

## Разработка энергоэффективной системы управления импульсных источников однофазного переменного напряжения

Н. К. Третьяков✉, В. Е. Кузнецов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [nktretyakov@stud.etu.ru](mailto:nktretyakov@stud.etu.ru)

**Аннотация.** Представлена разработка энергоэффективной системы управления гальванически развязанного источника однофазного переменного напряжения, синхронизирующей каскады постоянного и переменного напряжений преобразователя. Разработанная система управления позволяет уменьшить амплитудное значение тока, протекающего в первичной и вторичной частях преобразователя, что повышает общую энергоэффективность устройства. Используются методы структурного анализа, натурных испытаний и математического моделирования динамических систем в среде MatLab/Simulink. Приведены осциллограммы работы модели и макетного образца устройства. Результаты экспериментальных измерений работы преобразователя, соответствующие модели устройства, подтверждают целесообразность и эффективность разработанной системы управления.

**Ключевые слова:** DC/AC преобразователь, синхронизированная система управления, ток, энергоэффективность, амплитудное значение

**Для цитирования:** Третьяков Н. К., Кузнецов В. Е. Разработка энергоэффективной системы управления импульсных источников однофазного переменного напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 86–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-86-96.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Development of an Energy-Efficient Control System for Single Phase AC Voltage Pulse Sources

N. K. Tretiakov✉, V. E. Kuznetsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ [nktretyakov@stud.etu.ru](mailto:nktretyakov@stud.etu.ru)

**Abstract.** Presents the development of an energy-efficient control system for a galvanically isolated single phase AC voltage source that synchronizes the DC and AC voltage cascades of the converter. The developed control system allows reduce the amplitude value of the current flowing in the primary and secondary parts of the converter, which increases the overall energy efficiency of the device. The work uses methods of structural analysis, full-scale tests and mathematical modeling of dynamic systems in the MatLab/Simulink environment. Oscillograms of the model and prototype of the device are given. The results of experimental measurements of the converter operation corresponding to the device model confirm the feasibility and efficiency of the developed control system.

**Keywords:** DC/AC converter, synchronized control system, current, energy efficiency, amplitude value

**For citation:** Tretiakov N. K., Kuznetsov V. E. Development of an Energy-Efficient Control System for Single Phase AC Voltage Pulse Sources // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 86–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-86-96.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Современные импульсные преобразователи энергии стали неотъемлемой частью жизнедеятельности человека. Так, тенденции перехода к «зеленой» энергетике (солнечной), создание умных сетей (*англ.* smart grid), а также систем резервного электропитания дали толчок для развития и совершенствования импульсных источников переменного напряжения (*англ.* DC/AC converter), преобразующих постоянное напряжение низкого номинала в переменное однофазное стандартного значения 220/230 В 50 Гц. Наиболее явно прослеживается совершенствование дискретных полупроводниковых силовых компонентов – транзисторов и диодов. Уменьшение статических и динамических потерь компонентов и увеличение частоты работы позволяет проектировать преобразователи с большей удельной мощностью и меньшими массогабаритными характеристиками.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик современных импульсных преобразователей является КПД, а следовательно, и энергоэффективность. Стоит отметить, что возможностей повышения КПД различное множество. По мнению авторов, при проектировании преобразователей необходимо учитывать экономическую целесообразность, жизненный цикл (продолжительность эксплуатации) устройства и практическую возможность массового производства. Данные ограничения, а фактически требования для разработки конкурентоспособного продукта, значительно сужают выбор компонентов, а следовательно, и топологии, применяемой в преобразователе. Основным компонентом преобразователя с точки зрения структуры служит система управления (СУ), которая выполняет алгоритм регулирования и поддержания выходных параметров, а также второстепенные задачи. От качества и быстродействия работы СУ, особенно в переходных процессах, зависит режим эксплуатации компонентов. Зачастую некорректная работа СУ может приводить к выходу из строя всего устройства. Наряду с переходными процессами необходимо учитывать устойчивость в продолжительных режимах, где перерегулирование приводит к дополнительным потерям электроэнергии и уменьшению срока службы компонентов устройства.

Целью исследования служит разработка источника однофазного напряжения мощностью 3 кВт для применения в скоростном железнодорожном составе. Авторы в своей работе рассматривают гальванически развязанные устройства, выполняющие двойное преобразование электро-

энергии, что подразумевает применение силового высокочастотного трансформатора и отсутствие гальванической связи (общего потенциала) между входными и выходными цепями. В статье представлен процесс проектирования, наиболее приближенного к современным экономическим реалиям преобразователя согласно заданным параметрам, а также предложен вариант реализации энергоэффективной СУ, которая позволяет снизить амплитудное значение тока, протекающего в силовых цепях, что в свою очередь повышает общий КПД устройства и снижает нагрузку на силовые полупроводниковые компоненты, уменьшая статические потери.

**Структура и модель преобразователя.** В данное время наиболее распространенная структура инвертора, выполняющего двойное преобразование напряжения, состоит из двух частей: DC/DC и DC/AC, где первый – это высокочастотный каскад постоянного тока, выполняющий функции гальванической развязки и преобразования (увеличения амплитудного значения), а второй – преобразования постоянного напряжения в переменное. Данная структура имеет ряд достоинств: массогабаритные характеристики (уменьшение размера за счет высокой частоты работы трансформатора), себестоимость (отсутствие низкочастотных моточных компонентов), широкий диапазон входных напряжений (регулируемый каскад постоянного тока). В исследовании выходное среднеквадратичное значение переменного напряжения составляет 220 В.

