

Знаенок В. Н., Мельниченко О. В., Портной А. Ю.
V. N. Znaenok, O. V. Melnichenko, A. Yu. Portnoy

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОДВОДА ТОКА К ПЛЕЧУ
ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА НА БАЗЕ
IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ**

**DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CURRENT SUPPLY TO THE ARM
RECTIFIER-INVERTER CONVERTER OF ELECTRIC LOCOMOTIVE BASED
ON IGBT-TRANSISTORS**

Знаенок Вячеслав Николаевич – аспирант кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: znaenock@yandex.ru.

Vyacheslav N. Znaenok – Postgraduate Student, Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: znaenock@yandex.ru.

Мельниченко Олег Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: olegmelnval@mail.ru.

Oleg V. Melnichenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electric Rolling Stock Department, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: olegmelnval@mail.ru.

Портной Александр Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15. E-mail: portnoy_alexander@mail.ru.

Alexander Yu. Portnoy – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Physics, Mechanics and Instrumentation Department, Irkutsk State University of Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15. E-mail: portnoy_alexander@mail.ru.

Аннотация. В условиях постоянного увеличивающегося грузооборота и соответствующего роста нагрузки на железнодорожные инфраструктуру и подвижной состав актуальной является разработка энергоэффективного выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) для электровозов переменного тока на базе IGBT-транзисторов. В сравнении с тиристорным ВИП он позволяет более рационально использовать электроэнергию из контактной сети и увеличить пропускную способность тяговых участков. В статье рассматривается вопрос построения плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с параллельным соединением ветвей. Выполнено аналитическое исследование распределения токов по параллельным ветвям с учётом индуктивности силовых шин. На основе полученных уравнений разработан способ подвода тока к плечу ВИП с 4 параллельными ветвями. В условиях лаборатории выполнено физическое моделирование протекания тока по параллельным ветвям для моделей плеча ВИП с односторонним и с предложенным способом подвода тока к плечу. Полученные диаграммы позволяют наглядно оценить влияние шинного монтажа при построении плеча преобразователя на распределение токов по параллельным ветвям.

Summary. In conditions of constantly increasing freight turnover and a corresponding increase in the load on railway infrastructure and rolling stock, the development of an energy-efficient rectifier-inverter converter for AC electric locomotives based on IGBT is relevant. In comparison with a thyristor rectifier-inverter converter, it allows for more efficient use of electricity from the contact network and increases the throughput of traction sections. The article discusses the issue of constructing the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with parallel connection of branches. An analytical study of the distribution of currents along parallel branches was carried out, taking into account the inductance of power buses. Based on the obtained equations, the design of the arm of a rectifier-inverter converter with 4 parallel branches has been developed. In laboratory conditions, physical modeling of current flow through parallel branches was performed for models of the arm of a rectifier-inverter converter with a one-way current supply and with the proposed arm design. The resulting diagrams make it possible to clearly eval-

uate the influence of busbar installation when constructing a converter arm on the distribution of currents along parallel branches.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзистор, параллельное соединение, индуктивность, распределение токов.

Key words: AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT, parallel connection, inductance, current distribution.

УДК 629.423.1

Введение. В настоящее время электровозы переменного тока задействованы в непрерывном увеличении грузооборота. По железнодорожным магистралям Восточного полигона в 2021 году его величина составляла 144 млн т [1], уже в 2022 году он находился на отметке 158 млн т [2], и, согласно долгосрочной программе развития ОАО «РЖД», уже в 2025 году грузооборот должен достигнуть показателя 180 млн т [3]. Для повышения провозных способностей выполняются различные мероприятия, например: наращивают тяжеловесное движение, повышая массу поездов до 6300 и 7100 т [4]; увеличивают пропускные способности, организовывая движение соединённых поездов, соединяя автосцепки поездов физически либо по технологии «Виртуальная сцепка» [5]. Однако наряду с комплексом проводимых мероприятий для увеличения грузооборота остаётся актуальной проблема Восточного полигона – ограниченная пропускная способность железнодорожной инфраструктуры [6].

Рост объёмов перевозок приводит к повышению нагрузки на подвижной состав, систему электроснабжения и тяговые подстанции, мощность которых ограничена и лимитирует количество пар поездов на участке. При этом контактный провод значительно загружен реактивной мощностью – не затрачиваемой на тягу поездов энергией, которую генерирует в контактную сеть электроподвижной состав. Другими словами, можно сказать, что низкая энергоэффективность современных отечественных электровозов переменного тока – это фактор, ограничивающий сегодня пропускную способность тяговых участков. Такое положение дел не позволяет полноценно использовать разработанные новые технологии вождения поездов.

