

Новая структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда

с импульсным регулированием и защитой от перенапряжений

В статье предложена новая структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда с импульсным регулированием и защитой от перенапряжений. По основным критериям данная структура представляется максимально эффективной для перспективного железнодорожного транспорта.

**Станислав Резников,
д. т. н.
Денис Чув,
к. т. н.,
Александр Савенков**

beketovo@pr.spetsremont.ru

Дизель-электропоезд представляет собой обычно четырехвагонный состав, формируемый из двух головных, оборудованных силовой дизель-генераторной установкой (ДГУ), моторного вагона с тяговыми электродвигателями и электро-трансмиссией, а также прицепного вагона.

На неэлектрифицированных или аварийно-отключенных от подстанций участках питание тяговых электродвигателей поезда осуществляется от силовых ДГУ с помощью электротрансмиссии, а на электрифицированных — от контактного провода с напряжением 3 ± 1 кВ через пантограф, аналогично электропоезду.

Электротрансмиссия позволяет отказаться от сложной, трудоемкой по установке и обслуживанию схемы традиционного дизель-поезда, в которой крутящий момент от дизеля передается через систему гидроредукции на механический групповой привод.

В последние годы на российских и зарубежных электропоездах с питанием от контактной сети постоянного тока широко применяются тяговые схемы с импульсным регулированием, имеющие существенные преимущества по сравнению со схемами на базе реостатно-контакторного регулирования. Такое регулирование внедрено, например, на отечественном электропоезде ЭМ-2И (при участии авторов) [1, 2, 3].

При разработке структур перспективных тяговых схем дизель-электропоездов с импульсным регулированием необходимо учесть недостатки известных схем электропоездов и дизель-поездов с электротрансмиссией, выявленные в процессе их разработок и эксплуатации.

Основной проблемой для тяговых схем всех электропоездов и электропоездов с питанием от сети постоянного тока является защита электрооборудования (прежде всего, тяговых двигателей) от перенапряжений. Проблема имеет два аспекта:

- Оптимальным рабочим напряжением для коллекторных тяговых электродвигателей считается 750 В. Однако по-прежнему используются и устаревшие двигатели с напряжением 1500 В, значительно проигрывающие по надежности и эксплуатационным расходам. При сетевом напряжении 3 ± 1 кВ в обоих случаях необходимо применять последовательное соединение двигателей. При этом, по меньшей мере, якорная обмотка одного

из них оказывается под статическим потенциалом 4 кВ относительно корпуса. Выполнение изоляции в соответствии с указанным статическим потенциалом существенно усложняет, утяжеляет и удорожает конструкцию двигателя, а также снижает его надежность, срок службы и увеличивает эксплуатационные расходы.

- Другой аспект является еще более существенным. Он связан с трехкратным и более высоковольтным импульсным потенциалом в контактной сети, возникающим в штатной ситуации при аварийном выключении быстродействующего выключателя в соседней секции данного электропоезда или подключенного к той же подстанции электровоза. Специфика дугогашения при выключении постоянного тока и при наличии не зашунтированной диодом индуктивности (например, предвключенной L -сети) принципиально требует обязательного значительного превышения потенциала сети в точке отключения над выходным потенциалом подстанции. Эффективность выключателя можно приближенно оценить величиной энергии дуги, рассеиваемой в дугогасительной камере:

$$A_{д} \approx \frac{1}{2} \times U_{сету} \times I_0 \times t_{гаш} + \frac{L_{сету} \times I_0^2}{2}.$$

Для гипотетического идеального выключателя с прямоугольной формой графика зависимости напряжения дуги от времени указанный критерий приводит к значению [4]:

$$A_{\min} = \frac{L_{сету} \times I_0^2}{2} \times \frac{K_{д}}{K_{д}-1},$$

где $K_{д} = \frac{U_{д,\max}}{U_{сету}}$ — кратность квазистабильного напряжения дуги.

Анализ реальных осциллограмм напряжений и токов в отечественных быстродействующих выключателях (с линейно нарастающим напряжением) приводит к плачевной приближенной зависимости [4]:

$$A_{д} \approx \frac{2}{3} \times \frac{(K_{д}-1)^2}{(K_{д}-3,4)^2} \times \frac{L_{сету} \times I_0^2}{2},$$

где $K_{д} = \frac{U_{д,\max}}{U_{сету}} > 3,4$,

из которой следует, что максимальное напряжение дуги для надежного выключения в отечественных выключателях должно быть более чем трехкратным по отношению к выходному потенциалу подстанции (порядка 13,5 кВ). При плохом качестве дугогасительной камеры, а также при шунтировании контактного провода ограничителями напряжения (энергоемкими варисторами или емкостными накопителями), например в соседних секциях электропоезда, может произойти невыключение тока аварийного короткого замыкания в данной секции, то есть авария в сети.

Данная проблема является органическим недостатком высоковольтной контактной сети постоянного тока по сравнению с сетью переменного тока, впрочем, также имеющей свои недостатки.

Широкое применение в последнее десятилетие мощных высоковольтных (до 1700 В) модульных IGBT-транзисторов позволяет в принципе решить указанную проблему в первом аспекте путем введения звеньев повышенной частоты (инвертора) с выходными развязывающими трансформаторами. Но одновременно требуется решить задачу надежного равномерного деления постоянного питающего напряжения на четыре ступени (по числу каналов питания двигателей). Причем необходимость решения второго аспекта проблемы становится еще более актуальной, так как помимо изоляции надо защитить от высоковольтных импульсов полупроводниковые приборы.

