

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Р. А. ВАЙНШТЕЙН, Л. И. ВОРОНОВА, А. В. ШМОЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Исследование работы параметрического усилителя (ПУ) в условиях сильно изменяющейся температуры окружающей среды предпринято в связи с тем, что реагирующие органы защиты от замыканий на землю с применением ПУ пришлось устанавливать в неотопляемом помещении (распредустройстве на 6 кв электростанции).

Нужно отметить, что установка реагирующих органов земляной защиты потребительских линий на 6—10 кв электростанций в распределительном устройстве является типичной. Поэтому требование достаточно высокой стабильности характеристик при изменении температуры, предъявляемое к реагирующим органам защиты от замыканий на землю, можно считать общим.

В условиях Сибири максимальный диапазон изменения температуры окружающего воздуха в году можно принять в пределах от  $-40$  до  $+40^\circ$ .

В этом диапазоне температур необходимо исследовать и выбрать мероприятия, обеспечивающие стабильность работы реагирующего органа.

### Причины температурной неустойчивости ПУ

Напряжение на колебательном контуре ПУ, согласно [1], при оптимальной фазе сигнала, равной  $90^\circ$ , определяется выражением

$$U_\omega = \frac{\omega L_0 I_\omega V \sqrt{B^2 + \delta_+^2}}{B^2 + \delta_- \cdot \delta_+}, \quad (1)$$

где

$\omega$  — угловая частота сигнала,  
 $L_0$  — среднее значение индуктивности колебательного контура ПУ;  
 $I_\omega$  — ток сигнала;

$B = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{\gamma}{\sigma}$  — относительная реактивная проводимость контура;

$\frac{\gamma}{\sigma} = \frac{1/4 m^2 - 1}{(1/4 m^2 - 1)^2 - \frac{1}{4} m^2}$  — относительная индуктивная проводимость с учетом параметрического воздействия;

$m$  — глубина модуляции индуктивности;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C}}$  — резонансная частота контура, определенная по  $\alpha_0$

$$\delta_+ = \delta + \frac{\beta}{\sigma}; \quad \delta_- = \delta - \frac{\beta}{\sigma};$$

$\delta = g_3 \omega L_0$  — относительная эквивалентная активная проводимость контура;

$$\frac{\beta}{\sigma} = \frac{\frac{1}{2} m}{(1/4 m^2 - 1)^2 - \frac{1}{4} m^2}$$
 — относительная активная проводимость контура, вносимая за счет параметрического воздействия.

Проанализируем влияние температуры на параметры, входящие в формулу (1).

Величины  $\omega$  и  $L_0$  принципиально определяются не параметрами усилителя, а другими элементами, поэтому в дальнейшем при изменении температуры их считаем постоянными.

Среднее значение индуктивности  $L_0$  для усилителя, выполненного по конструкции, описанной в [2], определяется выражением

$$L_0 = \mu_{d\max} \frac{W_k^2 q_1}{l_1} + \mu_0 \frac{(W 2_k)^2}{l\delta}, \quad (2)$$

где

$\mu_{d\max}$  — максимальная динамическая проницаемость ферромагнитного материала сердечников ПУ.;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость пустоты;

$W_k; q_1; q_3; l_1; l\delta$  — конструктивные параметры усилителя, практически не зависящие от температуры.

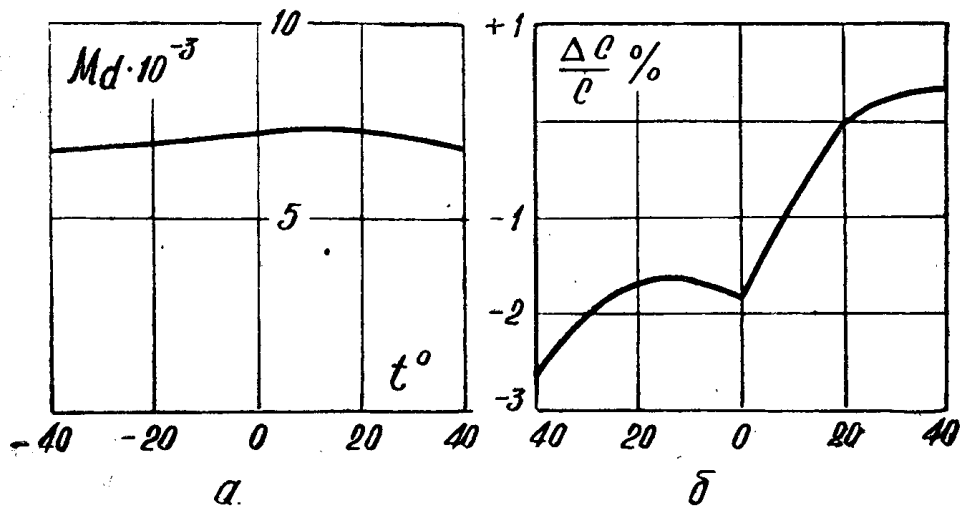


Рис. 1

Магнитная проницаемость пустоты  $\mu_0$  от температуры также не зависит, а максимальная дифференциальная проницаемость кремнистой трансформаторной стали, которую мы используем для изготовления ПУ, согласно данным, приведенным в [3], изменяется в диапазоне температур  $-40 \div +40^\circ$  незначительно.

