

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ДЭ1

Наведено аналіз роботи системи захисту тягових двигунів від зовнішніх і внутрішніх коротких замикань при рекуперативному гальмуванні на електровозах ДЕ1. На підставі розрахунків встановлено, що прийнята заводом вищезазначена система захисту не відповідає вимогам захисту тягових двигунів від коротких замикань при рекуперативному режимі.

Автори пропонують доповнити систему захисту тягових двигунів від зовнішніх і, особливо, від внутрішніх коротких замикань при рекуперативному гальмуванні встановленням швидкодіючих контакторів на боці «землі» з автоматичним примусовим розмагнічуванням обмоток збудження тягових двигунів, які працюють в режимі генератора, струмом рекуперації за час спрацювання захисту.

Представлен анализ работы системы защиты тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении на электровозах ДЭ1. Расчетами установлено, что принятая заводом вышеуказанная система защиты не отвечает требованиям защиты тяговых двигателей от коротких замыканий при рекуперативном режиме.

Авторами предлагается дополнить систему защиты тяговых двигателей от внешних и, особенно, от внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении установкой быстродействующих контакторов со стороны «земли» с автоматическим принудительным размагничиванием обмоток возбуждения тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме, током рекуперации за время срабатывания защиты.

The article deals with the analysis of the work of Traction Motor Protecting System on electric locomotives DE1, which protects the motors from inner and outer short circuits in the mode of recuperative breaking. The calculations have revealed that the system in question, installed by the producer, does not meet the requirements of protecting the motors from short circuits in the recuperative mode.

For extra protection of the motors from outer, and especially – from inner short circuits, the authors suggest complementing the system by quick-acting contactors from the «earth» side, with automatic forced demagnetization of traction motor excitation windings, operating in generator mode, with the recuperative current during the protection activation.

Как известно, к быстродействующей защите двигателей от токов коротких замыканий при рекуперативном режиме предъявляются следующие требования [1]:

а) защита должна быть быстродействующей, чтобы максимальный якорный ток не превышал 3–4-кратного часового тока;

б) скорость спада тока при его отключении, определяемая характеристикой дугогашения быстродействующего выключателя, должна быть такой, чтобы при этом не возникало опасных перенапряжений (максимальное напряжение между разноименными щеткодержателями не должно превышать 2–5-кратного номинального напряжения двигателя);

в) должна быть обеспечена защита тяговых двигателей от токов короткого замыкания как вне электровоза, так и на самом электровозе.

Процесс короткого замыкания тягового двигателя при рекуперативном торможении очень сложен. Характерным при этом является чрез-

вычайно быстрое нарастание тока, обусловленное малой индуктивностью якорной цепи. Чрезвычайно быстрое нарастание тока приводит к полному расстройству коммутации двигателя, так как увеличению магнитного потока дополнительных полюсов препятствуют вихревые токи, а при больших токах якоря дополнительные полюса насыщаются. Этот процесс в конечном итоге приводит к круговым огням на коллекторах тяговых двигателей.

От характера протекания переходных процессов в значительной степени зависит надежность и работоспособность электрической машины в эксплуатации. Поэтому очень важно уметь предопределить характер протекания переходных процессов, оценивать их количественно, уметь управлять этими сложными процессами.

Исследование переходных процессов, как теоретическое, так и экспериментальное, дело сложное и трудоемкое. Трудности в теоретическом плане связаны с необходимостью решения

сложных нелинейных дифференциальных уравнений, а принимаемые допущения для упрощения решений вносят ту или иную погрешность, которую очень трудно оценить. Трудности экспериментального порядка связаны с необходимостью одновременного измерения многих параметров, характеризующих переходные процессы.

При изменении токов и магнитных потоков в нерасслоенном магнитопроводе индуцируются вихревые токи, которые во многих случаях значительно влияют на течение переходных процессов.

На основании исследований Е. В. Горчикова [2] и Ю. А. Рунова [3], учитывая в переходных процессах сильное действие вихревых токов в магнитной цепи тяговых двигателей во время

внешних и внутренних коротких замыканий в режиме рекуперации, можно принять, что за время переходного процесса $t = 0,015$ с магнитный поток в машине уменьшается незначительно и составляет от начального значения

$$C\Phi = 0,92C\Phi_0 = \text{const}.$$

Произведем расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий в режиме рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1.

