

**О ПРИМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ  
С АСИНХРОННОЙ НАКАЧКОЙ В ЗАЩИТЕ ОТ ЗАМЫКАНИЙ  
НА ЗЕМЛЮ КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЕЙ**

Р. А. ВАЙНШТЕЙН, Л. И. ВОРОНОБА

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

В [1] было предложено использовать параметрический усилитель в качестве реагирующего органа защиты от замыкания на землю. Применение ПУ в синхронном режиме позволило получить реагирующие органы, обладающие высокой чувствительностью к току с частотой  $25\text{ гц}$  при хорошей отстройке от токов промышленной частоты. Однако, как вытекает из свойств ПУ, работающего в синхронном режиме, для получения максимального усиления требуется подводить к цепи накачки определенным образом, сфазированное напряжение.

Если на электрической станции, где имеются трансформаторы напряжения, необходимость фазировки вызывает только дополнительные трудности при монтаже и эксплуатации защиты, то на подстанциях, не имеющих трансформаторов напряжения, этот недостаток непреодолим.

В настоящей работе предлагается способ устранения фазочувствительности ПУ путем искусственного выведения усилителя из синхронного режима. Это может быть достигнуто изменением частоты накачки, соответствующей синхронному режиму —  $2\omega$ , на некоторую небольшую, по сравнению с  $2\omega$ , величину  $\Delta\omega$ .

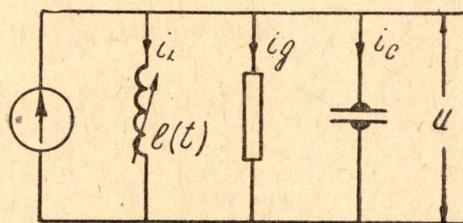


Рис. 1

При этом фаза сигнала относительно периодически изменяющейся индуктивности будет непрерывно меняться с частотой  $\Delta\omega$  и принимать все значения, в том числе и соответствующие максимальному усилению.

Мгновенное значение напряжения на контуре ПУ будет представлять из себя напряжение биений с частотой, огибающей  $\Delta\omega$ .

Таким образом, максимальное значение напряжения на контуре ПУ не будет зависеть от фазы сигнала. В данной работе делается попытка выяснить рациональную величину отклонения частоты накачки от синхронной и исследовать изменение частотно-избирательных свойств ПУ в несинхронном режиме.

Анализ работы ПУ так же, как и в [1], ведем по схеме замещения (рис. 1) методом малого сигнала, предполагающего линейность системы [2]. Закон изменения индуктивности.

$$l t = L_0 (1 + m \sin \omega_n t), \tag{1}$$

где  $L_0$  — постоянная составляющая индуктивности,  
 $m_0 L$  — амплитуда первой гармоники индуктивности или абсолютная глубина модуляции.

Положим

$$\omega_H = 2\omega + \Delta\omega.$$

Ток усилительного сигнала

$$i_0 = I_\omega \sin(\omega t + \psi). \quad (2)$$

Напряжение на контуре ПУ/ при изменении индуктивности с частотой  $2\omega + \Delta\omega$ , сигнала с частотой  $\omega$  будет содержать, кроме основной частоты, составляющие с комбинационными частотами:

$$2\omega + \Delta\omega - \omega = \omega + \Delta\omega,$$

$$2\omega + \Delta\omega + \omega = 3\omega + \Delta\omega.$$

Считая, что отклонение частоты от синхронной мало, то есть  $\Delta\omega \ll \omega$ , можем положить, что по отношению к резонансной частоте контура частоты  $\omega$  и  $\omega + \Delta\omega$  находятся приблизительно в одном положении, так как резонансная частота контура близка к частоте сигнала. Составляющую с частотой  $(3\omega + \Delta\omega)$ , сильно отличающуюся от резонансной, отбрасываем.

На основании этого закон изменения напряжения на контуре можно написать в таком виде:

$$U = U_{s_1} \sin \omega_1 t + U_{c_1} \cos \omega_1 t + U_{s_2} \sin \omega_2 t + U_{c_2} \cos \omega_2 t, \quad (3)$$

где

$$\omega = \omega_1; \quad (\omega + \Delta\omega) = \omega_2.$$

Здесь и в дальнейшем синусным составляющим присваивается индекс „s“, а косинусным „с“.

