

УДК 621.33:621.314.54

EDN EJOYHS

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Ю.Ю. Скороход

ORCID: 0000-0001-8192-8182 e-mail: skorohodu@yandex.ru

ООО «Трансконвертер»

Москва, Россия

Рассмотрены входные блоки высоковольтного многокаскадного преобразователя собственных нужд типа *EVB51* вагона локомотивной тяги, предназначенного для международных пассажирских перевозок. Такие входные блоки преобразовывают высоковольтное напряжение (выше 1500 В) как постоянного, так и переменного тока контактной сети в стабилизированные напряжения постоянного тока для промежуточных звеньев высоковольтного многокаскадного преобразователя. Приведена силовая схема входных блоков высоковольтного преобразователя типа *EVB51*. Исследованы пульсации входного потребляемого тока в режимах синхронного и асинхронного управления силовыми ключами рассматриваемых входных блоков. Предложено разделять входной ток на медленноменяющуюся и быстроменяющуюся составляющие. Представлены выражения для расчета составляющих входного тока преобразователя и зависимости его пульсаций от числа входных блоков в режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами. Показано, что использование режима асинхронного управления силовыми ключами позволяет существенно снизить пульсации входного тока высоковольтного преобразователя. Предложены выражения для оценки коэффициента гармонических искажений входного потребляемого тока. Проведен анализ влияния числа входных блоков и режимов управления силовыми ключами на качество потребляемого тока. Показано, что коэффициент гармонических искажений входного тока практически не зависит от выходной мощности преобразователя. Наибольшее влияние на коэффициент искажения тока оказывает количество входных блоков, которые функционируют в режиме асинхронного управления силовыми ключами.

Ключевые слова: асинхронное управления, высоковольтный многокаскадный преобразователь, импульсное преобразование, качество потребляемого тока, коэффициент искажения, пульсации входного тока, синхронное управление.

Для цитирования: Скороход Ю.Ю. Анализ влияния синхронного и асинхронного способа управления на качество потребляемого тока преобразователя // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 81-92. EDN EJOYHS

PERFORMANCE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS AND ASYNCHRONOUS CONTROL METHODS ON QUALITY OF CURRENT CONSUMING BY CONVERTER

Y.Y. Skorokhod

ORCID: 0000-0001-8192-8182 e-mail: skorohodu@yandex.ru

Transconverter LLC

Moscow, Russia

Abstract. The article considers the input blocks of the high-voltage multi-stage auxiliary converter type EVB51 for locomotive-trailing cars intended for international passenger trains. These blocks convert the DC and AC high voltage of above 1500 V of overhead catenary network into stabilised DC voltages for intermediate blocks of high-voltage multi-stage converters. The power scheme of the input blocks of the high-voltage converter type EVB51 is presented. The ripples of the input current consumed by these input blocks in synchronous and asynchronous control modes of power switches are studied. It is proposed to recognize two components of the input current, namely fast-changing and slow-changing. The expressions for calculating the input converter current components, the dependence of input converter current ripples on the number of input blocks for synchronous and asynchronous control modes of power switches are presented. It is demonstrated that the asynchronous control of power switches allows substantially reduce the high-voltage converter input current ripples. The expressions to estimate the harmonic distortion coefficient of the input consumed current are proposed. The influence of the number of input blocks and power switch control modes on the quality of the consumed current is studied. It is demonstrated that the harmonic distortion coefficient of the input consumed current has almost no effect from the converter output power. The current harmonic distortion coefficient has the greatest impact from the number of input blocks that operate in asynchronous control mode of power switches.

Keywords: asynchronous control, high-voltage multi-stage converter, pulsed conversion, input current quality, distortion coefficient, input current ripples, synchronous control.

