



УДК 621.333.004.86



НАУКА И ТЕХНИКА

Резервы рекуперативного торможения локомотивов постоянного тока



Валерий ФЕОКТИСТОВ
Valery P. FEOKTISTOV

Олег ТРЕТИННИКОВ
Oleg V. TRETINNIKOV



Сергей БОРИСЕНКОВ
Sergey S. BORISENKOV

Феоктистов Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Третинников Олег Владимирович – аспирант МИИТ, Москва, Россия.
Борисенков Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, машинист локомотивного депо имени Ильича Московской дирекции тяги, преподаватель МИИТ, Москва, Россия.

Opportunities to Enhance Effects of Regenerative Braking of DC Electric Locomotives

(текст статьи на англ.яз. – English text of the article – p.90)

Системой рекуперации оборудованы все электровозы, предназначенные для вождения грузовых поездов. Намечилась также тенденция ее применения в сочетании с реостатным тормозом на пассажирских электровозах и электропоездах. Приведена методика энергетического расчета при движении электровоза под уклон, проанализированы отдельные составляющие энергобаланса, указаны возможности повышения коэффициента полезного действия локомотива в режиме рекуперации. Выполнен аналитический обзор функций регулирования и защиты электрооборудования, который показывает, что в режиме рекуперации набор этих функций значительно шире, чем в тяге.

Ключевые слова: железная дорога, электровозы, постоянный ток, электрическое торможение, рекуперация, тяговые электрические двигатели, короткое замыкание.

Рекуперативное торможение является существенным средством энергосбережения в электрической тяге [1], оно позволяет преобразовать механическую энергию поезда (потенциальную или кинетическую) в электрическую и отдать ее в тяговую сеть. Такое преобразование осуществляется в соответствии с особенностями энергобаланса при переключении тяговых двигателей электровоза в генераторный режим (рис. 1). Рекуперативным тормозом оборудованы все электровозы для грузового движения и новые пассажирские.

1.

Основное назначение рекуперативного тормоза – поддержание постоянной скорости поезда на вредных спусках, т. е. на участках с уклоном $i > (4+4,5)\%$ [2]. При этом реализуется потенциальная энергия:

$$\mathcal{E}_1 = (P + Q)H = \frac{i(P + Q)l}{1000}, \quad (1)$$

где $(P+Q)$ – вес поезда (локомотив и вагоны); H – разница высот начальной и конечной точек вредного спуска; l – длина вредного спуска.

Часть потенциальной энергии расходуется на преодоление сопротивления движению поезда [3]:

$$\Delta \mathcal{E}_W = (W_O + W_{KP})l = [w'_O P + w''_O Q + w_{KP}(P+Q)]l, \quad (2)$$

где w'_O , w''_O – удельное основное сопротивление движению локомотива и вагонов; w_{KP} – удельное дополнительное сопротивление движению локомотива и вагонов от кривых.

Величину $\Delta \mathcal{E}_W$ не следует считать потерей энергии, поскольку она соответствует затратам на передвижение поезда. Расчеты по формулам (1) и (2) обычно выполняют при условии постоянства скорости движения по вредному спуску. Это отвечает практике вождения поездов и требованиям безопасности движения.

Если рассматривать электровоз как преобразователь механической энергии на входе ($\mathcal{E}_1 - \Delta \mathcal{E}_W$) в электрическую \mathcal{E}_2 на выходе, то его коэффициент полезного действия (КПД) можно представить в виде

$$\eta = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_W} = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_2 + \Delta \mathcal{E}}, \quad (3)$$

причем потери в электровозе $\Delta \mathcal{E}$ будут суммой трех составляющих (см. рис. 1). В наибольшей степени на величину КПД влияют электрические потери, которые в режиме рекуперации больше, чем при тяге (для номинальной мощности соответственно 0,86 и 0,92). Это объясняется просто: тяговые двигатели реализуют генераторный режим при их независимом возбуждении, что требует включения в силовую цепь дополнительных сглаживающих и демпфирующих элементов.

2.

Рекуперация реализуется значительно сложнее, чем тяговый режим, где используют ТЭД последовательного возбуждения. При рекуперации обмотки возбуждения тяговых двигателей питаются от отдельного мотор-генератора мощностью 5–6% от суммарной мощности всех ТЭД электро-

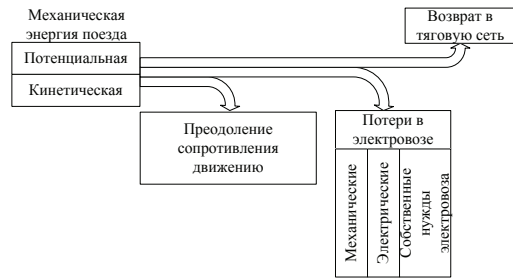


Рис. 1. Энергобаланс электровоза при рекуперации.