Последующему определению подлежат амплитуды и фазы напряжений с частотой  $\omega$  и  $(\omega + \Delta\omega)$ .

По схеме замещения ПУ (рис. 1)

$$i = i_L + i_c + i_g, \quad (4)$$

$$i_c = \omega C U_{1s} \cos \omega_1 t - \omega C U_{1c} \sin \omega_1 t + \omega C U_{s_2} \cos \omega_2 t - \omega C U_{c_2} \sin \omega_2 t, \quad (5)$$

$$i_g = g U_{1s} \sin \omega_1 t + g U_{1c} \cos \omega_1 t + g U_{2s} \sin \omega_2 t + g U_{2c} \cos \omega_2 t.$$

Мгновенные значения напряжения на контуре и тока, протекающего через индуктивность, связаны между собой соотношением

$$U = \frac{d [l(t) \cdot i_L]}{dt}. \quad (6)$$

Ток  $i_L$  будет содержать составляющие с частотами

$$\omega_1 = \omega; \quad \omega_2 = \omega + \Delta\omega; \quad \omega_3 = 3\omega + \Delta\omega; \quad \omega_4 = 3\omega + 2\Delta\omega,$$

то есть,

$$i_L = I_{s_1} \sin \omega_1 t + I_{c_1} \cos \omega_1 t + I_{s_2} \sin \omega_2 t + I_{c_2} \cos \omega_2 t + \\ + I_{s_3} \sin \omega_3 t + I_{c_3} \cos \omega_3 t + I_{s_4} \sin \omega_4 t + I_{c_4} \cos \omega_4 t. \quad (7)$$

Подставив (1) и (7) в (6), получаем систему уравнений, связывающих синусные и косинусные составляющие равных частот:

$$\begin{cases}
 -I_{c1} \omega_1 L_0 - \frac{I_{s3} \omega_1 L_0 m}{2} - \frac{I_{s2} \omega_1 L_0 m}{2} = U_{s1}, \\
 -I_{c2} \omega_2 L_0 - \frac{I_{s1} \omega_2 L_0 m}{2} - \frac{I_{s4} \omega_2 L_0 m}{2} = U_{s2}, \\
 -I_{c3} \omega_3 L_0 + \frac{I_{s1} \omega_3 mL_0}{2} = 0, \\
 I_{c4} \omega_4 L_0 + \frac{I_{s2} \omega_4 mL_0}{2} = 0, \\
 I_{s1} \omega_1 L_0 + \frac{I_{c2} \omega_1 mL_0}{2} - \frac{I_{c3} \omega_1 mL_0}{2} = U_{c1}, \\
 I_{s2} \omega_2 L_0 - \frac{I_{c4} \omega_2 mL_0}{2} + \frac{I_{c1} \omega_2 mL_0}{2} = U_{c2}, \\
 I_{s3} \omega_3 L_0 + \frac{I_{c1} \omega_3 mL_0}{2} = 0, \\
 I_{s4} \omega_4 L_0 + \frac{I_{c2} \omega_4 mL_0}{2} = 0.
 \end{cases} \quad (8)$$

Решение системы уравнений (8) дает:

$$\begin{cases}
 I_{s1} = \frac{\frac{1}{2} m \omega_1 U_{s2} - \omega_2 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{c1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]}, \\
 I_{c1} = \frac{\omega_2 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{s1} - \frac{1}{2} \omega_1 m U_{c2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]};
 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases}
 I_{s2} = \frac{\frac{1}{2} m \omega_2 U_{s1} - \omega_1 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{c2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]}, \\
 I_{c2} = \frac{\omega_1 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{s2} - \frac{1}{2} m \omega_2 U_{c1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]};
 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases}
 I_{s3} = m \frac{\frac{1}{2} \omega_1 m U_{c2} - \omega_2 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{s1}}{2 \omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]}, \\
 I_{c3} = m \frac{\omega_1 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{s2} - \omega_2 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{c1}}{2 \omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]};
 \end{cases} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I_{s4} &= m \frac{\frac{1}{2} m \omega_2 U_{c1} - \omega_1 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{s2}}{2 \omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]}, \\ I_{c4} &= m \frac{\frac{1}{2} m \omega_2 U_{s1} - \frac{1}{4} \omega_1 \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right) U_{c2}}{2 \omega_1 \omega_2 L_0 \left[ \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right)^2 - \frac{1}{4} m^2 \right]}, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где обозначено:

$$\beta = \frac{1}{2} m; \quad \gamma = \left( \frac{1}{4} m^2 - 1 \right); \quad \sigma = \gamma^2 - \beta^2.$$

