

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧАМ ВИП ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЭД

В.Н. Знаенко¹, О.В. Мельниченко², А.Ю. Портной³, А.О. Линьков⁴

¹ аспирант, зав. лаб. каф. «ЭПС» ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Иркутск

² д.т.н., профессор, зав. каф. «ЭПС», ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Иркутск

³ д.т.н., профессор каф. «ФМиП», ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Иркутск

⁴ к.т.н., доцент каф. «ЭПС», ФГБОУ ВО ИрГУПС, г. Иркутск

***Аннотация.** При разработке энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом необходимо обеспечить равномерное распределение токов по параллельно соединенным ветвям в его плечах. В статье рассмотрены способы достижения симметрии токов при параллельном соединении, применяемые в плечах ВИП4000М, а также используемые в преобразователях за рубежом. Предложен и испытан на электровозе Э5К-015 способ подвода тока к плечам ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по ветвям без применения специальных выравнивающих устройств.*

***Ключевые слова:** электровоз переменного тока; выпрямительно-инверторный преобразователь; параллельное соединение; IGBT; работоспособность.*

В условиях интенсификации грузового движения по железнодорожным магистралям Восточного полигона вопрос необходимости обеспечения мощным и энергоэффективным тяговым подвижным составом является актуальным. Энергоэффективность электровозов переменного тока связана с работой их преобразователей. Сегодня самые современные серии грузовых электровозов «Ермак» оборудованы выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) на базе тиристорov. Длительная коммутация тиристорov и существующие алгоритмы работы ВИП, приводят к значительному углу сдвига фаз между током и напряжением в контактной сети (КС), генерации в неё реактивной мощности и

просадкам напряжения в КС [1]. В результате коэффициент мощности современных электровозов переменного тока составляет не более 0,8 в режиме тяги и 0,65 в режиме рекуперативного торможения [2], что не отвечает требованиям ГОСТ Р 55364-2012, по обеспечению коэффициента мощности электровоза переменного тока в продолжительном режиме тяги не менее 0,9 [3].

Современной альтернативой ВИП на базе тиристоров и алгоритмам его управления является ВИП на базе IGBT-транзисторов, разработанный учеными ИрГУПС. Согласно исследований [4-7] при работе ВИП на базе IGBT-транзисторов, коэффициент мощности электровозов переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения составляет не менее 0,95, а просадки напряжения в КС при пропуске поездов снижаются втрое. На рисунке 1 представлены диаграммы токов и напряжений в первичной обмотке тягового трансформатора (ТТ) электровоза при работе тиристорного (рис.1 а) и транзисторного (рис.1 б) ВИП [6].

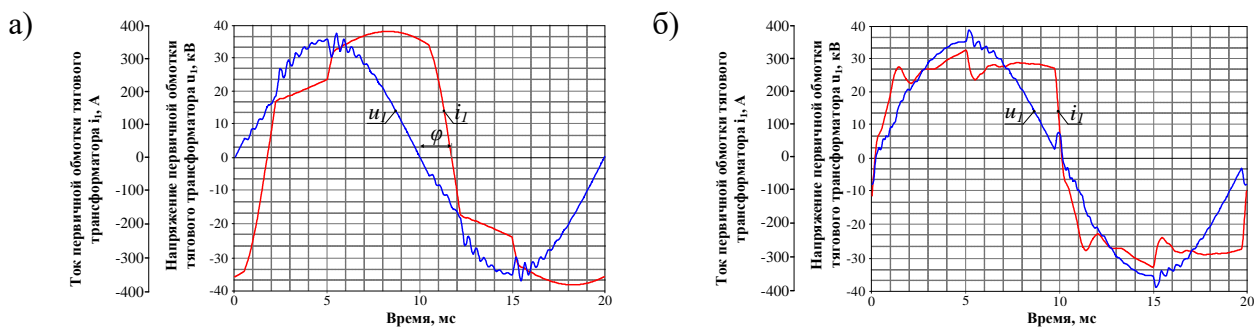


Рисунок 1 – Осциллограммы напряжения и тока в первичной обмотке ТТ при работе электровоза с тиристорным (а) и транзисторным (б) ВИП

