

## **Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей**

**В.Н. Знаенко✉, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉znaenock@yandex.ru

### **Резюме**

В текущих реалиях, когда железнодорожные магистрали Восточного полигона наращивают грузооборот, стоит острая необходимость в мощном тяговом подвижном составе, выполняющем тонно-километровую работу. Энергоэффективность электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом долгое время остается на относительно низком уровне. В связи с чем актуальными являются разработки в области повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока. К таким разработкам относится выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов, созданный и испытанный учеными Иркутского государственного университета путей сообщения. Работа такого преобразователя на электровозе способна повысить коэффициент его мощности не менее чем на 13 % в режиме тяги и на 46 % в режиме рекуперативного торможения. Плечи силового блока выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов, исходя из условия обеспечения запаса по току, имеют по четыре параллельные ветви, каждая ветвь содержит IGBT-транзистор, последовательно подключенный к силовому диоду. При их параллельном соединении необходимо учитывать множество особенностей, важнейшим из которых является влияние индуктивностей в цепях на работоспособность преобразователя. В данной статье рассмотрено влияние индуктивности со стороны входа преобразователя на распределение тока по параллельным ветвям плеча на базе IGBT-транзисторов с учетом индуктивности силовых шин, связывающих параллельные ветви. Для проведения исследования в программе, разработанной ООО «ЗВ Сервис» SimInTech смоделировано плечо преобразователя с параллельным соединением четырех IGBT-транзисторов. По результатам моделирования получены диаграммы распределения тока по параллельным ветвям в зависимости от величины индуктивности на входе преобразователя. Исследование позволяет сделать вывод о том, как изменение индуктивности на входе преобразователя влияет на работоспособность выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов.

### **Ключевые слова**

электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, параллельное соединение, IGBT-транзистор, работоспособность

### **Для цитирования**

Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей / В.Н. Знаенко, 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.

### **Информация о статье**

поступила в редакцию: 07.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 08.06.2023 г.; принята к публикации: 09.06.2023 г.

## **The effect of inductance at the input of the rectifier-purpose converter on the basis of the IGBT transistor of the alternating current electric locomotive on the performance of its shoulders with a parallel connection of branches**

**V.N. Znaenok✉, O.V. Mel'nichenko, A.I. Portnoi, A.O. Lin'kov**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉znaenock@yandex.ru

### **Abstract**

In the current reality, with the railway lines of the Eastern Range increasing freight turnover, there is an urgent need for a powerful traction rolling stock that performs ton-kilometer work. The energy efficiency of AC electric locomotives with a collector traction drive has remained at a relatively low level for a long time. In this connection, developments in the field of increasing the

power factor of AC electric locomotives are relevant. Such developments include an IGBT based rectifier-inverter converter designed and tested by scientists of Irkutsk State Transport University. The operation of such a converter on an electric locomotive can increase its power factor by at least 13 % in traction mode and by 46% in regenerative braking mode. The arms of the power block of IGBT-based rectifier-inverter converter on condition of ensuring the current margin, have four parallel branches, each branch containing an IGBT connected in series with a power diode. When they are connected in parallel, it is necessary to take into account many features, one of the most important being the effect of inductances in circuits on the performance of the converter. Therefore, this article considers the influence of the inductance from the converter input on the current distribution along the parallel branches of the arm based on IGBT, taking into account the inductance of the power buses connecting the parallel branches. To conduct the research, in the program by SimInTech, a converter arm with a parallel connection of four IGBTs was modelled. Based on the simulation results, diagrams of current distribution along parallel branches were obtained depending on the value of the inductance at the converter input. The information obtained allows to draw conclusions about how a change in the inductance at the input of the converter affects the performance of the IGBT-based rectifier-inverter converter.

### Keywords

AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, parallel connection, IGBT transistor, performance

### For citation

Znaenok V.N., Mel'nichenko O.V., Portnoi A.I., Lin'kov A.O. Vliyanie induktivnosti na vkhode vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na baze IGBT-tranzistorov elektrovoza peremennogo toka na rabotosposobnost' u ego plech pri paralel'nom soedinenii vetvei [The effect of inductance at the input of the rectifier-purpose converter on the basis of the IGBT of the alternating current electric locomotive to the performance of its shoulders with a parallel connection of branches]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 33–41. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).33-41.

