

ВЛАСЬЕВСКИЙ С.В., СКОРИК В.Г., БУНЯЕВА Е.В., ФОКИН Д.С.
(ГОУ ВПО ДВГУПС, ХАБАРОВСК, РФ)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ В РЕЖИМАХ ТЯГИ И РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Энергосбережение в локомотивном хозяйстве железнодорожного транспорта путем снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов является важнейшим направлением повышения эффективности электрических железных дорог России. Современные электровозы переменного тока серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 и ЭЭС5К с плавным регулированием напряжения на тяговых двигателях содержат четырёх зонные выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), которые имеют невысокий коэффициент мощности как в режиме выпрямителя (тяга электровоза), так и в режиме инвертора (электрическое рекуперативное торможение). Так, в тяге в номинальном режиме работы электровоза коэффициент мощности равен 0,84, а при рекуперативном торможении – 0,74. Такие показатели приводят к повышенному потреблению ими электроэнергии на тягу поездов. Это связано с достаточно большим углом сдвига фаз φ между током и напряжением в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, т.е. с повышенным потреблением реактивной энергии из контактной сети.

В качестве примера на рис. 1 показана упрощенная силовая схема современного электровоза с четырёхзонным ВИП на тиристорах, способным работать как в режиме тяги, так и рекуперативного торможения, а на рис. 2 и 3 показаны процессы работы ВИП на 4-ой зоне регулирования в режимах выпрямителя и инвертора соответственно. В режиме тяги электровоза электрическая машина (ЭМ) постоянного тока работает в качестве тягового двигателя с последовательным возбуждением, а в режиме рекуперативного торможения – генератора с независимым возбуждением. Схемы возбуждения ЭМ на рис. 1 не показаны.

Невысокий коэффициент мощности электровоза в режиме тяги связан с тем, что на современных электровозах в системе управления выпрямителя установлена достаточно большая величина нерегулируемого угла отпирания α_0 тиристорov (9-10 эл. град.), которая вместе с большой величиной (20-30 эл. град.) угла коммутации γ тиристорov при номинальной нагрузке создает большую ве-

личину угла φ . В состав угла коммутации γ входит сумма углов коммутации большого γ' и малого γ'' контуров.

Низкий коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения связан с большой величиной угла φ , который напрямую зависит от угла опережения β и угла коммутации большого γ' контура. В составе угла β находится большой угол запаса δ инвертора и угол коммутации γ , в который входит сумма углов коммутации большого γ' и малого γ'' контуров.

Таким образом, невысокие коэффициенты мощности современных электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения связаны с большой величиной угла сдвига фаз φ , на величину которого в тяге влияют углы α_0 и γ' , а при рекуперации углы δ и γ' . Следовательно, чтобы повысить коэффициенты мощности электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения, необходимо искать пути уменьшения величин этих углов.

Для повышения коэффициентов мощности электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения предлагаются следующие пути, которые разработаны в ДВГУПС на кафедре «Электротехника, электроника и электромеханика» и частично (для режима тяги) были реализованы в практике эксплуатации на электровозе ВЛ80Р № 1513 в локомотивном депо Смолениново Дальневосточной железной дороги:

1. Применение в схеме четырёхзонного ВИП двух диодных плеч VD1 и VD2, присоединённых параллельно цепи выпрямленного тока. Каждое диодное плечо работает избирательно только в одном режиме. Первое диодное плечо VD1 работает в режиме тяги и отключено в режиме рекуперативного торможения. Во время своей работы это диодное плечо присоединено катодом к катодной и анодом к анодной шинам преобразователя. Второе диодное плечо VD2 работает в режиме рекуперативного торможения и отключено в режиме тяги. Во время своей работы это диодное плечо присоединено

наоборот катодом к анодной и анодом к катодной шинам преобразователя;