Использование современной силовой базы в преобразователях ТПС позволит более рационально расходовать электроэнергию из сети, что обеспечит увеличение количества пар поездов на участках железных дорог и снижение межпоездного интервала до 5 минут, также способствуя более интенсивному развитию пропуска поездов по технологии «Виртуальной сцепки» [8]. Опираясь на вышеприведенное, следует, что рассмотрение вопросов построения ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов с коллекторными ТЭД актуально.

Значимым этапом конструирования ВИП является разработка его плеч. Для обеспечения заданного запаса по току в плечах ВИП применяется параллельное соединение силовых полупроводников. Их количество определяется по формуле (1):

$$m = \frac{I}{I_{\text{п}} \cdot k_I}, \quad (1)$$

где I – ток плеча преобразователя, А;

$I_{\text{п}}$ – предельный ток полупроводника, А;

k_I – коэффициент использования полупроводников по току.

Для большинства эксплуатируемых на Восточном полигоне электровозов переменного тока характерна схема потележечного регулирования силы тяги, когда два тяговых электродвигателя (ТЭД) параллельно подключены к одному ВИП. При такой схеме в плечах ВИП протекает двойной ток ТЭД, и в них соединены параллельно 4 ветви, которые содержат в себе силовые полупроводники, их снабберные цепи и цепи выравнивания напряжения и токов.

При параллельном соединении полупроводников необходимо решать задачу обеспечения равномерного распределения тока. В плечах ВИП4000М для этого применены три решения: подбор тиристоров по ВАХ, включение последовательно в цепи выравнивающих устройств – индуктивных делителей и диагональный подвод тока [9].

Подбор полупроводников по ВАХ характеризуется значительными трудозатратами и при этом не исключает человеческий фактор. Для транзисторного ВИП подбор IGBT-транзисторов по ВАХ осуществляется заводом их изготовителем.

Индуктивные делители бывают с магнитной связью, как, например, в выпрямительной установке возбуждения ВУВ-24, либо без магнитной связи, как в плечах ВИП-4000М. Установка индуктивных делителей увеличивает индуктивность в цепи и ведёт к повышению перенапряжений, величина которых может оказаться критичной для IGBT-транзисторов, характеризующихся высокой скоростью коммутации.

Диагональный подвод тока заключается в подключении шины переменного тока к одной крайней параллельной ветви плеча, а шины постоянного тока - к противоположной. Диагональный подвод обеспечивает равный токовый путь между собой для двух крайних ветвей и для двух внутренних, о чём отмечается в работе [10], однако между крайними и внутренними ветвями разброс тока остается значительным, что делает данное решение неэффективным.

Внимание к способу подводу тока также уделяется в зарубежной практике построения преобразовательной техники на базе IGBT-транзисторов. С целью получения равномерного распределения токов используют специальные

конструкции токоведущих шин [11-14]. Так, например, группой инженеров Hitachi Ltd предложено конструктивное решение соединения фазных модулей электрического силового преобразователя с параллельными плоскими пластинчатыми шинами, в которой шины с противоположным направлением течения тока расположены рядом друг с другом [11]. Такое расположение позволяет существенно снизить индуктивность схемы соединения соответствующих полупроводниковых модулей и улучшить распределение токов по параллельно включённым силовым полупроводникам. На рисунке 2 показана упрощенная принципиальная схема и конструктивное исполнение фазного модуля.

Преимущество такой схемы соединений с параллельными плоскими шинами состоит в том, что изменения магнитного потока в шинах с противоположным направлением течения тока взаимно компенсируют друг друга и не проявляются на выходе схемы, уменьшая таким образом взаимоиндукцию проводников.