На сегодняшний день это можно сделать только одним способом — уменьшить амплитуду импульсного потенциала на входе полупроводниковой схемы с помощью по-

следовательного включения на входе тяговой схемы мощного (и соответственно громоздкого) балластного реактора, шунтированной обратной диодно-тиристорной цепью, исключающей участие реактора в колебательном процессе. Параллельно входному емкостному делителю напряжения желательное подключить энергоемкие варисторы.

Кроме указанной проблемы, создание универсальной по питанию (сетевому и автономному) тяговой схемы для перспективного дизель-электропоезда с импульсным регулированием требует решения как минимум семи узловых задач:

- обеспечение всех видов торможения (рекуперативного, реостатного, механического) в широком скоростном диапазоне (вплоть до остановки) и при обоих видах питания (сетевом и автономном);
- обеспечение независимого возбуждения электродвигателей во всех режимах и оптимального дуального управления;
- раздельное управление двигателями для парирования боксований и юзов, а также для повышения степени резервирования (живучести);
- защита полупроводниковых элементов от перенапряжений, а именно: активное самовыравнивание напряжений на входном емкостном делителе и исключение групповых последовательных соединений транзисторов;
- защита основных узлов от сверхтоков, а именно: отсутствие энергоемких емкостных накопителей (активная фильтрация псофометрических рельсовых переменных токов, создающих помехи для стрелочной автоматики, например, с частотой 25 Гц); защита щеточно-коллекторных узлов и якор-

ных обмоток от токов коротких замыканий при их пробое на корпус; защита инверторных транзисторов от «сквозных» сверхтоков при воздействиях помех и т. п.;

- отсутствие недопустимых акустических шумов в преобразователях, дросселях и трансформаторах;
- минимизация массогабаритных и стоимостных показателей, в частности, за счет монорежимного использования основных узлов благодаря переменной структуре схемы. На рис. 1 показана новая структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда, предложенная для решения как самой проблемы, так и связанных с ней задач. Схема распределена по трем вагонам: по двум головным и одному моторному и содержит четыре регулируемых канала (по числу двигателей).

Аналогичная структура может быть использована и для локомотивного дизель-электропоезда, объединяющего в одном локомотиве тепловоз с электротрансмиссией и электровоз.

Обозначения узлов:

- ТП — токоприемник (пантограф);
- БВ — быстродействующий выключатель;
- L_3, P_3 — защитные дроссель и разрядник;
- ДД — дизельный двигатель;
- КН — кинетический накопитель (маховик с механическим тормозным устройством);
- ТГ — тяговый генератор (с регулятором напряжения);
- ОУВ — обратимый управляемый выпрямитель;
- ЕДН — емкостный делитель напряжения (с активным самовыравниванием);
- ИТ — инвертор тока;
- Тр — трансформатор;
- В — выпрямитель;

