

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
РЕОСТАТНО-РЕКУПЕРАТИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ
ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р. К. ГАЧИК, А. П. ЗАЙЦЕВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета).

В условиях частых пусков и остановок электропоезда постоянного тока применение электрического торможения вместо пневматического позволяет существенно уменьшить износ тормозных колодок и бандажей колес и осуществить рекуперацию в контактную сеть части энергии, запасенной маховыми массами поезда во время разгона. Особенно важно в процессе рекуперативного торможения максимально использовать по току двигателя, работающие в тормозном режиме. Это позволяет осуществить торможение в минимально возможное время и увеличить среднюю скорость электропоезда на перегонах. Величина максимально допустимого тока двигателя определяется условиями юза и потенциальными условиями на коллекторе.

Потенциальные условия на коллекторе характеризуются величиной максимальной межламельной э. д. с. Чтобы межламельная э. д. с. не превышала максимально допустимой величины $e_{\text{макс.}} = 45$ в, определяющей область нормальной коммутации, необходимо, чтобы ток возбуждения тяговых двигателей определялся выражением:

$$I_{\text{в}} = \frac{0,45 - \frac{2p}{k\alpha} \cdot \frac{N}{8ap} U_k I}{W_b \left(45 - \frac{2p}{k\alpha} U_k \right)}, \quad (1)$$

где $I_{\text{в}}$ — ток возбуждения;

I — ток якоря;

U_k — напряжение на коллекторе;

p — число пар полюсов;

k — число коллекторных пластин;

α — полюсное перекрытие;

N — число активных проводников;

a — число параллельных проводов.

Выражение (1) получено из формулы А. В. Иоффе:

$$e_{\text{макс}} = \frac{e_{\text{ср}}}{\alpha} \left(1 + \frac{0,45 \frac{IN}{8ap}}{I_{\text{в}} W_{\text{в}}} \right) = 45,$$

где $\epsilon_{\text{ср}} = -\frac{2pV}{p}$.

Для реостатного торможения с независимым возбуждением

$$U_c = I(R_r - r_a),$$

где R_r — эквивалентное сопротивление тормозного контура на один двигатель.

Для рекуперативного торможения

$$U_k = \frac{U_c}{n_c} + I(r - r_a),$$

где r — сопротивление тормозного контура, приведенное к одному двигателю;

n_c — число последовательно включенных двигателей;

U_c — напряжение контактной сети.

После подстановки численных значений параметров двигателя РТ-113 (двигатели РТ-113 используются на электропоездах Р-22) формула (1) приобретает вид:

$$I_b = \frac{0,2096 U_k I}{1500 - U_k}. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) является алгоритмом управления автоматической системы торможения и определяет структурную схему системы. Оно учитывает влияние напряжения контактной сети, которое изменяется в широких пределах, на величину максимальной межламельной э. д. с. при рекуперативном торможении. Чтобы затормозить электропоезд в минимальное время, необходимо максимально использовать по току тяговые двигатели, работающие в тормозном режиме. Это значит, что при принятом критерии оценки нормальной коммутации (по максимально допустимой величине межламельной э. д. с.), в области высоких скоростей двигатель должен работать на границе зоны нормальной коммутации до тех пор, пока ток двигателя по мере снижения скорости не достигнет максимально допустимой величины по условиям юза, а затем эта величина тока должна поддерживаться постоянной до истощения рекуперативного торможения.

В качестве регулируемой величины в системе торможения выбран ток возбуждения тяговых двигателей I_b . Регулирующим органом являются обмотки возбуждения, питающиеся от управляемого тиристорного выпрямителя. Применяется несимметричная мостовая схема выпрямления с нулевым вентилем, так как при одной и той же величине выпрямленного напряжения величины обратного и прямого напряжений в мостовой схеме в два раза меньше, чем в нулевой схеме. Это позволяет в мостовой схеме применять тиристоры, имеющие более низкие значения напряжения переключения и обратного напряжения. Недостатком мостовой схемы по сравнению с нулевой является необходимость применения удвоенного количества вентиля, но в несимметричной мостовой схеме управляемыми должны быть только половина вентиля. При высокой стоимости тиристоров это существенное преимущество схемы выпрямителя.

