

УДК 629.423.1

Разработка способа подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак»

В. Н. Знаенко

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Для цитирования: Знаенко В.Н. Разработка способа подвода тока к плечам выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 801–813. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-801-813

Аннотация

Цель: разработать способ подвода тока, обеспечивающий его равномерное распределение по параллельным ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств для электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом. **Методы:** построена подключенная через управляемый силовой ключ к источнику питания физическая модель четырехтранзисторного плеча ВИП, на которой проводился анализ распределения токов при различных способах его подвода к параллельным ветвям. **Результаты:** получены и проанализированы диаграммы распределения токов по параллельным ветвям плеча при различных способах подвода тока, исследовано влияние топологии подключения силовых шин плеча на параметры цепи. Разработан способ подвода тока к плечу ВИП, обеспечивающий разброс токов по ветвям не более 5%. **Практическая значимость:** результаты могут использоваться при построении ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов серии «Ермак», что позволит увеличить пропускную и провозную способность тяговых участков Восточного полигона.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзисторы, параллельное соединение, работоспособность, выравнивание токов

Введение

Энергоэффективность и энергосбережение относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации [1]. По данному направлению учеными Иркутского государственного университета путей сообщения разработан выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) на базе IGBT-транзисторов для современных отечественных электровозов переменного тока. Его внедрение на тяговый подвижной состав позволит электровозам работать

с коэффициентом мощности 0,95 в режимах тяги и рекуперативного торможения, что значительно превышает энергетические показатели электровозов с тиристорным ВИП (рис. 1) [2, 3].

С применением ВИП на базе IGBT-транзисторов втрое снизятся просадки и искажения напряжения в контактной сети (КС) при пропуске тяжеловесных поездов [4, 5]. Это позволит без усиления системы электроснабжения сократить межпоездной

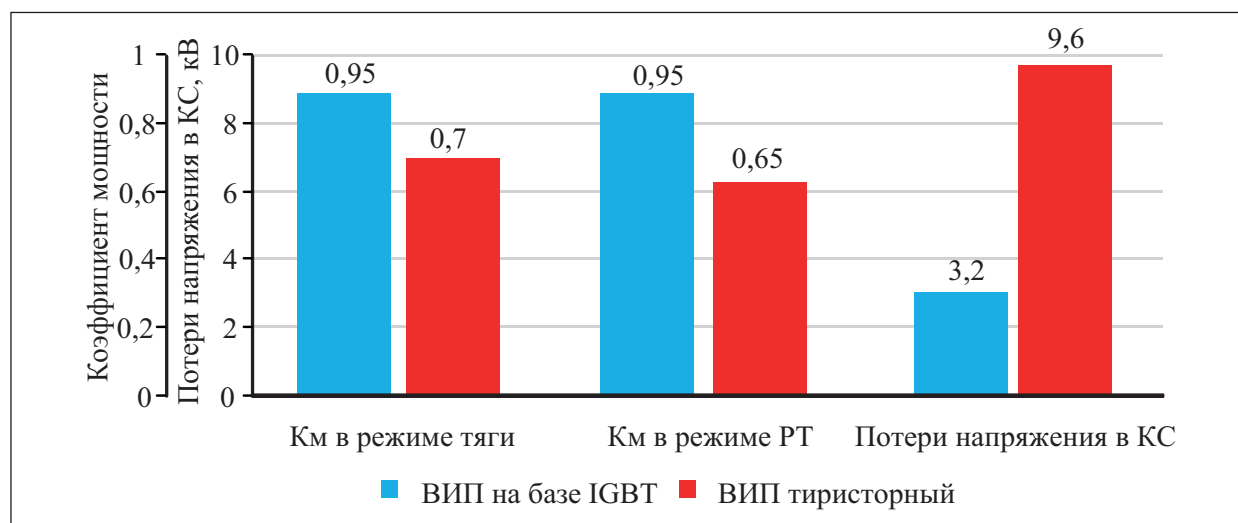


Рис. 1. Диаграмма сравнения показателей электровозов с ВИП на базе тиристоров и IGBT-транзисторов

интервал, увеличить количество пар поездов на участке, эффективнее использовать технологию «Виртуальная сцепка», что сегодня особенно важно в условиях постоянного увеличения грузооборота по железнодорожным магистралям.

Актуальным является рассмотрение вопросов построения ВИП на базе IGBT-транзисторов. Одна из важнейших задач — разработка конструкции плеча преобразователя с параллельным соединением IGBT-транзисторов.

Параллельное соединение силовых полупроводниковых приборов выполняется с целью обеспечить безотказное протекание по плечу ВИП тока необходимой величины. Их количество определяется по формуле (1):

$$m = \frac{I}{I_n \cdot k_I}, \quad (1)$$

где I — ток плеча преобразователя, А;

I_n — предельный ток полупроводника, А;

k_I — коэффициент использования полупроводников по току.

Разработчики при построении преобразователей для различных нужд предпочитают

соединять параллельно не более двух IGBT-транзисторов. Однако их мощность лимитирована, тогда появляется необходимость увеличивать количество параллельных ветвей, при этом нужно решить задачу обеспечения равномерного распределения токов по параллельным ветвям.

Способы выравнивания токов

Используя опыт отечественной практики построения преобразователей электровозов переменного тока, рассмотрим технические решения, направленные на выравнивание токов [6–12].

Одним из таких решений является подбор полупроводников по ВАХ [6–8]. Для этого их подразделяют на группы в зависимости от суммарной величины падения напряжения при предельном токе и токе 0,25 либо 0,5 от предельного. Способ подбора является трудозатратным, имеет зависимость от человеческого фактора и создает необходимость иметь значительный резерв полупроводников.