Один из начальных этапов разработки устройства – моделирование. На рис. 1 представлена разработанная модель в среде MatLab/Simulink R2020a [1] силовой части и СУ каскадами постоянного и переменного тока инвертора, где  $VT_1$ – $VT_4$  – силовые MOSFET-транзисторы первичной части, соединенные по мостовой схеме;  $VD_1$ – $VD_4$  – диоды высокочастотного выпрямителя, соединенные по мостовой схеме;  $TV_1$  – повышающий идеализированный высокочастотный трансформатор с коэффициентом трансформации 5.3;  $L_1$  – дроссель выпрямителя с номинальным значением индуктивности 360 мкГн;  $C_1, R_1$  – звено постоянного тока вторичной части с номинальным значением емкости 560 мкФ,  $R_1$  имитирует эквивалентное постоянное сопротивление конденсатора (*англ.* ESR);  $VT_5$ – $VT_6$  – силовые MOSFET-транзисторы каскада переменного тока, попарно формирующие положительную и отрица-

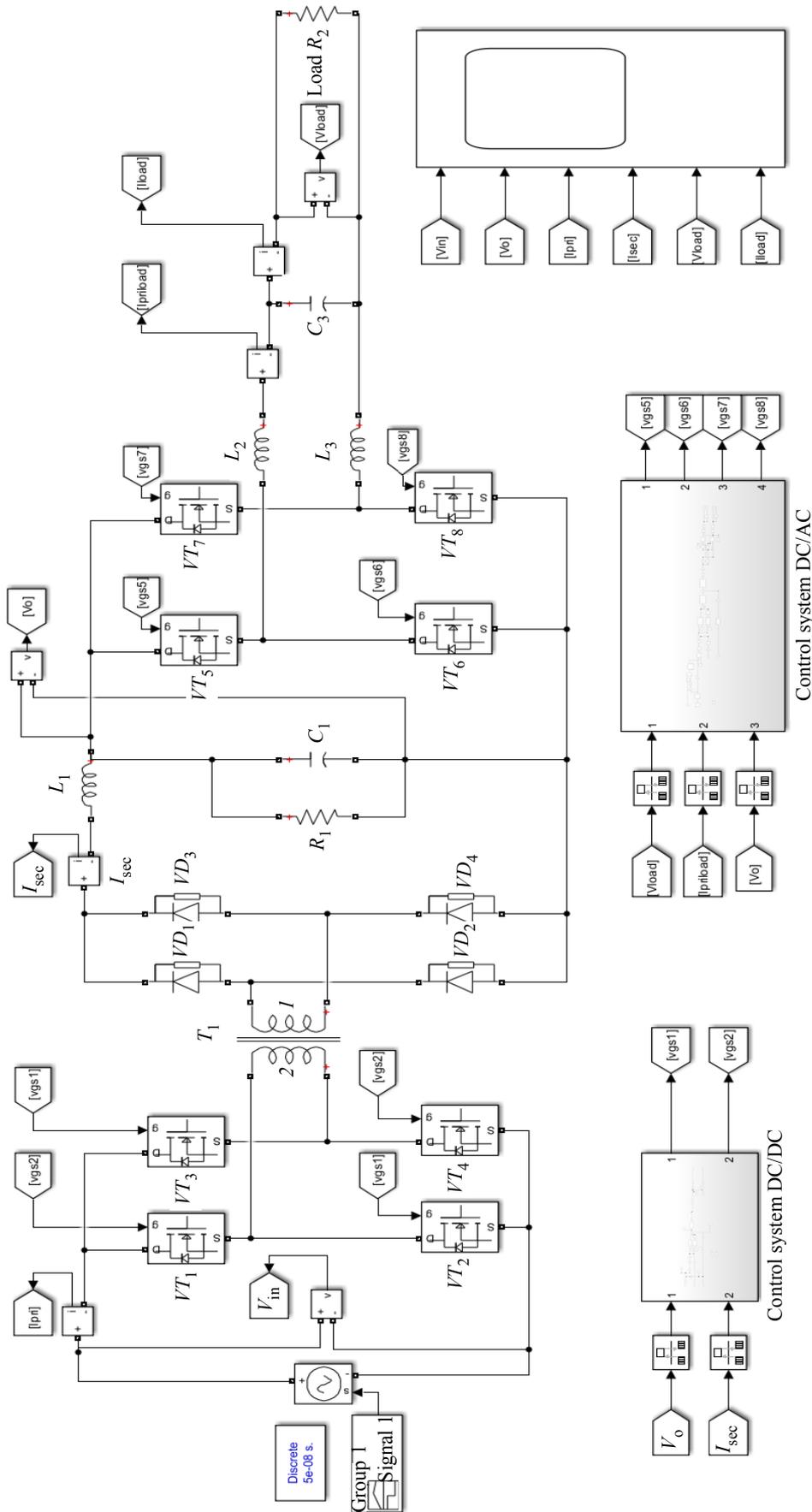


Рис. 1. Модель инвертора в среде динамического моделирования MatLab Simulink R2020a  
Fig. 1. Inverter model in the dynamic simulation environment MatLab Simulink R2020a

тельную полуволну выходного переменного напряжения;  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $C_3$  – выходной синус-фильтр с номинальными значениями индуктивности 320 мкГн и емкости 6 мкФ;  $R_2$  – активная нагрузка (сопротивление) с номинальным значением 14 Ом при мощности 3 кВт и 28 Ом при мощности 1.5 кВт; в

подсистеме «Control system DC/AC» реализована СУ каскада постоянного тока, состоящая из двух контурных регуляторов, формирующих положительную и отрицательную полуволны выходного переменного напряжения; блок «Group 1» формирует задание на источник напряжения пер-

