Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LX, вып. 1, 1970 г.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА И ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ

И. В. Никифоров

Для обеспечения при любых условиях оптимального режима работы тяговые устройства с нестабильным передаточным отношением оборудуются релейной следящей системой, которая работает по отклонению заданного угла β и сохраняет

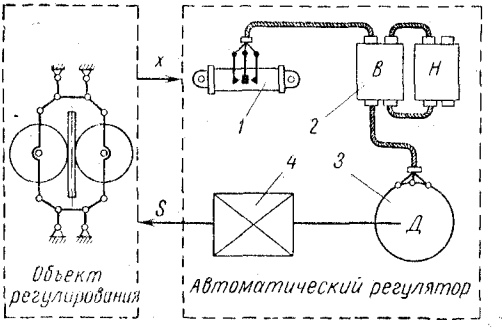


Рис. 1. Схема следящей системы тягового устройства:

1 — датчик системы с трехпозиционным реле; *2* — аппаратура включения электродвигателя системы вперед *В* и назад *Н*; *3* — электродвигатель системы; *4* — настраивающий механизм

расчетное значение передаточного отношения. Она состоит из объекта регулирования и автоматического регулятора (рис. 1). Объектом регулирования в системе является тяговое устрой-

ство. Автоматический регулятор включает чувствительный, преобразующий, исполнительный и регулирующие элементы. Чувствительным элементом является датчик, который имеет трехпозиционное реле и корректирующий механизм, позволяющий вносить поправки в передаточное отношение тягового устройства во время его работы при изменении условий сцепления приводных колес. К преобразующему элементу относится аппаратура включения электродвигателей системы.

Объект регулирования и регулятор объединены в одно звено, имеющее кусочно-линейную характеристику* с зоной нечувствительности, входная величина которой изменяется в пределах от $-a$ до $+a$. Исполнительным элементом в системе является электродвигатель, а регулирующим — настраивающий механизм, который представляет собой редуктор, преобразующий вращательное движение вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение ползуна. По динамической характеристике электродвигатель, приводящий систему в движение, относится к инерционному дифференциальному звену, а настраивающий механизм и тяговое устройство, как объект регулирования, к усилительным звеньям нулевого порядка.

При малом значении возмущающего воздействия на объект регулирования передаточное отношение тягового устройства находится в пределах расчетной величины, контакты реле датчика разомкнуты ($-a<x<+a$), система не работает. При отклонении передаточного отношения за пределы заданной расчетной величины ($x>+a$ и $x<-a$) контакты датчика включают электродвигатель и система приходит в движение. Она работает до тех пор, пока не установится расчетное значение величины передаточного отношения тягового устройства.

Рассматриваемая следящая система тягового устройства является нелинейной. Она состоит из нелинейной и линейной части: первую составляют чувствительный и преобразующий, вторую — исполнительный и регулирующий элементы.

Для исследования переходных процессов в следящей системе тягового устройства, которая не может быть описана линейными дифференциальными уравнениями, воспользуемся методом изображения этих процессов на фазовой плоскости.** Он позволяет получить наглядную и точную картину переходных процессов при любых начальных условиях для свободных

---

* См. настоящий сборник. Никифоров И. В. Следящая система тягового устройства и динамические характеристики ее звеньев (рис. 4, в).

** Цыпкин Я. З. Теория линейных следящих систем автоматического регулирования. Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1955.

колебаний в системах второго порядка, содержащих нелинейные элементы.

Фазовой плоскостью называется плоскость, в которой по осям координат откладываются какие-либо две переменные, характеризующие переходный процесс в системе. В качестве переменных можно принять отклонение регулируемой величины x и скорость ее изменения во времени

$$y = \frac{dx}{dt}. \tag{1}$$

При изображении процессов на фазовой плоскости уравнение второго порядка удобно свести к двум уравнениям первого порядка

$$\frac{dx}{dt} = f_1(x, y),$$

$$\frac{dy}{dt} = f_2(x, y), \tag{2}$$

где f_1 и f_2 — нелинейные функции координат.

