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

СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ЗВЕНЬЕВ

И. В. Никифоров

В создании эффективных и экономичных транспортных средств для горнорудной промышленности значительное место отводится тяговым устройствам, которые автоматически регулируют давление приводных колес на рельс в зависимости от реализуемого тягового усилия. Одно из основных достоинств этих механизмов заключается в том, что сила тяги при взаимодействии колес с гладким рельсом создается независимо от сцепного веса самоходного экипажа. Для тяговых устройств с нестабильным передаточным отношением давление приводных колес на рельс определяется выражением

$$\Sigma N = \Sigma W m_p \operatorname{tg}\beta, \qquad (1$$

где ΣW — суммарное сопротивление поезда или самоходного экипажа; m_p — передаточное отношение рычага колеса; β — угол наклона стержней к продольной оси рычага колеса.

В рассматриваемой зависимости (1) произведение $m_p \operatorname{tg}\beta$ называется передаточным отношением тягового устройства.*

Из выражения (1) видно, что угол β существенно влияет на передаточное отношение механизма, а следовательно, и на давление приводных колес.

При движении самоходного экипажа, оборудованного тяговым устройством с нестабильным передаточным отношением,

* Берсенев В. С. Тяговые устройства с автоматическим регулированием давления приводных колес на рельс. Зап. ЛГИ, т. XXXIX, вып. 1. Углетехиздат, 1959.

вследствие упругих деформаций рычагов и наклонных стержней, износа ходовых частей, а также изменения ширины головки рельса, наблюдается отклонение расчетной величины угла β: с увеличением угла β в большую сторону растет давление приводных колес на рельс и, наоборот, с уменьшением снижается давление ведущих колес. Изменение давления приводных колес на рельс неизбежно сказывается на работе механизма в целом. С уменьшением передаточного отношения и давления приводных колес на рельс увеличиваются относительные скорости скольжения колес, что снижает надежность работы тягового устройства.

Колебания коэффициента сцепления, особенно в большую сторону, открывают широкие возможности для значительного снижения интенсивности износа и улучшения условий работы ходовых частей тягового устройства. При малых скоростях движения, чистой и сухой поверхности качения рельса передаточное отношение обратной связи тягового устройства может быть значительно меньше, так как реализуемый в данных условиях коэффициент сцепления будет много больше, чем при высоких скоростях движения, мокром и загрязненном рельсе. Уменьшение передаточного отношения повлечет за собой соответствующее снижение рабочих усилий в звеньях тягового устройства, что положительно скажется также и на ходовых частях механизма. Изменение коэффициента сцепления в меньшую сторону (при увеличении скорости, влажности, загрязнения рельса) потребует увеличения передаточного отношения обратной связи тягового устройства.

Для обеспечения оптимального режима работы тягового устройства при любых условиях необходимо вводить поправку в передаточное отношение механизма. Так, например, при увеличении угла β необходимо уменьшить передаточное отношение механизма до заданной расчетной величины, определяемой надежным сцеплением приводных колес с рельсом, а при уменьшении угла β, наоборот, увеличивать передаточное отношение. Операции по восстановлению расчетной величины передаточного отношения нужно проводить во время движения самоходного экипажа.

Для сохранения задаваемой расчетной величины передаточного отношения тяговое устройство (рис. 1) оборудуется релейной следящей системой. Она состоит из датчиков *1* и *2*, которые своими проушинами шарнирно закреплены в кронштейнах *3* наклонных стержней, двух комплектов настраивающих механизмов *4*, *5* с электродвигателями *6* и *7*. Вращательное

движение вала электродвигателей в механизме настройки преобразуется в возвратно-поступательное движение соответствующего ползуна *8*, *9* (направление показано стрелками). Ползуны через шарнирные соединения воздействуют на стержни *10*, *11*. При этом восстанавливается угол β, а следовательно, и передаточное отношение обратной связи тягового устройства.

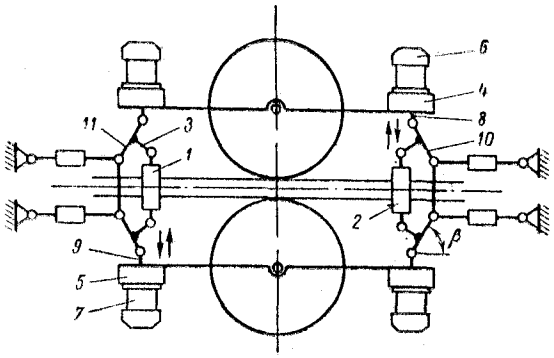


Рис. 1. Конструктивная схема тягового устройства, оборудованного следящей системой

Рассмотрим работу следящей системы совместно с конструкцией датчика (рис. 2). В корпусе *1* возвратно-поступательно перемещается кожух штока *2*, опирающийся на полукольца подшипника, и направляющий стержень *7*. На левом конце кожуха штока имеется кольцевой прилив, которому термообработкой сообщена высокая твердость, необходимая для снижения износа.

