

ОБ ОШИБКЕ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
С НЕЯВНО ВЫРАЖЕННЫМИ МШИ

Е. Г. Орлов, Н. В. Бородовицын, Б. В. Усков

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Для регулирования напряжения синхронных генераторов (СГ) малой мощности, используемых в качестве источников питания, широко применяются регуляторы на транзисторах, работающих в режиме переключения [1].

Режим переключения транзисторов обеспечивается за счет воздействия на вход усилителя с релейной или близкой к релейной характеристикой периодического сигнала пилообразной формы, содержащегося в управляющем воздействии или подаваемого отдельно. Указанные регуляторы относятся к классу дискретных регуляторов с «неявно выраженным модулятором ширины импульсов» (МШИ). В литературе при исследовании таких систем релейная характеристика усилителя заменяется на линеаризованную в соответствии с теорией вибрационной линеаризации и вся система рассматривается как линейная [1], [2], что часто приводит к существенным погрешностям при определении ошибки регулирования.

В работе дается анализ ошибки в системе регулирования напряжения СГ с обмоткой подмагничивания (ОП) с неявно выраженным МШИ точным методом с учетом реальных характеристик элементов.

Рассматриваемую систему регулирования при небольших отклонениях от установившегося режима работы можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}U_{\Gamma} &= E - k_1 i_n - k_2 i_{\Pi} \\i_n &= \frac{U_p}{R_{\text{оп}}} \cdot \frac{1}{T_1 p + 1} \\U_1 &= \frac{k_3}{T_2 p + 1} U_{\Gamma} \\U_{\text{чз}} &= k_4 (U_1 - U_0).\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь обозначено:

U_{Γ} — напряжение СГ;

E — эдс генератора;

i_n — ток нагрузки;

i_{Π} — ток ОП;

U_p — напряжение вы выходе усилителя;

$R_{\text{оп}}$ — сопротивление ОП;

$U_{\text{чз}}$ — напряжение на выходе чувствительного элемента (ЧЭ);

U_0 — опорное напряжение;
 K_1, K_2, K_3, K_4 — постоянные коэффициенты;
 T_1, T_2 — постоянные времени ОП и фильтра ЧЭ соответственно.
 Величина постоянной времени ОП — T_1 зависит от величины тока i_{II} по гиперболическому закону из-за насыщения спинки якоря (рис 2).