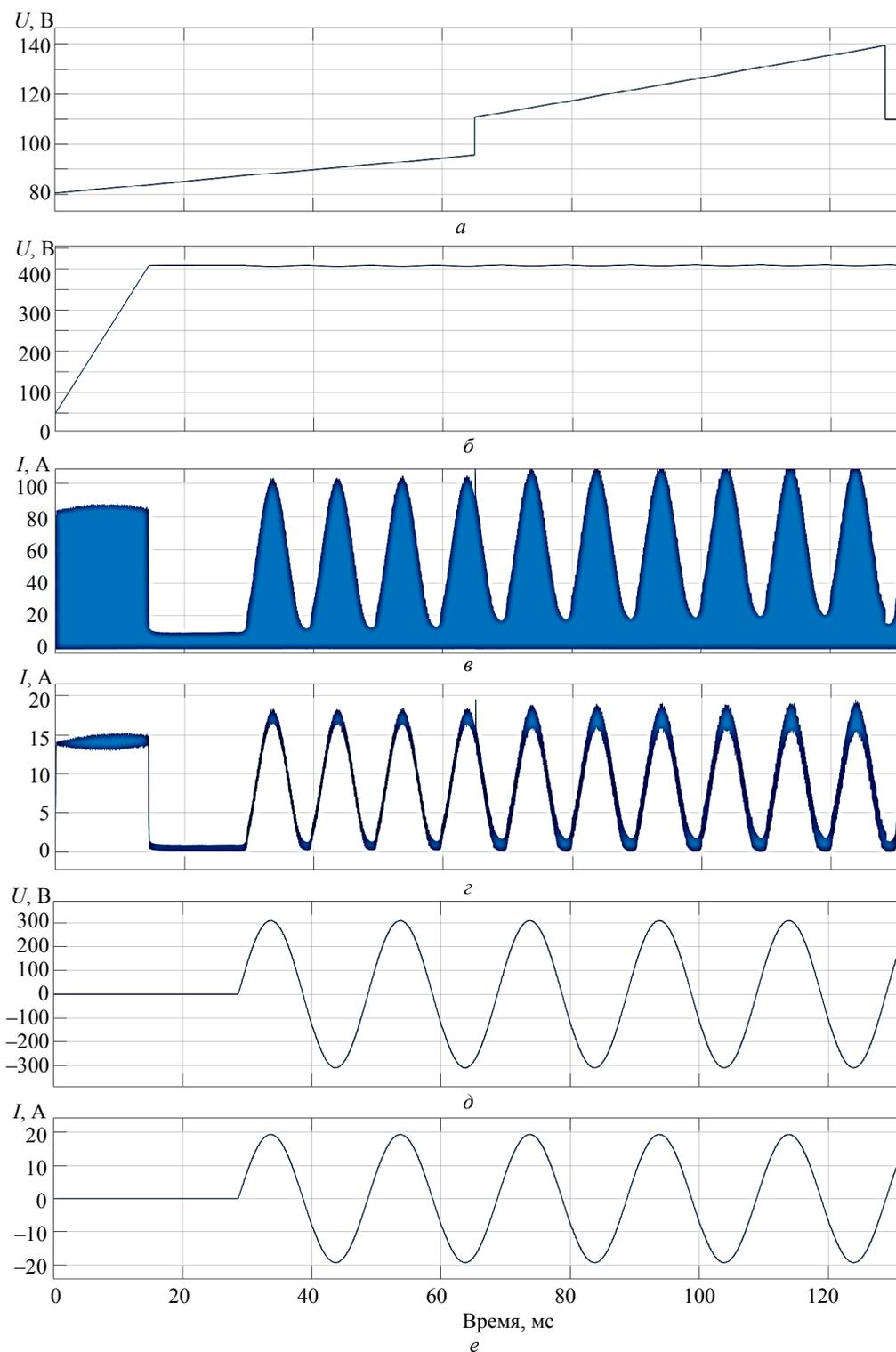


Рис. 2. Осциллограммы работы модели инвертора  
Fig. 2. Oscillograms of the inverter model operation

вичной части с заданными параметрами (диапазон от 80 до 140 В).

На рис. 2 представлены осциллограммы работы модели, где выполняются измерения напряжения питания (диапазон 80–140 В) (рис. 2, *a*); напряжения вторичной части (напряжение на  $C_1$  согласно рис. 1) (рис. 2, *b*); ток трансформатора  $T_1$  (измерение положительной силовой шины) (рис. 2, *в*); ток дросселя выпрямителя ( $L_1$  согласно рис. 1) (рис. 2, *г*); выходное переменное напряжение (напряжение на конденсаторе  $C_3$  согласно рис. 1) (рис. 2, *д*) и тока нагрузки (ток резистора  $R_2$  согласно рис. 1) (рис. 2, *е*).

Стоит отметить, что смоделированный преобразователь имеет номинальную выходную мощность 3 кВт и для формирования выходного переменного напряжения поддерживает на вторичной части постоянное напряжение 380 В. Для подтверждения адекватности модели и более глубокой проработки конструкции, а также учета сложно вычисляемых переходных процессов был разработан макетный образец инвертора с номинальной мощностью 1.5 кВт и проведены аналогичные измерения. На рис. 3 приведены осциллограммы (снимок экрана), измеренные цифровым осциллографом Micsig STO2202C с полосой пропускания 200 МГц, где *a* – выходное переменное напряжение; *b* – постоянное напряжение вторичной части; *в* – ток дросселя выпрямителя (соответствует току дросселя  $L_1$  рис. 1 и рис. 2, *г*). Полученные результаты натурных испытаний соответствуют смоделированным, что подтверждает адекватность мо-

дели. Так, форма тока, протекающего через дроссель, соответствует (по модулю) форме выходного напряжения, что есть ожидаемый результат при работе инвертора на активную нагрузку.