Расчетная схема рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1 на параллельном соединении тяговых двигателей представлена на рис. 1.

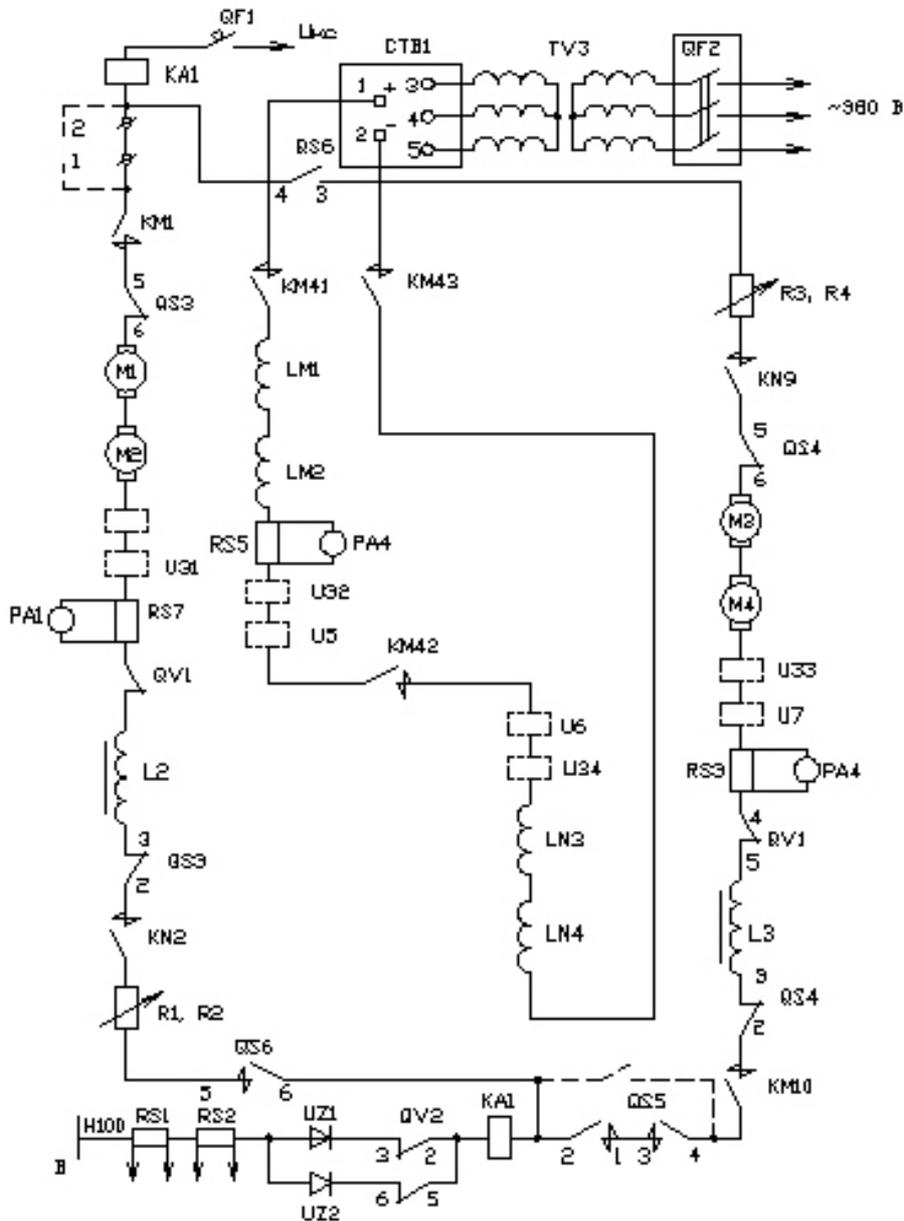


Рис. 1. Расчетная схема рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1 на параллельном соединении тяговых двигателей

