

УДК 629.423

О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО (ИРГУПС), С. В. ВЛАСЬЕВСКИЙ (ДВГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Россия, г. Иркутск,
ул. Чернышевского 15, тел.: +7 (902) 170-24-37, e-mail: olegmelnval@mail.ruДальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Россия, г. Хабаровск,
ул. Серышева 47, тел.: +7 (914) 547-54-47, e-mail: vas@festu.khv.ru

АВАРИЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПЕРВОЙ ЗОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕН- НОГО ТОКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Введение

Более 40 лет назад были созданы электровазы переменного тока с тиристорными преобразователями, в которых наиболее существенным изменениям подверглись их силовые схемы и системы управления. Общее количество элементов в таких электровазах стало на один – два порядка больше, чем на ранее выпускавшихся сериях электровазов. Так например, только в логической части аппаратуры управления первых электровазов серии ВЛ80Р насчитывается свыше 1500 элементов. Кроме того, в выходных каскадах выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) было установлено около 4000 электронных элементов [1]. В настоящее время с развитием полупроводниковой и микропроцессорной техники на электровазах серий ВЛ80ТК, ЭП1, 2(3) ЭС5К количество применяемых электронных элементов на порядок стало меньше. В результате, надёжность работы электровазов должна была возрасти. Однако этого не происходит и выход из строя даже одного маломощного элемента системы управления у современного электроваза и по сей день может привести к возникновению ненормального режима его работы, в результате которого дальнейшее движение электроваза будет затруднено или невозможно. Таким образом, на сегодняшний день всё ещё сохраняется жёсткая зависимость качества работы силового оборудования электроваза от работы системы его управления.

Основные причины возникновения аварийных режимов преобразователей

Анализ характера, причин повреждений и режимов работы электрооборудования электровазов при выходе из строя тиристорных ВИП показал, что основная часть повреждений и сбоев работы силовой части электровазов происходят из-за повреждений электронных элементов и

сбоев в работе цепей системы управления. Половина таких отказов приходится на пропуск импульсов управления, подаваемых на управляющие электроды тиристорных плеч ВИП. Действительно, в настоящее время система управления построена таким образом, что в случае отказа любого выходного канала аппаратуры управления возникает отказ отдельных выходных каскадов системы формирования импульсов (СФИ) на всех ВИП электроваза. Например, отказ элементов в каскаде выходных усилителей блока управления (типа БУВИП-133) приводит к отказу работы каскада СФИ ВИП. В итоге, это приводит к однократным или многократным броскам тока и напряжения ВИП, которые увеличивают продольную динамику подвижного состава и вероятность обрывов автосцепных устройств, снижают сцепление колёс локомотива с рельсами, снижают способность преодолевать тяжёлые элементы профиля пути.

Природа образования бросков тока тяговых двигателей электроваза с тиристорными преобразователями является многофакторной и, как правило, совершенно не устранима силами локомотивной бригады в процессе эксплуатации. В некоторых случаях обнаружить причину бросков тока удаётся только после нескольких дней непрерывных поездок, так как некоторые неисправности проявляют себя весьма кратковременно, например, при тряске локомотива в течение нескольких секунд.

Испытания электроваза серии ВЛ80Р на экспериментальном кольце ВНИИЖТ [2] показали, что пропуск даже одного импульса управления на плечи ВИП приводит к нарушению режима работы силовых цепей всего электроваза. В тяговом режиме, например, это может привести к быстрому снижению тока плеча ВИП в результате запираания тиристорных его ветвей, искажению синусоидальности кривой потребляемого переменного тока, увеличению пульсации выпрямленного тока, увеличению угла сдвига фаз φ и росту

реактивной энергии. В результате коэффициент мощности электровоза резко снижается. В тоже время это приводит к нарушению работы плеч ВИП в последующие полупериоды напряжения.

Цель работы

Перед технической системой – электровоз ставится задача, чтобы выход из строя любого элемента или узла системы управления не должен приводить к повреждению силовых цепей электровоза или возникновению режима, сопровождающегося резкими бросками тока и напряжения. Многолетняя практика эксплуатации электровозов с тиристорными преобразователями показала, что наиболее ответственные цепи и элементы целесообразно резервировать для обеспечения высокой надёжности работы тиристорных преобразователей.

Технические решения по реализации поставленной цели

Чтобы выполнить это требование необходимо было предложить такие технические решения, которые могли бы обеспечить его выполнение. Такие решения были разработаны ИрГУПС и ДВГУПС в виде нового алгоритма управления ВИП и включения в силовую схему ВИП диодного плеча, которые были испытаны на электровозе ВЛ80Р на участке Иркутск-Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги.

В качестве примеров, рассмотрим несколько аварийных режимов работы ВИП, связанные с пропуском импульсов управления на те или иные его плечи, для электровоза переменного тока в режиме тяги с типовым (табл. 1) и предлагаемым (табл. 2) авторами алгоритмами управления на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения совместно с включением в силовую схему ВИП диодного плеча.

Первая зона регулирования является важным режимом работы электровоза с поездом в диапазоне малых скоростей движения. На этих скоростях электровоз работает в режиме пуска и разгона поезда, при движении поезда на горном профиле пути по расчетному подъему на пределе сцепления при плохих погодных условиях и в других различных случаях.

Таблица 1

Типовой алгоритм управления ВИП на 1-й зоне регулирования

Зона	полу- период	Плечи выпрямителя			
		V3	V4	V5	V6
1	←	α_0	–	–	α_p
	→	–	α_p	α_0	–

Таблица 2

Предлагаемый алгоритм управления ВИП на 1-й зоне регулирования с включением диодного плеча в схему ВИП

Зона	полу- период	Плечи выпрямителя			
		V3	V4	V5	V6
1	←	α_p	–	–	α_p
	→	–	α_p	α_p	–

Вначале рассмотрим пример аварийного процесса на 1-й зоне, связанный с пропуском импульса управления на пятое плечо выпрямителя (VS5), при типовом алгоритме управления. На рис. 1 изображена диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с углом отпираания (фазой) α_0 на плечо VS5 в первом полупериоде напряжения, обозначенном сплошной стрелкой, при $\alpha_p = 90$ эл. град.

Проанализируем более подробно процессы работы плеч ВИП при смене полупериодов напряжения. Для этого на рис. 1 первый и второй полупериоды выпрямленного напряжения разбиваются на временные интервалы 0-1-2-3-4-5-п и 6-7-8-9-2п соответственно.

На рис. 2 изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) в первом полупериоде напряжения сети при возникновении в нем аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5.