Подставив (5), (9) и (10) в (2), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\beta \omega_1 U_{s2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} - \frac{\omega_2 \gamma U_{c1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} + g U_{s1} - \omega_1 C U_{c1} &= I \omega_1 \cos \psi, \\ \frac{\omega_2 \gamma U_{s1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} - \frac{\omega_1 \beta U_{c2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} + g U_{c1} + \omega_1 C U_{s1} &= I \omega_1 \sin \psi, \\ \frac{\beta \omega_2 U_{s1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} - \frac{\omega_1 \gamma U_{c2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} + g U_{s2} - \omega_2 C U_{c2} &= 0, \\ \frac{\omega_1 \gamma U_{s2}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} - \frac{\beta \omega_2 U_{c1}}{\omega_1 \omega_2 L_0 \sigma} + g U_{c2} + \omega_2 C U_{s2} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \Omega; \quad \omega_1 L_0 \cdot g = \delta_1; \quad C L_0 = \frac{1}{\omega_0^2}; \quad \omega_2 L_0 g = \delta_2;$$

$$\left( \frac{\gamma}{\sigma} + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} \right) = B_1; \quad \left( \frac{\gamma}{\sigma} + \frac{\omega_2^2}{\omega_0^2} \right) = B_2.$$

Тогда уравнения (14) после ряда преобразований примут вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \left( \frac{\beta \Omega}{\sigma} - \frac{\delta_1 \delta_2 \sigma \Omega}{\beta} - \frac{B_1 B_2 \sigma \Omega}{\beta} \right) U_{s2} + \left( \frac{\delta_1 \sigma \Omega B_2}{\beta} - \frac{B_1 \sigma \Omega \delta_2}{\beta} \right) U_{c2} &= \\ &= \Omega \omega_1 L_0 I_1 \cos \psi, \\ \left( \frac{\delta_1 \sigma \Omega B_2}{\beta} - \frac{B_1 \delta_2 \sigma \Omega}{\beta} \right) U_{s2} - \left( \frac{\beta \Omega}{\sigma} U_{c2} - \frac{\delta_1 \delta_2 \sigma \Omega}{\beta} - \frac{B_1 B_2 \sigma \Omega}{\beta} \right) U_{c1} &= \\ &= \omega_1 L_0 I_1 \sin \psi \Omega, \\ \left( \frac{\beta}{\sigma \Omega} - \frac{\delta_2 \sigma \delta_1}{\beta \Omega} - \frac{B_1 B_2 \sigma}{\beta \Omega} \right) U_{s1} + \left( \frac{\delta_2 B_1 \sigma}{\beta \Omega} - \frac{B_2 \sigma \delta_1}{\beta \Omega} \right) U_{c1} &= \\ &= - \left( \frac{\delta_2 \sigma \omega_1 L_0 I \cos \psi + B_2 \sigma \omega_1 L_0 I_1 \sin \psi}{\beta \Omega} \right), \\ \left( \frac{\delta_2 B_1 \sigma}{\beta \Omega} - \frac{B_2 \sigma \delta_1}{\beta \Omega} \right) U_{s1} - \left( \frac{\beta}{\sigma \Omega} - \frac{\delta_1 \delta_2 \sigma}{\beta \Omega} - \frac{B_1 B_2 \sigma}{\beta \Omega} \right) U_{c1} &= \\ &= - \frac{B_2 \sigma \omega_1 L_0 I \cos \psi + \delta_2 \sigma \omega_1 L_0 I_1 \sin \psi}{\beta \Omega}. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Решив систему (15), получим выражения для коэффициентов ряда (3):

