

## РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А. П. ЗАЙЦЕВ, Р. К. ГАЧИК, Л. В. ВОЛЫНЕЦ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ).

Класс дискретных автоматических систем открыли релейные регуляторы, обладающие такими преимуществами, как простота структурной схемы, высокое быстродействие, возможность получения больших коэффициентов передачи сравнительно простыми средствами и др. Они нашли наибольшее распространение в системах автоматического регулирования (САР) напряжения самолетных и автомобильных генераторов постоянного тока и до последнего времени почти не применялись в САР токов электродвигателей. Объясняется это тем, что нагрузка генераторов постоянного тока, как правило, обладает значительной индуктивностью, что обеспечивает сравнительно небольшой уровень пульсаций выходной величины в процессе регулирования, в то время как индуктивность силового контура электродвигателей постоянного тока незначительна, и применение релейных регуляторов в САР токов электродвигателей предъявляет весьма жесткие требования к динамическим свойствам всех элементов регулятора (датчики тока, устройства сравнения, усилители и т. д.). С появлением бесконтактных элементов (начиная от датчиков и кончая силовыми регулирующими звеньями) преодолен основной недостаток релейных регуляторов — сравнительно невысокий срок службы, что открывает широкие перспективы применения их для указанных целей.

Одним из таких применений является разработанная научно-исследовательским институтом автоматики и электромеханики при Томском политехническом институте совместно с предприятием система стабилизации пускового и тормозного токов серийных электродвигателей. На рис. 1 представлена схема силового контура, а на рис. 2 — упрощенная блок-схема, на которых обозначено:

- БУ* — блок управления;
- РЭ* — релейный элемент;
- ЭД* — электродвигатель;
- ДТ* — датчики тока;
- ТК* — тиристорный ключ.

Регулирование ведется путем шунтирования релейным элементом (например, тиристорным ключом ТК) добавочного сопротивления в цепи якоря или обмотки возбуждения. Напряжение обратной связи  $U_i$ , пропорциональное текущему значению тока  $i$ , сравнивается с эталонным напряжением (уставкой)  $U_0$ , пропорциональным требуемому значению тока якоря, в устройстве сравнения. По причине, указанной выше, это устройство должно обладать высоким быстродействием и выполняться на электронных приборах. Все реально существующие устройства сравнения имеют неодно-

значную (петлевою) статическую характеристику «вход — выход». Часто такую характеристику относят к релейному элементу. Если тиристорный ключ присоединен параллельно добавочному сопротивлению в цепи якоря, то за выходную координату  $F$  релейного элемента можно принять величину сопротивления, которое скачком возрастает до  $r_d$ , если ток, увеличиваясь, достигает некоторого значения  $i_{\max}$  и скачком падает до нуля, если ток, умень-

