

УДК 621.33 (072)

## **Эффективный способ шунтирования обмоток возбуждения тяговых машин**

А. В. Тулупов\*, В. Д. Тулупов

Постоянный и значительный рост стоимости энергоресурсов диктует необходимость максимального повышения эффективности их потребления. В транспортном сообщении крупных городов России с областными населенными пунктами решающее значение имеет пригородное железнодорожное сообщение, осуществляемое с помощью электропоездов. Именно для пригородного железнодорожного транспорта наиболее актуально наличие рекуперативного торможения и повышение его эффективности, так как электропоезда, в отличие от электропоездов, имеют большое количество остановок на станциях, следовательно разгон и торможение у них осуществляются часто и в широком диапазоне скоростей.

Железные дороги наиболее крупных мегаполисов РФ, в первую очередь Москвы и Санкт-Петербурга, электрифицированы на постоянном токе и потребляют наибольшее количество электроэнергии, следовательно необходимо совершенствование энергетических показателей электропоездов.

При создании современных отечественных составов предполагалось, что при увеличении технической скорости движения электропоездов до 72 км/ч их тягово-энергетические показатели будут лучше, чем у электропоездов предшествующих серий. Реально же, ожидаемого увеличения технической скорости движения не произошло, она осталась на уровне до 55 км/ч, что снизило эффект от применения рекуперативного торможения с 20 до 10%, а недостатки предыдущих серий наоборот, проявились особенно сильно, реостатные потери возросли с 10 до 20%.

Данное обстоятельство послужило основанием для выполненной МЭИ с участием Рижского Электромашиностроительного Завода и Московской железной дороги разработки энергосберегающей системы тягового электропривода (ЭС ТЭП). В системе ЭС ТЭП, благодаря применению схемы «сплотки» двух моторных вагонов, конструкцией которых не предусмотрена перегруппировка тяговых машин (ТМ), реализованы перегруппировка ТМ и энергосберегающий алгоритм пуска, за счет чего сокращено потребление энергии из системы внешнего электропитания до 30% при сохранении уже имеющихся преимуществ. При этом затраты, необходимые для оборудования серийно выпускающихся поездов системой ЭС ТЭП, минимальны.

Предложен вариант модернизации системы ЭС ТЭП с применением электронных шунтирующих устройств на основе IGBT транзисторов взамен индуктивных шунтов (ИШ). Электронные шунты (ЭШ) могут работать непрерывно, при этом не перегреваясь, обеспечивают наилучшие условия протекания переходных процессов и обладают целым рядом преимуществ перед ИШ.

Применение ЭШ в электропоездах, оборудованных системой ЭС ТЭП, может решить не только проблему перегрева ИШ, но и улучшить условия протекания переходных процессов в ТМ, повысит быстродействие и надежность работы системы, а также позволит регулировать шунтирование обмотки возбуждения тяговой машины в широком диапазоне.

Ключевые слова: электропоезд постоянного тока, тяговый электропривод, электронный шунт.

---

\* MiTulupov@mail.ru

Постоянный и значительный рост стоимости энергоресурсов диктует необходимость максимального повышения эффективности их потребления. В масштабе Российской Федерации эта задача сформулирована в действующем Федеральном законе от 23 ноября 2009 г. №216-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Задолго до его принятия комплекс мер по снижению удельных затрат электроэнергии на железнодорожном транспорте был сформулирован в Энергетической стратегии ОАО «РЖД».

По оценке старшего вице-президента по инновационному развитию — главного инженера ОАО «РЖД» В.А. Гапановича [1] Российские железные дороги являются «...крупнейшим корпоративным потребителем энергоресурсов в стране...», потребляя около 5% вырабатываемой в РФ электроэнергии, причем «...основная доля расхода топливно-энергетических ресурсов в Компании приходится на тягу поездов...». В частности, на нее расходуется «...82% объема потребления компанией электроэнергии...», а ее оплата составляет основную часть затрат на энергоресурсы, так как электрическая тяга выполняет более 80% всей работы железных дорог. Эта статистика усиливает актуальность проблемы снижения энергоемкости электроподвижного состава.

В транспортном сообщении крупных городов России с областными населенными пунктами, а также с ближайшими областными городами особенно важное, а зачастую и решающее значение имеет пригородное железнодорожное сообщение, осуществляемое с помощью электропоездов. Комплексное решение транспортных проблем мегаполисов и создание городских агломераций вообще невозможно без скоординированного развития пригородного железнодорожного сообщения с городскими видами общественного и автомобильного транспорта. Примером тому служит мировой, а в частности, и московский опыт по созданию крупных транспортно-пересадочных узлов, на которых пассажир может пересесть на пригородный железнодорожный транспорт, следующий по нескольким направлениям, метрополитен, городской наземный транспорт, а также воспользоваться услугами «перехватывающей» парковки, что также частично решает и проблему пробок.

