

## АНАЛИЗ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ С ТЯГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕТОДОМ КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА

В. В. БОЛОТОВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Известно, что гармонически линеаризованная нелинейная система должна рассматриваться как линейная, находящаяся на границе устойчивости [1]. Это вытекает из характеристического уравнения системы (рис. 1) при хороших фильтрующих свойствах линейной ее части

$$W_{л} \cdot K(A) = -1, \quad (1)$$

где

$K(A)$  — гармонический коэффициент передачи нелинейного звена.

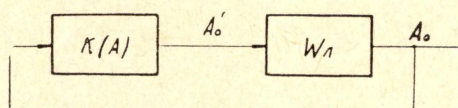


Рис. 1. Структурная схема нелинейной системы.

Выражение (1) показывает, что на комплексной плоскости амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы будет проходить через точку  $(-1, j0)$ , определяющую границу устойчивости.

Поэтому при наличии автоколебаний в системе, описываемой дифференциальным уравнением высокого порядка (не ниже третьего), ее исследование в основном сводится к определению параметров автоколебаний, что наиболее просто осуществить методом корневого годографа.

Преимущества этого метода заключаются в том, что не требуется построения самого годографа и определения корней характеристического уравнения замкнутой системы, так как система находится на границе устойчивости.

Тормозной режим описывается дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_B &= i_B \cdot r_B + L_S \frac{di_B}{dt} + L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt} \\ L_{\mu} \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} &= i_K \cdot r_K \\ i_B + i_{\mu} + i_K & \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Структурная схема системы показана на рисунках 2 и 3 (на последнем представлена схема после преобразования), где

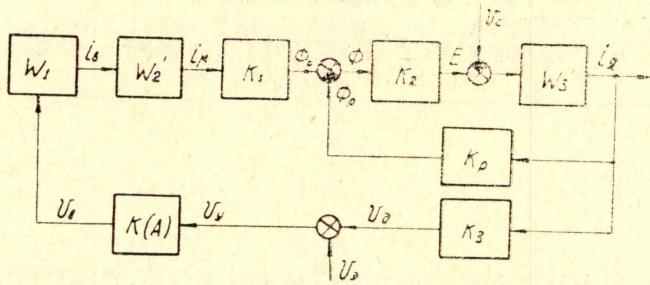


Рис. 2. Структурная схема релейной системы рекуперативного торможения с независимым возбуждением.

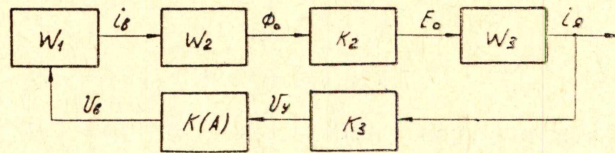


Рис. 3. Структурная схема после преобразования.

$U_B, i_B, r_B$  — напряжение, ток и сопротивление обмотки возбуждения;

$L_p, i_p$  — индуктивность и ток контура намагничивания;

$i_K, r_K$  — ток и эквивалентное сопротивление контура вихревых токов;

$T_K, T_S, T_p, T_я$  — постоянные времени: контура вихревых токов, рассеяния главных полюсов, контура намагничивания, якорной цепи.

$$W_1 = \frac{1/r_B \cdot (T_K \cdot p + 1)}{T_S \cdot T_{KP}^2 + (T_S + T_K + T_p)p + 1} \text{ — передаточная функция обмотки возбуждения;}$$

$$W_2 = \frac{k_1}{T_K p + 1} \text{ — передаточная функция магнитной цепи двигателя;}$$

$$K_1 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta i_p} \text{ — тангенс угла наклона касательной к кривой намагничивания в точке, определяемой средним значением } i_p \text{ ;}$$

$$K_2 = \frac{E}{\Phi} \text{ — коэффициент передачи, связывающий э. д. с. вращения с полезным потоком двигателя;}$$

$$W_3 = \frac{1/r_я}{T_я p + K} \text{ — передаточная функция цепи якоря с учетом размагничивающего влияния реакции якоря коэффициентом } K_p \text{ ;}$$

$$K = 1 + \frac{K_p \cdot K_2}{r_я} \text{ — коэффициент;}$$

$K_3$  — коэффициент передачи датчика тока якоря;

$\Phi_0$  — поток возбуждения двигателя без учета реакции якоря;

$\Phi = \Phi_0 - \Phi_p$  — поток реакции якоря;  
 $\Phi_p$  — полезный поток;  
 $U_c$  — напряжение сети;  
 $U_d$  — напряжение на выходе датчика тока;  
 $U_a$  — эталонное напряжение, пропорциональное заданному значению току якоря;  
 $U_y$  — напряжение на выходе релейного элемента.