Допустим, что в предшествующем полупериоде напряжения, обозначенном на рис. 2 пунктирной стрелкой, ток протекал по плечам VS3 и VS6 благодаря приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной е.д.с. e_{1-2} секции 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. После смены в точке 0 направления э.д.с. с пунктирной на сплошную стрелку, на интервале 0-1 обеспечивается возникновение отрицательного выпрямленного напряжения u_d (см. рис. 1). Это объясняется всё ещё проводимыми ток нагрузки тиристорами плеч VS3 и VS6, но уже не под действием e_{1-2} , а под действием е.д.с. самоиндукции e_L , возникшей в индуктивности L_d цепи выпрямленного тока во время прохождения по ней тока нагрузки в предыдущий полупериод напряжения сети. В результате, через секцию 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора и плечи VS3, VS6 происходит разряд (передача) в сеть электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности L_d . В момент времени, соответствующий цифре 1 на рис. 1, согласно типового алгоритма управления должен быть подан импульс управления с фазой α_0 на плечо VS5 и

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

должна произойти коммутация (переход) тока с плеча VS3 на плечо VS5 на интервале 1-2. Однако коммутации на этом интервале не возникает в силу того, что на плечо VS5 импульс управления с фазой α_0 не подается (пропуск импульса). Причиной не подачи импульса, например, является возникновение неисправности в системе управления ВИП (в БУВИП или в СФИ). При этом отрицательное напряжение u_d

возрастает, а ток нагрузки протекает через открытые плечи VS3 и VS6 под действием e_L . На интервале 2-3 отрицательное напряжение u_d продолжает возрастать (см. рис. 1), так как ток нагрузки все ещё протекает через открытые плечи VS3 и VS6 под действием e_L . Мгновенная схема замещения ВИП во временных интервалах 0-1-2-3 представлена на рис. 2, а.

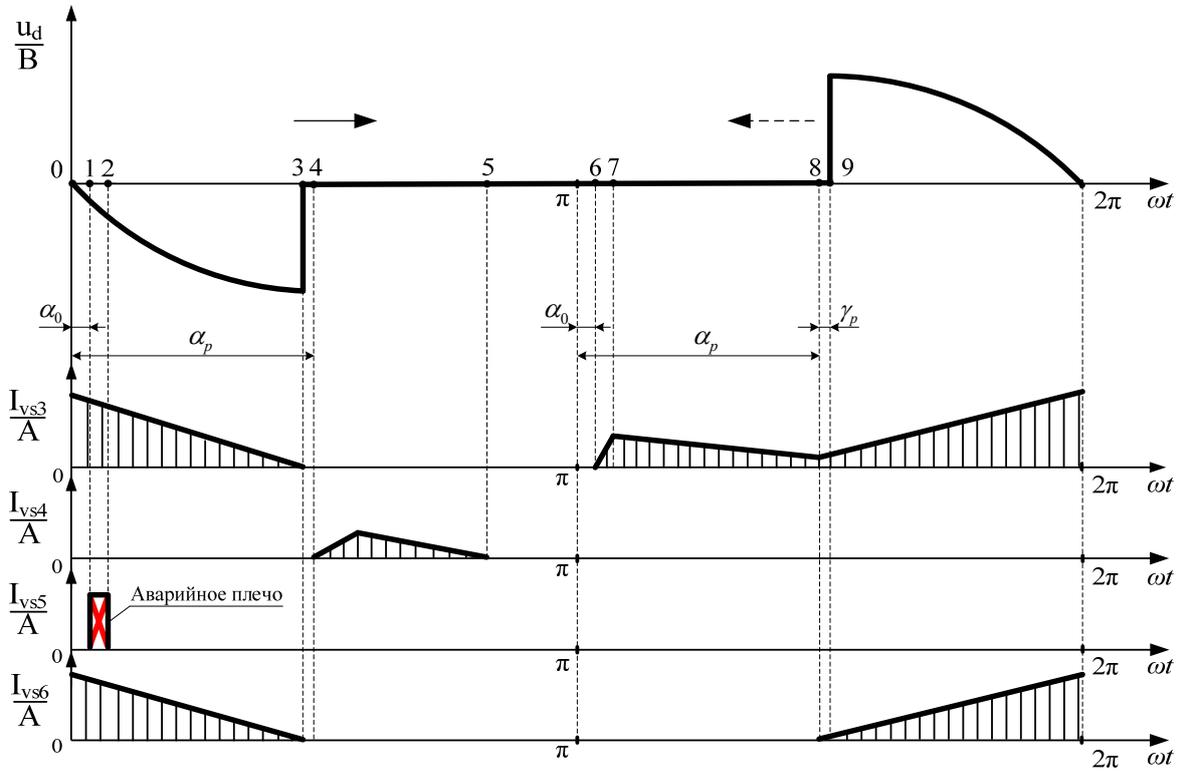


Рис. 1. Диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч на первой зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

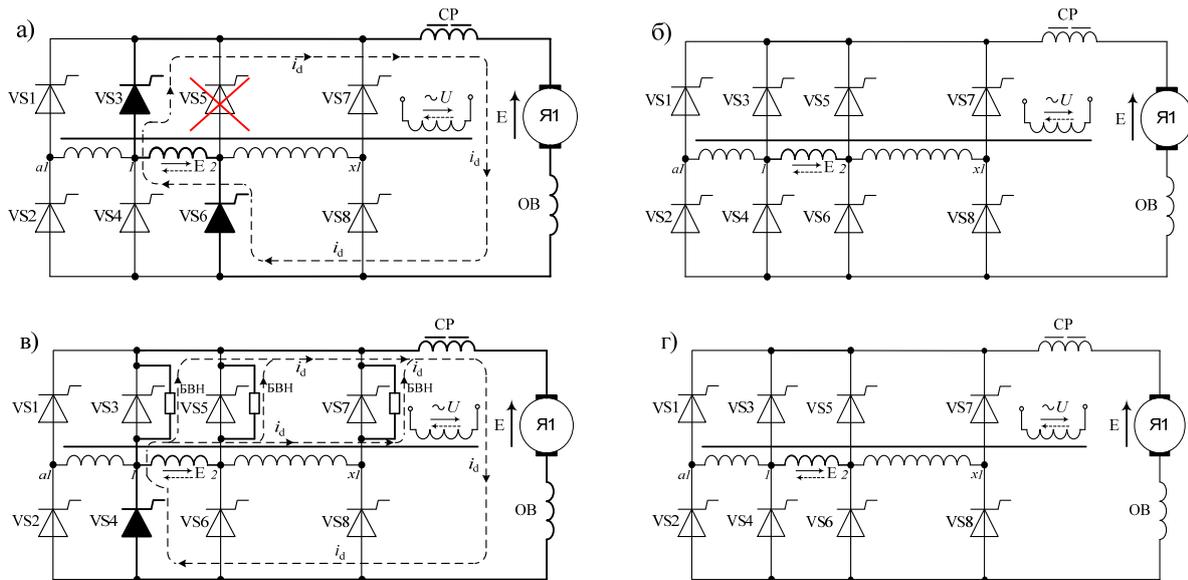


Рис. 2. Мгновенные схемы замещения ВИП на первой зоне регулирования, соответствующие интервалам 0-1-2-3 (а), 3-4 (б), 4-5 (в) и 5-π (г) при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

В момент времени, соответствующий точке 3, разряд в сеть электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности L_d , прекращается, ток в плечах VS3 и VS6 падает до нуля и плечи закрываются. В результате напряжение u_d падает до нуля. Далее в промежутке времени от точки 3 до точки 4 напряжение u_d продолжает быть равным нулю и ток нагрузки тоже равен нулю (см. рис. 1). Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 3-4 представлена на рис. 2, б.