Наибольшая сложность изготовления конечного устройства с номинальной мощностью 3 кВт, исходя из полученных результатов моделирования и практических испытаний, заключается в амплитудном значении тока первичной обмотки, который при максимальном значении питающего напряжения (140 В) составляет 110–115 А при статичной нагрузке. Данное амплитудное значение обусловлено высоким коэффициентом трансформации  $N_2/N_1$ , равным 5.3, а также типом нагрузки, где среднеквадратичное значение тока меньше амплитудного примерно в 1.41 раз ( $I_{RMS} = I_{Amp} / \sqrt{2}$ ) [2]. Бесспорно, наиболее просто добавить номинал емкости и/или индуктивности ( $C_1, L_1$ , рис. 1), что позволяет уменьшить амплитудное значение тока на 5–10%. Однако данное решение практически невозможно реализовать по причине габаритных ограничений, а в случае серийного производства теряется конечная экономическая целесообразность. Важно подчеркнуть, что основным требованием в рамках исследования служит применение дискретных полупроводниковых компонентов в силу особенностей конструкции и экономичность устройства.

В качестве силовых транзисторов  $VT_1$ – $VT_4$  (рис. 1) при проектировании макетного образца были применены попарно соединенные полевые транзисторы IPP200N25N3 [3] фирмы infineon [4],

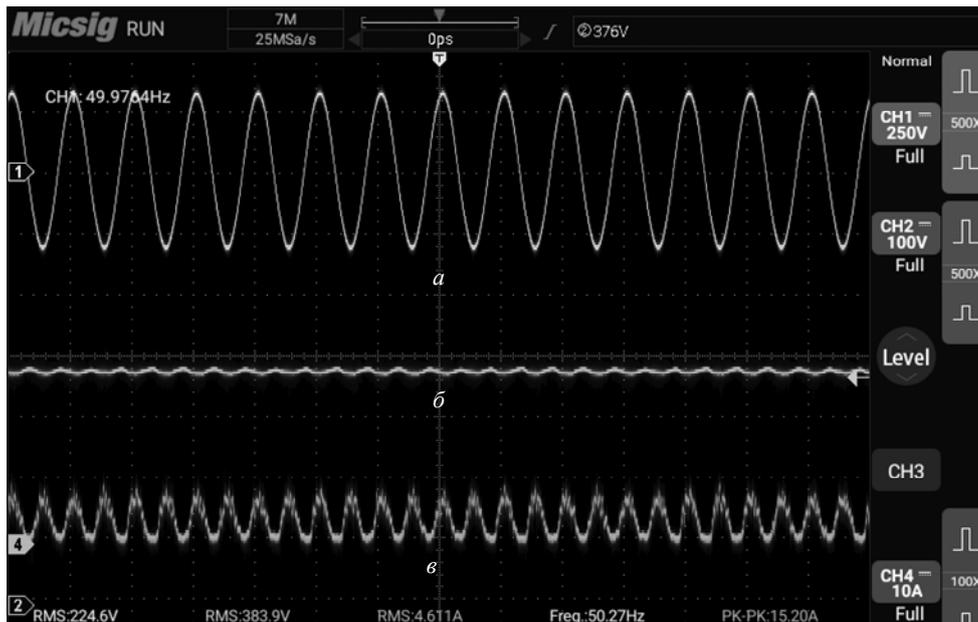


Рис. 3. Осциллограммы работы макетного образца инвертора мощностью 1.5 кВт  
Fig. 3. Oscillograms of the operation of a prototype inverter with a power of 1.5 kW

работающие на частоте 100 кГц, что позволяет добиться высокой эффективности силового трансформатора. Выбранные транзисторы рассчитаны на продолжительную работу при токе стока (*англ.* drain) 64 А [5], но стоит отметить, что данный режим эксплуатации рассчитан на температуру 25 °С. Так, согласно паспортным данным, при температуре 100 °С максимальный ток составляет 50 А. Допустимо провести аналогию модели мощностью 3 кВт и макетного образца и предположить, что для безопасного режима эксплуатации (токи коммутации более 120 А) возможно подключать по три параллельно соединенных транзистора, но такое решение в свою очередь ведет к применению более сложной схемы драйвера, чтобы обеспечить корректное управление (необходимый выходной ток драйвера). Согласно расчетам, при применении трех параллельно подключенных транзисторов, для управления которыми необходим затворный резистор номиналом 4 Ом на каждый, общее сопротивление будет составлять 1.33 Ом, что при управлении напряжением 15 В означает импульсный ток драйвера не менее 11 А. Стоит учитывать, что наибольшую эффективность транзистор имеет при управлении напряжением более высокого значения, например 18 В. Таким образом, для корректного управления тремя параллельно соединенными транзисторами необходимо использовать дополнительный драйвер либо усложнять схему текущего, так как на сегодняшний день среднее значение импульсного тока распространенных драйверов составляет 5–7 А. Допустимо применить затворные резисторы меньшего номинала, но данное решение ведет к увеличению динамических потерь, что подробно рассмотрено в ранее опубликованном исследовании [6]. Альтернативой может стать применение SiC-транзисторов, например IMBG65R015M2H [7], E4M0015075J2 [8] и схожих, рассчитанных на продолжительный ток более 100 А [9].

Схемотехнические решения уменьшения амплитудного значения тока первичной обмотки трансформатора, рассмотренные ранее, влекут существенное изменение как количества, так и типов компонентов, что значительно увеличивает конечную стоимость устройства.

### Энергоэффективная система управления.

При анализе осциллограмм на рис. 2 и 3 прослеживается непосредственная зависимость амплитудного значения тока первичной части (протекающего в первичной обмотке) трансформатора с амплитудным значением выходного переменного тока. Так как уставка (задание) контура напряжения регулятора (двухконтурного) СУ каскада постоянного тока – значение постоянное, ток, протекающий в звене постоянного тока (ЗПТ), будет схож по форме с модулем выходного тока инвертора.