For citation: Y.Y. Skorokhod, "Performance analysis of synchronous and asynchronous control methods on quality of current consuming by converter", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 81-92, 2025. EDN EJOYHS

I. Введение

В современных бортовых и наземных электротехнических комплексах в качестве источников питания все чаще применяются статические преобразователи, в основе работы которых лежит импульсный способ преобразовании электрической энергии [1-3]. Использование такого способа преоб-

разования электрической энергии дает выигрыш по массогабаритным показателям, стоимости обслуживания и надежности перед другими способами преобразования энергии [4-6]. В то же время импульсное преобразование электроэнергии вызывает электромагнитные помехи, которые, например, оказывают негативное влияние на кабели связи [7, 8]. Так, на железнодорожном транспорте высоковольтные преобразователи (ВП) могут оказывать серьезное влияние на линии связи, обеспечивающих работу стрелочных переводов [9, 10]. В связи с этим содержание высших гармонических составляющих во входном токе ВП строго регламентировано [11, 12].

В статье рассмотрен ВП типа *EVB51* производства *Siemens AG* и ООО «Трансконвертер», предназначенный для пассажирских вагоном модели 61-4476 *RIC* (*Siemens AG*, Вена). Он способен функционировать при пяти различных типах напряжения: – 1000 В, – 3000 В, 1 ~ 50 Гц 1000 В, 1 ~ 50 Гц 1500 В, 1 ~ 50 Гц, 3000 В, имеющие место в контактной сети на железных дорогах России и Европейского союза [12, 13]. Конструктивно преобразователь *EVB51* представляет собой ящик (рис. 1), который устанавливают под пассажирским вагоном.



Рис. 1. Преобразователь *EVB51*

Fig. 1. *EVB51* converter

Структурно рассматриваемый преобразователь содержит четыре последовательно соединенных входных блока, которые отвечают как за стабилизацию напряжения промежуточных звеньев постоянного тока, так и за качество потребляемого тока ВП. Как уже отмечалось, на железнодорожном транспорте к содержанию высших гармонических составляющих во входном потребляемом токе ВП предъявляются особенно повышенные требования, не выполнение которых может привести к несанкционированному срабатыванию стрелочных переводов и семафоров на железнодорожных путях. В связи с этим были проведены исследования влияния различных режимов управления силовыми ключами и количества входных блоков ВП на качество потребляемого тока.

II. Исследование пульсаций входного тока

Схемотехнически входной блок рассматриваемого ВП представляет собой импульсный преобразователь переменного/постоянного тока в постоянный, на входе которого установлен внешний дроссель $L1$ (рис. 2).

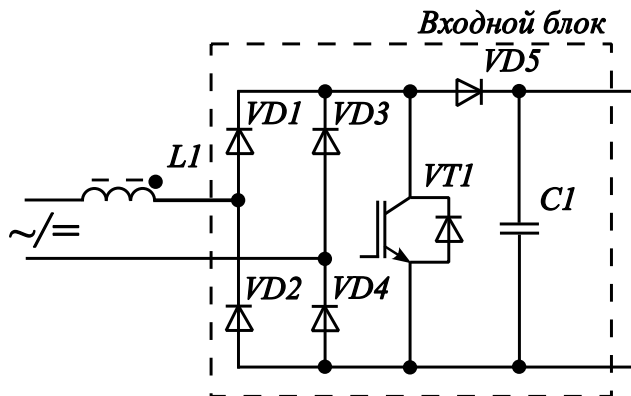


Рис. 2. Схема входного блока

Fig. 2. Scheme of the input block

В многокаскадном ВП входные блоки соединены последовательно и имеют один общий дроссель $L1$. Следует заметить, что в рассматриваемом преобразователе типа $EVB51$ напряжение контактной сети переменного тока поступает на четыре входных блока через встроенные понижающий однофазный автотрансформатор $TV1$ и дроссель $L1$. В связи с этим амплитуда суммы входных напряжений переменного тока входных блоков определяется как $U_{вхл} = U_{инн}K_{тр}$, где $U_{инн}$ – амплитуда входного напряжения контактной сети; $K_{тр}$ – коэффициент трансформации понижающего автотрансформатора $TV1$.