воза. Независимое возбуждение обладает определенными преимуществами, но в рассматриваемом случае, то есть в многодвигательном тяговом электроприводе с питанием от контактной сети, возникает ряд проблем по обеспечению устойчивости и функциональной надежности, которые еще нельзя считать решенными.

Поэтому целесообразно рассмотреть достигнутый уровень технических решений на примере типовой 4-осной секции электровоза с соединением ТЭД 1–4 по схеме группировки П. Генератор В подключен к обмоткам возбуждения ОВ1–ОВ4 по циклической схеме, называемой также схемой Тихменева–Птицына [4]. У него три обмотки возбуждения, из которых две в цепи якорных обмоток 1–4; они рассчитаны на полный ток ТЭД и реализуют противовозбуждение генератора В. Кроме того, имеется обмотка независимого возбуждения Н. Ток в ней от источника электропитания цепей управления 50 В регулирует машинист или система автоматического управления [5]. Благодаря такой схеме включения генератора В выполняются:

- противокомпаудирование ТЭД в генераторном режиме и смягчение переходных процессов при скачках напряжения в контактной сети;
- выравнивание нагрузок параллельных цепей якорных обмоток 1–4.

Особую проблему при рекуперации представляет защита от коротких замыканий – внутренних КЗ1 и внешних КЗ2. В первом случае защитная функция идентична для тягового и тормозного режимов; она традиционно реализуется быстродействующим выключателем БВ [6]. На внешнее замыкание электровоз в тяговом режиме реагирует размагничиванием ТЭД с последующим отключением БВ на элек-



Ограничение режимов работы и защита ТЭД в тяге и рекуперации

N	Параметр	Обозначение	Тяга	Рекуперация
1.	Напряжение на токоприемнике	U	-	+
2.	Ток якорных обмоток	I _я	+	+
3.	Ток возбуждения	I _в	-	+
4.	Защита от КЗ:			
	- в электровозе (внутреннее КЗ)	КЗ1	+	+
	- на контактной сети (внешнее КЗ)	КЗ2	-	+
5.	Выравнивание нагрузок параллельных цепей ТЭД	ΔI _{тэд}	-	+

тровоze и на подстанции. Если же КЗ2 возникает при рекуперации, то резко возрастает аварийный ток в цепях обмоток 1–4, но БВ при этом не срабатывает, поскольку он является поляризованным и реагирует только на ток внутреннего КЗ1. При внешнем КЗ2 ток в контуре якорных обмоток быстро нарастает с интенсивностью

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{U}{2I_{я} + I_{ОВВ} + I_{д}} \quad (4)$$

Активные сопротивления в контуре не учитываются ввиду их небольшой величины. Интенсивность же ограничивают до значения 150–200 А/мс, что достигается дополнительными индуктивностями I_д, которые включены в цепи якорных обмоток.

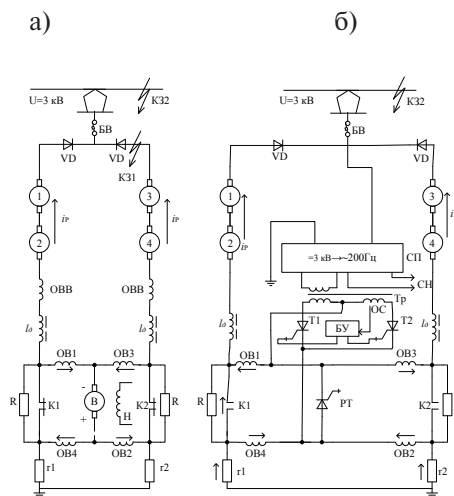
Защита от КЗ2 обеспечивается отключением быстродействующих контакторов К1 и К2 за время около 5 мс [4]. При этом аварийный ток будет протекать по резисторам R и падение напряжения на них будет приложено к ОВ1–ОВ4. Отсюда быстрое реверсирование тока в обмотках возбуждения

ОВВ и сброс в нуль электродвижущих сил ТЭД. В результате аварийный процесс внешнего КЗ2 быстро затухает. Аналогично срабатывает рекуперативная схема при КЗ1.

Таким образом, регулировочные и защитные функции электровоза в рекуперативном режиме значительно сложнее, чем в тяговом, что показано в таблице 1. Это нужно учитывать при разработке электровозов нового поколения, у которых электромашиный возбудитель В должен быть заменен статическим преобразователем СП (рис. 2б). Он создан на базе автономного инвертора и предназначен для питания всех собственных нужд СН электровоза. Питание обмоток возбуждения ОВ1–ОВ4 осуществляется от статического преобразователя посредством трансформатора Тр и двухполупериодного выпрямителя на тиристорах Т1 и Т2 с блоком управления БУ. Эта идея реализована на электровозах ВЛ15С, 2ЭС4К и 2ЭС6К.