Логично предположить, что для уменьшения амплитуды тока можно внести изменения в уставку контура напряжения СУ каскада постоянного тока, чтобы амплитудное значение имело менее ярко выраженный характер (более равномерное значение) и зависимость от нагрузки каскада переменного тока. Допустимо в момент минимального потребления (выходное синусоидальное напряжение имеет малое амплитудное значение) запастись энергией в ЗПТ, увеличивая значение уставки каскада постоянного тока, или выполнять обратное действие, например уменьшать уставку в момент максимального потребления, добавляя в нее значение, обратное току дросселя выпрямителя (рис. 4). Вышеописанная манипуляция увеличит пульсации напряжения в ЗПТ, период которых будет равен двойному периоду выходного переменного напряжения.

На рис. 4 представлен двухконтурный регулятор, разработанной системы управления, позволяющий снизить амплитудное значение тока, где РН – регулятор (контур) напряжения; РТ – регулятор (контур) тока;  $U_3$  – уставка (задание) постоянного напряжения вторичной части преобразователя, соответствующая 380 В;  $U_{обр. св}$  – измеренное напряжение вторичной части преобразователя;  $I_{обр. св}$  – значение тока трансформатора (по модулю);  $K$  – коэффициент преобразования значения тока трансформатора для изменения уставки напряжения (в рамках данной работы принят 0.3).

Возможны несколько вариантов реализации выдвинутой концепции СУ: ослабить контур напряжения и усилить контур тока действующей

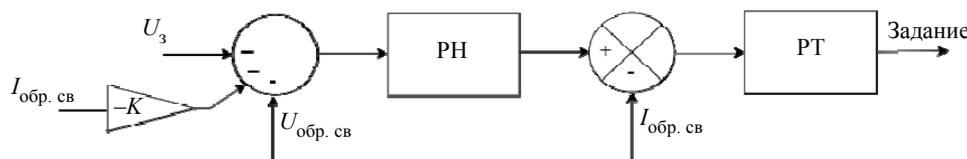


Рис. 4. Регулятор системы управления

Fig. 4. Control system regulator

СУ или вычесть из уставки контура напряжения фильтрованное значение тока дросселя, применяя оптимальные коэффициенты. Ослабление контуров регулятора ведет к общей нестабильности системы, а также к критическому поведению СУ в переходных режимах (сброс/наброс нагрузки). Авторами было принято решение применить концепцию изменения уставки, также данное решение позволило использовать ранее разработанную СУ с минимальными изменениями. На рис. 5 представлены осциллограммы работы модели преобразователя с внедренной разработанной СУ, где выполняются измерения напряжения питания (диапазон 80...140 В) (рис. 5, а); напряжения вто-

ричной части (напряжение на  $C_1$ , рис. 1) (рис. 5, б); ток трансформатора (измерение положительной силовой шины) (рис. 5, в); ток дросселя выпрямителя ( $L_1$  согласно рис. 1) (рис. 5, г) и выходное переменное напряжение (рис. 5, д).

На рис. 6 представлены осциллограммы (снимок экрана), измеренные цифровым осциллографом Micsig STO2202C с полосой пропускания 200 МГц, работы макетного образца преобразователя с внедренной разработанной СУ, где а – выходное переменное напряжение; б – постоянное напряжение вторичной части; в – ток дросселя выпрямителя.