Входные блоки ВП могут работать в режимах синхронного и асинхронного алгоритмов управления силовыми ключами. На рис. 3 показаны режимы синхронного и асинхронного управления четырьмя входными блоками, которые имеет преобразователь $EVB51$, где u_{VT1} , u_{VT2} , u_{VT3} , u_{VT4} импульсы управления (черные прямоугольники), которые подают на затворы транзисторов $VT1-VT4$ соответствующих входных блоков; t_u – длительность включенного состояния транзистора; T – период повторности.

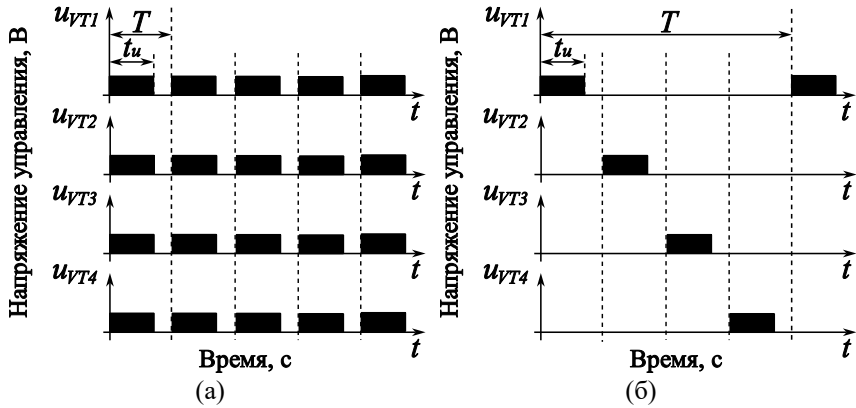


Рис. 3. Синхронное (а) и асинхронное управление

Fig. 3. Synchronous (a) and asynchronous (b) control

С учетом [1, 6, 12], для рассматриваемых входных блоков ВП при работе от контактной сети переменного тока, получено выражение для расчета коэффициента заполнения $\gamma(t)$:

$$\gamma(t) = 1 - \frac{U_{\text{вхм}} |\sin(\omega_1 t)|}{U_{\text{out s}}}, \quad (1)$$

где ω_1 – угловая частота напряжения контактной сети переменного тока; $U_{\text{out s}}$ – сумма выходных напряжений постоянного тока входных блоков.

Предложено, кривую входного переменного тока $i_{in}(t)$, которая имеет ШИМ форму благодаря переключению транзисторов входных блоков по заданному синусоидальному закону [1, 2], разделить на медленноменяющуюся $i_{in1m}(t)$ и быстроменяющуюся $i_{in\delta}(t)$ составляющие [6, 14, 15].

Медленноменяющаяся составляющая входного тока $i_{in1m}(t)$ представляет собой синусоидальную функцию с частотой первой гармоники, которая совпадает по фазе с входным напряжением контактной сети:

$$i_{in1m}(t) = \frac{2S}{U_{\text{вхм}} \eta} \sin(\omega_1 t), \quad (2)$$

где S – выходная суммарная мощность ВП; η – коэффициент полезного действия ВП.

В результате исследований установлено, что в режиме синхронного управления силовыми ключами при любом количестве входных блоков ВП

положительная и отрицательная огибающие амплитуд быстроменяющейся составляющей $i_{in\sigma}(t)$ входного тока определяется как:

$$i_{+6S} = \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{2f_c L_1} \left(1 - \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{U_{out s}} \right); \quad (3)$$

$$i_{-6S} = \frac{-U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{2f_c L_1} \left(1 - \frac{U_{вхм} \sin(\omega_1 t)}{U_{out s}} \right), \quad (4)$$

где f_c – частота переключения транзистора входного блока.

