

**В.Н. Знаенко<sup>1</sup>, О.В. Мельниченко<sup>1</sup>, А.О. Линьков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## **АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ ИХ ВНЕДРЕНИИ**

**Аннотация.** Повышение энергетических характеристик электровозов переменного тока – это актуальная обсуждаемая проблема. Один из вариантов её решения – совершенствование силовой базы электровоза, а именно - выпрямительно-инверторных преобразователей. Современный тиристорный ВИП эксплуатируется более 50 лет, за этим стоят десятилетия непрерывной доработки, испытаний, отказов оборудования и решений по повышению работоспособности преобразователей.

В статье рассмотрены исторические данные о первых опытных электровозах с тиристорными преобразователями. Приведены случаи отказов оборудования при испытаниях трёх опытных образцов электровозов ВЛ80р с плавным регулированием напряжения на тяговых электродвигателях. Представлена статистика отказов за 1969-1972 годы, данные которой свидетельствуют о начальной низкой надёжности тиристорных преобразователей, а также о необходимости доработки проблемных узлов.

Представлены основные проблемные узлы, доработка которых велась в ходе испытаний, к таковым относятся: логическая часть аппаратуры управления, выходные каскады, БУВИП, СФИ, параллельные ветви тиристорных плеч. Также в статье отображены возможные варианты нарушения процесса выпрямления с возмозжными причинами и последствиями аварийной работы, а также случаи нарушения распределения тока по параллельным ветвям тиристорных.

Отображены технические решения, направленные на повышение работоспособности и надёжности тиристорного преобразователя, которые впоследствии привели преобразователь к устойчивой работе, что дало старт к его массовому применению в электровозах переменного тока. В качестве вариантов повышения работоспособности рассмотрены решения: по совершенствованию аппаратуры управления, по резервированию узлов и увеличению мощности силовых тиристорных.

**Ключевые слова:** выпрямительно-инверторный преобразователь, тиристор, электровоз, БУВИП, СФИ, система управления, ВЛ80р, надёжность.

**V.N. Znaenok<sup>1</sup>, O.V. Melnichenko<sup>1</sup>, A.O. Linkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Irkutsk state transport university, Irkutsk, the Russian Federation

## **ANALYSIS OF THE DISADVANTAGES AND METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THYRISTOR CONVERTERS OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE DURING THEIR IMPLEMENTATION**

**Abstract.** Improving the energy characteristics of alternating current electric locomotives is a topical issue under discussion. One of the options for its solution is to improve the power base of an electric locomotive, namely, solutions related to a rectifier-inverter converter. A modern thyristor VIP has been in operation for more than 50 years, behind which there are years of development, testing, equipment failures and solutions to improve the efficiency of converters.

The article discusses the historical data on the first experimental electric locomotives with thyristor converters. Cases of equipment failures during testing of three prototypes of VL80r electric locomotives with smooth voltage regulation on traction motors are presented. The statistics of failures for 1969-1972 are presented, the data of which testify to the low reliability of thyristor converters, as well as the need to refine the problem units.

The main problematic units, the refinement of which was carried out during the tests, are presented, these include: the logical part of the control equipment, output stages, BUVIP, SFI, parallel branches of thyristors in the arm. The article also shows possible variants of the rectification process disturbance with possible causes and consequences of emergency operation, as well as cases of current distribution disturbance along parallel thyristor branches.

Shown are technical solutions aimed at improving the performance and reliability of the thyristor converter, which subsequently led the converter to stable operation, which gave rise to its mass use in AC electric locomotives. The following solutions are considered as options for increasing the operability: to improve the control equipment, redundancy of nodes and increase the power of power thyristors.

**Key words:** rectifier-inverter converter, thyristor, electric locomotive, BUVIP, SFI, control system, VL80r, reliability.

## **Введение.**

Достижение стратегических целей, поставленных президентом нашей страны, связанных с обеспечением вхождения Российской Федерации в число крупнейших экономик мира, увеличением провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей, сложно представить без совершенствования как технологий пропуска поездов, так и самого подвижного состава, один из вариантов которого представлен в [1].

Процесс внедрения нового оборудования на электроподвижной состав, где агрегаты подвергаются различным нагрузкам, работают в условиях повышенной вибрации, динамических воздействий, нестабильности питающего напряжения и др., не может протекать мгновенно. Любое новое оборудование требует отладки, выявления проблемных узлов в ходе их наработки на отказ, накопления опыта, статистических данных, публикаций и решений по установленным проблемам. Только при осуществлении всех вышеперечисленных этапов можно добиться устойчивой работы передовых разработок и надежной работы электровозов, о чем может свидетельствовать опыт советских учёных при разработке и испытаниях тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП).

Современный электрический тяговый подвижной состав переменного тока оборудован тиристорными преобразователями, история применения которых насчитывает уже более чем полвека. На железных дорогах СССР тиристоры были применены в начале 70-х годов для плавного регулирования напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД) 10 опытных электровозов ВЛ60ку [2]. Плавное регулирование на тиристорах отмечено как наиболее перспективное по сравнению с преобразователями на игнитронах и диодах, уступающих по технико-экономическим показателям.

