

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПУСКОВОГО И ТОРМОЗНОГО ТОКОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Л. В. ВОЛЫНЕЦ, Р. К. ГАЧИК, А. П. ЗАЙЦЕВ, Ю. Ф. МИХЕЕВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

Широко известны широтно-импульсные системы регулирования тока двигателей электроприводов постоянного тока. Менее распространены и недостаточно изучены аналогичные системы, использующие релейный принцип регулирования. Объясняется это сложностью применения релейного принципа при регулировании быстропротекающих процессов, каким является электромагнитный процесс, связанный с изменением тока якоря. Недостаточное быстродействие датчиков тока и значительный гистерезис характеристик устройств сравнения, выпускаемых серийно, обуславливают значительные пульсации регулируемой величины и, как следствие, плохую энергетику и коммутацию электродвигателей. Это обстоятельство сдерживает развитие простых по структуре релейных систем регулирования тока, обладающих высоким быстродействием и позволяющих реализовать большие коэффициенты усиления без нарушения устойчивости системы относительно гладкой составляющей регулируемого тока.

Удобным объектом регулирования для релейной САР тока является двигатель последовательного возбуждения, имеющий повышенную электромагнитную постоянную времени цепи якоря, что несколько снижает требования к быстродействию датчиков тока в системе. Научно-исследовательским институтом автоматики и электромеханики при ТПИ совместно с Рижским электромашиностроительным заводом разработаны и испытаны релейные САР пускового и тормозного токов тяговых электродвигателей, блок-схемы которых приведены на рис. 1. Регулирование тока осуществляется шунтированием тиристорным ключом ТК обмотки возбуждения или сопротивления цепи якоря. Для электрического транспорта с низковольтным источником питания тиристорный ключ может быть включен последовательно в якорную цепь на полное напряжение источника. При реостатно-рекуперативном торможении тяговый двигатель включается по схеме независимого возбуждения с тиристорным ключом в цепи обмотки возбуждения. В качестве датчика тока в системах применен подмагничиваемый мультивибратор с магнитной связью, частота выходного напряжения которого изменяется в функции регулируемого тока, а в качестве элемента сравнения истинного и заданного значений тока якоря применен селектор импульсов по частоте, не обладающий гистерезисом выходной характеристики. Это позволило снизить амплитуду пульсаций тока якоря в процессе регулирования до нескольких процентов от среднего значения.

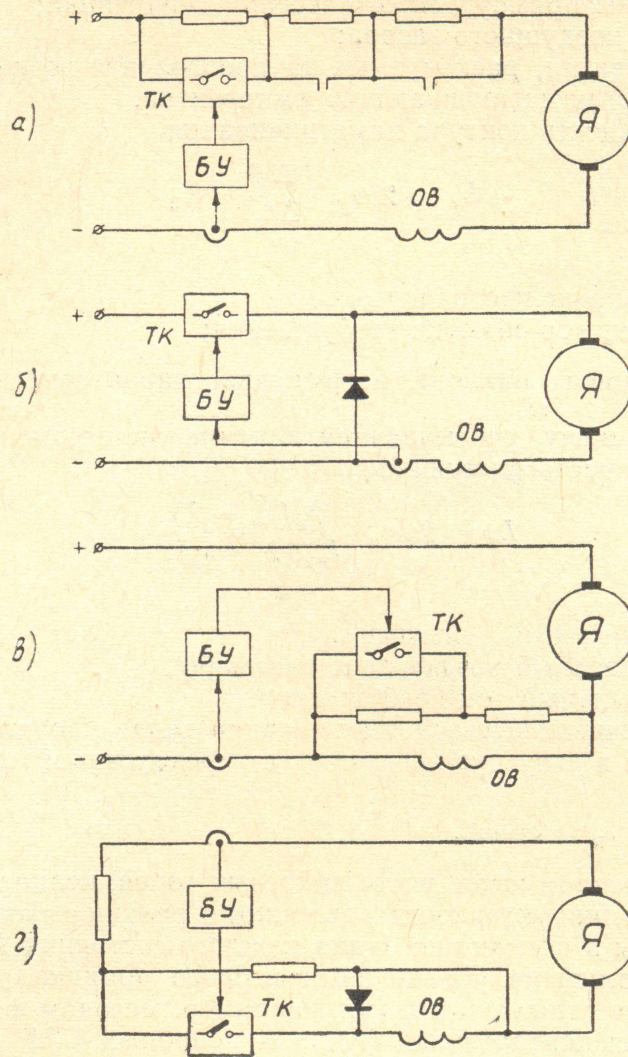


Рис. 1.

Для релейных систем регулирования характерно то, что вследствие больших скоростей изменения координат системы существенное влияние на характер процессов оказывают некоторые факторы, которыми пренебрегают или учитывают упрощенными зависимостями в непрерывных системах.

При анализе квазиустановившихся и переходных режимов в релейных САУ тока эти факторы можно учесть следующим образом.