1. Переходной процесс при коротком замыкании в контактной сети описывается уравнением

$$2C\Phi_p V_p - U_{кв}^1 = L_{общ} \frac{dI}{dt} + R_{общ} I, \quad (1)$$

где

$$L_{общ} = L_{я} + (L_{ко} + L_{дп}) L_{иш} = \\ = 0,83 + (0,73 + 4,5) 10^{-3} = 7,62 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где $L_{я}$ – индуктивность якоря, Гн, $L_{ко}$, $L_{дп}$ – индуктивность компенсационных и дополнительных обмоток соответственно, Гн, $L_{иш}$ – индуктивность индуктивного шунта обмоток возбуждения двух тяговых двигателей, Гн;

$$R_{общ} = R_{я} + (R_{ко} + R_{дп}) R_{иш} + R_{ст} = \\ = 0,098 + 0,022 + 0,378 \approx 0,6 \text{ Ом},$$

где $R_{я}$ – сопротивление якоря при 115 °С, Ом, $R_{ко}$ – сопротивление компенсационной обмотки при 115 °С, Ом, $R_{дп}$ – сопротивление дополнительных полюсов при 115 °С, Ом, $R_{иш}$ – сопротивление индуктивного шунта, Ом, $R_{ст}$ – величина стабилизирующего сопротивления, Ом; скорость, при которой произошло короткое замыкание, км/ч

$$V_p = V_0 = \text{const}.$$

За время протекания переходного процесса ($t = 0,015$ с) скорость практически не может измениться.

Уравнение (1) необходимо записать в следующем виде:

$$2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0 = L_{общ} \frac{dI}{dt} + R_{общ} I. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид

$$I(t) = I_{уст} - (I_{уст} - I_0) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где

$$I_{уст} = \frac{2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0}{R_{общ}} = \\ = \frac{2 \cdot 0,92 \cdot 1900}{0,6} = 5826 \text{ А};$$

$$T = \frac{L_{общ}}{R_{общ}} = \frac{7,62 \cdot 10^{-3}}{0,6} = 12,7 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$I_0 = 500$ А – начальный ток рекуперации.

Подставляя данные в уравнение (3) получим следующий результат:

$$I(t) = 5826 - (5826 - 500) e^{-\frac{t}{12,7 \cdot 10^{-3}}} = \\ = 5826 - 5326 e^{-78,7t}.$$

Время отключения тока короткого замыкания быстродействующим выключателем составляет $t = 0,015 \dots 0,02$ с [1].

Тогда максимальный ток в цепи тяговых двигателей при коротком замыкании в контактной сети может достигнуть 4180 А.

$$I(t) = 5826 - 5326 e^{-78,7 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \approx 4180 \text{ А}$$

Превышение максимального тока рекуперации перед часовым током составит

$$\gamma = \frac{I_{p(\max)}}{I_{час}} = \frac{4180}{565} = 7,4,$$

т. е. больше допустимого.

При этом в силовой цепи тяговых двигателей возникнут перенапряжения при отключении тока быстродействующим выключателем:

$$U_L = 2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0 + L_{общ} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \\ = 3496 + 7,62 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4180}{0,015} = \\ = 3496 + 2123 = 5600 \text{ В} = 5,6 \text{ кВ}.$$

2. Аналогичные явления произойдут и при внутреннем коротком замыкании в цепи первого тягового двигателя (например, пробой щеткодержателя). Ток рекуперации достигнет недопустимой величины за тоже время (0,015 с) хотя быстродействующий выключатель сработает. А защита от тока короткого замыкания линейными контакторами приведет к их сгоранию, так как на это линейные контакторы не рассчитаны и сработают через 100 мс, т. е. в 10 раз позже.

3. Особо неблагоприятный случай короткого замыкания – это возникновение его в цепи 3-го тягового двигателя в режиме рекуперации.

В этом случае в параллельной цепи М4-М3 не включено стабилизирующее сопротивление $R_{ст} = 0,378$ Ом. Поэтому расчетные величины составят:

$$I_{уст} = \frac{2 \cdot 0,92 \cdot 1900}{R_{общ}^*} = \frac{3496}{0,218} = 16036 \text{ А},$$

где

$$R_{общ}^* = R_{общ} - R_{ст} = 0,596 - 0,378 = 0,218 \text{ м}.$$

$$T = \frac{7,62 \cdot 10^{-3}}{0,218} = 34,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$I(t) = 16036 - (16036 - 500)e^{-\frac{t}{34,95 \cdot 10^{-3}}} =$$

$$= 16036 - 15536e^{-28,6t}.$$

При $t = 0,015$ с, $I(t) = 5920$ А кратность составит:

$$\gamma = \frac{I_{p(\max)}}{I_{\text{час}}} = \frac{5920}{565} = 10,4,$$

т. е. значительно больше.

