

Силовые полупроводниковые преобразователи на электровозах переменного тока в России

С.В. ВЛАСЬЕВСКИЙ¹

Резюме

Доклад содержит сведения о силовых полупроводниковых преобразователях, которые были применены на электровозах переменного тока некоторых стран Европы и России начиная с начала 70-х годов 20 века. Рассмотрены принципы построения силовых схем преобразователей, используемых в режимах тяги и электрического (реостатного и рекуперативного) торможения электровозов. Показаны процессы работы преобразователей в режимах выпрямителя и зависимого инвертора согласно их алгоритмов управления. Раскрыты пути повышения коэффициента мощности современных выпрямительно-инверторных преобразователей. Рассмотрены примеры возникновения аварийных процессов в преобразователях при различных алгоритмах их управления и их влияние на работоспособность электровоза.

С начала 60-х годов 20 века в России началась электрификация железных дорог на переменном однофазном токе частотой 50 Гц, которая продолжалась более 40 лет. Полигон электрифицированных железных дорог на переменном токе охватил часть Юго-Восточной и Северо-Кавказской железных дорог европейской части России, а также Восточную Сибирь, Забайкалье и Дальний Восток России (от станции Мариинск Красноярской железной дороги до станции Владивосток и Находка Дальневосточной железной дороги) общей протяженностью около 7000 км. Сибирский и Дальневосточный полигоны железных дорог имеют в основном сложный перевалистый профиль пути с большим количеством кривых, подъемов и спусков, так как на этой территории России имеется большое количество горных хребтов и рек.

Для осуществления грузовых и пассажирских перевозок на этих полигонах железных дорог в России были построены и продолжают строиться электровозы переменного тока. В период 1960–1980 гг. были построены электровозы серий ВЛ60К, ВЛ60КП, ВЛ60Р, ВЛ80К, ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80Р. В период 1980–2000 гг. были построены электровозы ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М. Начиная с 2000 года, и по настоящее время строятся электровозы 2ЭС5К и 3ЭС5К [1, 2].

¹ Д.т.н., профессор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Россия.

На всех этих электровозах для выпрямления однофазного переменного тока применяются силовые полупроводниковые преобразователи-выпрямители. Кроме того, на большинстве электровозов применяется электрическое торможение – реостатное или рекуперативное. Без электрического торможения выпускались только первые серии электровозов ВЛ60К, ВЛ60КП, ВЛ80К. Электрическое торможение появилось на электровозах не случайно. При вождении грузовых поездов по спускам достаточно большой крутизны и длины электровозам приходится часто применять пневматическое торможение с помощью прижатия чугунных колодок к поверхности катания колес вагонов и электровозов, что сопровождается большим нагревом и износом колодок и колесных пар при их совместном трении друг о друга. Поэтому для устранения этого недостатка электровозы стали оснащать системой электрического торможения. Электровозы серий ВЛ80Т и ВЛ80С были оснащены электрическим реостатным торможением, а все остальные электровозы – электрическим рекуперативным торможением. Надо сразу отметить, что рекуперативное торможение имеет ряд преимуществ перед реостатным, поэтому все современные электровозы, начиная с ВЛ80Р имеют рекуперативное торможение.

Электрическое торможение стало возможным на электровозах благодаря свойству обратимости электрической машины постоянного тока. В режиме тяги, когда электровоз потребляет электрическую энергию, электрическая машина работает двигателем последовательного возбуждения и преобразует электрическую энергию в механическую, расходуемую на движение поезда по участку железной дороги, в том числе и на преодоление его подъемов и кривых. Когда же электровоз с поездом оказывается на спуске, то электрическая машина работает генератором с независимым возбуждением и преобразует механическую энергию движения поезда на спуске в электрическую энергию, которую можно отправить через преобразователь обратно в сеть, или погасить на реостатах (сопротивлениях) внутри электровоза. При тяге и электрическом торможении электровоза силовой полупроводниковый преобразователь также как и электрическая машина имеет свойство обратимости – в тяге он работает выпрямителем, а при электрическом торможении – зависимым инвертором или иначе инвертором ведомым сетью. Такие возможности электрической машины и полупроводникового преобразователя позволили добиться электровозу переменного тока высокой тягово-энергетической эффективности его работы, которая выразилась в снижении одного из главных показателей эксплуатационной работы электровоза – удельного расхода электрической энергии на тягу поезда.

В настоящее время все электровозы переменного тока оснащены силовыми выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), построенными на основе управляемых вентилей-тиристоров, которые позволяют

осуществить плавное регулирование напряжения тяговых двигателей (ТД). Так как мощность тягового электрического двигателя достигает более 800 кВт на одну ось колесной пары, а ВИП питает 2 или 3 двигателя, то его приходится выполнять на тиристорах большой мощности, у которых ток достигает 1000 А и напряжение до 3000 В, и более. И, несмотря на это, чтобы передать достаточно большую мощность (до 4000 кВт) от трансформатора к двигателям плечи ВИП приходится строить по групповому принципу – последовательно параллельному соединению тиристоров между собой. Отсюда ВИП имеет достаточно большие массо-габаритные показатели на электровозе.

Рассмотрим некоторые схемные решения ВИП.

На электровозах переменного тока многих стран Европы (Австрия, Швейцария, Франция, Германия, Швеция, Финляндия и другие) и Азии (Япония, Индия, Китай и другие) чаще всего применяются силовые полупроводниковые преобразователи, работающие только в режиме выпрямления (выпрямители) [3–8]. На этих электровозах не применяется рекуперативное торможение, а, следовательно, и нет необходимости иметь в преобразователе инверторный режим. Вместо рекуперативного торможения на этих электровозах применяют реостатное торможение. Отсюда и схемы силовых преобразователей зарубежных электровозов отличаются от схем российских электровозов.

В выпрямительных преобразователях электровозов без рекуперативного торможения применяют последовательное соединение двух и трех полууправляемых мостов, построенных на силовых диодах и тиристорах, и имеющих продольные диодные и тиристорные плечи. Упрощенная силовая схема электровоза с таким преобразователем показана на рисунке 1.

