -триодного усилителя при воздействии температуры приведена на рис. 1. Температура — дестабилизирующий фактор — является истоком схемы. Стоками служат характеристики усилителя. Остальные узлы схемы отображают переменные,

характеризующие нестабильность усилителя при воздействии температуры. К ним относятся величины, определяющие режим питания триодов, а также их статические и динамические параметры. Режим питания триода определяется значениями тока стока  $I_c$  и напряжения сток — исток  $U_{c.и}$ . В качестве статических параметров выбраны напряжение отсечки (насыщения)  $U_0$ , ток насыщения стока  $I_0$  при напряжении затвор — исток  $U_{з.и} = 0$ , обратный ток стокового перехода  $I_{c0}$ , а также коэффициент усиления по току  $\alpha_3$  в схеме включения ПТ с общим затвором [2—4]. Динамическими параметрами, определяющими характеристики усилителя на переменном токе, являются  $h$ -параметры [5].

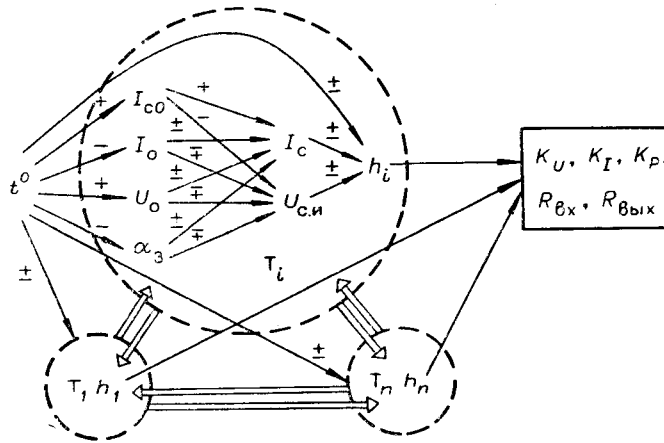


Рис. 1. Структурная схема  $n$ -триодного усилителя при воздействии температуры.

Причинно-следственные связи на структурной схеме отображаются ветвями, соединяющими узлы схемы. Каждая из ветвей исходит из узла, являющегося причиной (или одной из причин) нестабильности того узла, в который она входит. Таким образом, для расположения ветвей на структурной схеме необходимо знать основные функциональные связи в усилителе. Последние подразделяются на функциональные связи в самих триодах и на связи между ними.

На структурной схеме (см. рис. 1) полностью отображены функциональные связи для  $i$ -го триода  $T_i$  в схеме  $n$ -триодного усилителя. Для других триодов они аналогичны. Структурная схема одиночного триода  $T_i$  справедлива для любого способа включения ПТ в усилительной цепи (с общим затвором; с общим истоком; с общим стоком). Ветви структурной схемы однонаправленны. Это справедливо для маломощных усилительных схем, в которых ток стока и напряжение сток — исток не влияют на температуру  $p-n$  переходов триодов и несущественно сказываются на изменениях обратного тока, тока насыщения и напряжения отсечки. Кроме того, не учтено слабое влияние напряжения  $U_{c.и}$  на ток стока  $I_c$ . Это допущение также справедливо, поскольку величина сопротивления сток-затворного перехода ПТ обычно очень велика.

Связи между триодами осуществляются через общие токи и напряжения. На рис. 1 они условно указаны в виде двойных линий и определяются уже конкретной схемой усилителя.

**Б. Качественный анализ температурной неустойчивости.** Построив по указанным правилам структурную схему усилителя, можно производить как качественный, так и количественный анализ его неустойчивости. Для этого, пользуясь любым из известных методов расчета электрических цепей [6—7], необходимо прежде всего найти аналитические зависимости исследуемых характеристик усилителя от  $h$ -параметров ПТ в номинальном режиме работы. Затем по структурной схеме выявить взаимосвязи между температурой и характеристиками усилителя. Для этого следует определить узлы и ветви структурной схемы, связанные лишь с теми  $h$ -параметрами, которые определяют исследуемые характеристики.

