

Электротехнические комплексы и системы Electrotechnical complexes and systems

Научная статья

УДК 621.31

DOI: 10.14529/power260105

СНИЖЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

А.В. Вынгра, avyngra@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0665-047X>

Б.А. Авдеев, dirigeant@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6902-245X>

Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

Аннотация. На этапе развития технологий твердотельного трансформатора (ТТТ) разработчики сталкиваются с дополнительными проблемами поддержания высоких показателей качества электроэнергии. При применении входного мостового однофазного выпрямителя мгновенная мощность однофазной сети колеблется с удвоенной частотой, тогда как на выходе ТТТ требуется постоянная мощность. Для снижения массы и габаритов авторами предложено изменить архитектуру ТТТ и заменить входные конденсаторы высокой емкости на активный фильтр. В работе произведен синтез полумостового активного фильтра пульсаций вставки постоянного тока ТТТ, включающего в себя вспомогательную индуктивность и емкость, предназначенную для накопления энергии. Разработан алгоритм работы фильтра, спроектирована имитационная модель фильтра. Результаты моделирования позволили оценить эффективность применения предложенного метода. Полумостовой активный фильтр позволил значительно снизить амплитуды пульсаций при незначительном снижении КПД. Заключено, что применение активной фильтрации пульсаций постоянного напряжения ТТТ позволяет уменьшить массогабаритные показатели при сохранении высоких показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: активный фильтр, твердотельный трансформатор, пульсации напряжения

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00359, <https://rscf.ru/project/24-29-00359/>.

Для цитирования: Вынгра А.В., Авдеев Б.А. Снижение пульсаций напряжения звена постоянного тока твердотельного трансформатора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 1. С. 42–52. DOI: 10.14529/power260105

Original article

DOI: 10.14529/power260105

REDUCING THE VOLTAGE RIPPLE OF THE DC LINK OF A SOLID-STATE TRANSFORMER

A.V. Vyngra, avyngra@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0665-047X>

B.A. Avdeev, dirigeant@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6902-245X>

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

Abstract. At the stage of developing solid-state transformer (SST) technologies, engineers face additional challenges in ensuring high electricity quality. When using a single-phase input bridge rectifier, the instantaneous power of a single-phase network fluctuates with double frequency, while constant power is required at the SST output. To reduce the weight and dimensions, the authors proposed changing the TTT architecture and replacing high-capacity input capacitors with an active filter. The work synthesizes a semi-bridge active pulsation filter of the SSR DC insert, which includes auxiliary inductance and capacitance for energy storage. The authors developed an algorithm for filter operation and constructed a simulation model of the filter. Modeling results allowed evaluating the effectiveness of the proposed method. The half-bridge active filter significantly reduces ripple amplitudes with a slight decrease in efficiency. It is concluded that the use of the active filtering of SST DC voltage ripple reduces weight and size indicators while maintaining high quality indicators of electric power.

Keywords: active filter, solid-state transformer, voltage ripple

Acknowledgments. This work has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF No. 24-29-00359, <https://rscf.ru/project/24-29-00359/>.

For citation: Vyngra A.V., Avdeev B.A. Reducing the voltage ripple of the DC link of a solid-state transformer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;26(1):42–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260105

© Вынгра А.В., Авдеев Б.А., 2026

Введение

Твёрдотельные трансформаторы (ТТТ) – это новая технология, разработанная для современных интеллектуальных сетей электроснабжения (ИСЭ). ТТТ состоят из звена среднего переменного напряжения, звена постоянного тока, высокочастотной развязки и звена низкого переменного напряжения. Несмотря на свою относительную дешевизну и простоту, классический трансформатор имеет ряд существенных недостатков, что ограничивает его применение в ИСЭ. Классический трансформатор не позволяет регулировать уровни напряжения, если есть такая необходимость, поддерживать выходное напряжение при провалах входного напряжения. ИСЭ на базе переменного тока обладают большим количеством ступеней преобразования, что уменьшает эффективность всей системы. В отличие от него ТТТ может регулировать напряжение или поддерживать качество выходной синусоиды и заданный уровень напряжения на выходе при изменении напряжения на входе, производить компенсацию реактивной мощности. Звенья постоянного тока используются для создания новых функций трансформатора, таких как гибридное распределение переменного и постоянного тока, что позволяет интегрировать нагрузку и источники электроэнергии с различным уровнем напряжения и родом тока. Ко всему прочему ТТТ обладает меньшими массогабаритными показателями, что может быть использовано в локомотивах и в ветроэлектростанциях. Все эти преимущества делают актуальным применение ТТТ в ИСЭ.

Исследования ТТТ активно ведутся по разным направлениям: передача электроэнергии от источника электроэнергии к потребителю [1], гальваническая развязка между источником и потребителем электроэнергии [2–5], повышение качества электроэнергии [6], согласование сетей постоянного и переменного тока [7], создание интеллектуальных сетей с местными источниками электроэнергии различной мощности [8]. Существует ряд топологий ТТТ, которые позволяют применять их для конкретных целей с наивысшей эффективностью и сопоставимой стоимостью. Все разновидности по степеням преобразования можно поделить на одноступенчатые, двухступенчатые и трехступенчатые. Трехступенчатая топология ТТТ является самой распространённой благодаря гибкости и универсальности и одновременно с этим самой сложной в техническом плане. Мощности экспериментальных образцов ТТТ достигают нескольких МВт.

Постановка проблемы

При применении входного мостового однофазного выпрямителя мгновенная мощность однофазной сети колеблется с удвоенной частотой, тогда как на выходе ТТТ требуется постоянная мощность. В результате на выходе выпрямителя возникают пульсации мощности с удвоенной частотой сети [9]. Чтобы сгладить пульсации мощно-

сти и мгновенного значения напряжения, в схемах используют электролитические конденсаторы высокой емкости, что приводит к увеличению массогабаритных показателей прибора, а также к снижению его срока службы.