Блок-схема автоматической системы торможения представлена на рис. 1, где обозначены:

ДТЯ — датчик тока якоря;

ДТВ — датчик тока возбуждения;

ДНК — датчик коллекторного напряжения;

ДНС — датчик напряжения контактной сети;

РСВ — реле перехода на торможение с самовозбуждением. СС «500», СС «325», СС «250» — схемы сравнения.

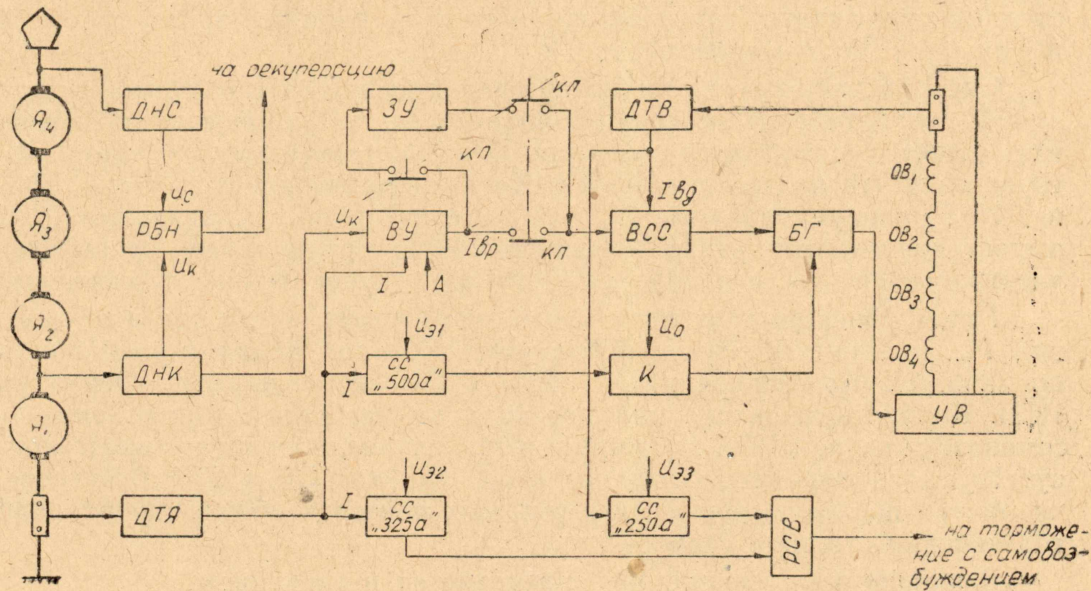


Рис. 1

В процессе реостатно-рекуперативного торможения четыре тяговых двигателя, соединенных последовательно, переводятся в режим генераторов с независимым возбуждением. Обмотки возбуждения тяговых двигателей так же соединяются последовательно.

На входы ВУ, которое решает уравнение (1), подаются напряжения постоянного тока с ДТЯ и ДНК, пропорциональные I и U_k соответственно. На выходе ВУ формируется напряжение пропорциональное расчетному току возбуждения $I_{вр}$ при котором $e_{\max.} = 45$ в для текущих значений I и U_k . С выхода ВУ напряжение подается на ВСС, где сравнивается с выходным напряжением ДТВ, которое пропорционально действительному току возбуждения $I_{вл}$. Когда $I_{вл} > I_{вр}$, выходная схема сравнения ВСС выдает разрешающий сигнал на БГ, который в исходном состоянии генерирует с высокой частотой, и опитрует тиристоры управляемого выпрямителя УВ. Тиристоры в этот момент полностью открыты. Отпирающее напряжение U_0 , обеспечивающее генерацию БГ, подается через ключ K , который открыт при условии, что $I < I_{\max.}$. Ток возбуждения $I_{в}$ нарастает до тех пор, пока $I_{вл}$ не станет больше $I_{вр}$. В этот момент на выходе ВСС формируется запрещающий сигнал, и БГ срывает генерацию, тиристоры запираются, $I_{в}$ спадает. Как только снова будет выполняться условие $I_{вл} > I_{вр}$, ВСС снова выдаст разрешающий сигнал, и процесс повторится. Таким образом $I_{вл}$ и $I_{вр}$ будут поддерживаться равными друг другу с определенной степенью точности. Когда ток якоря I достигнет значения $I_{\max.}$, схема сравнения СС «500»,