Именно для пригородного железнодорожного транспорта наиболее актуально наличие рекуперативного торможения и повышение его эффективности, так как электропоезда, в отличие от электропоездов, как грузовых, так и пассажирских, имеют большое количество остановок на станциях, поэтому разгон и торможение у них осуществляются часто и в широком диапазоне скоростей.

Железные дороги наиболее крупных мегаполисов страны, в первую очередь Москвы и Санкт-Петербурга,

электрифицированы на постоянном токе и потребляют наибольшее количество электроэнергии. В частности, на Московской железной дороге — филиале ОАО «РЖД» (МЖД) электропоезда постоянного тока потребляют в год из системы внешнего электроснабжения более 1 млрд. кВт·ч и абсолютный и удельный расходы постоянно растут. Последнее обусловлено растущим пассажиропотоком и тем, что реальные энергетические показатели каждой новой серии электропоездов оказываются хуже, чем у предыдущей.

Из вышеизложенного следует необходимость совершенствования энергетических показателей электропоездов, однако, для понимания причин ухудшения реальных энергетических показателей каждой новой серии электропоездов и формулировки способов повышения их энергетической эффективности, следует обратиться к почти вековой истории создания отечественных электропоездов постоянного тока. Массовое производство электропоездов постоянного тока в СССР было начато в 1957 г. с выпуска серии ЭР1, замененной в 1962 г. на ЭР2, которые серийно выпускались вплоть до 1987 г. На всех выпускавшихся в СССР с 1957 г. электропоездах постоянного тока серий ЭР1 и ЭР2 использовался тяговый электропривод с двухступенчатым реостатным пуском без электрического торможения. Плохие энергетические показатели этих электропоездов были обусловлены отсутствием у них рекуперативного тормоза и плохой динамикой, вызванными малой мощностью тяговых машин (ТМ) и ограничениями возможности регулирования токов их возбуждения вследствие высокого напряжения на коллекторах (до 2 кВ).

С целью устранения этих недостатков в проектировании перспективных серий электропоездов была применена новая система тягового электропривода с рекуперативно-реостатным торможением (РРТ), разработанная профессором кафедры электрического транспорта Московского Энергетического института (МЭИ) Л. М. Трахтманом в 1950-х гг. прошлого столетия. В этой системе основным недостатком было высокое напряжение на коллекторах ТМ, которое устранялось путем отказа от перегруппировки ТМ и использования постоянного последовательного соединения всех четырех ТМ моторного вагона электропоезда. При этом вдвое снижалось напряжение на коллекторах ТМ (с 1,5 до 0,75 кВ), а отношение их номинальных напряжений и токов существенно приблизилось к единице — оптимальному значению для ТМ (с 11,5 до 2,4).

Указанные новшества позволили увеличить часовую мощность ТМ на 20% (с 195 до 234 кВт), а минимальный коэффициент шунтирования обмотки возбуждения ТМ (КШОВ) оказалось возможным снизить с 0,5 до 0,18, что позволило (за счет увеличения силы тяги) существенно улучшить динамические показатели работы электропоезда в зоне высоких скоростей, следовательно, снизить расход электроэнергии на тягу

электропоезда без усложнения конструкции его ТМ [2]. Устоявшийся термин — коэффициент ослабления поля ( $\beta$ ) заменен на КШОВ ввиду того, что  $\beta$  не отражает физики процесса: при включении ослабления поля происходит шунтирование обмотки возбуждения (ОВ) ТМ, при этом сила тока и магнитный поток (поле) в ней меняются незначительно.

Кроме того, преимуществом новой системы стало применение рекуперативного тормоза — основного резерва улучшения энергетических показателей, который позволяет в режиме электрического торможения, когда ТМ работают в генераторном режиме, возвращать энергию в систему внешнего энергоснабжения (контактную сеть) [3].