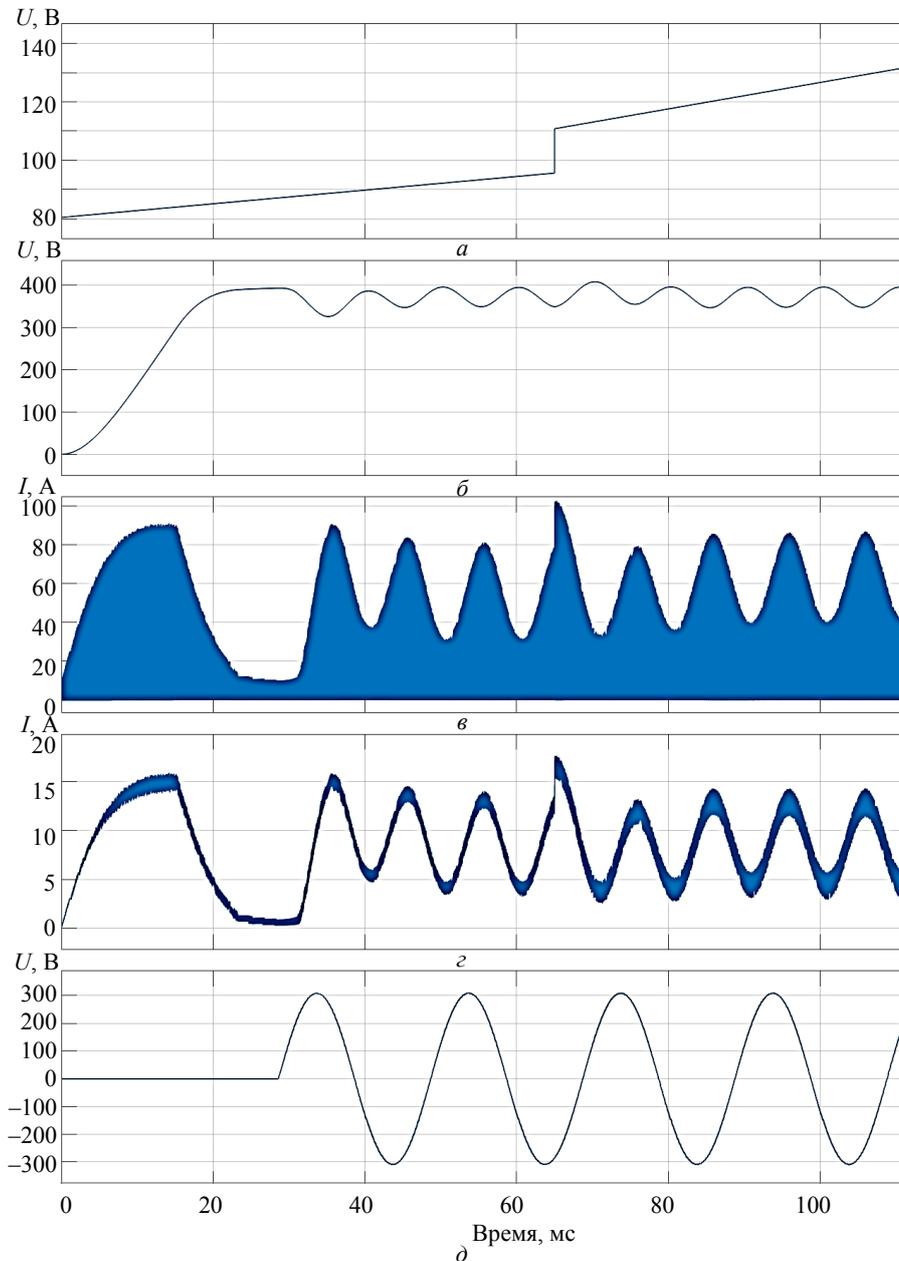


Рис. 5. Осциллограммы работы модели инвертора с применением разработанной СУ  
Fig. 5. Oscillograms of the inverter model operation using the developed control system

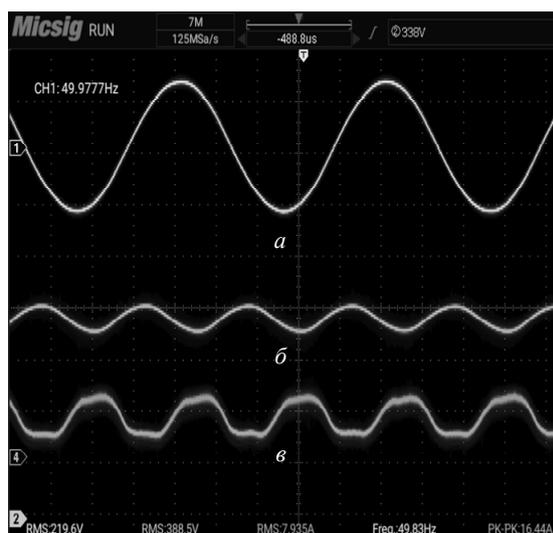


Рис. 6. Осциллограммы работы макета инвертора с применением разработанной СУ  
 Fig. 6. Oscillograms of the inverter layout operation using the developed control system

Результатом натурных испытаний служит уменьшение амплитудного значения тока первичной обмотки каскада постоянного тока в установившемся режиме примерно на 20 %, что означает уменьшение статических потерь более чем на 35 %, исходя из базового расчета мощности  $P = I^2R$ , где  $I$  – ток транзисторов, а  $R$  – сопротивление открытого канала транзистора.

При сравнении осциллограмм тока дросселя макетного образца (рис. 3, в и рис. 6, в) пиковое амплитудное значение тока примерно схоже, а среднеквадратичное значение при применении

разработанной СУ практически в два раза больше, что свидетельствует о более эффективной передаче электроэнергии. Стоит отметить, что, как и любое решение, применяемое в проектировании аппаратной и программной частях устройства, разработанная СУ кроме достоинств имеет значительный недостаток – повышенные пульсации напряжения ЗПТ вторичной части, которые влияют на работу каскада переменного тока. Так, для корректной оценки реализованной СУ необходимо выполнить измерения качественных параметров выходного переменного напряжения.

**Качественные параметры выходного переменного напряжения.** Предметной областью разрабатываемого преобразователя служит подвижной железнодорожный состав, в частности скоростные электропоезда, где основным нормативным актом, описывающим требования к конечным устройствам, служит ГОСТ 33726–2016 «Преобразователи статические тяговые для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия» [10]. Разрабатываемый преобразователь относится к типу устройств с выходными «каналами переменного тока с напряжением синусоидальной формы», которые предназначены для «питания бортовой сети ...». Так, требования к качественным параметрам выходного напряжения предъявляются к отклонению напряжения – не более  $\pm 5\%$ ; отклонению частоты – не более  $\pm 2\%$ ; к коэффициенту гармоник напряжения – не более 8 %. Для измерения