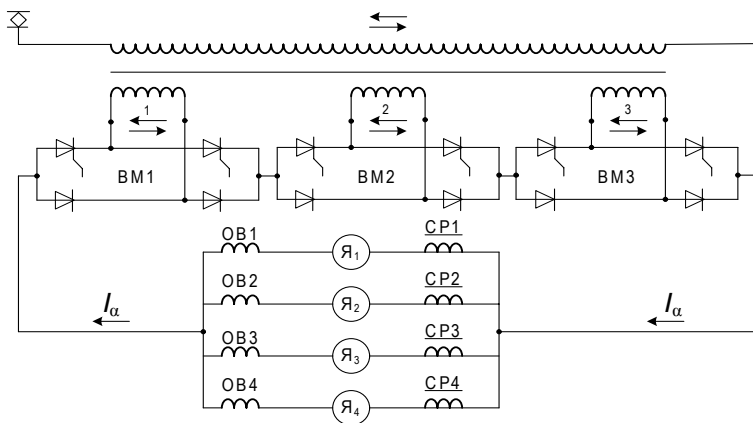


Рис. 1. Силовая схема электровоза с последовательным соединением трех полууправляемых мостов, построенных на силовых диодах и тиристорах, и имеющих продольные диодные и тиристорные плечи

На таких электровозах имеются и некоторые другие схемы последовательного соединения выпрямительных мостов, когда к первому простому мосту присоединяют последовательно второй и даже третий секционированные мосты, имеющие две или три секции. На рисунках 2а и 2б представлены такие схемы.

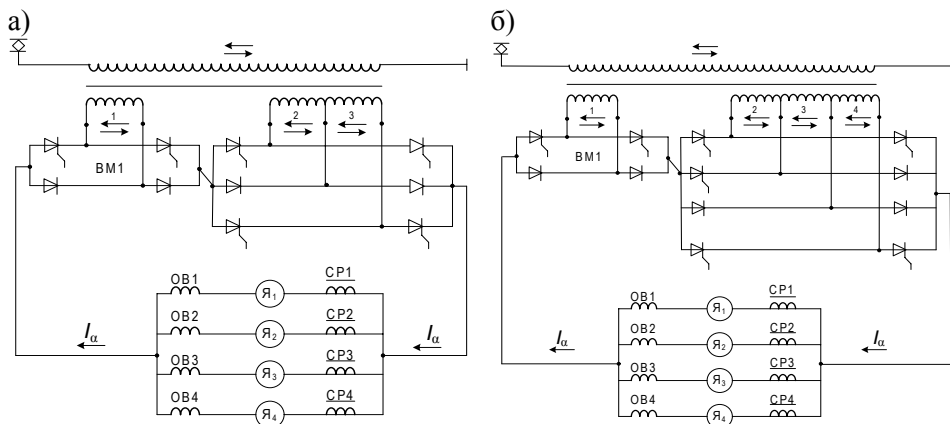


Рис. 2. Силовые схемы электровозов с последовательным соединением выпрямительных мостов, когда к первому простому мосту присоединяют последовательно второй секционированный мост, имеющий две: (а) и три (б) секции

Все эти схемы выпрямительных преобразователей позволяют получить от двух до восьми зон регулирования напряжения. Однако сегодня во всех странах получили распространение схемы с числом зон от двух до четырех, так как при большем количестве зон (6 и 8) усложняется схема преобразователя и система его управления.

В схеме выпрямителя с последовательным соединением полупроводящих мостов выпрямленное напряжение начинает постепенно повышаться от нуля до какого-то значения (1-я зона регулирования) благодаря фазовому регулированию напряжения первого из мостов, а в остальных мостах в это время ток протекает через неуправляемые вентили-диоды, напряжение на которых равно нулю. Далее, после полного открытия тиристоров первого моста (конец 1-й зоны) начинается открытие тиристоров второго моста и его напряжение суммируется с первым мостом (2-я зона регулирования) и так далее.

В схемах последовательного соединения мостов с разным выпрямленным напряжением, в том числе и в схемах с секционированными мостами можно получить большее количество зон (от 3-х до 8-и). Однако схемы

с последовательным соединением мостов, несмотря на пониженную величину напряжения каждого моста, обладают существенными недостатками: большое количество плеч, большое количество выводов изолированных секций вторичной обмотки тягового трансформатора. Всё это усложняет схему, увеличивает массу и габариты преобразователя. Кроме того, такие схемы неприемлемы для выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов с рекуперативным торможением.

Для электровозов с рекуперативным торможением наиболее подходят схемы с параллельным соединением тиристорных мостов, присоединенных к промежуточным выводам неизолированных секций вторичной обмотки тягового трансформатора. Иногда эти схемы, реализующие зонно-фазовое регулирование напряжения на тяговых двигателях, называют схемами секционированного моста. Здесь регулирование напряжения осуществляется с помощью дополнительных плеч, соединенных с промежуточными выводами неизолированных секций вторичной обмотки трансформатора. Так в начале на 1-й зоне регулирование осуществляется с помощью плеч 1-4, а на 2-й зоне открываются дополнительные плечи 5 и 6, открытие которых регулируется углом отпирания α_p . В результате схема такого преобразователя реализует двухзонное регулирование выпрямленного напряжения на тяговых двигателях. На рисунке 3 представлена упрощенная силовая схема электровоза с двухзонным регулированием напряжения на основе применения параллельного соединения двух тиристорных мостов, присоединенных к промежуточным выводам неизолированных секций вторичной обмотки тягового трансформатора.

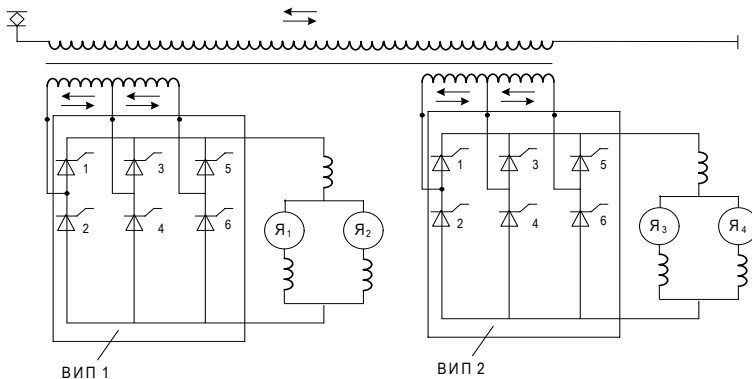


Рис. 3. Упрощенная силовая схема электровоза с параллельным соединением двух тиристорных мостов, присоединенных к промежуточным выводам неизолированных секций вторичной обмотки тягового трансформатора (двухзонное регулирование напряжения)

Если требуется увеличить число зон, необходимо применить большее количество дополнительных плеч и промежуточных выводов секций вторичной обмотки трансформатора. Кроме того применение разновеликих по напряжению неизолированных секций вторичной обмотки трансформатора в секционированных мостах позволяет также еще больше увеличить число зон регулирования при равном общем количестве плеч в преобразователе, что является достоинством этих схем. В таких схемах группа секций, состоящая, например из двух малых секций, замещается одной секцией, напряжение которой равно суммарному напряжению двух малых секций. Такое замещение секций получило название «синхронный переход». Малые секции, выведенные из работы на данной зоне, далее используются в последующих выше стоящих зонах. Так, в России на всех современных электровозах переменного тока серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К и 3ЭС5К используется подобная схема из 8-ми плеч, которые присоединены к трем неизолированным секциям, с использованием синхронного перехода со 2-й на 3-ю зону и обратно. На рисунке 4 представлена упрощенная схема такого электровоза.