Целью качественного анализа является установление в общем виде характера неустойчивости усилителя. Необходимым и, как прави-

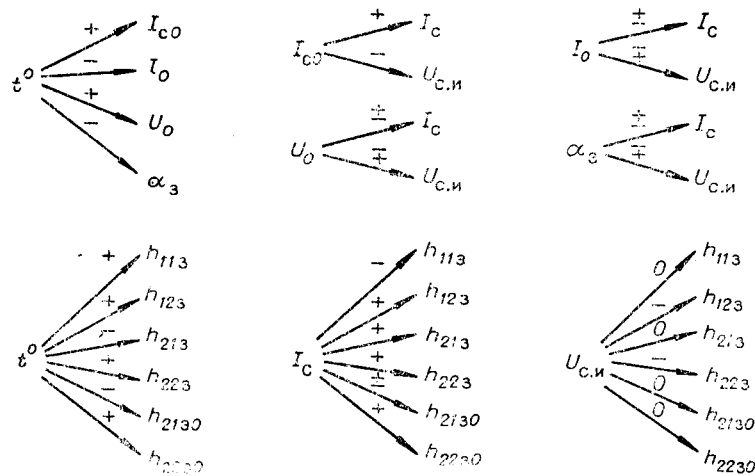


Рис. 2. Качественные зависимости между узлами структурной схемы усилителя.

ло, достаточным условием для решения этой задачи является нахождение характера неустойчивости  $h$ -параметров триода, определяющих коэффициенты усиления, входное сопротивление и прочие характеристики усилителя.

Для проведения качественного анализа каждой ветви структурной схемы присписывается знак плюс или минус. Так обозначаются знаки весовых коэффициентов ветвей между соответствующими узлами. Например, на рис. 1 ветвям  $t^o \rightarrow I_{c0}$ ,  $t^o \rightarrow U_o$ , присписан знак плюс, а ветви  $t^o \rightarrow I_o$  — знак минус. Таким образом, подразумевается, что, например, с увеличением температуры обратный ток и напряжение отсечки увеличиваются, а ток насыщения уменьшается.

Операция значительно облегчается, если для наглядности выделить отдельные связи структурной схемы (рис. 2). На рис. 2 показаны как активные  $h$ -параметры ( $h_{113}$ ,  $h_{123}$ ,  $h_{2130}$ ,  $h_{2230}$ ), так и параметры, носящие реактивный характер ( $h_{213}$  и  $h_{223}$ ) [8]. Ветвям присписаны знаки, определяющие характер взаимосвязей между узлами. В случае взаимной независимости узлов весовой коэффициент ветви между ними равен нулю. Тогда связь между этими узлами можно не указывать. Знаки ветвей установлены на основании результатов исследования ПТ типа КП103.

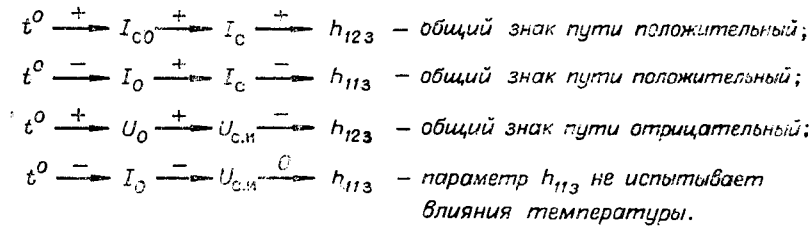


Рис. 3. Примеры нахождения общего знака пути.

Для определения характера неустойчивости  $h$ -параметров необходимо установить знаки путей, выходящих из общего истока структурной схемы и входящих в каскадные узлы —  $h$ -параметры. Знак пути — это знак части структурной схемы, образованной последовательно соединенными ветвями [9]. Знак пути находится аналогично правилам перемножения простых алгебраических величин: если все знаки ветвей положительные, знак пути тоже положительный; если число ветвей с отрицательными знаками четное, знак пути положительный; если нечетное — отрицательный (рис. 3).

Качественное определение характера изменения  $h$ -параметров в зависимости от действия дестабилизирующего фактора необходимо производить, учитывая влияние параллельных путей, сходящихся к общему узлу. Покажем на примере выполнения этой операции. На рис. 4 приведены три случая влияния температуры по параллельным путям. Изменение параметра  $h_{123}$  (см. рис. 4, а) будет происходить в том же направлении, что и изменение температуры, так как знаки путей, сходящихся к этому узлу, положительные. Параметр  $h_{113}$  (см. рис. 4, б) будет изменяться в том же направлении, что и изменение температуры, так как знаки путей, сходящихся к общему узлу, тоже положительные. Однако для части структурной схемы (см. рис. 4, в) уже нельзя однозначно определить характер изменения  $h_{123}$ , поскольку верхний путь имеет отрицательный знак, а нижний — положительный. В этом случае изменение  $h_{123}$  может происходить как в том же, так и в обратном направлении с изменением температуры. Знак изменения параметра  $h_{123}$  (см. рис. 4, в) будет зависеть от соотношения сил, воздействующих на него по двум параллельным путям. Это соотношение определяется уже конкретной схемой усилителя. Если влияние температуры через изменение статического параметра  $U_0$  и тока стока  $I_c$ , сильнее, чем ее прямое влияние на  $h_{123}$ , то параметр будет изменяться в обратном направлении от изменения температуры (знак верхнего пути отрицательный). Если, наоборот, прямое влияние температуры на  $h_{123}$  сильнее, то изменение параметра будет происходить в том же направлении, что и изменение температуры.