Предусмотренные функции регулирования при наличии СП выполняются более качественно с использованием обратных связей ОС по всем параметрам, указанным

Рис. 2. Включение ТЭД в режиме рекуперации: а) машинный возбудитель В, нормальный режим рекуперации; б) статический преобразователь СП, режим отключения КЗ2.



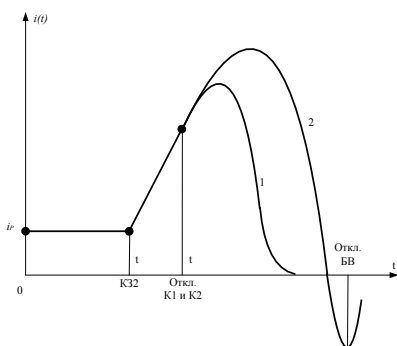


Рис. 3. Варианты развития процесса К32.

в таблице 1. Возникает тем не менее проблема с защитой от К32, при этом отключение К1 и К2 не приведет к реверсированию тока в обмотках ОВ1-ОВ4, поскольку тиристоры Т1 и Т2 не пропускают ток обратного направления. Поэтому в выпрямителе нужно установить реверсивный тиристор РТ, включаемый одновременно с отключением быстродействующих контакторов.

Возможны и другие варианты рекуперации со статическим преобразователем для питания обмоток возбуждения. Причем можно существенно улучшить качественные показатели генераторного режима ТЭД и отдачу механической энергии поезда в сеть.

3.

Особое внимание следует уделить обеспечению функций защиты от внешнего короткого замыкания. В частности, целесообразно дополнительно исследовать этот процесс применительно к современным условиям, когда существенно возросли как мощность электровоза (у 12-осных до 10 МВт), так и мощность системы тягового электроснабжения.

Условно можно считать, что аварийный процесс внешнего К32 протекает следующим образом (рис. 3):

- в момент t_1 происходит К32 и ток i_p быстро нарастает, сразу же отключаются тиристоры Т1-Т2 и включаются РТ;

- в момент t_2 отключаются К1 и К2 и нарастание i_p замедляется.

Дальнейшее развитие процесса существенно зависит от ряда факторов (удаленность электровоза от места К32, срабатыва-

ние защиты на подстанции и т. д.). На рис. 3 показано два вида процесса: кривая 1 имеет место при отключении К32 защитой подстанции и кривая 2 с сохранением напряжения в сети и отключением БВ.

Опыт эксплуатации электровоза постоянного тока с рекуперацией доказал эффективность рассмотренных решений при использовании электромашинных преобразователей для питания обмоток возбуждения ТЭД. При переходе на статические преобразователи необходимо сохранить отработанные функции регулирования и защиты электрооборудования.

ВЫВОДЫ

1. Рекуперативное торможение следует рассматривать как наиболее эффективное средство снижения энергозатрат в электрической тяге. Поэтому сферу его применения нужно расширять, в том числе и для возврата в тяговую сеть кинетической энергии поезда.

2. Электрооборудование, реализующее рекуперацию, целесообразно усовершенствовать с использованием новых технологий (статические преобразователи, бортовые микропроцессоры, быстродействующая защита). При этом надо не снижать достигнутый уровень функциональной надежности и сохранить проверенные схемные решения, включая перекрестное циклическое возбуждение ТЭД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Учебник. — М.: ИД МИСиС, 2012. — 620 с.
2. Кантор И. И. Продольный профиль пути и тяга поездов. — М.: Транспорт, 1984. — 207 с.
3. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги. — М.: Маршрут, 2006. — 436 с.
4. Трахтман Л. М. Электрическое торможение электроподвижного состава. — М.: Транспорт, 1985. — 204 с.
5. Иньков Ю. М., Фельдман Ю. И. Электроподвижной состав с электрическим торможением: Учеб. пособие. — М.: УМЦЖДТ, 2008. — 412 с.
6. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические аппараты. — М.: Транспорт, 1991. — 247 с.
7. Иньков Ю. М., Литовченко В. В., Назаров Д. В., Феоктистов В. П. Выбор параметров двухсистемного грузового электровоза // Мир транспорта. — 2014. — № 6. — 34–46 с.

Координаты авторов: Феоктистов В. П. — +7(495) 6842452, Третинников О. В. — olegtretinnikov@mail.ru, Борисенков С. С. — Sergei_Borisenkov@mail.ru.
Статья поступила в редакцию 22.08.2014, принята к публикации 27.11.2014.