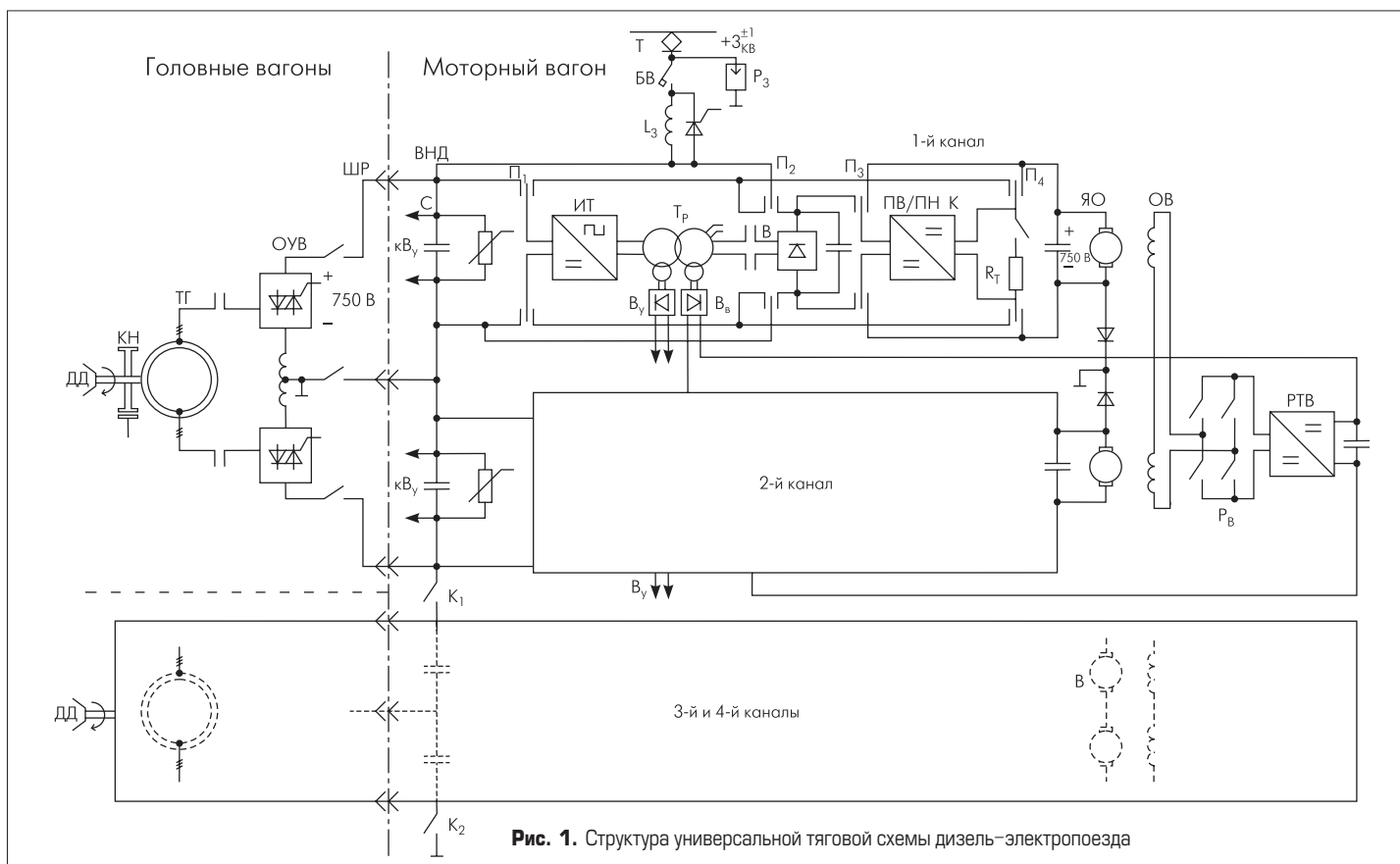


Рис. 1. Структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда

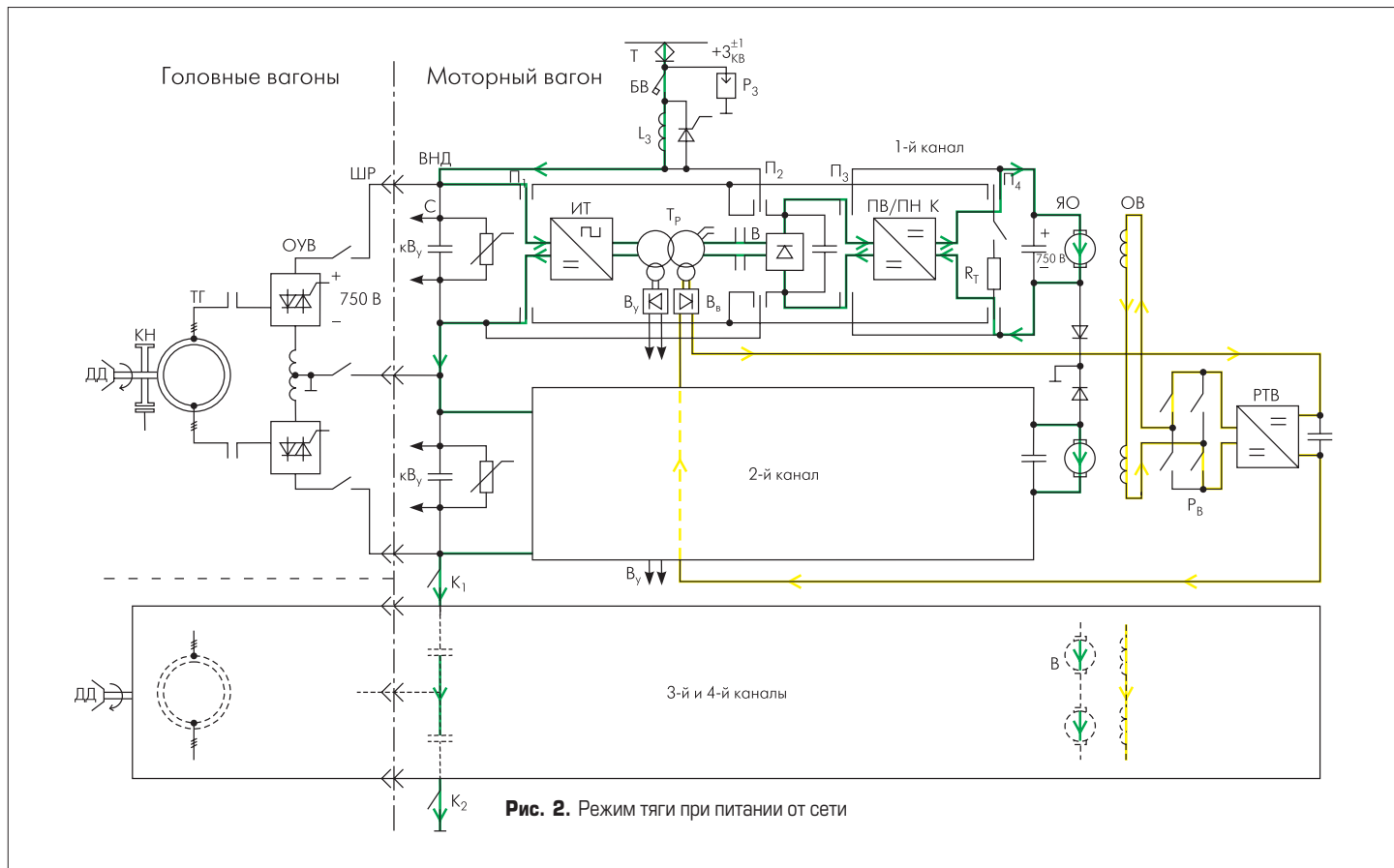


Рис. 2. Режим тяги при питании от сети

- ПВ/ПН К — повышающе-понижающий конвертор;
- Rт — тормозной резистор;
- ЯО — якорная обмотка электродвигателя;
- ОВ — обмотка возбуждения электродвигателя;
- Рв — реверсор возбуждения;
- РТВ — регулятор тока возбуждения;
- K_{1,2} — контакторы;
- В_у, В_в — выпрямители уравнивания и возбуждения;
- ШР — штепсельный разъем;
- П₁₋₄ — спаренные переключатели.