После эксплуатационных испытаний на ряде опытных серий электропоездов система была применена на электропоездах серий ЭР2Р и ЭР2Т, которые стали основными серийно выпускавшимися в период с 1982 по 2003 гг. При создании электропоездов ЭР2Р и ЭР2Т предполагалось, что при прогнозирувавшемся ОАО «ВНИИЖТ» увеличении технической скорости движения электропоездов до 72 км/ч их тягово-энергетические показатели будут лучше, чем у электропоездов предшествующих серии, в которых РРТ отсутствовало [4]. При этом применение низковольтных ТМ повышенной мощности должно было существенно снизить расход электроэнергии электропоездом (ориентировочно до 40%) за счет наличия рекуперации и повышенных динамических показателей [5]. Реально же, ожидаемого увеличения технической скорости движения электропоездов не произошло, она осталась на уровне до 55 км/ч, что снизило эффект от применения рекуперативного торможения с 20 до 10%, а недостатки одноступенчатого реостатного пуска наоборот проявились особенно сильно, реостатные потери возросли с 10 до 20%. Отсюда итог — увеличение общего расхода энергии электропоездами серий ЭР2Р и ЭР2Т по сравнению с ЭР2 [6, 7]. Следует отметить, что и в настоящее время серийно выпускается их аналог — электропоезд серии ЭД4М.

Указанное обстоятельство послужило основанием для выполненной МЭИ с участием Рижского Электромашиностроительного Завода (РЭЗ) и МЖД разработки энергосберегающей системы тягового электропривода (ЭС ТЭП). В системе ЭС ТЭП, благодаря применению схемы «сплотки» двух моторных вагонов, достигнуто сокращение потребления энергии из системы внешнего электроснабжения примерно на 30% по отношению к серийным электропоездам с РРТ при сохранении реализованных на этих электропоездах преимуществ. При этом затраты, необходимые для оборудования серийно выпускающихся поездов по системе ЭС ТЭП, являются минимальными. Для понимания принципа работы ЭС ТЭП рассмотрим упрощенную схему силовых цепей «сплотки» [8], представленную на рис. 1, которая также обеспечивает эксплуатацию каждого из моторных

вагонов, объединяемых в «сплотку» в индивидуальном режиме, в котором практически сохраняется штатный алгоритм работы серийных электропоездов с РРТ. Схемы обоих вагонов отличаются от серийных только разверткой реостатного контроллера (РК), в них, за исключением блока автоматики, используется штатное электрооборудование серийных электропоездов.

На схеме обмотки якорей 4-х тяговых машин вагонов *A* и *B*, постоянно включенных последовательно, изображены одним якорем *ЯА* и *ЯБ*. В цепи межвагонного соединения установлен серийный разъем, используемый в схемах электроотопления пассажирских поездов. Пуско-тормозные резисторы обоих вагонов разделены на две группы *R1* и *R2*, регулирование сопротивлений которых производится штатными *РК*. Контактные тормозного переключателя *ТП* изображены в положении «тяга». Обмотки возбуждения *ТМ* каждого вагона, аналогично обмоткам якорей, постоянно включены последовательно и изображены одной обмоткой *ОВА* и *ОВБ*. При этом *ОВ* показаны для режима независимого возбуждения, то есть они подключены к отдельным источникам питания — возбудителям *ВА* и *ВБ*, хотя в режиме тяги, как и на серийных электропоездах с РРТ, используется последовательное возбуждение.

В индивидуальном режиме работы моторных вагонов разомкнут контактор *M*, соединяющий силовые цепи вагонов *A* и *B*. В режиме тяги замкнуты контакторы *ЛК* и *ЛКТ*. Ток якорей регулируется вначале изменением сопротивлений *R1* и *R2*, включенных последовательно, а затем применяется шесть ступеней шунтирования *ОВ ТМ*. При рекуперативном торможении контакторы *ЛКТ* разомкнуты и ток якоря проходит через диоды *VD1* и *VD2* на вагоне *A* и через диод *VD1* на вагоне *B*. При этом *ОВ* тяговых машин каждого вагона подключаются к возбудителям *ВА* и *ВБ*, то есть происходит переключение с последовательного возбуждения (ПВ) на независимое (НВ). По мере снижения скорости, поддержание постоянства тока якоря осуществляется путем постепенного увеличения тока возбуждения. Когда ток возбуждения достигает максимального значения, происходит переход на реостатное торможение, которое включается замыканием контакторов *ЛКТ* и отключением контакторов *ЛК*. При этом сохраняется независимое возбуждение тяговых машин, а ток якоря регулируется изменением сопротивлений *R1* и *R2*, включенных последовательно как и в режиме тяги, с одновременным регулированием тока возбуждения.