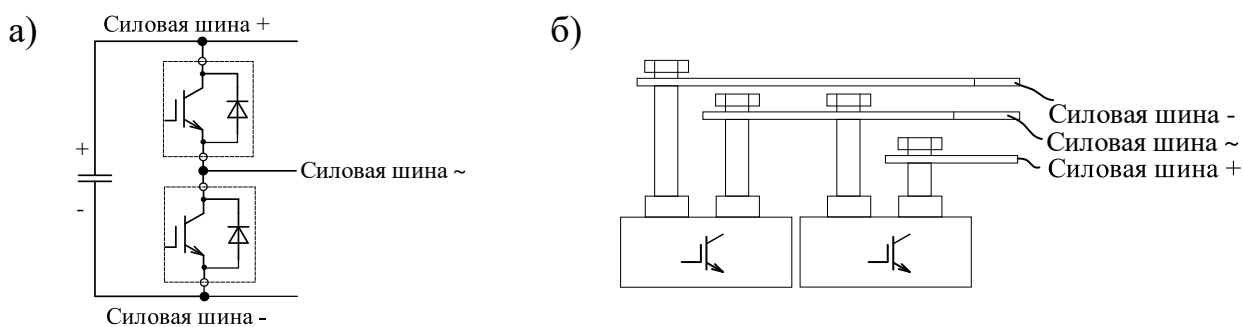


Рисунок 2 – Упрощенная принципиальная схема (а) и конструктивное исполнение (б) одной фазы электрического преобразователя с параллельными плоскими пластинчатыми шинами

Недостатком конструкции является ограниченность ее применения только для фазовых сборок с модульным исполнением IGBT-транзисторов. В преобразователе с IGBT-транзисторами вида Press-pack, применять такую схему соединения нецелесообразно, так как удаленность силовых выводов между собой, вызванная значительными габаритами радиаторов охлаждения, приведёт к изменению строгой геометрии, предложенной в фазовом модуле, и ликвидации эффекта, обеспечивающего снижение индуктивности силовой цепи.

В итоге существующие выравнивающие устройства неприменимы для ВИП электровоза переменного тока на базе IGBT-транзисторов. При

проектировании силового плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов поставлена цель разработать способ подвода тока, обеспечивающий равномерное распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств. Данная цель достигнута в ходе исследований, описанных в [15] - разработан способ подвода тока к плечу ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов [16]. Разработанный способ подвода тока представлен на примере плеча *VT7* на рисунке 3.

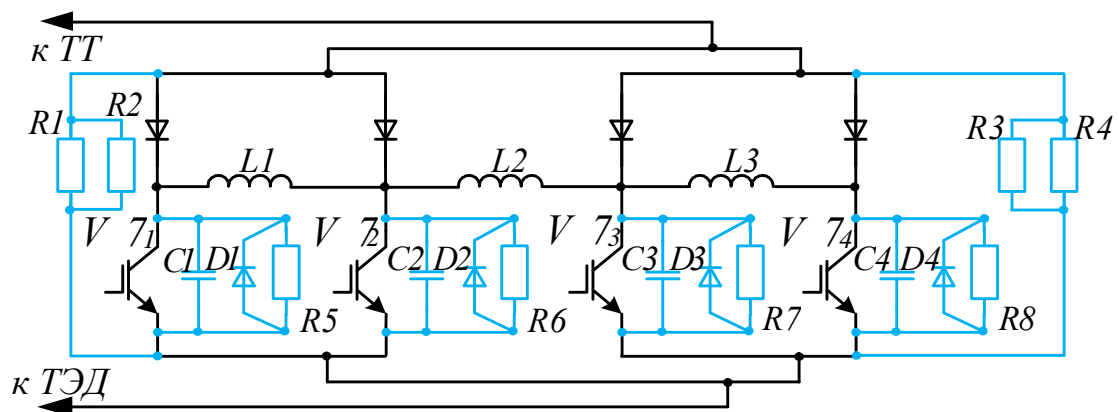


Рисунок 3 – Предложенный способ подвода тока к плечу ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по параллельным ветвям