на входы которой подаются напряжение, пропорциональное току якоря и эталонное напряжение $U_3 I$, выдаст запирающий сигнал на K . Под действием этого сигнала K закрывается, что приводит к срыву генерации БГ, и тиристоры закрываются. Это приводит к спаду I . Когда I станет меньше $I_{\text{макс}}$, СС «500» откроет ключ, что приведет к генерации БГ. По мере дальнейшего снижения скорости I будет поддерживаться на уровне заданного значения $I_{\text{макс}}$, который определяется степенью загрузки вагона. Сигнал с выхода ВУ постоянно подается на запоминающее устройство ЗУ. Если требуется в течение непродолжительного времени (до 10 мин) поддерживать $I_{\text{в}}$ постоянным и равным его текущему значению, выход ЗУ подключается на вход ВСС, а ВУ от последней отключается при помощи кнопки в кабине машиниста. Этой же кнопкой ЗУ отключается от ВУ.

Система выполняет ряд логических операций. При торможении с любой скорости релейно-контакторная схема электропоезда обеспечивает режим реостатного торможения с независимым возбуждением, которое является подготовительным. Когда напряжения с выходов ДНС и ДНК, пропорциональные U_c и U_k соответственно, сравниваются РБН выдаст контактный сигнал в релейно-контакторную схему управления электропоезда для перехода системы на рекуперативное торможение.

При истощении рекуперативного торможения, когда ток возбуждения $I_{\text{в}}$ достигнет максимального значения, а ток якоря I уменьшится до 325а, схемы сравнения СС «325» и СС «250» выдадут сигнал на РСВ. Контактный сигнал для перехода на реостатное торможение с самовозбуждением РСВ формирует в том случае, если на его входе присутствуют одновременно сигналы с СС «250» и СС «325». Вышеперечисленная последовательность тормозных режимов обеспечивается при торможении с любой скорости.

Выходное напряжение ВУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{k U_3 U_4}{U_1 - U_2}, \quad (3)$$

где k — постоянный коэффициент;

U_1 — напряжение, пропорциональное постоянной величине 1500 из (2);

U_2, U_4 — напряжения, пропорциональные напряжению на коллекторе;

U_3 — напряжение, пропорциональное току якоря.

Напряжение $U_{\text{вых}}$ в процессе регулирования равно напряжению датчика тока возбуждения. Для нормального функционирования системы масштабы величин, входящих в выражение (2), необходимо выбрать вполне определенными. Обозначим:

$$m_{1k} = \frac{U_k}{U_4} \text{ — первый масштаб напряжения коллектора;}$$

$$m_{2k} = \frac{U_2}{U_4} \text{ — второй масштаб напряжения коллектора;}$$

$$m_c = \frac{1500}{U_1} \text{ — масштаб постоянной величины } A = 1500 \text{ в;}$$

$$m_{\text{я}} = \frac{I}{U_3} \text{ — масштаб тока якоря;}$$

$$m_{\text{в}} = \frac{I_{\text{в}}}{U_{\text{дв}}} = \frac{I_{\text{в}}}{U_{\text{вых}}} \text{ — масштаб тока возбуждения.}$$

Здесь $U_{\text{дв}}$ — напряжение датчика тока возбуждения. Разделив выражение (3) на выражение (2), получим:

$$\frac{k U_3 U_4 (1500 - U_k)}{(U_1 - U_2) \cdot 0,2096 U_{k1}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{в}}}, \quad (4)$$

которое можно переписать с учетом масштабов в виде:

$$\frac{k (1500 - U)}{\left(\frac{1500}{m_c} - \frac{U_k}{m_{2k}} \right) \cdot 0,2096 m_{я} m_{1k}} = \frac{1}{m_b}. \quad (5)$$

Если принять $m_c = m_{2k}$, то

$$m_b = \frac{0,2096 m_{я} m_{1k}}{m_{2k} \cdot k}. \quad (6)$$

Система управления торможением электропоезда выполнена полностью на транзисторах.