**В. Количественный анализ температурной неустойчивости.** Целью количественного анализа является нахождение зависимостей характеристик усилителя от дестабилизирующих факторов и представление результатов анализа в виде аналитических выражений, графиков и таблиц.

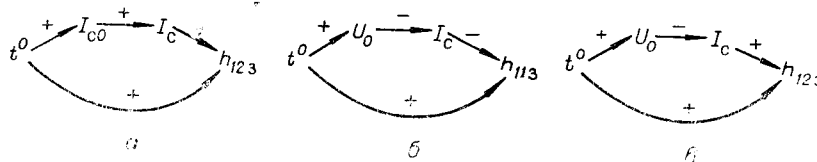


Рис. 4. К качественному определению температурной неустойчивости усилителя.

$h_3$	$t^\circ$	$I_c$	$U_{c,н}$	Диапазон изменения		$U_{c,н}, В$
				$t, ^\circ C$	$I_e, мА$	
$h_{113}$	$h_{113,н}(1+a_{п}\Delta t)$	$h_{113,н}(1+f_{п}\Delta I_c)$	$h_{113,н}(1+n_{п}\Delta U_{c,н})$	-60 ÷ 130	0,1 ÷ 0,3; $f_{п1}$ 0,3 ÷ 1,0; $f_{п2}$ 1,0 ÷ 6,0; $f_{п3}$	$U_0 \div 10$
$h_{123}$	$h_{123,н}(1+c_{п}\Delta t)$	$h_{123,н}(1+l_{п}\Delta I_c)$	$h_{123,н}(1+r_{п}\Delta U_{c,н})$	-60 ÷ 130	0,1 ÷ 0,6; $l_{п1}$ 0,1 ÷ 1,0; $l_{п2}$	2 ÷ 4; $r_{п1}$ 4 ÷ 6; $r_{п2}$ 6 ÷ 10; $r_{п3}$
$1 \pm h_{213}$ для $f=1кГц$	$(1+h_{213,н})(1+b_{п}\Delta t)$	$(1+h_{213,н})(1+K_{п}\Delta I_c)$	$(1+h_{213,н})(1+p_{п}\Delta U_{c,н})$	0 ÷ 80	0,1 ÷ 0,3; $K_{п1}$ 0,3 ÷ 1,0; $K_{п2}$ 1,0 ÷ 3,0; $K_{п3}$ 3,0 ÷ 6,0; $K_{п4}$	$U_0 \div 10$
$h_{223}$ для $f=1кГц$	$h_{223,н}(1+d_{п}\Delta t)$	$h_{223,н}(1+m_{п}\Delta I_c)$	$h_{223,н}(1+g_{п}\Delta U_{c,н})$	0 ÷ 80	0,1 ÷ 0,8 $I_0$	$U_0 \div 10$
$1 \pm h_{2130}$	$(1+h_{2130,н})(1+b_{0п}\Delta t)$	$(1+h_{213,0н})(1+k_{0п}\Delta I_c)$ $\times \Delta I_c$	$(1+h_{213,0н})(1+p_{0п}\Delta U_{c,н})$	0 ÷ 50; $b_{0п1}$ 50 ÷ 80; $b_{0п2}$	0,1 ÷ 0,3; $K_{0п1}$ 0,3 ÷ 1,0; $K_{0п2}$ 1,0 ÷ 3,0; $K_{0п3}$ 3,0 ÷ 6,0; $K_{0п4}$	2 ÷ 6; $p_{0п1}$ 6 ÷ 10; $p_{0п2}$
$h_{2230}$	$h_{2230,н}(1+d_{0п}\Delta t)$	$h_{2230,н}(1+m_{0п}\Delta I_c)$	$h_{2230,н}(1+g_{0п}\Delta U_{c,н})$	0 ÷ 50; $d_{0п1}$ 50 ÷ 80; $d_{0п2}$	0,1 ÷ 3,0; $m_{0п1}$ 3,0 ÷ 6,0; $m_{0п2}$	2 ÷ 6; $g_{0п1}$ 6 ÷ 10; $g_{0п2}$

Для проведения количественного анализа необходимо оценить значения причинно-следственных связей в усилителе путем свертывания его структурной схемы. При этом связи между отдельными узлами должны быть известны и выражены в аналитической форме. Свертывание структурной схемы значительно упрощается после ее представления в виде линейного графа. Подобное преобразование производится заменой узлов схемы, изображающих независимые или зависимые переменные, соответствующими узлами, изображающими приращения этих переменных (рис. 5).