Другим приемом снижения неравномерности распределения токов является

ся включение последовательно в каждую параллельную ветвь специальных выравнивающих устройств — индуктивных делителей [9–12]. Различают индуктивные делители без магнитной связи (рис. 2а) и с магнитной связью (рис. 2б).

Делитель тока с магнитной связью работает следующим образом: при неравенстве токов в параллельных ветвях в сердечнике делителя наводится магнитный поток Φ , генерирующий в обмотке делителя с меньшей величиной тока ЭДС e_k , которая суммируется с падением напряжения на полупроводнике, улучшая потенциальные условия для протекания тока:

$$e_k = \frac{d\Phi}{dt} \cdot 2\omega, \quad (2)$$

где $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока, Вб/с;

ω — количество витков обмотки делителя.

Преимущество делителей с магнитной связью заключается в том, что магнитный поток в сердечниках возбуждается только при разности токов в параллельных ветвях, однако их применение значительно увеличивает габариты преобразователя, именно поэтому такое решение не применяется в мощных установках. К тому же при выходе из строя одного из полупроводников работа схемы выравнивания нарушается.

Делители без магнитной связи обладают достаточно малыми размерами и позволяют применять их при большом количестве параллельных ветвей. Принцип действия основан на том, что с помощью катушек индуктивности в каждую параллельную ветвь вводится добавочная выравнивающая ЭДС e_k , пропорциональная скорости изменения тока i_k данной ветви:

$$e_k = L \cdot \frac{di_k}{dt}, \quad (3)$$

где L — индуктивность делителя, Гн;

di_k/dt — скорость изменения тока, А/с.

Недостаток использования индуктивных делителей заключается в увеличении нежелательной индуктивности цепи и снижении КПД преобразователя, вызванном дополнительными потерями на делителях.

Перечисленные выше решения дорабатывались, совершенствовались в ходе испытаний и опытной эксплуатации тиристорных преобразователей на электровозах переменного тока и сегодня учтены в конструкции современных локомотивов, например, в ВИП-4000М и ВУВ-24 электровозов серии «Ермак» [13]. Известно, что надежность данных преобразователей находится на удовлетворительном уровне. Абсолютно противоположная ситуация с их энергоэффективностью, которая сегодня

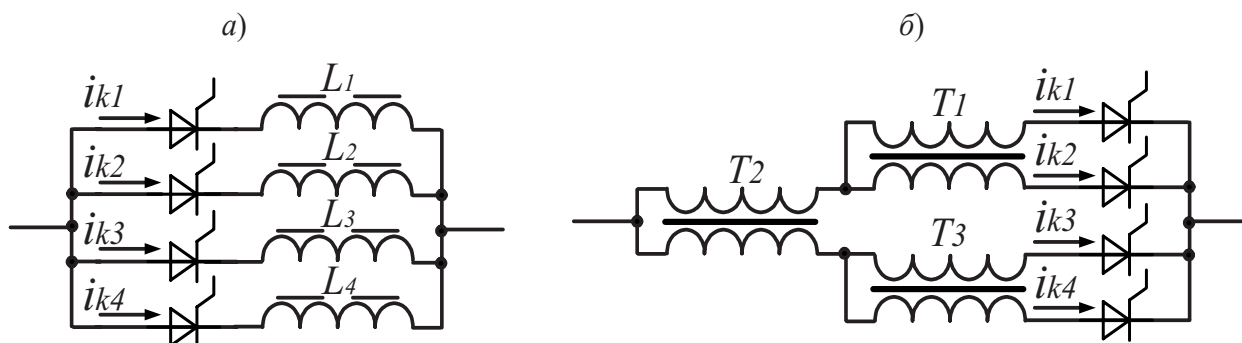


Рис. 2. Принципиальные схемы включения в цепь параллельных СПП индуктивных делителей:

а — без магнитной связи; б — с магнитной связью

сдерживает передовые технические решения пропуска поездов и обусловлена устаревшей силовой базой — тиристорами. Переход на полностью управляемые полупроводники (IGBT-транзисторы) продиктован временем. При их внедрении вопросы неравномерности распределения токов по параллельным ветвям обязательно должны учитываться, как и разрабатываться новые технические решения, учитывающие особенности работы IGBT-транзисторов в коллекторных приводах отечественных электровозов.

Основной грузооборот на Восточном полигоне осуществляется электровозами серии «Ермак», в большинстве которых к ВИП подключено параллельно два тяговых электродвигателя (ТЭД). Согласно формуле (1) в плече необходимо предусмотреть четыре параллельные ветви (рис. 3). Применение IGBT-транзисторов обуславливает быстротечность коммутационных процессов, что

обостряет проблему выравнивания токов по параллельным ветвям плеча. Включение индуктивных делителей в цепь не является для них эффективным, так как приводит к дополнительным перенапряжениям IGBT-транзисторов, способствуя их пробоем. Идентичность ВАХ для параллельно соединенных ветвей обеспечивается подбором IGBT-транзисторов из одной партии уже на заводе, при их изготовлении и сборке. Однако, как показывает практика, этого далеко не достаточно. На симметрию токов значительно влияет топология подключения силовых шин. Целью данной работы является разработка способа подвода тока, обеспечивающего его равномерное распределение по параллельным ветвям плеча ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств.