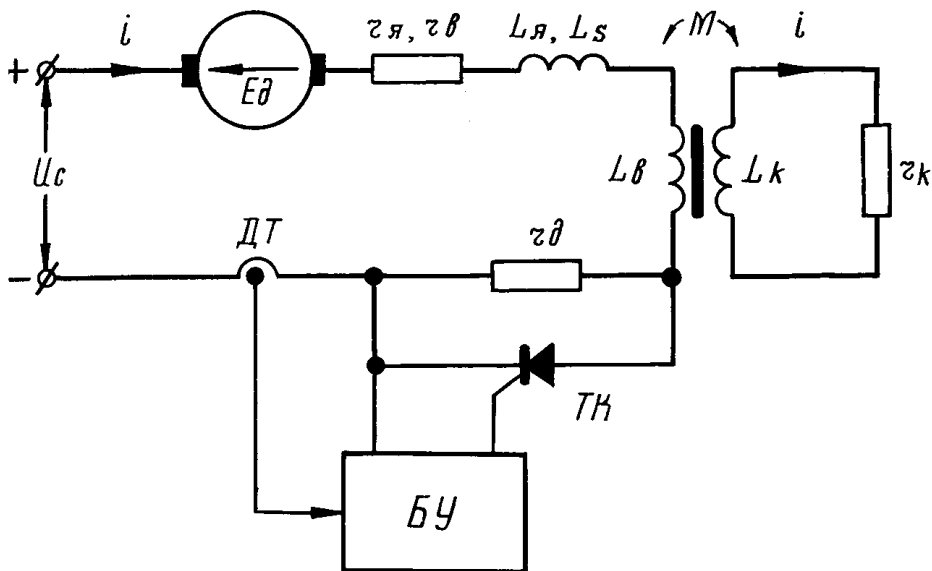


Рис. 1.

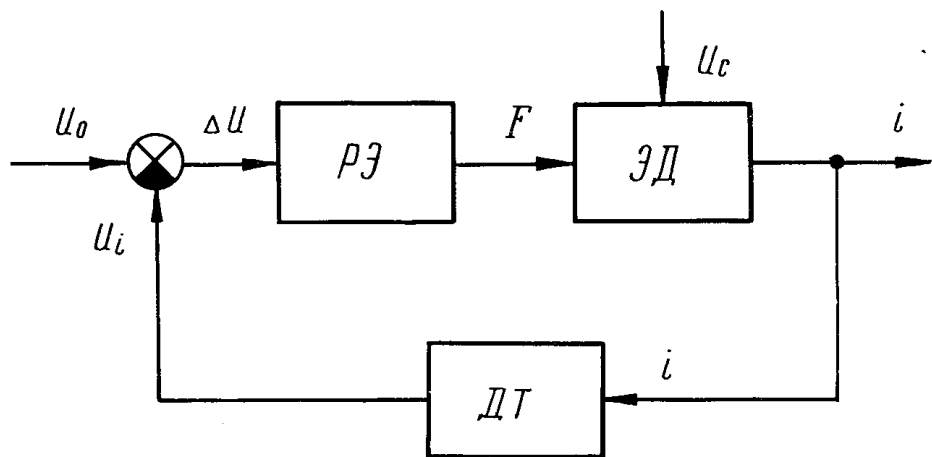


Рис. 2.

шаясь, достигает некоторого значения  $i_{\min}$ . Поскольку статическая характеристика релейного элемента неоднозначна, режим автоколебаний является характерным режимом работы системы. Тиристорный ключ является практически безынерционным звеном, поэтому порядок системы даже при учете рассеяния и влияния вихревых токов равен двум, а сама система является плохим фильтром высших гармоник, что затрудняет ее исследование одним из хорошо развитых частотных методов. При переключении релейного элемента происходит скачкообразное изменение суммарного сопротивления силового контура, а следовательно, и коэффициентов дифференциального уравнения системы. Поэтому для исследования квазиустановившихся процессов целесообразно применить метод фазовой плоскости.

Для одного из состояний тиристорного ключа система описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} L_{\Sigma} \frac{di}{dt} + M \frac{di_K}{dt} + r_{\Sigma} i &= U_c - E_d; \\ L_K \frac{di_K}{dt} + M \frac{di}{dt} + r_K i_K &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При этом предполагается, что регулируемый объект связан с большими массами и, кроме того, пульсации тока якоря не превышают 10%. Это позволяет при рассмотрении динамических электромагнитных процессов не учитывать изменение скорости, а следовательно, и противоз. д. с. двигателя и не учитывать нелинейность характеристики двигателя.

Приняты следующие обозначения (рис. 1):

$L_{\Sigma}$  — индуктивность обмотки якоря с учетом обмотки дополнительных полюсов, обмотки возбуждения и рассеяния главных полюсов;

$L_K$  — индуктивность контура вихревых токов;

$M$  — коэффициент взаимной индукции между обмоткой возбуждения и эквивалентным контуром вихревых токов;

$r_{\Sigma}$  — общее сопротивление силового контура для данного состояния тиристорного ключа;

$r_K$  — сопротивление контура вихревых токов;

$U_c$  — напряжение питающей сети;

$E_d$  — противоз. д. с. двигателя.