В результате подачи во временной точке 4 на плечо VS4 импульса управления с углом отпирания $\alpha_p = 90$ эл. град. образуется контур протекания импульсного тока через цепи блока выравнивания напряжения (БВН) плеч ВИП. В эти БВН входят резисторы $R_{ш}$, шунтирующие тиристоры и цепочки RC плеч ВИП. В этот момент времени изменением выпрямленного тока и напряжения можно пренебречь в силу их малости.

Ток в плече VS4 является результатом появления контура тока, в котором имеется э.д.с. секций 1-2-X1 вторичной обмотки тягового трансформатора, участок цепи из резисторов БВН плеч VS3, VS4 и VS5, а также цепь выпрямленного тока (сглаживающий реактор и тяговые двигатели). Этот ток заряжает индуктивность L_d , создавая э.д.с. самоиндукции e_L , которая затем разряжается в этом же контуре, поддерживая ток плеча VS4 на более длительном времени, чем импульсный ток через БВН указанных плеч вначале открытия плеча VS4 (см. рис. 1 и 5). Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 4-5 представлена на рис. 2, в.

На интервале времени 5-π напряжение u_d продолжает быть равным нулю, так как на этом интервале плечо VS4 закрыто и не проводит ток нагрузки. Этому процессу соответствует мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 5-π, представленная на рис. 2, г.

На рис. 3 изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) для второго полупериода напряжения при возникновении аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5 в первом полупериоде напряжения.

Во втором полупериоде, обозначенном на рис. 1 пунктирной стрелкой, в на интервале времени π-6 напряжение u_d продолжает быть равным нулю, так как на этом интервале плечо VS4 продолжает быть закрытым, а на плечо VS3 еще не подан импульс управления, в результате чего они не проводят ток нагрузки.

Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале π-6, представлена на рис. 3, а.

В момент времени, соответствующий точке 6, на плечо VS3 согласно алгоритма управления подается импульс управления с углом отпирания α_0 (рис. 1). В результате подачи на плечо VS3 импульса управления вначале образуется контур протекания тока утечки через плечо VS3, цепь БВН плеч VS4, VS6 и VS8, а также цепь выпрямленного тока под действием э.д.с. e_{1-2} секции 1-2 вторичной обмотки трансформатора. Этот контур тока утечки действует до точки 7 непродолжительное время, а именно пока не зарядится индуктивность L_d с образованием в ней э.д.с. самоиндукции e_L . Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 6-7, представлена на рисунке 3, б.

Затем в точке 7 создается другой контур тока, а именно контур тока разряда e_L через цепь выпрямленного тока, цепь БВН плеча VS4 и плечо VS3, минуя обмотку секции 1-2. К моменту времени, соответствующему точке 8, по мере разряда e_L ток в плече VS3 постепенно уменьшается, но не падает до нуля к точке 8 и поэтому это плечо не закрывается. Таким образом, оба контура тока действуют на интервалах времени 6-7 и 7-8 (см. рис. 1). На интервале времени 6-7 действия контура тока утечки выпрямленное напряжение u_d имеет небольшую величину, так как большая часть э.д.с. e_{1-2} в виде падения напряжения тратится на большой величине сопротивления БВН плеча VS4 при прохождении через него тока утечки. На интервале времени 7-8 действия контура тока разряда e_L напряжение u_d практически равно нулю в силу уменьшения тока разряда и малой величины сопротивления цепи выпрямленного тока. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 7-8, представлена на рис. 3, в.

В момент времени, соответствующий точке 8, на плечо VS6 согласно алгоритма управления подается импульс управления с фазой $\alpha_p = 90$ эл. град., плечо VS6 открывается и начинает проводить ток. На интервале времени 8-9 коммутации токов плеч VS4 и VS6 не происходит, так как тока в плече VS4 в этот момент времени нет (ток плеча VS4 стал равен нулю еще в момент времени, соответствующий точке 4). Поэтому на интервале 8-9 и 9-2π ток в плечах VS3 и VS6 резко возрастает под действием приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной э.д.с. e_{1-2} секции 1-2 (см. рис. 1). При этом выпрямленное напряжение u_d также резко возрастает сначала до амплитудной величины напряжения 1-й зоны, а затем спадает до нуля в точке 2π. В итоге к тяго-

вым двигателям прикладывается половина напряжения первой зоны регулирования. Мгновенная

схема замещения ВИП во временном интервале 8-9-2π представлена на рис. 3, г.

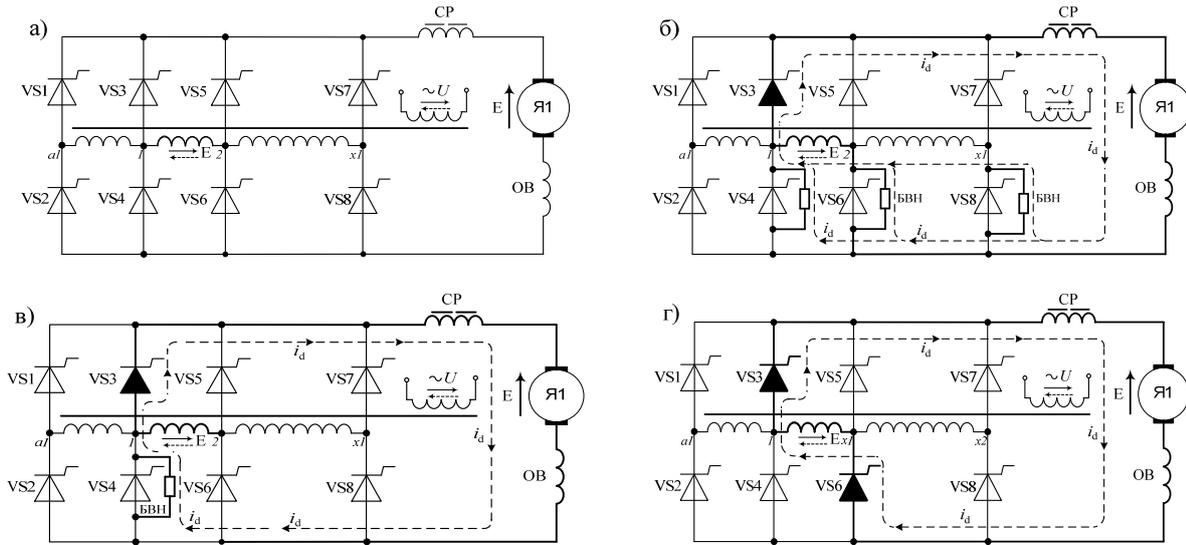


Рис. 3. Мгновенные схемы замещения ВИП на первой зоне регулирования, соответствующие интервалам времени $\pi-6$ (а), 6-7 (б), 7-8 (в), 8-9-2π (г) при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

В следующий полупериод при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5 электромагнитные процессы ВИП происходят аналогично описанным выше.

Чтобы детально изучить аварийные процессы была разработана математическая модель электровоза в среде схемотехнического проектирования OrCad16.0. В качестве объекта моделирования был выбран электровоз переменного тока, аналогичный существующему электровозу ВЛ80Р, работающий в режиме тяги. Работа этого электровоза была смоделирована при управлении преобразователем по типовому алгоритму и предлагаемому алгоритму с применением диодного плеча, включенного параллельно цепи выпрямленного тока.