$$\left\{ \begin{aligned} U_{s1} &= \frac{\omega_1 L_0 I_1 [(NP - TM) \cos \psi - (PM + NT) \sin \psi]}{M^2 + N^2}, \\ U_{c1} &= \frac{\omega_1 L_0 I_1 [(MP + NT) \cos \psi - (MT - NP) \sin \psi]}{M^2 + N^2}, \\ U_{s2} &= \frac{\omega_1 L_0 I_1 (M \cos \psi + N \sin \psi)}{\Omega (M^2 + N^2)}, \\ U_{c2} &= \frac{\omega_1 L_0 I_1 (N \cos \psi - M \sin \psi)}{\Omega (M^2 + N^2)}; \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{(MP + NT) \cos \psi + (NP - MT) \sin \psi}{(NP + TM) \cos \psi - (PM + NT) \sin \psi}, \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= \frac{N \cos \psi - M \sin \psi}{M \cos \psi + N \sin \psi}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \left( \frac{\delta_1 \sigma B_2}{\beta} - \frac{\delta_2 \sigma B_1}{\beta} \right) &= N; \\ \left( \frac{\beta}{\sigma} - \frac{\delta_1 \delta_2 \sigma}{\beta} - \frac{B_1 B_2 \sigma}{\beta} \right) &= M; \\ \frac{B_2 \sigma}{\beta} &= P; \\ \frac{\delta_2 \sigma}{\beta} &= T. \end{aligned} \quad (17)$$

Амплитудные значения напряжений с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно равны:

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{U_{s1}^2 + U_{c1}^2} = \omega_1 L_0 I_1 \sqrt{\frac{P^2 + T^2}{M^2 + N^2}}, \\ U_2 &= \sqrt{U_{s2}^2 + U_{c2}^2} = \omega_2 L_0 I_1 \sqrt{\frac{1}{M^2 + N^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Как и следовало ожидать, амплитуды напряжений не зависят от фазы сигнала. От нее зависит только фаза огибающей результирующего напряжения на контуре ПУ.

Теперь исследуем выражение амплитуды напряжения биений функции от  $\Delta\omega$ , положив  $\cos \Delta\omega t = 1$ . Текущее значение амплитуды результирующего напряжения при изменении  $\Delta\omega$  будет равно

$$U_{s_{\max}} = \frac{L_0 I T_1}{\sqrt{M^2 + N^2}} \sqrt{(P^2 + T^2) (\omega_1^2 + 2\omega_1 \omega_2) + \omega_2^2}. \quad (19)$$

При построении зависимости  $U_s = f(\Delta\omega)$  принято: глубина модуляции  $m = 0,5$ ; коэффициент запаса устойчивости в усиленном режиме

$$\Delta_p = \frac{\delta_p - \frac{\beta}{\sigma}}{\delta_p} = 0,1,$$

де  $\delta_p$  — активная проводимость контура, отнесенная к индуктивной проводимости, определенной на частоте  $\omega_p = 25$  гц, т. е.  $\delta_p = g\omega_p L_0$ . Также считаем, что контур настроен в резонанс на частоте  $\omega_p$ , т. е. относительная реактивная проводимость контура на этой частоте

$$B_p = \frac{\gamma}{\sigma} + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2} = 0.$$

При принятых исходных условиях относительная активная и реактивная проводимость контура при любом  $\Delta\omega$  будет определяться соотношениями:

$$\delta_1 = \delta_p \frac{\omega_1}{\omega_p}; \quad \delta_2 = \delta_p \frac{\omega_2}{\omega_p};$$

$$B_1 = \frac{\gamma}{\sigma} \left( 1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \right);$$

$$B_2 = \frac{\gamma}{\sigma} \left( 1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_p^2} \right).$$

Полагая  $\Delta\omega$  последовательно равным 0,5; 1; 2 и 3 гц, подсчитаем для каждого случая амплитуду напряжения биения в относительных единицах:

$$U_{s*} = \frac{U_s}{U_{s \max}}.$$

Соответствующая кривая приведена на рис. 2.

