

Анализ методов контроля выходных параметров статических преобразователей подвижного железнодорожного состава

Н. К. Третьяков

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
nktretyakov@stud.etu.ru

В. Е. Кузнецов

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
vekuznetcov@etu.ru

П. В. Реньё

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
pvrene@stud.etu.ru

Аннотация. В работе представлен анализ современных требований и методов контроля выходных параметров импульсных преобразователей электроэнергии – бортовых импульсных источников переменного напряжения, соответствующих межгосударственным отраслевым стандартам, распространяющимся на преобразователи локомотивов и моторвагонного подвижного состава, в частности, на скоростные электропоезда постоянного тока Siemens Velaro RUS «Сапсан» с бортовой сетью 220 В 50 Гц. Рассмотрен вопрос необходимости доработки современных нормативных документов в области устойчивости преобразователей в переходных процессах при подключении электронных потребителей с емкостным накопителем и выпрямителем. В исследовании применяются методы структурного анализа и натурных испытаний. Приведены осциллограммы практических измерений работы макетного образца преобразователя.

Ключевые слова: методы контроля; железнодорожное сообщение; импульсный преобразователь энергии; переходные процессы; потребители электроэнергии; качественные параметры выходного напряжения

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из наиболее распространённых и доступных способов перемещения является железнодорожное сообщение. Так, согласно данным за 2024 г., пассажиропоток «Российских железных дорог» вырос на 7 % и составил 1284 млн человек. Но наибольшая тенденция роста наблюдается в скоростном железнодорожном сообщении, а именно, на участке междугородней магистрали постоянного тока «Москва – Санкт-Петербург». Основными курсирующими скоростными поездами (скорость более 140 км/ч) являются Siemens Desiro RUS («Ласточка») и Siemens Velaro RUS («Сапсан»). В связи с отсутствием на электропоездах источников переменного напряжения необходимых для питания бытовых потребителей, рассчитанных на стандартную сеть 220 В 50 Гц [1], применяются импульсные источники питания, преобразующие постоянное напряжение, поступающее с аккумуляторной батареи (АКБ), в переменное с заданными параметрами (рис. 1) [2].

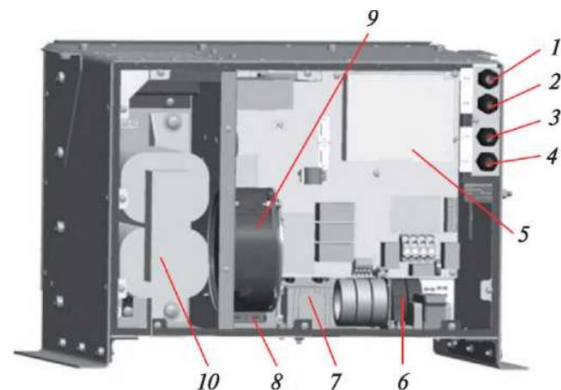


Рис. 1. Инвертор 220 В 50 Гц электропоезда Siemens Velaro RUS: 1 - клемма двоичных кодов управления; 2 - клеммы выходного напряжения; 3,4 - клеммы входного напряжения; 5 - плата управления; 6 - дроссель тороидальный; 7 - контактор предзаряда; 8 - главный контактор; 9 - вентилятор; 10 - трансформатор

Современные импульсные преобразователи, применяемые в поездах дальнего, скоростного и пригородного сообщения, должны строго соответствовать отраслевым стандартам – ГОСТ 33726-2016 [3] и ТР ТС 001/2011 [4], которые определяют технические требования к конечным устройствам, а следовательно, методы и методики контроля их общей работоспособности и функционирования.

Необходимо отметить, что электропоезд Siemens Velaro RUS введен в полноценную эксплуатацию в 2009 году [5]. Следовательно, техническим решениям, примененным при проектировании преобразователя, представленного на рис. 1, более 15 лет, что с точки зрения скорости и масштаба развития техники является «неактуальным». Более того, ГОСТ 33726-2016 был введен в 2016 г., что значительно позже введения в эксплуатацию.