Для этого в лаборатории ИрГУПС была построена модель плеча ВИП с четырьмя па-

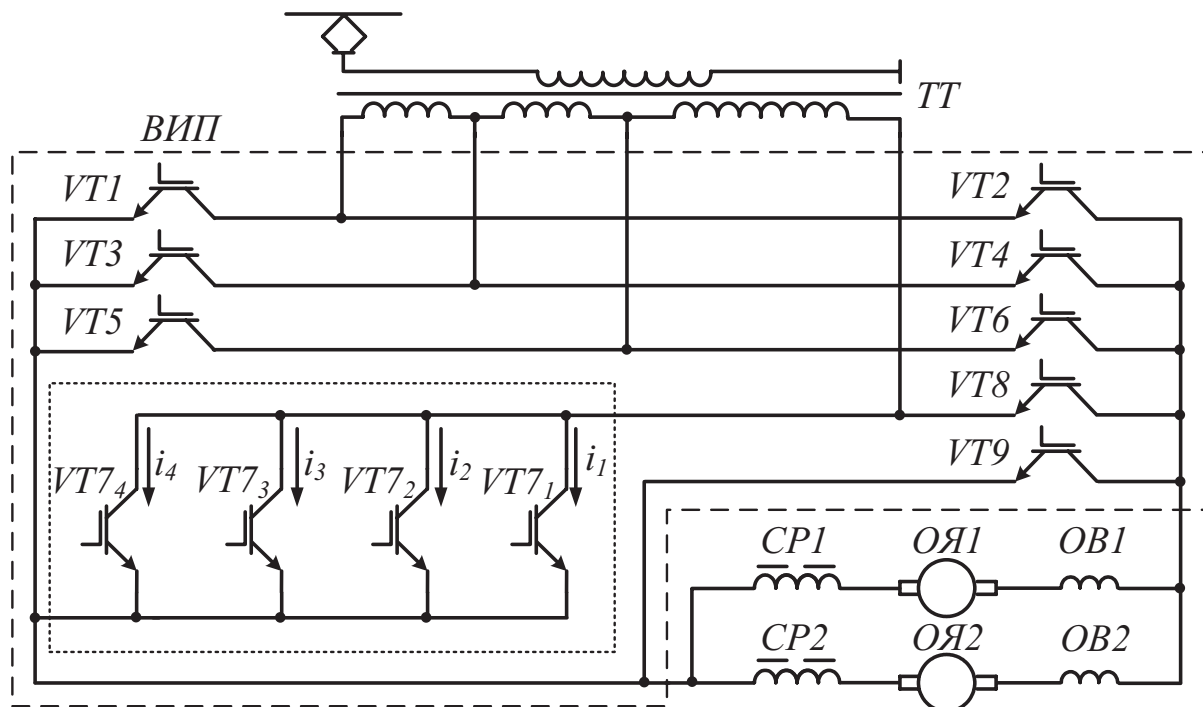


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема тележки электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов

раллельными ветвями. К модели плеча прикладывается постоянное напряжение, фиксируется изменение токов по ветвям в течение периода проводящего состояния, после чего анализируются полученные кривые. Чтобы исключить влияние на распределение токов таких факторов, как разброс ВАХ и задержки в цепях управления, ветви плеча выполнены из медных проводников с сохранением геометрических размеров, аналогичных преобразователю электровоза. На каждой ветви модели плеча закреплены пояса Роговского Т1–Т4, фиксирующие изменение токов i_1 – i_4 в соответствующей ветви. Сигнал с поясов преобразуется и выводится на цифровой осциллограф Tektronix TDS 2024C. Так как пояс Роговского фиксирует только изменение тока, то есть лишь моменты открытия и запираания модели плеча, то для получения диаграмм протекания токов в течение всего периода проводящего состояния плеча сигнал с них преобразуется интегратором. Предварительно все пояса апробированы на одном проводнике, подтверждено отсутствие расхождений при

измерении. В целях исключения помех подвод сигнала от поясов Роговского выполнен из коаксиального кабеля. Моделирование открытия и запираания плеча выполняется с помощью силового ключа VT , выполненного на базе MOSFET-транзистора IRF3205. Разработанная принципиальная схема исследования влияния конструкции подвода тока на распределение токов по параллельным ветвям приведена на рис. 4.

Исследование распределения токов по параллельным ветвям плеча при различных способах его подвода

Из существующего уровня техники известны диагональный и односторонний способы подводы тока [14]. Диагональный способ предполагает подключение токоведущих шин к первой и последней параллельным ветвям плеча. Упрощенно подвод тока представлен в схеме плеча $VT7$ на рис. 3. При одностороннем способе токоведущие шины подключены к коллекторному и эмиттерному выводам одной крайней ветви. Упрощенное графическое

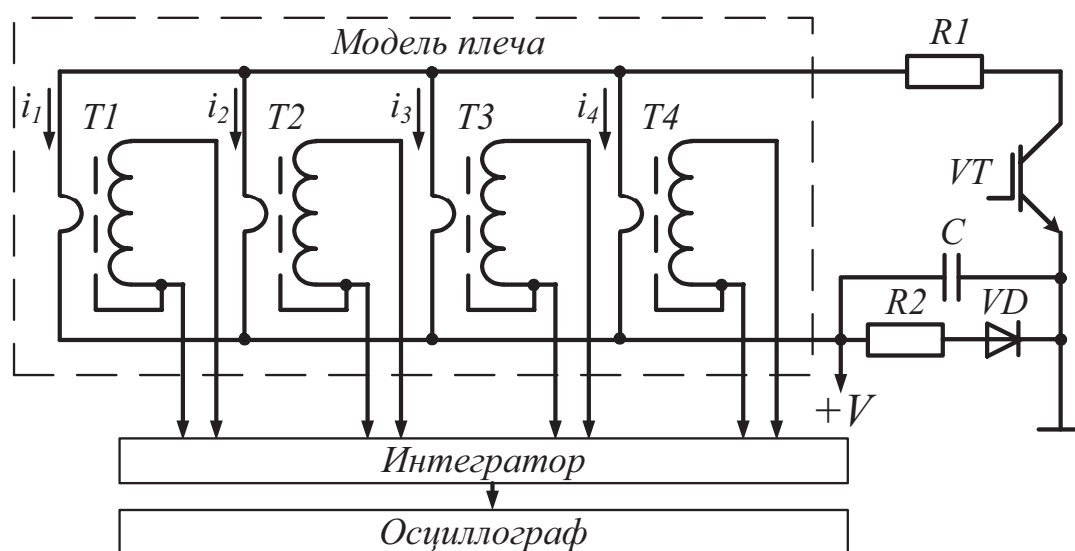


Рис. 4. Принципиальная схема для исследования влияния конструкции подвода тока на распределение токов

