

СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

А. П. ЗАЙЦЕВ, Р. К. ГАЧИК, В. М. ШАДТ.

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

Применение электрического торможения в различных механизмах с двигателями постоянного тока позволяет повысить технико-экономические показатели механизмов. Это особенно характерно для электроприводов, связанных с большими массами и работающих с частыми пусками и остановками, например для электрифицированного транспорта. Наиболее экономичным электрическим торможением является рекуперативное торможение, особенно для электрифицированного транспорта.

На электропоездах рекуперативное торможение является служебным и вследствие частых остановок дает значительный экономический эффект.

Основными факторами, сдерживающими применение систем рекуперативного торможения на электропоездах, являются нестабильность напряжения контактной сети и необходимость на высоких скоростях движения ограничивать тормозной ток по потенциальным условиям на коллекторах тяговых некомпенсированных двигателей.

В статье описана система управления рекуперативным торможением электропоезда постоянного тока ЭР-22, питающегося от контактной сети и оборудованного некомпенсированными тяговыми двигателями.

Условие коммутации и возможность возникновения круговых огней на коллекторе двигателя связаны с величиной максимальной межламельной эдс e_m . Коммутация будет нормальной и опасность возникновения кругового огня на коллекторе будет минимальной, если величина e_m не превышает определенного для каждого типа двигателей значения. Величина e_m определяется по формуле, предложенной А. В. Иоффе.

$$e_m = \frac{2pU_k}{K\alpha} \left(1 + \frac{0,45 \frac{I_a N}{8a'p}}{I_b W_b} \right) = aU_k + \frac{B_b U_k I_a}{I_b}, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов двигателя;

k — число коллекторных пластин;

α — полюсное перекрытие;

N — число активных проводников;

a' — число параллельных проводов;

W_b — число витков обмотки возбуждения;

U_k — напряжение на коллекторе двигателя;

I_a — ток якоря;

I_b — ток возбуждения.

Предлагается система управления рекуперативным торможением при ограничении $e_m = \text{const}$ и $I_a = \text{const}$, алгоритмом управления кото-

рой в зоне ограничения e_m является уравнение (1), решенное относительно тока якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{(e_m - aU_{\text{к}}) I_{\text{в}}}{\delta U_{\text{к}}} \quad (2)$$

Из (2) видно, что для поддержания $e_m = \text{const}$ при постоянном $U_{\text{к}}$ ток якоря должен быть пропорционален току возбуждения, т. е. $I_{\text{я}} = m I_{\text{в}}$. Величина m определяется величиной $U_{\text{к}}$:

$$m = \frac{e_m - aU_{\text{к}}}{\delta U_{\text{к}}} \quad (3)$$

Если построить систему управления так, чтобы в процессе регулирования выходные величины датчиков $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ поддерживались равными, а коэффициент передачи одного из датчиков сделать зависимым от $U_{\text{к}}$, то e_m будет поддерживаться постоянной при любом сочетании скорости движения и напряжения на коллекторах двигателей.