Таким образом, применение ранее разработанных преобразователей, установленных на действующих электропоездах, является невозможным в таких проектах как «Белый кречет» – новый российский скоростной электропоезд. Так же повсеместное внедрение электронной техники поднимает требование к функциональным возможностям преобразовательной техники, а следовательно, и стандартам, которым она

должна соответствовать. Цель данного исследования заключается в детальном рассмотрении стандартов, регламентирующих общие технические требования к импульсным преобразователям напряжения, разрабатываемым для применения в электропоездах скоростного сообщения, для выявления несоответствия современным требованиям эксплуатации для последующей доработки и усовершенствования.

II. АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Согласно ГОСТ 33726-2016 преобразователи делятся на несколько типов, которые отличаются видом подключаемой нагрузки и типом формируемого напряжения (постоянное, синусоидальное и прямоугольной формы с ШИМ модуляцией) [6]. Рассмотренный ранее инвертор, преобразующий 110 В постоянного тока в переменный 220 В 50 Гц, относится к источникам синусоидального напряжения, который должен сохранять работоспособность и поддерживать параметры эксплуатации в соответствии с значениями в таблице. Режимы работы преобразователей делятся на установившийся и переходный. Важно подчеркнуть, что установившийся режим подразумевает отсутствие внешних возмущающих факторов (изменения напряжения питания и/или нагрузки на выходе), что имитирует продолжительный режим работы. В свою очередь реальный режим эксплуатации подразумевает работу преобразователя, в основном, в переходных режимах – подключение различного типа гаджетов и приборов бытового пользования. С точки зрения рассматриваемого стандарта, переходный режим подразумевает исключительно скачкообразные изменения входного напряжения в предельных диапазонах (от наибольшего до наименьшего и/или наоборот). Требования сохранения работоспособности в переходном режиме заключаются в отключении преобразователя на период, не превышающий 5 сек., с обязательным последующим автоматическим повторным включением (АПВ) и отклонением выходного напряжения на значение, не превышающее 30 % от номинального. Указанные требования по качеству выходного напряжения и устойчивости работы преобразователя, особенно в переходных режимах, могут иметь пагубное воздействие на потребителей электроэнергии (выход из строя), которые, как правило, рассчитаны на максимальное отклонение питающего напряжения в пределах не более $\pm 10-15\%$, согласно общепромышленным стандартам [7].

III. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

Для детального анализа и проведения испытаний согласно действующим стандартам был разработан

макетный образец преобразователя номинальной мощностью 3 кВт (рис. 2), который выполняет двойное преобразование напряжения – dc/dc и dc/ac для обеспечения гальванической развязки силовых цепей. В инверторе применяются современные SiC транзисторы фирмы Cree, работающие на частоте 50 кГц.

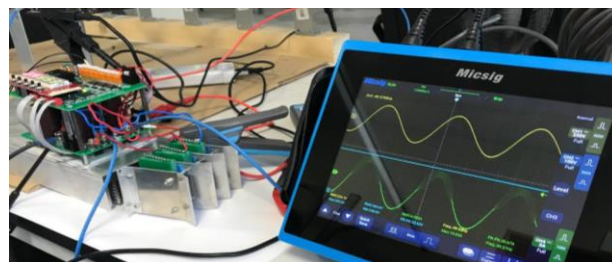


Рис. 2. Макетный образец инвертора 3 кВт 220 В 50 Гц

Первоначально был рассмотрен установившийся режим работы. Согласно данным, приведенным в таблице, общее количество измерений качественных параметров выходного напряжения составляет не менее десяти и выполняется с равным шагом до максимального значения нагрузки ($I_{ном}$). Из чего следует, что для соответствия стандарту, первое измерение необходимо выполнить на значении нагрузки равном $0,1 \cdot I_{ном}$. Система управления импульсного источника питания состоит из двухконтурного ПИ-регулятора (внешний контур напряжения и внутренний контур тока) – источник напряжения с обратной связью по току [8]. Передаточная функция регуляторов имеет стандартный вид (1):

$$G(s) = K_p + K_i/s. \quad (1)$$

Следовательно, некорректное вычисление интегральной составляющей тока, имеющей наибольшее влияние, может приводить к неустойчивости (перерегулированию) системы в режиме холостого хода ($0 \cdot I_{ном}$) как представлено на рис. 3, где осциллограмма – выходное переменное напряжение, формируемое преобразователем. В центральной части осциллограммы выполнено отключение нагрузки длительностью, составляющей приблизительно 20 мс.