Если выходная координата (ток якоря) сравнивается с заданным в дискретные моменты времени, то гистерезис системы становится пренебрежимо мал и его можно не учитывать. Тогда, согласно [1],

$$K(A) = \frac{4B}{\pi \cdot A}, \quad (3)$$

где  $B$  — определяется согласно виду релейной характеристики (рис. 4);  
 $A$  — амплитуда сигнала на входе нелинейного элемента.

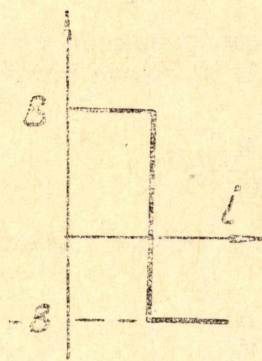


Рис. 4. Характеристика нелинейного элемента.

Согласно рис. 3 передаточная функция линеаризованной разомкнутой системы запишется в виде

$$W_p = \frac{K_d \cdot K(A)}{[T_s \cdot T_k p^2 + (T_s + T_k + \tau) p + 1] (T_d p + K)}, \quad (4)$$

где

$$K_d = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{r_a \cdot r_b \cdot K}.$$

Определив корни характеристического уравнения для разомкнутой системы (4), можно записать уравнение корневых годографов

$$-\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \omega_0 \tau = -180^\circ, \quad (5)$$

где  $\theta_1$  — фазовые углы векторов, проведенных из полюсов в точку  $\omega_0$  на мнимой оси комплексной плоскости (рис. 5);

$\omega_0$  — частота автоколебаний в системе;

$\tau$  — фиксированное запаздывание.

Если величина  $\tau$  оказывает заметное влияние, то уравнение (5) является трансцендентным и решается методом проб. Однако в практически имеющихся пределах величина  $\omega_0 \tau$  составляет малую величину и ею можно пренебречь. Тогда при значительно малой величине  $P_1$  частоту автоколебаний можно определить аналитически

$$\omega_0 = \sqrt{P_2 \cdot P_3}. \quad (6)$$

Найденное значение  $\omega_0$  необходимо нанести на мнимую ось (рис. 5) и проверить уравнение (5). Гармонический коэффициент передачи согласно (3)

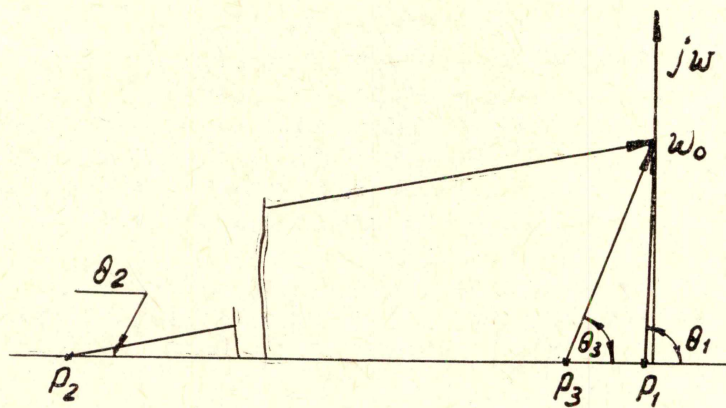


Рис. 5. Нулевой портрет.

$$K(A_0) = \frac{K_{гр}}{K_{л}} = \frac{4B}{\pi \cdot A_0}, \quad (7)$$

где  $K_{гр}$  — коэффициент передачи линеаризованной системы в точке  $\omega_0$ .  
 Другой параметр автоколебаний  $A_0$  на входе нелинейного звена определяется как

$$A_0 = \frac{4B \cdot K_{л}}{\pi \cdot K_{гр}}. \quad (8)$$

После приведения к току якоря амплитуда автоколебаний тока составит

$$\Delta I_{я} = \frac{A_0}{K_3}. \quad (9)$$

Фильтрующие свойства линейной части системы проверяются, исходя из полученной частоты автоколебаний  $\omega_0$ , согласно [2]

$$\left| \frac{W_{л}(iK\omega)}{W_{л}(i\omega)} \right| \ll 1. \quad (10)$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Г. Удерман. Приближенное исследование автоколебаний методом корневого годографа. М., «Энергия», 1967.
2. Теория автоматического управления. Под общей редакцией А. В. Нестушила, М., «Высшая школа», 1972.