В режиме асинхронного управления (рис. 3б) силовыми ключами при наличии четырех входных блоков, которые имеет преобразователь *EVB51*, существуют четыре характерных участка кривых быстроизменяющейся составляющей входного тока, которые соответствуют коэффициенту заполнения γ : от 0 до 0,25; от 0,25 до 0,5; от 0,5 до 0,75; от 0,75 до 1. Для этих случаев получены следующие выражения:

$$\begin{aligned} i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(7u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - 3U_{out s} \right); & 0 \leq \gamma < 0,25; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(5u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - \frac{3}{2}U_{out s} \right); & 0,25 \leq \gamma < 0,5; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(3u_{вх}(t) - \frac{4u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} - \frac{1}{2}U_{out s} \right); & 0,5 \leq \gamma < 0,75; \\ i_{\pm 6A4} &= \frac{\pm 1}{8f_c L_1} \left(u_{вх}(t) - \frac{4 \cdot u_{вх}(t)^2}{U_{out s}} \right); & 0,75 \leq \gamma < 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_{вх}(t) = U_{вхм} \cdot \sin(\omega_1 t)$ – мгновенное суммарное значение напряжения, которое поступает на входные блоки.

Как видно из (3)-(5), в режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами амплитуда быстроменяющейся составляющей входного тока не зависит от выходной мощности S преобразователя.

III. Анализ влияния режимов

синхронного и асинхронного управления на качество входного тока

Из [8] следует, что нормативным показателем качества входного потребляемого тока принят коэффициент искажений тока:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n_r=2}^{40} I_{n_r}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100, \quad (6)$$

где I_{n_r} – действующее значение n_r -гармонической составляющей тока; $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармонической составляющей тока.

При нахождении K_I было принято, что:

- частота входного напряжения контактной сети во много раз меньше частоты коммутации силовых транзисторов ВП, т. е. $f_1 \ll f_c$;
- ВП работает в режиме непрерывного тока;
- коэффициент заполнения $\gamma(t)$ определяется из (1).
- нагрузка силовой схемы имеет активный характер благодаря последующему выпрямлению высокочастотного тока;
- отсутствуют потери мощности в полупроводниковых элементах силовой схемы;
- отсутствует насыщение в магнитной системе входного реактора $L1$;
- отсутствуют потери мощности в обмотке и в магнитной системе входного реактора $L1$;
- отсутствуют потери мощности в выходном конденсаторе $C1$.

В этом случае было сделано допущение, что:

$$\sum_{n_r=2}^{40} I_{n_r}^2 = \frac{I_6^2}{K_{тр}^2}, \quad (7)$$

где I_6 – действующее значение быстромменяющейся составляющей входного тока.

С учетом (6) и принятого допущения (7) было выведено выражение для расчета коэффициента искажений входного тока в режиме синхронного управления силовыми ключами при любом количестве входных блоков:

$$K_{I_s} = \frac{1}{f_c L_1} \sqrt{\frac{U_{in}^2}{16} - \frac{\sqrt{2} U_{in}^3}{3\pi U_{out\ s}} + \frac{3U_{in}^4}{32U_{out\ s}^2}} \cdot 100, \quad (8)$$

$$\sqrt{\left(\frac{Q}{U_{in} n}\right)^2 - \frac{1}{(f_c L_1)^2} \left(\frac{U_{in}^2}{16} - \frac{\sqrt{2} U_{in}^3}{3\pi U_{out\ s}} + \frac{3U_{in}^4}{32U_{out\ s}^2}\right)}$$

где U_{in} – действующее значение напряжения контактной сети.

