

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕОСТАТНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ЭР2Т

Розглянуто перехідні процеси в силовому колі тягових двигунів і вплив на роботу ступеневого автоматичного гальмування електропоїздів ЕР2Т. Даються рекомендації щодо підвищення надійності роботи моторвагонного рухомого складу.

Рассмотрены переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей и их влияние на работу ступенчатого автоматического торможения электропоездов ЭР2Т. Даются рекомендации по повышению надежности работы моторвагонного подвижного состава.

The article examines transitional process in the power circuit of tractive motors and their influence on the work of grading automatic breaking of EMU trains ER2T. Recommendations have been developed for increasing reliability of operations of multiple-unit rolling stock.

1. Расчет и построение тормозных реостатных скоростных характеристик электропоезда ЭР2Т при самовозбуждении

1.1. Определение скоростных характеристик электропоезда ЭР2Т.

Скоростные тормозные характеристики электропоезда ЭР2Т рассчитываются по формуле

$$V_T = \frac{I_T (R_T + 4R_{дв})}{4C\Phi_{об}}, \quad (1)$$

где R_T – сопротивление тормозного резистора, Ом; $R_{дв}$ – общее сопротивление тягового двигателя при $\beta = 0,8$, Ом; β – коэффициент ослабления возбуждения.

Результаты расчета $V_T(I)$ на позициях силового контроллера представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Зависимость $V_{\phi}(I)$ силового контроллера

№ поз.	R_T , Ом	Параметры	Токи, А			
			300	350	400	450
		$C\Phi_{об}$, В·ч/км	17,0	17,75	18,8	19,6
1	9,91	V1	46,9	52,4	56,54	61,0
2	8,01	V2	38,5	43,0	46,4	50,0
3	6,84	V3	33,3	37,3	40,2	43,4
4	6,08	V4	30,0	33,5	36,0	39,0
5	5,07	V5	25,5	28,5	30,8	33,2
6	4,15	V6	21,5	24,0	26,0	28,0
7	3,35	V7	18,0	20,0	21,6	23,4
8	2,67	V8	15,0	16,7	18,0	19,5
9	2,07	V9	12,3	13,8	14,8	16,0

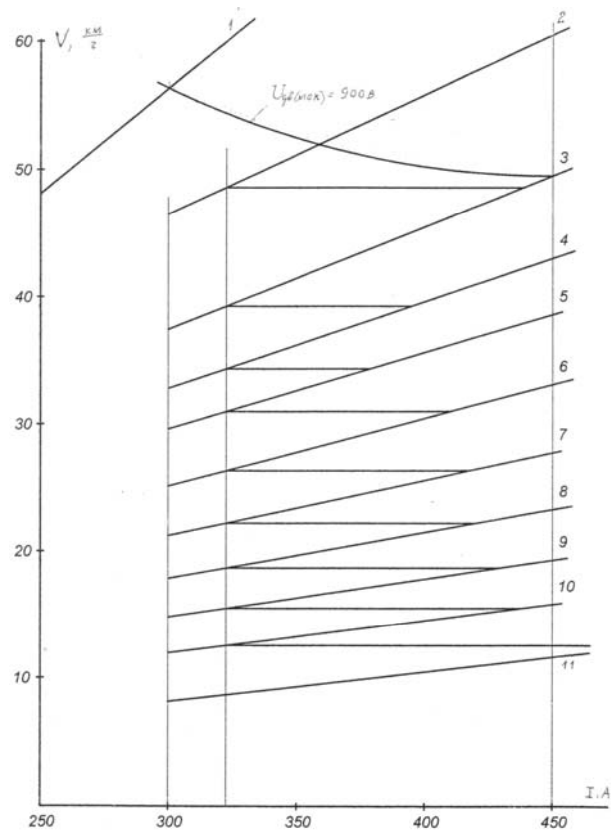


Рис. 1. Тормозные реостатные характеристики электропоезда ЭР2Т

1.2. Построение ограничения тормозных реостатных характеристик. Реостатные характеристики ограничиваются допустимым напряжением на коллекторе тягового двигателя, которое не должно превышать 20 % номинального напряжения, т. е.

$$U_{к(доп)} = 1,2U_{дв(ном)} = 1,5 \cdot 750 = 900 \text{ В.}$$

Ограничение тормозных характеристик определяется по формуле

$$V_{T(\text{огр})} = V_{\text{дв(ов)}} \frac{1,2U_{\text{дв(ном)}} - I_T \cdot R_{\text{дв}}}{U_{\text{дв(ном)}} - I_T \cdot R_{\text{дв}}} = \\ = V_{\text{дв(ов)}} \frac{900 - 0,2I_T}{750 - 0,2I_T},$$

где $V_{\text{дв(ов)}}$ – скорость движения при ослабленном возбуждении $\beta = 0,8$, так как реостатное торможение происходит при ослабленном возбуждении.