Оборудование логической части аппаратуры преобразователя составляло свыше 1500 элементов [3]. Это в сотню раз больше, чем на более ранних электровозах, что заставляло остро ставить вопрос обеспечения надёжности преобразователя. Учёные столкнулись с массой скептицизма в плане «туманного» будущего использования тиристоров для плавного регулирования напряжения на электровозах. Разработчикам пришлось преодолеть массу критики в адрес новых преобразователей, а также более десяти лет отрабатывать схемные и конструктивные решения по преобразователям и блокам их управления для обеспечения устойчивой работы электровозов. Сложно оценить труд советских ученых, затраченный на решение массы задач в совершенствовании электровозов, благодаря которым железная дорога получила новые электровозы переменного тока с плавным регулированием напряжения.

В 1967 году начались испытания опытного образца магистрального электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения и рекуперативным торможением на тиристорных преобразователях – ВЛ80р. В последующие годы для отработки аппаратуры и проведения испытаний построено ещё несколько опытных образцов данных электровозов. Было бы ошибочно считать, что создание тиристорного преобразователя, его настройка и отладка произошла в короткие сроки, т.к. серийное производство электровозов с их использованием началось только с 1979 года.

После создания тиристорных ВИП и оборудования ими первых электровозов ВЛ80р при проведении испытаний выявлена их низкая надёжность, это повлекло необходимость продолжения доработки проблемных узлов. Это свидетельствует о том, что электровоз выступает как устройство высокой сложности, характеризующееся взаимным влиянием с тяговой сетью, влиянием работы других электровозов, находящихся на одной фидерной зоне, влиянием нетяговых нагрузок и многим другим. Разработка и постройка опытных тиристорных преобразователей для электровозов сопровождалась рядом задач, которые проектировщиками зачастую не могли быть учтены или просчитаны до момента установки их на подвижной состав. Соответственно, для доработки тиристорных преобразователей

требовалось проведение ряда испытаний преобразователя под нагрузкой непосредственно в эксплуатации, а уже затем отработка каких-либо решений.

### Отказы опытных электровозов с тиристорным регулированием выпрямленного напряжения

Надежность первых образцов тиристорных преобразователей была на низком уровне. По данным статистики отказов опытных электровозов за три года эксплуатации, представленных на рис. 1, видно, что 87% всех отказов связаны с тиристорным регулированием [4]. Многочисленные выходы из строя не давали возможность обеспечить высокую работоспособность электровозов с плавным регулированием напряжения, и вопрос её повышения являлся главной проблемой всех учёных и конструкторов страны, связанных с тяговым подвижным составом.

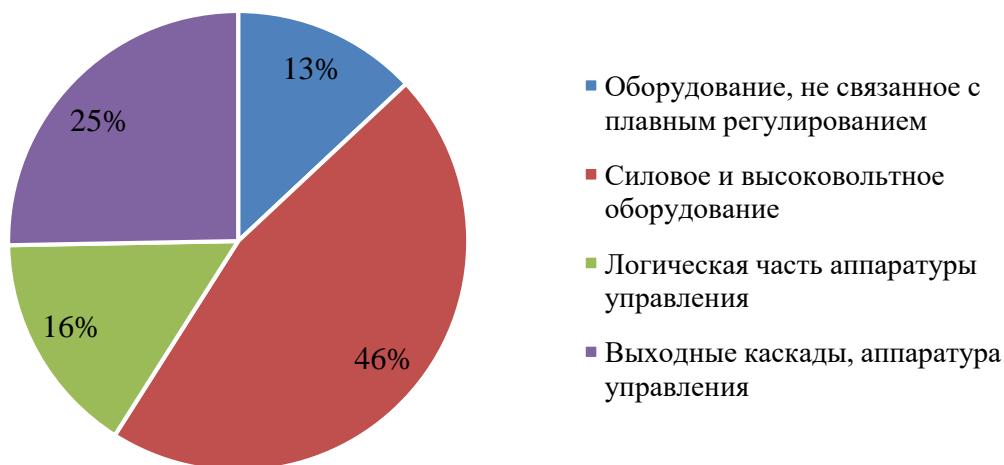


Рис.1. Статистика повреждений оборудования трёх опытных электровозов ВЛ80р за 1969-1972 г.г.