Направления токов во всех возможных режимах показаны стрелками на рис. 2 и не требуют особых пояснений.

Защита цепей тяговых электродвигателей от высоких статических и импульсных потенциалов относительно корпуса обеспечивается трансформаторной гальванической развязкой (Тр), их отдельным (не последовательным) подключением и заземлением общей точки соединения обратимых управляемых выпрямителей (ОУВ). Защита элементов преобразователей (особенно верхнего первого канала) от высоковольтного импульсного коммутационного потенциала обеспечивается входным защитным дросселем (L_3) и нелинейными резисторами (варисторами), шунтирующими емкостный делитель напряжения (ЕДН).

Проведем приближенную оценку энергетических параметров L_3 и ЕДН при следующих упрощающих допущениях: высоковольтный импульс напряжения имеет прямоугольную форму; инверторы тока (ИТ) во время импульса отключены; активное сопротивление дросселя пренебрежимо мало, а его сердечник ненасыщен; напряжение ста-

билизации для шунтирующих варисторов выше расчетных уровней напряжений на конденсаторах ЕДН. Независимыми начальными условиями являются $i_L(0)$ и $u_D(0)$; начальное напряжение сети $U_C \approx u_D(0)$. Расчет ведем для приращений. При воздействии прямоугольного сетевого импульса с амплитудой приращения $\Delta U_{И}$ и с длительностью $t_{И}$ приращения тока дросселя и напряжения на делителе будут

$$\Delta i_L(t) = \frac{\Delta U_{И}}{\rho} \times \sin(\omega t)$$

$$\text{и } \Delta u_D(t) = \Delta U_{И} \times (1 - \cos(\omega t)),$$

$$\text{где } \rho = \sqrt{\frac{L_3}{C_D}}, \quad C_D = \frac{C}{4}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Заметим, что если бы $t_{И}$ превышало

$$A_{\min} = \frac{L_{\text{сери}} \times I_0^2 \times K_D}{2 \times K_D - 1},$$

когда $\Delta u_D = \Delta U_{И}$, то в момент времени $t = T/4$ можно было бы включить тиристор, шунтирующий L_3 с целью срыва колебательного заброса $\Delta u_D > \Delta U_{И}$. Однако при этом мы имели бы перенапряжение на делителе $\Delta u_D = \Delta U_{И}$. Поэтому зададим допустимую величину

$$\Delta U_{D,\max} = \frac{\Delta U_{И}}{K},$$

где K — коэффициент демпфирования.

Тогда

$$K = \frac{1}{1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T} \times t_{И}\right)} = \frac{1}{1 - \cos\left(\frac{t_{И}}{\sqrt{L_3 C_D}}\right)}$$

$$\text{и } L_3 \times C_D = \left(\frac{t_{И}}{\arccos\left(1 - \frac{1}{K}\right)} \right)^2.$$

Пусть $K \geq 2$, например, для $\Delta U_{D,\max} \leq 6 \text{ кВ}/2$; при этом:

$$L_3 \times C_D = \left(\frac{4t_{И}}{\pi} \right)^2 \approx 0,9 \times t_{И}^2 \quad (T_0 = 6t_{И}).$$

В практике часто встречается величина $t_{И} = 10 \text{ мс}$. Приняв для ограничения энергоемкости ЕДН $C_D = 450 \text{ мкФ}$, получаем величину $L_3 = 200 \text{ мГн}$. При этом следует учесть, что максимальные величины тока дросселя и напряжения ЕДН будут:

$$I_{L,\max} = i_L(0) + \frac{\Delta U_{И}}{\sqrt{\frac{2L_3}{C_D}}};$$

$$U_{D,\max} = U_C + \Delta U_{И} \times \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right).$$

Величины L_3 и $i_L(0)$ определяют номинальную энергоемкость (габариты) дросселя, а величина $I_{L,\max}$ — зону насыщения для его сердечника. Приблизительно масса такого дросселя при номинальном токе порядка 300 А будет приближаться к 1000 кг. Энергоемкость (габариты) емкостного делителя напряжения определяется величиной