### Article info

Received: March 7, 2023; Revised: June 8, 2023; Accepted: June 9, 2023.

### Введение

На сегодняшний день магистрали Восточного полигона востребованы в тех объемах, которые холдинг ОАО «РЖД» ожидал достичь через несколько лет. Исторически вопросы повышения пропускной и провозной способностей участков железных дорог являются актуальными. В стремлении рационально использовать действующую инфраструктуру ОАО «РЖД» увеличивают количество тяжеловесных поездов. Так, для Восточного направления по итогам восьми месяцев 2021 г. было сформировано 1,06 тыс. тяжеловесных поездов, за этот же период 2022 г. – 2,35 тыс. поездов, что в 2,3 раза больше. На 46 % выросло и количество контейнерных поездов по итогам девяти месяцев работы 2022 г. по сравнению с аналогичным периодом 2021 г. [1, 2].

Для наращивания весовых норм и увеличения качественных показателей работы железной дороги необходимы локомотивы, обеспечивающие требуемые тяговые характеристики. На сегодняшний день основными представителями самого современного и мощного тягового подвижного состава для Восточного полигона являются электровозы серии «Ермак».

Данные локомотивы оснащены электродвигателями НБ-514Б либо НБ-514Е, которые попарно на тележку подключаются к одному выпрямительно-инверторному преобразовате-

лю (ВИП) [3]. Также с конца 2019 г. осуществляется поставка таких локомотивов с поосным регулированием силы тяги, когда на каждый двигатель приходится отдельный канал ВИП [4]. При организации тяжеловесного движения поездов возрастает сила тяги электровозов и потребляемый ток, часть которого не используется непосредственно на тягу поездов, а курсирует по цепи «тяговый трансформатор – контактная сеть – тяговая подстанция», что снижает пропускную способность тяговых участков.

Силовые преобразователи электровозов мало чем отличаются от созданных более 50 лет назад (для электровоза ВЛ80р). Современные электровозы работают с коэффициентом мощности на всех зонах регулирования в режиме тяги и рекуперативного торможения не превышающим значений 0,85 и 0,65 соответственно.

Работа тиристорного ВИП сопровождается коммутацией полупроводников, которая вызывает значительные просадки и искажение напряжения в контактной сети, загрузкой контактного провода реактивным током, малым количеством возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении, а также рядом других факторов [5]. Это вызывает увеличение межпоездного интервала, снижение пропускной способности, уменьшение

участковой скорости, увеличение затрат на электроснабжение и рост отказов электрооборудования электровозов [6].

Сегодня имеется ряд предложений по повышению коэффициента мощности электровозов переменного тока. Это, например, применение разрядных плеч в силовой схеме ВИП, позволяющее использовать накопленную энергию в индуктивности цепи и уменьшать угол сдвига фаз [7, 8]. Известны также исследования, направленные на изменение алгоритма работы ВИП [9, 10], на изменение величины сопротивления блоков балластных резисторов в режиме рекуперации либо их исключение из силовой цепи [11, 12]. Один из современных вариантов повышения коэффициента мощности – это замена полууправляемой тиристорной базы преобразователей электровоза на полностью управляемые полупроводники [13]. Наиболее перспективным на сегодняшний день является ВИП на базе IGBT-транзисторов, энергоэффективность которого доказана по результатам математического моделирования [14] и в ходе стендовых испытаний на базе сервисного локомотивного депо Боготол-Сибирский ЛокоТех Сервис.

Работа такого преобразователя на электровозе способна повысить его коэффициент мощности не менее чем на 13 % в режиме тяги и на 46 % в режиме рекуперативного торможения.

### Особенности конструкции выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Алгоритмы управления ВИП на базе IGBT-транзисторов позволяют работать электровозам переменного тока с коэффициентом мощности в режимах тяги и рекуперативного торможения равным 0,95, что снижает просадки и искажение напряжения в контактной сети [6]. Стоит также отметить, что драйверы управления IGBT-транзисторами дают возможность осуществлять алгоритмические защиты силовых цепей и прерывать развитие аварийных процессов. Исходя из сказанного, исследование работоспособности ВИП на базе IGBT-транзисторов представляет интерес для современных отечественных электровозов серии «Ермак». Упрощенная функциональная схема тележки электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов представлена на рис. 1.