По результатам расчета на рис. 1 нанесено ограничение скорости тормозных характеристик по коммутации тяговых двигателей.

1.3. Определение характера изменения тока в силовой цепи тяговых двигателей при автоматическом реостатном торможении электропоезда ЭР2Т с самовозбуждением. При переходе силового контроллера 1КС-009 с одной позиции на другую при автоматическом торможении можно записать следующий баланс напряжений:

$$4C\Phi V = 4 \cdot L_{\text{дв}} \frac{dI}{dt} + (R_T'' + 4R_{\text{дв}}) \cdot I, \quad (2)$$

где $L_{\text{дв}}$ – индуктивность двигателя, Гн;

R_T'' – сопротивление тормозного резистора на $(n+1)$ позиции, Ом.

Произведем аналогичную с тяговым режимом линеаризацию кривой намагничивания тягового двигателя:

$$C\Phi = C\Phi_{\text{нач}} + K_{\Phi} I. \quad (3)$$

Подставляя в уравнение (3), получим:

$$(C\Phi_{\text{нач}} + K_{\Phi} I) \cdot V_2 = \\ = L_{\text{дв}} \frac{dI}{dt} + \left(\frac{R_T''}{4} + R_{\text{дв}} \right) I \quad (4)$$

или

$$C\Phi_{\text{нач}} = L_{\text{дв}} \frac{dI}{dt} + \left(\frac{R_T''}{4} + R_{\text{дв}} - K_{\Phi} \cdot V_2 \right) I. \quad (5)$$

Уравнение (5) линейное, первого порядка с правой частью.

Оно имеет следующее решение:

$$I = I_{\text{уст}} - (I_{\text{уст}} - I_2) \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6)$$

где I_2 – значение тормозного тока, с которого начинается переходной процесс при переходе 1КС-009 с « n » на « $n+1$ » позицию, т. е. аналогично тяговому режиму [1].

$$I_{\text{уст}} = \frac{C\Phi_{\text{нач}} \cdot V_2}{\frac{R_T''}{4} + R_{\text{дв}} - K_{\Phi} V_2}, \text{ А}; \quad (7)$$

$$T = \frac{L_{\text{дв}}}{\frac{R_T''}{4} + R_{\text{дв}} - K_{\Phi} V_2}, \text{ с}; \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{\left(\frac{R_T''}{4} + R_{\text{дв}} \right) I_2}{C\Phi_{I_2}}, \text{ км/ч}; \quad (9)$$

$$K_{\Phi} = \frac{C\Phi_{I_{\text{пу}}} - C\Phi_{I_2}}{I_{\text{пу}} - I_2}, \quad (10)$$

где V_2 , км/ч – скорость при токе I_2 , при котором происходит вывод ступени тормозного резистора при переходе 1КС-009 на следующую позицию; K_{Φ} – коэффициент линеаризации зависимости $C\Phi_v(I)$.

Произведенные исследования переходных процессов характера изменения тормозного тока $I_T(t)$ в силовой цепи тяговых двигателей, работающих генераторами с последовательным возбуждением, при автоматическом реостатном торможении под контролем блока регулятора ускорения БРУ показали, что имеют место «проскоки» очередных позиций вала силового контроллера 1КС-009 так же, как и в тяговом режиме [1]. Это приводит к возникновению продольных динамических ударов в автосцепке вагонов электропоезда, юзованию колесных пар, а иногда к появлению круговых огней на коллекторах тяговых двигателей.

Для устранения выявленных недостатков ненадежной работы ступенчатого автоматического реостатного торможения произведены изменения параметров в БРУ на всех электропоездах ЭР2Т депо Днепропетровск. Опыт эксплуатации электропоездов ЭР2Т с произведенными изменениями показал надежную работу системы автоматического управления ступенчатым реостатным торможением.