изображение одностороннего подвода тока представлено в модели плеча на рис. 4. Результаты моделирования при диагональном и одностороннем способах подвода тока представлены на рис. 5а и 5б соответственно.

Из рис. 5а видно, что односторонний подвод тока демонстрирует неудовлетворительное распределение токов по параллельным ветвям, разброс токов превышает 96%. Приближенная к подводу тока ветвь 4 является перегруженной, ток i_4 по величине больше силы тока остальных ветвей в сумме более чем в два раза.

Диагональный подвод тока, исходя из представленных на рис. 5б результатов, также не является оптимальным, разброс между ветвями составляет 55%. Значительная часть тока приходится на крайние ветви 1 и 4 при недоиспользовании ветвей 2 и 3.

Из результатов опытов очевидно, что на распределение токов по параллельным ветвям влияет путь его прохождения, и чем более удалены ветви от точки подвода тока, тем меньшим значением характеризуется величина тока в них. Тогда исходя из предположения, что равенство токов может быть достигнуто при равноудаленном расстоянии всех параллельных ветвей от точки подвода тока, собрана модель плеча, предполагающая расположение парал-

лельных ветвей «по кругу» с подводом тока в центре. Подобное решение предложено в работе [15] для дискретных IGBT-транзисторов. Для обеспечения равноудаленного расстояния всех ветвей от точки подвода тока необходимо осуществить переход от рассмотрения модели плеча на плоскости к модели плеча в пространстве. Упрощенный вид модели плеча и диаграммы распределения токов по ветвям представлены на рис. 6а и 6б соответственно.

На рис. 6б можем наблюдать распределение токов с меньшей неравномерностью в сравнении с диагональным и односторонним способами его подвода. При этом полученный результат также нельзя считать удовлетворительным, так как величина разброса токов достигает 39%. Таким образом, симметрия токов не обеспечивается даже при равноудаленном положении ветвей от точки подвода, хотя, на первый взгляд, достижение симметрии токов было очевидным. Чтобы определить причину разброса токов, необходимо более детально рассмотреть связанные с конструкцией плеча факторы, определяющие величину тока по ветвям. Для этого рассмотрим каждую параллельную ветвь плеча как отдельный контур, в котором протекает советующий ток i_1-i_4 . Величина тока в контуре будет зависеть от

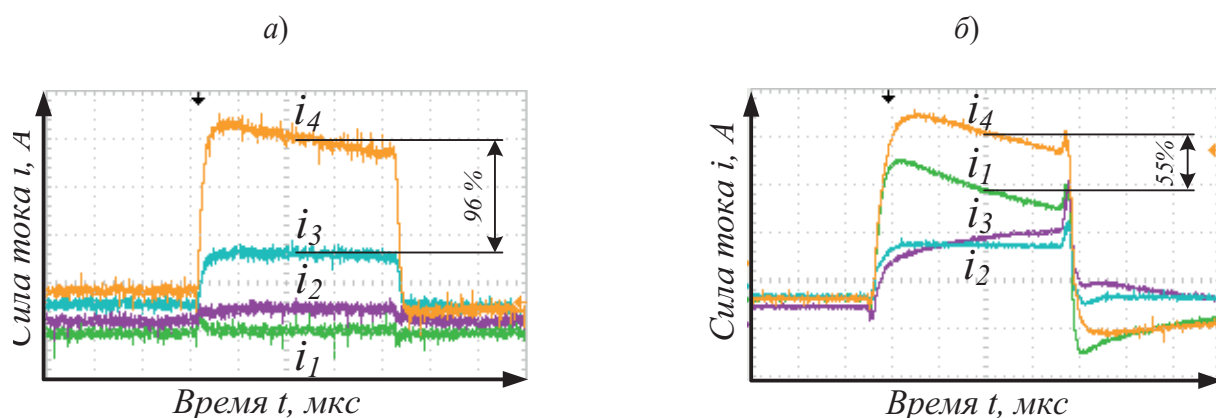


Рис. 5. Диаграммы протекания токов по модели плеча:

а — при одностороннем подводе тока; б — при диагональном подводе тока

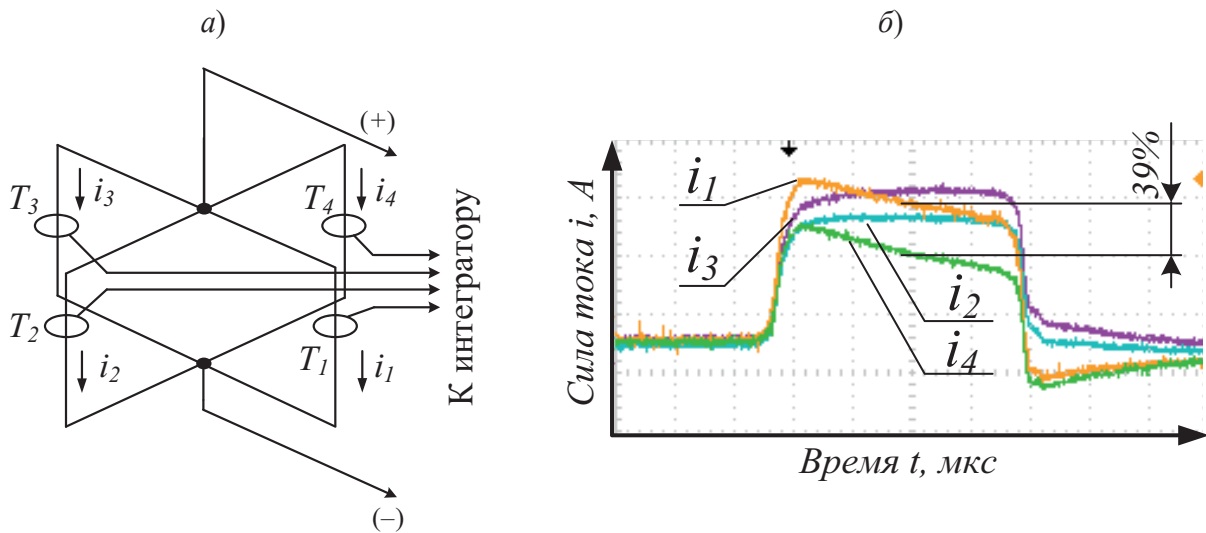


Рис. 6. Моделирование равноудаленного подвода тока:
 а — модель плеча; б — диаграммы протекания токов

прикладываемого напряжения и импеданса в цепи. Под импедансом подразумевается активное сопротивление и индуктивность контура. Так как по условиям моделирования все ветви выполнены идентично и расположены равноудаленно от точки подвода тока, активное сопротивление контуров равное, так же как и прикладываемое к ним напряжение. В конкретном случае решающим фактором, влияющим на величину тока, является индуктивность контура, которая складывается из собственной (L) и взаимной (M) между контурами индуктивностей (рис. 7а). Индуктивность может быть определена по следующим формулам, взятым из источника [16]:

$$L_n = \Psi_{L_n} / i_n, \tag{4}$$

$$M_{mn} = \Psi_n / i_m; \quad M_{mm} = \Psi_m / i_n, \tag{5}$$

где L_n — собственная индуктивность контура n , Гн;

M_{mn} — взаимная индуктивность контура n от контура m , Гн;

M_{mm} — взаимная индуктивность контура m от контура n , Гн;

Ψ_{L_n} — поток самоиндукции контура n , Гн;

$i_m i_n$ — токи в контурах n и m , А;

Ψ_m, Ψ_n — потоки взаимной индукции контуров n и m соответственно, обусловленные токами $i_m i_m$, Вб.

При постоянном, а также при переменном токе низкой частоты под потоком индукции контура понимают величину:

$$\Psi = \frac{1}{s} \int \Phi ds, \tag{6}$$

где ds — элемент площади s поперечного сечения провода;

Φ — магнитный поток, Вб.

Магнитный поток определяется равенством:

$$\Phi = \int_{S_k} B dS_k, \tag{7}$$

где B — поток вектора магнитной индукции, Тл;

S_k — площадь контура, мм².

Из приведенных формул следует вывод, что на импеданс ветви влияет площадь под

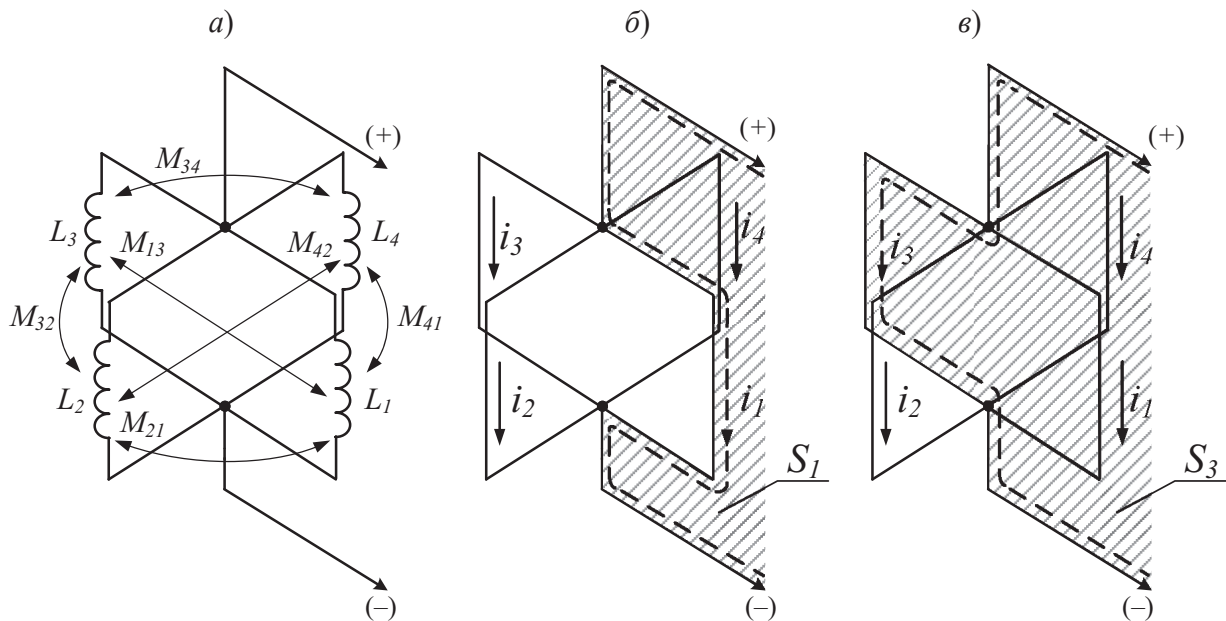


Рис. 7. Индуктивность и взаимноиндуктивность параллельных ветвей плеча — а; площадь S_1 контура протекания тока i_1 — б; площадь S_3 контура протекания тока i_3 — в

контуром протекания тока. Так, например, площадь S_1 под контуром протекания тока i_1 (рис. 7б) отличается по величине от площади S_3 под контуром протекания тока i_3 (рис. 7в), что в последующем приводит к неравенству индуктивностей в этих контурах, что и является причиной разброса величины токов по ветвям.