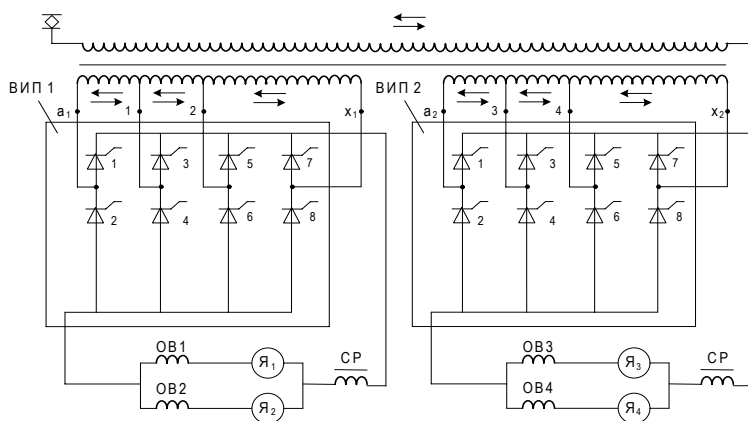


Рис. 4. Упрощенная силовая схема электровоза с параллельным соединением трех тиристорных мостов, присоединенных к промежуточным выводам неизолированных секций вторичной обмотки тягового трансформатора

Такой ВИП обеспечивает четырехзонное плавное регулирование выпрямленного напряжения с использованием трех секций вторичной обмотки трансформатора, из которых две малые секции а1-1 и 1-2 имеют равное напряжение $U = 300$ В, а третья большая секция 2-Х1 имеет напряжение в 2 раза большее против одной малой секции $2U = 600$ В. При переходе со второй на третью зону алгоритм управления тиристорами плеч ВИП предусматривает перевод нагрузки с двух малых секций а1-1, 1-2 и плеч 1, 2, 5, 6 на третью

большую секцию 2-Х1 и плечи 5, 6, 7, 8, т.е. осуществляется «синхронный переход», при котором две секции а1-1 и 1-2 замещаются одной секцией 2-Х1 без нарушения величины выпрямленного напряжения и непрерывности переменного тока. Переход с третьей на вторую зону осуществляется в обратном порядке.

В таблице 1 на примере электровоза ВЛ80Р приведен алгоритм управления плечами ВИП в режиме тяги и рекуперативного торможения, а на рисунках 5 и 6 показаны диаграммы выпрямленного напряжения и тока плеч ВИП по зонам регулирования в режимах выпрямителя (рис. 5 – тяга электровоза) и инвертора (рис. 6 – рекуперативное торможение электровоза).

Таблица 1

Алгоритм управления плечами ВИП по зонам регулирования в режимах выпрямителя и инвертора

Режим работы	Зона регулирования	Полупериод напряжения	Плечи ВИП							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Тяга	1	←			α_0			α_p		
		→				α_0	α_0, α_p			
	2	←	α_p		α_0			α_0		
		→		α_p		α_0	α_0			
	3	←			α_p		α_0			α_0
		→				α_p		α_0	α_0	
	4	←	α_p		α_0					α_0
		→		α_p		α_0			α_0	
Рекуперация	1	←			β_p			β_p		
		→				β_p	β_p			
	2	←	β			β_p		β		
		→		β	β_p		β			
	3	←			β			β_p		β
		→				β	β_p		β	
	4	←	β			β_p				β
		→		β	β_p				β	

Анализ силовых схем выпрямительных преобразователей различных электровозов в части применения рационального количества зон регулирования показал, что наиболее подходящей является схема четырехзонного преобразователя, в которой сочетаются удовлетворительные энергетические показатели (коэффициенты мощности и полезного действия) при достаточно небольшой сложности построения его силовой схемы. Это и послужило основанием к тому, что на российских электровозах закрепилась схема ВИП с четырехзонным регулированием, у которых коэффициенты мощности

и полезного действия в расчетном (номинальном) режиме работы достигают величины 0,84.

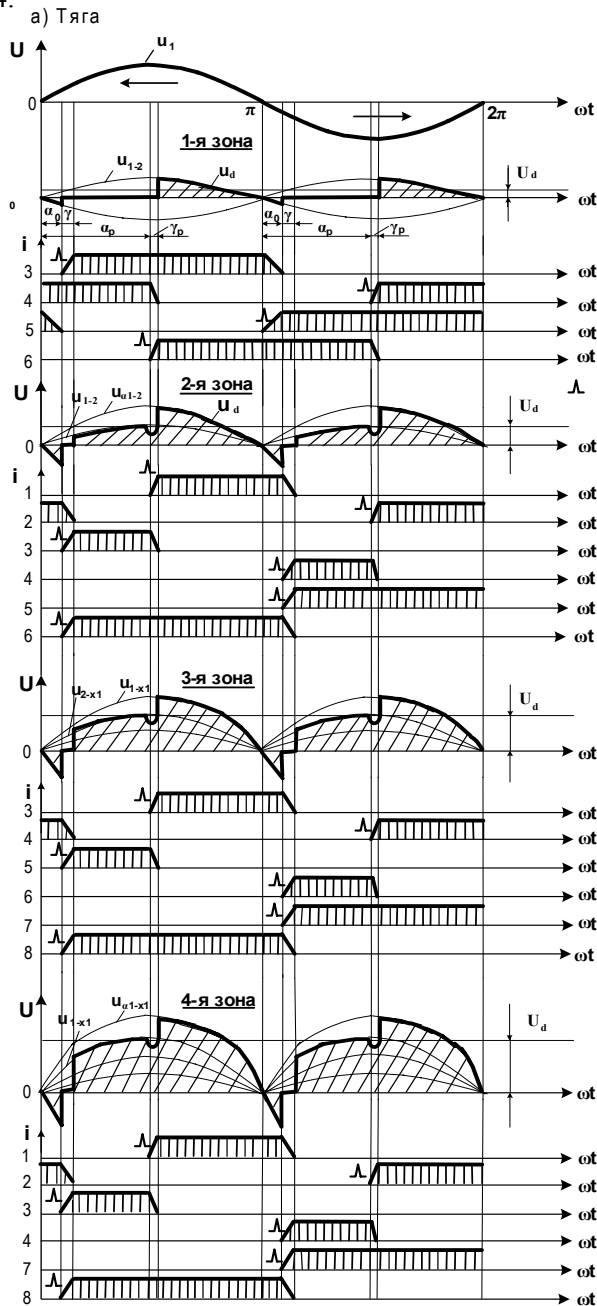


Рис. 5. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока плеч ВПТ по зонам регулирования в режимах выпрямителя (тяга электровоза)