Это проиллюстрировано для стали Э-42 на рис. 1, а, заимствованным из [3].

Относительная активная проводимость, вносимая за счет параметрического воздействия  $\beta/\sigma$ , зависит только от глубины модуляции индуктивности  $m$ , которая, по [2], равна

$$m = \mu_{d\max} \frac{q_1 W_k^2}{l_1} \cdot \frac{1}{L_0} \quad (3)$$

Сопоставляя (2) и (3), приходим к выводу, что  $m$ , а следовательно, и вносимая проводимость  $\beta/\sigma$  практически не зависят от температуры. Относительная активная проводимость контура

$$B = \frac{\omega^2}{L_0 C} + \frac{\frac{1}{4} m^2 - 1}{\left(\frac{1}{4} m^2 - 1\right) - \frac{1}{4} m^2} \quad (4)$$

при  $m = \text{const}$  и  $L_0 = \text{const}$  будет оставаться постоянной при условии постоянства емкости ( $C$ ) конденсатора колебательного контура. Последняя для используемых металобумажных конденсаторов изменяется в принятом диапазоне температур не более, чем на 3% (рис. 1, б) [3].

Учитывая, что зависимость коэффициента усиления параметрического усилителя от настройки в области своего максимума тупая, можем пренебречь изменениями  $B$  при колебаниях температуры.

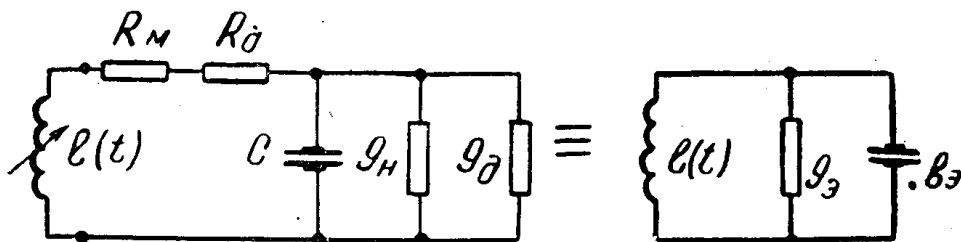


Рис. 2

Относительная эквивалентная нагрузка усилителя  $\delta$  учитывает потери во внешней нагрузке колебательного контура ПУ и потери в медной контурной обмотке. При условии постоянства  $\omega L_0$   $\delta$  пропорциональна действительной эквивалентной активной проводимости контура  $g_3$ , которая (рис. 2) определяется выражением

$$g_3 = \frac{R_M + \frac{g_H}{(\omega C)^2 + g_H^2}}{\left[ R_M + \frac{g_H}{(\omega C)^2 + g_H^2} \right]^2 \left[ \frac{\omega C}{(\omega C)^2 + g_H^2} \right]^2} \quad (5)$$

при  $R_D = g_D = 0$ , где

$R_M$  — активное сопротивление контурной обмотки.

Из (5) видно, что  $g_3$  состоит из двух составляющих, в той или иной степени зависящих от температуры, так как, даже если  $g_H$  не зависит от температуры,  $R_M$  всегда очень сильно изменяется при колебаниях температуры.

Для облегчения дальнейшего анализа упростим выражение (5), учтя действительные соотношения, имеющие место в реальных ПУ. Так, для всех построенных усилителей  $(\omega C)^2 \gg g_H^2$ , поэтому

$$g_3 \approx \frac{R_M + g_H/(\omega C)^2}{\left[ R_M + g_H/(\omega C)^2 \right]^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}} \quad (6)$$

Дальнейший анализ соотношений параметров, входящих в (6), позволяет сделать вывод, что его знаменатель очень мало изменяется при колебаниях температуры, если считать, что  $g_{II} = \text{const}$ .