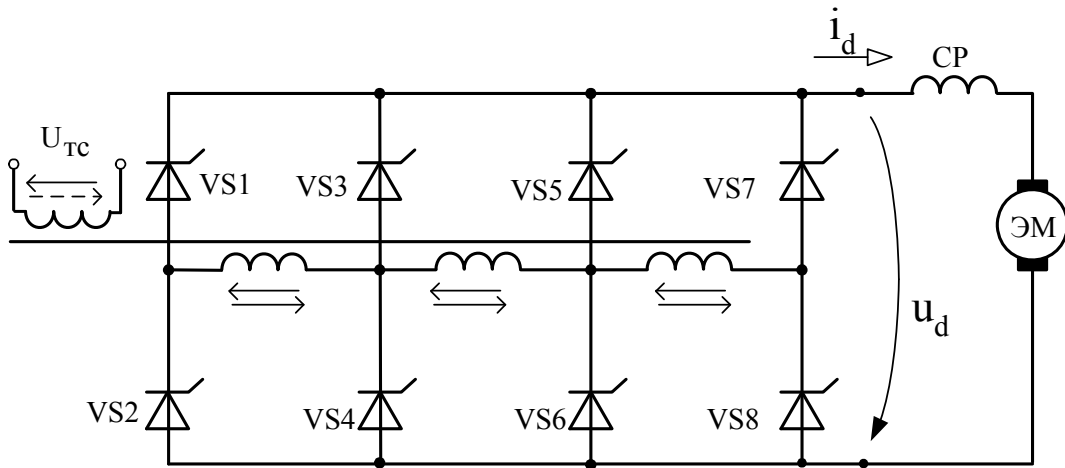


Рис. 1. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока с четырёхзонным ВИП на тиристорах

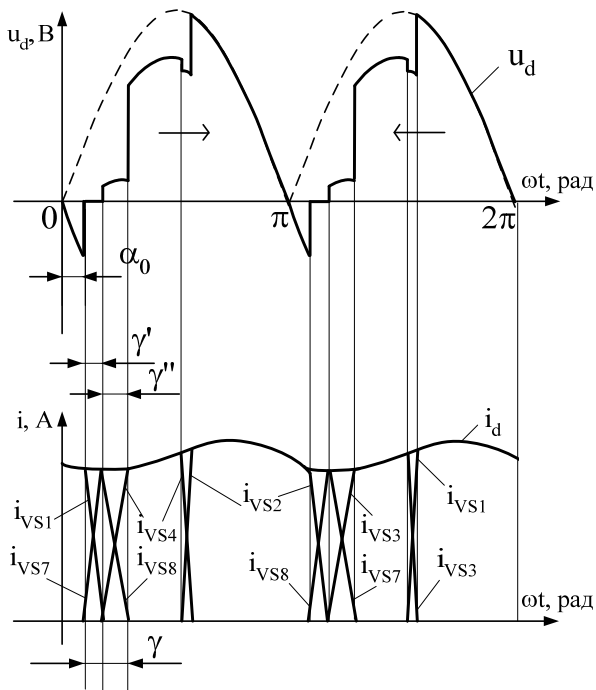


Рис. 2. Процессы работы ВИП в режиме выпрямителя на 4-ой зоне регулирования напряжения

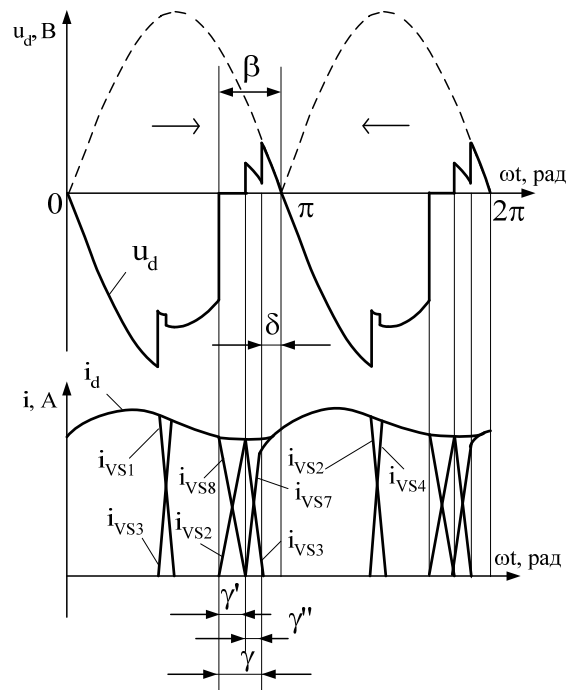


Рис. 3. Процессы работы ВИП в режиме инвертора на 4-ой зоне регулирования напряжения

2. Применение нового алгоритма управления четырёхзонным преобразователем на первой зоне как в режиме выпрямителя, так и инвертора. На рис. 4 показана упрощенная силовая схема современного электровоза с четырёхзонным ВИП на тиристорах и включением двух диодных плеч VD1, VD2 по предложению ДВГУПС, а на рис. 5 и 6 показаны процессы работы такого ВИП на 4-ой зоне регулирования в режимах выпрямителя и инвертора соответственно.