Для невозмущенного движения ( $dU_c/dt = 0$ ) система (1) может быть сведена к уравнению:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = f - a \frac{di}{dt} - bi, \quad (2)$$

где  $a, b, f$  — постоянные величины.

Уравнение интегральных кривых

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f - ay - bx}{y}, \quad (3)$$

по которому может быть построен фазовый портрет системы для одного из состояний релейного элемента. Дополнив его фазовым портретом для другого состояния релейного элемента, нетрудно получить четко выраженный предельный цикл. Параметры автоколебаний могут быть найдены по предельному циклу, либо определены более точным методом — методом точечных преобразований.

Величина амплитуд автоколебаний определяется этим методом по выражению

$$(X_i)^{\frac{p_1}{p_2}} = \frac{(p_2)^{p_2} (y_0 + p_1 x_0)^{p_1}}{(p_1)^{p_1} (y_0 + p_2 x_0)^{p_2}}, \quad (3)$$

где

$p_1, p_2$  — корни характеристического уравнения системы;

$x, y$  — начальные значения тока якоря и его первой производной на линии переключения релейного элемента.

При этом предполагается перенос начала координат в «особую» точку. Длительность полупериодов  $t_i$  автоколебаний определяется выражением

$$t_i = \frac{1}{p_2 - p_1} \ln \frac{p_2 (y_0 + p_1 x_0)}{p_1 (y_0 + p_2 x_0)}, \quad (4)$$

при этом также предполагается перенос начала координат в «особую» точку.

Автоколебания носят ярко выраженный релаксационный характер, а предельный цикл несимметричен, что обуславливается, с одной стороны, текущим значением противоз. д. с. двигателя и с другой — скачкообразным изменением коэффициентов дифференциального уравнения системы при переключении релейного элемента. Поэтому внутри предельного цикла величины амплитуд и длительность полупериодов автоколебаний следует находить отдельно для открытого и закрытого состояний тиристорного ключа.

ча, а размах пульсаций и период автоколебаний находить как сумму амплитуд и полупериодов соответственно.

Ключевой элемент может быть включен последовательно в силовой контур. После разгона двигателя до естественной характеристики тиристорный ключ присоединяется параллельно обмотке возбуждения, и дальнейший разгон осуществляется путем плавного ослабления поля. В режиме динамического торможения с самовозбуждением тиристорный ключ включается последовательно в тормозной контур. Особенностью САР является то, что логика работы релейного элемента остается неизменной независимо от режима работы электродвигателя: для увеличения тока якоря необходимо открыть ключ и для уменьшения — закрыть.

Режим динамического торможения с самовозбуждением серийных двигателей является простейшим режимом торможения. Создание релейных систем рекуперативного торможения с самовозбуждением тяговых двигателей последовательного возбуждения представляет значительные трудности, так как необходимо принимать специальные меры для обеспечения удовлетворительного переходного процесса при скачкообразных изменениях напряжения контактной сети. Гораздо проще обеспечить удовлетворительное качество переходных процессов при рекуперативном торможении с независимым возбуждением тяговых двигателей. Кроме того, при больших скоростях движения необходимо ограничивать тормозной ток по потенциальным условиям на коллекторе двигателей. Такая система рекуперативного торможения была разработана в НИИ АЭМ при ТПИ совместно с предприятием и описана в [3]. Анализ и синтез релейных систем регулирования тока якоря двигателей изменением тока возбуждения затруднителен, так как даже при применении безынерционных элементов управления система описывается дифференциальным уравнением четвертого порядка и содержит несколько нелинейностей (релейный элемент, насыщение, изменение постоянных времени, произведение координат системы и т. д.). Так как регулируемый объект связан с большими маховыми массами, то электрохимическая постоянная времени на несколько порядков превосходит электромагнитные. Последнее обстоятельство позволяет исследовать отдельно электромагнитные и электрохимические процессы, т. е. электромагнитные процессы исследуются при неизменных скоростях движения, а электрохимические процессы исследуются по гладкой составляющей тока.