Отечественными и зарубежными учеными рассматриваются различные способы решения проблемы высоких массогабаритных показателей входных сглаживающих фильтров [10, 11]. Применение корректоров коэффициентов мощности устраняет гармонические искажения входного тока и потребляемую реактивную энергию, но не устраняет пульсации постоянного напряжения, что доказывается как при исследованиях имитационных моделей корректоров коэффициента мощности, так и при экспериментальных исследованиях [12, 13]. Классические активные фильтры работают на переменном токе, потребляя и отдавая энергию в сеть, таким образом снимая лишнее напряжение и компенсируя провалы напряжения, причём отдаваемая и потребляемая энергия за единицу времени должны быть равны [14–16]. Существуют вольтодобавочные устройства, которые непрерывно могут подпитывать сеть, но они нуждаются в отдельном стабильном источнике электроэнергии, что значительно усложняет и удорожает систему передачи электроэнергии. Вольтодобавочные устройства применяют в основном для тяговых подстанций и в горнодобывающей промышленности [17, 18]. Из-за ограниченности формата статьи привести различные вариации активных фильтров и корректоров коэффициента мощности не представляется возможным.

Так, в качестве альтернативного метода снижения пульсаций напряжения, а вследствие – пульсаций мощности авторами работы [19] была предложена концепция активного фильтра, который состоит из конденсаторов низкой емкости. Дополнительно для реализации данной схемы снижения пульсаций необходимы катушка индуктивности и коммутационные устройства (MOSFET-транзисторы) для управления напряжением конденсатора.

Снизить массогабаритные показатели катушки индуктивности возможно увеличением частоты коммутации транзисторов. Однако при увеличении частоты коммутации в транзисторах возникают коммутационные потери, что, в свою очередь, создает необходимость применения дополнительных радиаторов для отведения тепла [20]. Для того чтобы нивелировать показатели частоты и нагрева силовых ключей, возможно применение карбидкремниевых транзисторов, обладающих высокой скоростью переключения и значительно низким сопротивлением канала в открытом состоянии. Таким образом, применение активного фильтра для подавления пульсаций мощности после выпрямителя наряду с применением новейших силовых полупроводниковых устройств позволит снизить массогабаритные показатели ТТТ.

Целью работы является снижение массогабаритных показателей ТТТ путем применения дополнительного активного фильтра снижения пульсаций выпрямленного напряжения, заменяющего традиционные конденсаторы высокой емкости. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения однофазного мостового выпрямителя составляет 67 %, трехфазного – 5,7 %, поэтому в статье будет рассмотрен однофазный выпрямитель как самый сложный вариант.

Разработка устройства

Для снижения массы и габаритов авторами предложено изменить архитектуру ТТТ и заменить входные конденсаторы высокой емкости на активный фильтр. На принципиальной схеме (рис. 1) представлен однофазный ТТТ с активной фильтрацией пульсаций постоянного напряжения, который может использоваться как однонаправленный преобразователь уровней напряжения в различных областях техники, в том числе в устройствах и приборах, применяемых в движущихся объектах, автономных мобильных системах и других устройствах с высокими требованиями к массогабаритным показателям компонентов.

ТТТ с активной фильтрацией пульсаций постоянного напряжения состоит из входного однофазного активного выпрямителя 1, двойного активного моста 2, выходного однофазного инвертора 6. Двойной активный мост включает в себя автономный инвертор 3, высокочастотный трансформатор 4 и управляемый мостовой выпрямитель 5. Для сглаживания пульсаций постоянного тока на входе и выходе двойного активного моста стоят сглаживающие конденсаторы 7 и 8 соответственно, а также установлен полумостовой активный фильтр звена постоянного тока 9, включающий в себя индуктивность 10 и емкость 11. Для измерения электрических величин предусмотрены датчики напряжения и датчики тока 12–17. На выходе инвертора установлен сглаживающий пассивный фильтр 18. Управление преобразователем осуще-

ствляется микроконтроллером 19. В устройстве в качестве управляемых ключей могут быть использованы IGBT-транзисторы или MOSFET-транзисторы, в зависимости от разрабатываемой мощности устройства, однако для снижения размеров радиаторов охлаждения рекомендовано применять карбид-кремниевые транзисторы.

Работает ТТТ следующим образом. Напряжение поступает из сети на неуправляемый однофазный выпрямитель. Выпрямленное напряжение, имеющее пульсирующую форму, подается на активный полумостовой фильтр, снижающий пульсации. Далее напряжение подается на однофазный мостовой инвертор, который преобразует из постоянного напряжения в высокочастотное переменное (импульсное). Высокочастотное напряжение подается на высокочастотный трансформатор, который осуществляет преобразование в другой уровень напряжения. Полученное напряжение с помощью управляемого выпрямителя выпрямляется в необходимый уровень постоянного напряжения. Полученное напряжение сглаживается конденсатором и подается на однофазный инвертор, который генерирует выходное однофазное напряжение и через выходной пассивный фильтр подает его на нагрузку.

Также датчики тока и датчики напряжения передают значения соответствующих электрических величин микроконтроллеру, который на основании этих данных и сигнала управления вырабатывает импульсы для коммутации электронных ключей на инверторы и выпрямитель.

Описание процесса фильтрации

Снижение пульсаций полумостовым активным фильтром происходит следующим образом. Предположим, что напряжение сети u_{AC} и ток i_{AC} являются синусоидальными и выражаются следующим образом:

$$u_{AC} = U_m \cos(\omega t); \quad (1)$$

$$i_{AC} = I_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

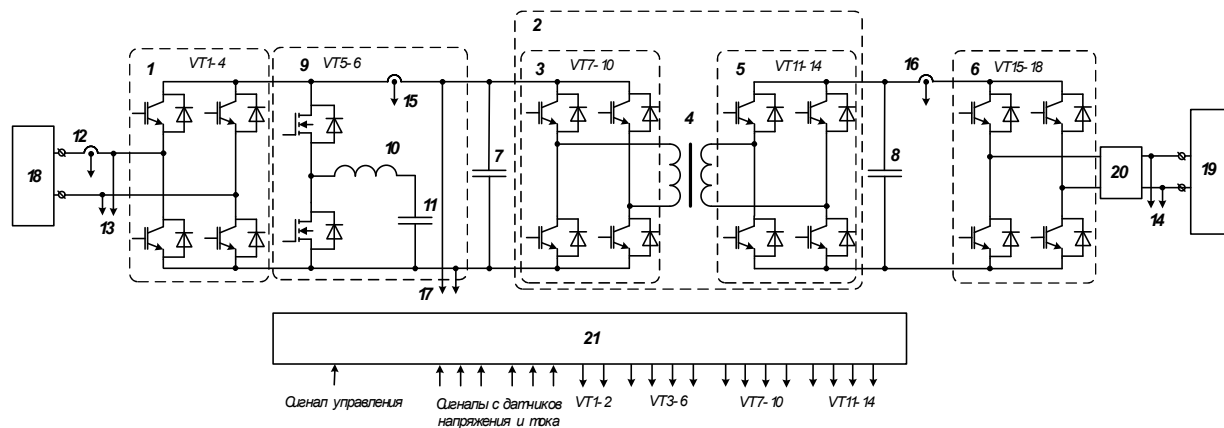


Рис. 1. Принципиальная схема твердотельного трансформатора с активной фильтрацией пульсаций постоянного напряжения
Fig. 1. Schematic diagram of a solid-state transformer with active filtering of DC voltage ripples

где U_m и I_m – амплитуды напряжения и тока сети; ω – частота сети; φ – угол сдвига фаз. Тогда мгновенная мощность p_{AC} сети выражается как

$$p_{AC} = u_{AC}i_{AC} = \underbrace{U_m I_m \cos(\varphi) / 2}_{P_{\text{ср}}} + \underbrace{U_m I_m \cos(2\omega t + \varphi) / 2}_{P_{\text{пульс}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность, т. е. мощность нагрузки; $P_{\text{пульс}}$ – мощность пульсаций, которая должна быть сглажена конденсаторами или компенсирована активным фильтром.

При абсолютном сглаживании напряжения и тока звена постоянного тока напряжение и ток пульсаций ($u_{\text{пульс}}$ и $i_{\text{пульс}}$) станут источниками пульсирующей мощности на удвоенной частоте сети. Для упрощения расчета потерями в пассивных фильтрах и выпрямителе решено пренебречь. При отсутствии сглаживающих конденсаторов, согласно балансу мощности, мгновенное значение тока и напряжения на выходе выпрямителя определяются следующим образом:

$$i_{\text{выпр}} = \frac{u_{AC}i_{AC}}{u_{DC}} = 0,5 \underbrace{U_m I_m \cos(\varphi) / u_{DC}}_{i_n} + 0,5 \underbrace{U_m I_m \cos(2\omega t + \varphi) / u_{DC}}_{i_{\text{пульс}}}; \quad (4)$$

$$u_{\text{выпр}} = \frac{u_{AC}i_{AC}}{i_{DC}} = 0,5 \underbrace{U I \cos(\varphi) / i_{DC}}_{u_n} + 0,5 \underbrace{U I \cos(2\omega t + \varphi) / i_{DC}}_{u_{\text{пульс}}}, \quad (5)$$

где u_{DC} и i_{DC} – напряжение и ток вставки постоянного тока; $u_{\text{пульс}}$ и $i_{\text{пульс}}$ – напряжение и ток пульсаций; u_n и i_n – напряжение и ток нагрузки.

Согласно представленным схемам замещения (рис. 2а, б), можно записать следующие уравнения для звена постоянного тока при сглаживании тока и напряжения:

$$C \frac{du_{DC}}{dt} = i_{\text{выпр}} - i_n; \quad (6)$$

$$L \frac{di_{DC}}{dt} = u_{\text{выпр}} - u_n. \quad (7)$$

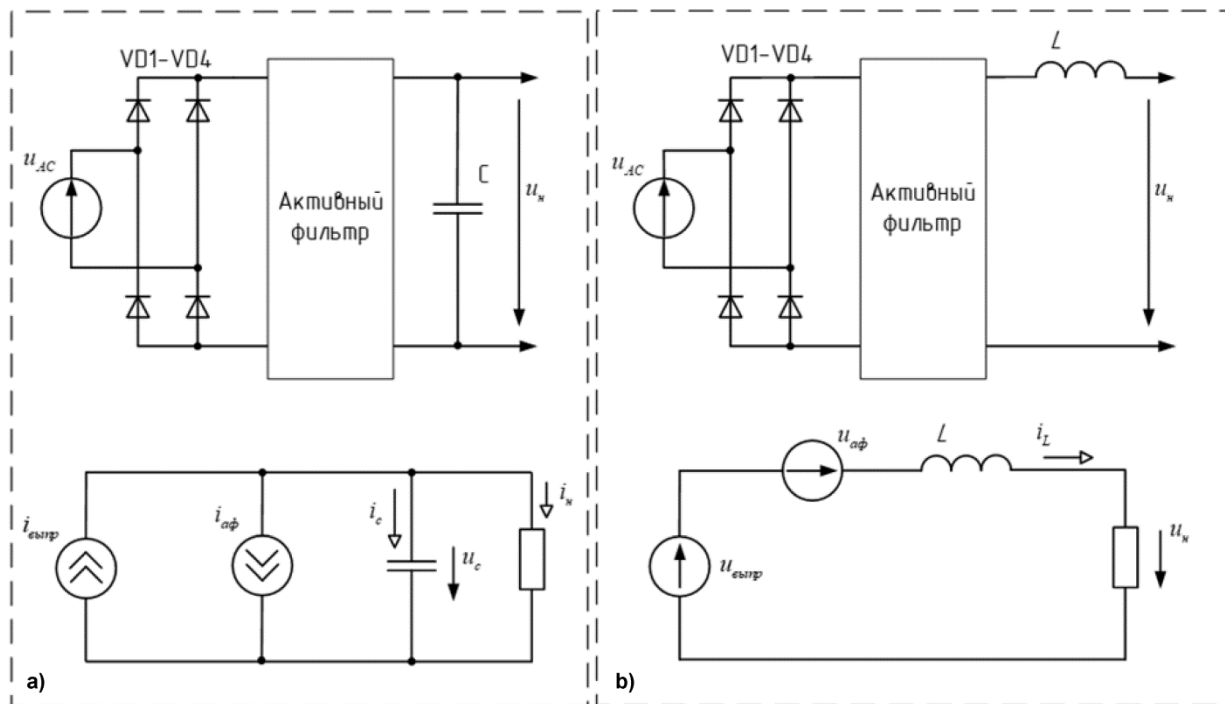


Рис. 2. Принципиальная схема участка цепи с активным фильтром напряжения (а) и тока (б) и их схемы замещения
Fig. 2. Schematic diagram of a circuit section with an active voltage (a) and current (b) filter, and their replacement circuits