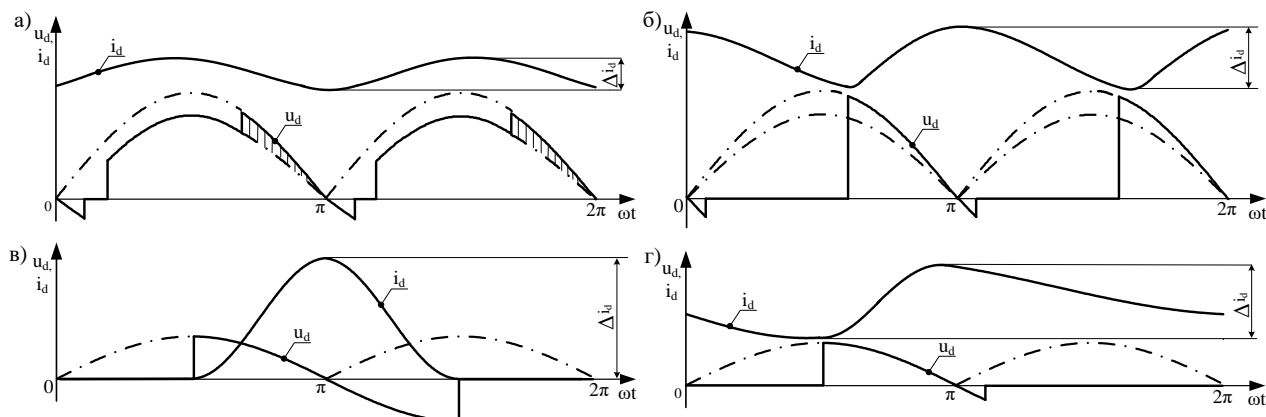
За время опытной эксплуатации накапливались данные об отказах, нарушениях работы преобразователя и системы управления. Один из вариантов отклонения работы преобразователя - это нарушение процесса выпрямления, который, прежде всего, отражается на форме выпрямленного напряжения – рис. 2. На рис. 2 (а) показана форма выпрямленного напряжения для 2-й – 4-й зон, где нарушением процесса регулирования является периодическое автоматическое переключение зон с высшей на низшую и обратно (звонковая работа). При этом напряжение высшей зоны регулирования (заштрихованная часть) то пропадает, то появляется вновь. Указанный режим работы характерен для начальной области регулирования, его последствия приводят к колебаниям тока, реже к динамическим колебаниям в поезде. Для предотвращения такого режима производилась доработка и регулировка блока управления и системы формирования импульсов [5].

Нарушение регулирования в обоих полупериодах, когда выпрямление напряжения начинается сразу с высшей зоны без перехода на низшую представлено на рис. 2 (б). Возникает такое нарушение выпрямления по причине отказа канала  $\alpha_{03}$  в БУВИП. Это приводит к снижению коэффициента мощности электровоза и увеличению пульсации тока тяговых двигателей. Такое нарушение выпрямления является не стационарным процессом, однако зачастую не приводит к тяжёлым отказам оборудования электровоза.

Следующее нарушение заключается в появлении однополупериодного выпрямления и регулировании нулевого контура – рис. 2 (в). При таком режиме работы выпрямленный ток значительно снижается и увеличивается его пульсация, что отрицательно сказывается на работе силового оборудования. Нарушения такого вида возникают при отказах системы формирования импульсов (СФИ), БУВИП, ВИП и др.

К одной из разновидностей форм отказов в режиме выпрямления относится отсутствие выпрямленного напряжения в отдельные полупериоды. Такой вид отказов происходит на 2-й – 4-й зонах регулирования при повреждениях канала  $\alpha_0$  блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем (БУВИП). При однополупериодном выпрямлении – рис. 2

(г), зачастую отсутствует регулирование в нулевом контуре, что приводит к броскам тока. При таких отказах, в большинстве случаев, невозможно вести поезд и машинист электровоза вынужден заказывать вспомогательный локомотив.



**Рис. 2. Кривые токов и напряжений на тяговом двигателе при различных нарушениях процесса выпрямления**

Таким образом, любые повреждения ВИП, как правило, носят тяжелый характер отказа электровоза.

Отказы тиристоров ВИП классифицируются на три вида:

- повреждение под действием тока (прожог), напряжения (пробой) или температуры;
- непринятие нагрузки;
- несвоевременное отпирание.

Прожог или пробой тиристоров наступает по причине превышения допустимого значения, либо высокой скорости нарастания тока или напряжения соответственно. Также причиной прожога может являться повышенный нагрев, когда скорость охлаждающего воздуха ниже минимальной.

Непринятие нагрузки тиристором происходит из-за следующих причин:

- в силовой цепи тиристора ток и напряжение меньше значений, соответствующих включению;
- обрыв силовой цепи или цепей управления, а также их короткое замыкание;
- параметры импульсов управления меньше допустимых значений.

Несвоевременное отпирание тиристоров происходит под действием помех, вследствие превышения напряжения, тока или температуры, а также скорости их изменения в области, где отсутствуют рабочие сигналы управления.

К одной из основных проблем при испытаниях электровозов относится самопроизвольное открытие тиристоров, приводящее к аварийным контурам протекания тока и, как следствие, отказам. Анализируя работу в эксплуатации, разработчики определяли возможные причины таких сбоев в работе электровоза. Так в [6] описан вариант включения части силовых тиристоров из-за несовершенства системы управления. Без решения данной проблемы обеспечение работоспособности преобразователя не представляется возможным.

Наиболее неблагоприятный характер отказа ВИП – это сквозное повреждение плеча. Эксплуатация опытных электровозов позволила выделить основные причины, приводящие к сквозному повреждению:

- повышенное напряжение в контактной сети, которое утяжеляет потенциальные условия работы тиристоров, увеличивает наводимые в цепях управления помехи, уменьшает длительность импульсов управления, что делает более легким условия несвоевременного отпирания тиристоров;
- понижение напряжения в контактной сети и значительное искажение её формы, вызывающее сбой в работе аппаратуры управления;

- повышение нагрузки на тяговые электродвигатели и высокая температура охлаждающего воздуха, способствующая перегреву преимущественно нижних плечей ВИП.