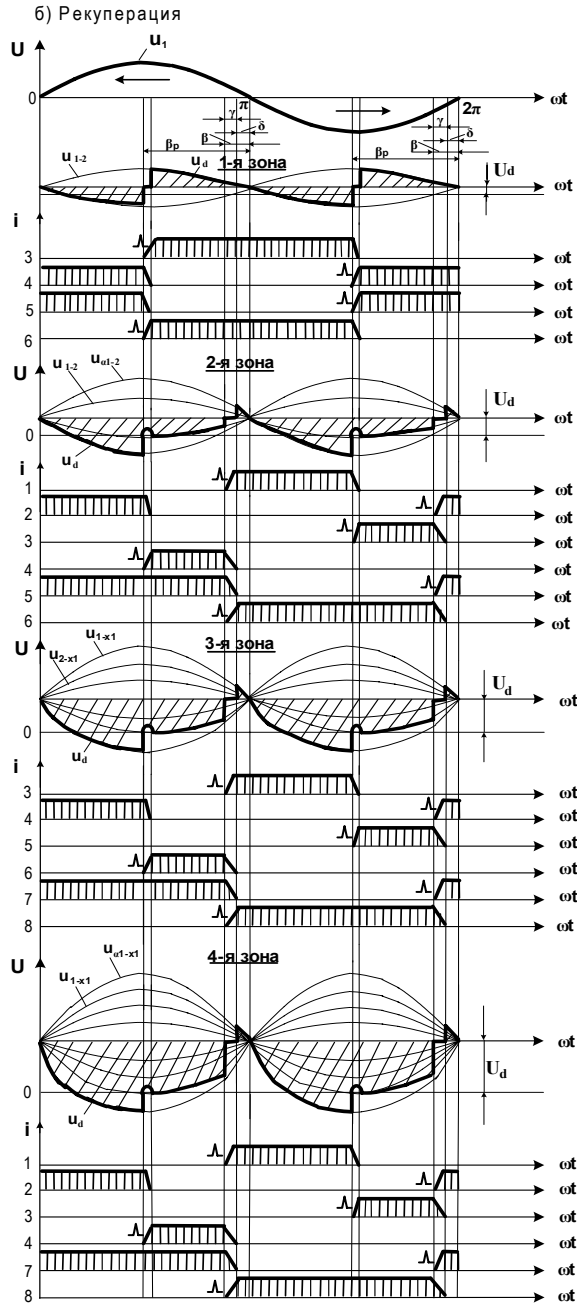


Рис. 6. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока плеч ВИП по зонам регулирования в режиме инвертора (рекуперативное торможение электровоза)

В настоящее время в локомотивном хозяйстве электрифицированных железных дорог России ставится задача – повышение коэффициента мощности электровозов на базе выпрямительно-инверторных преобразователей и повышение эффективности использования электроэнергии на тягу поездов электровозами переменного тока с рекуперативным торможением.

Отечественные электровозы переменного тока серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К и 3ЭС5К имеют невысокий коэффициент мощности как в режиме выпрямителя (тяга электровоза), так и в режиме инвертора (электрическое рекуперативное торможение). Так, в тяге в эксплуатационном режиме работы электровоза на всех зонах регулирования коэффициент мощности не превышает величины 0,7–0,8, а при рекуперативном торможении 0,6–0,7. 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 связи с этим перед специалистами стоит задача поиска путей повышения коэффициента мощности данных электровозов. 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 тиристоров (9–10 эл. град.), которая вместе с большой величиной (20–30 эл. град.) угла коммутации γ тиристоров при номинальной нагрузке создает большую величину угла сдвига фаз φ . В состав угла коммутации γ входит сумма углов коммутации большого γ' и малого γ'' контуров. Уменьшить угол α_0 ниже установленного не предоставляется возможным из-за недостаточных потенциальных условий вначале полупериода напряжения сети, которые возникают вследствие искажений кривой напряжения сети от коммутации выпрямителей тяговых электровозов.

Низкий коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения связан с большой величиной угла опережения β инвертора, который напрямую создает и большую величину угла сдвига фаз φ . В составе угла β находится большой угол запаса δ инвертора (на современных электровозах $\delta = 25$ –30 эл. град.) и угол коммутации γ , в который входит сумма углов коммутации большого γ' и малого γ'' контуров. Уменьшение угла запаса δ ниже установленного может вызвать опрокидывание инвертора в переходных процессах вследствие малого запаса времени восстановления запирающей способности силовых вентилях.

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.

Прежде чем показать пути повышения коэффициента мощности современных электровозов, необходимо вскрыть причины появления его низких значений в режимах тяги и рекуперативного торможения.

В качестве примера на рисунке 7 показана упрощенная силовая схема современного электровоза с четырёхзонным ВИП на тиристорах, способным работать как в режиме тяги, так и рекуперативного торможения, а на рисунках 8 и 9 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 рисунке 7 не показаны.

Для повышения коэффициентов мощности электровозов в режимах тяги и рекуперативного торможения предлагаются следующие пути, которые были разработаны в Дальневосточном государственном университете путей сообщения (ДВГУПС) и Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) [9–17]:

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.
2. Применение новых алгоритмов управления четырёхзонным преобразователем на первой и последующих 2, 3, 4-й зонах как в режиме выпрямителя, так и инвертора.

На рисунке 10 показана упрощенная силовая схема современного электровоза с четырёх зонным ВИП на тиристорах и включением двух диодных плеч VD1, VD2 по предложению ДВГУПС, а на рисунках 11 и 12 показаны процессы работы такого ВИП на 4-ой зоне регулирования в режимах выпрямителя и инвертора соответственно.