Таким образом, для реализации идеально выпрямленного постоянного напряжения и постоянного тока на выходе выпрямителя, согласно (6) и (7), необходимо бесконечное значение емкости и индуктивности, и именно применение пассивных фильтров для значительного снижения коэффициента пульсаций приводит к увеличению массогабаритных размеров устройства. Однако применение активного фильтра позволяет

снизить размеры накопителей энергии. Согласно первому закону Кирхгофа, если ток активного фильтра $i_{аф}$ принимает обратное значение тока пульсаций $i_{пульс}$, пульсации выходного тока будут отсутствовать. Аналогично, согласно второму закону Кирхгофа, если напряжение активного фильтра $u_{аф}$ равно напряжению пульсаций $u_{пульс}$, то выходные пульсации напряжения также будут равны нулю.

Синтез блока активной фильтрации

Предложенный блок активной фильтрации представляет собой полумостовой понижающий преобразователь, включающий в себя вспомогательную индуктивность $L_{аф}$ и емкость $C_{аф}$, предназначенную для накопления энергии. Ток катушки и напряжение конденсатора определяются переключением силовых ключей на MOSFET-транзисторах VT1 и VT2. Индуктивность используется только для передачи энергии между цепью постоянного тока и конденсатором, следовательно, запасаемая энергия в ней пренебрежимо мала. Так как в цепи постоянного тока наблюдаются как пульсации тока, так и напряжения, компенсацию пульсаций целесообразно производить по мощности. Мощность пульсаций, генерируемых активным фильтром, можно определить как

$$P_{аф} = U_{аф} \cdot i_{аф} = U_{аф} \cdot C_{аф} \frac{dU_{аф}}{dt}, \quad (8)$$

где $U_{аф}$ – напряжение активного фильтра.

Учитывая тот факт, что активному фильтру необходимо генерировать пульсирующую мощность, частота которой в два раза выше частоты сети, справедливо следующее выражение:

$$U_{аф} \cdot C_{аф} \frac{dU_{аф}}{dt} = P_{аф} \cos(2\omega t - \varphi). \quad (9)$$

Проинтегрировав обе части выражения (9) и приняв константы равными нулю, получим

$$C_{аф} \frac{U_{аф}^2}{2} = E_0 + \frac{P_{аф}}{2\omega} \sin(2\omega t - \varphi) = E_0 + E_{2,макс} \sin(2\omega t - \varphi), \quad (10)$$

где E_0 – энергия конденсатора; $E_{2,макс}$ – амплитудное значение пульсаций энергии. Когда пульсации мощности в активном фильтре достигают амплитудного значения, напряжение на конденсаторе определяется как

$$U_{аф} = \sqrt{U_{аф0}^2 - \frac{U_{AC} I_{AC}}{2\omega C_{аф}} \cdot \sin(2\omega t - \varphi)}, \quad (11)$$

где $U_{аф0} = \sqrt{2E_0 / C_{аф}}$ – напряжение на конденсаторе в начале каждого полупериода; U_{AC} – действующее значение напряжения цепи переменного тока; I_{AC} – действующее значение переменного тока.

Во время работы активного фильтра напряжение фильтра всегда будет выше нуля и ниже напряжения линии постоянного тока. Учитывая емкость конденсатора $C_{аф}$, можно определить следующие ограничения:

$$E_0 - E_{2,макс} > 0; \quad (12)$$

$$E_0 + E_{2,макс} < \frac{C_{аф} U_{DC}^2}{2}, \quad (13)$$

где U_{DC} – напряжение цепи постоянного тока.

При условии, что энергия конденсатора будет составлять половину максимальной энергии активного фильтра, можно определить максимальную емкость устанавливаемого конденсатора:

$$E_0 = \frac{C_{аф} U_{DC}^2}{4}; \quad (14)$$

$$U_{аф0} = \frac{U_{DC}}{\sqrt{2}}; \quad (15)$$

$$\frac{C_{аф} U_{DC}^2}{2} = 2E_{2,макс}. \quad (16)$$

Минимальная емкость конденсатора активного фильтра определяется случаем, когда вся энергия, запасенная в фильтре, будет использована для компенсации пульсаций мощности:

$$C_{аф,мин} = \frac{2P_{аф}}{\omega U_{DC}^2}. \quad (17)$$

Алгоритм работы фильтра

Снижение пульсаций активным фильтром происходит по следующему алгоритму: датчик напряжения и трансформатор тока снимают значения переменного напряжения и тока и передают в микроконтроллер, который вычисляет действующее значение потребляемой из сети мощности, далее датчики тока и напряжения передают значения постоянного напряжения и тока, по которым вычисляется значение мощности звена постоянного тока. При возникновении рассогласования значений мощностей ввиду пульсаций напряжения постоянного тока микроконтроллер генерирует импульсы, отпирающие верхний или нижний ключи полумоста активного фильтра, тем самым создавая пульсации тока в цепи индуктивности и конденсатора в противофазе с пульсациями мощности звена постоянного тока.