$$\frac{C_D U_{D,\max}^2}{2} = 4 \times \frac{C U_{C,\max}^2}{2},$$

$$\text{где } C = 4 \times C_D, \quad U_{C,\max} = \frac{U_{D,\max}}{4}.$$

Для примера можно привести параметры индуктивного шунта ИШ 104А для шунтирования

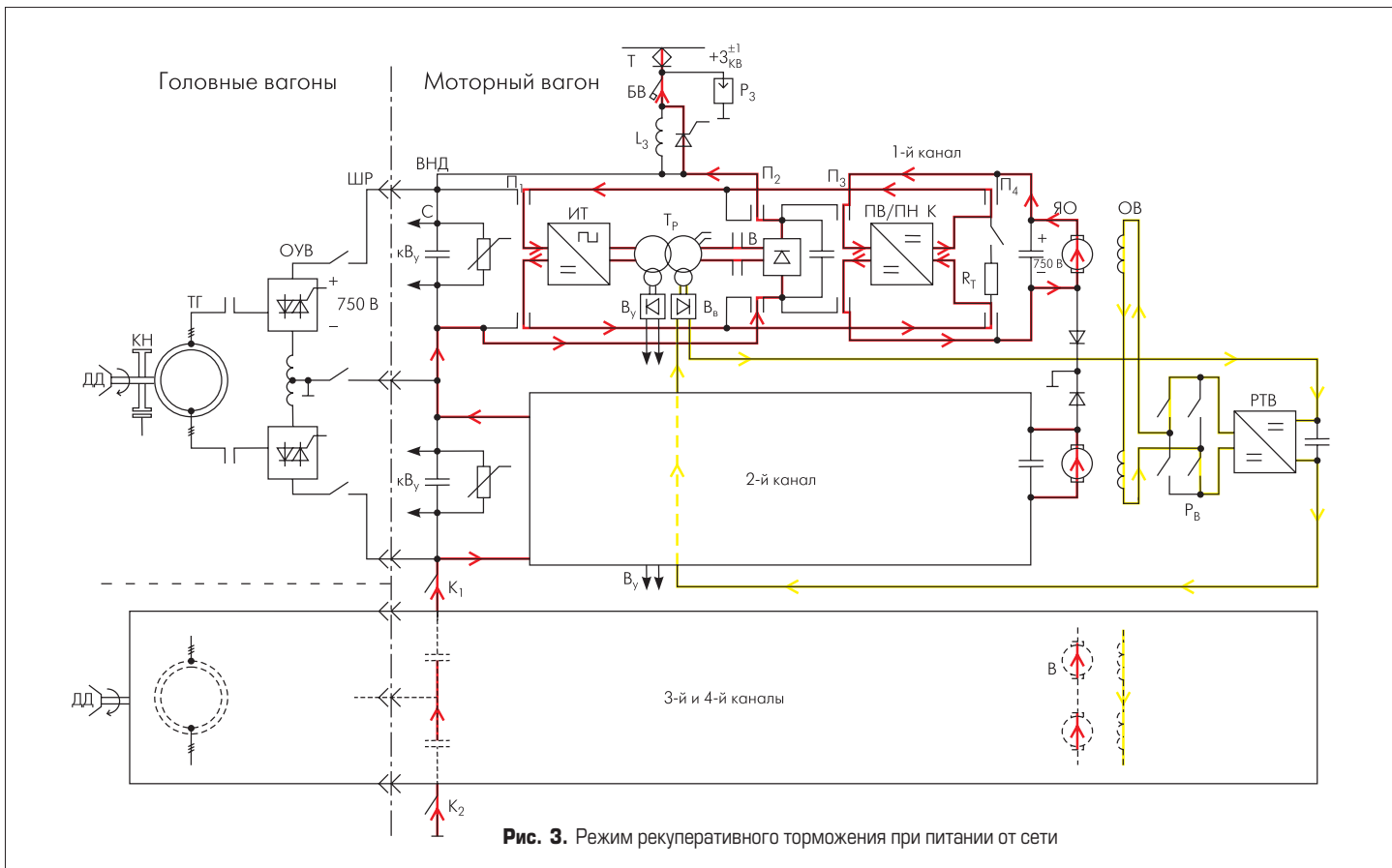


Рис. 3. Режим рекуперативного торможения при питании от сети