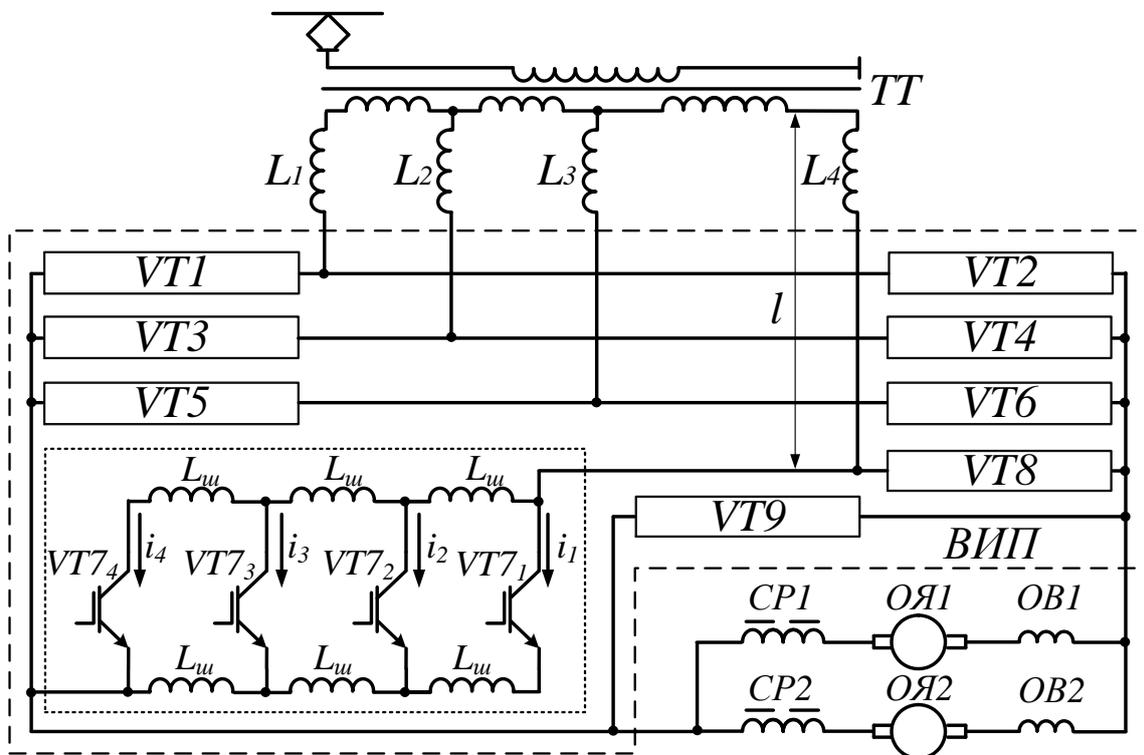


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема тележки электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов

Fig. 1. Simplified functional diagram of an electric locomotive trolley with a rectifier-inverter converter based on IGBT

Блок силовой ВИП состоит из девяти плеч ( $VT1-VT9$ ). Для обеспечения необходимого запаса мощности плеча по току крайние плечи содержат в себе по четыре параллельные ветви ( $VT7_1-VT7_4$ ), в состав которых входят диодно-транзисторная сборка и снабберные цепи. Параллельное соединение IGBT-транзисторов высокой мощности обладает рядом особенностей, сказывающихся на работоспособности преобразователя. При проектировании учитываются условия охлаждения, параметры цепей управления, характеристики IGBT-транзисторов, снабберные цепи и др. [15–17]. Важным также является выбор способа расположения силовых шин.

Индуктивность коллекторных и эмиттерных шин  $L_{ш}$ , соединяющих параллельные ветви, оказывает значительное влияние на распределение токов по параллельно включенным ветвям. Так, при диагональном подключении шин переменного и постоянного токов к плечу ВИП (см. рис. 1) в момент открытия IGBT-транзисторов токи  $i_1-i_4$  по параллельным ветвям отличаются по величине. Крайние транзисторы плеча ( $VT7_4, VT7_1$ ), расположенные наиболее близко к точкам подключения шин переменного и постоянного токов, принимают основную нагрузку при включении и проводят больший ток. Внутренние же ветви ( $VT7_2, VT7_3$ ), где по сравнению с крайними токовые цепи более удалены от силовых шин постоянного и переменного токов, нагружены меньше [18].