В процессе испытаний опытных электровозов разработчиками установлено, что искажение формы питающего напряжения сказывается на формировании импульсов синхронизации напряжения управления с напряжением сети, формировании нулевых и нулевых задержанных импульсов управления, выдаче сигналов с датчиков угла коммутации. Кроме того, на работу аппаратуры управления влияет и амплитуда питающего напряжения по каналу формирователя нестабилизированных рабочих импульсов управления, выдаваемых непосредственно на усилители ВИП. В экстремальных условиях работы фазы и диапазоны подачи импульсов управления могут нарушаться, а сами импульсы управления могут приводить к сбоям и повреждениям силовых преобразователей, что проявляется в бросках тяговых и тормозных сил, приводящих к динамическим воздействиям в поезде, срабатыванию защит, пробоем ветвей тиристоров [7].

Из-за асимметричной формы питающего напряжения по полупериодам возникают сбои синхрои импульсов. Это, в свою очередь, приводит к резкому изменению минимального угла открытия  $\alpha_0$ . Рост угла открытия приводит к значительному снижению коэффициента мощности, а при снижении угла открытия до такого значения, что потенциальные условия открытия тиристоров оказываются недостаточными, происходит сбой регулирования в режиме тяги. Периодические нарушения такого типа приводили к увеличению продольной динамики поезда, нарушалась работоспособность преобразователей на 2 – 4 зонах регулирования.

Снижение напряжения в контактной сети также отрицательно сказывается на режиме рекуперативного торможения. Такой режим работы характеризовался значительными отклонениями сигналов датчиков угла коммутации по длительности, а также угла запаса по полупериодам питающего напряжения. При углах запаса  $18 - 22^\circ$  в процессе входа в рекуперативный режим следовало почти постоянное опрокидывание инвертора и срабатывание защиты. По результатам поиска причин сбоев, разработчики обнаружили, что при больших углах коммутации и одновременных искажениях формы напряжения сети, применяемые на тот момент датчики угла коммутации выдавали в аппаратуру управления сигналы, длительность которых меньше длительности коммутации. В таких условиях аппаратура управления не могла поддерживать угол запаса постоянным, он уменьшался и приводил к опрокидыванию инвертора.

Выявление причин сбоев в режиме тяги и рекуперативного торможения требовало не только испытаний при различных режимах работы, но и проведение поездок в экстремальных условиях работы системы электроснабжения во избежание возможности возникновения нарушений их работоспособности в процессе эксплуатации. Стал очевиден факт о необходимости принимать во внимание форму напряжения контактной сети в различных режимах её работы с учётом вероятности и длительности нормальных, вынужденных и аварийных режимов.

По причине отсутствия устройств распределения тока по параллельным ветвям тиристоров плеча первых ВИП накапливались отказы отдельных ветвей, вследствие их перегрузки рабочим током ВИП. Так происходит в случаях неравномерного распределения рабочего тока по ветвям – рис. 3 (а), либо при принятии нагрузки не всеми параллельными ветвями плеч – рис. 3 (б). Такие случаи имеют место быть при сбоях аппаратуры управления в случае отказов каналов слежения за  $\alpha_{03}$ ,  $\alpha_0$ ; отказов датчиков угла коммутации; отказов СФИ.