На основании этого представим  $g_{э*}$  в виде некоторой относительной величины, состоящей из двух слагаемых, первое из которых зависит только от  $R_{M*}$ , а второе от  $g_{II}$ :

$$g_{э*} = R_{M*} + \left[ \frac{g_{II}}{(\omega C)^2} \right]. \quad (7)$$

Важно отметить, что при принятых допущениях эквивалентная емкостная проводимость  $b_{э}$  в схеме на рис. 2 не зависит от температуры:

$$b_{э} = \frac{1/(\omega C)^2}{[R_{M*} + g_{II}/(\omega C)^2]^2 + 1/(\omega C)^2}. \quad (8)$$

На основании сделанных допущений относительное изменение напряжения на контуре ПУ можно исследовать, положив в (1)  $B=0$  и  $\omega_0 L_0 I_{\omega} = 1$ , по выражению

$$\frac{U(t)}{U} = \frac{1}{\delta(t) - \beta/\sigma}$$

Относительные температурные изменения  $\delta$  найдем по (7), приняв  $R_{M*} = 1$  и несколько значений отношения  $\frac{g_{II}}{(\omega C)^2 R_{M*}} = P$ ,

$$g_{э*}(t) = (1 + \alpha \Delta t) + P_{*}$$

На рис. 3 представлены кривые зависимости  $U(t)/U$  при  $m=0,6$  и коэффициенте запаса устойчивости в усилительном режиме при  $t=20^\circ \Delta=0,1$ .

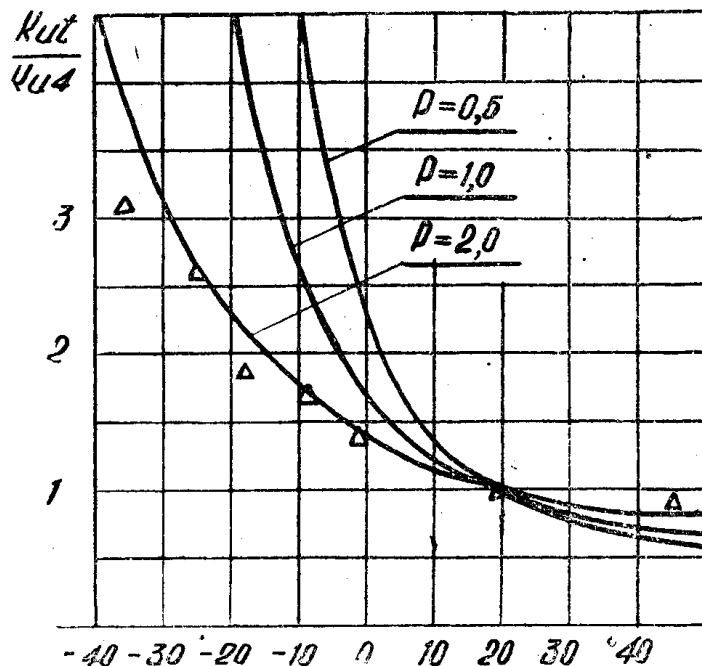


Рис. 3

Из этих кривых следует, что в диапазоне температур  $-40 \div +40^\circ$  имеют место совершенно недопустимые изменения коэффициента усиления. Причем эти изменения уменьшаются при увеличении  $P$ .

Большие значения  $P$  имеют место у более мощных усилителей. Однако сравнительно малое отличие кривых при разных  $P$  позволяет заключить, что естественная температурная стабильность даже при значительном увеличении мощности усилителя будет низкой.

#### Метод повышения температурной стабильности

Как следует из сказанного выше, температурная стабильность ПУ может быть обеспечена, если будет обеспечено постоянство  $g_g$ . Обратимся снова к выражению (6). Эквивалентная активная проводимость  $g_g$  будет оставаться постоянной, если двучлен  $[R_A + g_n/(\omega C)]$ , содержащий параметр, зависящий от температуры, будет также оставаться постоянным. Это может быть достигнуто, если приращения величин  $R_m$  и  $g_n/\omega^2 C^2$  при изменении температуры будут равны по величине и противоположны по знаку.

Ниже показано, что такое изменение  $R_A$  и  $g_n/\omega^2 C^2$  получается с удовлетворительной точностью при выполнении сопротивления внешней нагрузки из металлической проволоки. Обозначим текущее значение величины  $R_m + g_n/\omega^2 C^2$  через  $A(t)$ .

$$A(t) = R_{m_t} (1 + \alpha_m \Delta t) + R_A + \frac{g_n / (1 + \alpha_n \Delta t) + g_A}{\omega^2 C^2} \quad (11)$$

Сопротивление  $R_A$  и проводимость  $g_A$ , не зависящие от температуры, введены в схему для общности. Выражение  $g_n (1 + \alpha_n \Delta t)$  может быть аппроксимировано для ограниченного диапазона температур прямой линией, пока можно считать, что  $(\alpha_n \Delta t) \ll 1$ , так как

$$\frac{1}{1 + \alpha_n \Delta t} = \frac{1 - \alpha_n \Delta t}{1 - (\alpha_n \Delta t)^2} \approx 1 - \alpha_n \Delta t.$$