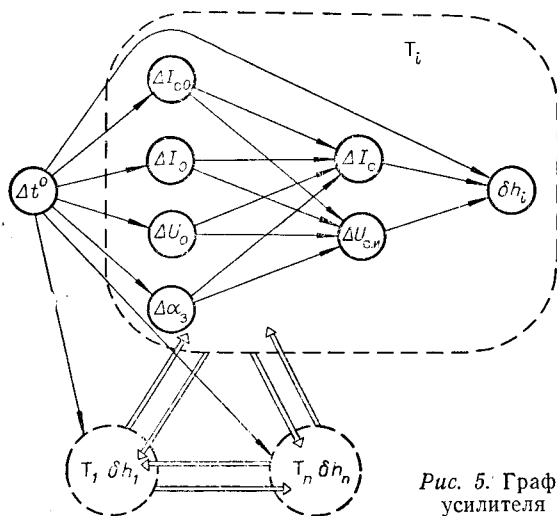


Рис. 5. Граф структурной схемы  $n$ -триодного усилителя при воздействии температуры.

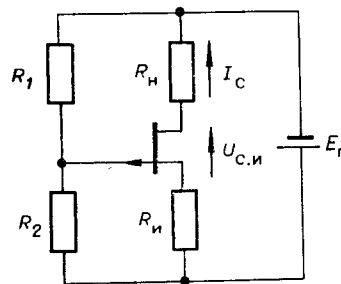


Рис. 6. Общая схема включения ПТ по постоянному току.

Для нахождения относительных изменений  $h$ -параметров  $\delta h$  необходимо знать количественные взаимосвязи между узлами — передачи ветвей графа. Передачи ветвей получаются в результате аналитического представления зависимостей статических и динамических параметров ПТ от температуры и режима питания и аппроксимации нелинейных функций линейными и кусочно-линейными. Кроме того, должны быть определены коэффициенты неустойчивости режима питания триодов в усилительной схеме.

Результаты аппроксимации нелинейных зависимостей  $h$ -параметров линейными функциями приведены в таблице. В таблице  $h_{11з.н}$ ,  $h_{12з.н}$ ,  $h_{21з.н}$ ,  $h_{22з.н}$ ,  $h_{21з0н}$ ,  $h_{22з0н}$  — начальные значения  $h$ -параметров ПТ в схеме включения с общим затвором;  $\Delta t = t^\circ - 20^\circ \text{C}$ ;  $\Delta I_c = I_c - 0,3 \text{mA}$ ;  $\Delta U_{с.и} = U_{с.и} - 6 \text{В}$ .

Типовые значения коэффициентов пропорциональности, являющихся передачами ветвей графа (см. рис. 5), с учетом 80%-ного производственного разброса для триодов типа КП103 (2П103) составляют:

$$a_n = (0,0038 \pm 0,0014) 1/^\circ \text{C}; \quad c_n = (0,0032 \pm 0,002) 1/^\circ \text{C}; \quad b_n = (0,0036 \pm 0,0015) 1/^\circ \text{C}; \quad d_n = (0,0015 \pm 0,001) 1/^\circ \text{C};$$

$$b_{0n1} = (0,123 \pm 0,085) 1/^\circ \text{C};$$

$$d_{0n1} = (0,033 \pm 0,233) 1/^\circ \text{C}; \quad b_{0n2} = b_{0n1} + (0,393 \pm 0,268) \frac{\Delta t'}{\Delta t} 1/^\circ \text{C};$$

$$-0,033$$

$$d_{0n2} = d_{0n1} + (0,093 \pm 0,193) \frac{\Delta t'}{\Delta t} 1/^\circ \text{C}, \quad \text{где } \Delta t' = t^\circ - 50^\circ \text{C}; \quad f_{n1} = -0,093$$