Электровоз в модели рассмотрен как комплексная система, состоящая из нескольких подсистем, взаимодействующих между собой. Такими подсистемами является электрическая часть электровоза, контактная сеть и система управления электровоза. Электрическая часть электровоза представлена математической моделью, состоящей из тягового трансформатора, двух ВИП, двух сглаживающих реакторов и четырех тяговых двигателей. Система управления ВИП электровоза представляет собой схему, с помощью которой импульсы управления подаются на тиристоры плеч преобразователя согласно алгоритму управления. Для более точного отображения взаимного влияния переходных процессов в системе контактная сеть – электровоз в общей модели этой системы контактная сеть представлена конечноэлементной схемой замещения. Она состоит из каскадного

соединения Т-образных симметричных четырехполюсников.

Результаты моделирования процессов работы ВИП при штатном алгоритме управления в аварийном режиме тяги, связанном с пропуском импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5, представлены на рис. 4 и 5.

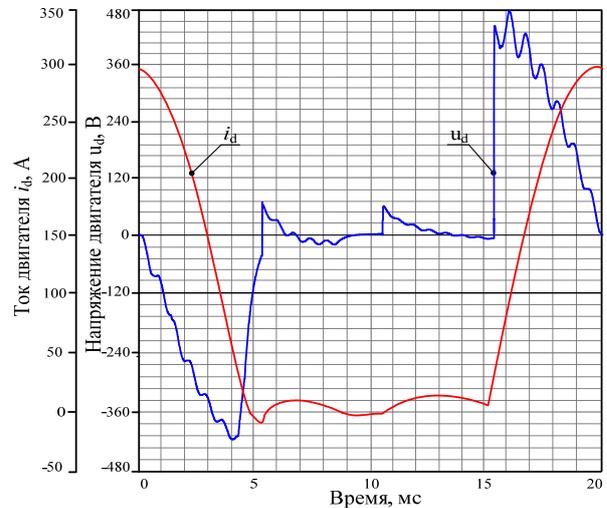


Рис. 4. Диаграмма выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя для типового способа управления в аварийном режиме тяги на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

На участке Татаурово – Боярский Восточно-Сибирской железной дороги были проведены сравнительные испытания электровоза ВЛ80Р №1829 в тяговом режиме для штатного и предлагаемого алгоритмов управления на первой зоне регулирования при аварийных режимах

работы ВИП, связанные с пропуском импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5. Диаграммы процессов работы ВИП по результатам этих испытаний представлены на рис. 6.

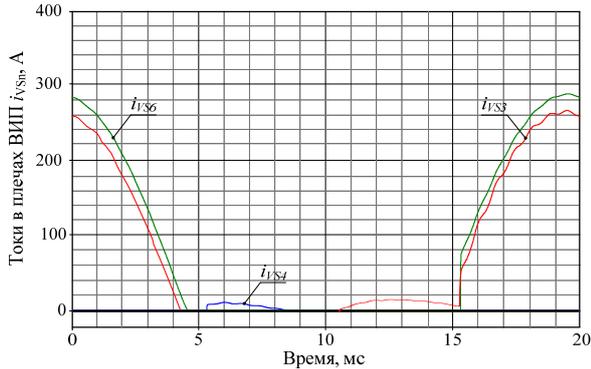


Рис. 5. Диаграммы токов плеч ВИП на 1-й зоне регулирования с типовым способом управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

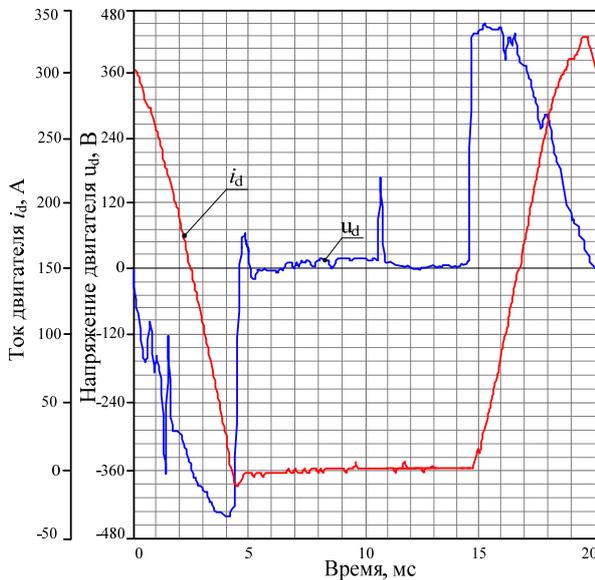


Рис. 6. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом алгоритме управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5

Сравнивая процессы на рис. 4 и 6 можно сказать о том, что наблюдается высокая сходимость электромагнитных процессов, полученных при математическом моделировании и при проведении испытаний электровоза.

Таким образом, оценивая электромагнитные процессы, происходящие в электровозе при типовом алгоритме управления на 1-й зоне в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5 ВИП, можно сделать следующие выводы:

1. В течение первой половины времени первого полупериода напряжения происходит рост

реактивной энергии, что резко снижает энергетические показатели электровоза, а выпрямленный ток двигателя резко падает с 300 А до нуля, образуя броски тока.

2. Во втором полупериоде выпрямленное напряжение является регулируемым и величина его зависит от положения штурвала машиниста электровоза, а выпрямленный ток двигателя резко возрастает от нуля до 300 А, также образуя броски тока.

Если рассматривать в качестве аварийного процесса работы ВИП с типовым алгоритмом управления пропуск импульса управления с фазой α_p на плечо VS6 в полупериод напряжения сети, обозначенный на рис. 1 пунктирной стрелкой, то выпрямленное напряжение u_d на всем протяжении этого полупериода будет равно нулю, а в следующем полупериоде (сплошная стрелка на рис. 1) к тяговым двигателям будет прикладываться уже полное напряжение 1-й зоны. Такой аварийный процесс работы ВИП, полученный с помощью математического моделирования, представлен на рис. 7 и 8.

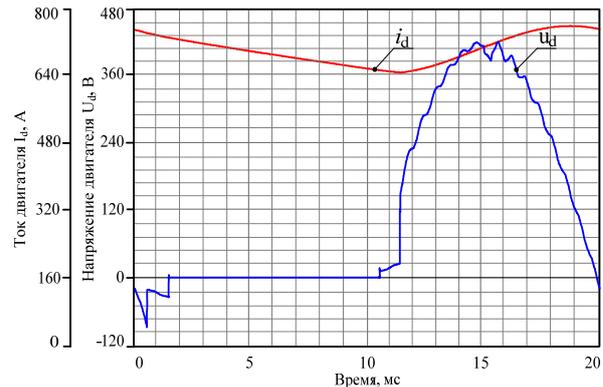


Рис. 7. Диаграммы выпрямленного напряжения u_d и тока i_d тягового двигателя при типовом способе управления ВИП на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS6

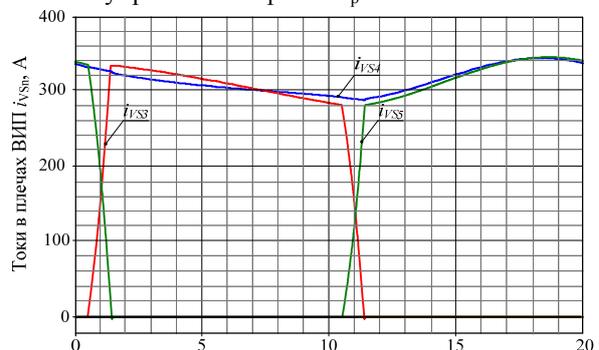


Рис. 8. Диаграммы токов плеч ВИП на 1-й зоне регулирования с типовым способом управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления 6-го плеча ВИП

На рис. 9 изображены экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом способе управления ВИП на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS6, полученные во время испытаний электровоза на участке Татаурово – Боярский Восточно-Сибирской железной дороги.