2. Исследование работы реостатного торможения при независимом возбуждении на электропоездах ЭР2Т

2.1. Как известно, схема реостатного торможения с независимым возбуждением может автоматически собраться с рекуперативного торможения, если сработает реле максимального напряжения РМН. При этом замкнется повторитель реле максимального напряжения ПРМН и соединит провода 40Н – 40Л и в силовой цепи включится контактор Т (рис. 2).

Определим, какие тормозные токи будут проходить через пуско-тормозные резисторы и как будет нагружен трансформатор возбуждения при различных положениях тормозной рукоятки контроллера машиниста, а, следовательно, и различных уставках тормозного тока.

2.2. Предположим, что РМН отрегулировано на напряжение срабатывания 3800 В, скорость движения была 80 км/ч, ток уставки при движении в рекуперативном режиме $I_{уст} = 350$ А, т. е. тормозная рукоятка находилась в третьем положении. При напряжении в контактной сети более 3800 В сработает РМН и схема переключится на реостатное торможение с независимым возбуждением.

До переключения ток рекуперации был равен

$$I_p = \frac{4C\Phi_B V_p - U_{кc}}{4R'_{дв} + R_{иш}} = 350 \text{ А,}$$

где $R'_{дв} = R_{я} + R_{доп} \approx 0,09$ Ом, $R_{иш} = 0,03$ Ом – сопротивление индуктивного шунта.

Отсюда

$$C\Phi_B = \frac{U_{кc} + I_p (4R'_{дв} + R_{иш})}{4V} = \frac{3800 + 350 \cdot 0,4}{4 \cdot 80} = \frac{3940}{480} = 12,31 \text{ В} \cdot \text{ч/км.}$$

По кривой зависимости $C\Phi_B = f(I_B)$ ток $I_B = 90$ А. При переходе на реостатное торможение тормозной ток в двигателе будет равен

$$I_T = \frac{4C\Phi_B V}{R_p + 4R'_{дв} + R_{иш} + R_{оп}},$$

где R_{δ} – сопротивление тормозных резисторов, величина которого равна 9,91 Ом; $R_{оп} = 0,5$ Ом – сопротивление ослабления возбуждения тяговых двигателей.

$$I_T = \frac{3940}{9,91 + 0,4 + 0,5} = \frac{3940}{10,81} = 364 \text{ А.}$$

Так как реостатное торможение происходит с независимым возбуждением и система автоматического управления САУТ будет поддерживать ток уставки в цепи двигателей 350 А, а силовой контроллер 1КС-009 будет находиться на первой позиции пока ток возбуждения не достигнет 250 А и не сработает реле самовозбуждения РСВ, вывод ступеней пуско-тормозных резисторов не происходит. Определим, как ток якорей тяговых двигателей 350 А распределяется между прохож-

дением в контактную сеть, т. е. ток рекуперации, и пуско-тормозными резисторами.

Определим, при каком максимальном напряжении в контактной сети не будет проходить ток рекуперации, а будет проходить только через пуско-тормозные резисторы:

$$4E_{ген} = 4C\Phi_B V = I_T \cdot R_p^* = 350 \cdot 10,81 \approx 3784 \text{ В.}$$

Напряжение в контактной сети или напряжение на зажимах двигателей (генераторов) равно

$$U_{кc} = 4C\Phi_B V - I_T (4R'_{дв} + R_{иш}) = 3784 - 350 \cdot 0,4 = 3644 < 3800 \text{ В.}$$

Итак, практически при реостатном торможении с независимым возбуждением при работе САУТ пуско-тормозные резисторы ПТР нагружены током 350 А.

Определим, до какой скорости торможения нагружены ПТР этим током.