$$\begin{aligned}
& - (6,5 \pm 1,25) 1/\text{мА}; \quad f_{\text{п}2} = - (0,838 \mp 0,043) 1/\text{мА}; \quad f_{\text{п}3} = f_{\text{п}2} + (0,81 \mp \\
& \mp 0,044) \frac{\Delta I'_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}, \quad \text{где } \Delta I'_c = I_c - 1/\text{мА}; \quad l_{\text{п}1} = (0,543 \pm 0,105) 1/\text{мА}; \\
& l_{\text{п}2} = (0,8 \pm 0,026) 1/\text{мА}; \quad k_{\text{п}1} = - (5,35 \pm 1,43) 1/\text{мА}; \quad k_{\text{п}2} = - (0,6 \mp \\
& \mp 0,09) 1/\text{мА}; \quad k_{\text{п}3} = k_{\text{п}2} + (0,52 \mp 0,107) \frac{\Delta I'_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}; \quad k_{\text{п}4} = k_{\text{п}3} + \\
& + (0,073 \pm 0,007) \frac{\Delta I''_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}, \quad \text{где } \Delta I''_c = I_c - 3\text{мА}; \quad m_{\text{п}} = - (0,03 \pm \\
& \pm 0,02) 1/\text{мА}; \\
& k_{0\text{п}1} = - (3,8 \pm 2,8) 1/\text{мА}; \quad k_{0\text{п}2} = - (0,314 \mp 0,072) 1/\text{мА}; \quad k_{0\text{п}3} = \\
& = k_{0\text{п}2} + (0,223 \mp 0,036) \frac{\Delta I'_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}; \quad k_{0\text{п}4} = k_{0\text{п}3} + (0,243 \pm 0,047) \frac{\Delta I''_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}; \\
& m_{0\text{п}1} = (0,0875 \pm 0,167) 1/\text{мА}; \quad m_{0\text{п}2} = m_{0\text{п}1} + (0,197 \pm 0,216) \frac{\Delta I''_c}{\Delta I_c} 1/\text{мА}; \\
& n_{\text{п}} = 0; \quad r_{\text{п}1} = - (0,2 \pm 0,05) - (0,58 \pm 0,215) \frac{\Delta U'_{\text{с.н}}}{\Delta U_{\text{с.н}}} 1/\text{В}, \quad \text{где } \Delta U'_{\text{с.н}} = \\
& = U_{\text{с.н}} - 4\text{В}; \quad r_{\text{п}2} = - (0,2 \pm 0,05) 1/\text{В}; \quad r_{\text{п}3} = - (0,05 \pm 0,005) 1/\text{В}; \\
& p_{\text{п}} = \pm 0,014 1/\text{В}; \quad g_{\text{п}} = - (0,025 \pm 0,012) 1/\text{В}; \quad p_{0\text{п}1} = \pm 0,0172 1/\text{В}; \\
& p_{0\text{п}2} = (0,006 \pm 0,022) 1/\text{В}; \quad g_{0\text{п}1} = \pm 0,0365 1/\text{В}; \quad g_{0\text{п}2} = (0,0212 \pm 0,0612) 1/\text{В}.
\end{aligned}$$

Зависимости между статическими параметрами ПТ и температурой описываются выражениями:

$$U_0(t) = U_{0\text{н}} + \eta_{\text{п}} \Delta t; \quad (1)$$

$$I_0(t) = I_{0\text{н}} (1 + q \Delta t); \quad (2)$$

$$I_{\text{с}0}(t) = I_{\text{с}0\text{н}} e^{K_i(t-t_{\text{н}})} + \xi \Delta t; \quad (3)$$

$$(1 - \alpha_3)(t) = (1 - \alpha_{3,\text{н}}) (1 + b_{0\text{п}} \Delta t), \quad (4)$$

где  $U_{0\text{н}}, I_{0\text{н}}, I_{\text{с}0\text{н}}, \alpha_{3,\text{н}}$  — начальные значения статических параметров, соответствующие  $t_{\text{н}} = 20^\circ \text{С}$ ;  $\eta_{\text{п}} = 2\text{мВ}/^\circ \text{С}$ ;  $q = - (0,5 \pm 0,5) 1/^\circ \text{С}$  для диапазона температур  $20 \pm 50^\circ \text{С}$  и  $q = - (0,36 \pm 0,04) 1/^\circ \text{С}$  в диапазоне от  $20$  до  $70^\circ \text{С}$ ;  $k_i = (0,04 \div 0,08) 1/^\circ \text{С}$ ;  $\Delta t' = t - t_1$ ;

$$\xi = I_{\text{с}0\text{н}} \frac{e^{K_i(t_2-t_{\text{н}})} - e^{K_i(t_1-t_{\text{н}})}}{t_2 - t_1}; \quad (5)$$

здесь  $t_1 - t_2$  — интервал изменения температуры [1];  $t_{\text{н}}$  — начальная температура, обычно  $t_{\text{н}} = 20^\circ \text{С}$ .