При управлении двигателем со стороны обмотки возбуждения система является хорошим фильтром высоких частот, поэтому для исследования электромагнитных процессов в первом приближении (особенно автоколебательных режимов) можно использовать метод гармонической линеаризации. Поскольку режим автоколебаний для релейных систем с неоднозначной характеристикой релейного элемента является единственно возможным, то определение амплитуды и частоты автоколебаний выходной координаты системы решает задачу исследования электромагнитных квазиустановившихся процессов. Проведем анализ квазиустановившихся процессов в упомянутой выше системе, структурная схема которой после гармонической линеаризации представлена на рис. 3. Поведение системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta U_{\text{в}}}{r_{\text{в}}} (T_{\text{к}} p + 1) &= \Delta I_{\text{в}} [T_{\text{с}} T_{\text{к}} p^2 + (T_{\text{с}} + T_{\text{к}} + T_{\mu}) p + 1]; \\ \Delta I_{\text{в}} \cdot K_1 &= \Delta E (T_{\text{к}} p + 1); \\ \frac{\Delta E}{r_{\text{я}}} &= \Delta I (T_{\text{я}} p + 1); \\ \Delta U_{\text{в}} &= \Delta U_{\text{я}} \frac{4B}{\sqrt{1-A}} e^{-i\varphi}; \\ \varphi &= \arcsin \frac{b}{A}; \\ \Delta U_{\text{я}} &= \Delta I \cdot K_2 \cdot K_3; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

- $U_B$  — напряжение на обмотке возбуждения;
- $I_B$  — ток возбуждения двигателя;
- $E$  — э. д. с. вращения двигателя;
- $I$  — ток якоря двигателя;
- $U_y$  — выходное напряжение вычислительного устройства;
- $T_K$  — постоянная времени контура вихревых токов;
- $T_s$  — постоянная времени, обусловленная индуктивностью, рассеяния главных полюсов;

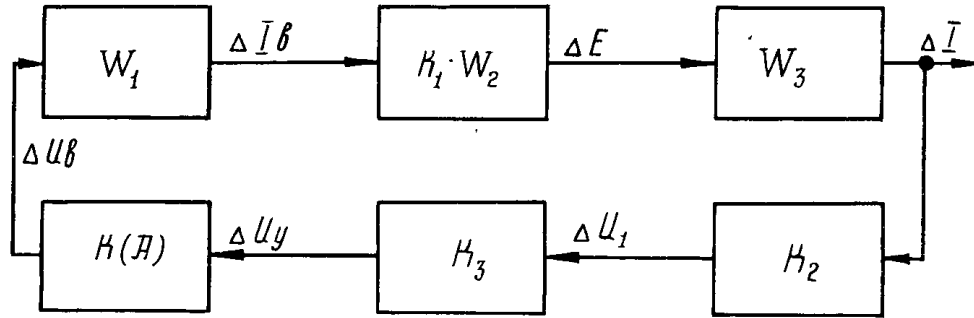


Рис. 3

- $T_\mu$  — постоянная времени намагничивания главных полюсов;
- $r_B$  — сопротивление цепи возбуждения;
- $r_\alpha$  — сопротивление якорной цепи;
- $B$  — амплитуда выходного напряжения релейного элемента;
- $b$  — половина зоны неоднозначности релейного элемента;
- $A$  — амплитуда первой гармоники автоколебаний на входе релейного элемента;
- $K_2, K_3$  — коэффициенты передачи датчика тока якоря и вычислительного устройства соответственно.