Разработка имитационной модели устройства

Для проверки работы устройства спроектирована модель в среде имитационного моделирования MATLAB. Модель включает в себя входной выпрямитель, активный фильтр, двойной активный мост и выходной инвертор. Разработанная модель без добавления активного фильтра исследовалась ранее [21] и показала высокую эффек-

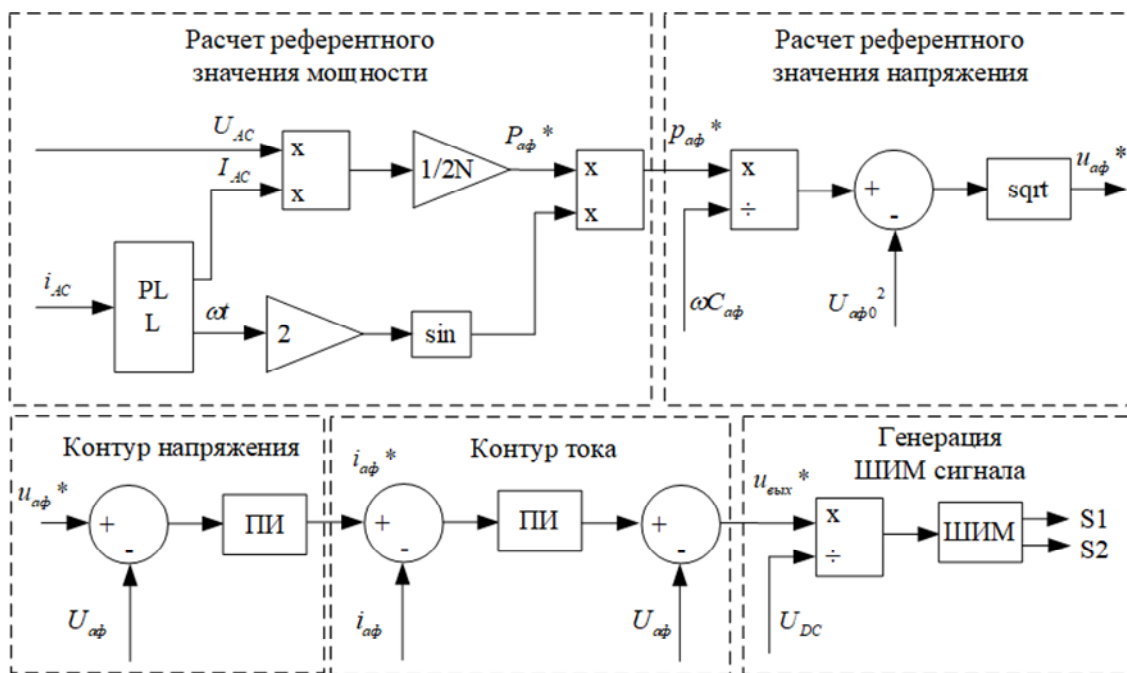


Рис. 3. Двухконтурная система управления активным фильтром
 Fig. 3. Dual-circuit active filter control system

тивность отображения процессов, происходящих в преобразователе.

Сигнал управления ключами формируется по алгоритму, описанному выше, двухконтурной системой управления, блок-схема которой представлена на рис. 3.

Отличительной особенностью данной системы автоматического управления является определение референтного значения мощности вставки постоянного по мощности линии переменного тока. Согласно уравнению (2), в системе используется удвоенное значение частоты сети ($2\omega t$). Генерация ШИМ сигнала и определение коэффициента заполнения ШИМ происходит с учетом двухконтурной отрицательной обратной связи по току и напряжению.

Результаты моделирования

В ходе имитационного моделирования, произведенного в MATLAB/Simulink, получены графики пульсаций напряжения звена постоянного тока при работе без активного фильтра и с активным фильтром при фиксированной емкости конденсатора, составляющей 50 мкФ. В момент времени 0,4 с происходит включение системы управления полумостового активного фильтра. Полученные осциллограммы приведены на рис. 4. При сохранении одинакового значения емкости удалось снизить амплитуды пульсаций с 179 до 66 В. Коэффициент пульсаций без активного фильтра составил 0,42, а при работе фильтра снизился до 0,13. Следует заметить, что устройство снижает амплитуды пульсаций удвоенной частоты сети (2-й гармоники), однако создает пульсации 4-й гармони-

ки, хоть и значительно меньшей амплитуды. При моделировании работы устройства без активного фильтра при тех же параметрах нагрузки коэффициент пульсаций составил 0,12 в случае применения сглаживающего конденсатора емкостью 500 мкФ.

На рис. 4 видно, что пульсации формируемого активным фильтром тока имеют удвоенную частоту относительно частоты пульсаций выпрямленного мостовым фильтром напряжения. Энергия, запасаемая в LC-цепи в момент достижения максимального напряжения, отдается в цепь постоянного тока в момент провала напряжения.

Также произведено исследование эффективности работы устройства твердотельного трансформатора при переменной нагрузке с добавлением активного фильтра и без него при емкости сглаживающего конденсатора 50 мкФ, а также при увеличенной емкости 400 мкФ. Результаты приведены на рис. 5.

КПД ТТТ с конденсаторами высокой емкости при нагрузке в 1,2 кВт составляет 92,9 %. При уменьшении емкости звена постоянного тока резко увеличивается амплитуда пульсаций мощности, что приводит к повышению импульсного напряжения и снижению КПД до 91 %. Активный фильтр также вносит дополнительные потери в ТТТ. Однако при сохранении уменьшенной емкости КПД снижается всего на 0,5 % по сравнению со случаем с уменьшенной емкостью звена постоянного тока, но без АФ. Следует отметить, что конструкция ТТТ незначительно дополняется катушкой индуктивности и двумя транзисторными ключами с радиаторами.