Известно, что взаимная индуктивность двух контуров может быть как положительной, так и отрицательной и изменяет свой знак при изменении направления одного из токов [14]. С учетом этого в модели плеча с равноудаленным подводом тока (рис. 6а) одну из токоведущих шин расположим равноудаленно от параллельных ветвей, но максимально близко ко второй токопроводящей шине. Такое решение обеспечит равенство всех площадей контуров протекания тока, например $S_1 = S_3$, и снизит зависимость величины индуктивности от положения токоведущих шин. Так как ток i в них направлен противоположно, то и магнитная индукция B от них обращена встречно. Упро-

щенный вид модели плеча и диаграммы распределения токов по ветвям представлены на рис. 8а и 8б соответственно.

По результатам моделирования на рис. 8б показано практически равномерное распределение токов по всем параллельным ветвям, что свидетельствует об их идентичном импедансе.

Построение модели плеча ВИП с равноудаленным подводом тока (рис. 6–8) выполнено для исследования факторов, влияющих на распределение токов. При этом в качестве конструкции, применимой к ВИП электровоза, такое расположение ветвей не рассматривается по причине ограниченных габаритов преобразователя внутри электровоза, в особенности при воздушном охлаждении, реализуемом на всех отечественных электровозах переменного тока.

На основании полученных результатов исследований распределения токов по параллельным ветвям автором предложен способ подвода тока, обеспечивающий равномерное

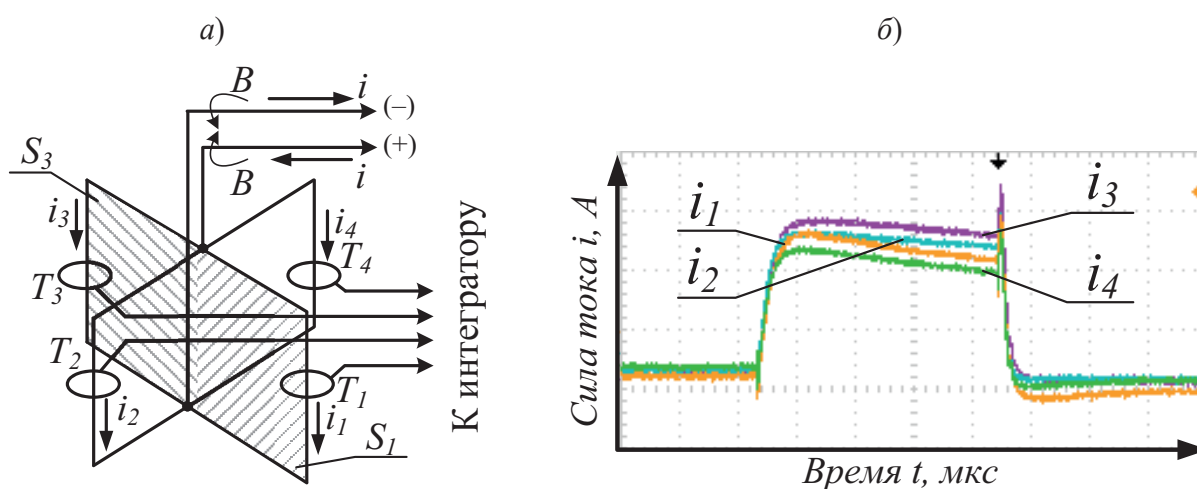


Рис. 8. Моделирование равноудаленного подвода тока с измененным расположением токоведущих шин: а — модель плеча; б — диаграммы протекания токов

распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств, а также удовлетворяющий условиям ограниченных габаритов внутри электровоза с воздушным охлаждением оборудования. На рис. 9 представлена предлагаемая модель плеча, а также диаграммы протекания токов по параллельным ветвям, полученные по результатам физического моделирования. Обозначения элементов на рис. 9 соответствуют приборам схемы на рис. 4.

По результатам моделирования получено удовлетворительное распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов. Выравнивание токов обеспечивается за счет предлагаемого способа подвода тока, в котором выполнены встречное включение силовых шин и их смещение относительно точек подвода тока к ветвям. Так, например, выполнено смещение шины, обозначенной позицией 1, относительно первой и второй ветвей плеча, что увеличивает для данных ветвей активное сопротивление, одновременно снижая их индуктивность за счет встречного включения

шин 1, 2 и шин 5, 6. Снижение индуктивности обеспечивается за счет того, что векторы магнитной индукции $B_{\Sigma i}$ и $B_{i_1+i_2}$ направлены встречно, что обусловлено встречным направлением тока i и суммы токов $i_1 + i_2$, протекающих в этих шинах. При этом импеданс первой и второй ветвей выравнивается относительно импедансов третьей и четвертой, в цепи которых активное сопротивление уменьшено за счет приближенного подвода тока шинами 1 и 6. Так как к параллельным ветвям приложено одинаковое напряжение и они обладают идентичным друг другу импедансом, то в них протекает равный ток, что подтверждается результатами испытаний: на диаграмме протекания токов (рис. 9) кривые i_1-i_4 накладываются друг на друга, разброс токов составляет менее 5%.