Коэффициенты нестабильности режима питания для общей схемы включения ПТ по постоянному току (рис. 6) определяются выражениями:

$$S_{I_0} = \frac{\partial I_c}{\partial I_0} \left( V_{I_0} = \frac{\partial U_{\text{с.н}}}{\partial U_{I_0}} \right) \quad \text{— коэффициент нестабильности тока стока (напряжения сток — исток) при изменении тока насыщения } I_0;$$

$$S_{U_0} = \frac{\partial I_c}{\partial U_0} \left( V_{U_0} = \frac{\partial U_{\text{с.н}}}{\partial U_0} \right) \quad \text{— коэффициент нестабильности тока стока (напряжения сток — исток) при изменении напряжения отсечки } U_0;$$

$S_{I_{c0}} = \frac{\partial I_c}{\partial I_{c0}} \left( V_{I_{c0}} = \frac{\partial U_{c.н}}{\partial I_{c0}} \right)$  — коэффициент неустойчивости тока стока (напряжения сток — исток) при изменении обратного тока  $I_{c0}$ ;

$S_{\alpha_3} = \frac{\partial I_c}{\partial \alpha_3} \left( V_{\alpha_3} = \frac{\partial U_{c.н}}{\partial \alpha_3} \right)$  — коэффициент неустойчивости тока стока (напряжения сток — исток) при изменении коэффициента усиления по току  $\alpha_3$ .

Записав выражения для расчета тока стока и напряжения сток — исток в виде

$$I_c = \frac{AC - B(D - 1)}{C^2}; \quad (6)$$

$$U_{c.н} = E_{п} + I_{c0} \frac{R_{н}}{\alpha_3} - I_c \left( R_{н} + \frac{R_{н}}{\alpha_3} \right), \quad (7)$$

[здесь  $A = E_{п} \alpha_3 R_3 / R_1 + I_{c0} (R_{н} + R_3) + U_0 \alpha_3$ ;

$$B = \frac{(U_0 \alpha_3)^2}{2I_0}; \quad C = R_{н} + R_3 (1 - \alpha_3);$$

$$D = \sqrt{1 + \frac{2AC}{B}}; \quad R_3 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2),$$

найдем частные производные:

$$S_{I_0} = \frac{1}{I_0 C} \left[ \frac{BD(D - 1) - AC}{CD} \right]; \quad (8)$$

$$S_{I_{c0}} = \frac{(D - 1)(R_{н} + R_3)}{CD}; \quad (9)$$

$$S_{U_0} = \frac{\alpha_3 (D - 1)}{C^2 D I_0} (I_0 C - \alpha_3 U_0 D) + \frac{2A}{CD U_0}; \quad (10)$$

$$S_{\alpha_3} = \left( \frac{E_{п} R_3 / R_1 + U_0}{D} - 2B \frac{C + \alpha_3 R_3}{\alpha_3 C^2} \right) \frac{D - 1}{C} + \frac{A}{\alpha_3 C^2 D} [2C + \alpha_3 R_3 (D + 1)]; \quad (11)$$

$$V_{I_0} = F S_{I_0}; \quad F = - \left( R_{н} + \frac{R_{н}}{\alpha_3} \right); \quad (12)$$

$$V_{U_0} = F S_{U_0}; \quad (13)$$

$$V_{I_{c0}} = F S_{I_{c0}} + \frac{R_{н}}{\alpha_3}; \quad (14)$$

$$V_{\alpha_3} = F S_{\alpha_3} + \frac{R_{н}}{\alpha_3^2} (I_c - I_{c0}). \quad (15)$$

Зависимости  $\delta h = f(\Delta t^\circ)$  устанавливаются по известным правилам операций над графами [9] после нахождения путей графа и передач этих путей. В частности, передачи путей графа определяются перемножением передач его ветвей. Для определения передачи от истока к стоку передачи параллельных путей суммируются и т. д. На рис. 7, а — в приведены некоторые операции над графами. Над ветвями графа указаны их весовые коэффициенты. При зависимости передачи ветви от температуры ее представляют в виде двух параллельных ветвей: одна из них с весовым коэффициентом, определяемым при начальной температуре и не зависящим от нее, вторая — от нее зависящим. Операция при преобразовании температурозависимой ветви показана на рис. 7, в.