В режиме «сплотки» при пуске замкнуты контакторы *ЛК* и *M*, при этом тяговые машины обоих вагонов включены последовательно, а ток якоря вначале регулируется поочередным выключением ступеней резисторов *R1* каждого вагона, что удваивает число ступеней регулирования силы тяги по сравнению с серийными электропоездами с РРТ. Затем происходит

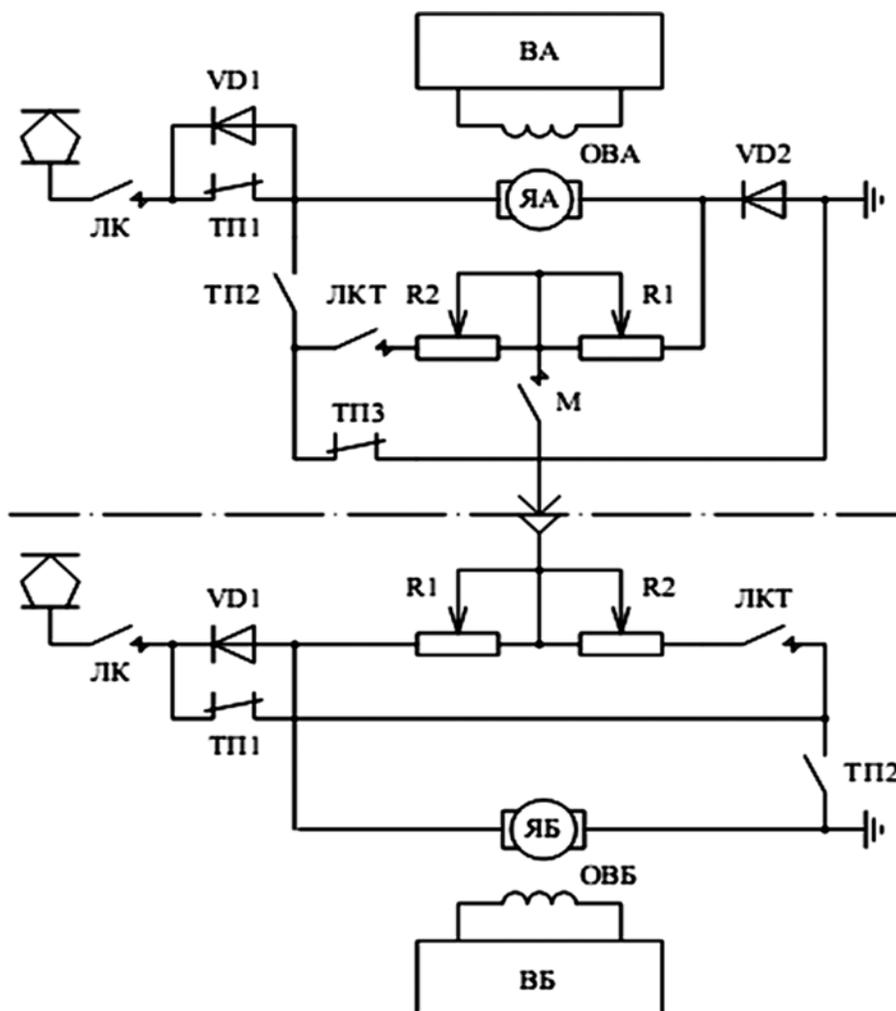


Рис. 1. Упрощенная схема силовых цепей

поочередное включение на каждом вагоне сплотки 1-й, 3-й и 5-й ступеней шунтирования *ОВ ТМ*. Далее происходит переключение сплотки на параллельное соединение *ТМ* мостовым способом, при этом сначала включаются контакторы *ЛКТ*, а затем выключается контактор *М*. Таким образом, в пределах каждого вагона последовательно с якорями оказывается включенным сопротивление *R2*, которое быстро выводится при хронометрическом вращении *ПК*. Далее, как и в индивидуальном режиме работы, применяется шесть ступеней шунтирования *ОВ ТМ*, по три на каждом из моторных вагонов «сплотки».