При переходе электровоза из режима тяги в режим рекуперативного торможения отключение первого VD1 и подключение второго диодного плеча VD2 происходит автоматически с помощью нормально замкнутого и разомкнутого силовых контактов тормозного переключателя QT соответственно. При переходе электровоза из режима рекуперативного торможения в режим тяги отключение второго и подключение первого диодного плеча происходит также автоматически с помощью нормально разомкнутого и замкнутого силовых контактов

тормозного переключателя соответственно. В противном случае наличие неправильного включения диодного плеча в соответствующем режиме приведет к возникновению короткоза-

мкнутого контура в силовой схеме преобразователя, который будет препятствовать нормальной работе электровоза.

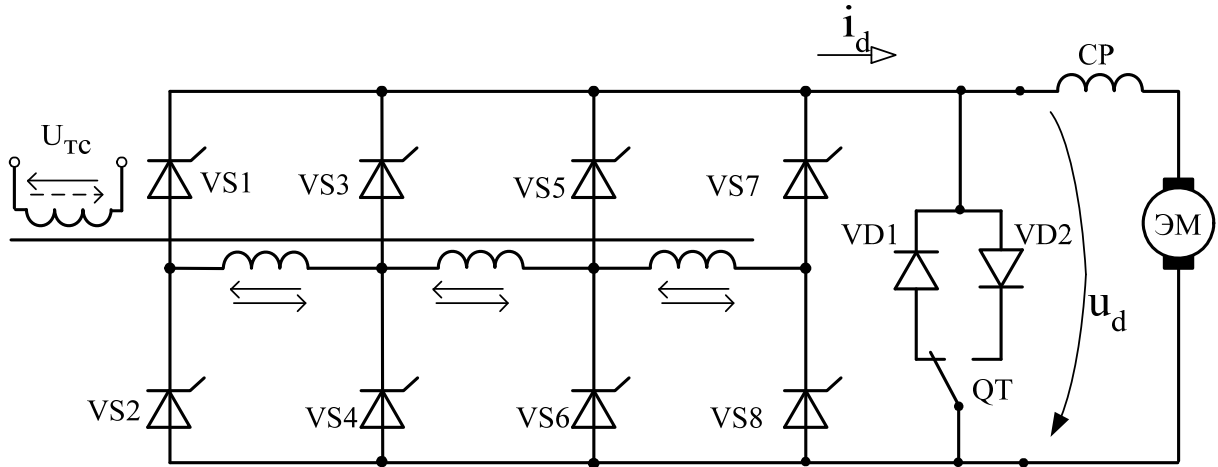


Рис. 4. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока с четырёхзонным ВИП на тиристорах и включением двух диодных плеч VD1 и VD2

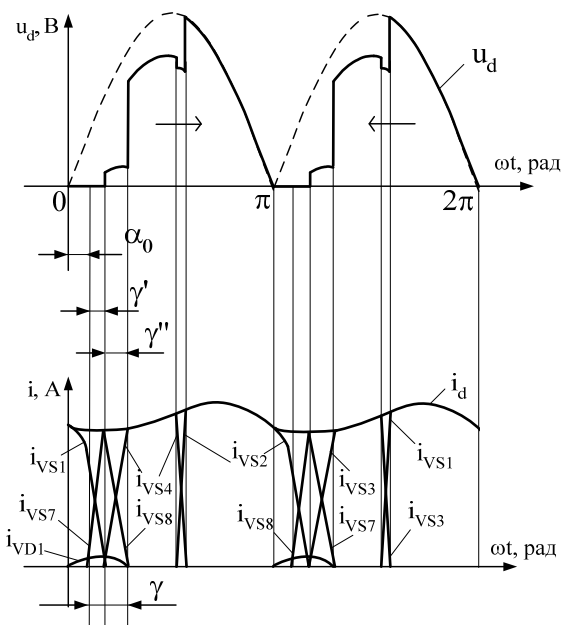


Рис. 5. Процессы работы ВИП в режиме выпрямителя на 4-ой зоне регулирования напряжения с включенным диодным плечом VD1