С учетом того, что по условиям моделирования расположение ветвей на физической модели плеча соответствует геометрическим размерам плеча ВИП электровоза, предложенный способ подвода тока возможно применить в конструкции плеч ВИП на базе IGBT-транзисторов для электровозов переменного тока. Исследование работы предложенного способа подвода тока

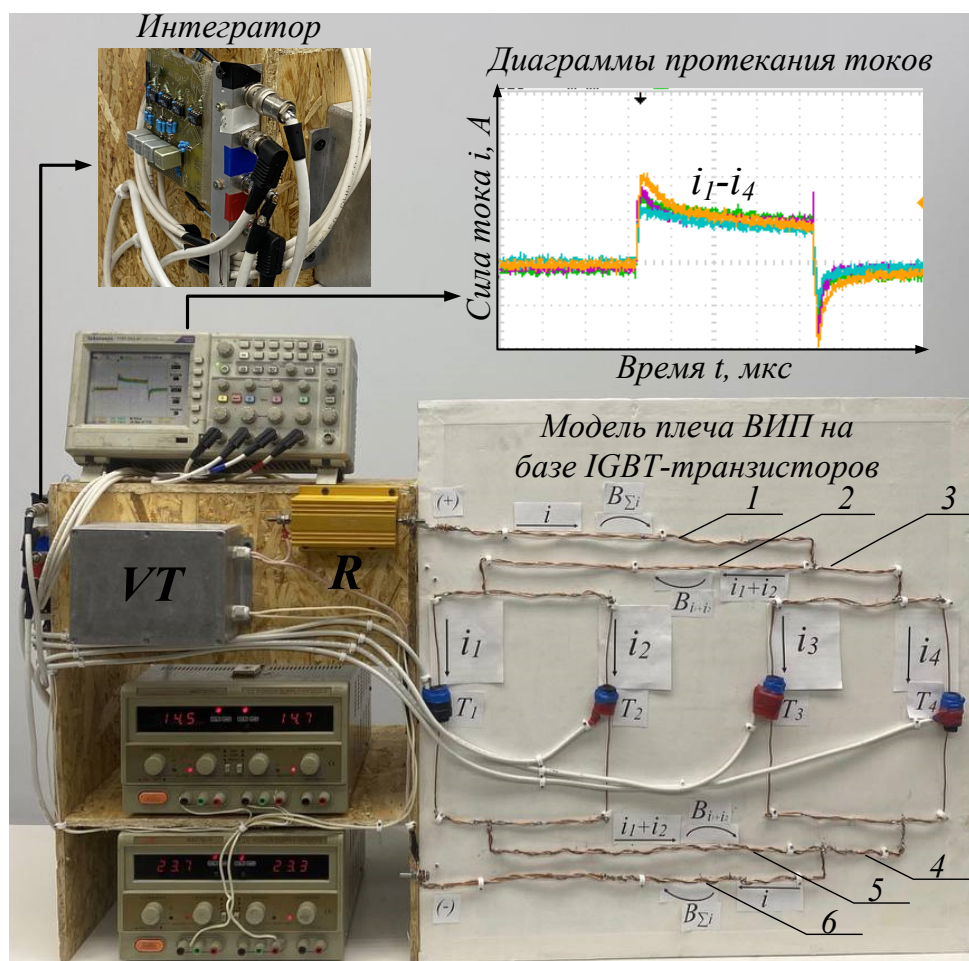


Рис. 9. Моделирование предлагаемого способа подвода тока к плечу ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов (фотография предоставлена автором)

в условиях электровоза представляет интерес для дальнейшей научной проработки.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Типовые способы подвода тока, такие как односторонний и диагональный, не обеспечивают удовлетворительной симметрии токов без выравнивающих устройств. Разброс токов в них по результатам испытаний может достигать 96% и 55% соответственно, что делает их неприменимыми в конструкции плеч ВИП на базе IGBT-транзисторов.

2. Разброс токов по параллельным ветвям при равноудаленном способе подвода тока достигает 39%, но может быть уменьшен за счет выравнивания индуктивностей и взаимоиндуктивностей контуров протекания токов путем изменения положения токоведущих шин.

3. Разработан способ подвода тока, обеспечивающий распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов без применения выравнивающих устройств. По результатам испытаний предложенного способа разброс токов по ветвям четырехтранзисторного плеча ВИП составил не более 5%.

4. В результате для электровозов серии «Ермак» имеется возможность построить ВИП на базе IGBT-транзисторов, которые позволят увеличить пропускную и провозную способность тяговых участков Восточного полигона.

Библиографический список

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899.

2. Знаенко В.Н., Линьков А.О. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении // Молодая наука Сибири. 2021. № 2(12). С 1–7.

3. Самойлова А.С., Мельниченко О.В. Повышение энергоэффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1(77). С. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143.

4. Макашева С.И., Пинчуков П.С., Мельниченко О.В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов // Известия Транссиба. 2022. № 3(51). С. 112–125.

5. Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / П.В. Григоренко [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 1. С. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264

6. Дубровский З.М., Лорман Л.М. Электровозы ВЛ60к и ВЛ60п/к: руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1993. 400 с.

7. Магистральные электровозы переменного тока ВЛ60 и ВЛ80 / Б.А. Тушканов [и др.]. М.: Транспорт, 1964. 556 с.

8. Капустин Л.Д., Копанев А.С., Лозановский А.Л. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80р. М.: Транспорт, 1979. 175 с.