Коэффициент искажения входного тока для ВП, содержащего N входных блоков с асинхронным способом управления, определен как:

$$K_{I \Lambda(n=N)} = \frac{I_{6 \Lambda(n=N)}}{\sqrt{\left(\frac{Q}{U_{in} \eta}\right)^2 - \left(I_{6 \Lambda(n=N)}\right)^2}} \cdot 100, \quad (9)$$

где $I_{6 \Lambda(n=N)} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{U_{in} \sqrt{f_1}}{2Nf_c L_1} \sqrt{Z1_k - Z2_k + Z3_k - Z4_k + B_k^2 \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} \right)} \right)$;

$$Z1_k = \frac{U_{in}^4 N^2}{U_{outs}^2} \left(\frac{3}{2} \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} \right) + \frac{\sin 4D_k - \sin 4E_k}{8\omega_1} + \frac{\sin 2E_k - \sin 2D_k}{\omega_1} \right);$$

$$Z2_k = \frac{8U_{in} N A_k}{\sqrt{2}\omega_1 U_{outs}} \left(\cos E_k - \cos D_k + \frac{\cos^3 D_k - \cos^3 E_k}{3} \right);$$

$$Z3_k = U_{in}^2 (A_k^2 + 2NB_k) \left(\frac{D_k}{\omega_1} - \frac{E_k}{\omega_1} + \frac{\sin 2E_k - \sin 2D_k}{2\omega_1} \right);$$

$$Z4_k = \frac{\sqrt{2}U_{in} U_{outs} A_k B_k}{\omega_1} \cdot (\cos E_k - \cos D_k);$$

$$A_k = (2N - j_k - i_k)4; \quad B_k = \left(\frac{i_k j_k}{N} - i_k - j_k + N \right); \quad D_N = \frac{T}{4};$$

$$D_k = \arcsin \frac{\left(1 - \frac{j_k}{N}\right) U_{outs}}{\sqrt{2}U_{in}}; \quad E_1 = 0; \quad E_k = \arcsin \frac{\left(1 - \frac{i_k}{N}\right) U_{outs}}{\sqrt{2}U_{in}};$$

$$k = 1, 2, \dots, N; \quad \frac{j_k}{N} < \gamma_k \leq \frac{i_k}{N}; \quad i_k = 1, 2, \dots, N; \quad j_k = 0, 1, \dots, (N-1).$$

Были проведены исследования влияния выходной мощности ВП на коэффициент искажения входного тока при различных количествах входных блоков и различных режимах управления силовыми ключами. В качестве наглядных примеров на рис. 4а (при одном входном блоке) и рис. 4б (при четырех входных блоках) в режиме асинхронного управления представлены зависимости относительных коэффициентов искажения входного тока

$$K_{I \Lambda(n=1)}^* = \frac{K_{I \Lambda(n=1)}}{K_{\max I \Lambda(n=1)}} \quad \text{и} \quad K_{I \Lambda(n=4)}^* = \frac{K_{I \Lambda(n=4)}}{K_{\max I \Lambda(n=4)}},$$

от относительного действующего значения входного напряжения $U_{in}^* = U_{in} / U_{max\ in}$ при выходной мощности ВП, равной $S = 100$ кВА (линия 1), при $S = 75$ кВА (линия 2), при $S = 50$ кВА (линия 3) и при $S = 25$ кВА (линия 4), где $K_{max\ I\ \Delta(n=1)}$ – максимальное значение коэффициента искажения входного тока при одном входном блоке; $U_{max\ in}$ – максимальное действующее значения напряжения контактной сети переменного тока.

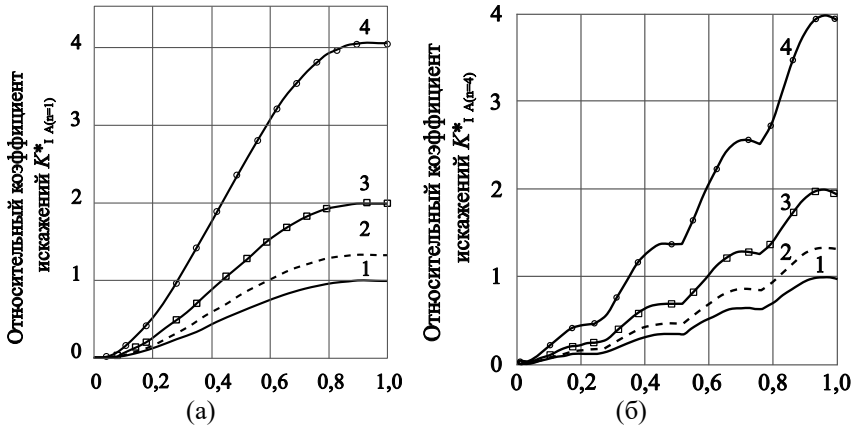


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента искажения входного тока ВП с одним входным блоком (а) и четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления (б) при выходной мощности ВП: 1 – 100 кВА, 2 – 75 кВА, 3 – 50 кВА, 4 – 25 кВА