Блок-схема системы представлена на рис. 1, где

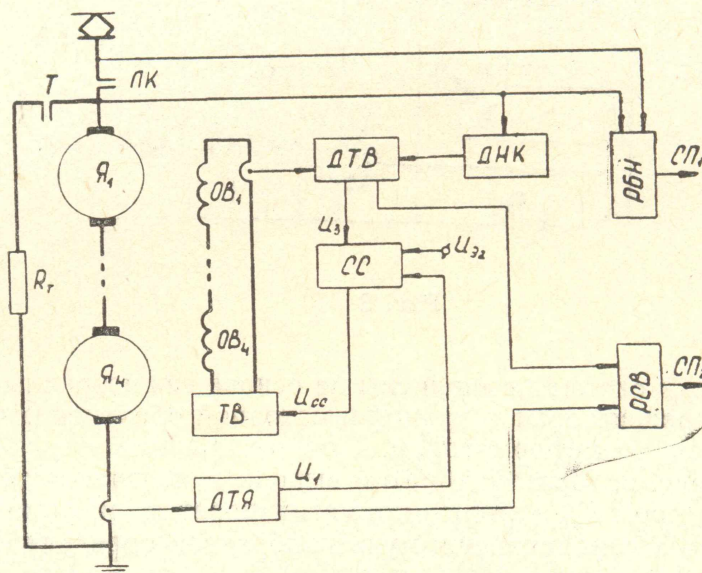


Рис. 1

- $Я_1—Я_2$ — якорные обмотки тяговых двигателей;
- ЛК — контакт линейного контактора;
- Т — контакт тормозного контактора;
- $R_{\text{т}}$ — тормозное сопротивление;
- ДНК — датчик напряжения на коллекторах двигателей;
- ДТЯ — датчик тока якоря;
- ДТВ — датчик тока возбуждения;
- РБН — реле баланса напряжений;
- СС — устройство сравнения;
- ТВ — тиристорный возбудитель;
- $U_{\text{э2}}$ — эталонное напряжение, пропорциональное заданному значению тока якоря $I_{\text{я}}$;
- $U_1; U_3$ — выходные напряжения ДТЯ и ДТВ соответственно;
- СП₁ — контактный сигнал перехода на рекуперативное торможение;
- СП₂ — контактный сигнал перехода на реостатное торможение с самовозбуждением.

На рис. 3 представлена диаграмма напряжений, поясняющая работу системы управления. ДТЯ и ДТВ построены так, что выходные напряжения их уменьшаются с ростом входных токов. Если $U_1 > U_3$, на выходе СС формируется последовательность коротких прямоугольных импульсов, которые открывают ТВ. Идет процесс нарастания I_B и I_A . Если U_1 станет меньше U_3 , на выходе СС исчезнут импульсы и ТВ закроется. I_A и I_B будут уменьшаться. При выполнении условия $U_1 > U_3$ процесс повторится. Так будет регулироваться тормозной ток, при котором $e_m = \text{const}$. По мере снижения скорости, когда при $e_m = \text{const}$ I_A достигнет наибольшей допустимой величины, U_3 станет равным U_{a2} . Теперь на СС сравниваются U_1 и U_{a2} . Так как U_{a2} не меняется, то будет поддерживаться постоянным I_A .

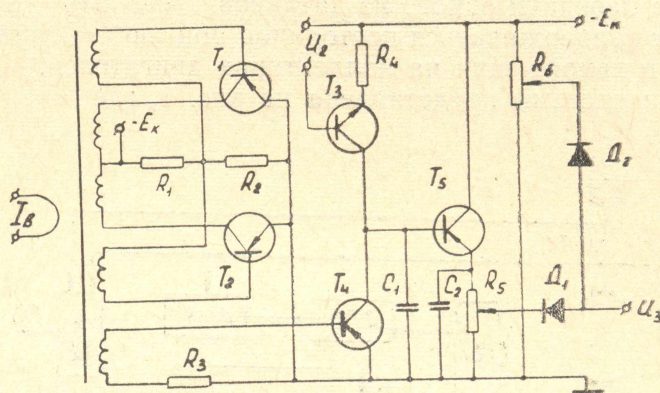


Рис. 2

Все датчики системы выполнены на основе симметричных мультивибраторов на транзисторах с трансформаторной обратной связью и подмагничиваемым трансформатором. Принципиальная схема ДТВ представлена на рис. 2. Мультивибратор выполнен на транзисторах T_1 и T_2 с трансформатором T_3 , который подмагничивается измеряемым током. Частота выходного напряжения мультивибратора определяется

$$f_B = k_B I_B, \quad (4)$$

где

k_B — коэффициент наклона характеристики мультивибратора $f_B = F(I_B)$.

Транзистор T_3 работает в режиме стабилизатора тока, причем величина тока стабилизации определяется величиной U_2 :

$$I_C = \frac{U_2 \alpha'}{R_4}. \quad (5)$$

Когда с мультивибратора снимается положительный полупериод напряжения, T_4 закрыт и на C_1 формируется линейно возрастающее напряжение U_C . Во время отрицательного полупериода T_4 открыт и C_1 разряжается. Амплитудное значение U_{C1}^* определяется:

$$U_{C1}^* = \frac{1}{C_1} \int_0^{T_2} I_C dt = \frac{T U_2 \alpha}{2 C_1 R_4}, \quad (6)$$

Определив T из (4) и подставив в (6), получим

$$U_{c1}^* = \frac{U_2 \alpha}{2C_1 R_4 k_B I_B} = \frac{U_K m_K \alpha}{2C_1 R_4 k_B I_B}, \quad (7)$$

На T_5 выполнен амплитудный детектор, т. е. напряжение на C_2 будет равно U_{c1}^* .

Выходное напряжение U_3 снимается через схему «или», выполненную на D_1 и D_2 , что обеспечивает переход с режима поддержания $e_m = \text{const}$ на режим поддержания $I_a = \text{const}$.