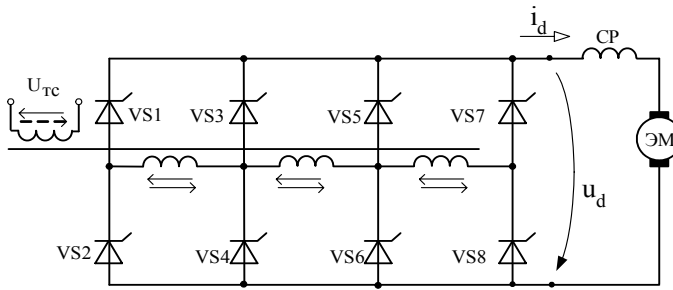


Рис. 7. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока с четырёхзонным ВИП на тиристорах

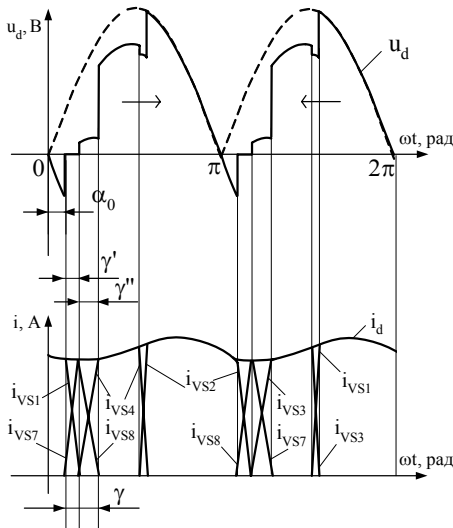


Рис. 8. Процессы работы ВИП в режиме выпрямителя на 4-ой зоне регулирования напряжения

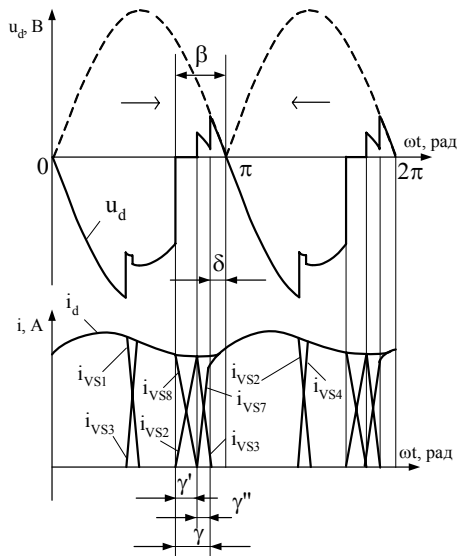


Рис. 9. Процессы работы ВИП в режиме инвертора на 4-ой зоне регулирования напряжения

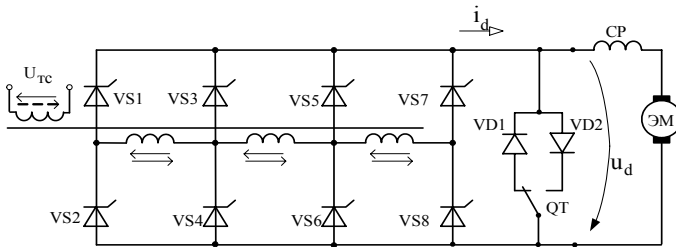


Рис. 10. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока с четырёхзонным ВИП на тиристорах и включением двух диодных плеч VD1 и VD2

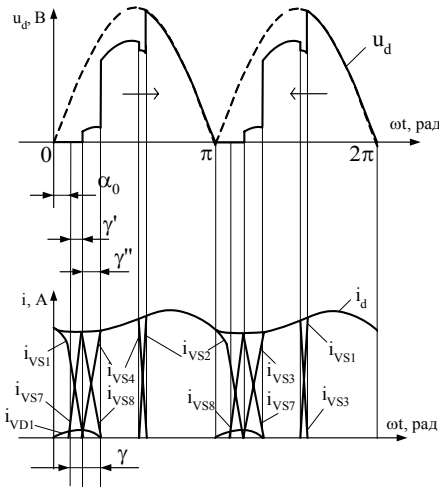


Рис. 11. Процессы работы ВИП в режиме выпрямителя на 4-ой зоне регулирования напряжения с включенным диодным плечом VD1

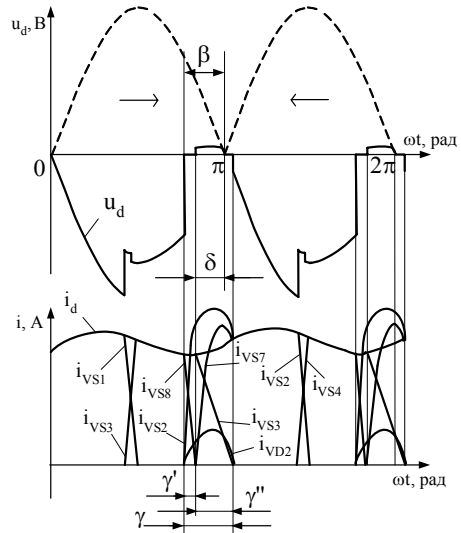


Рис. 12. Процессы работы ВИП в режиме инвертора на 4-ой зоне регулирования напряжения с включенным диодным плечом VD2

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

Включение первого диодного плеча VD1 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

щую полной энергии потребления электровозом. Таким образом, за счет снижения потребления реактивной и увеличения активной энергий коэффициент мощности электровоза 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 VD2 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' тиристорных плеч этого контура. Так, в полупериоде напряжения, обозначенном на рисунке 10 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 отношению к минимально необходимому времени 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 не успевшие 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-й зоне регулирования в режиме тяги обеспечивает в каждом полупериоде напряжения подачу на два вентиля только импульсов управления с регулируемым углом отпирания α_p . В результате, процесс разряда накопленной энергии в индуктивности цепи выпрямленного тока происходит не в сеть, а через диодное плечо VD1 в нагрузку с полезным её использованием. Новый алгоритм управления на 2, 3 и 4-й зонах регулирования в режиме тяги обеспечивает дополнительную одновременную подачу импульсов управления на плечи, которые создают малые контура коммутации, разбивая большой контур коммутации на два малых. Например, на 4-й зоне в полупериод напряжения, обозначенном на рис. 10 и 12 стрелкой \leftarrow , одновременно подаются импульсы управления с фазой α_0 не только на тиристоры плеч VS3, VS8, но и на тиристоры плеч VS5, VS6, а в полупериод \rightarrow на тиристоры плеч VS4, VS7 и дополнительно на VS6, VS5. Этим достигается снижение эквивалентного индуктивного сопротивления в цепи переменного тока электровоза, которое приводит к уменьшению длительности коммутации γ' , а значит к снижению угла сдвига фаз ϕ , что приводит к повышению коэффициента мощности электровоза.