Рекуперативное торможение в режиме «сплотки» при параллельном соединении *ТМ* аналогично рекуперативному торможению в индивидуальном режиме. При этом контактор *М* разомкнут. Когда ток возбуждения достигает максимального значения, замыкается контактор *М* и происходит переход на рекуперативное торможение при последовательном соединении *ТМ*. При этом ток якоря проходит через последовательно включенные сопротивления *R1* обоих вагонов, диод *VD1* и контактор *ЛК* вагона *А*. Дiodы *VD2* вагона *А*

и *VD1* вагона *Б* запираются. Далее аналогично пуску при параллельном соединении происходит хронометрический вывод сопротивлений *R1* каждого вагона с соответствующим снижением тока возбуждения, после чего поддержание постоянства тока якоря по мере снижения скорости также выполняется путем увеличения тока возбуждения. При достижении током возбуждения максимального значения осуществляется переход на реостатное торможение с *НВ*. При этом отключаются контакторы *ЛК* обоих вагонов и контактор *М*, включаются контакторы *ЛКТ* также обоих вагонов. Далее процесс торможения протекает аналогично индивидуальному режиму с одним лишь отличием, что на каждом вагоне выводится только сопротивление *R2*.

Экономия энергии посредством ЭС ТЭП достигается благодаря перегруппировке *ТМ* за счет снижения пусковых реостатных потерь в 3,5 раза, что дает уменьшение потребления энергии в режиме тяги при технической скорости равной 55 км/ч на 15%. Кроме того, экономия достигается за счет снижения скорости окончания рекуперативного торможения примерно в два раза, что увеличивает возврат энергии в сеть на

10 — 15%. Следовательно, общий расход энергии электропоезда с ЭС ТЭП снижается на 25 — 30%. Помимо этого, ориентировочно на 5% сокращается потребление энергии из системы внешнего электроснабжения за счет уменьшения ее потерь в системе тягового электроснабжения.

Положительные результаты шести специальных испытаний электропоездов с применением системы ЭС ТЭП, двух контрольных тягово-энергетических и четырех эксплуатационных испытаний в депо им. Ильича, Железнодорожная и Лобня МЖД, последнее из которых было проведено в 2005 г., подтверждаемые многолетним опытом эксплуатации оборудованных по системе ЭС ТЭП четырех серийных электропоездов, являются доказательством необходимости применения системы ЭС ТЭП как при модернизации существующих, так и при производстве новых электропоездов. Это делает актуальной задачу дальнейшего улучшения технико-экономических показателей электропоезда с ЭС ТЭП на базе «сплотки», а также рассмотрения возможности ликвидации определенных негативных явлений, возникающих при реализации ЭС ТЭП, с применением современной элементной базы.

Почему же по системе ЭС ТЭП до настоящего времени не модернизируются эксплуатируемые и не оборудуются выпускаемые серийно электропоезда? В первую очередь, из-за ряда субъективных негативных оценок эффективности системы, большинство из которых не обоснованы, что подробно описано в [9]

Однако, среди субъективных оценок существуют и объективные технические недостатки в работе системы, ряд из которых возможно устранить, применив в системе ЭС ТЭП современные системы управления и полупроводниковые элементы, которые с каждым годом становятся все совершеннее и все более широко внедряются в различные области науки и техники. В частности, за последние 10 — 15 лет были серьезно усовершенствованы IGBT транзисторы и системы управления ими, характеристики и стоимость которых позволяют применять их в электроприводах современного подвижного состава.

Определенным недостатком существующего алгоритма пуска и торможения электропоезда с ЭС ТЭП, выявленным в процессе проведения упомянутых выше испытаний, является снижение сил тяги и торможения в зоне ступенчатого шунтирования обмотки возбуждения ТМ при последовательном соединении ТМ в диапазоне скоростей от 20 до 40 км/ч и в зоне рекуперативного торможения при последовательном соединении ТМ в диапазоне скоростей от 50 до 25 км/ч, то есть снижение силы тяги или торможения ниже уровня ее уставки и затем повышение ее вновь до того же уровня. Это связано с тем, что в режимах тяги и рекуперативного торможения регулирование ведется на постоянство пускового тока путем уменьшения величины магнитного потока по мере роста скорости движения

или тормозного тока путем увеличения величины магнитного потока по мере снижения скорости движения. В результате происходит соответствующее снижение силы тяги и торможения, которое негативно сказывается на динамике движения электропоезда, то есть увеличивается время и путь разгона и торможения.

Для ликвидации этого недостатка можно применить регулирование на постоянство силы тяги и тормозной силы в указанных диапазонах скоростей. В этом случае при пуске по мере роста скорости движения надо увеличивать ток якоря, чтобы при снижении магнитного потока не происходило уменьшение силы тяги, при рекуперативном торможении по мере снижения скорости надо наоборот снижать ток якоря. В обоих режимах изменение тока якоря с поддержанием постоянства силы тяги или торможения возможно осуществить путем соответствующего регулирования тока возбуждения.