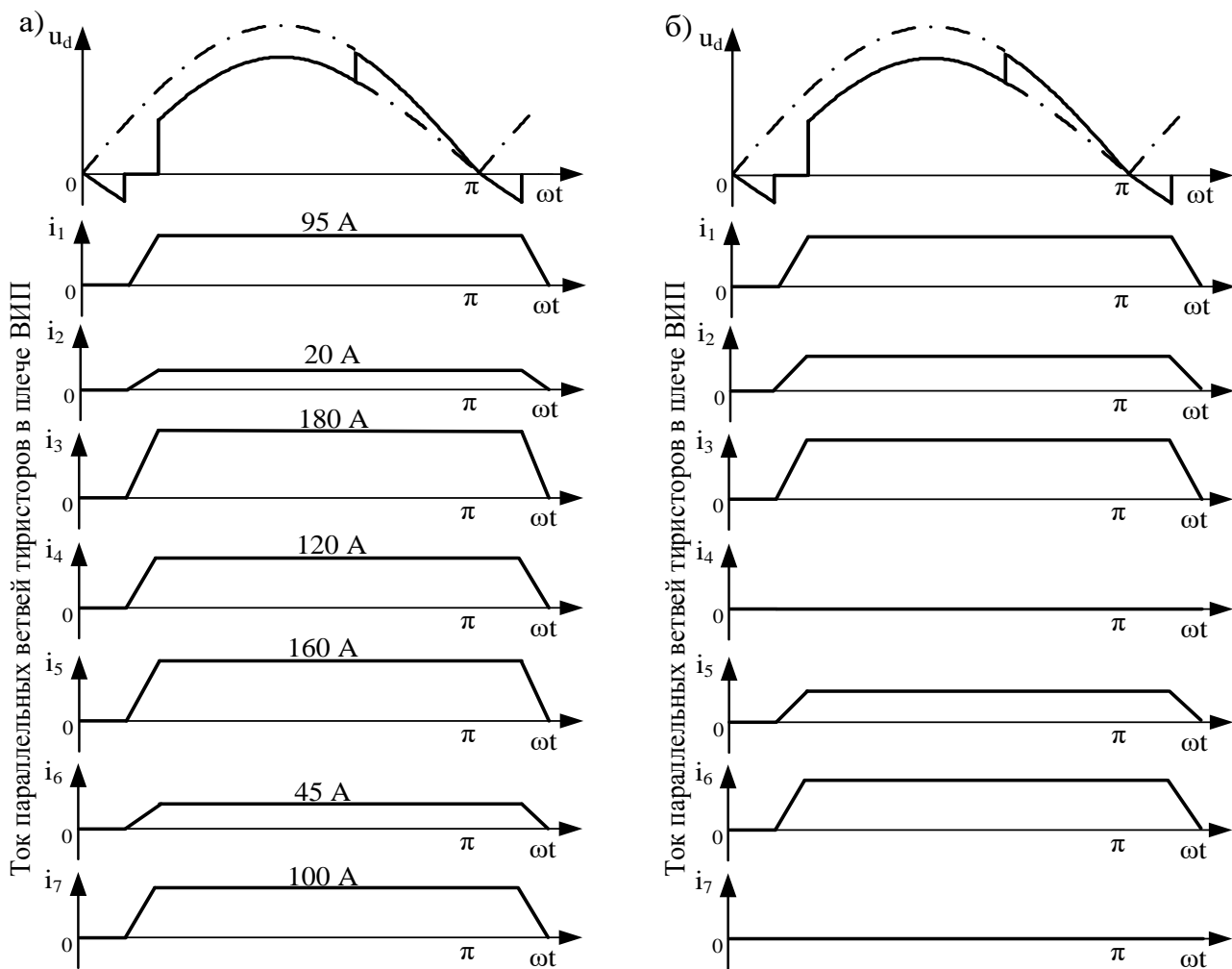


Рис. 3. Диаграммы токов и напряжений при перегрузке отдельных параллельных цепей тиристорov: а) – сильно недогружены ветви 2 и 6; б) – ветви 4 и 7 не принимают нагрузку

### Решения, принятые для повышения работоспособности преобразователя

Система управления тиристорными преобразователями на первоначальном этапе эксплуатации не обладала достаточной надёжностью. Усилиями промышленности некоторые элементы и блоки были заменены или доработаны, в результате повреждения по этим причинам были исключены или сокращены. Так, например, были исключены залипания герконов, работающих в качестве пороговых элементов; устранены повреждения регулировочных сопротивлений кассет, заменены некоторые элементы на более мощные. Однако стоит отметить, что не всегда замена элементов приносила должный эффект, так как замена недостаточно проверенного оборудования на новое, позволяла исправить известную проблему, но нередко приводила к появлению новых повреждений и сбоев.

Опытная эксплуатация, сбор статистических данных и публикация материалов по надёжности элементов ВИП и системы управления позволили учёным накопить достаточную базу знаний и опыта по устранению отказов, повышению работоспособности и надёжности преобразователя.

Один из вариантов повышения работоспособности преобразователя заключается в совершенствовании системы управления. Согласно [8] следует, что наиболее ответственные цепи и элементы системы управления целесообразно резервировать. В местах, где резервирование вызывает технические трудности или большие затраты, необходимо предусмотреть резервирование отдельных блоков и узлов. Исключение ложных переключений тиристорov по причине помех требовало пересмотра параметров цепей

управления. Решение этой проблемы осуществлялось либо подбором характеристик цепей управления таким образом, чтобы помехи не могли открыть тиристор, либо снижением помех в цепях управления. Большое внимание при проектировании системы формирования импульсов преобразователя уделено повышению помехоустойчивости тракта усиления. В импульсных трансформаторах используются экранирующие заземленные обмотки (экраны), цепи питания отделяются от цепей управления, монтаж выполняется по функциональному принципу скрученными попарно проводами. С этой же целью проводились работы по сокращению суммарной длины проводного монтажа.

Другой вариант повышения работоспособности ВИП, рассмотренный в [9], осуществлен за счёт совершенствования формирователей импульсов. Накопленный опыт эксплуатации, привёл к выводу, что в схеме формирователя импульсов наблюдаются систематические отказы конденсаторов, тиристоров, вентилях и др., что нередко приводит к образованию контуров короткого замыкания. С целью улучшения работы формирователя и параметров импульсов управления тиристорами выходные каскады получили гальваническую связь с силовой схемой. Благодаря этому общее количество трудоёмких в изготовлении трансформаторов, используемых для формирователей, снизилось с 54 до 16. В дальнейшем с развитием полупроводниковой техники с учетом известных недостатков был разработан транзисторный формирователь импульсов. Постепенно, с переходом на более совершенные формирователи, система управления преобразователем стала работать более стабильно, что значительно увеличило надежность. Необходимо также отметить, что на качество работы преобразователя влияет и форма импульсов управления, так решения в этом направлении, описанные в [10] внесли значительный вклад в повышении надежности работы преобразователя и электровоза в целом.