В данной работе поставлена цель выполнить испытание предложенного технического решения на электровозе Э5К-015, приписанного к эксплуатационному локомотивному депо Иркутск-Сортировочный Восточно-Сибирской железной дороги и оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов. Для этого шинный монтаж плеч ВИП электровоза Э5К-015 на базе IGBT-транзисторов выполнен в соответствии с предложенным способом. Исследования распределения токов по параллельным ветвям осуществлено на примере плеча *VT7*, на каждую параллельную ветвь которого установлены пояса Роговского (*T1-T4*) LEM ART-D22 D125. На рисунке 4 представлена упрощенная силовая схема тележки электровоза Э5К-015, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока к плечам. Сигнал с поясов Роговского после интегрирования фиксировался с помощью ЭВМ, а также цифровым осциллографом Tektronix TDS 2024C. Пояс Роговского, их размещение на ветвях плеча ВИП и вывод осциллограмм представлены на рисунке 5.

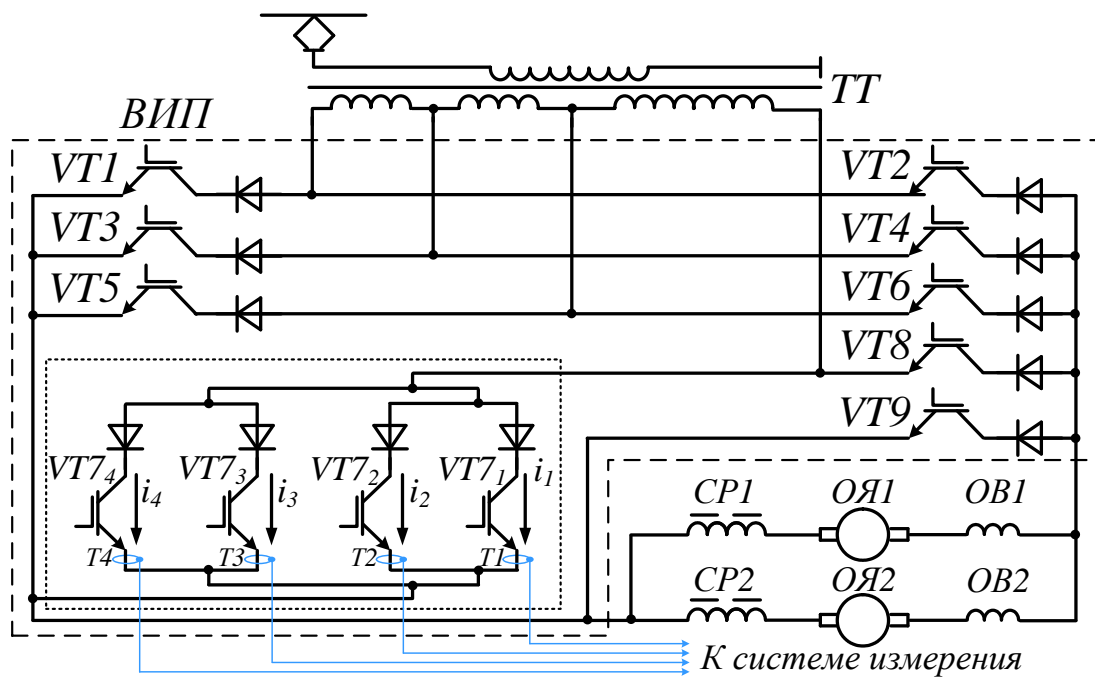


Рисунок 4 - Упрощенная силовая схема тележки электровоза, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока к плечу VT7