Осуществить такое регулирование тока возбуждения на существующих электропоездах с ЭС ТЭП в режиме тяги составляет определенную сложность, так как на них используется ступенчатое шунтирование ОВ при ПВ ТМ и вывод каждой ступени шунтирования ОВ производится по сигналу реле ускорения–торможения (РУТ). Реальной альтернативой в этом случае является применение НВ ТМ, при котором можно плавно менять ток возбуждения по любому требуемому алгоритму. Кроме того, применение НВ ТМ в режиме тяги эффективно еще и с точки зрения повышения тяговых свойств электропоезда и упрощения силовых цепей.

При контрольных испытаниях на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» электропоезда с ЭС ТЭП был выявлен повышенный нагрев индуктивного шунта (ИШ) одного из двух моторных вагонов сплотки в режиме электрического торможения. Это обусловлено тем, что в тормозном режиме у электропоезда с ЭС ТЭП, в отличие от серийного ЭП, ИШ включен в силовую цепь не только в режиме рекуперативного, но и в режиме реостатного торможения, поэтому он обтекается тормозным током более длительное время, что и приводит к его повышенному нагреву.

Для ликвидации этого недостатка возможно исключение ИШ из силовой цепи как в режиме тяги при НВ ТМ, так и в режиме электрического торможения. Выполняемая им функция токоограничивающего реактора для уменьшения бросков тока якоря при резком изменении напряжения в контактной сети (КС) может быть обеспечена соответствующим регулированием тока возбуждения, то есть его увеличением в режиме тяги при резком возрастании напряжения в КС и уменьшением в режиме рекуперативного торможения при резком снижении напряжения в КС.

Кроме того, применение ЭС ТЭП теоретически может увеличивать склонность электропоезда к боксованию из-за последовательного соединения всех восьми ТМ обоих моторных вагонов «сплотки».

Указанные проблемы неоднократно изучались на

кафедре электрического транспорта НИУ МЭИ и легли в основу ряда статей и научных работ. Проведенные исследования показали, что в подавляющем большинстве режимов работы ЭС ТЭП эти проблемы возможно решить, модернизировав систему, или они не играют значимого для функционирования системы значения. Одним из вариантов модернизации системы ЭС ТЭП для ликвидации обозначенных проблем и является предполагаемое применение электронных шунтирующих устройств на основе IGBT транзисторов взамен ИШ. Подобные устройства в настоящее время проходят испытания на отечественном магистральном подвижном составе. Электронные шунты (ЭШ) могут работать непрерывно, не перегреваясь при этом, обеспечивают лучшие условия протекания переходных процессов и обладают целым рядом преимуществ перед ИШ, которые позволяют:

- снизить потери в зоне высоких скоростей движения;

- улучшить показатели надежности ТЭП и снизить затраты на его обслуживание;

- повысить качественные показатели регулирования тормозной силы;

- увеличить процент возврата электроэнергии в процессе рекуперативного торможения;

- реализовать дополнительные механизмы защиты от юза и боксования;

- демонтировать ряд контакторных элементов.

Основным силовым элементом ЭШ является система регулирования тока возбуждения на основе IGBT транзистора (Insulated Gate Bipolar Transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором).

Комплект ЭШ, проходящий испытания с отечественным магистральным подвижным составом, содержит:

- силовые модули (МС), устанавливаемые вместо ИШ;

- блок управления ЭШ (БУ ЭШ);

- датчики тока якоря и тока возбуждения;

Рассмотрим принцип работы ЭШ. На рис. 2. представлена схема подключения ЭШ к силовым цепям магистральное подвижного состава.

Работу силовых модулей ЭШ обеспечивает блок БУ ЭШ. В режиме тяги для увеличения тяги или для регулирования скорости движения машинистом может быть использован режим ослабленного возбуждения ТМ путем установки реверсивного переключателя из положения ПП (полное поле) в положения ОП1, ОП2, ОП3 (ослабленное поле) (термин «ослабленное поле» используется в большинстве литературных источников, в данном тексте вместо него используется термин «коэффициент шунтирования обмотки возбуждения ТМ»). При установке машинистом реверсивного переключателя из положения ПП в положение ОП1 включаются контактор шунтировки 71, с задержкой 0,2 с сигналом с БУ ЭШ включаются модули IGBT в силовых

модулях и устанавливается режим шунтирования ОВ ТМ с коэффициентом  $K_{\text{ШОВ}} 0,7+0,1$ . Подобное происходит и при установке реверсивного переключателя в положения ОП2 и ОП3, при этом устанавливаются  $K_{\text{ШОВ}} 0,52+0,1$  и  $0,43\pm 0,1$ , соответственно. Следует отметить, что алгоритм работы ЭШ позволяет устанавливать различные режимы шунтирования ОВ ТМ с различными  $K_{\text{ШОВ}}$ , диапазон которых ограничен лишь характеристиками ТМ.