Основным узлом преобразователя является силовой тиристор. При опытной эксплуатации электровозов ВЛ80р тиристоры являлись одним из самого часто отказываемого оборудования по причинам нарушения работы системы управления, нарушения распределения тока по параллельным ветвям, а также неудовлетворительных характеристик по току и напряжению, приводивших к пробоем, либо прожогу. Первые преобразователи на тиристорах насчитывали в своем составе 320 силовых полупроводников, что при таком количестве отрицательно влияло на надежность преобразователя. Естественно, что при повышении надежности каждого отдельного элемента оборудования и снижении их общего количества следует повышение надёжности всего устройства. Так, в процессе выпуска электровозов, усилия промышленности были направлены на совершенствование тиристоров - улучшались их параметры, повышался класс по току и напряжению, сокращалось общее количество тиристоров в плече – таблица 1.

**Таблица 1 – Данные тиристоров, применяемых в ВИП**

Показатель	Значение показателя						
	ВИП-1670,2200	ВИП2-2200М	ВИП3-2200М	ВИП-4000	ВИП-5600	ВИП-4000М	
Тип ВИП	ТЛ2-200; ТЛ200	Т2-320	Т500	Т353-800	Т353-800	Т353-800	
Тип тиристора	320, 260	154	110	80	80	64	
Число приборов в установке, шт.	1968 - 1978	1975 - 1984	1976 - 1984	с 1984	С 1999	с 1991	
Период эксплуатации, г.	6 - 10	14 - 15	14 - 15	28 - 32	28 - 32	32 - 33	
Класс прибора	Число включенных: последовательно параллельно	2 – 5 10	2 - 3 7	2 - 3 5	2 – 3 4	2 5	2 4

Для обеспечения надёжной работы преобразователя осуществлялся подбор тиристорov по вольт-амперным характеристикам по двум точкам 800 и 400 А. Для того, чтобы снизить неравномерное распределение рабочего тока по параллельным тиристорам в плече ВИП, были приняты меры по разработке способов принудительного выравнивания токов в параллельных ветвях. Выравнивание осуществлялось с помощью резисторов и индуктивных делителей, ненасыщающихся дросселей, делительных реакторов и других устройств. Равномерное распределение напряжений между последовательно включенными тиристорами каждого плеча и снятие коммутационных перенапряжений обеспечено схемами выравнивания напряжений, состоящими из шунтирующих резисторов и RC-цепей. Одновременно с этим, контуры протекания тока схем выравнивания напряжений и контуры управления отделены друг от друга с целью помехоустойчивости силовой схемы в целом.

Решая вопрос предотвращения опрокидывания инвертора, разработчики изменяли уставку угла запаса. Настройка угла запаса на угол  $27^\circ$  сделала рекуперацию возможной при малых нагрузках (до 300 А на тяговый двигатель), после увеличения до  $32^\circ$  стала возможна рекуперация и при больших токах (до 1000 А). Тенденция увеличения угла запаса позволяла устойчивее осуществлять рекуперативное торможение, но в свою очередь такой метод приводит к резкому снижению коэффициента мощности. Данное решение применяется и в настоящее время на современных отечественных электровозах переменного тока. Однако существует ряд стратегических документов [11,12], характеризующих развитие железнодорожной отрасли РФ, в том числе и тягового подвижного состава по ряду показателей, одним из которых является повышение коэффициента мощности. Сохранение таких углов до настоящего времени, говорит о сохранении значительных потерь мощности, что неизбежно снижает пропускную способность тяговых участков. Поэтому вопрос повышения энергетических показателей тягового подвижного состава является актуальным и сейчас.

Вопрос совершенствования системы управления для преобразователя являлся одним из основных в направлении обеспечения работоспособности ВИП. Один из примеров решения данной проблемы представлен в [13]. Для повышения надежности штатный БУВИП был заменён на цифровой. Переход на цифровую технику был продиктован временем, и по сравнению с предыдущим блоком управления цифровой БУВИП значительно повышал надёжность работы электровоза. Алгоритмы управления тиристорным ВИП в режимах тяги и рекуперативного торможения сегодня морально устарели, не отвечают современным требованиям. Хотя учёными на протяжении последнего десятка лет было разработано, апробировано и опубликовано ряд научных работ по новым алгоритмам работы ВИП электровоза повышающие его энергетические показатели и надёжность работы.

### **Заключение**

Опыт поиска неисправностей, причин отказов и недостатков, допущенных при разработке преобразователей, является ценной информацией для современных перспективных направлений разработок. Анализируя вышеуказанные проблемы и их решения, очевидным становится необходимость усиления внимания к разработке современных силовых преобразователей, систем управления, энергосберегающих алгоритмов, которые обеспечивают резервирование, работоспособность электровоза при вынужденных условиях работы электроснабжения и других аварийных режимах.