9. Бурдасов Б.К., Толстых В.А., Янбиков В.Я. Тиристорный преобразователь для электровозов ВЛ85 // Вестник ВНИИЖТ. 1988. № 1. С. 20–23.

10. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 480 с.

11. Тихменев Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями. М.: ТрансЖелДорИздат, 1958. 264 с.

12. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э.М. Аптер [и др.]. М.: Энергия, 1975. 208 с.

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

14. Режимы работы магистральных электровозов / О.А. Некрасов [и др.]. М.: Транспорт, 1983. 231 с.

15. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. 2-е изд. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 416 с.

16. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 487 с.

Дата поступления: 24.07.2024

Решение о публикации: 29.08.2024

Контактная информация:

ЗНАЕНОК Вячеслав Николаевич — аспирант;
znaenock@yandex.ru

Development of a method for supplying current to the arms of a rectifier-inverter converter based on IGBT for electric locomotives of the “Ermak” series

V. N. Znaenok

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: *Znaenok V.N.* Development of a method for supplying current to the arms of a rectifier-inverter converter based on IGBT for electric locomotives of the “Ermak” series // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 801–813. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-801-813

Abstract

Purpose: to develop a method of current supply that ensures its uniform distribution over parallel branches of the arm of a rectifier-inverter converter based on IGBT without using equalizing devices for AC electric locomotives with a collector traction drive. **Methods:** a physical model of a four-transistor rectifier-inverter converter arm connected through a controlled power key to a power source was built, on which an analysis of the current distribution was carried out for various methods of its supply to parallel branches. **Results:** diagrams of current distribution along parallel branches of the arm with different methods of current supply were obtained and analyzed, the influence of the topology of the arm power buses on the circuit parameters was studied. A method of current supply to the arm of the rectifier-inverter converter was developed, providing a spread of currents along the branches of no more than 5%. **Practical significance:** the results can be used in the construction of rectifier-inverter converter based on IGBT for the “Ermak” series electric locomotives, which will increase the throughput and carrying capacity of the traction sections of the Eastern Polygon.

Keywords: AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT, parallel connection, operability, current equalization

References

1. Ob utverzhdenii prioritetnyh napravlenij razvitiya nauki, tekhnologij i tekhniki v Rossijskoj Federacii i perechnya kriticheskikh tekhnologij Rossijskoj Federacii: ukaz Prezidenta RF ot 07.07.2011 No. 899. (In Russian)
2. Znaenok V.N., Lin'kov A.O. Povyshenie energeticheskikh pokazatelej elektrovozov peremennogo toka v tyazhelovesnom dvizhenii // Molodaya nauka Sibiri. 2021. No. 2 (12). S 1–7. (In Russian)
3. Samojlova A.S., Mel'nichenko O.V. Povyshenie energoeffektivnosti raboty sovremennogo otechestvennogo elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya // Sovremennye tekhnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie. 2023. No. 1(77). S. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).136-143 (In Russian)
4. Makasheva S. I., Pinchukov P. S., Mel'nichenko O. V. Ocenka poter' napryazheniya v tyagovoj seti pri rabote elektrovozov s vypryamitel'no-invertornymi preobrazovatelyami na baze tiristorov i IGBT-tranzistorov // Izvestiya Transsiba. 2022. No. 3(51). S. 112–125. (In Russian)
5. Razrabotka sposoba raznesennogo upravleniya tranzistornymi tyagovymi preobrazovatelyami elektrovoza na pervoj zone regulirovaniya vypryamlenno napryazheniya / P.V. Grigorenko [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 1. S. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264 (In Russian)

6. Dubrovskij Z.M., Lorman L.M. Elektrovozy VL60k i VL60p/k: rukovodstvo po ekspluatacii. M.: Transport, 1993. 400 s. (In Russian)
 7. Magistral'nye elektrovozy peremennogo toka VL60 i VL80 / B.A. Tushkanov [i dr.]. M.: Transport, 1964. 556 s. (In Russian)
 8. Kapustin L.D., Kopanev A.S., Lozanovskij A.L. Osobennosti ustrojstva i ekspluatacii elektrovoza VL80r. M.: Transport, 1979. 175 s. (In Russian)
 9. Burdasov B. K., Tolstyh V. A., YAnbikov V. Ya. Tiristornyj preobrazovatel' dlya elektrovozov VL85 // Vestnik VNIIZHT. 1988. No. 1. S. 20–23. (In Russian)
 10. Elektrovoz VL85: rukovodstvo po ekspluatacii / B. A. Tushkanov [i dr.] M.: Transport, 1992. 480 s. (In Russian)
 11. Tihmenev B.N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami. M.: TransZHelDorIzdat, 1958. 264 s. (In Russian)
 12. Moshchnye upravlyaemye vypryamiteli dlya elektroprivodov postoyannogo toka / E.M. Apter [i dr.]. M.: Energiya, 1975. 208 s. (In Russian)
 13. Elektrovoz magistral'nyj 2ES5K (3ES5K): rukovodstvo po ekspluatacii. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5. Novocherkassk: VEINII, 2005. 125 s. (In Russian)
 14. Rezhimy raboty magistral'nyh elektrovozov / O. A. Nekrasov [i dr.]. M.: Transport, 1983. 231 s. (In Russian)
 15. Semenov B. Yu. Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu. 2-e izd. M.: SOLON-Press, 2015. 416 s. (In Russian)
 16. Kalantarov P.L., Cejtlin L.A. Raschet induktivnostej. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 487 s. (In Russian)
- Received: 24.07.2024
Accepted: 29.08.2024
- Author's information:**
Vyacheslav N. ZNAENOK Postgraduate Student;
znaenock@yandex.ru