При уменьшении угла β (например, с уменьшением ширины головки рельса) кожух штока перемещается влево и кольцевым приливом воздействует на щуп *12*, заставляя приподниматься рычаг *10* в зоне *Д*. При этом упором *9* замыкаются левые контакты, которые дают сигнал для включения электродвигателей механизма настройки в сторону увеличения угла β. Угол β начинает увеличиваться, расстояние между проушинами возрастает и кольцевой прилив возвращается в зону нечувствительности *С*, левые контакты размыкаются и отключают электродвигатель.

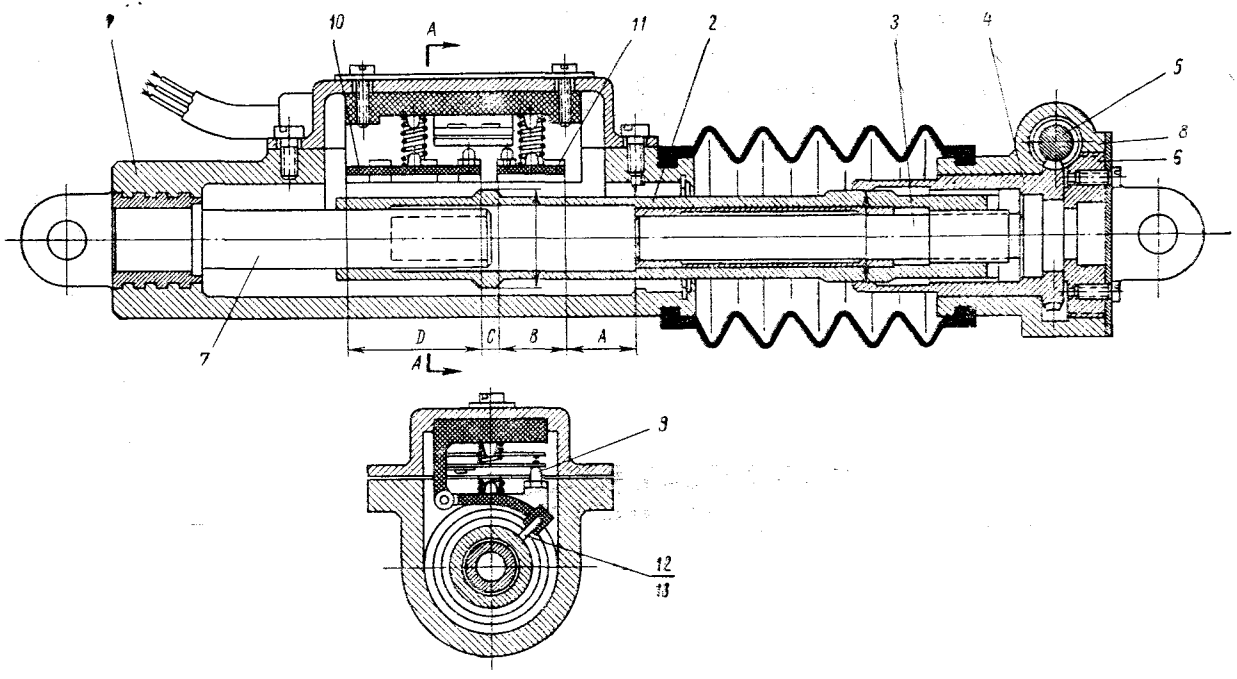


Рис. 2. Конструкция датчика следящей системы тягового устройства

При увеличении угла β (например, с увеличением ширины головки рельса) кольцевой прилив на кожухе штока перемещается вправо, входит в зону *B* и через щуп *13* приподнимает рычаг *11*, который замыкает правые контакты. Электродвигатели механизма настройки включаются в направлении уменьшения угла β, расстояние между осями проушин датчика начинает сокращаться и кольцевой прилив возвращается в зону нечувствительности *C*, выключив тем самым настраивающие механизмы.

При эксплуатации тягового устройства могут изменяться условия сцепления приводных колес с рельсом. Для настройки тягового устройства на работу в конкретных условиях сцепления датчик в правой части имеет корректирующее устройство, состоящее из штока *3* с резьбовым участком, муфты *4* с червячным венцом и шлицевой нарезкой внутри, червяка *5* и корпуса с крышкой *6*. Вращательное движение от червяка *5* передается муфте *4*, которая через шлицевое соединение передает вращение на кожух штока *2*, который по резьбовому соединению с неподвижным штоком *3* одновременно перемещается вдоль оси датчика, изменяя расстояние между осями его проушин. При ввинчивании штока в кожух задаваемое расчетное значение передаточного отношения обратной связи тягового устройства уменьшается, а при вывинчивании увеличивается, повышая давление приводных колес на рельс в тех же условиях.