Низкие энергетические показатели электровозов напрямую связаны с устаревшей силовой тиристорной базой выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), что подтверждается рядом исследований [7–8]. Повышение энергетических показателей возможно путём замены на полностью управляемые силовые полупроводники. Такое решение разработано учёными Иркутского государственного университета путей сообщения – предложен ВИП на базе современных полупроводников – IGBT-транзисторов. Коэффициент мощности в режимах тяги и рекуперации предлагаемого преобразователя значительно превосходит тиристорный преобразователь (см. рис. 1), алгоритмы работы преобразователя позволяют втрое снизить потери напряжения и значительно уменьшить нагрузку реактивным током на контактную сеть, что в перспективе даст возможность пропуска дополнительных пар поездов на тяговых участках и сократить межпоездной интервал [9].

В настоящее время разработчики ведут дальнейшие исследования в повышении эффективности работы ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов. Это усовершенствование заключается в построении силовых плеч, содержащих несколько параллельно включённых ветвей, управляемых от одного драйвера.

Цели работы: исследование процессов распределения токов по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов, а также разработка технического решения, обеспечивающего оптимальное распределение токов в плече.

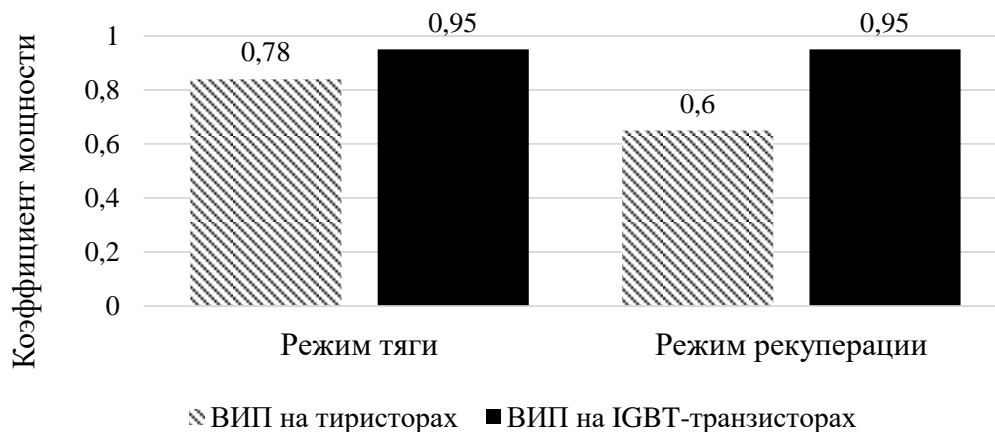


Рис. 1. Сравнение коэффициентов мощности электровозов с ВИП на базе тиристоров и IGBT-транзисторов

Силовой блок ВИП на базе IGBT-транзисторов состоит из девяти плеч для осуществления плавного зонно-фазового регулирования напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД). Исходя из максимально возможных в эксплуатации токов ТЭД, в плечах ВИП применяют параллельное соединение ветвей силовых полупроводниковых приборов (СПП), их количество определяется формулой

$$m = \frac{I}{I_n k_I};$$

где I – ток плеча преобразователя; I_n – предельный ток IGBT-транзистора; k_I – коэффициент использования IGBT-транзисторов по току.

В условиях воздушного охлаждения, значительных размеров радиаторов и ограниченных габаритов внутри электровоза неизбежно возникает асимметрия соединений силовых шин, имеет-ся в виду различие геометрических форм параллельных ветвей и неодинаковое расположение их в пространстве, приводящее к отличию электромагнитных параметров параллельных ветвей: их индуктивностей и взаимоиндуктивностей. Последствие разброса параметров – это неравномерное распределение токов по параллельным ветвям, которое приводит к аварийным процессам в силовой цепи и выходу из строя IGBT-транзисторов.