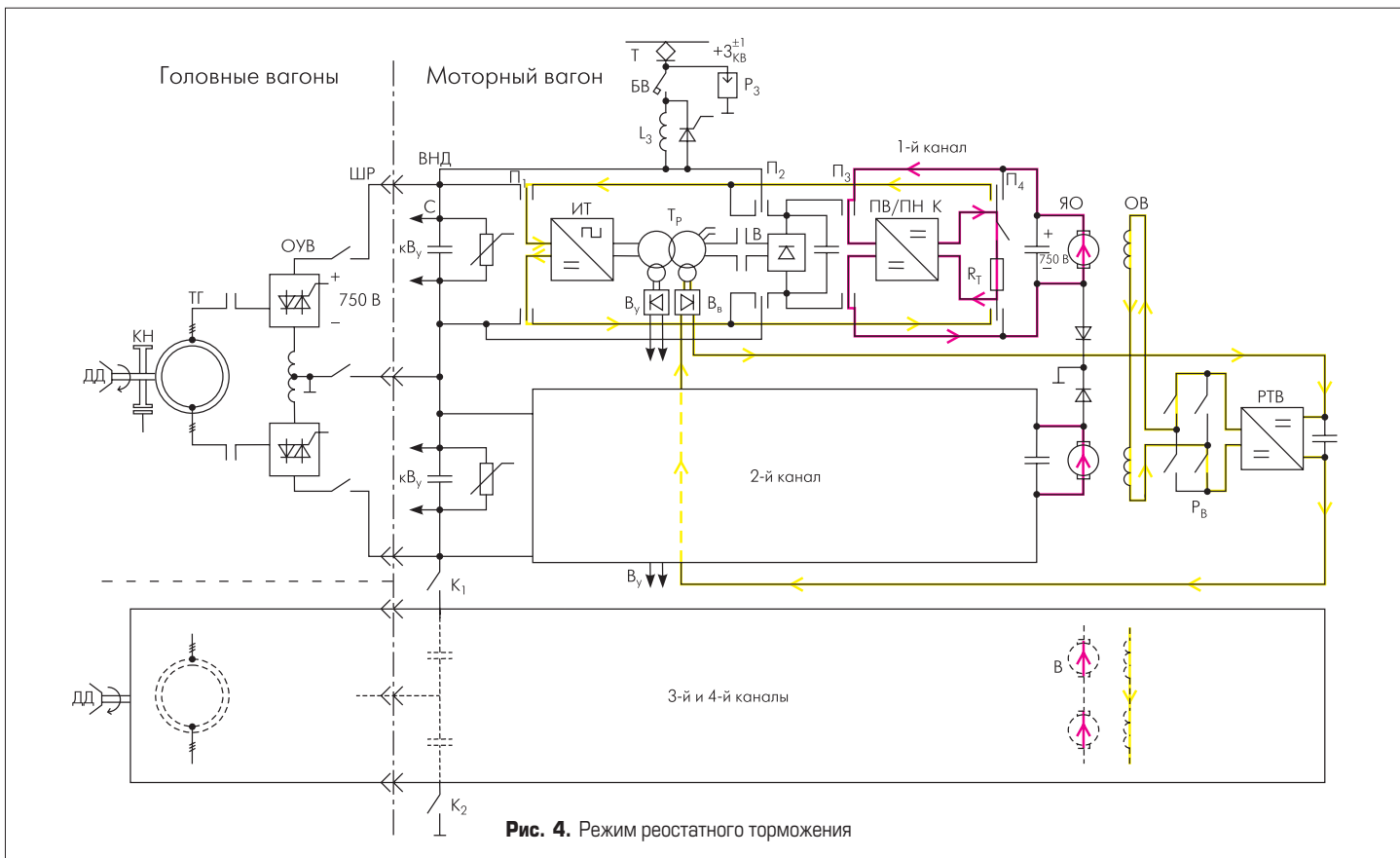


Рис. 4. Режим реостатного торможения

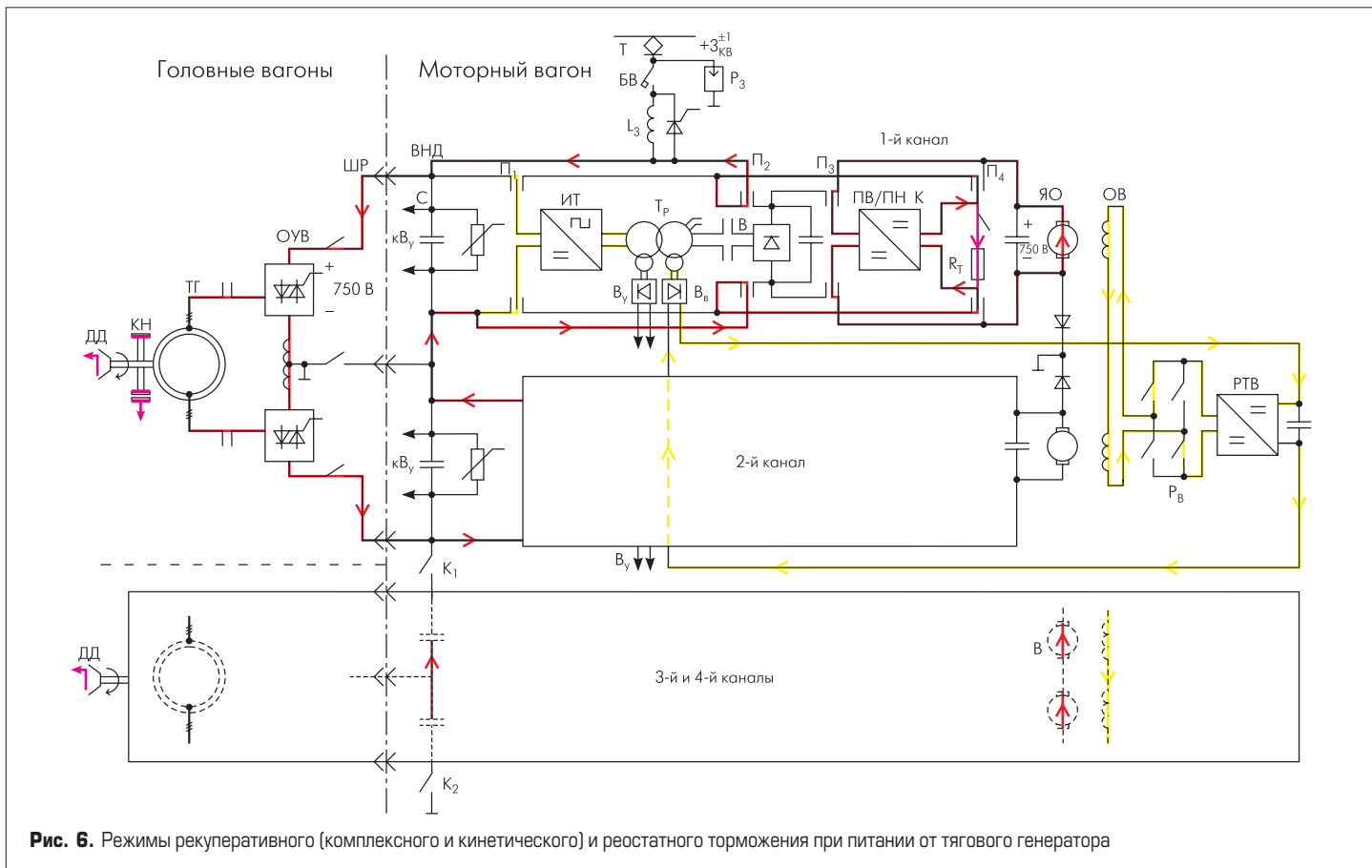
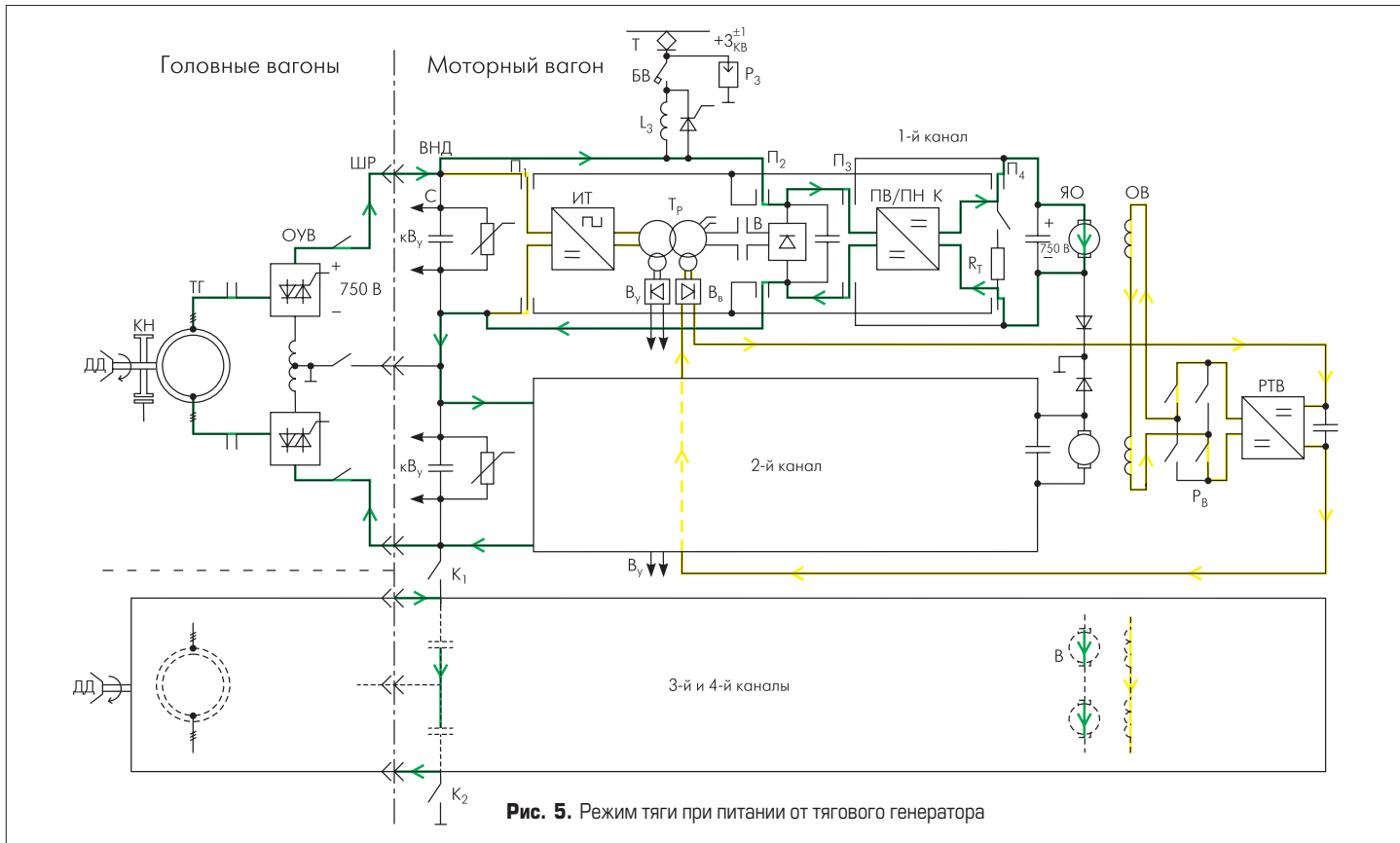
обмоток возбуждения тяговых электродвигателей УРТ-110: $R = 0,35 \text{ Ом}$, $L_{\text{при } 100 \text{ А}} = 170 \text{ мГн}$ ($L_{\text{при } 50 \text{ А}} = 300 \text{ мГн}$)