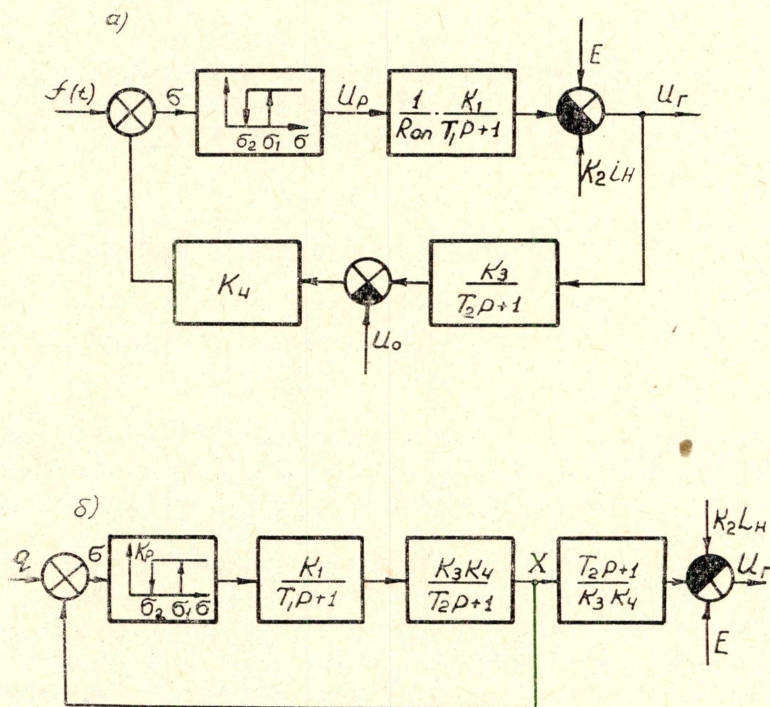


Рис. 1. Структурные схемы системы регулирования напряжения СГ

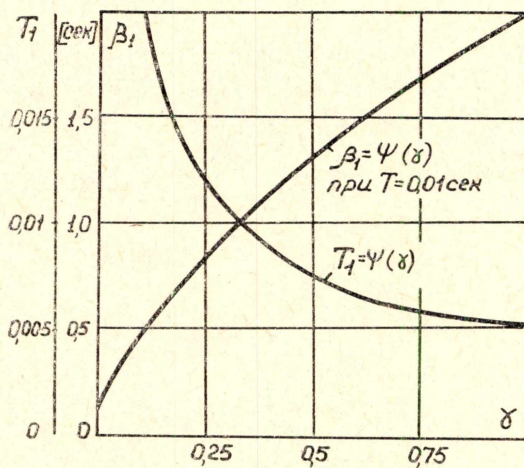


Рис. 2. Графики зависимостей $T_1 = \psi(\gamma)$ и $\beta_1 = \psi(\gamma)$

Усилитель имеет релейную характеристику без запаздывания с напряжением срабатывания σ_1 , напряжением отпускания σ_2 и выходным напряжением U_p . В качестве внешнего периодического сигнала рассмотрим подаваемый от специального формирователя (1) пилообразный сигнал $f(t)$ с амплитудой A , длительностью заднего фронта μ_2 , длительностью переднего фронта μ_1 и постоянной составляющей $1/2 A$.

Структурная схема системы регулирования приведена на рис. 1, а. Для упрощения выкладок целесообразно структурную схему преобразовать к виду рис. 1, б, где возмущающие и задающие воздействия приведены по входу реле.

Для установившегося режима работы и $E = \text{const}$

$$q = k_3 k_4 (E - k_2 i_n) - k_4 U_0. \quad (2)$$

В соответствии с рис. 1, б входная величина реле будет

$$q + f(t) - x(t). \quad (3)$$

Передаточную функцию непрерывной части системы можно известным образом разложить на элементарные передаточные функции первого порядка.

Для i -й компоненты в установившемся режиме работы изменение выходной координаты будет определяться соотношениями:

При импульсе напряжения на выходе усилителя

$$X_{2i} = C_i k_p \left[1 + \frac{e^{-\frac{T_n}{T_i}} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}} e^{-\frac{t}{T_i}} \right], \quad (4)$$

при паузе

$$X_{1i} = C_i k_p \frac{1 - e^{-\frac{T_n}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}} e^{-\frac{t}{T_i}}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2$;

C_i — коэффициент разложения;

T_n, T_i — длительности паузы и импульса соответственно;

$$k_p = \frac{U_p}{R_{оп}}.$$

Начало отсчета времени в (4), (5) совпадает с моментами переключения реле

$$x(t) = \sum_{i=1}^2 x_i(t). \quad (6)$$

Моменты переключения реле будут определяться условиями: при срабатывании

$$\sigma = \sigma_1, \quad \dot{\sigma} > 0, \quad (7)$$

при отпускании

$$\sigma = \sigma_2, \quad \dot{\sigma} < 0. \quad (8)$$

Обозначая сдвиг момента срабатывания реле относительно момента, соответствующего максимальному значению сигнала $f(t)$ через φ , запишем уравнения для нарастающего и спадающего фронтов сигнала $f(t)$ соответственно:

$$f_1(t) = \frac{A}{\mu_1} \left(T_n + t - \varphi - \mu_2 \right), \quad (9)$$

$$f_2(t) = \frac{A}{\mu_2} \left(\mu_2 + \varphi - t \right). \quad (10)$$

Введем относительные значения параметров

$$\frac{T_{\text{н}}}{T} = \gamma T; \quad \frac{T}{T_i} = \beta_i,$$

где T — период следования импульсов.

Из (7), (8) с учетом (4) ÷ (6), (9), (10) получим условия для моментов переключения реле:

$$q + \frac{A}{\mu_2} (\mu_2 + \varphi - T_{\text{н}}) - \sum_{i=1}^2 c_i k_p \lambda_{2i} = \sigma_2,$$

$$q + \frac{A}{\mu_1} (T - \mu_2 - \varphi) - \sum_{i=1}^2 c_i k_p \lambda_{3i} = \sigma_1, \quad (11)$$

где

$$\lambda_{2i} = \frac{1 - e^{-\gamma \beta_i}}{1 - e^{-\beta_i}}; \quad \lambda_{3i} = \frac{e^{-(1-\gamma)\beta_i} - e^{-\beta_i}}{1 - e^{-\beta_i}}.$$

Исключая из этих соотношений величину φ , получим:

$$q = \frac{1}{T} \left[\mu_2 \sigma_2 + \mu_1 \sigma_1 + \mu_2 \sum_{i=1}^2 c_i k_p \lambda_{2i} + \mu_1 \sum_{i=1}^2 c_i k_p \lambda_{3i} - AT(1 - \gamma) \right], \quad (12)$$

Это соотношение определяет зависимость относительной длительности γ от воздействия q при существовании в системе режима вынужденных колебаний с периодом T .