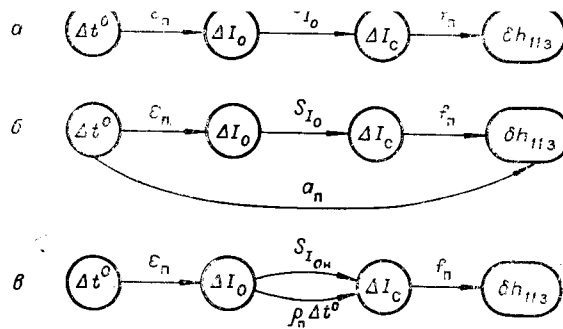


Рис. 7. Операции над графами; к определению зависимости  $\delta h = f(\Delta t^0)$ :

*a* — передача пути графа от  $\Delta t^0$  до  $\delta h_{113}$  определяется перемножением передач его ветвей:

$$P = \frac{\delta h_{113}}{\Delta t^0} = \epsilon_n S_{I_0} f_n;$$

*б* — для нахождения передачи от истока к стоку передачи параллельных путей графа суммируются:

$$P = \frac{\delta h_{113}}{\Delta t^0} = \epsilon_n S_{I_0} f_n + a_n;$$

*в* — преобразование температурнозависимой ветви  $S_{I_0}$ ; передача от истока к стоку равна

$$P = \frac{\delta h_{113}}{\Delta t^0} = \epsilon_n f_n (S_{I_{0n}} + \rho_n \Delta t).$$

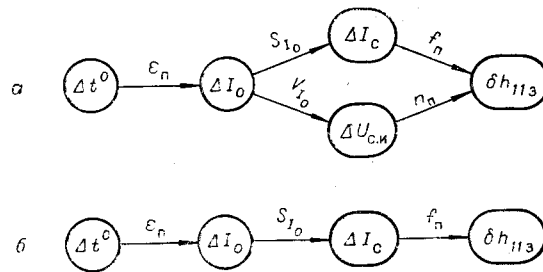


Рис. 8. Пример упрощения графа структурной схемы усилителя:

*a* — полный граф; *б* — упрощенный граф; влияние  $\Delta U_{c.и}$  на  $\delta h_{113}$  слабое; отброшен узел  $\Delta U_{c.и}$  и две ветви графа.

элементов (резисторов) схемы и учета влияния паразитных проводимостей, разброс номинальных значений и температурных зависимостей динамических и статических параметров ПТ, временные изменения параметров от старения элементов схемы и триодов и т. д. неизбежно приводят к расхождению между расчетными и экспериментальными характеристиками усилителя. Указанные факторы нередко лишают смысла анализ неустойчивости с учетом слабо выраженных взаимосвязей в структурной схеме и графе усилителя, т. е. с учетом слабых влияний.

Исходя из этого, установим некоторые возможные случаи упрощения графа. Для этого предварительно укажем степень влияния отдель-

$\delta h = f(\Delta t^0)$  позволяют записать выражения, определяющие характеристики усилителя как функции от приращений температуры. Для этого в соотношения, устанавливающие связь коэффициентов усиления, входного сопротивления и пр. с переменными аргументами  $\delta h$ , необходимо подставить вместо последних их зависимости от  $\Delta t^0$ . Полученная в итоге система алгебраических уравнений полностью характеризует неустойчивость усилителя с переменными параметрами и может быть исследована известными методами.

### Г. Упрощение графа

**структурной схемы.** Учет влияния взаимосвязей в структурной схеме и графе усилителя позволяет с высокой точностью рассчитать его температурную неустойчивость. Однако при большом числе взаимосвязей (ветвей графа) процесс расчета может оказаться громоздким. Здесь большую помощь может оказать использование ЭВМ. С другой стороны, слишком высокая степень точности расчета не всегда оправдана, так как погрешности при измерении параметров ПТ и установлении режимов питания, невозможность точного воспроизведения величин всех

ных узловых величин структурной схемы. К числу сильных, как правило, относятся влияния:

- а) статических параметров триода на его режим питания;
- б) температуры на статические параметры, а также на динамические параметры  $h_{113}$ ,  $h_{213}$ ,  $1 + h_{2130}$ ,  $h_{2230}$ ,  $1 + h_{213}$ ,  $h_{223}$ ;
- в) тока стока на динамические параметры  $h_{113}$ ,  $h_{123}$ ,  $1 + h_{213}$ ;
- г) напряжения  $U_{с.н}$  на динамический параметр  $h_{123}$ .

К слабым можно отнести влияния:

- а) температуры на параметры  $\alpha_3$ ,  $h_{2130}$  и  $h_{213}$ ;
- б) статического параметра  $\alpha_3$  на ток  $I_c$  и напряжение  $U_{с.н}$ ;
- в) тока  $I_c$  на динамические параметры  $h_{213}$ ,  $h_{2130}$ ,  $1 + h_{2130}$  и  $h_{223}$ ;
- г) напряжения  $U_{с.н}$  на динамические параметры  $h_{113}$ ,  $h_{213}$ ,  $h_{223}$ ,  $1 + h_{213}$ ,  $h_{2130}$ ,  $1 + h_{2130}$ ,  $h_{2230}$ .