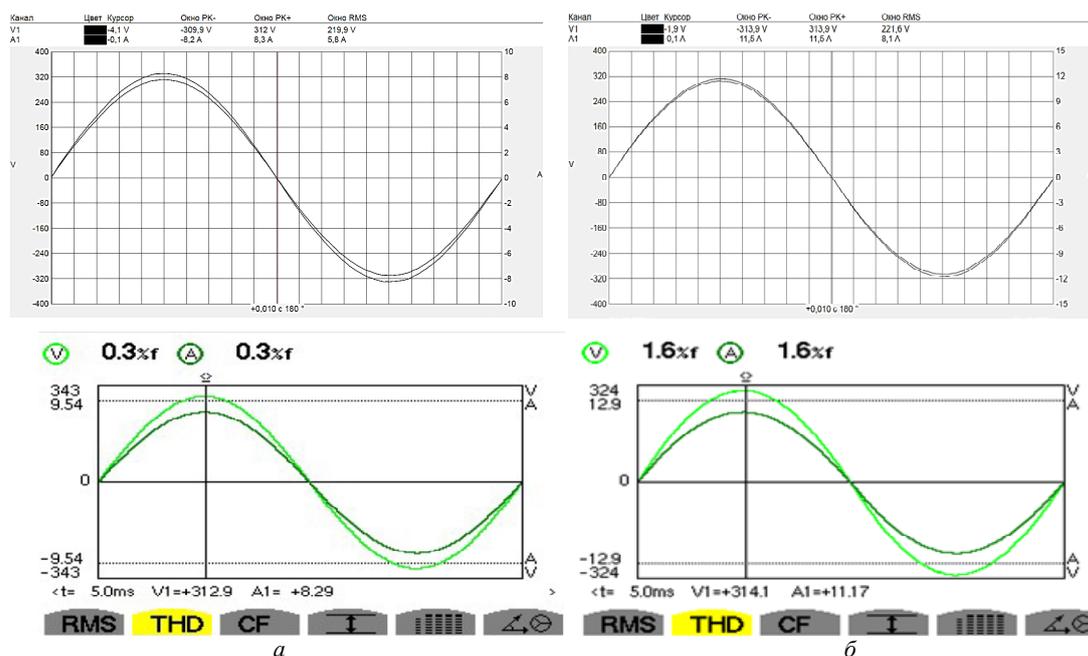


Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения макетного образца без (а) и с разработанной СУ (б)  
 Fig. 7. Oscillograms of the output voltage of the prototype without (a) and with the developed control system (б)

применялся анализатор качества электрической энергии Chauvin Arnoux С.А 8336, который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений [11], следовательно, полученные результаты будут корректны и объективны. На рис. 7 представлены результаты измерения (снимки экрана) из программы Chauvin Arnoux DataView качества выходного напряжения разрабатываемого инвертора, где верхние осциллограммы – амплитудные и среднеквадратичные значения тока и напряжения, а нижние – коэффициенты гармоник. Левый столбец (а) осциллограмм относится к макетному образцу без внедрения разработанной СУ, правый (б) – с ее применением.

Согласно результатам измерения, гармонические искажения напряжения изменились на 1.3 % (с 0.3 до 1.6 %). Изменения среднеквадратичного значения напряжения и частоты составили менее 0.8 %. Значения измеренных параметров входят в допустимый диапазон, а также имеют минимальные отличия [12], [13].

**Выводы.** Проектирование импульсных источников однофазного переменного напряжения – технически сложная задача, требующая глубокой проработки, анализа протекающих процессов и нахождения оптимального и сбалансированного конечного решения реализации. Наибольшая сложность реализации устройств данного типа заключается в высоком амплитудном значении протекающего в первичной обмотке, а следовательно, и в транзисторах тока.

В проведенных исследованиях авторы сфокусировались на решении ограничения тока с помощью реализации СУ каскадом постоянного тока, где в уставку контура напряжения регулятора вносится изменение в зависимости от потребляемого тока, что позволяет накапливать энергию в ЗПТ в моменты минимального потребления (минимальной выходной мощности каскада переменного тока). Верификация предложенного решения проводилась посредством математического моделирования и проведения ряда практических экспериментов, которые подтвердили адекватность и конечную работоспособность алгоритма. Разработанная СУ позволила уменьшить амплитудное значение тока примерно на 20 %, а статические потери в транзисторах – более чем на 35 %.

Необходимо отметить, что рассмотренное решение – одно из многих возможных, но, согласно субъективному мнению авторов наиболее простое в реализации. Результаты исследования, а именно разработанная СУ, были применены для проектирования серийного источника однофазного переменного напряжения мощностью 3 кВт, применяемого в поездах скоростного железнодорожного сообщения.

Дальнейшее развитие исследований направлено на более глубокое изучение переходных процессов и проектирование более оптимальной СУ, а также на рассмотрение вопросов более эффективной практической реализации для уменьшения общей себестоимости устройства.

#### Список литературы

1. Aher A. B., Patil S. M., Sutikno T. Design and development of model for proton exchange membrane fuel cell // Intern. J. of Power Electronics and Drive Syst. (IJPEDS). 2024. Vol. 15, no. 2. P. 1061–1071. doi: 10.11591/ijpeds.v15.i2.pp1061-1071.
2. Пустоветов М. Ю. Влияние нагрузки системы электроснабжения и емкости синус-фильтра на его характеристики // Актуальные вопр. энергетики. 2020. Т. 2, № 1. С. 66–70. doi: 10.25206/2686-6935-2020-2-1-66-70.
3. Питер Ф. Высокоэффективные SiC MOSFET для силовой электроники // Электрон. компоненты. 2020. № 2. С. 46–53.
4. Соколов М. Интеллектуальные силовые ключи Infineon // Электроника: наука, технол., бизнес. 2021. № 8(209). С. 80–83. doi: 10.22184/1992-4178.2021.209.8.80.83.
5. Анализ тенденций развития полевых транзисторов / В. П. Жалнин, А. И. Власов, И. С. Коробенко, Ю. А. Шадрин // Пробл. разработки перспективных микро- и нанoeлектронных сист. (МЭС). 2022. № 2. С. 53–60. doi: 10.31114/2078-7707-2022-2-53-60.
6. Третьяков Н. К., Кузьменко В. П., Соленая О. Я. Проектирование импульсных источников питания с использованием МДП-транзисторов производства КНР // Практическая силовая электроника. 2024. № 2(94). С. 33–37.
7. Ершов А. Si MOSFET, SiC FET и GaN FET. Что нового? // Электронные компоненты. 2022. № 5. С. 74–81.
8. Курышева Е. Силовые приборы компании Cree на основе карбида кремния // Компоненты и технол. 2011. № 6(119). С. 106–110.
9. Fukunaga Sh., Nakamura Yu., Funaki Ts. Evaluation of electrical model parameter changes in SiC power MOSFETs during power cycling test // IEEE J. of Industry Appl. 2024. Vol. 13, no. 6. P. 731–740. doi: 10.1541/ieejia.24004453.
10. Емельянов Д. В., Старовойтов С. А., Вербицкая Л. В. Нормативное обеспечение в области преобразователей на железнодорожном транспорте // Локомотив. 2024. № 11(815). С. 2–5.
11. Имитационное моделирование источников переменного напряжения / Н. К. Третьяков, В. П. Кузь-

менко, А. В. Рысин, М. С. Романова // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 4(154). С. 103–106.