Компьютерное моделирование показало, что последовательно-параллельный набор из четырех шунтов с успехом решает проблему.

Единственной альтернативой указанному методу защиты представляется входной

быстродействующий полупроводниковый высоковольтный выключатель, например на базе запираемых тиристоров [5]. Однако в настоящее время этот путь по надежности и стоимости многократно проигрывает вышеописанному, а по массогабаритным показателям не дает ощутимого выигрыша.

В статическом режиме самовыравнивание напряжений на конденсаторах ЕДН происходит независимо от регулируемых напряжений на якорных обмотках (ЯО) электродвигателей. Оно обесточивается с помощью закольцованных перекрестных обратных связей в неуправляемых инверторах тока (ИТ) по цепям выходных транс-



форматоров (Тр) и уравнивающих выпрямителей (В_у) [6].

Расширение скоростного диапазона для рекуперативного торможения (вплоть до остановки) при сетевом питании (рис. 3) обеспечивается широкими функциональными возможностями ПВ/ПН К, а именно способностью работать в режиме повыше-

ния напряжения, понижения напряжения и «безразличном» режиме (при любом соотношении напряжений). При этом обеспечивается цепь независимого возбуждения (ИТ-Тр-В_у-РТВ-Р_в-ОВ). Аналогично обеспечивается реостатное (динамическое) торможение с рассеиванием энергии в тормозном резисторе R_т (рис. 4).

При автономном питании возможны (порознь или совместно) режимы торможения (рис. 6): с помощью компрессионного режима дизеля (ДД); возврат энергии в кинетический накопитель (КН), например маховик с механическим тормозом (дисковым или цилиндрическим), а также вышеуказанный режим реостатного торможения.