Кроме того, некоторые из взаимосвязей в зависимости от условий работы усилителя могут выступать сильнее или слабее. Рассмотрим ряд практических случаев. Например, при небольших (не более 10 МОм) сопротивлениях резистора в цепи затвора ПТ и рабочей температуре не выше 50—60°С можно пренебречь влиянием тока  $I_{c0}$  на режим питания. Обычно слабым является влияние нестабильности напряжения отсечки  $U_0$  на ток  $I_c$  и напряжение  $U_{с.н}$  при значениях тока стока  $I_c \approx I_0$  и напряжении  $U_0 \geq 2 \div 3В$ . В режиме микротоков, когда  $U_{з.н} \approx U_0$ , практически не проявляется нестабильность тока насыщения  $I_0$ .

Отмеченные примеры, безусловно, не охватывают всех возможных вариантов упрощения. С другой стороны, иногда нельзя пренебрегать некоторыми указанными выше взаимосвязями. Например, поскольку параметры ПТ  $\alpha_3$ ,  $h_{213}$  и  $h_{2130}$  по абсолютному значению очень близки к единице, в ряде случаев необходимо учитывать их нестабильность в выражениях, содержащих множители вида  $1/(1 - \alpha_3)$ ,  $1/(1 + h_{213})$  и  $1/(1 + h_{2130})$  [10]. Таким образом, в каждом конкретном случае при упрощении графа следует исходить из особенностей практической схемы усилителя и его характеристик.

Упрощение графа производится последовательным сравнением передач параллельных путей или частей путей, выходящих из некоторого узла и входящих в другой общий узел. В процессе сравнения степени влияния параметров триодов, токов, напряжений и температуры отбрасываются пути графа со слабо выраженными связями между истоком и стоками. Дальнейший анализ усилителя производится с помощью упрощенного графа по описанной выше методике. На рис. 8 приведен пример упрощения графа.

В заключение отметим, что в некоторых случаях анализа целесообразно разбить температурный интервал на два—три поддиапазона, отделив условно диапазоны низких и высоких температур. Отмеченное производится при наличии нелинейных зависимостей в структурной схеме. В частности, при заметном влиянии обратного тока  $I_{c0}$ , особенно в диапазоне высоких температур, можно выделить поддиапазоны, например, от 20 до 50 и от 50 до 80°С. Разбиение температурного интервала позволяет производить анализ нестабильности в широком температурном интервале с использованием линеаризованных аналитических зависимостей параметров триодов.

Структурно-функциональный метод анализа нестабильности применим не только, когда возмущающим фактором является температура, но и при нестабильности напряжения источников питания [1], при воздействии влажности, радиации и пр. Во всех этих случаях, составив структурную схему усилителя, установив основные взаимосвязи и т. д., можно произвести требуемый анализ.

Область применения описанного метода не ограничивается усилительными цепями. Метод может быть с успехом применен для анализа генераторов, стабилизаторов, модуляторов, активных фильтров и других схем на ПТ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Т. Загорский, Д. Г. Левченко, В. М. Носов. Измерительные усилители на транзисторах. М., «Энергия», 1971.
2. Б. В. Малин, М. С. Сонин. Параметры и свойства полевых транзисторов. М., «Энергия», 1967.
3. Л. Севин. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968.
4. В. Гозлинг. Применение полевых транзисторов. М., «Энергия», 1970.
5. Я. Т. Загорский, И. Н. Козляева. Анализ динамических параметров полевых триодов.— В сб. «Тенденции развития активных радиокомпонентов малой мощности». Новосибирск, «Наука», 1972.
6. В. П. Сигорский. Анализ электронных схем. Киев, Гостехиздат УССР, 1964.
7. А. М. Заездный, И. В. Гуревич. Основы расчета радиотехнических цепей. М., «Связь», 1968.
8. Я. Т. Загорский, И. Н. Козляева, В. А. Марков. Измерительные устройства переносной виброизмерительной аппаратуры.— В сб. «Измерение слабых магнитных и электрических полей в широком диапазоне частот», вып. 16. Новосибирск, СНИИМ, 1972.
9. С. Мэзон, Г. Циммерман. Электронные цепи, сигналы и системы. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
10. В. В. Гребнев, Я. Т. Загорский, И. Н. Козляева. Усилитель на полевом триоде с отрицательной обратной связью по току.— Измерительная техника, 1971, № 9.

*Поступила в редакцию  
20 января 1972 г.*