Одним из важных вопросов при параллельном соединении ветвей является наличие индуктивности  $L_1-L_4$  на входе преобразователя, изменение которой приводит к изменению диаграмм протекания тока по параллельным ветвям в плече, и сказывается на работоспособности преобразователя. Этот вопрос предлагается рассмотреть в данной статье.

На электровозе ВИП соединяется с тяговым трансформатором (ТТ) электровоза, индуктивность которого неизменна. Однако при стендовых и последующих испытаниях непосредственно на электровозе возможны изменения условий подключения, связанные с различным удалением испытываемого ВИП от источника переменного напряжения за счет разной длины силовых кабелей его подключения. Связь индуктивности с длиной кабеля при допущении исключения изгибов может выражаться следующей зависимостью:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (1)$$

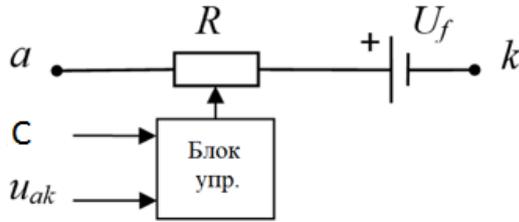
где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $r$  – радиус поперечного сечения кабеля, м;  $l$  – длина кабеля, м.

Например, при радиусе поперечного сечения кабеля 5 мм, задавая различную длину кабеля подключения и получив его соответствующую индуктивность, можем проследить, как изменяется распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов, от изменения индуктивности со стороны переменного напряжения. Для проведения исследования предлагается рассмотреть электромагнитные процессы в ветвях преобразователя посредством математического моделирования в программе SimInTech.

### **Моделирование работы четырехтранзисторного плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов в программе SimInTech**

SimInTech – среда динамического моделирования технических систем, предназначенная для расчетной проверки работы систем управления сложными техническими объектами. SimInTech осуществляет моделирование технологических процессов, протекающих в различных объектах, с одновременным моделированием системы управления, и позволяет повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта. Программное обеспечение содержит набор специализированных библиотек, обеспечивающих моделирование электрических схем и электропривода [20]. Для расчета мгновенных значений параметров сетей переменного тока предусмотрена библиотека блоков «Электроцепи динамика», которая использована при проведении данного исследования.

Для моделирования IGBT-транзистора с учетом принятых допущений выбран блок, реализующий спрямленные статические вольтамперные характеристики с параллельно включенным обратным диодом. Общая структура модели полупроводникового элемента представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Структура модели IGBT-транзистора в программе SimInTech:

$u_{ak}$  – значение напряжения на элементе, В;  $C$  – значение управляющего сигнала;  $R$  – сопротивление элемента, Ом;  $U_f$  – заданное в свойствах блока падение напряжения в прямом направлении, В

**Fig. 2.** Structure of the IGBT model in the SimInTech program:

$u_{ak}$  – the voltage value on the element, V;  $C$  – the value of the control signal;  $R$  – the resistance of the element, Ohms;  $U_f$  – the forward voltage drop specified in the block properties, V

По условиям моделирования приняты допущения:

- сигнал управления подается одновременно на все ветви плеча от одного драйвера;
- помехи в цепях управления отсутствуют;
- все транзисторы и диоды, включенные в параллельные ветви, имеют идентичные характеристики.