Рассмотрим упрощённую схему плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с n последовательно и m параллельно соединёнными IGBT-транзисторами (см. рис. 2). Общепринято при анализе процессов в электрических схемах с СПП использовать кусочно-линейную аппроксимацию прямой ветви вольтамперной характеристики, которая приведена на рис. 3 [10]. Аппроксимация такого вида позволяет вместо сложной функциональной зависимости при определении среднего значения падения напряжения на СПП использовать следующее достаточно простое выражение:

$$U = \frac{\pi + \gamma}{2\pi} u_0 + I_B R_d - \Delta U,$$

где γ – угол коммутации; u_0 – пороговое падение напряжения; R_d – динамическое сопротивление; ΔU – поправка; I_B – средний ток ветви,

$$I_B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi+\gamma} i_B d\omega t,$$

здесь i_B – мгновенное значение тока в ветви плеча ВИП.

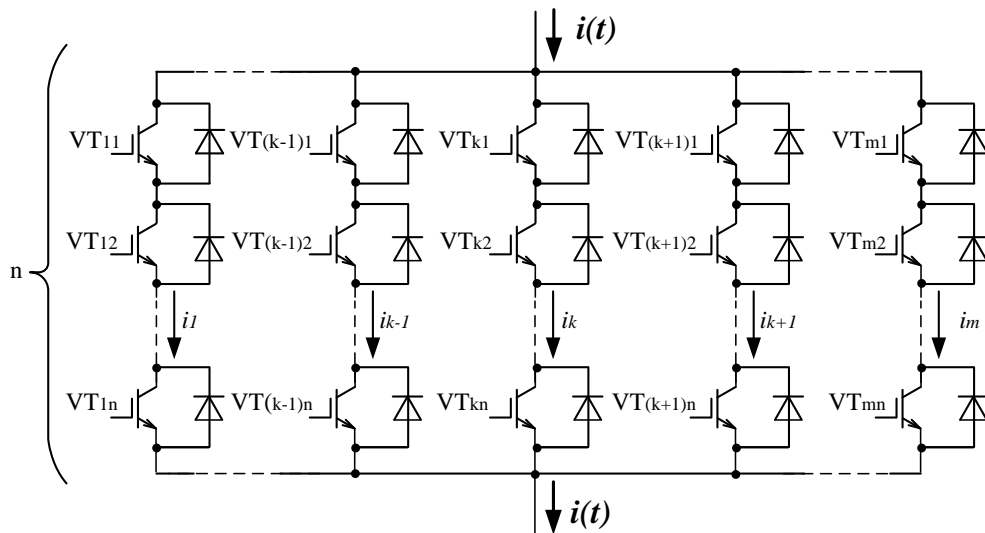


Рис. 2. Расчётная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов

При $\gamma = 0$ и однополупериодном выпрямленном синусоидальном токе, среднее значение которого равно номинальному, среднее значение падения напряжения на IGBT-транзисторе может быть представлено в виде

$$U = 0,5u_0 + I_B R_d - \Delta U.$$

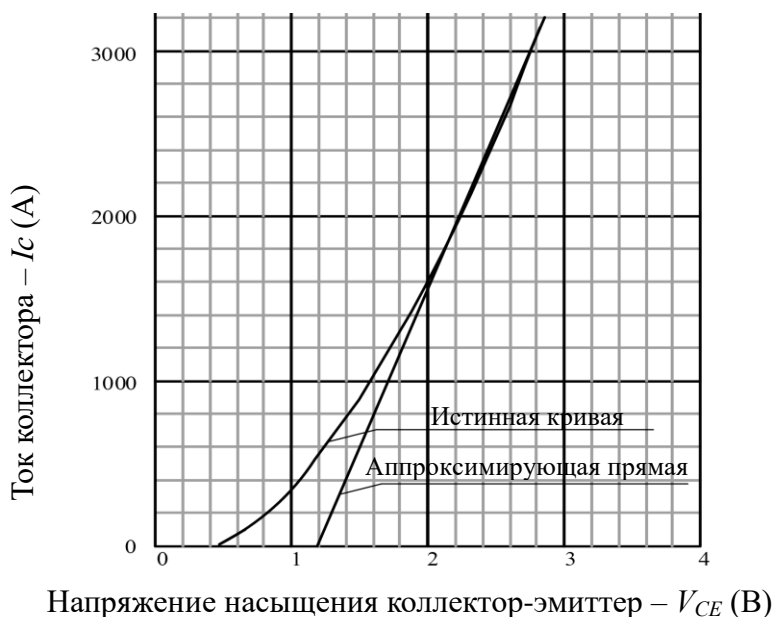


Рис. 3. Истинная и спрямлённая вольтамперные характеристики IGBT-транзистора (при напряжении управления на затворе $V_{GE} = 15$ В)