Рис. 3. Осциллограммы работы макетного образца инвертора 220 В 50 Гц при переключении в режим холостого хода

ТАБЛИЦА I. ПОКАЗАТЕЛИ ВЫХОДНЫХ КАНАЛОВ НЕТАЯГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Тип или назначение выходного канала преобразователя	Общее кол-во измерений, не менее	Диапазон измерений	Допустимые отклонения выходных параметров преобразователя, не более		
			напряжения, %	частоты, %	коэффициент гармоник напряжения, %
Питания потребителей бортовой синусоидальным напряжением	10	На $U_{ном}$ при $0 \dots I_{ном}$	± 5	± 2	8
Примечания $U_{ном}$ – номинальное напряжение выходного канала преобразователя. $I_{ном}$ – номинальный ток выходного канала преобразователя.					

Безусловно, неправильно подобранные коэффициенты приводят к перегулированию и в установившемся режиме работы с нагрузкой (рис. 4). Но авторы статьи хотят сфокусировать внимание именно на нестабильности работы системы управления в неучтенном режиме холостого хода при стабильности работы с минимальной нагрузкой.

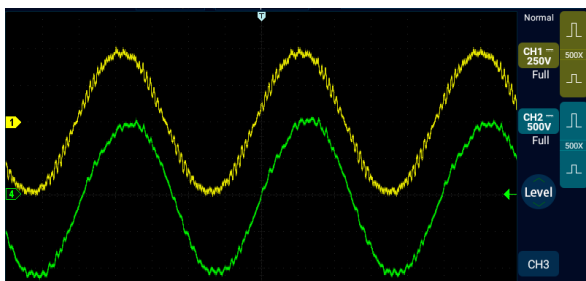


Рис. 4. Осциллограммы работы макетного образца инвертора при неправильно подобранных коэффициентах регулятора

С точки зрения переходных процессов рассмотренный стандарт не включает описание работы при скачкообразном изменении нагрузки, например, мгновенный переход с режима холостого хода преобразователя на максимальную нагрузку и/или другим различным переключением с ненормированным шагом, что имитирует подключение бытовых приборов, как представлено на рис. 5, где желтая осциллограмма – выходное напряжение, зеленая – ток.

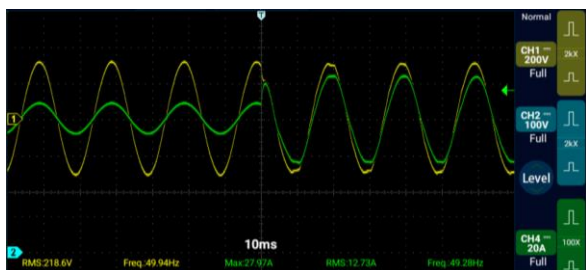


Рис. 5. Осциллограммы работы макетного образца инвертора при ненормированном шаге переключения нагрузки

Также отсутствуют требования по искажениям качественных параметров выходного напряжения при работе на реактивную нагрузку ($\cos\varphi \neq 1$), что аналогично влияет на корректность и безопасность работы системы управления, в том числе для потребителей электроэнергии [9]. Например, на рис. 6 представлены измерения качественных параметров выходного напряжения разработанного макетного образца преобразователя в установившемся режиме на активную нагрузку ($\cos\varphi = 1$).