Для анализа распределения токов принят

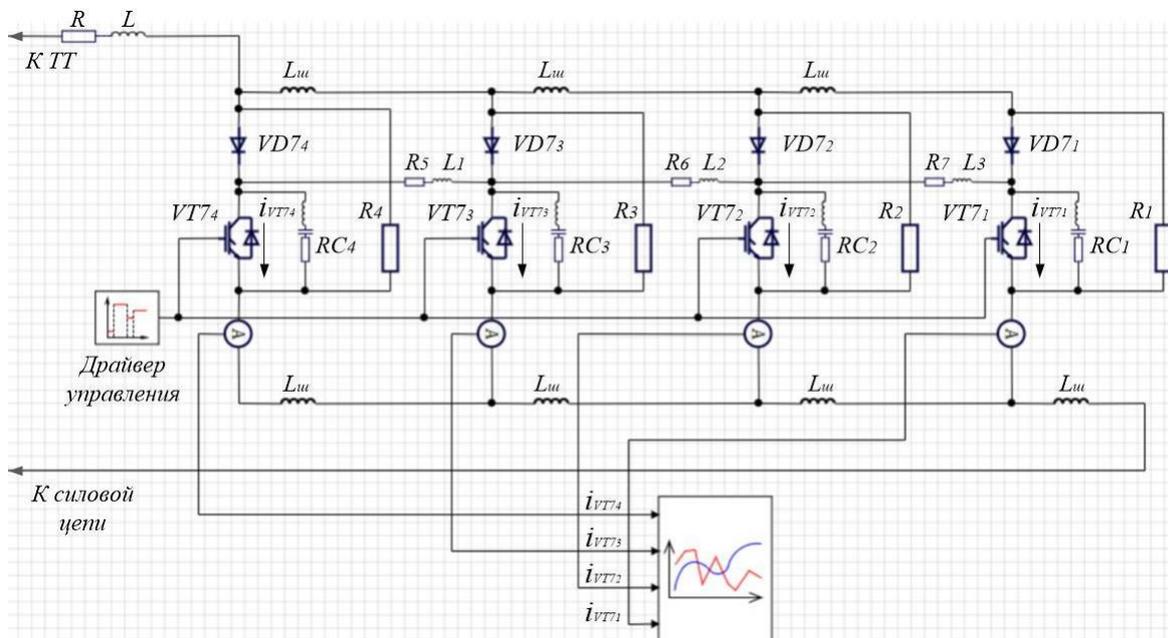
момент включения и выключения силовых транзисторов. Время проводящего состояния ветвей соответствует существующим алгоритмам управления ВИП на IGBT-транзисторах для 3,5 зоны регулирования в режиме тяги.

На основании штатных схемотехнических решений подключения силовых шин, применяемым снабберным цепям, индуктивности силовых шин, соединяющих параллельные ветви и принятых допущениях в программе SimInTech построена модель четырехтранзисторного плеча ВИП электровоза (рис. 3).

### Анализ распределения тока по ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Полученные в результате моделирования диаграммы протекания тока по параллельным ветвям плеча ВИП при подключении преобразователя к источнику переменного напряжения медным кабелем длиной 1 м и расчетной индуктивностью согласно (1), представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 показал, что в момент открытия транзисторов имеется значительный разброс по величине их тока включения. Ток по транзистору  $VT_4$  на 226 А больше чем, например, ток по транзистору  $VT_3$ , и практически



**Рис. 3.** Модель плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов в программе SimInTech

**Fig. 3.** Arm model of an IGBT-based rectifier-inverter converter in the SimInTech program

составляет двойной номинальный ток ветви при текущих условиях работы. Для реального преобразователя электровоза такой режим недопустим, так как приведет к перегреву перегруженного транзистора  $VT_4$  с последующим его прожогом и отказом плеча в целом.

Для исследования влияния значительно увеличим индуктивность на входе преобразователя, используем для примера длину провода 40 м. Тогда по результатам моделирования получим диаграммы протекания тока по параллельным ветвям плеча ВИП (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что при наличии значительной индуктивности на входе преобразователя, характерная точка включения транзисторов в явном виде прослеживается слабо и находится на уровне 100 А. Если сравнивать с предыдущим опытом (см. рис. 4) кривые тока

имеют идентичные формы, а для внутренних ветвей плеча  $VT_2$  и  $VT_3$  вовсе одинаковы, что является закономерным при выбранном способе подключения силовых шин. Такой вариант показывает достаточно удовлетворительный режим работы плеча преобразователя, обеспечивающий практически равномерное распределение тока по его ветвям.

Проведя ряд аналогичных опытов на модели в программе SimInTech при разной величине индуктивности на входе преобразователя, получены диаграммы распределения тока по параллельным ветвям плеча ВИП. Результаты моделирования представлены в таблице. При этом целесообразно учитывать значения тока включения только для двух ветвей, первая из которых принимается максимальной по току  $i_{\max}$  при включении, вторая – минимальной  $i_{\min}$ .