На электровозах переменного тока поправка, допускаемая при измерении прямого падения напряжения, не превышает 1...2 % от U , по этой причине при расчётах поправка не учитывается. С учётом кусочно-линейной аппроксимации процесс деления тока по m параллельным ветвям плеча (см. рис. 2) преобразовательной установки, имеющей n последовательно включённых СПП, описывается с помощью системы из $(m+1)$ линейных уравнений с $(m+1)$ неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} u_{01}^* + i_1 R_{d1}^* &= u \\ u_{02}^* + i_2 R_{d2}^* &= u \\ \dots &\dots \\ u_{0m}^* + i_m R_{dm}^* &= u \\ i_1 + \dots + i_m &= i(t) \end{aligned} \right\}$$

В такой системе неизвестными являются мгновенные значения токов в параллельных ветвях $i_1 \dots i_m$ и падение напряжения u на плече преобразователя, а коэффициентами – нагрузка плеча $i(t)$ и величины u_{0j}^* и R_{dj}^* , где $j = 1, \dots, m$, при этом

$$\left. \begin{aligned} u_{0j}^* &= \sum_{i=1}^n u_{0j}^i \\ R_{dj}^* &= \sum_{i=1}^n R_{dj}^i \end{aligned} \right\}$$

где u_{0j}^* – сумма пороговых падений напряжений IGBT-транзисторов; R_{dj}^* – сумма динамических сопротивлений IGBT-транзисторов.

Для решения системы уравнений целесообразно воспользоваться её матричной записью:

$$\begin{pmatrix} R_{d1}^* & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & R_{d2}^* & \dots & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_{dm}^* & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_m \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -u_{01}^* \\ -u_{02}^* \\ \dots \\ -u_{0m}^* \\ i(t) \end{pmatrix}$$

Обозначим матрицу коэффициентов, стоящую перед столбцом неизвестных, буквой A . Симметричное относительно главной диагонали расположение коэффициентов матрицы A позволяет определить обратную к ней матрицу A^{-1} с помощью метода «разбиения на клетки». Тогда решение системы может быть получено в явном виде:

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_m \\ u \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} -u_{01}^* \\ -u_{02}^* \\ \dots \\ -u_{0m}^* \\ i(t) \end{pmatrix}$$

После перемножения матриц можно выписать явные выражения для токов параллельных ветвей плеча ВИП:

$$i_l = \frac{\left[\sum_{j=1}^m \frac{-u_{0j}^* - u_{0l}^*}{R_{dj}^*} + i(t) \right]}{\left(R_{dl}^* \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{dj}^*} \right)},$$

где $l = 1, \dots, m$.

Средние токи параллельных ветвей могут быть получены интегрированием выражения на интервале изменения тока в плече $(\pi + \gamma)$ и усреднением по периоду изменения нагрузки плеча 2π :

$$I_l = \frac{\left[(\pi + \gamma) \sum_{j=1}^m \frac{u_{0j}^* - u_{0l}^*}{R_{dj}^*} + 2\pi I_B \right]}{\left(2\pi R_{dl}^* \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_{dj}^*} \right)},$$

где $l = 1, \dots, m$.

Значения средних токов параллельных ветвей плеча определяются вольтамперными характеристиками СПП, схемой преобразователя и параметрами силовой цепи.

При анализе распределения токов по параллельным ветвям плеча ВИП необходимо учитывать падение напряжения на участках силовых шин между точками подключения параллельных цепей, возникающих по причине индуктивности силовых шин со стороны коллекторов (L_C) и эмиттеров (L_E).

Опытные измерения участков медных силовых шин, соединяющих параллельные ветви в плече, на базе сервисного локомотивного депо «Иркутское» с помощью измерителя иммитанса МНИПИ Е7-21 показали индуктивность равную 0,3 мкГн. Обладая даже незначительной величиной, индуктивность оказывает существенное влияние на распределение токов в плече ВИП и требует учёта в расчётной схеме. Тогда расчётная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с учётом индуктивностей силовых шин будет соответствовать рис. 4.