При токе возбуждения $I_B = 250$ А по зависимости $C\Phi_B = f(I_B)$ получаем

$$C\Phi_B = 17 \text{ В} \cdot \text{ч/км.}$$

$$4C\Phi_B V_{т(\min)} = I_T R_T^* = 350 \cdot 10,81 = 3784 \text{ В,}$$

где

$$R_T^* = R_p + R_{иш} + R_{оп} = 9,91 + 0,03 + 0,5 = 10,44 \text{ Ом.}$$

Отсюда

$$V_{m(\min)} = \frac{3784}{4 \cdot 17} = 56 \text{ км/ч.}$$

Таким образом, от скорости движения 80 км/ч до скорости 61 км/ч во время реостатного торможения с независимым возбуждением пуско-тормозные резисторы нагружены током 350 А, а трансформатор возбуждения – током от 90 А до 250 А. Далее схема автоматически переключается на реостатное торможение с самовозбуждением, прекращается действие САУТ и осуществляется ступенчатый вывод ступеней ПТР под контролем бесконтактного регулятора ускорения по мере снижения скорости торможения до 10 км/ч.

Так как пуско-тормозные резисторы и трансформатор возбуждения рассчитаны на повторно-кратковременную работу, то возможен их перегрев, а, следовательно, преждевременный выход их из строя.