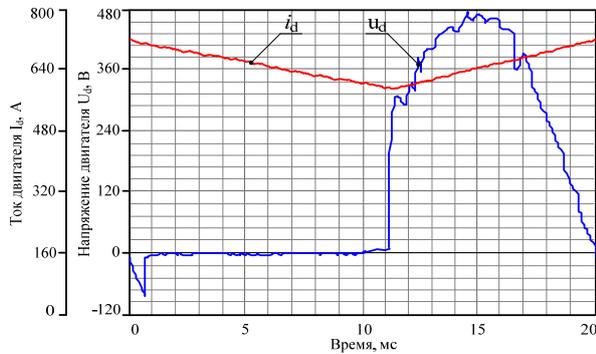


Рис. 9. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом способе управления ВИП на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS6

Сравнение диаграмм процесса работы ВИП на рис. 7 и 9 показывает их хорошую сходимость. Из диаграмм видно, что выпрямленный ток двигателя электровоза резко не уменьшается до нуля как на рис. 4 и 6 (нет бросков тока), однако он становится не регулируемым и определяется величиной напряжения u_d полной 1-й зоны в одном из полупериодов. При движении

электровоза на этой зоне с определенной скоростью такой аварийный режим тяги не представляет опасности. Однако, если рассматривать этот аварийный процесс при трогании электровоза с места, то ток двигателя будет возрастать резким броском до тока уставки защиты силовой цепи, так как к двигателю в один из полупериодов будет прикладываться напряжение полной 1-й зоны в отсутствие противо-ЭДС двигателя. При таком аварийном процессе ВИП, привести в движение электровоз будет невозможно.

Чтобы устранить негативные результаты в работе электровоза на 1-й зоне регулирования от возникновения аварийных процессов в режиме тяги при пропуске импульсов управления на плечо VS5 или VS6 необходимо, как уже было сказано выше, применить на 1-й зоне новый алгоритм управления ВИП и включить в его силовую схему разрядное диодное плечо VD [3]. Суть нового алгоритма управления заключается в том, что на все плечи ВИП по два в каждом полупериоде напряжения подаются импульсы управления с фазой α_p (см. табл. 2). Плечо VD включается параллельно цепи выпрямленного тока.

Рассмотрим на рис. 9 электромагнитные процессы в электровозе при действии предлагаемых технических решений. Также как и в предыдущем случае первый полупериод разбиваем на временные интервалы 0-1-2-3-4- π , а второй полупериод на интервалы 5-6-7-8-2 π .

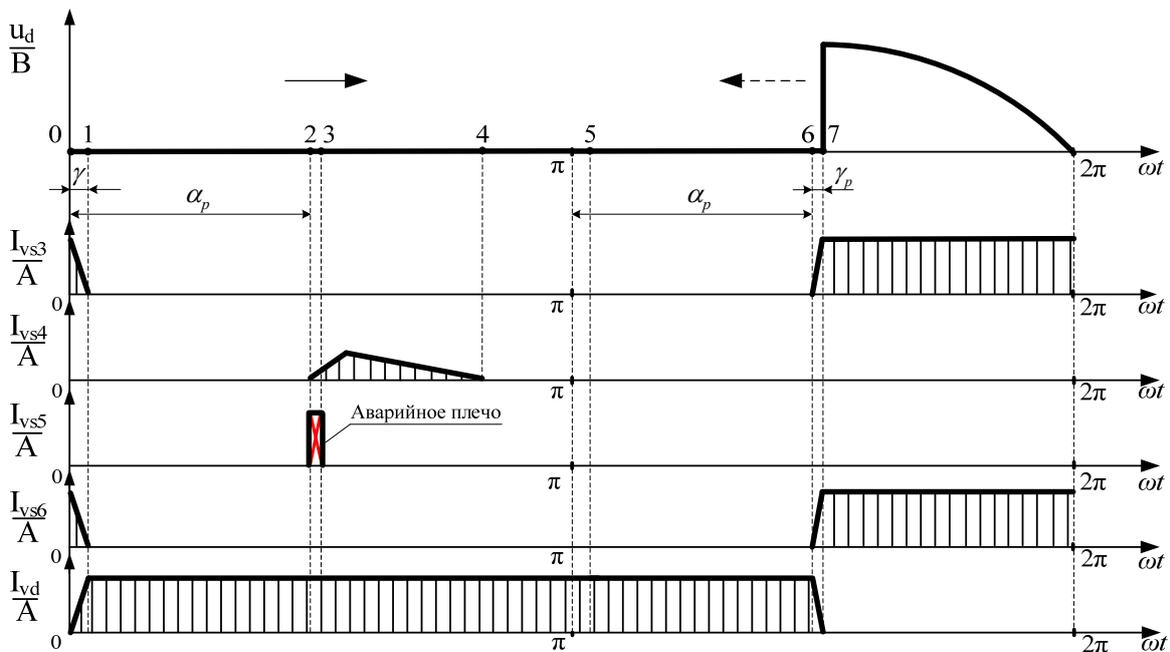


Рис. 10. Диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5

На рис. 11 изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) с предлагаемым алгоритмом управления и плечом VD на 1-й зоне регулирования в первом полупериоде

напряжения сети при возникновении в нем аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5. Проанализируем их работу

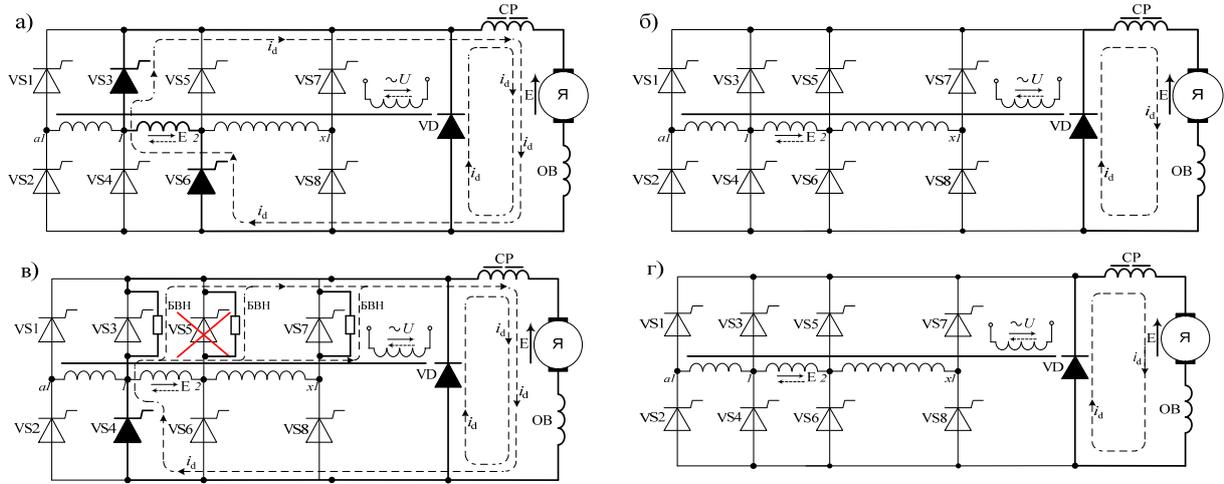


Рис. 11. Мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD, соответствующие интервалам 0-1 (а); 1-2 (б); 2-3-4 (в); 4-π-5-6 (г) при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5