Игнорирование разработок по модернизации силовой схемы электроподвижного состава, которое продолжается в последнее время, неизбежно приводит к сохранению положительной динамики отказов электровозов, снижению показателей качественной и количественной работы железной дороги и увеличению затрат на их содержание [14, 15].

Становление электровозов переменного тока – это процесс непрерывный, эволюционный, который с течением времени должен реализовывать свой накопленный опыт, навык и экспертизу. Только тогда удастся добиться совершенства постройки и эксплуатации тягового подвижного состава Российских железных дорог и продолжить развивать другие альтернативы тягового обеспечения.



Исследование выполнено в рамках государственного задания по государственной работе «Разработка математических моделей электрической части электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения и энергосберегающих алгоритмов управления его преобразователями с применением диодно-транзисторного разрядного плеча» №121050600025-2 от 06.05.2021.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Знаенко В.Н. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В.Н. Знаенко, А.О. Линьков, О.В. Мельниченко. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2021 - №1 (45). – С 66 – 75.
2. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями [Текст] / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
3. Мельниченко О.В. Обеспечение работоспособности электровоза в режиме при аварийных режимах выпрямительно-инверторного преобразователя: монография / О.В. Мельниченко. – Иркутск : ИрГУПС, 2014. – 169 с. : ил. ISBN 978-5-98710-248-0
4. Капустин Л.Д., Тесля Г.Т. Тиристорные электровозы ВЛ80р с рекуперативным торможением // Электрическая и тепловозная тяга. 1974. №6 (210). С. 4 – 6. – Текст: непосредственный
5. Капустин Л.Д. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80р в эксплуатации // Л.Д. Капустин, А.С. Копанев, А.Л. Лозановский - М.: Транспорт, 1986 - 240 с. Текст: непосредственный
6. Бурдасов Б.К., Толстых В.А., Янбиков В.Я. Тиристорный преобразователь для электровозов ВЛ85 // Вестник ВНИИЖТ. 1988. №1. С. 20 - 23
7. Капустин, Л.Д. Особенности работы электровозов с тиристорными преобразователями в экстремальных условиях системы электроснабжения [Текст] / Л.Д. Капустин // Электрическое торможение электроподвижного состава: Сб. науч. тр. /Под ред. О. А. Некрасова. - М.: Транспорт, 1984. - С. 57-68.
8. Капустин Л.Д. Обеспечение надежности системы управления электроподвижного состава с тиристорными преобразователями // Вестник ВНИИЖТ. 1975. № 2. С. 5 – 9.
9. Голованов В.А., Горбань В.Н. Сравнительный анализ формирователей импульсов управления тиристорных преобразователей электроподвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 1977. № 7. С. 7 - 10
10. Бурдасов Б.К., Толстых В.А. Система формирования импульсов унифицированного преобразователя переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 1985. №1. С. 12 – 15.
11. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года. – Утв. Указом Президента Российской Федерации № 204 от 07.05.2018 / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2018. – 19 с. – Текст : непосредственный
12. Белая книга ОАО «РЖД» № 769/р от 17.04.2018 «Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года». – Текст : электронный. - URL:[https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya\\_nauchnotekhnologicheskogo\\_razvitiya\\_holdinga\\_rzhd\\_na\\_period\\_do\\_2025\\_goda\\_i\\_na\\_perspektivu\\_do\\_2030\\_goda\\_belaya\\_kniga\\_2018.pdf](https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya_nauchnotekhnologicheskogo_razvitiya_holdinga_rzhd_na_period_do_2025_goda_i_na_perspektivu_do_2030_goda_belaya_kniga_2018.pdf) (дата обращения: 24.03.2021). .
13. Савоськин А.Н., Ефремов А.А., Зверев В.Г., Завьялова Н.Б. Цифровой БУВИП для электровоза ВЛ80р // Вестник ВНИИЖТ. 1985. №2. С. 17 – 20
14. Богинский С. А. Повышение коэффициента мощности электровозов переменного тока за счет новой организации сетевой коммутации плеч выпрямительно-инверторного преобразователя / С. А. Богинский, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 166–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177

15. Устинов Р.И., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Шрамко С.Г., Линьков А.О., Яговкин Д.А. Способ повышения работоспособности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения и устройство для его реализации. Патент RU, no. 2659756: МПК В60L 9/12, В60L 7/16, H02P 7/295, H02M 7/1555, В60L 2200/26, 2018.

## REFERENCES

1. Znaenok V. N., Linkov A. O., Melnichenko O. V. Vypryamitel'no-invertornyy preobrazovatel' elektrovoza na baze IGBT-tranzistorov kak sposob povysheniya propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznoy dorogi [Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT transistors as a way to increase the capacity of railway sections]. Journal of Transsib Railway Studies, 2021, no. 1 (45), pp. 66 – 75

2. Tikhmenev, B. N. *EHlektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* (AC electric locomotives with thyristor converters). Moscow: Transport, 1988, 311 p.