Литература

Наличие регуляторов якорного тока (ПВ/ ПН К) и тока возбуждения (РТВ) позволяет обеспечить оптимальные по энергоэкономичности и комфортности режимы пуска, тяги и торможения при дуальном управлении [7].

Раздельное управление якорными обмотками двигателей позволяет своевременно парировать буксования (в тяговом режиме) и юзы (в режимах торможения). Если один из двигателей окажется аварийным, его можно отключить от питания. В этом случае перекрестные самовыравнивающие цепи обратных связей (ИТ-Тр-В_у-С) позволяют, несмотря на образовавшийся режим холостого хода в одном из каналов, удержать прежними напряжения на входах оставшихся трех, что повышает функциональную живучесть тяговой схемы.

При реализации железнодорожных тяговых схем с импульсным регулированием, как правило, возникает задача демпфирования псофометрических рельсовых переменных токов, особенно с частотой 25 Гц, опасных для автоматических систем управления стрелками. Заметим, что резонансная частота вышеописанного контура L_3-C_D равна 17 Гц. Приняв во внимание снижение эффективной индуктивности из-за насыщения магнитопровода, а также относительно пологий характер резонансной кривой, получаем реальную опасность усиления возмущений, имеющих частоту 25 Гц. Такие возмущения могут появляться при выпрямлении на подстанции (как субгармоника для 50 Гц), в замкнутых цепях управления импульсным регулятором, а также в цепи заземляющего узла (при резонансных колебаниях).

В настоящее время для защиты от этих колебательных токов применяется явно нерациональный и весьма опасный способ: повышение на порядок величины C_D (до 4,5–5 мФ), а следовательно, и его энергии. Самый действенный и универсальный способ демпфирования таких колебаний — введение последовательно, с целью питания, активного полосового заграждающего фильтра. Наиболее безопасным местом его включения представляется цепь заземляющего устройства.

Отказ от последовательного возбуждения или использование режима рекуперативного торможения, как правило, вызывает опасность повреждения сверхтоком щеточно-коллекторного узла и якорной обмотки двигателя при пробое на корпус его анодного вывода. В электропоездах типа ЭР2Т(ЭР2Р) для защиты от таких случаев установлен громоздкий и дорогой быстродействующий контактор защиты. В рассматриваемой схеме для этого используются защитные диоды в цепи заземления якорных обмоток.

И наконец, защита инверторных транзисторов от «сквозных» сверхтоков (при воздействиях помех) может быть обеспечена выбором схемы инвертора тока со звеном постоянного тока (дросселем) в цепи питания. Однако при этом возникает задача экономичной утилизации энергии дросселя, передаваемой в межкоммутационных паузах. Оптимальным решением данной задачи представляется схема L-C-D — демпфирующе-рекуперативной цепочки, рассмотренной в [8, 9], но модернизированной авторами для применения в мостовых инверторах тока.

Исключение недопустимых акустических шумов в инверторах, конверторах, дросселях и трансформаторах обеспечивается выбором рабочей частоты для IGBT-транзисторов порядка 20 кГц.

Существенное достоинство рассмотренной структуры в том, что ее универсальность в отношении сетевого и автономного питания достигается не путем сложения двух рациональных схемотехнических решений, а за счет многорежимного использования основных узлов благодаря переменной структуре. Еще одним достоинством является модульно-канальный принцип построения, обеспечивающий высокую ремонтпригодность и простоту технического диагностирования.

В перспективе структура практически может быть сохранена и при переходе на бесщеточные двигатели с полупроводниковыми коммутаторами.

Заключение

Данная структура универсальной тяговой схемы дизель-электропоезда с импульсным регулированием и защитой от перенапряжений представляется максимально эффективной по основным рассмотренным критериям для перспективного железнодорожного транспорта.

1. Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / Под общ. ред. В. М. Амелина, Ю. М. Инькова. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. 200 с.
2. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. Учебное пособие / Авт. кол.: Н. В. Балюк, В. Г. Болдырев, В. П. Булеков, Л. Н. Кечиев, В. Ю. Кириллов, И. И. Литвак, В. А. Постников, С. Б. Резников. Под ред. Булекова В. П. М.: Изд-во МАИ, 2004. 648 с.
3. Ламанов А. В., Белашенко М. Д., Вольский С. И., Чуев Д. В., Милованов В. К., Никитин В. В. Новый поезд России. М.: ФПО НТТ, 2002. 73 с.
4. Резников С. Б., Савенков А. И. Пути повышения эффективности аварийных быстродействующих выключателей постоянного тока в железнодорожных тяговых схемах // Практическая силовая электроника. № 12'2003. С. 20–26.
5. Патент РФ № 2167478 от 20.05.2001. Автоматический выключатель постоянного тока / Авт. кол.: М. Д. Белашенко, А. В. Ламанов, А. И. Савенков, С. Б. Резников, В. А. Станкевич, А. А. Кузмин.
6. Патент РФ на полезную модель № 37293 от 10.04.2004. Преобразователь постоянного напряжения с конденсаторным делителем / Авт. кол.: М. Д. Белашенко, А. В. Ламанов, С. Б. Резников, А. И. Савенков.
7. Резников С. Б. Квазиоптимальное по энергоэкономичности импульсное управление тяговым приводом электропоезда // Практическая силовая электроника. № 12'2003. С. 12–15.
8. Сергеев Б. С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания. М.: Радио и связь, 1992. 224 с.
9. Сергеев Б. С., Чечулина А. Н. Источники электропитания электронной аппаратуры железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1998. 280 с. (рис. 4.22, с. 157).