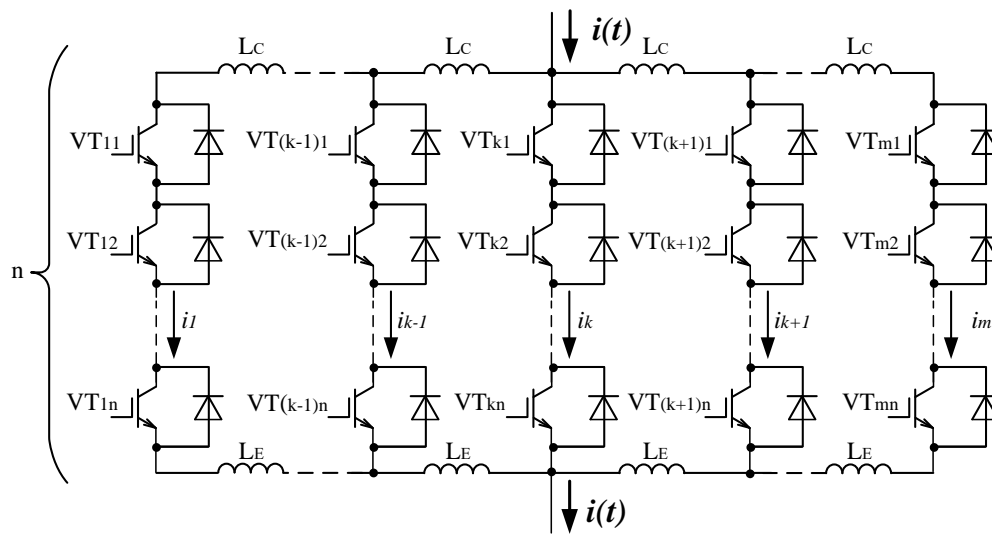


Рис. 4. Расчётная схема плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов с учётом индуктивностей силовых шин

Для ВИП электровозов переменного тока характерно расположение силовых шин с коллекторной и эмиттерной сторон параллельно друг другу, чем обуславливается влияние взаимоиנדукции (M_C и M_E) силовых шин (см. рис. 5).

При расчёте принимаем, что индуктивность и взаимоиנדуктивность с коллекторной и эмиттерных сторон равны: $L_C = L_M$; $M_C = M_E$. С учётом индуктивности и взаимоиנדуктивности силовых шин процесс деления тока по m параллельным ветвям плеча описывается с помощью системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_1}{dt} + i_1 R_{d1}^* + u_{01}^* - M \frac{di_1}{dt} &= u \\ \dots & \dots \\ L \frac{di_m}{dt} + i_m R_{dm}^* + u_{0m}^* - M \frac{di_m}{dt} &= u \\ L \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + \dots + L \frac{di_m}{dt} - M \frac{di_m}{dt} &= 0 \\ i_1 + \dots + i_m &= i(t) \end{aligned} \right\}$$

Из выражений очевидно, что для равномерного распределения токов по параллельным ветвям, если принять допущение, что ВАХ всех параллельных СПП идентичны, необходимо равное

значение индуктивности и взаимной индуктивности по всем токовым путям относительно точки подключения силовых шин со стороны коллекторов и эмиттеров.

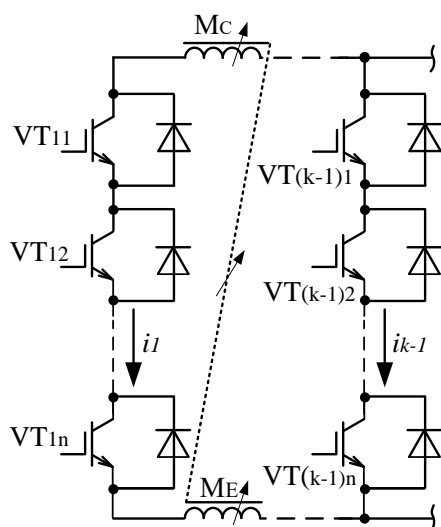


Рис. 5. Взаимоиндукция силовых шин в плече ВИП на базе IGBT-транзисторов

Количество СПП в плече выбирается с учётом их номинального тока и максимального напряжения «коллектор-эмиттер». С учётом существующих предложений, например от компании «МикроЭМ» [11], возможно комплектование плеча ВИП из четырёх параллельных ветвей, каждая из которых содержит последовательно соединённые силовые диод и IGBT-транзистор. С учётом аналитического исследования для выбранного количества СПП разработан способ подвода тока к плечу ВИП на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающий равномерное распределение токов по его параллельным ветвям.