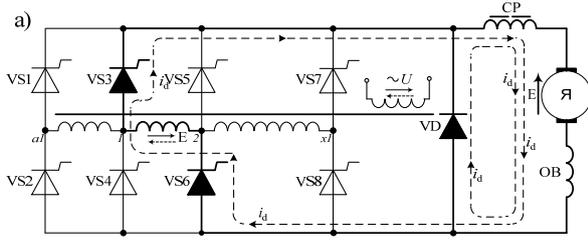
Допустим, что в предшествующем полупериоде напряжения, обозначенном на рис. 9 пунктирной стрелкой, ток протекал по плечам VS3 и VS6 благодаря приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной е.д.с. e_{1-2} секции 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. После смены в точке 0 направления э.д.с. e_{1-2} с пунктирной на сплошную стрелку, на интервале времени 0-1 начинается коммутация (переход) тока с плеч VS3 и VS6 на плечо VD. Такая коммутация возникает потому, что благодаря наличию плеча VD э.д.с. самоиндукции e_L , возникшая в индуктивностях L_d цепи выпрямленного тока, создает буферный контур протекания тока через это плечо и тем самым возникают потенциальные условия для закрытия плеч VS3 и VS6. К точке 1 токи плеч VS3 и VS6 падают до нуля и плечи закрываются. Таким образом, на интервале времени 0-1 через плечо VD происходит разряд электромагнитной энергии, накопленной в индуктивностях L_d в предыдущий полупериод напряжения сети. Ток буферного контура проходит через плечо VD, минуя секцию 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. Благодаря такому контуру выпрямленный ток двигателя на интервале 0-1 в аварийном полупериоде практически не уменьшается и поддерживается на прежнем уровне, что сохраняет работоспособность электровоза.

Мгновенная схема замещения ВИП на интервале времени 0-1 приведена на рис. 10 а. На интервале 1-2 ток протекает через плечо VD,

разряжая накопленную электромагнитную энергию в L_d . При этом выпрямленное напряжение будет равняться нулю. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 1-2 представлена на рис. 10, б.

В момент времени, соответствующий цифре 2 на рис. 9, при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5 перехода тока с плеча VD на плечи VS4 и VS5 на интервале 2-3 не происходит. Образуется контур протекания тока утечки через плечо VS4 и цепь ББН плеч VS3, VS5 и VS7 под действием напряжения секции 1-2 вторичной обмотки. Плечо VD остается открытым, поддерживая тем самым ток нагрузки. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 2-3 представлена на рис. 10, в. На интервале 3-4 ток утечки продолжает протекать по образовавшемуся контуру через плечо VS4 и цепь ББН плеча ВИП. Выпрямленное напряжение при этом также равняется нулю. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 3-4, представлена на рисунке 10, в. К моменту времени, соответствующему точке 4, по мере снижения величины напряжения секции 1-2 ток плеча VS4 падает до нуля и плечо закрывается. При этом выпрямленное напряжение продолжает быть равным нулю. На интервале 4-π-5-6 ток продолжает протекать через плечо VD, причём выпрямленное напряжение также равняется нулю. Этому соответствует мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 4-π-5-6, представленная на рис. 10, г.

На рис. 12 представлены мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления



на плечо VS5, соответствующие интервалам времени 6-7 (а) и 7-2π (б).

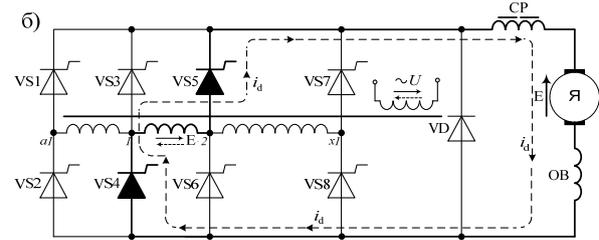


Рис. 12. Мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5, соответствующие интервалам 6-7 (а) и 7-2π (б)

В момент времени, соответствующий цифре 6, на плечи VS3 и VS6 приходят импульсы управления с фазой $\alpha_p = 90$ эл. град. На интервале 6-7 происходит коммутация токов плеч VD и VS3, VS6 (токи в плечах VS3 и VS6 возрастают, а в плече VD падает до нуля). При этом выпрямленное напряжение равно нулю. Мгновенная схема замещения ВИП в интервале 6-7 представлена на рис. 11, а.

На интервале 7-2π ток протекает через открытые плечи VS3 и VS6. К тяговым двигателям прикладывается напряжение, равное напряжению первой зоны в соответствии с заданным фазовым углом регулирования α_p . Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 7-2π представлена на рис. 11, б. В следующий период при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5 электромагнитные процессы в ВИП происходят аналогично описанным выше.

Если рассматривать в качестве аварийного плечо VS6 с предлагаемым алгоритмом управления на 1-й зоне регулирования, то существенной разницы с аварийным плечом VS5 – нет. Электромагнитные процессы ВИП происходят аналогично описанным выше. Выпрямленное напряжение и ток двигателей электровоза второго полупериода остаётся регулируемым и зависит от положения штурвала машиниста электровоза.

На рис. 12 представлены диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при математическом моделировании аварийного режима тяги при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5. На рис. 13 представлены диаграммы токов плеч ВИП при математическом моделировании аварийного режима тяги при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5.

При проведении испытаний электровоза ВЛ80Р с предлагаемым алгоритмом управления ВИП на 1-й зоне регулирования и диодным плечом VD осуществлялся аварийный режим тяги,

вызванный пропуском импульса управления с фазой α_p на плечо VS5. На рис. 14 изображены экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования с предлагаемым способом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5.