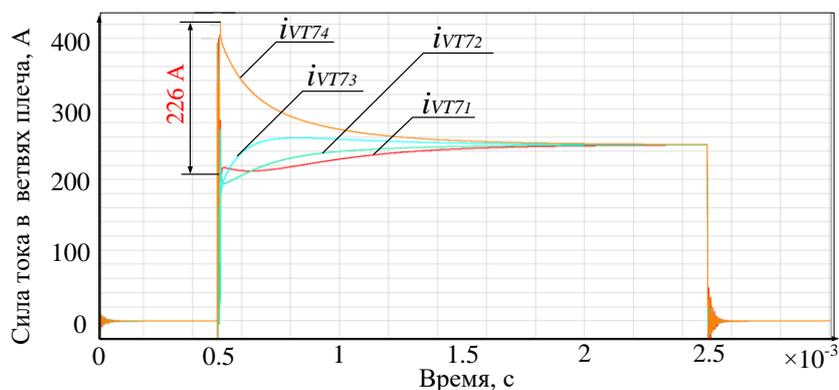


Рис. 4. Диаграммы протекания тока в параллельных ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя

на базе IGBT-транзисторов при длине провода подключения на входе преобразователя 1 м  
**Fig. 4.** Diagrams of current flow in parallel branches of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with a connection wire length of 1 m at the input of the converter

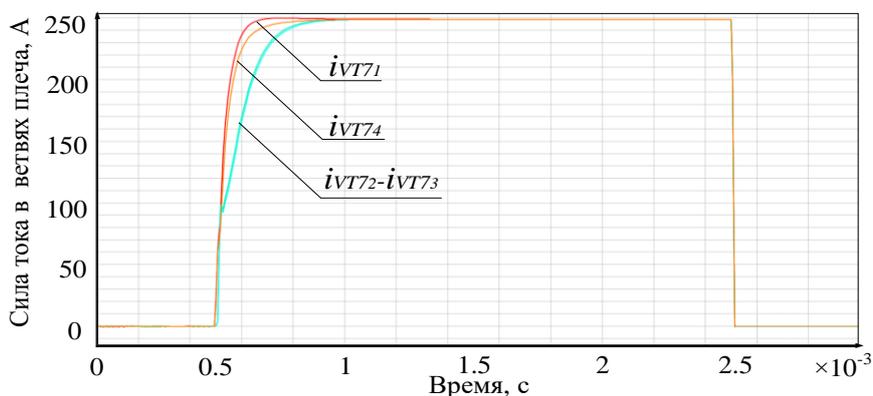


Рис. 5. Диаграммы протекания тока в параллельных ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя

на базе IGBT-транзисторов при длине провода подключения на входе преобразователя 40 м  
**Fig. 5.** Diagrams of current flow in parallel branches of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with a connection wire length of 40 m at the input of the converter

Другая пара транзисторов имеет среднее значение тока включения, близкое к номинальному в течение всего периода.

По данным таблицы видно, что с увеличением длины кабеля подключения увеличивается и индуктивность. В соответствии с этим будет меняться и разница между токами по параллельным ветвям плеча ВИП. Так при моделировании ток в момент открытия транзисторов по ветвям может отличаться более чем в два раза. Для более наглядного представления построим зависимость отношения  $i_{\max} / i_{\min}$  от длины кабеля на входе преобразователя (рис. 6).

Результаты моделирования процесса открытия включенных параллельно IGBT-транзисторов плеча преобразователя показали, что при организации стендовых испытаний необходимо учитывать длину кабелей подключения преобразователя со стороны его входа и принимать практически идентичными, так как они будут установлены на реальном электровозе.

## Заключение

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Индуктивность на входе преобразователя влияет на распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов при встречном подключении шин.

2. Изменение величины индуктивности на входе преобразователя на базе IGBT-транзисторов может привести к увеличению разности тока в момент включения по ветвям плеча ВИП более чем в 2 раза.

3. При некорректном подборе вариантов подключения силовых шин сила тока в момент включения в наиболее нагруженной ветви может отличаться более чем на 220 А, что практически составляет номинальный ток отдельной ветви.

4. Оптимальное соединение шин для параллельного подключения IGBT-транзисторов должно подбираться под конкретные условия испытаний.