Для оценки адекватности разработанного решения в условиях лаборатории выполнено физическое моделирование протекания токов по параллельным ветвям плеча ВИП для одностороннего (см. рис. 6) и предлагаемого (см. рис. 7) способов подвода тока к плечу ВИП. Чтобы учесть допущение идентичности всех ВАХ параллельных СПП, силовая цепь плеча построена из медных проводников. При построении расстояние между параллельными ветвями и их

габаритные размеры приняты подобно плечам ВИП электровозов переменного тока. Испытание выполняется путём кратковременного пропуска тока короткого замыкания через модель плеча. Изменение тока в ветвях отслеживается с помощью катушек Роговского LEM ART-D22 D125 (T_1-T_4 , см. рис. 6 и 7) с последующим интегрированием сигнала и выводом диаграмм цифровым осциллографом Tektronix TDS 2024C.

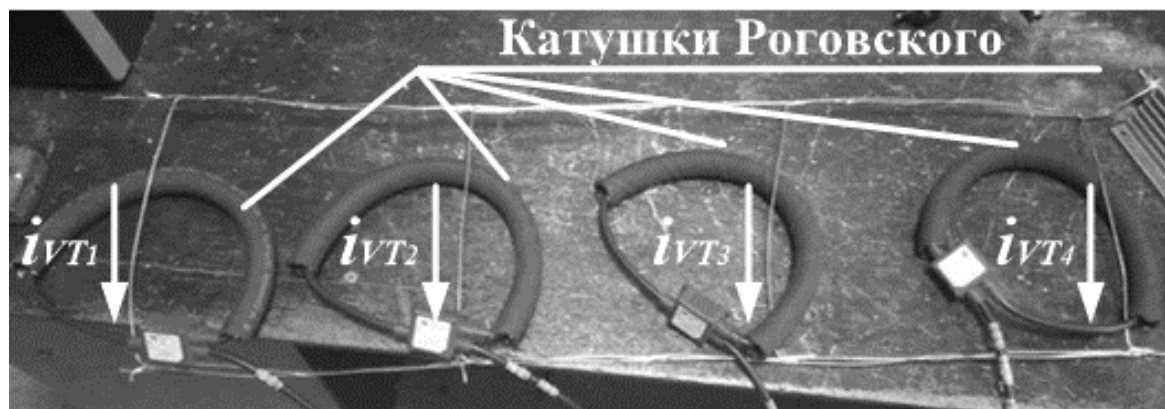


Рис. 6. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях при одностороннем подводе тока к плечу ВИП

На рис. 8 представлен результат моделирования протекания тока в параллельных ветвях при одностороннем способе подвода тока (см. рис. 8, б), когда шины переменного и постоянного токов подключаются к коллектору и эмиттеру крайней ветви плеча (см. рис. 8, а).

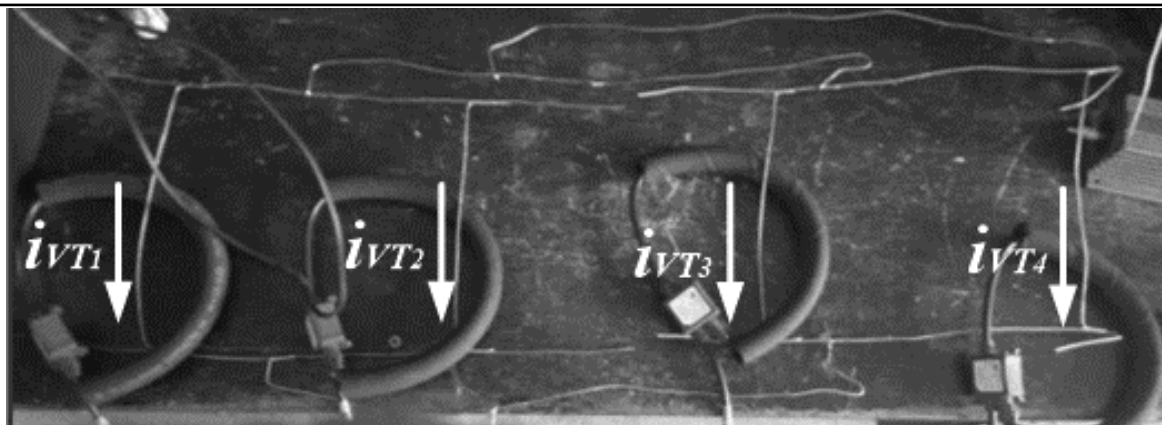


Рис. 7. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подвода тока

По диаграммам распределения токов (см. рис. 8, б) видно, что ток по четвертой ветви (i_{VT4}) практически в три раза превышает ток по всем остальным ветвям в сумме. Это результат подтверждает, что соединение группы параллельно соединённых IGBT-транзисторов является сложной задачей. При неравномерном распределении токов по параллельным ветвям неизбежна перегрузка ветвей с последующим возможным пробоем плеча и отказом оборудования электровоза. Стандартные известные способы соединения силовых шин в плече не обеспечат нормальной работоспособности плеча ВИП электровоза на базе IGBT-транзисторов.