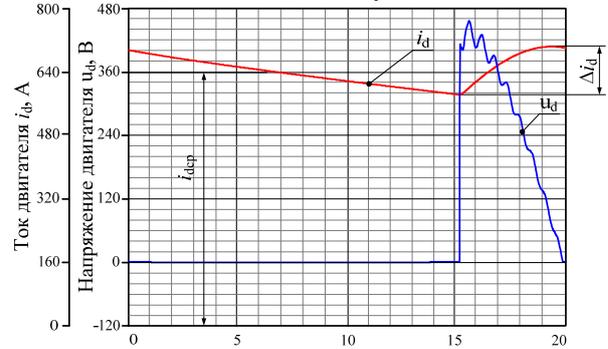


Рис. 13. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования с предлагаемым способом управления и диодным плечом VD, полученные при математическом моделировании аварийного режима тяги при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5

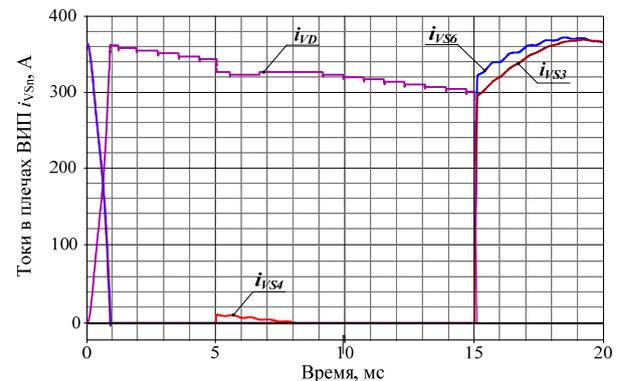


Рис. 14. Диаграммы токов плеч ВИП на 1-й зоне регулирования с разрядным диодным плечом в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α_p на плечо VS5

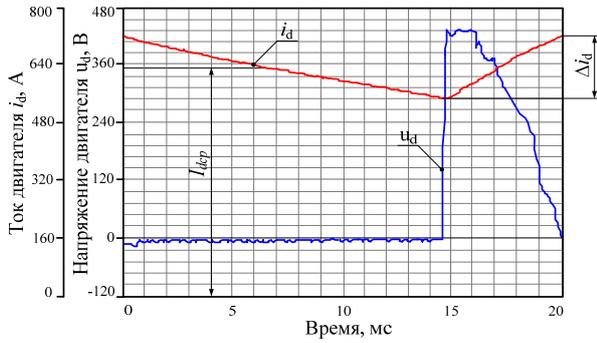


Рис. 15. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования с предлагаемым способом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления фазой α_p на плечо VS5

Сравнение осциллограмм на рис. 12 и 14 показывает хорошую сходимость электромагнитных процессов, полученных при математическом моделировании и при проведении испытаний электровоза (расхождение не более 3 %).

Анализ и сравнение аварийных процессов ВИП при штатном и предлагаемом алгоритмах управления представляет собой особый интерес с точки зрения оценки переходного процесса выпрямленного тока (резкие изменения величины тока в виде образования его бросков). Через такое сравнение процессов можно оценить возможность движения электровоза с поездом без образования негативных последствий для его электрооборудования. Эту оценку можно осуществить через определение коэффициента относительной пульсации выпрямленного тока

$K_{\text{ПО}}$ и его влияния на корректирующий коэффициент λ , который в свою очередь влияет на величину потерь выпрямленного напряжения от коммутации вентилей преобразователя (потери напряжения на индуктивном сопротивлении обмоток трансформатора) и как следствие на величину коэффициента мощности электровоза.

$K_{\text{ПО}}$ и λ определяются по формулам

$$K_{\text{ПО}} = \Delta i_d / I_d, \quad (1)$$

$$\lambda = 1 + 0,2 K_{\text{ПО}}, \quad (2)$$

где I_d – среднее значение выпрямленного тока, Δi_d – переменная составляющая выпрямленного тока.

По условиям коммутации коллекторных тяговых электрических двигателей электровоза коэффициент относительной пульсации выпрямленного тока должен быть не более 0,6. Самый тяжелый режим по броскам тока на первой зоне регулирования при типовом алгоритме управления образуется, когда на плечо VS5 не приходит импульс управления. Для этого аварийного режима проведём его количественную оценку в сравнении с таким же аварийным процессом при применении предлагаемого алгоритма управления. Из полученных токовых диаграмм аварийных режимов (см. рис. 6 и 13), определим коэффициент относительной пульсации для типового и предлагаемого алгоритмов управления и произведём расчёт корректирующего коэффициента λ . Результаты расчёта заносим в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные значения коэффициентов $K_{\text{ПО}}$ и λ в аварийном режиме при типовом и предлагаемом алгоритмах управления

№ зоны	№ плеча	Типовой алгоритм				Предлагаемый алгоритм			
		I_{dcp}	Δi_d	$K_{\text{ПО}}$	λ	I_{dcp}	Δi_d	$K_{\text{ПО}}$	λ
0,5	5	150	660	4,4	1,88	632	176	0,27	1,05

По результатам табл. 3 видно, что коэффициенты $K_{\text{ПО}}$ и λ при применении предлагаемого алгоритма управления с диодным плечом меньше на 93 % и 44 % соответственно по сравнению с типовым алгоритмом и без применения диодного плеча.

При пропуске импульса управления на плечо VS5 в ВИП с предлагаемым алгоритмом управления на первой зоне регулирования возникает резерв плеча VS5, не принявшего нагрузку, за счёт разрядного диодного плеча VD, что даёт возможность машинисту электро-

воза довести поезд до ближайшей станции без образования опасных бросков тока двигателей, при которых движение поезда становится невозможным.

Определение коэффициента мощности при аварийных процессах с учётом несинусоидальности кривых переменного напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза производилось при проведении эксперимента с помощью счетчика активной и реактивной энергии переменного тока типа СЭТ-1М по формуле

$$K_M = \frac{\sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \phi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}} = \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \phi_1 + \dots + U_k I_k \cos \phi_k}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2} \cdot \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}}, \quad (3)$$

где U_0, I_0 - постоянные составляющие напряжения и тока; U_1, I_1 - действующие значения синусоидальных напряжения и тока 1-й гармоники; U_k, I_k - действующие значения синусоидальных напряжения и тока k -й гармоники; ϕ_k - угол сдвига фазы между напряжением и током k -й гармоники.

Результаты замеров заносим в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные значения коэффициента мощности в аварийном режиме при типовом и предлагаемом алгоритмах управления

№ зоны	Коэффициент мощности			
	Плечо ВИП	Типовой алгоритм	Предлагаемый алгоритм	Разница, %
0,5	5	0,118	0,224	90

Данные табл. 4 показывают, что коэффициент мощности при предлагаемом алгоритме выше, чем при типовом на 90 %. Это говорит о повышении активной и снижении реактивной мощности питающей сети в аварийном режиме при предлагаемом алгоритме управления на первой зоне регулирования с разрядным диодным плечом.

Выводы

1. Пропуск импульса управления с фазой α_0 на плечо VS5 при типовом алгоритме управления ВИП образует значительный рост реактивной энергии, что резко снижает энергетические показатели электровоза. Выпрямленный ток двигателя резко падает до нуля, образуя броски тока, которые приводят к срабатыванию токовой защиты электровоза.

2. Пропуск импульса управления с фазой α_p на плечо VS6 при типовом алгоритме управления

образует не регулируемый выпрямленный ток двигателя электровоза, так как в первом полупериоде выпрямленное напряжение всегда равно нулю, а во втором полупериоде к тяговым двигателям всегда прикладывается полное напряжение первой зоны.

3. Пропуск импульса управления с фазой α_p на плечо VS6 при типовом алгоритме управления ВИП приводит при трогании электровоза с места к резкому возрастанию тока в виде его броска до тока уставки защиты силовой цепи, что приводит к срабатыванию токовой защиты электровоза. При таком аварийном процессе ВИП привести в движение электровоз не предоставляется возможным.