Результаты моделирования работы плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов с четырехпараллельными ветвями

Results of modeling the operation of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with four parallel branches

Радиус сечения кабеля, м Cable section radius, m	Длина кабеля, м Cable length, m	Индуктивность кабеля L, мкГн Cable inductance L, μH	Значение тока в момент включения IGBT-транзистора, А Current value at the moment of switching on the IGBT transistor, A		$i_{\max} - i_{\min}$	$i_{\max}/i_{\min}$
			В цепи наиболее нагруженного транзистора ( $i_{\max}$ ) In the circuit of the most loaded transistor ( $i_{\max}$ )	В цепи транзистора с наименьшей нагрузкой ( $i_{\min}$ ) In the circuit of the least loaded transistor ( $i_{\min}$ )		
0,005	1	1,05	420	194	226	2,16
	5	6,85	369	193	176	1,91
	10	15,09	356	191	165	1,86
	15	23,85	290	190	100	1,53
	20	32,95	283	210	73	1,35
	40	71,44	250	210	40	1,19



Рис. 6. Диаграмма зависимости отношения  $i_{\max} / i_{\min}$  от длины кабеля подключения на входе преобразователя

Fig. 6. Diagram of the dependence of the  $i_{\max} / i_{\min}$  ratio on the length of the connection cable from the AC voltage side

## Список литературы

1. Рационализировать перевозки // Гудок. 2022. № 168. сент. : электрон. газ. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (дата обращения 14.02.2023).
2. «PRO//Движение. Сибирь». Запрос на умную логистику и тяжеловесные поезда // Гудок. 2022. сент. : электрон. газ. URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1614107/> (дата обращения 14.02.2023).
3. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи // Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ (ЗТС.001.012РЭ). Новочеркасск : ВЭлНИИ, 2005. 125 с.
4. Задорожный В.Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги // Локомотив. 2019. № 10 (754). С. 11–16.
5. Знаенко В.Н., Линьков А.О., Мельниченко О.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги // Изв. Транссиба. 2021. № 1 (45). С. 66–75.
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 // Изв. Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 112–125.
7. Власевский С.В., Скорик В.Г., Буяева Е.В., Фокин Д.С. Повышение коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 1. С. 2–5.
8. Иванов В.С., Баринов И.А. Диодно-транзисторная база моторвагонного подвижного состава переменного тока // Молодая наука Сибири. 2018. № 1. С. 49–57.
9. Газизов Ю.В. Новый алгоритм управления полупроводниковыми преобразователями электровоза // Наука. Технологии Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2008. Т. 3. С. 88–90.
10. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
11. Шрамко С.Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. 2016. № 4 (111). С. 192–199.
12. Томилов В.С. Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 3 (55). С. 138–144.
13. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 177 с.
14. Яговкин Д.А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск. 2016. 178 с.
15. Проблемы параллельного и последовательного соединения IGBT. Ч. 1. Параллельная работа IGBT / А. Винтрих, У. Николаи, В. Турски и др. // Силовая электроника. 2013. Т. 4. № 43. С. 67–74.
16. Хофштоттер Н., Ламп И., Колпаков А. Параллельная работа IGBT при различных способах управления затворами // Силовая электроника. 2017. Т. 4. № 67. С. 12–23.
17. Колпаков А. Особенности параллельного соединения модулей IGBT // Компоненты и технологии. 2005. № 8 (52). С. 134–139.
18. Знаенко В.Н., Мельниченко О.В., Линьков А.О. Влияние конструкции силовых шин на токовую симметрию в ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах при их параллельном включении // Изв. Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 74–85.
19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. 487 с.
20. Среда динамического моделирования SimInTech : программа // SimInTech : сайт. URL : <https://simintech.ru/> (Дата обращения 14.02.2023).

## References

1. Ratsionalizirovat' perevozki (Elektronnyi resurs) [Rationalize transportation (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (Accessed February 14, 2023).
2. «PRO // Dvizhenie. Sibir'». Zпрос na umnyu logistiku i tyazhelovesnye poyezda (Elektronnyi resurs) [«PRO // Motion. Siberia». Request for smart logistics and heavy trains (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1614107/> (Accessed February 14, 2023)
3. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5. [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Book 5. Description and work. Electronic equipment. Converters. IDMB.661142.009.RE5]. NovoCherkassk ; VELNII Publ., 2005. 125 p.
4. Zadorozhnyi V.L. Osobennosti elektrovozov serii «Ermak» s poosnym regulirovaniem sily tyagi [Features of electric locomotives of the «Ermak» series with axial control of traction force]. *Locomotiv* [Locomotive], 2019, no. 10 (754), pp. 11–16.
5. Znaenok V.N., Lin'kov A.O., Mel'nichenko O.V. Vypryamitel'no-invertornyi preobrazovatel' elektrovoza na baze IGBT-tranzistorov kak sposob povysheniya propusknosti sposobnosti uchastkov zheleznoi dorogi [Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT as a way to increase the capacity of railway sections]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2021, no. 1 (45), pp. 66–75.
6. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mel'nichenko O.V. Otsenka poter' napryazheniya v tyagovoi seti pri rabote elektrovozov s vypryamitel'no-invertornymi preobrazovatelyami na baze tiristorov i IGBT-tranzistorov [Estimation of voltage losses in traction network when operating electric locomotives with rectifier-inverter converters based on thyristors and IGBT-transistors].