1. Контур вихревых токов представляется в виде эквивалентного короткозамкнутого контура без потоков рассеяния с постоянной времени

$$T_k = T_k' \frac{Aw_0}{Aw_1},$$

где

$$T_k' = \frac{4l_c}{\pi\rho\delta 10^9} \cdot \frac{a \cdot b}{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}},$$

l_c — длина сплошного участка сердечника;
 ρ — удельное электрическое сопротивление материала сплошного участка;

- a, b — стороны прямоугольного сечения сердечника;
 σ — длина воздушного зазора;
 $A\omega_0$ — ампервитки, расходуемые на преодоление воздушного зазора;
 $A\omega_1$ — полные намагничивающие ампервитки.
 2. Индуктивность контура намагничивания

$$L_{\mu} = 2pw_{\text{в}} \frac{\Delta\Phi}{\Delta I_{\mu}} \cdot K_2,$$

где

- p — число пар полюсов двигателя;
 $\omega_{\text{в}}$ — число витков обмотки возбуждения;
 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta I_{\mu}}$ — коэффициент наклона нагрузочной характеристики;
 K_2 — коэффициент, учитывающий влияние гистерезиса.

3. Индуктивность рассеяния

$$L_s = 2pw_{\text{в}} \frac{\Phi_{\text{н}}(\sigma_{\text{н}} - 1)}{I_{\text{вн}}(2 - \sigma_{\text{н}})},$$

где

- $\Phi_{\text{н}}$ — номинальный полезный поток,
 $\sigma_{\text{н}}$ — номинальный коэффициент рассеяния,
 $I_{\text{вн}}$ — номинальный ток возбуждения.

4. Размагничивающее действие реакции якоря удобно учитывать отдельным звеном в структурной схеме с передаточным коэффициентом

$$K_p = \frac{\Delta\Phi_p}{\Delta I_{\text{я}}} \text{ при } I_{\text{в}} = \text{const}.$$

При приведенном выше учете вихревых токов, нелинейности кривой намагничивания, индуктивности рассеяния и реакции якоря электромагнитные процессы в схемах рис. 1 для каждого состояния ТК описываются дифференциальными уравнениями второго порядка, которые могут быть решены известными методами, например, методом фазовой плоскости. Обобщенная передаточная функция подобных САР на интервалах постоянств параметров имеет вид

$$W(p) = W_f(p) \cdot F(p) + W_{\delta}(p),$$

где

- $F(p)$ — изображение управляющего воздействия,
 $W_t(p)$ — передаточная функция по основному входу,
 $W_{\delta}(p)$ — передаточная функция по δ -входу.

Передаточная функция по основному входу может быть представлена в виде

$$W_i(p) = \frac{T_{\text{к}}p + 1}{T_s T_{\text{к}} p^2 + (T_s + T_{\text{к}} + T_{\mu}) p + (k_e + 1)},$$

- T_s — постоянная времени рассеяния главных полюсов;
 T_{μ} — постоянная времени намагничивающего контура;
 k_e — коэффициент, учитывающий противоэдс двигателя.

Передаточная функция по δ -входу учитывает начальные условия движения в системе:

$$W_{\delta}(p) = \frac{T_s T_{\text{к}} i'_0 + [T_s T_{\text{к}} p + (T_s + T_{\text{к}} + T_{\mu}) i_0 - T_{\text{к}} U_{\text{сo}}]}{T_s T_{\text{к}} p^2 + (T_s + T_{\text{к}} + T_{\mu}) p + (k_e + 1)},$$

где

- i_0 ; i'_0 и $U_{\text{сo}}$ — начальные значения тока, его первой производной и напряжения питающей сети соответственно

Электромагнитные процессы в схеме рис. 2 описываются дифференциальными уравнениями третьего порядка, и исследование квазиустановившихся процессов в релейной САР рис. 2 методом фазовой плоскости затруднительно. Ниже проведено исследование квазиустановившихся процессов в оптимальной системе рекуперативного торможения, описанной в [1] и выполненной по схеме рис. 2. При исследовании были приня-

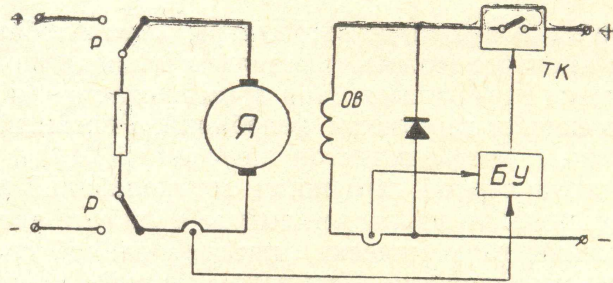


Рис. 2

ты следующие допущения:

- 1) скорость вращения двигателя постоянная,
- 2) напряжение в сети не изменяется,
- 3) тиристорный ключ идеальный,
- 4) линейная часть системы является хорошим фильтром низких частот.