Считая амплитуду  $A_0$  и частоту  $\omega_0$  автоколебаний напряжения на входе релейного элемента системы в первом приближении равной амплитуде и частоте автоколебаний этой же величины гармонически линеаризованной системы, находящейся на границе устойчивости, для определения  $A$  и  $\omega_0$  можно применить метод корневого годографа. Передаточная функция разомкнутой системы запишется

$$W(p) = \frac{K_\lambda \cdot K(A)}{[T_s T_K p^2 + (T_s + T_K + T_\mu) p + 1] (T_\alpha p + 1)}, \quad (2)$$

где

$K_\lambda$  — коэффициент усиления линейной части системы;

$K(A) = \frac{4B}{\pi A_0} e^{-i\varphi}$  и  $\varphi = \arcsin \frac{b}{A_0}$  — гармонический коэффициент передачи релейного элемента.

Уравнение корневых годографов запишется

$$\varphi + \sum_{i=1}^3 \arcsin \frac{\omega_0}{p_i} = \pm \pi, \quad (3)$$

где

$p_i$  — полюсы передаточной функции (2).

Значение граничного коэффициента усиления определится

$$K_{гв} = K_\lambda \cdot K(A) = C \prod_{i=1}^3 \sqrt{\omega_0^2 + p_i^2}. \quad (4)$$

Задаваясь несколькими значениями  $\omega_0$  по (3), (4) и выражению для  $K(A)$ , определяем зависимость  $\omega_0 = f_1(K_{л})$  и  $A_0 = f_2(K_{л})$ , рис. 4. По полученным зависимостям можно для разработанной системы определить величины  $A_0$  и  $\omega_0$  или при синтезе системы по желаемым  $A_0$  и  $\omega_0$  определить

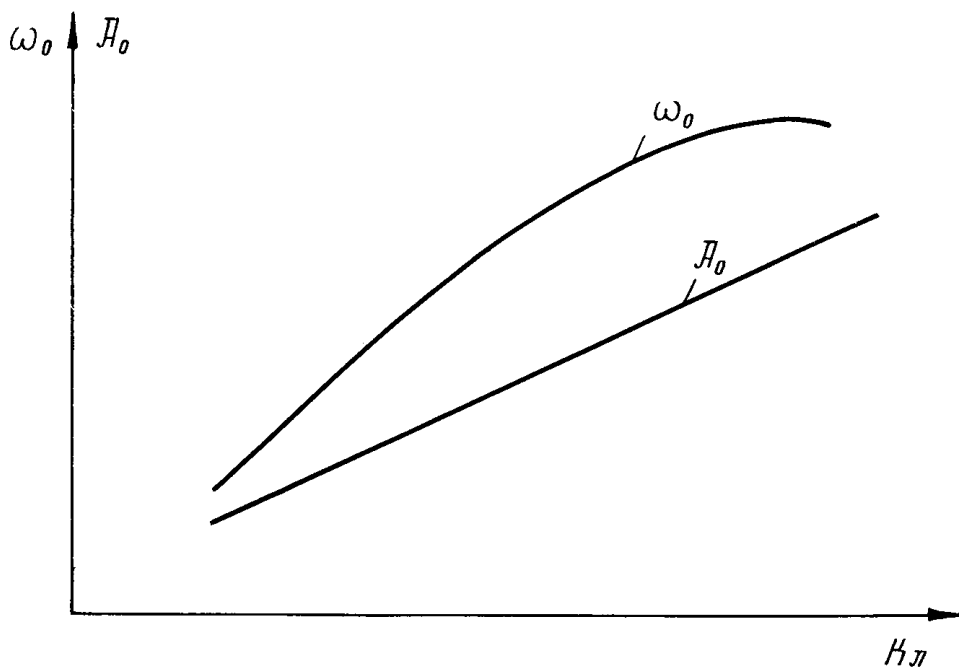


Рис. 4

необходимый  $K$  ( $J$ ). При подстановке численных параметров системы результат расчетов совпадает с экспериментом с точностью 10—15%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. Физматгиз, 1959.
2. Э. Г. Удерман. Приближенное исследование автоколебаний методом корневого годографа. «Энергия», 1967.
3. А. П. Зайцев, Р. К. Гачик. Оптимальная система управления электрическим торможением электропоезда. «Доклады к пятой научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства», т. 1, 1967, Томск.