losses in the traction network during operation of electric locomotives with rectifier-inverter converters based on thyristors and IGBT]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2022, no. 3 (51), pp. 112–125.

7. Vlasevskii S.V., Skorik V.G., Bunyaeva E.V., Fokin D.S. Povyshenie koeffitsienta moshchnosti vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka v rezhimakh tyagi i rekuperativnogo tormozheniya [Increasing the power factor of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive in traction and regenerative braking modes]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2011, no. 1, pp. 2–5.

8. Ivanov V.S., Barinov I.A. Diodno-tranzistornaya baza motorvagonnogo podvizhnogo sostava peremennogo toka [Diode-transistor base of AC rolling stock]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2018, no. 1, pp. 1–9.

9. Gazizov Yu.V. Novyi algoritm upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami elektrovoza [New control algorithm for electric locomotive semiconductor converters]. *Materialy Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologii Innovatsii»* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of young scientists «The science. Technologies Innovations»]. Novosibirsk, 2008, vol. 3, pp. 88–90.

10. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.

11. Shramko S.G. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the efficiency of operation of AC electric locomotives in the regenerative braking mode]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2016, no. 4 (111), pp. 192–199.

12. Tomilov V.S. Vliyaniye bloka ballastnykh rezistorov na KPD elektricheskoi tsepi elektrovoza peremennogo toka [Influence of a block of ballast resistors on the efficiency of the electric circuit of an alternating current electric locomotive]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2022, no. 3 (55), pp. 138–144.

13. Lin'kov A.O. Sovershenstvovaniye vypryamitel'noi ustanovki vozbuzhdeniya tyagovykh dvigatelei elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improvement of the rectifier system for excitation of traction motors of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2015. 177 p.

14. Yagovkin D.A. Sovershenstvovaniye vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka i printsipa ego upravleniya v rezhime tyagi [Improvement of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive and the principle of its control in the traction mode]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2016. 178 p.

15. Wintrich A., Nicolai U., Turski W., Reimann T. Problemy parallel'nogo i posledovatel'nogo soyedineniya IGBT. Chast' 1. Parallel'naya rabota IGBT [Problems of IGBT parallel and series connection. Part 1. Parallel operation of IGBT]. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2013, vol. 4, no. 43, pp. 67–74.

16. Hofstotter N., Lamp J., Kolpakov A. Parallel'naya rabota IGBT pri razlichnykh sposobakh upravleniya zatvorami [Parallel operation of IGBTs with various gate control methods]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2017, vol. 4, no. 67, pp. 12–23.

17. Kolpakov A. Osobennosti parallel'nogo soyedineniya modulei IGBT [Features of parallel connection of IGBT modules]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 8 (52), pp. 134–139.

18. Znaenok V.N., Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O. Vliyaniye konstruksii silovykh shin na tokovuyu simmetriyu v vetvyakh plecha vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh pri ikh parallel'nom vklyuchenii [Influence of the design of power buses on the current symmetry in the branches of the arm of the rectifier-inverter converter on IGBT when they are connected in parallel]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2022, no. 2 (50), pp. 74–85.

19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Raschet induktivnostei [Calculation of inductances:]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.

20. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya SimInTech (Elektronnyi resurs) [SimInTech Dynamic Simulation Environment (Electronic resource)]. Available at: <https://simintech.ru/> (Accessed February 14, 2023).

### Информация об авторах

**Знаенко Вячеслав Николаевич**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: znaenock@yandex.ru.

**Мельниченко Олег Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Портной Александр Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Линьков Алексей Олегович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: linkovalex@mail.ru.

### Information about the authors

**Vyacheslav N. Znaenok**, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: znaenock@yandex.ru.

**Oleg V. Mel'nichenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Alexander Yu. Portnoi**, Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Aleksei O. Lin'kov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: linkovalex@mail.ru.