Чтобы изобразить переходный процесс на фазовой плоскости, из уравнений (2) исключим время, для чего поделим второе уравнение на первое

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f_2(x, y)}{f_1(x, y)}. \tag{3}$$

Получили нелинейное дифференциальное уравнение, общих методов точного решения которого не существует, и в каждой задаче приходится искать частный метод решения. Решением уравнения (3) будет некоторая функция

$$y = F(x), \tag{4}$$

графическое изображение которой на фазовой плоскости называется фазовой траекторией. Как известно, каждому из начальных условий x_0 и y_0 соответствует свое решение и своя фазовая траектория.

Фазовая плоскость в результате решения каждого уравнения покрывается множеством фазовых траекторий. Однако это множество обладает ценным свойством: если функции f_1 и f_2

однозначны, то каждой точке (x, y) на плоскости соответствует только одно значение производной $\frac{dy}{dx}$. Это означает, что через каждую точку фазовой плоскости проходит только одна фазовая траектория и что фазовые траектории не пересекаются. Это позволяет получать наглядные и четкие «фазовые портреты» исследуемой системы, на которых виден характер всевозможных движений.

Перейдем к следящей системе тягового устройства. Электродвигатель системы должен перемещать ползун настраивающего механизма в сторону, противоположную возмущающему воздействию, и тем самым сохранять заданное передаточное отношение тягового устройства. Таким образом, следящая система осуществляет обратную отрицательную связь.

Отклонение передаточного отношения тягового устройства обнаруживается датчиком, установленным в кронштейнах наклонных стержней, который включает контакты трехпозиционного реле. Электродвигатель включается в ту или иную сторону в зависимости от знака рассогласования передаточного отношения механизма.

Для получения фазового портрета переходных процессов в следящей системе тягового устройства используем дифференциальное уравнение второго порядка, записанное для линейной части системы

$$(T_m p + 1) p x = M, \tag{5}$$

где x — рассогласование передаточного отношения тягового устройства; $M = KU$ — положение контактов датчика при включении электродвигателя следящей системы в одну сторону вращения; $M = -KU$ — положение контактов датчика при включении электродвигателя следящей системы в другую сторону; $M = 0$ — положение контактов датчика при отключенном электродвигателе следящей системы тягового устройства; K — коэффициент усиления системы; U — напряжение, подводимое к электродвигателю; T_m — электромеханическая постоянная времени.

Получим сначала уравнение фазовых траекторий при включенном положении контактов датчика, т. е. при работе электродвигателя следящей системы. В этом случае $M = KU = \text{const}$. Дифференциальное уравнение (5) запишем в более удобной форме

$$T_m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = M. \tag{6}$$

Обозначив $\frac{dx}{dt} = y$, согласно рекомендации при изображении переходных процессов на фазовой плоскости дифференциальное уравнение второго порядка (6) необходимо свести к двум уравнениям первого порядка

$$\frac{dx}{dt} = y, \tag{7}$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_m}(M - y). \tag{8}$$

Поделим уравнение (8) на (7), исключим время и получим дифференциальное уравнение, интегрирование которого даст фазовые траектории

$$T_m \frac{dy}{dx} = \frac{M - y}{y} \tag{9}$$

или

$$\frac{T_m y dy}{M - y} = dx. \tag{10}$$

При отключении передаточного отношения тягового устройства $x < -a$ и $x > +a$ система приходит в движение и величина подаваемого на электродвигатель напряжения будет соответственно менять знак.

Проинтегрируем уравнение (10) при $M = KU$

$$x = -T_m [y + KU \ln (y - KU)] + C_1 \tag{11}$$

и при $M = -KU$

$$x = T_m [KU \ln (y + KU) - y] + C_2. \tag{12}$$

Уравнения (11), (12) определяют криволинейные траектории, по которым протекает переходный процесс при работе следящей системы тягового устройства. Они располагаются по обеим сторонам зоны нечувствительности трехпозиционного реле.