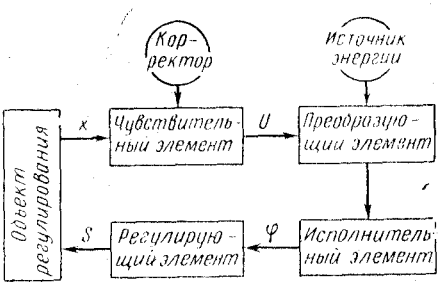


Рис. 3. Структурная схема следящей системы тягового устройства

После рассмотрения конструкции отдельных элементов следящей системы тягового устройства перейдем к анализу ее отдельных звеньев. Система состоит из регулирующего объекта и автоматического регулятора (рис. 3). Регулируемым объектом

в системе является тяговое устройство. Автоматический регулятор включает чувствительный, преобразующий, исполнительный и регулирующий элементы. Чувствительным элементом являются датчики, каждый из которых 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, подающая напряжение на электродвигатели, которые являются исполнительным элементом в структурной схеме системы. Регулирующим элементом в системе следует считать механизмы настройки, включающие комплекс зубчатых, червячных и винтовых передач.

В системах автоматического регулирования* с воздействием по возмущению регулируемый параметр не измеряется. Для борьбы с нежелаемым внешним воздействием устанавливается причина, вызвавшая отклонение регулируемого параметра от заданного значения, а затем соответствующим воздействием на регулируемый объект восстанавливается нарушенное равновесие регулируемого объекта.

Основными возмущающими воздействиями на тяговое устройство как регулируемый объект являются величина изменения упругих деформаций в грузонесущих деталях механизма, износ ходовых частей, а также изменение ширины головки рельса, при котором увеличивается или уменьшается угол β.

Входной величиной на датчик чувствительного элемента является отклонение угла $\pm\Delta\beta$, которое поступает на преобразующий элемент в виде импульса напряжения. При этом контактор замыкает нормально открытые главные контакты и включает электродвигатели, приводящие в возвратно-поступательное движение ползуны регулирующего элемента, которые воздействуют на тяговое устройство таким образом, чтобы восстановить заданный угол β, а следовательно, и расчетную величину передаточного отношения механизма.

Особый интерес представляет работа следящей системы в переходном, неустановившемся режиме. Математическое уравнение системы в переходном режиме определяет значение выходной величины в зависимости от входной и времени.

Прежде чем перейти к анализу автоматической системы в целом, необходимо рассмотреть динамические характеристики

---

* Антонович С. А. Основы теории автоматического регулирования. Изд-во «Речной транспорт», 1962.

отдельных звеньев. Для определения динамических свойств звена требуется решить его дифференциальное уравнение. Это можно выполнить, если известно изменение входной величины в функции времени.

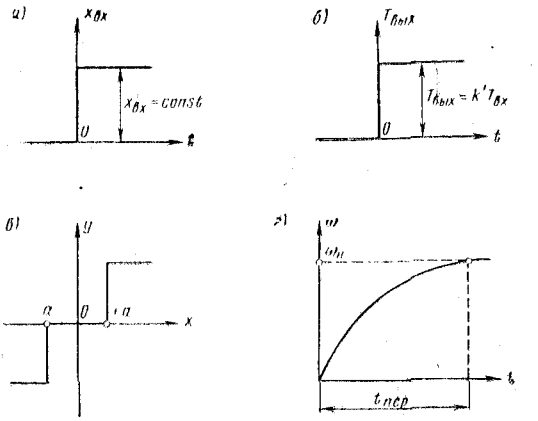


Рис. 4. Динамические характеристики звеньев следящей системы тягового устройства:
а — скачкообразная функция для определения динамических свойств системы; *б* — переходная характеристика тягового устройства; *в* — кусочно-линейная характеристика включающего устройства следящей системы; *г* — переходная характеристика приводного электродвигателя

В реальных условиях при работе следящей системы входная величина есть случайная функция времени. Поэтому в теории автоматического регулирования динамические свойства звеньев определяются несколькими типовыми закономерностями изменения входных величин, отображающих различные стороны совокупности входных случайных величин. При определении динамических свойств системы можно использовать скачкообразную функцию (рис. 4, *а*). При $t<0$ воздействие на тяговое устройство равно нулю, например, механизм движется по рельсовому пути с постоянной шириной головки рельса. В момент времени $t=0$ возмущающее воздействие на объект принимает конечное, неизменное значение, например, тяговое устройство перешло на рельсовый путь с другой шириной головки рельса. Следовательно, возмущающее воздействие на тяговое устройство как объект регулирования будет x; оно увеличивает или уменьшает величину передаточного отношения

механизма, а автоматическая система его восстанавливает. Система тягового устройства состоит из звеньев направленного действия, поэтому звенья системы удобнее рассматривать по порядку, начиная с объекта регулирования.