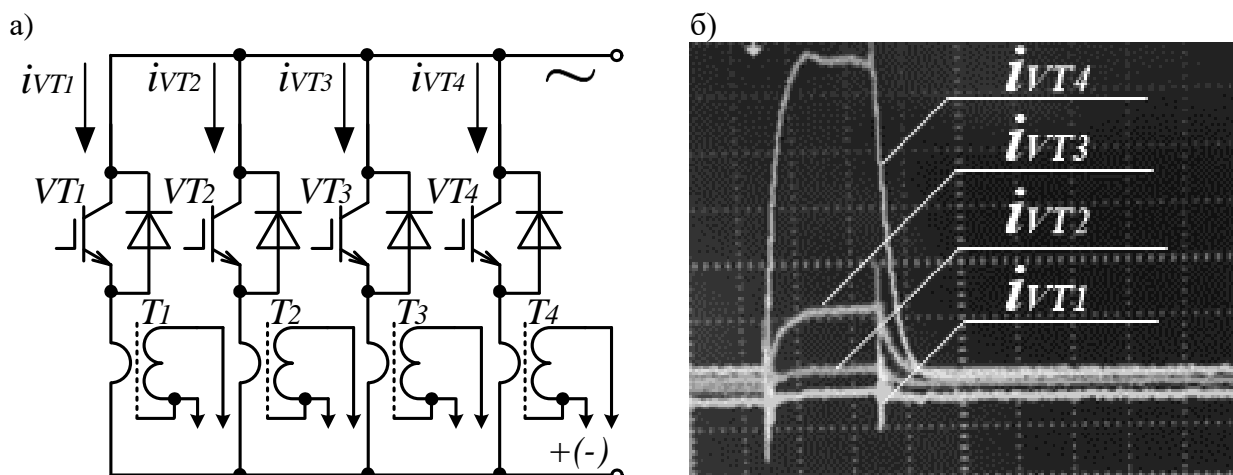


Рис. 8. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях плеча ВИП при одностороннем способе подвода тока:
а – упрощённая принципиальная схема; б – диаграмма распределения токов

Известно, что в тиристорных ВИП для выравнивания токов по ветвям применяются индуктивные делители [12–15]. Однако при управлении IGBT-транзисторами дополнительная индуктивность крайне нежелательна, т. к. не только усложняет конструкцию, но и приводит к увеличению перенапряжений при коммутации [16].

Упрощённая принципиальная схема плеча ВИП с предлагаемым способом подвода тока к параллельным ветвям на базе IGBT-транзисторов представлена на рис. 9, а. Результат физического моделирования протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подводом тока представлен на рис. 9, б.