Обычно при эксплуатации рассматриваемых систем интересуются средним значением регулируемой величины, которая в соответствии с рис. 1, б определится для установившегося режима

$$U_{\text{ср}} = E - k_2 i_{\text{н}} - k_1 k_p \gamma$$

При этом размах пульсаций напряжения U_{Γ} в соответствии с (4), (5) будет

$$\delta U_{\Gamma} = k_1 k_p (\lambda_{21} - \lambda_{31}).$$

На рис. 3 приведены рассчитанные по соотношениям (2), (12), (13) зависимости ошибки регулирования напряжения $\Delta U_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} - \frac{U_0}{k_4}$ тока нагрузки при $\mu = 0$; $A = 1,5$ в; $\sigma = 0,1$ в; $k_1 = 5$ в/а; $k_2 = 0,4$ в/а; $k_3 = 0,6$; $k_p = 1,5$ а; $k_4 = 10$; $\beta_1 = \text{const}$; $\beta_2 = 0,5$. $U \beta_1 = \text{var}$ — изменение постоянной времени ОП от значения $i_{\text{н}}$ (скважности γ). Там же даны результаты эксперимента.

Анализ соотношений (2), (12), (13) и рис. 3 показывает, что величина ошибки регулирования по среднему значению существенно образом зависит от значений постоянных времени звеньев системы и отличается от значения, рассчитанного по методу вибрационной линеаризации. Изменение постоянной времени ОП от тока $i_{\text{н}}$ благоприятным образом влияет на величину статической ошибки, уменьшая ее значение.

Изложенный метод расчета ошибки системы регулирования напряжения СГ позволяет рассчитать точные характеристики системы, хорошо совпадающие с результатами эксперимента.

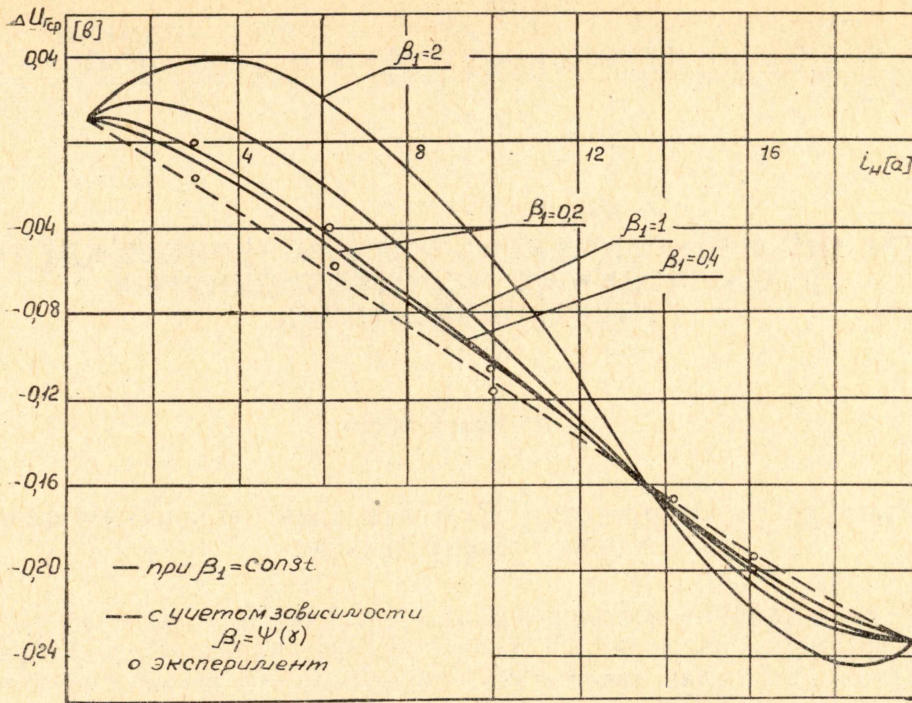


Рис. 3. Графики зависимостей $\Delta U_{гр} = \psi(I_n)$ при $\beta_2 const$ и $\mu = 0$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Бунаков, Р. Г. Гаспаров. Полупроводниковые регуляторы напряжения и частоты электрических машин. «Энергия», 1966.
2. А. А. Красовский и Г. С. Поспелов. Основы автоматики и технической кибернетики. Госэнергоиздат, 1962.