Тяговое устройство состоит из рычагов, которые представляют собой безынерционные или усилительные звенья, последовательно соединенные в силовую цепь. Для усилительного звена скачкообразное изменение входной величины мгновенно передается на выход звена, причем выходная величина с течением времени не изменяется. Следовательно, для тягового устройства как объекта регулирования, состоящего из усилительных звеньев нулевого порядка, динамическую характеристику в общем виде можно представить зависимостью

$$T_{\text{вых}} = k' T_{\text{вх}}, \tag{2}$$

где $T_{\text{вых}}$ — сила тяги на выходе тягового устройства, или тяговое усилие, реализуемое его приводными колесами; $T_{\text{вх}} = \Sigma W$ — усилие на входе тягового устройства, равное суммарному сопротивлению передвижения подвижного состава; k' — коэффициент усиления тягового устройства.

Из выражения (2) видно, что скачкообразное изменение входной величины $T_{\text{вх}}$ мгновенно передается на выход тягового устройства, причем выходная величина $T_{\text{вых}}$ с течением времени не изменяется (рис. 4, *б*).

Чувствительный и преобразующий элементы можно объединить в единое звено, имеющее одну кусочно-линейную характеристику. На рис. 4, *в* показана характеристика трехпозиционного реле с зоной нечувствительности. При малом значении входной величины — $a < x < a$ контакты реле датчика разомкнуты, и значение выходного напряжения на электродвигатели исполнительного механизма автоматической системы равно нулю. При $x > a$ контакты датчика замыкают реле, включаются электродвигатели, которые имеют при этом правое вращение; при $x < -a$ контакты датчика включают электродвигатели, которые меняют вращение на обратное.

В качестве исполнительного элемента в следящей системе тягового устройства применяются электродвигатели. По переходной характеристике их можно отнести к инерционному дифференциальному звену. Переходные процессы для электродвигателя составляющего звена автоматической системы регулирования можно записать линейным дифференциальным уравнением, которое в операторной форме имеет вид

$$(T_e T_m p^2 + T_m p + 1) p = k_1 U, \tag{3}$$

где T_e — электрическая постоянная времени, зависящая от индуктивного и активного сопротивления; T_m — электромеханическая постоянная времени, зависящая от момента инерции вращающихся частей приведенного к валу электродвигателя и коэффициента успокоения; $p = \frac{d\varphi}{dt}$ — операторный полином, отображающий угол поворота вала электродвигателя во времени; k_1 — коэффициент усиления электродвигателя; U — напряжение, подводимое к электродвигателю.

Если предположить, что электрическая постоянная времени ничтожно мала в сравнении с электромеханической ($T_e \ll T_m$), то первым членом уравнения (3) можно пренебречь, положив $T_e = 0$. В результате дифференциальное уравнение упростится

$$(T_m p + 1)p = k_1 U. \tag{4}$$

Переходная характеристика в этом звене (рис. 4, *г*) имеет вид кривой, у которой величина на выходе ω изменяется апериодически по закону экспоненты и стремится к новому установившемуся значению $\omega_н$.

Механизм настройки как регулирующий элемент автоматической системы следует отнести к усилительному звену нулевого порядка. Здесь входной величиной является угол поворота φ ведущего вала редуктора, а выходной возвратно-поступательное перемещение ползуна S во времени. Тогда для регулирующего элемента системы можно записать

$$S = k_2 \varphi, \tag{5}$$

где k_2 — коэффициент усиления механизма настройки.

Проведя анализ звеньев следящей системы тягового устройства, можно сделать вывод, что рассматриваемая система является нелинейной и состоит из линейной и нелинейной частей. Нелинейную часть системы составляют чувствительный и преобразующий, а линейную — исполнительный и регулирующий элементы. Определяющим звеном в линейной части системы следует считать исполнительное устройство, которое будет определять в системе переходные процессы. Дифференциальное уравнение с учетом возмущающего воздействия для линейной части системы имеет вид

$$(T_m p + 1)px = kU, \tag{6}$$

где x — возмущающее воздействие; k — коэффициент усиления системы.

Следящая система осуществляет прерывистое регулирование передаточного отношения тягового устройства, сохраняя его заданную величину в пределах, которые определяются зоной нечувствительности контактов трехпозиционного реле датчика. Исследовать переходные процессы нелинейной системы тягового устройства целесообразно наиболее наглядным графоаналитическим методом изображения движения системы на фазовой плоскости.