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 отпирания β_p , 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.

Новый алгоритм управления на 2, 3 и 4-й зонах регулирования в режиме рекуперативного торможения в каждом полупериоде напряжения обеспечивает вначале дополнительную подачу импульсов управления с фазой β на тиристоры одного плеча, не участвующего в коммутации при образовании зоны в типовом алгоритме управления, а затем с задержкой на величину угла коммутации γ' относительно импульсов с фазой β подают импульсы управления с фазой β_3 на тиристоры двух плеч, участвующих в коммутации при образовании зоны в типовом алгоритме управления.

Например, на 4-й зоне регулирования в полупериод питающего напряжения, обозначенный на рисунке 10 и 12 стрелкой \leftarrow , после фазовой коммутации ток инвертора протекал через плечи VS4 и VS7. В момент β подаются импульсы на тиристоры плеча VS5. Тем самым образуется короткозамкнутый контур через секцию трансформатора 2-х₁ и тиристоры плеч VS5 и VS7. В тоже время за счет секции 1-2 инвертор продолжает работать в режиме проводимости. После окончания коммутации в контуре VS5-VS7 (после закрытия тиристора VS7) подаются импульсы управления на тиристоры плеч VS1 и VS8. В результате этого образуется два короткозамкнутых контура, один из которых состоит из секций трансформатора а-1, 1-2 и тиристоров плеч VS1, VS5, а второй – из секций 1-2, 2-х₁ и тиристоров плеч VS4, VS8. Под действием ЭДС двух секций вторичной обмотки трансформатора коммутация в контуре VS1, VS5 заканчивается раньше, переводя в режим проводимости секцию трансформатора а-1. После закрытия плеча VS4 сетевая коммутация заканчивается.

Особенность данного алгоритма заключается в том, что при создании контура VS5-VS7 инвертор продолжает проводить ток через плечи VS4 и VS5, т.е. в момент начала коммутации не происходит полного закорачивания секций вторичной обмотки трансформатора. В результате этого в кривой выпрямленного напряжения добавляется дополнительный положительный участок соответствующий этому времени. При подаче импульсов на плечи VS1 и VS8 закорачиваются все секции, что соответствует нулевому значению напряжения на инверторе. После закрытия VS5 в кривой выпрямленного напряжения появляется отрицательная область соответствующая напряжению на секции а-1. После окончания сетевой коммутации выпрямленное напряжение равно суммарному напряжению всех секций, участво-

вавших в коммутации. Такой порядок организации коммутации сглаживает кривую выпрямленного напряжения и соответственно кривую первичного напряжения, что в свою очередь уменьшает амплитуду свободных колебаний. На рисунке 13 представлена кривая выпрямленного напряжения при новом алгоритме управления с применением диодного плеча VD2.

Кроме этого разнесение во времени одновременного участия в двух контурах коммутации секции 2-х1 позволяет избежать появления отрицательного напряжения на этой секции, возникающего за счет ЭДС самоиндукции от коммутационных токов. Это позволяет использовать в течение коммутационного интервала времени участок соответствующий времени коммутации в добавочном контуре под проводимость, увеличивая тем самым возврат полезной энергии в тяговую сеть. Благодаря этим двум особенностям происходит увеличение среднего значения выпрямленного напряжения инвертора U_d (см. рис. 13) и тем самым повышается коэффициент мощности электровоза и эффективность рекуперативного торможения.

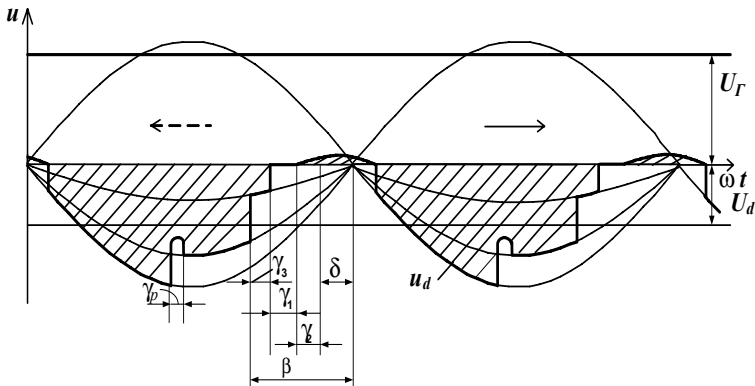


Рис. 13. Кривая выпрямленного напряжения при новом алгоритме управления с применением диодного плеча VD2

Рост коэффициента мощности электровоза объясняется тем, что в предлагаемом способе за счет изменения организации коммутации тиристорных плеч инвертора кривая мгновенной мощности на участке активной составляющей увеличивается на величину участка, соответствующего коммутации в контуре VS5-VS7, а на участке реактивной составляющей – уменьшается на величину этого же участка.

Помимо увеличения коэффициентов мощности электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, предлагаемые технические решения значительно уменьшают амплитуду коммутационных и послекоммутационных высокочастотных свободных колебаний в кривой напряжения контактной

сети, измеренной в месте токоприёма нагрузки электровоза (на токоприемнике). Это обстоятельство уменьшает коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети, что повышает качество электроэнергии в контактной сети и выполнение электромагнитной совместимости работы электровоза с другими потребителями электроэнергии тяговой системы электроснабжения. Так, при работе электровоза в номинальном режиме на середине фидерной зоны питания от тяговой подстанции, предлагаемые технические решения уменьшают коэффициент искажения синусоидальности напряжения сети на 30%.

Анализ электромагнитных процессов работы электровоза в режиме тяги показывает, что применение диодного плеча в схеме ВИП и нового алгоритма его управления позволяет уменьшить пульсации выпрямленного тока тяговых двигателей на 20%, что улучшает коммутационные свойства двигателя (уменьшает искрение под сбегаящим краем щетки на коллекторе), снижая тем самым вероятность выхода из строя двигателя по причине плохой коммутации в его коллекторно-щеточном узле.