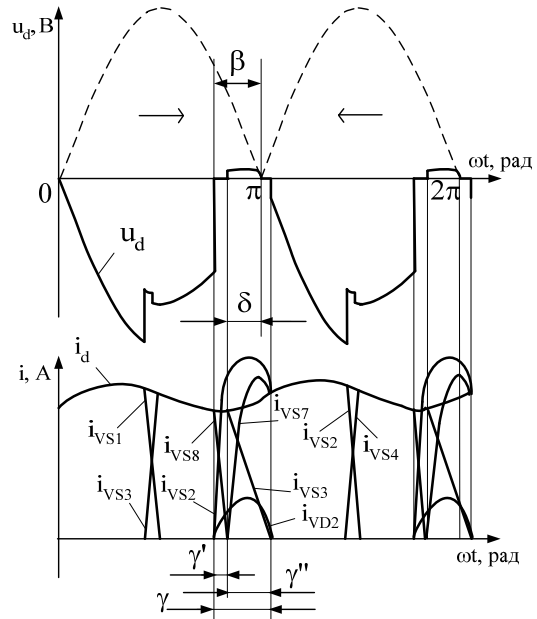


Рис. 6. Процессы работы ВИП в режиме инвертора на 4-ой зоне регулирования напряжения с включенным диодным плечом VD2

Включение первого диодного плеча в схему ВИП в режиме тяги приводит на интервалах нерегулируемого угла отпирания тиристорov α_0 и угла коммутации γ к разряду накопленной энергии в индуктивности цепи выпрямленного тока через диодное плечо в тяговый двигатель, т.е. к её полезному использованию, что вызывает уменьшение угла φ и увеличение выпрямленных значений напряжения и тока тяговых двигателей. При отсутствии диодного плеча эта

энергия через тиристорные плечи ВИП и трансформатор уходит в сеть и увеличивает тем самым реактивную составляющую полной энергии потребления электровозом. Таким образом, за счет снижения потребления реактивной и увеличения активной энергий коэффициент мощности повышается на 4 % и достигает в номинальном режиме работы электровоза величины 0,88, что в конечном итоге, сокращает удельный расход электроэнергии электровоза

на тягу поездов примерно на 5-6 %.

Включение второго диодного плеча в схему ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения позволяет в равных условиях сравнения со схемой ВИП без диодного плеча ускорить процесс коммутации большого контура в инверторе, т.е. уменьшить угол коммутации γ' этих тиристорных плеч. Так, в полупериоде напряжения, обозначенном на рис. 4 стрелкой \rightarrow , большой контур коммутации на 4-ой зоне регулирования образуется открытыми тиристорными плечами VS2, VS8 и тремя секциями вторичной обмотки трансформатора. Ускорение процесса коммутации большого контура происходит потому, что электрическая цепь плеча VS2, вступающего в работу очередного цикла, замыкается в цепи контура нагрузки не через цепь электрической машины (генератор), а накоротко через диодное плечо VD2. Это приводит к тому, что тиристоры плеча VS8 закрываются быстрее и фактический интервал времени для восстановления их запирающей способности (угол запаса δ) увеличивается, т.е. создается дополнительный запас времени по сравнению с минимально необходимым временем выключения тиристоров и таким образом не возникает угрозы возникновения аварийного режима – опрокидывания инвертора. Опрокидывание инвертора возникает тогда, когда после смены полярности напряжения сети в точке π неуспешные восстановить свою запирающую способность плечи VS3 и VS8 вновь отпираются, в результате чего сумма ЭДС секций вторичной обмотки трансформатора и ЭДС генератора создает большой (аварийный) ток инвертора.