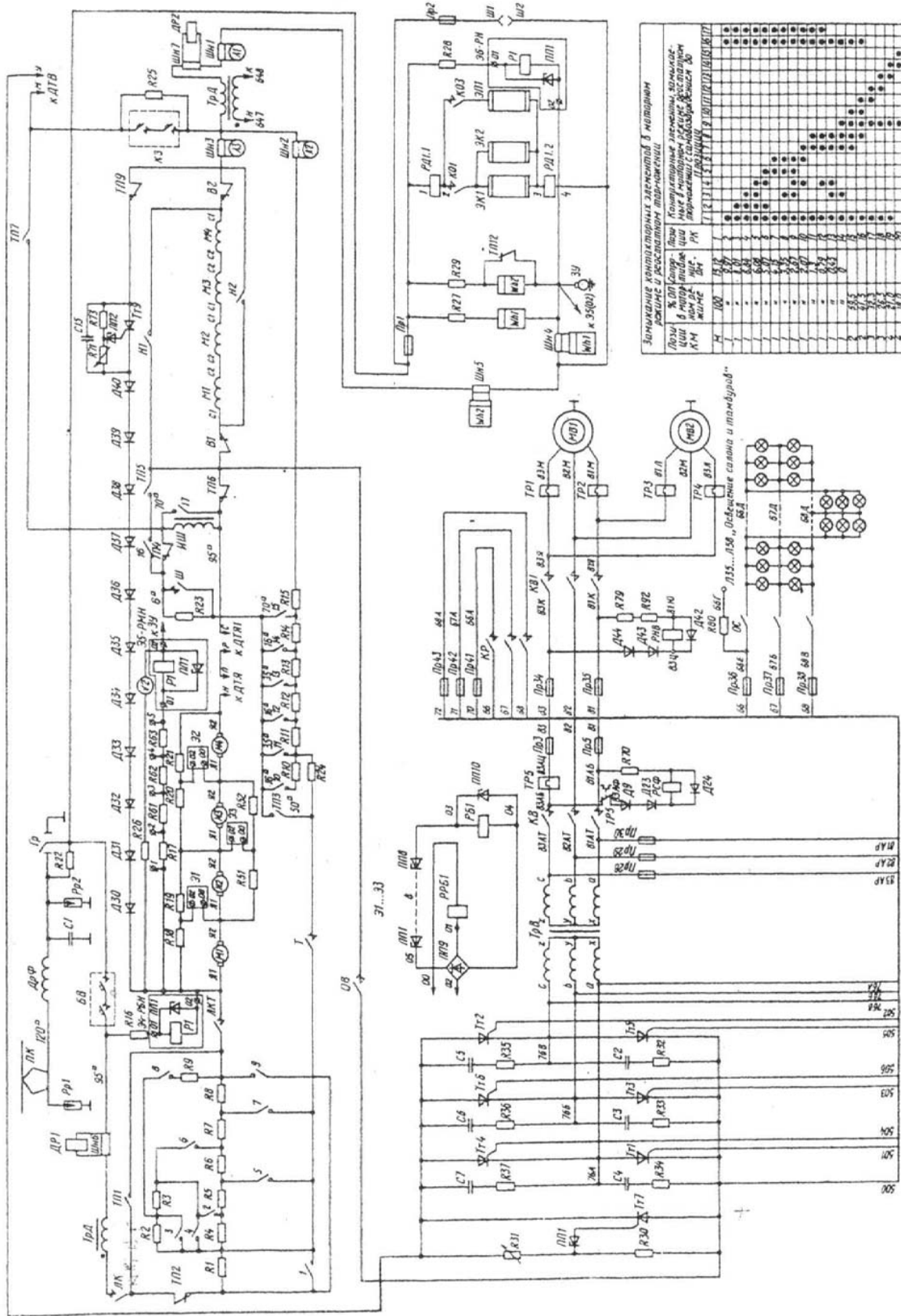


Рис. 2. Схема силовой цепи моторного вагона

2.2. При токе уставки 250 А и уставки реле напряжения РМН 3650 В при напряжении в контактной сети 3700 В произойдет переход с рекуперативного торможения на реостатное с независимым возбуждением. Предположим, что скорость движения электропоезда $V = 80$ км/ч. Определим ток возбуждения и ЭДС генераторов:

$$C\Phi_B = \frac{U_{\text{КС}} + I(4R'_{\text{дв}} + R_{\text{иш}})}{4V} = \frac{3700 + 250 \cdot 0,4}{4 \cdot 80} = \frac{950}{80} = 11,87 \text{ В} \cdot \text{ч/км}.$$

По кривой зависимости $C\Phi_B = f(I_B)$ определим, что $I_B = 85$ А. ЭДС генераторов равна $4C\Phi_B V = 4 \cdot 11,87 \cdot 80 = 3800$ В.

При переходе на реостатное торможение тормозной ток в двигателях должен установиться до величины

$$I_T = \frac{4C\Phi_B V}{(R_T + 4R'_{\text{дв}} + R_{\text{иш}} + R_{\text{оп}})} = \frac{3800}{(9,91 + 0,4 + 0,5)} = \frac{3800}{10,81} = 350 \text{ А}.$$

Но САУТ установит ток в якорях тяговых двигателей равным 250 А и тогда напряжение на тормозных реостатах (или на зажимах генераторов) будет равно

$$U_{\text{торм}} = 4U_{\text{ген}} = I \cdot R_T^* = 250(R_p + R_{\text{иш}} + R_{\text{оп}}) = 250(9,91 + 0,03 + 0,5) = 250 \cdot 10,44 = 2610 \text{ В}.$$

ЭДС генераторов равна

$$4E_{\text{ген}} = 4(U_{\text{ген}} + IR'_{\text{дв}}) = 2610 + 4 \cdot 250 \cdot 0,1 = 2710 \text{ В} < U_{\text{КС}}.$$

Так как реостатное торможение происходит с независимым возбуждением и САУТ поддерживает ток в цепи равным 250 А, а силовой контроллер 1КС-009 находится на первой позиции, а, следовательно, вывод ступеней пуско-

тормозного резистора не происходит, то по мере снижения скорости движения электропоезда ЭР2Т произойдет увеличение тока возбуждения. Определим, при какой скорости движения ток возбуждения достигнет 250 А и произойдет переход на реостатное торможение с самовозбуждением.

При $I_B = 250$ А $C\Phi_B = 17$ В·ч/км, тогда

$$V = \frac{4C\Phi_B^* V}{4C\Phi_B} = \frac{2800}{4 \cdot 17} = 40 \text{ км/ч}.$$

Таким образом, от скорости 80 км/ч до скорости 40 км/ч тормозные резисторы нагружаются неизменным током 250 А, а трансформатор возбуждения нагружен током от 85 А до 250 А.

Выводы

1. Рекомендовать при применении рекуперативного торможения в диапазоне от 80 до 46 км/ч следовать с током уставки равным 250 А, т. е. на положении 2Т тормозной рукоятки контроллера машиниста.

2. В этом случае при срабатывании реле максимального напряжения РМН и переключения схемы на реостатное торможение с независимым возбуждением, пуско-тормозные резисторы нагружены максимальным током равным 250 А, а не 350 А, как в положении 3Т.

Регулировать реле максимального торможения РМН на срабатывание при напряжении в контактной сети 3950 В, т. е. согласно техническим требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Висин Н. Г. Повышение надежности работы системы ступенчатого автоматического пуска на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т и ЕПЛ2Т / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, А. А. Соколов. // Вісник Днепропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2005. – Вип. 9. – С. 41–46.

Поступила в редколлегию 30.05.2007.