Перенапряжение составит $U_{\sim} = 6,5$ кВ.

Произведенные аналогичные расчеты защиты тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении на электровозах ДЭ1, но при начальном токе 400 А (вместо 500 А), показали практически такие же кратности превышения предельного разрываемого максимального тока рекуперации по сравнению с часовым током и составили соответственно 7,4 и 10,3.

Выводы

1. Защита с помощью только поляризованного быстродействующего выключателя типа UR26-64 тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении электровоза ДЭ1 не соответствуют требованиям, предъявленным к защитным аппаратам.

2. Необходимо дополнить систему защиты БВ установкой быстродействующего контактора со стороны «земли» после стабилизирующего сопротивления последовательно с тяговыми двигателями в каждой параллельной ветви. При отключении БК обмотки возбуждения двигателей должны быть включены последовательно с якорными обмотками через шунтирующие сопротивление $R_{\text{ш}}$ с принудительным автоматическим размагничиванием их током рекуперации за время срабатывания защиты (рис. 2).

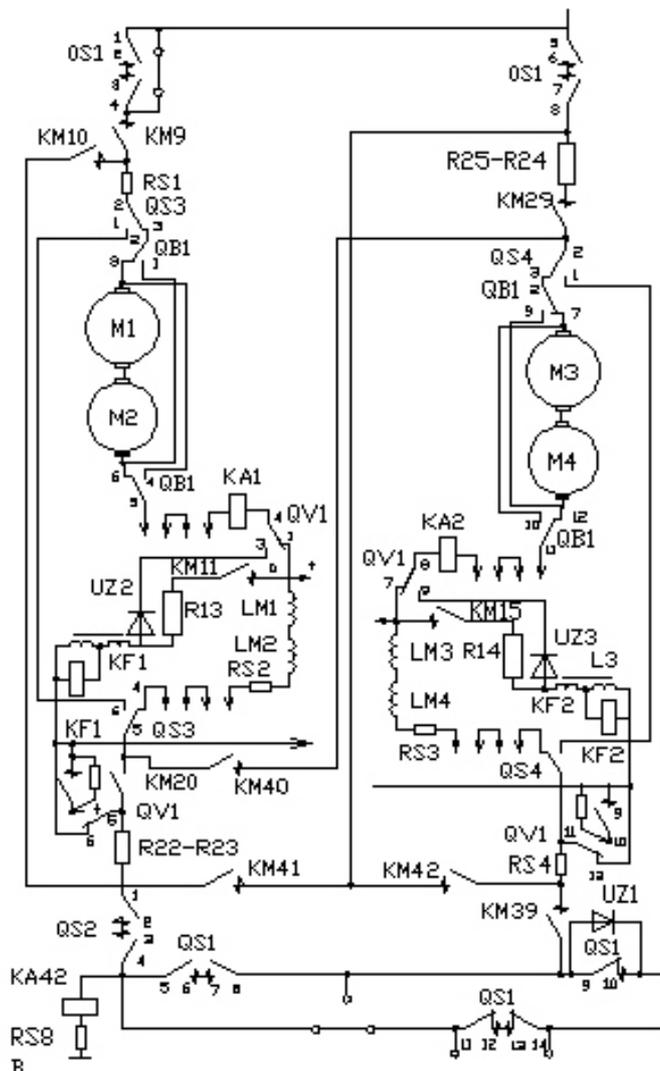


Рис. 2. Схема одной секции электровоза ДЭ1 при рекуперативного торможения на параллельном соединении тяговых двигателей с применением быстродействующего контактора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мацне В. Д. Исследование электрооборудования электроподвижного состава постоянного тока / В. Д. Мацнев, А. С. Курбасов, Б. С. Сухо-руких, Ю. И. Чуверин // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1959. – С. 21
2. Захарченко Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые машины и трансформаторы / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968. – С. 104–108.
3. Рунов Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава // Труды ЦНИИ МПС «ВНИИЖТ». – М.: Транспорт, 1974. – Вып. 516. – С. 78–92,

Поступила в редколлегию 23.03.2005.