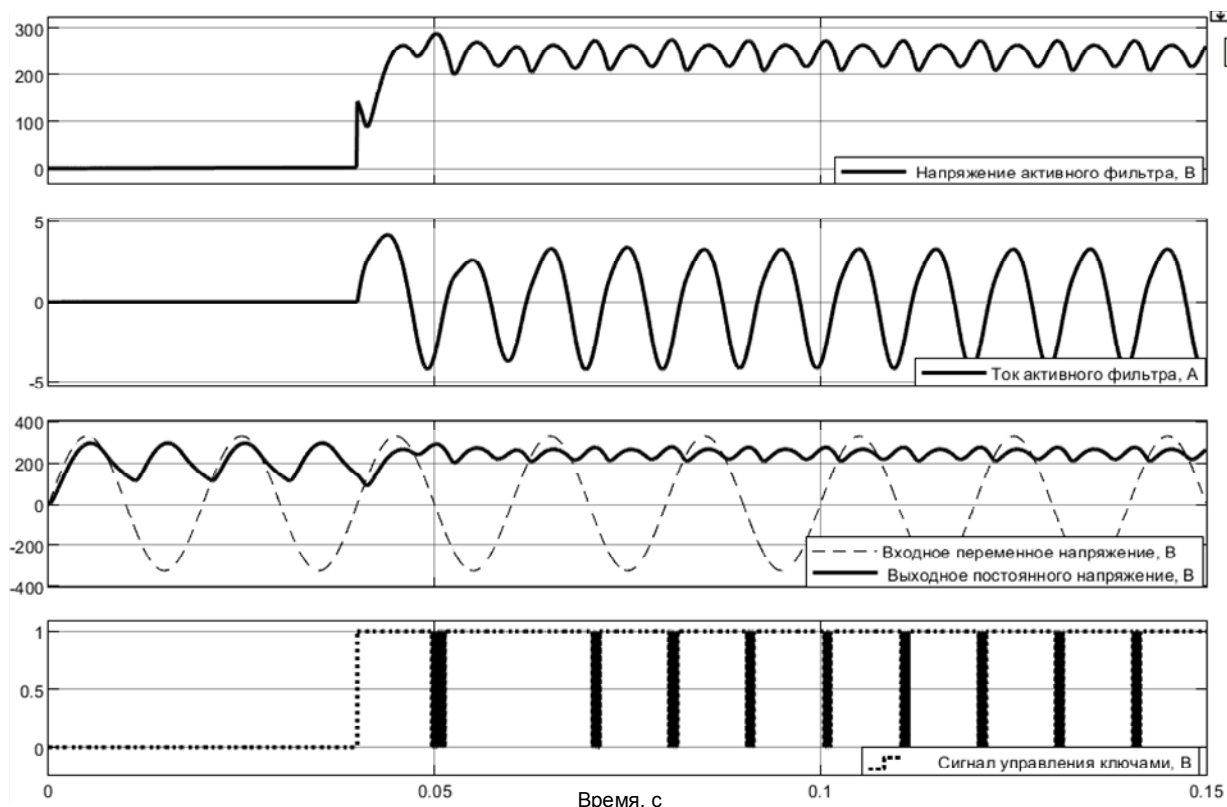


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока при работе активного фильтра
Fig. 4. Voltage and current waveforms during operation of the half-bridge active filter

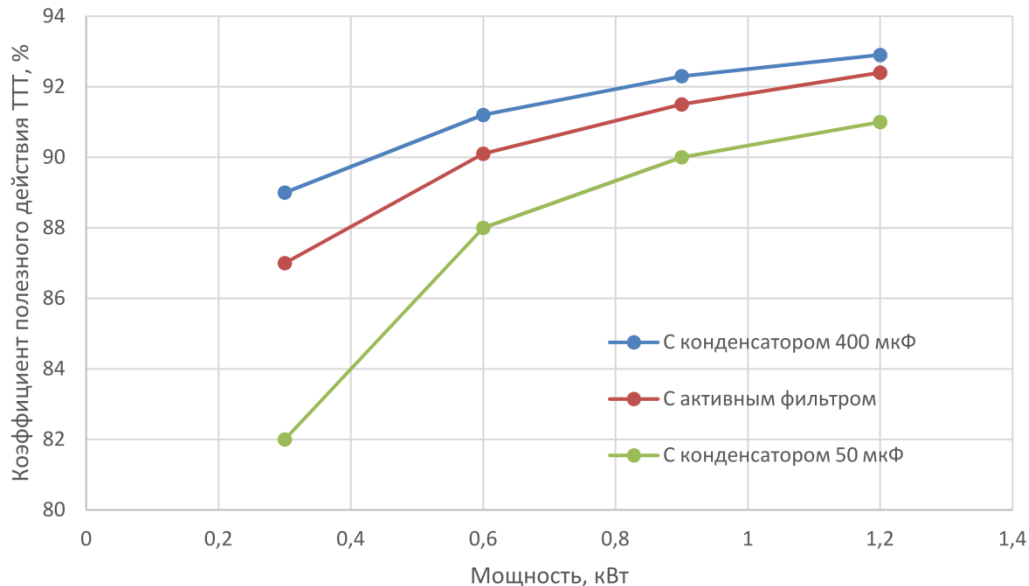


Рис. 5. КПД устройства при работе с АФ и без него
Fig. 5. The efficiency of the device when operating with and without the AF

Обсуждение

Согласно обзору топологий активной фильтрации пульсаций мощности видно, что большинство исследователей уделяли пристальное внимание топологиям с низкой стоимостью (обеспечиваемой снижением количества переключателей), чтобы снизить стоимость готового устройства при

сохранении высоких показателей качества электроэнергии [22, 23]. В настоящей работе вопрос о стоимости комплектующих устройства стоит косвенно, так как основной задачей исследования стояло снижение массогабаритных параметров устройства для дальнейшего его использования в различных мобильных системах.

Следует заметить, что разработанная модель и предложенный алгоритм активного фильтра не способны полностью убрать пульсации напряжения и тока, а только снижают их амплитуды. Это связано с тем, что в системе не учитываются потери на элементах цепи, а также не учитываются режимы работы двойного активного моста, выступающего в качестве нагрузки звена постоянного тока твердотельного трансформатора. Аппаратная реализация предлагаемого устройства может быть осуществлена с помощью существующих силовых электротехнических, электронных и микропроцессорных устройств, при надлежащем выборе и настройке соответствующих параметров [24].