12. A Novel seven level inverter with reduced switch count and THD for PV system applications / M. Venkateswarlu, S. H. Suraj, G. A. K. Reddy, K. S. Santhosh,

K. Parashuram // E3S Web of Conf. 2024. Vol. 540. P. 06014. doi: 10.1051/e3sconf/202454006014.

13. Syarifuddin A., Pakka H. M., Eren H. Minimizing THD using integrated multilevel maximum power tracking inverters // ILKOM J. Ilmiah. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 198–209. doi: 10.33096/ilkom.v16i2.2092.198-209.

### Информация об авторах

**Третьяков Никита Константинович** – аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [nktretyakov@stud.etu.ru](mailto:nktretyakov@stud.etu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>

**Кузнецов Владимир Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [vekuznetsov56@mail.ru](mailto:vekuznetsov56@mail.ru)

### Вклад авторов:

Третьяков Н. К. – разработка методологии исследования, аналитические расчеты.

Кузнецов В. Е. – общее руководство, разработка концепции.

### References

1. Aher A. B., Patil S. M., Sutikno T. Design and development of model for proton exchange membrane fuel cell // Intern. J. of Power Electronics and Drive Syst. (IJPEDS). 2024. Vol. 15, no. 2. P. 1061–1071. doi: 10.11591/ijpeds.v15.i2.pp1061-1071.

2. Pustovetov M. Ju. Vliyanie nagruzki sistemy jelektrosnabzhenija i emkosti sinus-fil'tra na ego harakteristiki // Aktual'nye vopr. jenergetiki. 2020. T. 2, № 1. S. 66–70. doi: 10.25206/2686-6935-2020-2-1-66-70. (In Russ.).

3. Piter F. Vysokojeffektivnye SiC MOSFET dlja silovoj jelektroniki // Jelektron. komponenty. 2020. № 2. S. 46–53. (In Russ.).

4. Sokolov M. Intel'lectual'nye silovye kljuchi Infineon // Jelektronika: nauka, tehnol., biznes. 2021. № 8(209). S. 80–83. doi: 10.22184/1992-4178.2021.209.8.80.83. (In Russ.).

5. Analiz tendencij razvitija polevyh tranzistorov / V. P. Zhalnin, A. I. Vlasov, I. S. Korobenko, Ju. A. Shadrin // Probl. razrabotki perspektivnyh mikro- i nano-jelektronnyh sist. (MJeS). 2022. № 2. S. 53–60. doi: 10.31114/2078-7707-2022-2-53-60. (In Russ.).

6. Tret'jakov N. K., Kuz'menko V. P., Solenaja O. Ja. Proektirovanie impul'snyh istochnikov pitaniya s ispol'zovaniem MDP-tranzistorov proizvodstva KNR // Prakticheskaja silovaja jelektronika. 2024. № 2(94). S. 33–37. (In Russ.).

7. Ershov A. Si MOSFET, SiC FET i GaN FET. Chto novogo? // Jelektron. komponenty. 2022. № 5. S. 74–81. (In Russ.).

8. Kuryшева E. Silovye pribory kompanii Cree na osnove karbida kremnija // Komponenty i tehnol. 2011. № 6(119). S. 106–110. (In Russ.).

9. Fukunaga Sh., Nakamura Yu., Funaki Ts. Evaluation of electrical model parameter changes in SiC power MOSFETs during power cycling test // IEEE J. of Industry Appl. 2024. Vol. 13, no. 6. P. 731–740. doi: 10.1541/ieejia.24004453.

10. Emel'janov D. V., Starovojtov S. A., Verbickaja L. V. Normativnoe obespechenie v oblasti preobrazovatelej na zheleznodorozhnom transporte // Lokomotiv. 2024. № 11(815). S. 2–5. (In Russ.).

11. Imitacionnoe modelirovanie istochnikov perezmennogo napryazhenija / N. K. Tret'jakov, V. P. Kuz'menko, A. V. Rysin, M. S. Romanova // Nauka i biznes: puti razvitija. 2024. № 4(154). S. 103–106. (In Russ.).

12. A Novel seven level inverter with reduced Switch count and THD for PV system applications / M. Venkateswarlu, S. H. Suraj, G. A. K. Reddy, K. S. Santhosh, K. Parashuram // E3S Web of Conf. 2024. Vol. 540. P. 06014. doi: 10.1051/e3sconf/202454006014.

13. Syarifuddin A., Pakka H. M., Eren H. Minimizing THD using integrated multilevel maximum power tracking inverters // ILKOM J. Ilmiah. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 198–209. doi: 10.33096/ilkom.v16i2.2092.198-209.

### Information about the authors

**Nikita K. Tretiakov** – postgraduate student of the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [nktretyakov@stud.etu.ru](mailto:nktretyakov@stud.etu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-4795-5181>

**Vladimir E. Kuznetsov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vekuznetsov56@mail.ru

**Author contribution statement:**

Tretiakov N. K. – research methodology development, analytical calculations.

Kuznetsov V. E. – general supervision, conception development.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; принята к публикации после рецензирования 24.04.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 04.02.2025; accepted 24.04.2025; published online 30.06.2025.

---