Коммутация малого контура (угол γ''), образованного плечами VS3, VS7 и двумя секциями вторичной обмотки трансформатора, протекает во вторую очередь сразу после окончания коммутации большого контура (закрытие плеча VS8 и полное открытие плеча VS2). Поэтому начало закрытия тиристоров плеча VS3 под действием начала открытия плеча VS7 происходит с задержкой на величину угла γ' . Окончание коммутации малого контура, т.е. выключение плеча VS3 может произойти значительно позднее, чем в схеме ВИП без диодного плеча VD2, вплоть до начала следующего полупериода (в точке π) и даже далее. Это происходит потому, что диодное плечо VD2, находясь от момента начала открытия плеча VS2 и до момента времени π под прямым напряжением секций вторичной обмотки трансформатора, образует ток короткого замыкания в инверторе

и тем самым создает между катодной и анодной шинами инвертора прямое падение напряжения диодного плеча (примерно 1 В). В результате на плечи VS2 и VS7 в этом интервале времени прикладывается не сумма напряжений генератора и секций вторичной обмотки трансформатора, а только небольшое напряжение секций вторичной обмотки. Такие сильно заниженные потенциальные условия на тиристорах плеч затягивают время выхода плеча VS7 на полную нагрузку, а следовательно и время выключения VS3. Однако длительность угла γ'' в этом случае уже не влияет на создание режима опрокидывания инвертора, так как плечо VS8 уже закрылось значительно раньше с восстановлением запирающих свойств и не может участвовать в создании контура тока для опрокидывания инвертора. Следовательно, измерять датчиком полную коммутацию инвертора (угол γ) для целей автоматизации нет необходимости, а можно измерять лишь только угол γ' . Это обстоятельство приводит к возможности уменьшения угла запаса δ с величины 25-30 эл. град. на современных электровозах до 10-12 эл. град. и поддержания системой управления этой величины путем автоматического регулирования угла β в зависимости от длительности угла γ' . В результате, значительно уменьшается угол ϕ и повышается выпрямленное значение напряжения инвертора, что увеличивает передаваемую в сеть электроэнергию генератора примерно до 15 % и повышает коэффициент мощности инвертора на 10% с достижением его величины в номинальном режиме работы электровоза до уровня 0,84, т.е. близком к режиму тяги.

Новый алгоритм управления на 1-ой зоне в режиме тяги обеспечивает в каждом полупериоде напряжения подачу на два вентиля только импульсов управления с регулируемым углом отпираания α . В результате, процесс разряда на-копленной энергии в индуктивности цепи выпрямленного тока происходит не в сеть, а через диодное плечо в нагрузку с полезным её использованием.

Новый алгоритм управления на 1-ой зоне в режиме рекуперативного торможения обеспечивает в каждом полупериоде напряжения подачу на один вентиль импульсов управления с регулируемым углом отпираания α , а на другой – импульсов управления с углом опережения β . В этом случае вместо режима противовключения, когда инвертор переходит в режим выпрямителя для обеспечения более значительных токов генератора за счет увеличения выпрямленного напряжения, будет сохраняться режим

рекуперации электрической энергии до самых малых уровней скорости движения и тем самым увеличится энергетическая, а следовательно, и экономическая эффективность рекуперации.

Выводы

Применение диодных плеч VD1, VD2 и нового алгоритма управления ВИП на 1-ой зоне в режимах тяги и рекуперативного торможения позволяет значительно повысить коэффициент мощности электровоза в тяге на 4%, а при рекуперативном торможении на 10 %. Такое повышение коэффициентов мощности электровоза сокращает удельный расход электроэнергии электровоза в режиме тяги поездов примерно на 5-6 % и увеличивает возврат электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении до 15% по сравнению с существующими электровозами. С учетом возврата электроэнергии электровоза при рекуперации его удельный расход электроэнергии будет еще больше сокращаться.

Если внедрить представленные в статье технические решения на такие современные элект-

ровозы, как ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К и 3ЭС5К, которые участвуют в перевозках грузовых поездов весом до 6000 т на перевалистых и горных профилях пути участков железных дорог в Сибири и на Дальнем Востоке, то их технико-экономическая эффективность значительно повысится. Это будет реальным вкладом в реализацию программы ОАО «РЖД» по снижению эксплуатационных расходов и экономии топливно-энергетических ресурсов путем разработки новых и совершенствования существующих конструкций и технологий, а также роста надежности их работы.

Ключевые слова: переменный ток, электровоз, тяга, рекуперация, эффективность, регулирование напряжения.

Ключові слова: змінний струм, електровоз, тяга, рекуперация, ефективність, регулювання напруги.

Keywords: AC, electric locomotive, traction, recuperation, voltage regulating.