Fig. 4. Relative input current distortion coefficient of high-voltage converter with one input block (a) and four input block and asynchronous control principle (b) vs high-voltage converter output power: 1 – 100 kVA, 2 – 75 kVA, 3 – 50 kVA, 4 – 25 kVA

В результате исследований был сделан вывод, что коэффициент искажения входного тока не существенно зависит от выходной мощности ВП при любом количестве входных блоков и в любом режиме управления силовыми транзисторами. Это объясняется отсутствием зависимости действующего значения быстроменяющейся составляющей входного тока от мощности нагрузки. Отклонение от данного вывода начинает проявляться, когда действующее значение медленноменяющейся составляющей становится сопоставимо с действующим значением быстроменяющейся составляющей входного тока, что имеет место при входном напряжении менее 7 % от номинального значения.

Анализ показывает, что при одной и той же частоте коммутации силовых транзисторов с различным количеством входных блоков в асинхронном режиме управления, работающих при одной и той же мощности нагрузки, отношение коэффициента искажения входного тока к мощности нагрузки отклоняется от обратно пропорционального закона с уменьшением мощности нагрузки. Данный фактор проявляется при меньшем количестве входных блоков и более высоком действующем значении входного напряжения контактной сети.

Экспериментальная проверка на преобразователе *EVB51* при напряжении контактной сети переменного и постоянного тока подтвердила правильность полученных выражений и выводов.

IV. Заключение

В режиме синхронного и асинхронного управления силовыми ключами амплитуда пульсаций входного тока не зависит от выходной мощности S преобразователя.

Коэффициент искажений входного тока в режиме синхронного управления силовыми ключами не зависит от количества входных блоков.

В асинхронном режиме управления силовыми ключами применение двух входных блоков в ВП позволяет добиться максимум 4,5-кратного и минимум 2-кратного улучшения коэффициента искажения тока, а применение четырех входных блоков – максимум 14-кратного и минимум 4,2-кратного улучшения коэффициента искажений входного тока по сравнению с одним входным блоком в ВП.

Коэффициент искажения входного тока несущественно зависит от выходной мощности ВП при любом количестве входных блоков и в любом режиме управления силовыми транзисторами.

Полученные результаты можно использовать при проектировании высоковольтных многокаскадных преобразователей с входным напряжением как переменного, так и постоянного тока.

© Скороход Ю.Ю., 2025

Поступила в редакцию 02.12.2024

Принята к публикации 30.01.2025

Received 02.12.2024

Accepted 30.01.2025

Библиографический список

- [1] Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
- [2] Makarov S.N., Ludwig R., Bitar S.J. Practical Electrical Engineering. Springer Cham, 2016. – 987 p. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2