ДТЯ выполнен по такой же схеме, только без амплитудного детектора и вместо U_2 подается $U_0 = \text{const}$, поэтому по аналогии с (7) можно записать:

$$U_1 = \frac{U_0 \alpha}{2C'_1 R'_4 k_{я} I_{я}}, \quad (8)$$

Так как в процессе регулирования поддерживается равенство U_3 и U_1 , то

$$\frac{U_0}{C'_1 R'_4 k_{я} I_{я}} = \frac{U_K m_K}{C_1 R_4 k_B I_B}. \quad (9)$$

Умножив почленно (2) на (9), получаем

$$U_0 b C_1 R_4 k_B = (e_m - a U_K) m_K C'_1 R'_4 k_{я}. \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет связать между собой правильным соотношением коэффициенты передачи ДНК, ДТВ, ДТЯ. ДНК выполняется так же на мультивибраторе, но на выходе включается магнитный демодулятор и фильтр, что позволяет получить выходное напряжение постоянного тока, пропорциональное U_K . СС выполняется на балансном диодно-регенеративном компараторе. В качестве возбудителя применен двухполупериодный трехфазный несимметричный выпрямитель.

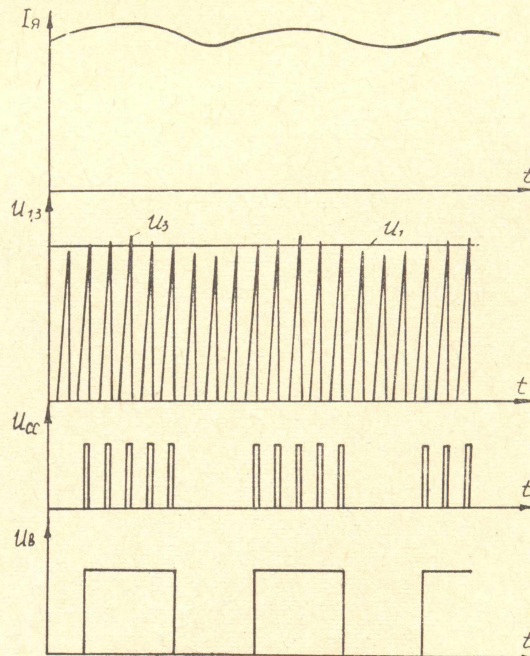


Рис. 3

По описанным выше схемам изготовлена система торможения, которая испытывалась на стенде НИИ АЭМ при ТПИ и в тяговой лаборато-

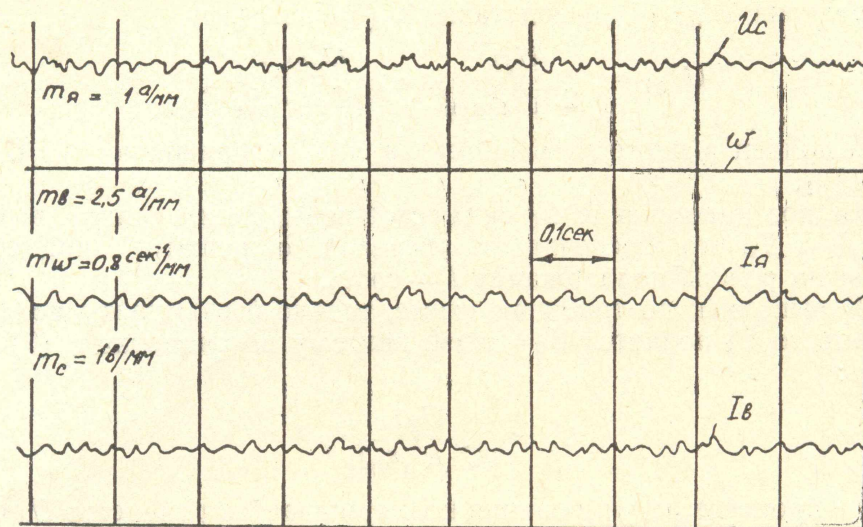


Рис. 4

рии специального конструкторского бюро тяги Рижского электромашиностроительного завода. Испытания показали, что система полностью работоспособна. На рис. 4 приведена осциллограмма квазиустановившегося процесса при рекуперативном торможении, снятая на стенде НИИ АЭМ при ТПИ. Анализ осциллограммы показывает, что пульсация тока якоря не превышает 5%.