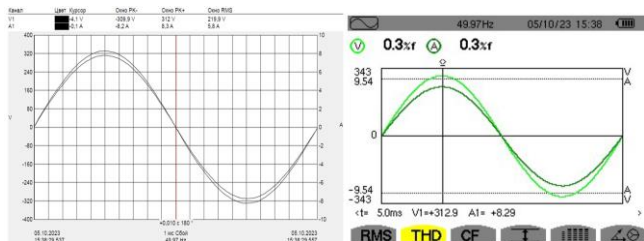


Рис. 6. Осциллограммы работы макетного образца инвертора 220 В 50 Гц в установившемся режиме при работе на активную нагрузку

Полученные результаты соответствуют установленному стандарту по качественным параметрам выходного напряжения: частоте, среднеквадратичному значению и коэффициенту гармоник выходного напряжения. Аналогичным образом были проведены испытания работы макетного образца преобразователя на реактивную нагрузку, имитирующую реальные условия – СВЧ печь и промышленный пылесос, применяемый для уборки служебных помещений электропоезда (рис. 7). Желтая осциллограмма соответствует выходному напряжению, зеленая – току, голубая – постоянное напряжение вторичной части преобразователя.

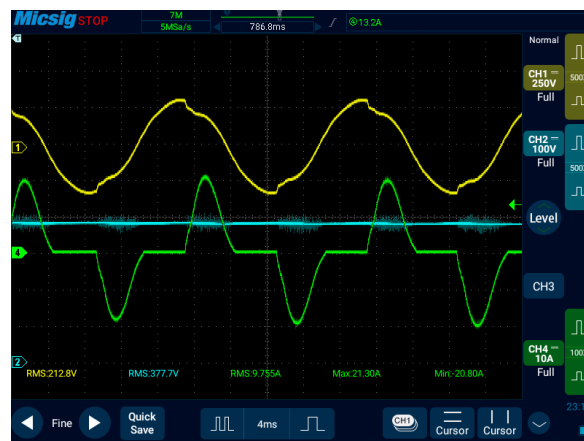


Рис. 7. Осциллограммы работы макетного образца инвертора в установившемся режиме при работе на реактивную нагрузку

Полученные результаты качественных параметров, а именно, коэффициента гармоник и среднеквадратичного значения напряжения, при работе на реактивную нагрузку значительно превышают значения, полученные при работе на активную нагрузку [10].

Наиболее сложным переходным режимом, с точки зрения работы системы управления является подключение электронной нагрузки, имеющей выпрямитель с подключенными емкостями для сглаживания пульсации напряжений, например, зарядные устройства гаджетов малой мощности (до 100 Вт). Так, в момент подключения зарядного устройства выполняется заряд емкости гаджета, и протекающие токи, которые соответствуют токам в выходных цепях преобразователя, по сути, ограничены сопротивлением, составляющим единицы Ом, и индуктивностью цепей. В следствии данного процесса в преобразователе протекают токи, превышающие номинальные рассчитанные амплитудные значения более чем в два раза. На рис. 8 представлены осциллограммы работы макетного образца преобразователя при работе в продолжительном режиме на реактивную нагрузку и при подключении зарядного устройства смартфона мощностью 60 Вт.

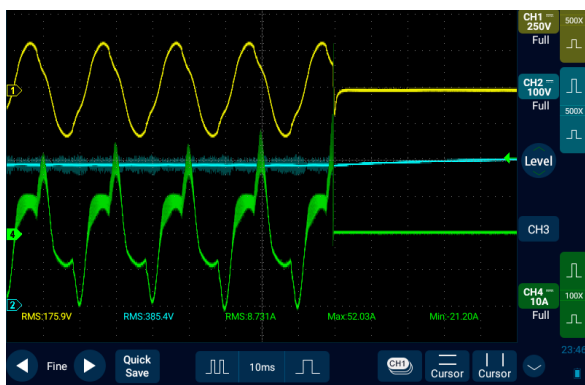


Рис. 8. Осциллограммы работы макетного образца инвертора при работе на реактивную нагрузку с подключением зарядного устройства