Рассмотрим влияние новых технических решений на работоспособность электровоза и его процессы в случае возникновения аварийных процессов в режиме тяги электровоза по причине отказа работы любого плеча ВИП (пропуск в подаче импульсов управления на открытие тиристоров плеча, обрыв проводимости тиристоров плеча и другие причины).

При возникновении аварийных процессов в ВИП в режиме тяги электровоза применение диодного плеча VD1 и нового алгоритма управления ВИП создают возможность работы электровоза без бросков тока тяговых двигателей, а следовательно и без срабатывания токовой защиты электровоза. В этом случае наблюдается лишь небольшое снижение величины и пульсаций тока двигателя. Такая возможность сохраняет высокую живучесть электровоза на участке железной дороги и позволяет машинисту довести поезд до станции назначения без срыва графика движения.

В качестве примера на рисунках 14 и 15 представлены диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на плечо VS5 при типовом алгоритме (рис. 14) и новом алгоритме (рис. 15) управления с включением в схему ВИП диодного плеча VD1 соответственно.

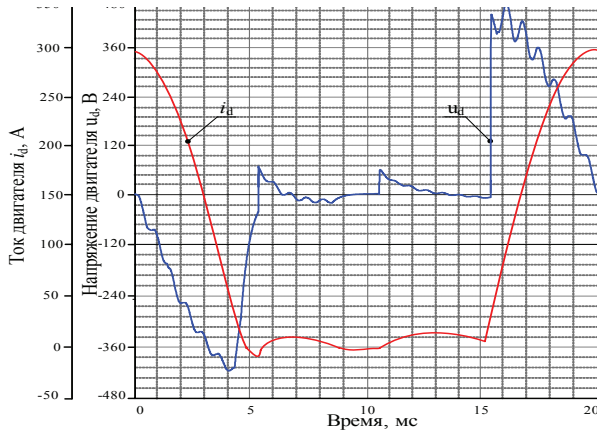


Рис. 14. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на плечо VS5 при типовом алгоритме управления

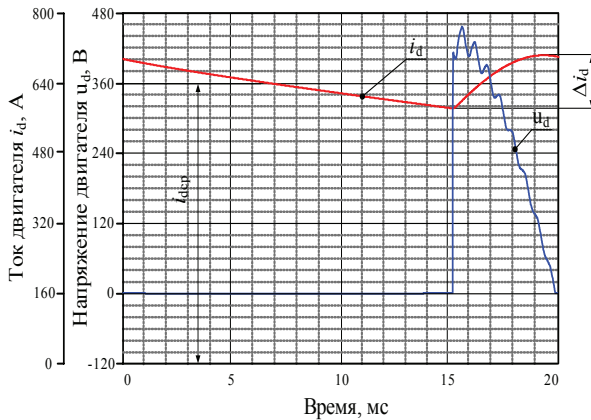


Рис. 15. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на плечо VS5 при новом алгоритме управления и включении диодного плеча VD1

В качестве примера на рисунках 16 и 17 представлены диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 4-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на плечо VS8 при типовом алгоритме (рис. 16) и новом алгоритме (рис. 17) управления с включением в схему ВИП диодного плеча VD1 соответственно.

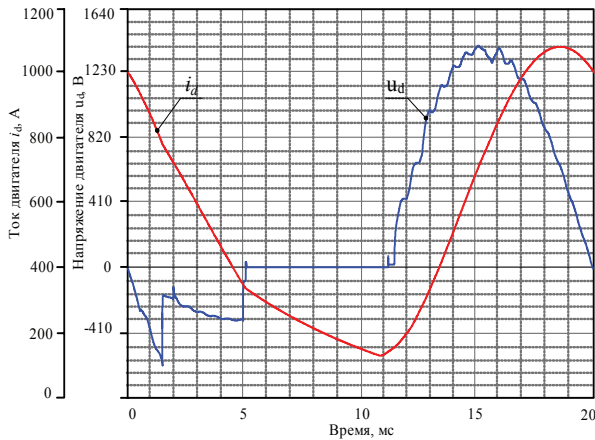


Рис. 16. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 4-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на VS8 при типовом алгоритме управления

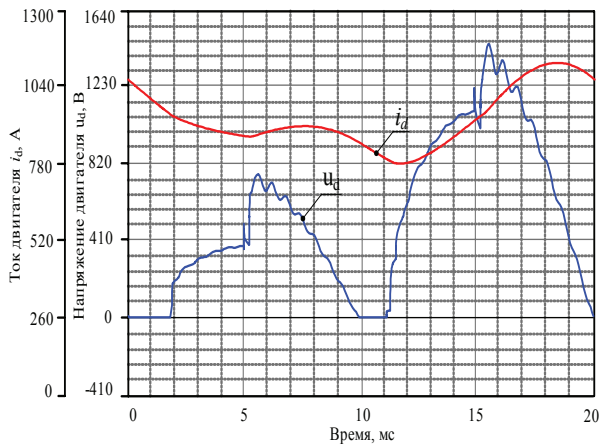


Рис. 17. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 4-й зоне регулирования при аварийном процессе ВИП в режиме выпрямителя в виде пропуска импульсов управления на плечо VS8 при новом алгоритме управления и включении диодного плеча VD1

Сравнение аварийных процессов работы электровоза с типовым и новым алгоритмом управления с включением диодного плеча VD1 показывает, что применение предлагаемых технических решений практически устраняет аварийный процесс и позволяет работать электровозу без бросков тока тяговых двигателей, а машинисту электровоза довести поезд до станции назна-

чения. На рисунках 15 и 17 видно, что ток двигателей уменьшается по величине в среднем на 20%, а пульсации тока увеличиваются примерно на 15%.

В результате, коэффициент технической готовности электровоза к работе поддерживается на высоком уровне, так как случаи отказов работы электровоза по причине выходов из строя ВИП сводятся к минимуму.

Предлагаемые технические решения реализованы на практике. Схемы с разрядным диодным плечом апробированы на Дальневосточной железной дороге в рамках договора по плану НТР между ДВГУПС и Дальневосточной железной дорогой на электровозе ВЛ80Р-1513 в локомотивном депо Смоляниново. В рамках инвестиционного проекта ЗАО «ДЦВ Красноярской железной дороги» на Красноярской железной дороге, предлагаемое решение апробировано на электровозе ВЛ80Р № 1575/1723.

Опытная реализация предлагаемого проекта показала эффективность предложенных решений, и на текущий момент отвечает требованиям, предъявляемым к повышению надежности, «живучести» локомотива в условиях повышения весовых норм для современных локомотивов и создает предпосылки для реализации Программы мероприятий по повышению эффективности перевозочного процесса на дорогах Восточного полигона, утвержденной решением № 376 Первого вице-президента ОАО «Российские железные дороги» В.Н. Морозова от 15.11.2013 г.