Заключение

Было продемонстрировано, что применение активной фильтрации пульсаций постоянного напряжения для твердотельного трансформатора позволяет уменьшить массогабаритные показатели при сохранении высоких показателей качества электроэнергии. В результате имитационного моделирования показано, что применение АФ в цепи

постоянного тока позволяет уменьшить ёмкость сглаживающего конденсатора с 500 до 50 мкФ при сохранении коэффициента пульсаций, равного 0,13, и выходной мощности 1,2 кВт. С увеличением мощности ёмкости также должны увеличиваться, чтобы обеспечить сглаживания пульсаций. Так, для 50 кВт желательно использовать конденсаторную батарею на 2000 мкФ, что является проблематичным. Также следует учитывать тот факт, что входное напряжение на ТТТ может превосходить 600 В, что вынудит устанавливать конденсаторы последовательно, что в несколько раз увеличит количество применяемых конденсаторов. Всё это делает применение предложенного метода устранения пульсаций на вставке постоянного тока ещё более перспективным и необходимым.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на создание оптимальных алгоритмов работы активного фильтра, а также на разработку новых топологий систем сглаживания постоянного тока и повышения показателей качества электроэнергии в целом.

Список литературы

1. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Совершенствование системы регулирования напряжения твердотельного трансформатора в интеллектуальных сетях электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65, № 3. С. 74–79. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-3-74-79
2. Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators / D. Cervero, M. Fotopoulou, J. Muñoz-Cruzado Alba et al. // Electronics. 2023. Vol. 12, iss. 4. P. 931. DOI: 10.3390/electronics12040931
3. Huber J.E., Kolar J.W. Volume/Weight/Cost Comparison of a 1 MVA 10 kV/400 V Solid-State against a Conventional Low-Frequency Distribution Transformer // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA, 2014. P. 4545–4552. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6954023
4. Huang A.Q. Solid state transformers, the Energy Router and the Energy Internet // The Energy Internet. Woodhead Publishing, 2019. P. 21–44. DOI: 10.1016/B978-0-08-102207-8.00002-3
5. Царева П.Е., Авдеев Б.А., Марковкина Н.Н., Епифанцев И.Р., Жиленков А.А. Моделирование работы трехфазного твердотельного трансформатора при изменении нагрузки // Электротехника. 2022. № 6. С. 61–64. DOI: 10.53891/00135860_2022_6_61
6. Фадеева Н.Е., Савиных В.Л., Полянская А.В. Анализ схемотехнических решений преобразователя для твердотельного трансформатора // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. С. 129–135.
7. Шалухо А.В., Эрдили Н.И. Применение твердотельных трансформаторов в распределительных электрических сетях с объектами распределенной генерации // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. С. 305–307.
8. Huber J.E., Kolar J.W. Solid-state transformers: On the origins and evolution of key concepts // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2016. Vol. 10, no. 3. P. 19–28. DOI: 10.1109/MIE.2016.2588878
9. State of the Art of Solid-State Transformers: Advanced Topologies, Implementation Issues, Recent Progress and Improvements / M.A. Hannan, P.J. Ker, M.S. Hossain Lipu et al. // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 19113–19132. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2967345
10. Разработка и исследование твердотельного трансформатора низкого напряжения / А.И. Чивенков, Е.Н. Соснина, И.А. Липужин и др. // Электротехника. 2024. № 10. С. 41–48. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-41-848
11. Кастров М.Ю., Лукин А.В. Обеспечение минимальной фильтрации за счёт управления пульсациями (практический подход к разработке предварительных регуляторов с коррекцией коэффициента мощности в граничном режиме) // Практическая силовая электроника. 2009. № 3 (35). С. 9–20.
12. Xiao L. Comprehensive Analysis on Power Factor Correction Circuit // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 71. P. 210–220. DOI: 10.54097/hset.v71i.12697

13. Hardware Implementation of Single Phase Power Factor Correction System using Micro-controller / K. Jha, B. Mahato, P. Prakash, K. Jana // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2016. Vol. 7, iss. 3. P. 790–799. DOI: 10.11591/ijped.v7.i3.pp790-799
14. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник / Р.В. Клюев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, В.И. Голик // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022. № 2. С. 313–324. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-313-324
15. Sychev Y., Abramovich B., Prokhorova V. The assesement of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 5621–5630. DOI: 10.11591/ijece.v10i6.pp5621-5630
16. Кудяков Д.А. Моделирование активного фильтра высоковольтного источника питания ФЭУ // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. 2024. № 1-1. С. 237–241.
17. Крюков Е.В. Применение тиристорных вольтодобавочных устройств для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева, 2018. 185 с.
18. Rashitov P.A., Mostovoy D.V., Seregin D.A. Comparative analysis of devices for improvement quality of power supply in 0.38 kV distribution networks in rural area and inner suburbs // *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, Russia, 2020. P. 188–194. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216287
19. Second Harmonic Current Reduction Techniques for Single-Phase Power Electronics Converter Systems / Xinbo Ruan, Li Zhang, Xinze Huang et al. Nanjing, Jiangsu, China: Springer, 2022. 288 p. DOI: 10.1007/978-981-19-1547-5
20. Идентификация гармонического состава токов и напряжений в автономной энергосистеме при нестабильной частоте тока / П.П. Поделенюк, С.Г. Черный, Т.Д. Кайнова, А.А. Жиленков // *Электротехника*. 2022. № 6. С. 51–55. DOI: 10.53891/00135860_2022_6_51
21. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Совершенствование системы регулирования напряжения твердотельного трансформатора в интеллектуальных сетях электроснабжения // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2022. Т. 65, № 3. С. 74–79. DOI: 10.17213/0136-3360-2022-3-74-79
22. Черный С.Г. Комплексная разработка программно-аппаратных компонентов фильтра преобразователя частоты для работы в судовых сетях ограниченной мощности / С. Г. Черный, А. С. Соболев // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36, № 1. С. 159–164. DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164
23. Сычев Ю.А., Аладьин М.Е. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023. № 11. С. 159–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_159
24. Оценка влияния активно-емкостного пассивного фильтра на амплитудно-частотные характеристики промышленной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных явлениях / Ю.А. Сычев, В.А. Сериков, В.Н. Костин, А.А. Коржев // *Промышленная энергетика*. 2024. № 1. С. 46–55. DOI: 10.34831/EP.2024.37.84.006