Номинальная мощность исследуемого преобразователя составляет 3 кВт, что соответствует максимальному амплитудному значению тока 20 А. В проведенном эксперименте максимальное зафиксированное амплитудное значение тока составило 52 А. Устойчивость в данных режимах описывает параметр крест-фактор (англ. Crest Factor) – показатель, характеризующий способность преобразователя сохранять работоспособность при работе с нагрузкой, потребляющей импульсный ток, описываемый следующим выражением (2):

$$I_{FC} = I_{PEAK}/I_{RMS}. \quad (2)$$

Данный показатель также не учтен в рассматриваемом стандарте.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены и проведены испытания в соответствии с действующими методами контроля работоспособности импульсных преобразователей электроэнергии (источников напряжения), предназначенных для эксплуатации в скоростных электропоездах постоянного тока. Необходимо отметить, что авторы в своей работе выполнили измерения режимов работы преобразователя, имитируя условия и ситуации наиболее приближенные к реальным.

При выполнении практических измерений работы макетного образца был выявлен ряд требований к устойчивости в переходных и установившихся процессах, не зафиксированных в нормативных актах, но необходимых для учета и контроля:

1. качественные параметры выходного напряжения преобразователей в режиме холостого хода;
2. параметры работы преобразователя в переходных режимах (при ненормированном шаге нагрузки);
3. требования к качеству формируемого напряжения при подключении реактивной нагрузки, вносящей гармонические и фазные искажения;
4. крест-фактор.

Дальнейшие исследования направлены на более детальный анализ процессов, протекающих в преобразователе в различных режимах работы, а также разработку конкретных предложений по доработке действующих отраслевых стандартов в соответствии с действующими государственными нормативными актами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность своему научному руководителю Кузнецову Владимиру Евгеньевичу, профессору кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), за помощь, поддержку и руководство в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A. Lamkaddem and K. Kassmi, "Design and realization of a new structure of DC / DC and DC/AC converters dedicated to renewable energies," 2020 *International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, Rabat, Morocco, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEIT48248.2020.9113167.
- [2] K. Suresh, E. Parimalasundar, M. S. Sujatha and N. M. G. Kumar, "Design and Implementation Bidirectional DC-AC Converter for Energy Storage System," in *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2023, vol. 46, no. 2, pp. 130-136, doi: 10.1109/ICJECE.2022.3233840.
- [3] ГОСТ 33726—2016. Преобразователи статические тяговые для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с.
- [4] ТР ТС 001/2011. О безопасности железнодорожного подвижного состава / Евразийская экономическая комиссия. Минск: Госстандарт; БелГИСС, 2022.
- [5] А. Назаров. Опыт запуска высокоскоростных поездов «Сапсан» и «Аллегро» в России // *Техника железных дорог*. 2014. Т. 4. с. 64-69.
- [6] C. Li, R. Wang, H. Liu, P. Wheeler, F. Wu and Z. Xiong, "A Novel Family of Four-Port Three-Phase DC-AC Converter and Its Carrier-Based PWM Strategy," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 40, no. 4, pp. 5130-5146, 2025, doi: 10.1109/TPEL.2024.3515052.
- [7] N. Tretyakov, A. Bobryshov, V. Kuzmenko and O. Solenaja, "Control System Modeling and Simulation for Active Filters of the High-Frequency Harmonics," 2023 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10147915.
- [8] Y. Huang, M. Armstrong, S. Odhano and M. Ahmeid, "Real-Time Parameter Estimations of DC-AC Converters Using a Kalman Filter Approach," 2023 *25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe)*, Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-8, doi: 10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264544.
- [9] B. N. Harish and U. Surendra, "Comparison of DQ Method with I cosφ Controller in Solar Power System Connected to Grid with EV Load," 2022 *IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*, Ballari, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICDCECE53908.2022.9792847.
- [10] S. Mohamadian, C. Buccella and C. Cecati, "Transformerless HERIC Inverter with Modified Unipolar PWM to Decrease Grid-Injected Current's THD," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9969060.