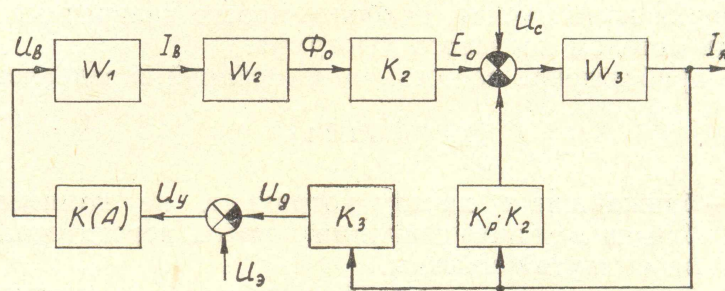


Рис. 3

Блок-схема исследуемой системы представлена на рис. 3, где

$$W_1 = \frac{\Delta U_B(p)}{\Delta I_B(p)} = \frac{1/r_b (T_K p + 1)}{T_S T_K p^2 + (T_S + T_K + T_\mu) p + 1}$$

— передаточная функция обмотки возбуждения;

$$W_2 = \frac{\Delta \Phi(p)}{\Delta I_B(p)} = \frac{1/r_\alpha}{T_K p + 1}$$

— передаточная функция магнитной цепи двигателя;

$k_2 = C_e n$ — коэффициент передачи двигателя между э.д.с. и потоком;

$$W_3 = \frac{\Delta I_\alpha(p)}{\Delta U_\alpha(p)} = \frac{1/r_\alpha}{T_\alpha p + 1}$$

— передаточная функция якорной цепи двигателя;

k_3 — коэффициент передачи блока управления (датчик тока якоря, вычислительное устройство);

$$K(A) = \frac{4B}{\pi A} e^{-i\varphi(A)}, \quad \varphi(A) = \arcsin \frac{B}{A} \text{ — комплексный коэффициент}$$

передачи релейного элемента с зоной неоднозначности $2b$ и сигналом на выходе B ;

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}}} \text{ — постоянная времени якорной цепи.}$$

При сделанных допущениях параметры автоколебаний при квазиустановившемся процессе можно определить, проведя гармоническую линеаризацию системы торможения. При этом считаем, что в системе циркулирует только первая гармоника колебаний. Релейный элемент заменяется комплексным коэффициентом передач $K(A)$ и считается, что амплитуда и частота первой гармоники автоколебаний релейной системы в первом приближении равны амплитуде и частоте автоколебаний регулируемой величины гармонически линеаризованной системы, находящейся на границе устойчивости. При таком подходе передаточная функция разомкнутой линеаризованной системы запишется:

$$W_p(p) = \frac{K_{\text{л}} \cdot K(A)}{[T_{\text{с}} T_{\text{к}} p^2 + (T_{\text{с}} + T_{\text{к}} + T_{\text{п}}) p + 1] (T_{\text{я}} p + 1)}, \quad (1)$$

где

$K_{\text{л}}$ — коэффициент передачи линейной части системы.

Дальнейшее исследование автоколебаний можно вести любым методом линейной теории автоматического регулирования, но, поскольку $K(A)$ — величина комплексная, наиболее просто дальнейшее исследование проводить методом корневого годографа.

Нулевое приближение частоты автоколебаний определяется

$$\omega_0 = \sqrt{p_1 \cdot p_2},$$

где

p_1 и p_2 — ближайшие к началу координат, не компенсированные близко лежащими нулями полюсы передаточной функции разомкнутой системы.

Задаваясь значениями частоты, близкими к $\omega_{\text{н}^0}$, записываем уравнение фаз:

$$-\varphi(A) - \sum_{i=1}^3 \arctg \frac{\omega_0}{p_i} = \mp 180^\circ. \quad (2)$$

Из (2) определяем значение $\varphi(A)$ и по выражении для $K(A)$ и $\varphi(A)$ определяем амплитуду колебаний на входе релейного элемента A и модуль $K(A)$. Значения общего коэффициента передачи линеаризованной системы, при котором система будет находиться на границе устойчивости, находится из уравнения модулей:

$$K_{\text{гр}} = K_{\text{л}} \cdot |K(A)| = a \prod_{i=1}^3 \sqrt{\omega_0^2 + p_i^2}. \quad (3)$$

Из (3) определяем значение $K_{\text{л}}$, при котором в системе будут автоколебания с частотой ω_0 . Прделав такие преобразования для нескольких значений ω_0 , строим зависимости $\omega_0 = f(K_{\text{л}})$ и $A = f(K_{\text{л}})$, по которым при известной ($K_{\text{л}}$) можно определить параметры автоколебаний, либо по заданным ω_0 и A определить необходимый $K_{\text{л}}$.

Приведенные выше методики и выражения позволили исследовать электромагнитные процессы в релейных системах управления по схемам рис. 1 и 2. Результаты расчетов и экспериментов совпадают с точностью 8—15 процентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Зайцев, Р. К. Гачик. Оптимальная система управления электрическим торможением электропоезда. Доклады к V научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Том 1, 1967, Томск.

2. Р. К. Гачик, А. П. Зайцев, Л. М. Трахтман, Л. Ю. Вейцман и др. Способ плавного автоматического реостатно-рекуперативного торможения электроподвижного состава. Авторское свидетельство № 244373, Бюллетень, № 18, 1969.

3. Э. Г. Удерман. Приближенное исследование колебаний методом корневого годографа. «Энергия», 1967.