- [3] Скороход Ю.Ю., Вольский С.И. Анализ бортовых высоковольтных преобразователей однофазного переменного тока с повышенным коэффициентом мощности // *Электричество*. 2020. № 10. С. 44-51. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-44-51
- [4] Sepehr A., Saradarzadeh M., Farhangi S. High-voltage isolated multioutput power supply for multilevel converters // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2017. № 25 (4). С. 3319-3333. DOI: 10.3906/elk-1604-410
- [5] Резников С.Б., Вольский С.И., Вышков Ю.Д., Кириллов В.Ю., Харченко И.А. Силовые полупроводниковые ключи для импульсных преобразователей электроэнергии с модульно-масштабируемой архитектурой // *Электротехника*. 2019. № 2. С. 10-17.
- [6] Зиновьев Г.С. Силовая электроника. М.: Юрайт, 2017. – 667 с.
- [7] ГОСТ 33436.3-1-2015. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3-1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. Введ. 2017-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 26 с.
- [8] ГОСТ Р 55434-2013. Электропоезда. Общие технические требования. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 61 с.
- [9] Skorokhod Y., Philin D., Volskiy S. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction // 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic: IEEE, 2020. P. 1-5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [10] UIC CODE 550-3. Power supply installations for passenger stock. Effect electrical installations outside passenger coaches. Введ. 2005-04-01. Paris: UIC, 2005. – 12 p.
- [11] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- [12] IEC 62236-3-1. Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle. Введ. 2008-02-01. IEC, 2008. – 63 p.
- [13] ГОСТ 6962-75. Транспорт, электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. Введ. 1977-01-01. М.: Издательство стандартов, 1976. – 8 с.
- [14] Skorokhod Y., Volskiy S. The analysis and simulation of power circuits for AC high-voltage converter // 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Nov. 27-30, 2007, Bangkok, Thailand: IEEE, 2007. P. 1741-1747. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487944
- [15] Bacha S., Munteanu I., Bratcu A.I. Power electronic converters modeling and control. London: Springer, 2014. – 454 p.

References

- [1] V.I. Meleshin, *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor conversion systems]*. Moscow: Tekhnosfera, 2005 (in Russian).
- [2] S.N. Makarov, R. Ludwig and S.J. Bitar, *Practical Electrical Engineering*, 1st ed. Springer Cham, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21173-2

- [3] Y.Y. Skorokhod and S.I. Volskiy, "An analysis of on-board high-voltage converters of single-phase alternating current with increased microelectric power factor", *Elektrichestvo*, no. 10, pp. 44-51, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-10-44-51
- [4] A. Sepehr, M. Saradarzadeh and S. Farhangi, "High-voltage isolated multioutput power supply for multilevel converters", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 25, no. 4, pp. 3319-3333, Jan. 2017. DOI: 10.3906/elk-1604-410
- [5] S.B. Reznikov, S.I. Vol'skii, Y.D. Vyshkov, V.Y. Kirillov and I.A. Kharchenko, "Power semiconductor switches for pulse power transformers with a modular and scalable architecture", *Russian Electrical Engineering*, vol. 90, no. 2, pp. 100-106, 2019.
- [6] G.S. Zinoviev, *Silovaya elektronika [Power Electronic]*. Moscow: Urait, 2017 (in Russian).
- [7] Electromagnetic compatibility of technical equipment. Railway systems and equipment. Part 3-1. Railway rolling stock. Requirements and test methods, GOST 33436.3-1-2015, June 2017.
- [8] Electric trains. General technical requirements, GOST R 55434-2013, Jan. 2014.
- [9] Y. Skorokhod, D. Philin and S. Volskiy, "Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction", in proc. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Oct. 19-21, 2020, Prague, Czech Republic, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269238
- [10] Power supply installations for passenger stock. Effect electrical installations outside passenger coaches, UIC CODE 550-3, Apr. 2005.
- [11] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [12] Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock. Train and complete vehicle, IEC 62236-3-1, Feb. 2008.
- [13] Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row, GOST 6962-75, January 1977.
- [14] Y. Skorokhod and S. Volskiy, "The analysis and simulation of power circuits for AC high-voltage converter", in proc. *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Nov. 27-30, 2007, Bangkok, Thailand, pp. 1741-1747. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487944
- [15] S. Bacha, I. Munteanu and A.I. Bratcu, *Power electronic converters modeling and control*. London: Springer, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Скоруход Юрий Юрьевич, начальник конструкторского бюро ООО «Трансконвертер», г. Москва, Российская Федерация. **Yury Y. Skorokhod**, head of design office of the Transconverter LLC, Moscow, Russian Federation.