4. Предлагаемый алгоритм управления на 1-й зоне регулирования при пропуске импульсов управления с фазой α_p на плечи VS5 или VS6 образует их резервирование за счёт разрядного диодного плеча VD. Величины выпрямленных значений напряжения и тока двигателей электровоза всегда остаются регулируемыми и зависят от положения штурвала машиниста электровоза. Это даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без образования опасных бросков тока двигателей.

5. Сравнительные значения коэффициентов $K_{\text{ПО}}$ и λ в аварийном режиме при применении предлагаемого алгоритма управления с разрядным диодным плечом по сравнению с типовым алгоритмом ниже на 93% и 44% соответственно.

6. Коэффициент мощности электровоза на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме при предлагаемом алгоритме управления по сравнению с типовым алгоритмом выше на 90 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капустин, Л.Д. Обеспечение надёжности системы управления электроподвижного состава с тиристорными преобразователями [Текст] Л. Д. Капустин // Вестник ВНИИЖТ. – 1975. – №2. – С. 5-9.
 2. Тихменев Б. Н. Потенциальные условия работы тиристорных в выпрямительно-инверторном преобразователе электровоза ВЛ80Р [Текст] / Б.Н. Тихменев, Ю.В. Басов, В.В. Находкин // сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – 1984. – М. – С. 9-20.
 3. Патент № 2322749 Российская Федерация, МПК H02M 5/42, B60L 9/12, 2006 г.; Опубл. 20.04.2008; Бюл. № 11. Способ управления многозонным выпрямителем однофазного переменного

REFERENCES

1. Kapustin L.D. *Obespechenie nadezhnosti sistemy upravleniya elektropodvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami* [Ensuring the reliability of the control system of electric rolling stock with thyristor converters] *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport], 1975, no. 2, pp. 5-9
 2. Tikhmenev B.N., Basov Yu.V., Nakhodkin V.V. *Potentsial'nye usloviya raboty tiristorov v vypryamitel'no-invertornom preobrazovatele elektrovoza VL80R* [Potential working conditions thyristor rectifier-inverter converter electric locomotive VL80R], Moscow, collection of scientific papers of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport, 1984, pp. 9-20

тока / авторы Власьевский С.В., Бабичук А.К.,
Мельниченко О. В.

3. Vlasyevsky S.V., Babichuk A.K., Melnichenko
O.V., e.a. *Sposob upravleniya mnogozonnym
vupryamitelem odnofaznogo peremennogo toka* [The
control method of multi-zone single-phase rectifier AC].
Patent, no. 2322749, 2006.

Поступила в печать 14.10.2013.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

Статья рассматривает аварийные процессы тиристорного преобразователя (выпрямителя) электровоза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения, возникающие в результате пропуска импульсов управления на плечи выпрямителя по причине выхода из строя электронных элементов выходных усилителей системы формирования импульсов СФИ. Предложены технические решения по устранению негативного влияния аварийных процессов тиристорного преобразователя на работоспособность электровоза. Проведено математическое моделирование аварийных процессов работы выпрямителя при штатном (типовом) и предлагаемом алгоритмах управления преобразователем. Показаны диаграммы аварийных процессов выпрямителя при типовом и предлагаемом алгоритмах управления на математической модели и в опытных испытаниях электровоза ВЛ80Р на участке Татаурово-Боярский Восточно-Сибирской железной дороги. Приведены количественные и качественные результаты моделирования и эксперимента.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, тяговый двигатель, тиристорный преобразователь, выпрямитель, тиристорные плечи, алгоритм управления, импульсы управления, аварийные процессы, зона регулирования, выпрямленный ток, коэффициент относительной пульсации, коэффициент мощности.

УДК 629.423

О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО (ИРГУПС), С. В. ВЛАСЬЕВСКИЙ (ДВГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, 664074, м. Іркутськ, Росія, вул. Чернишевського 15,
тел.: +7(902)170-24-37, ел. пошта: olegmelival@mail.ru

Далекохідний державний університет шляхів сполучення, 680021, м. Хабаровськ, Росія, вул. Сєришева 47,
тел.: +79145475447, ел. пошта: ulas@festu.khv.ru

АВАРІЙНІ ПРОЦЕСИ НА ПЕРШІЙ ЗОНІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

Стаття розглядає аварійні процеси тиристорного перетворювача (випрямляча) електровозу змінного струму в режимі тяги на першій зоні регулювання випрямленої напруги, що виникають в результаті пропуску імпульсів управління на плечі випрямляча з причини виходу з ладу електронних елементів вихідних підсилювачів системи формування імпульсів СФІ. Запропоновано технічні рішення з усунення негативного впливу аварійних процесів тиристорного перетворювача на працездатність електровозу. Проведено математичне моделювання аварійних процесів роботи випрямляча при штатному (типовому) і запропонованому алгоритмах управління перетворювачем. Показані діаграми аварійних процесів випрямляча при типовому і запропонованому алгоритмах управління на математичній моделі і в дослідних випробуваннях електровоза ВЛ80Р на ділянці Татаурова - Боярський Східно-Сибірської залізниці. Приведені кількісні та якісні результати моделювання і експерименту.

Ключові слова: електровоз змінного струму, тяговий двигун, тиристорний перетворювач, випрямляч, тиристорні плечі, алгоритм управління, імпульси управління, аварійні процеси, зона регулювання, випрямлений струм, коефіцієнт відносної пульсації, коефіцієнт потужності.

Внутрішній рецензент *Костин М. О.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 629.423

O. V. MELNICHENKO (IRGUPS), S. V. VLASEVSKY (DVGUPS)

Irkutsk State University of Railway Transport, 664074, Irkutsk, Russia, 15 Chernyshevskogo Street,
tel.: +7(902) 170-24-37, e-mail: olegmelival@mail.ru

Far Eastern State University of Railways, 680021, Khabarovsk, Russia, 47 Serysheva Street,
tel.: +7(914) 547-54-47, e-mail: ulas@festu.khv.ru

EMERGENCY FIRST PROCESS CONTROL AREA VOLTAGE CONVERTER AC LOCOMOTIVES AND SUPPORT THE OPERATION

The article examines the processes of emergency thyristor converter (rectifier) AC electric traction mode on the first control zone rectified voltage strength resulting from crossing the control pulses on the shoulders of the rectifier because of failure of the electronic components output amplifiers pulse shaping system PSS. Proposed technical solutions to eliminate the negative impact of the NIJ - disturbance thyristor converter to work tiveness electric . The mathematical modeling of emergency processes of the rectifier with a nominal (typical) and the proposed algorithms management converter. Chart shows the disturbance in a typical rectifier and the proposed control algorithms on a mathematical model and experimental tests on a plot of electric VL80R Tataurovo - East Siberian Boyarsky of railways. The quantitative and qualitative results of simulation and experiment.

Keywords: AC electric locomotive, traction motor, thyristor converter, rectifier, thyristor shoulders, control algorithm, control impulses, emergency processes, rectified current, coefficient of relative pulsation, power factor.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013