Выводы

1. Применение диодных плеч VD1, VD2 и новых алгоритмов управления ВИП на всех зонах в режимах тяги и рекуперативного торможения позволяет 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.
2. При возникновении аварийных процессов в выпрямителе с типовым алгоритмом управления в электровозе образуется нерегулируемый выпрямленный ток двигателя, который резко падает с 1200 А до 160 А и обратно возрастает, что сопровождается значительными бросками тока и приводит к срабатыванию защиты. В результате, неоднократные повторения аварийного режима выводят из строя силовое оборудование локомотива (ВИП, ТД), что приводит к неработоспособности электровоза.
3. При возникновении аварийных процессов в выпрямителе с новым алгоритмом управления и диодным плечом VD выпрямленное напряжение и ток двигателей электровоза всегда остаются регулируемыми и зависят от положения штурвала машиниста электровоза. Это значительно повы-

шает надежность работы электровоза и его «живучесть» путем исключения этих аварийных процессов в силовых цепях электровоза, что обеспечивает готовность электровоза к работе. Это даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до станции назначения без образования опасных бросков тока для тяговых двигателей.

Литература

1. Тихменев Б.Н.: *Силовые полупроводниковые преобразователи и их применение в электроподвижном составе* // Вестник ВНИИЖТ, № 3. – 1966.
2. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А.: *Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями*. М.: Транспорт, 1986. – 312 с.
3. Knobloch G.: *Regenerative braking on rectifier locomotives* // Monthly bulletin of the International Railway congress association Elektrik traction on the Railways. – 1965. – № 5, 12.
4. Коссие А.: *Развитие электровозов с тиристорами на железных дорогах Франции (Evolution de la locomotive a thyristorsala SNCF)* // Elektrische Bahnen. – 1981. – V. 52. – № 1–2. – P. 18-22, 52–60.
5. Хасимото Сюнъити: *Выпрямители электроподвижного состава. (Rectifier of electric rollibg stock)* // Дэнки Тецудо, Elec. Railway. – 1980. – № 3. – С. 19–22.
6. Series production of the ristor locomotives for Sweden // Railway Gazette. – 1967. – V. 123. – № 19.
7. Гриньков Б.Н.: *Тиристорное регулирование на электроподвижном составе переменного тока за рубежом*. // Железные дороги мира. – 1979. – № 3, 4.
8. *Развитие электрической тяги в Китае* // Железные дороги мира. – 1999. – № 1. – С. 8–19.
9. Власьевский С.В.: *Возможности повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями* / С.В. Власьевский, А.К. Бабичук, О.В. Мельниченко // Вестник МИИТ, № 10. – 2004.
10. Власьевский С.В. Пути снижения искажений синусоидальности напряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, // Электроника и электрооборудование транспорта, № 2. – М.: 2006. – С. 15–17.
11. Власьевский С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы

- и эффективность его применения. Электроника и электрооборудование транспорта, № 1. – М.: 2006. – С. 21–24.
12. Власьевский С.В.: *Свободные колебания напряжения в контактной сети, вызванные процессами коммутации тиристорных преобразователей электровозов* / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик // Электроника и электрооборудование транспорта, № 1. – М. 2007. – С. 14–19.
 13. Власьевский С.В.: *Повышение эффективности работы электровозов переменного тока в режиме электрического рекуперативного торможения* / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, Е.В. Буняева, Д.С. Фокин // Вестник ВНИИЖТ, № 6. – М., 2009. – С. 28–33.
 14. Патент на изобретение 2168839. Способ управления многозонным преобразователем переменного тока / С.В. Власьевский, В.В. Литовченко, А.Н. Савоськин // – Заявка № 2000106412/09; Заявл. 17.03.2000; Оpubл. 10.06.2001, Бюл. № 16.
 15. Патент на изобретение № 2322749 Способ управления многозонным выпрямителем однофазного переменного тока. / С.В. Власьевский, О.В. Мельниченко, А.К. Бабичук // Заявка № 2006140957/09 от 20.11.2006; Оpubл. 20.04.2008, Бюл. № 11.
 16. Патент на изобретение № 2418354 Зависимый многозонный инвертор однофазного переменного тока / С.В. Власьевский, Д.С. Фокин, Е.В. Буняева // Заявка № 2010113666/07 от 07.04.2010; Оpubл. 10.05.2011; Бюл. № 13.
 17. Патент на изобретение № 2469458. Способ управления зависимым инвертором однофазного переменного тока / С.В. Власьевский, В.Г. Скорик, О.В. Мельниченко, Е.В. Буняева // Заявка № 2023415721/07 от 12.06.2011; Оpubл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

Przełączniki półprzewodnikowe dużej mocy na lokomotywach elektrycznych na prąd przemienny w Rosji

Streszczenie

Artykuł zawiera informacje na temat przełączników półprzewodnikowych dużej mocy stosowanych na lokomotywach elektrycznych na prąd przemienny w niektórych krajach Europy i w Rosji od początku lat 70-tych XX wieku. Rozpatrzono zasady budowy układów przełącznikowych dużej mocy stosowanych w warunkach trakcji i hamowania elektrycznego (oporowego i odzyskowego) lokomotyw. Przedstawiono przebieg pracy przełączników w trybie pracy prostownika i zależnego falownika zgodnie z ich algorytmami sterowania. Podano sposoby zwiększenia współczynnika mocy nowoczesnych przełączników prostownikowo-falownikowych. Rozpatrzono przykłady wystąpienia awarii w przełącznikach przy różnych algorytmach ich sterowania oraz ich wpływ na zdolność lokomotywy elektrycznej do wykonywania pracy.

High-power Semiconductor Converters in AC Electric Locomotives in Russia

Summary

The paper provides information on high-power semiconductor converters installed in AC electric locomotives which have been in service in some European countries and in Russia since the beginning of the 70-ties of 20th century. Principles of construction of high-power converter systems applied in the power transmission and braking (dynamic and regenerative braking) in locomotives were examined. Converter working cycle in the rectifier and inverter modes according to their control algorithms was presented. The methods for increasing the power factor in modern double converters (i.e. operating both in rectifier and inverter modes) were presented. Examples of converter failures occurring at various control algorithms as well as their effect on electric locomotive efficiency were studied.