При установке машинистом реверсивного переключателя из положения ОП1 в положение ПП сигналом с БУ ЭШ выключаются модули IGBT и после размыкания контактора шунтировки 71 ТМ переходят в режим полного возбуждения. Таким образом, с применением ЭШ значительно уменьшен разрывной ток контакторов, так как модули IGBT выключаются раньше контакторов шунтировки.

При возникновении нестационарных ситуаций в режиме шунтирования ОВ ТМ (восстановление сцепления после боксования, восстановление контакта токоприемника с контактным проводом после отрыва, резкие перепады напряжения в контактной сети) и отсутствии индуктивности в шунтирующей цепи скорость изменения тока якоря значительно опережает скорость изменения тока возбуждения, что может создать режим работы ТМ с недопустимо малым  $K_{\text{ШОВ}}$ . Для предотвращения этой ситуации в блоке БУ ЭШ задается пороговая величина  $K_{\text{ШОВ}}$ , которая определяется как:

$$K_{\text{ШОВ}} = K_{\text{ШОВ}}^1 - \Delta K_{\text{ШОВ}}$$

где  $K_{\text{ШОВ}}^1 = I_B / I_A - K_{\text{ШОВ}}$  при стационарном режиме работы ТМ,  $I_B$ ,  $I_A$  — токи возбуждения и якоря ТМ;  $\Delta K_{\text{ШОВ}}$  — допустимое задаваемое отклонение  $K_{\text{ШОВ}}$  при нестационарном режиме работы.

Значения токов  $I_B$  и  $I_A$  передаются в блок БУ ЭШ с датчиков тока возбуждения (ДТВ) и тока якоря (ДТЯ). При уменьшении коэффициента  $K_{\text{ШОВ}}$  меньше заданной величины  $K_{\text{ШОВ}}^1 - \Delta K_{\text{ШОВ}}$  (0,35) блок БУ ЭШ формирует сигнал на выключение модулей IGBT. После выключения модулей IGBT ТМ переводятся в режим полного возбуждения, блок БУ ЭШ формирует задержку 0,2 с на время действия переходных процессов в цепи ТМ, а затем вновь подает сигнал на включение модулей IGBT, переводя ТМ в режим шунтирования ОВ ТМ.

Ввиду того, что при реостатном торможении ток через шунтирующую цепь протекает в противоположном направлении по отношению к току в тяговом режиме, БУ ЭШ не формирует сигнал на включение модуля IGBT, а ток в шунтирующей цепи протекает через обратные диоды модуля IGBT, обеспечивая шунтирование ОВ ТМ.

Для обеспечения требуемой изоляции между высоковольтными цепями и цепями управления помехоза-