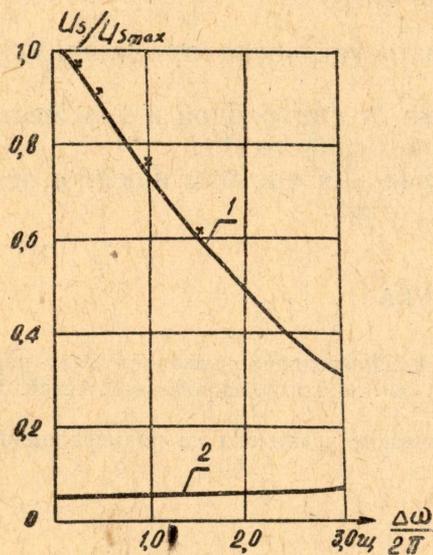


Рис. 2

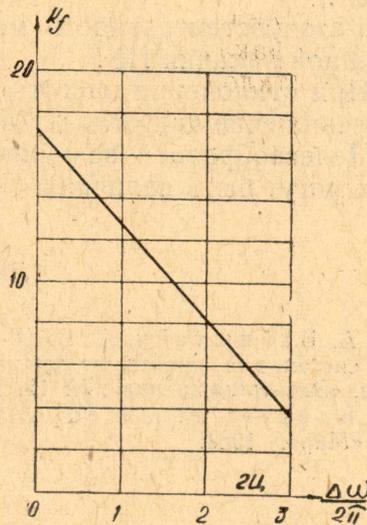


Рис. 3

Там же приведены экспериментальные данные. При отклонении частоты накачки от синхронной наблюдается снижение усиления, следовательно, величина  $\Delta\omega$  имеет принципиальное значение, так как при больших отклонениях наблюдается потеря необходимых свойств ПУ.

Исследования реакции усилителя в области частоты 50 гц показывают, что уменьшение коэффициента отстройки по частоте ( $K_f$ ) происходит не только из-за уменьшения амплитуды напряжения с час-

тотой 25 гц, но и из-за роста напряжения на контуре при частоте сигнала 50 герц.

Реакция усилителя на ток частотой 50 гц проиллюстрирована на рис. 2. Кривая 2 получена из выражения (19) при подстановке как основной частоты 50 гц и  $\Delta\omega = 0,5; 1; 2; 3; 6$  герц.

Сопоставляя кривые (1 и 2), можно построить зависимость

$$K_f = f(\Delta\omega), \quad \text{где} \quad K_f = \frac{U_{s*25}}{U_{s*50}} \quad (\text{рис. 3}).$$

Эта кривая показывает, что отклонение частоты должно быть ограничено такой величиной, при которой  $K_f$  остается достаточно большим. Брать малое отклонение частоты  $\Delta\omega = 0$  нецелесообразно, так как это приведет к большому замедлению в действии защиты при возникновении замыкания, когда  $\cos \Delta\omega t = 0$ . К тому же ориентация на свойства ПУ при  $\Delta\omega = 0$  потребует высокой стабильности частоты у генератора асинхронной накачки. По-видимому, приемлемыми будут значения  $\Delta\omega$  в интервале от 1 до 2 гц. При этом  $K_f = 14 \div 11$ .

Такое значение  $K_f$  достаточно для большинства практических случаев.

Колебания частоты генератора асинхронной накачки в пределах принятого диапазона  $\Delta\omega$  не имеют значения, что упрощает задачу разработки генератора накачки.

### Выводы

1. Эксплуатационные свойства защиты от замыканий на землю на частоте 25 гц могут быть повышены устранением фазочувствительности ПУ.
2. Фазочувствительность может быть устранена путем применения асинхронной накачки ПУ.
3. При отклонении частоты накачки от синхронной имеет место некоторое снижение частотно-избирательных свойств ПУ.
4. Целесообразной величиной отклонения частоты накачки от синхронной могут быть величины  $\Delta\omega = 1-2$  гц.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. А. Вайнштейн, А. В. Шмойлов. Применение низкочастотных параметрических систем для защиты от замыканий на землю компенсированных сетей. Известия вузов. «Электромеханика», № 12, 1965.
2. Л. Блекуэл, К. Коцебу. Параметрические усилители на полупроводниковых диодах. «Мир», 1964.