3. Melnitschenko O. V. Obespecheniye rabotosposobnosti elektrovoza v rezhime pri avariynykh rezhimakh vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya : monografiya [Sicherstellung der Funktionsfähigkeit einer Elektrolokomotive im Notbetrieb eines Gleichrichter-Wechselrichter-Umrichters: Monographie] / Irkutsk: IrGUPS, 2014 .- 169 S.

4. Kapustin L.D., Teslya G.T. Tiristornyye elektrovozy VL80r s rekuperativnym tormozheniyem [Thyristor electric locomotives VL80r with regenerative braking]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga*, [Electric and diesel traction]. 1974. No. 6 (210). pp. 4 - 6.

5. L.D. Kapustin, A.S. Kopanov, A.L. Lozanovsky Nadezhnost' i effektivnost' elektrovozov VL80r v ekspluatatsii [Reliability and efficiency of VL80r electric locomotives in operation]. M.: Transport, 1986 - 240 p.

6. Burdasov B.K., Tolstykh V.A., Yanbikov V.Ya. Tiristornyy preobrazovatel' dlya elektrovozov VL85 [Thyristor converter for electric locomotives VL85] // *Vestnik VNIIZhT*. [VNIIZhT Bulletin]. 1988. No. 1. S. 20 - 23

7. Kapustin, L.D. Osobennosti raboty elektrovozov s tiristornymi preobrazovatelyami v ekstremal'nykh usloviyakh sistemy elektrosnabzheniya [Merkmale des Betriebs von Elektrolokomotiven mit Thyristor-Umrichtern unter extremen Bedingungen des Stromversorgungsnetzes] // Sb. nauch. tr. /Pod red. O. A. Nekrasova. [Elektrisches Bremsen von Elektrofahrzeugen: Sa. wissenschaftlich. tr. / Ed. O. A. Nekrasova]. - M.: Transport, 1984.- S. 57-68.

8. Kapustin L. D. Obespecheniye nadezhnosti sistemy upravleniya elektropodvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami [Ensuring the reliability of the control system for electric rolling stock with thyristor converters]. *Vestnik VNIIZhT*. [VNIIZhT Bulletin]. 1975.No. 2. pp. 5 - 9.

9. Golovanov V.A., Gorban V.N. Sravnitel'nyy analiz formirovateley impul'sov upravleniya tiristornykh preobrazovateley elektropodvizhnogo sostava [Comparative analysis of pulse shapers of control of thyristor converters of electric rolling stock]. *Vestnik VNIIZhT*. [VNIIZhT Bulletin]. 1977.No. 7.pp. 7 - 10

10. Burdasov B.K., Tolstykh V.A. Sistema formirovaniya impul'sov unifikirovannogo preobrazovatelya peremennogo toka [Pulse shaping system for unified AC converter]. *Vestnik VNIIZhT*. [VNIIZhT Bulletin]. 1985. No. 1. pp. 12 - 15.

11. O nacional'nykh cel'yah i strategicheskikh zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda № 466r [On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024 № 466r]. Moscow, President of Russian Federation, 2018, 19 p.

12. White Paper of JSCo Russian Railways no. 769 / p dated 04.17.2018 «Strategiya nauchnotekhnicheskogo razvitiya kholdinga «RZHD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda». [“Strategy of the Scientific and Technical Development of the Russian Railways Holding for the Period up to 2025 and the Prospect until 2030”]. Access point: <https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/> (Revised: 25.03.2019)

13. Savoskin A.N., Efremov A.A., Zverev V.G., Zavyalova N.B. Tsifrovoy BUVIP dlya elektrovoza VL80r [Digital BUVIP for the VL80r electric locomotive]. *Vestnik VNIIZhT*. [VNIIZhT Bulletin]. 1985. No. 2. pp. 17 – 20

14. Boginskii S. A., Mel'nichenko O. V., Lin'kov A. O. Povyshenie koeffitsienta moshchnosti elektrovozov peremennogo toka za schet novoi organizatsii setevoi kommutatsii plech VIP [Increasing AC locomotive power factor by reorganizing line commutation of the RIC arms]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 166–177. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177

15. Ustinov R. I., Melnichenko O. V., Portnoi A. Yu., Shramko S. G., Linkov A. O., Yagovkin D. A. Sposob povysheniya rabotosposobnosti elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya i ustroystvo dlya yego realizatsii [Ein Verfahren zur Leistungssteigerung von Wechselstrom-Elektrolokomotiven im regenerativen Bremsbetrieb und eine Vorrichtung zu seiner Umsetzung]. Patent-RU, Nr. 2659756: IPC B60L 9/12, B60L 7/16, H02P 7/295, H02M 7/1555, B60L 2200/26, 2018.

### **Информация об авторах**

*Знаенок Вячеслав Николаевич* – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: znaenock@yandex.ru

*Мельниченко Олег Валерьевич* – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru

*Линьков Алексей Олегович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: linkovalex@mail.ru

### **Authors**

*Vyacheslav Nikolaevich Znaenok* – Postgraduate Student of the department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: znaenock@yandex.ru

*Oleg Valerievich Melnichenko* – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru

*Aleksey Olegovich Linkov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: linkovalex@mail.ru