References

1. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Improving the voltage regulation system of a solid-state transformer in smart power supply grids. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2022;65(3):74–79. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2022-3-74-79
2. Cervero D., Fotopoulou M., Muñoz-Cruzado Alba J. et al. Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators. *Electronics*. 2023;12(4):931. DOI: 10.3390/electronics12040931
3. Huber J.E., Kolar J.W. Volume/Weight/Cost Comparison of a 1 MVA 10 kV/400 V Solid-State against a Conventional Low-Frequency Distribution Transformer. In: *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Pittsburgh, PA, USA, 2014. P. 4545–4552. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6954023
4. Huang A.Q. Solid state transformers, the Energy Router and the Energy Internet. In: *The Energy Internet*. Woodhead Publishing, 2019. P. 21–44. DOI: 10.1016/B978-0-08-102207-8.00002-3
5. Tsareva P.E., Avdeev B.A., Markovkina N.N., Epifantsev I.R., Zhilenkov A.A. Simulation of the operation of a three-phase solid-state transformer when the load changes. *Elektrotehnika*. 2022;(6):61–64. (In Russ.) DOI: 10.53891/00135860_2022_6_61
6. Fadeeva N.E., Savinykh V.L., Polyanskaya A.V. Analysis of circuit design solutions of a converter for a solid-state transformer. In: *Sovremennye problemy telekommunikatsiy: materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of telecommunications. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Information Science, 2023. P. 129–135. (In Russ.)

7. Shalukho A.V., Erdili N.I. [Application of solid-state transformers in electric distribution networks with distributed generation facilities]. In: *Dinamika nelineynykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh sistem: materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems. materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Cheboksary: I.N. Ulyanov Chuvash State University, 2021. P. 305–307. (In Russ.)
8. Huber J.E., Kolar J.W. Solid-state transformers: On the origins and evolution of key concepts. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2016;10(3):19–28. DOI: 10.1109/MIE.2016.2588878
9. Hannan M.A., Ker P.J., Hossain Lipu M.S. et al. State of the Art of Solid-State Transformers: Advanced Topologies, Implementation Issues, Recent Progress and Improvements. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 19113–19132. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2967345
10. Chivenkov A.I., Sosnina E.N., Lipuzhin I.A. et al. Development and Research of Low-Voltage Solid-State Transformer *Russian Electrical Engineering*. 2024;95:819–825. DOI: 10.3103/S1068371224701050
11. Kastrov M.Yu. Lukin A.V. [Ensuring minimal filtration by controlling pulsations (a practical approach to the development of preliminary regulators with power factor correction in the boundary mode)]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. 2009;3(35):9–20. (In Russ.)
12. Xiao L. Comprehensive Analysis on Power Factor Correction Circuit. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023;71:210–220. DOI: 10.54097/hset.v71i.12697
13. Jha K., Mahato B., Prakash P., Jana K. Hardware Implementation of Single Phase Power Factor Correction System using Micro-controller. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2016;7(3):790–799. DOI: 10.11591/ijpeds.v7.i3.pp790-799
14. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Golik V.I. Improving the quality of electric power at industrial enterprises through the application of an active harmonic filter. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):313–324. (In Russ.) DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-313-324
15. Sychev Y., Abramovich B., Prokhorova V. The assesement of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020;10(6):5621–5630. DOI: 10.11591/ijece.v10i6.pp5621-5630
16. Kudyakov D.A. [Modeling of an active filter of a high-voltage PV power source]. *Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR* [Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR]. 2024;(1-1):237–241. (In Russ.)
17. Kryukov E.V. *Primenenie tiristornykh vol'todobavochnykh ustroystv dlya povysheniya kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya: dis. kand. tekhn. nauk* [The use of thyristor voltage-boosting devices to improve the quality of electricity in power supply systems. Cand. sci. diss.]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2018. 185 p. (In Russ.)
18. Rashitov P.A., Mostovoy D.V., Seregin D.A. Comparative analysis of devices for improvement quality of power supply in 0.38 kV distribution networks in rural area and inner suburbs. In: *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Chelyabinsk, Russia, 2020. P. 188–194. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216287
19. Xinbo Ruan, Li Zhang, Xinze Huang et al. *Second Harmonic Current Reduction Techniques for Single-Phase Power Electronics Converter Systems*. Nanjing, Jiangsu, China: Springer, 2022. 288 p. DOI: 10.1007/978-981-19-1547-5
20. Podelenyuk P.P., Cherny S.G., Kainova T.D., Zhilenkov A.A. Identification of the harmonic composition of currents and voltages in an autonomous power system at an unstable current frequency. *Elektrotekhnika*. 2022;(6):51–55. (In Russ.) DOI: 10.53891/00135860_2022_6_51
21. Avdееv B. A., Vyngra A.V. Improving the voltage regulation system of a solid-state transformer in smart power supply grids. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2022;65(3):74–79. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2022-3-74-79
22. Chernyi S.G., Sobolev A.S. Integrated development of software and hardware components of the frequency converter filter for operating in power-limited ship networks. *Software & Systems*. 2023;36(1):159–164. (In Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.141.159-164
23. Sychev Y.A., Aladin M. E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11):159–181. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_159
24. Sychev Yu.A., Serikov V.A., Kostin V.N., Korzhev A.A. Evaluation of the effect of an active-capacitive passive filter on the amplitude-frequency characteristics of an industrial power supply system with a nonlinear load and capacitor units in conditions of resonant phenomena. *Industrial power engineering*. 2024;(1):46–55. DOI: 10.34831/EP.2024.37.84.006

Информация об авторах

Вынгра Алексей Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия; avyngra@mail.ru.

Авдеев Борис Александрович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия; dirigeant@mail.ru.

Information about the authors

Aleksei V. Vyngra, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electrical Equipment of Ships and Automation, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia, avyngra@mail.ru.

Boris A. Avdeev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electrical Equipment of Ships and Automation, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia, dirigeant@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.02.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025; принята к публикации 06.06.2025.

The article was submitted 01.02.2025; approved after review 06.06.2025; accepted for publication 06.06.2025.