Картина фазовых траекторий (рис. 2) справа от зоны $ABDC$ отвечает уравнению (11), а слева — уравнению (12). Причем каждая кривая соответствует определенному значению произвольной постоянной C_1 и C_2.

При отключенном реле правая часть дифференциального уравнения (6) равна нулю, следовательно, оно имеет вид

$$T_m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = 0. \tag{13}$$

Тогда, используя уравнения (7), (8) и (9), опишем систему дифференциальными уравнениями

$$\frac{dx}{dt} = y, \tag{14}$$

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{y}{T_m}$$

и

$$T_m \frac{dy}{dx} = -1. \tag{15}$$

Интегрируя уравнение (15)

$$x = -T_m y + C_3, \tag{16}$$

получаем траекторию движения переходного процесса внутри полосы нечувствительности. Здесь отрезки траектории прямолинейны и имеют отрицательный угловой коэффициент $\frac{1}{T_m}$.

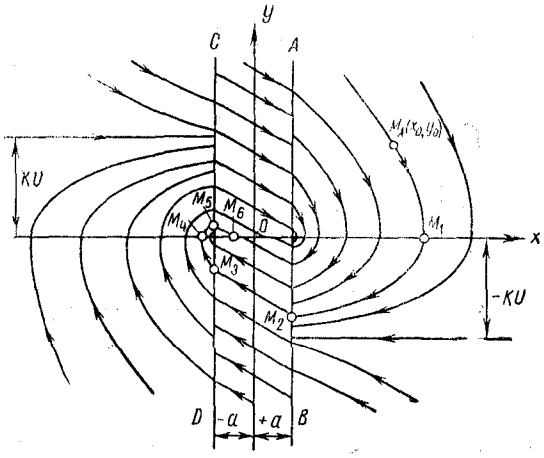


Рис. 2. Фазовый портрет переходных следящей системы тягового устройства

В уравнении (16) C_3 — произвольная постоянная интегрирования. При всех возможных ее значениях $-\infty < C_3 < +\infty$ получаем на фазовой плоскости прямые, заполняющие всю зону $ABDC$ (рис. 2), причем C_3 является ординатой точки пересечения каждой прямой с осью y, а линии $x = \pm a$ (AB и

CD) — линиями переключения электродвигателя следящей системы при помощи реле датчика в ту или иную сторону вращения. Как видно из рис. 3, траектории скручиваются к отрезку оси абсцисс между линиями переключения или к отрезку покоя.

Общая картина для данной системы такова, что все фазовые траектории имеют вид спиралевидных кривых, приближающихся к началу координат. Следовательно, при любых начальных условиях переходный процесс в системе будет затухающим. Например, если заданы условия процесса

$$x = x_0;\ \frac{dx}{dt} = y_0 \text{ при } t = 0,$$

то получим начальную точку фазовой траектории $M_A(x_0, y_0)$, а сама фазовая траектория будет иметь вид кривой $M_A M_1 M_2 M_3 M_4 M_5 M_6$. В точке M_6 процесс остановится. По этой фазовой траектории можно приблизительно (так как времени t на фазовой плоскости нет) составить представление о форме переходного процесса (рис. 3).

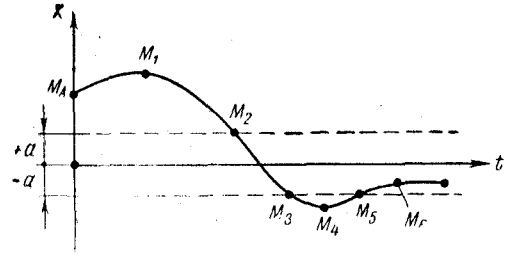


Рис. 3. Кривая затухания переходных процессов в следящей системе тягового устройства

Анализ дифференциальных уравнений линейной части и построение траекторий движения переходных процессов в следящей системе на фазовой плоскости наглядно показывает ее устойчивую работу, не вызывающую автоколебаний.