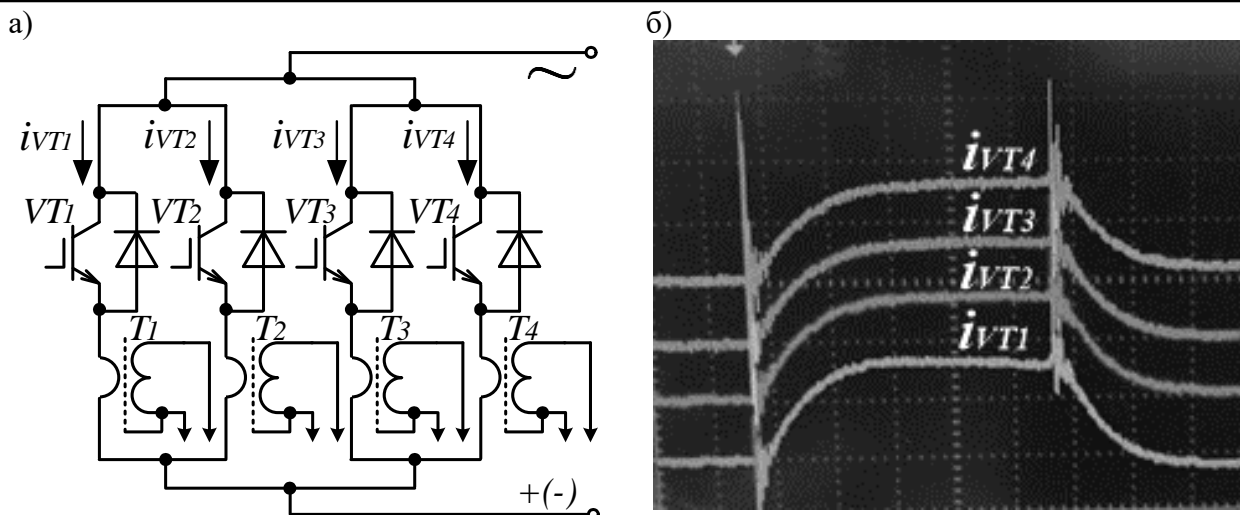


Рис. 9. Физическое моделирование протекания тока в параллельных ветвях с предложенным способом подвода тока к параллельным ветвям плеча ВИП:
 а – упрощённая принципиальная схема; б – диаграмма распределения токов

Результат опыта показывает оптимальное распределение токов по параллельным ветвям плеча ВИП с предложенным способом подвода тока (см. рис. 9, б). Мгновенные значения токов по ветвям в течение всего периода проводящего состояния и в моменты коммутации равны по величине.

Заключение. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Паразитные параметры силовой цепи плеча ВИП вкуче с топологией соединения силовых шин влияют на симметрию токов параллельно включённых IGBT-транзисторов. Ток по одной ветви может в три раза превышать суммарных ток остальных ветвей.

2. Один из аспектов достижения равенства токов по параллельным ветвям плеча – выравнивание импеданса каждой ветви относительно точки подключения плеча к силовым шинам переменного и постоянного токов.

3. Предложенный способ подвода тока к параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов позволяет получить равномерное распределение токов по параллельным ветвям плеча, что подтверждается результатами физического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якушева, А. Рационализировать перевозки / А. Якушева // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 168. – 17 сент. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
2. Восточный полигон – Транссиб и БАМ. Итоги развития в 2013-2022 гг. // ОАО «РЖД»: официальный сайт, 2023. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9787/page/103290?id=19721> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
3. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги»: Утв. Указом Президента Российской Федерации № 466р от 07 мая 2018 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с. – Текст: непосредственный.
4. Якушева, А. Вектор развития / А. Якушева. // Гудок: [сайт]. – 2022. – № 238. – 22 дек. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1622858> (дата обращения: 12.10.2023). – Текст: электронный.
5. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власевский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 17-25.
6. Габов, М. Ю. Проблемы транспортной системы Хабаровского края / М. Ю. Габов, Т. А. Яковлева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-2 (34). – С. 101-104.

7. Иванов, В. С. Диодно-транзисторная база моторвагонного подвижного состава переменного тока / В. С. Иванов, И. А. Баринов // Молодая наука Сибири. – 2018. – № 1. – С. 49-57.
8. Знаенко, В. Н. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока в тяжеловесном движении / В. Н. Знаенко, А. О. Линьков // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2 (12). – С. 1-7.
9. Макашева, С. И. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристоров и IGBT-транзисторов / С. И. Макашева, П. С. Пинчуков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 112-125.
10. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Э. М. Аптер, Г. Г. Жемеров, И. И. Левитан, А. Г. Элькин. – Москва: Энергия, 1975. – 208 с.
11. МикроЭМ – группа компаний: [сайт]. – Москва. – URL: <https://microem.ru/> (дата обращения: 08.08.2023). – Текст: электронный.
12. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К): руководство по эксплуатации. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи. ИДМБ.661142.009.РЭ5. – Новочеркасск: ВЭлНИИ, 2005. – 125 с.
13. Капустин, Л. Д. Надёжность и эффективность электровозов ВЛ80р в эксплуатации / Л. Д. Капустин, А. С. Копанев, А. Л. Лозановский. – Москва: Транспорт, 1986. – 240 с.
14. Электровоз ВЛ-85. Руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова и др. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
15. Электровоз ЭП1: Руководство по эксплуатации. Том 1 / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – Москва: Транспорт, 2006. – 554 с.
16. О частичной компенсации паразитных трансформаторных связей паразитными индуктивностями при параллельном включении IGBT-транзисторов / А. Портной, О. Мельниченко, В. Знаенко, В. Лобанов, И. Осипчук // Силовая электроника. – 2022. – № 5. – С. 18-22.