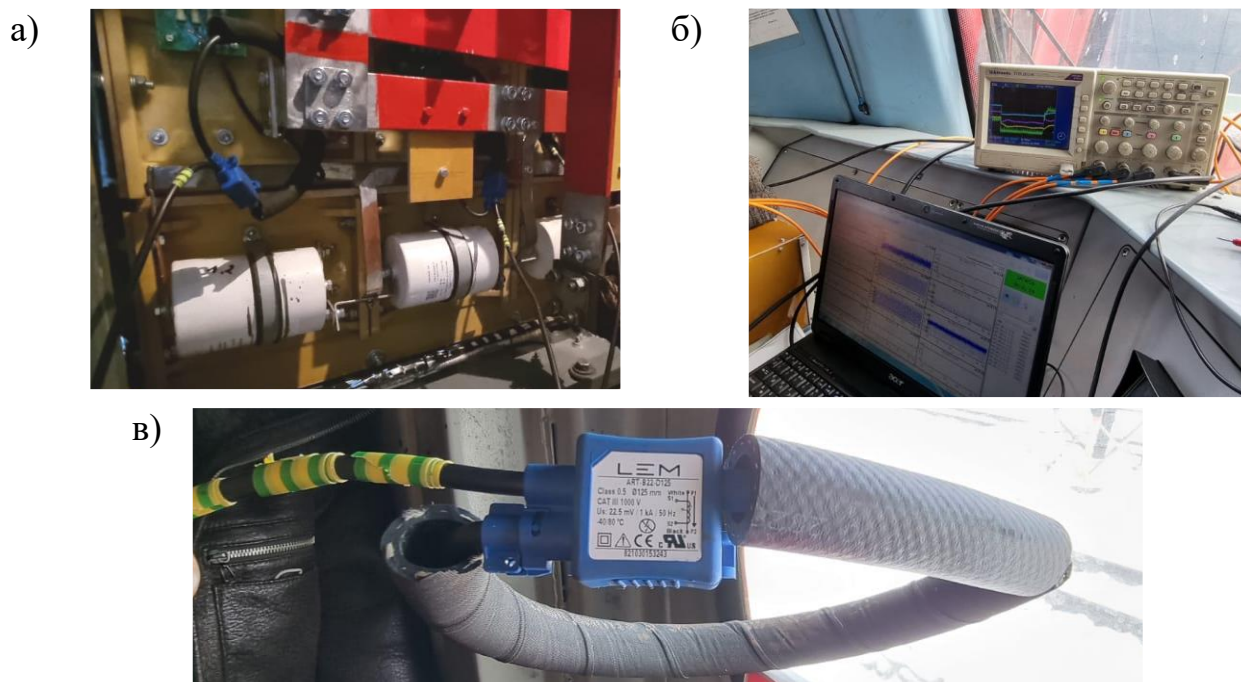


Рисунок 5 – Испытание предложенного способа подвода тока к параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов на электровозе Э5К-015:
 а) – установленные пояса Роговского на параллельные ветви плеча ВИП;
 б) – вывод значений на ЭВМ и осциллограф Tektronix TDS 2024;
 в) – пояс Роговского LEM ART-D22 D125

Анализ распределения токов по параллельным ветвям плеча VT7 ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода выполнен в ходе опытной поездки электровоза Э5К-015 на 3.5 зоны регулирования напряжения. Полученные осциллограммы представлены на рисунке 6.

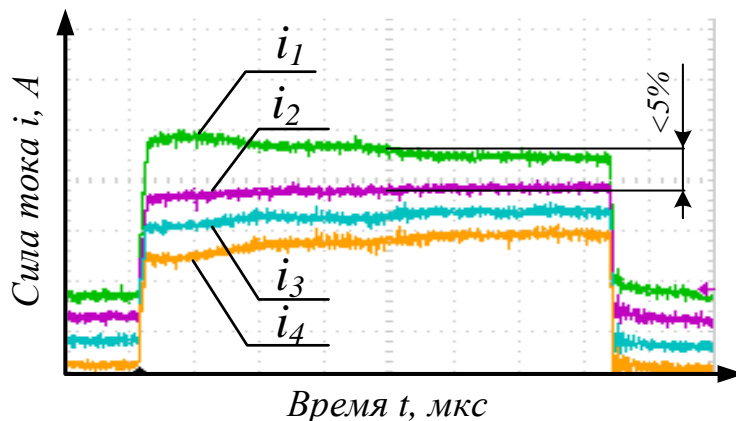


Рисунок 6 – Диаграммы распределения тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с предложенным способом подвода тока