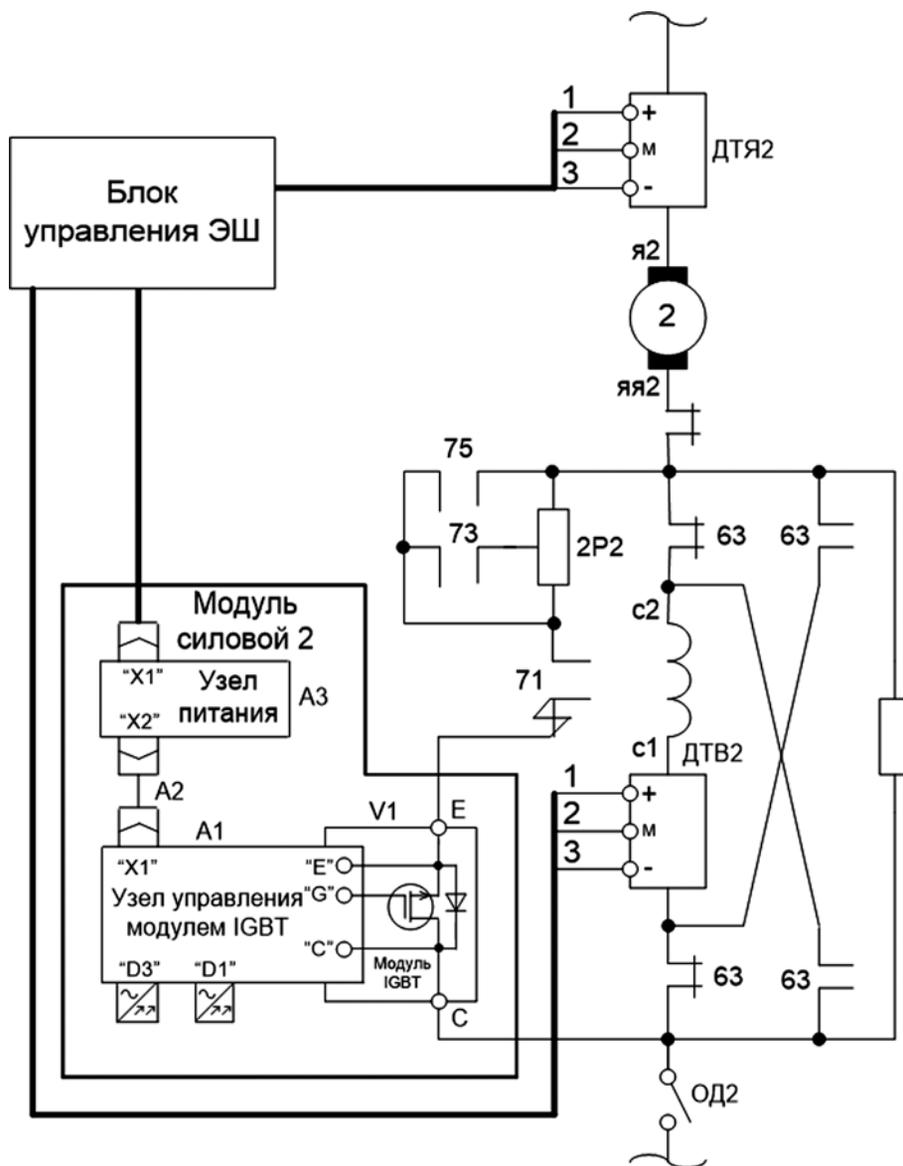


Рис. 2. Принципиальная схема электронного шунта

щищенности сигналы управления подаются с БУ ЭШ на силовые модули по оптоволоконным линиям связи.

Таким образом, применение электронных шунтирующих устройств на основе IGBT транзисторов в электропоездах, оборудованных по системе ЭС ТЭП, решит не только проблему перегрева ИШ, но и улучшит условия протекания переходных процессов в ТМ, повысит быстродействие и надежность работы системы, а также позволит регулировать  $K_{шов}$  в широком диапазоне. Анализируя состав и принцип работы ЭШ можно с уверенностью говорить о том, что это устройство способно не только эффективно заменить ИШ, но и поможет решить целый ряд задач, не входящих в область применения ИШ. Однако, возможность полного исключения ИШ потребует дополнительных расчетов и экспериментальных поездок, т.к. может негативно сказаться на пульсациях тока якоря, что может привести к нестабильной работе систем поездной сигнализации.

Работа выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

### Литература

1. Гапанович В.А. Мы всегда в движении. РЖД за экономию энергоресурсов // Межотраслевой альманах Деловая слава России. 2008. Вып. 5. С. 55 — 57.
2. Тулунов В.Д. и др. Возможности резкого улучшения энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт. 2003. № 6. С. 45 — 51.
3. Тулунов В.Д., Минаев Д.В. Эффективность рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока // Железнодорожный транспорт. 2005. № 10. С. 47 — 50.

4. **Трахтман Л.М.** Электрическое торможение электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1965.

5. **Кирюшин Д.Е.** Система показателей при комплексной оценке тягового электропривода пригородных и межрегиональных электропоездов: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. М., 2005.

6. **Гуткин Л.В., Борисов Г.П.** Энергетическая эффективность рекуперативно-реостатного торможения пригородных электропоездов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 4. С. 20 — 25.

7. **Гуткин Л.В., Самарец Д.М.** Нормирование расхода электроэнергии для электропоездов ЭР2Р и ЭР2Т в условиях депо «Железнодорожная» // Совершенство-

вание электрооборудования электропоездов и высоковольтного оборудования пассажирских вагонов: Сб. научн. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1993. С. 55 — 62.

8. **Тулупов В.Д.** Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // Сборник «Электросила». СПб., 2002. Вып. 41.

9. **Тулупов В.Д., Гарбузюк В.С.** Оценка эффективности и возможности массового внедрения энергосберегающих электропоездов постоянного тока // Вестник МЭИ. 2010. № 5. С. 73 — 80.

*Статья поступила в редакцию 08.04.2016*