С учетом (12) выражение (11) примет вид

$$A(t) = R_m + R_g + g_n/\omega^2 C^2 + g_g/\omega^2 C^2 + R_m \alpha_m \Delta t - g_n/\omega^2 C^2 \alpha_n \Delta t. \quad (13)$$

Выражение (13) не будет зависеть от температуры, если

$$R_m \alpha_m \Delta t - \frac{g_n}{\omega^2 C^2} \alpha_n \Delta t = 0. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) дает нужное значение  $g_n$  при данной фиксированной температуре, обеспечивающее постоянство эквивалентной нагрузки усилителя.

$$g_n = \frac{\alpha_m}{\alpha_n} \cdot R_m \omega^2 C^2.$$

Из (15) видно, что материал, из которого предполагается изготовление  $g_n$ , должен обладать положительным температурным коэффициентом сопротивления, постоянным в заданном диапазоне температур. Для того, чтобы потери мощности в сопротивлении  $g_n$ , предназначенном только для температурной стабилизации, были небольшими,  $\alpha_n$  желательно иметь наибольшей. К сожалению, единственным располагаемым материалом, из которого может быть изготовлена компенсирующая проводимость, является медь. Недостатком ее для этой цели является малое удельное сопротивление и как следствие сравнительно большая трудоемкость изготовления больших сопротивлений.

Разработанный способ температурной стабилизации применен в частотно-избирательных реагирующих органах защиты от замыканий на землю Барнаульской ТЭЦ-2. Активное сопротивление обмоток колебательного контура параметрических усилителей  $R_m = 410 \text{ ом}$ , а емкость конденсатора  $3 \text{ мкф}$ .

Компенсирующее сопротивление при условии его изготовления из медного провода, по (15), равно

$$R_n = 1/g_n = \frac{1}{R_m \omega^2 C^2} = 11,3 \text{ ком.}$$

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости напряжения на контуре ПУ от температуры без стабилизации и при включении параллельно емкости сопротивления  $R = 11,3 \text{ ком.}$

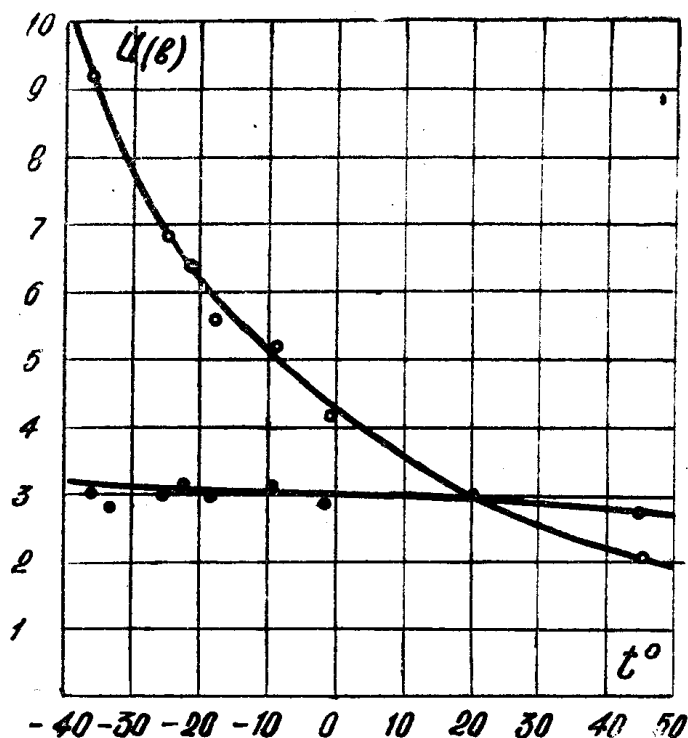


Рис. 4

Как видно, данный способ стабилизации весьма эффективен, а условие (15) для определения компенсирующего сопротивления дает удовлетворительную точность.

Компенсирующее сопротивление намотано бифилярно медным проводом диаметром 0,05 мм и имеет следующие размеры: диаметр — 15 мм, высота — 45 мм. Мощность усилителя при наличии компенсирующего сопротивления достаточна для срабатывания поляризованного реле типа РП-5.

#### Выводы

1. Зависимость коэффициента усиления параметрического усилителя от температуры объясняется изменением сопротивления контурной обмотки.

2. Может быть достигнута высокая температурная стабильность коэффициента усиления путем подключения параллельно колебательному контуру металлического сопротивления, величина которого выбрана по (15).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. А. Вайнштейн, А. В. Шмойлов. Применение низкочастотного параметрического усилителя в защите от замыканий на землю компенсированных сетей. Известия ВУЗов, «Электромеханика», № 12, 1965.
2. Р. А. Вайнштейн. Параметрический усилитель. Авторское свидетельство № 178862 с приоритетом от 15.12.1964.
3. Н. М. Тищенко. Стабильность магнитных усилителей. «Энергия», 1964.