Исходя из результатов испытания, представленных на рисунке 6, можем наблюдать удовлетворительное распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов: в течение периода проводящего состояния разброс между токами не превышает 5 %. Таким образом, предложенный способ подвода тока позволяет обеспечить равномерное распределение токов по параллельным ветвям без применения специальных выравнивающих устройств в цепи.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Топология подключения силовых шин к ВИП на базе IGBT-транзисторов оказывает влияние на распределение токов по параллельно включённым силовым полупроводникам;

2. Диагональный способ подвода тока к плечам, используемый в ВИП4000М, не обеспечивает равномерное распределение токов по ветвям в плечах ВИП на базе IGBT-транзисторов;

3. Предложен способ подвода тока к плечам ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по параллельным ветвям без применения выравнивающих устройств, который по результатам испытаний на электровозе Э5К-015 подтвердил свою эффективность: разброс токов не превышает 5%.

Список использованных источников

1. Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей / В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 2(78). – С. 33-41. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).33-41.
2. Томилов, В. С. Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока / В. С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 138-144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.
3. ГОСТ Р 55364-2012. Электровозы. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 36 с. – Текст : непосредственный.
4. Знаенок В. Н. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 66-75.
5. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46-51.
6. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мельниченко О.В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристоров и IGBT-транзисторов // Известия Транссиба, 2022. № 3 (51). С. 112–125.
7. Повышение качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями в режиме тяги / П.В. Григоренко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.С. Самойлова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4(64). – С. 42-54. – DOI: 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.
8. Бушуев, С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В.

Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 1-20. – DOI 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.

9. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): Руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2005. 125 с.

10. Некрасов О.А., Лисицин А.Л., Мугинштейн Л.А., Рахманинов В.И. Режимы работы магистральных электровозов. М.: Транспорт, 1983. 231 с.

11. Патент № 2190919 С2 Российская Федерация, МПК H02M 7/219, H02M 7/00, H02M 7/04. Силовая цепь электрического силового преобразователя : № 99109135/09 : заявл. 27.04.1999 : опубл. 10.10.2002 / С. Ито, К. Наката, А. Койанаги [и др.].

12. Колпаков, А. Многослойная шина и модули SEMISTACK от SEMIKRON / А. Колпаков // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 32-36.

13. Патент № 2546979 С1 Российская Федерация, МПК H02M 7/487. Многослойная шина для силового преобразователя и силовой преобразователь : № 2013144660/07 : заявл. 07.10.2013 : опубл. 10.04.2015 / Я. Ли, Х. Гань, С. Вэнь, Ц. Ин ; заявитель ДЕЛЬТА ЭЛЕКТРОНИКС, ИНК.

14. Патент № 2701870 С1 Российская Федерация, МПК H05K 7/14, H01L 25/11. Фазный модуль для полупроводникового преобразователя электроэнергии : № 2018139471 : заявл. 24.03.2017 : опубл. 02.10.2019 / Ш. Бойгк, Ю. Бемер, Р. Клеффель, Э.У. Краффт, Я. Вайгель ; заявитель СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛШАФТ.

15. Знаенок, В. Н. Разработка способа подвода тока к плечу выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза на базе IGBT-транзисторов / В. Н. Знаенок, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2024. – № 3(75). – С. 10-19.

16. Патент № 2808309 С1 Российская Федерация, МПК B60L 9/12, H02M 7/219, H02G 5/02. Способ подключения системы токопроводящих шин к параллельным ветвям плеча преобразователя однофазно-переменного тока : № 2023112388 : заявл. 11.05.2023 : опубл. 28.11.2023 / В. Н. Знаенок, А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения.