

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-317-330>

УДК 621.316.721.1

Подавление пульсаций управляемых выпрямителей для питания магнитных систем

М. С. Лурье¹⁾, О. М. Лурье¹⁾, А. С. Фролов¹⁾

¹⁾Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева (Красноярск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. К установкам, связанным с регулируемым источниками постоянного тока, предъявляется ряд требований, среди которых малые пульсации напряжения и тока в нагрузке, а также широкий диапазон изменения выходного тока. Такие установки традиционно строятся на управляемых выпрямителях или широтно-импульсных преобразователях, в которых всегда присутствуют пульсации напряжения. В статье рассмотрен метод снижения пульсаций напряжения мощных выпрямителей для питания магнитных систем, основанный на введении в цепь нагрузки компенсирующего напряжения, равного по величине и противоположного по фазе напряжению пульсаций. Показана возможность применения компенсаторов пульсаций, подключаемых параллельно и последовательно с нагрузкой. Приведены методы получения компенсирующего напряжения. Для исключения подмагничивания трансформатора компенсатора пульсаций предлагается применять несколько вариантов его исполнения и включения. Проанализированы практические схемы пассивных компенсаторов (с цепью размагничивания и бифилярной обмоткой). Рассмотрена проблема разработки компенсаторов пульсаций для многофазных выпрямителей, а также пути ее решения. Приведены практические рекомендации по выбору материала сердечника и расчету трансформатора. На основе теоретических и практических соображений по проектированию компенсаторов пульсаций разработаны имитационные модели в пакете Simulink программы MATLAB. Представлена методика исследования компенсаторов пульсаций на разработанных имитационных моделях симметричного 12-пульсного выпрямителя. Результаты имитационного моделирования пассивных компенсаторов пульсаций, выполненных в двух вариантах, показали их эффективность при относительно несложной схеме и невысоких экономических затратах. Время установления заданного тока в системе при наличии компенсатора пульсаций увеличивается не более чем на 3 %, а точность и стабильность работы не изменяются.

Ключевые слова: регулирование постоянного тока, нагрузка, пульсации напряжения и тока, компенсация пульсаций, цепь размагничивания, бифилярная обмотка, моделирование, имитационная модель

Для цитирования: Лурье, М. С. Подавление пульсаций управляемых выпрямителей для питания магнитных систем / М. С. Лурье, О. М. Лурье, А. С. Фролов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 317–330. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-317-330>

Адрес для переписки

Лурье Михаил Семенович
Сибирский государственный университет науки
и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
просп. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31,
660037, г. Красноярск, Российская Федерация
Тел.: +7 391 222-73-19
sibgtu-frolov@rambler.ru

Address for correspondence

Lur'e Mikhail S.
Reshetnev Siberian State University
of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy Ave.,
660037, Krasnoyarsk, Russian Federation
Tel.: +7 391 222-73-19
sibgtu-frolov@rambler.ru

Suppression of Ripples of Controllable Rectifiers for Power Supply of Magnetic Systems

M. S. Lur'e¹⁾, O. M. Lur'e¹⁾, A. S. Frolov¹⁾

¹⁾Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
(Krasnoyarsk, Russian Federation)

Abstract. A number of requirements are imposed on installations associated with regulated DC sources, including low voltage and current ripple in the load, as well as a wide range of output current variation. Such installations are traditionally made on controlled rectifiers or pulse-width converters in which voltage ripples are always present. The paper considers a method for reducing the voltage ripple of powerful rectifiers for powering magnetic systems based on the insertion of a compensating voltage equal in magnitude and opposite in phase to the ripple voltage into the load circuit. The possibility of using ripple compensators connected in parallel and in series with the load, as well as methods of obtaining a compensating voltage is shown. Methods for obtaining compensating voltage are given. In order to exclude the magnetization of the ripple compensator transformer, it is proposed to use several versions of the compensating transformer and the inclusion of ripple compensators. Practical schemes of passive compensators (with a demagnetizing circuit and a bifilar winding) are analyzed. The problem of developing ripple compensators for multiphase rectifiers, as well as ways to solve it, is considered. Practical recommendations for choosing a core material and calculating a transformer are given. On the basis of the presented theoretical and practical considerations for the design of the ripple compensators, simulation models have been developed in the Simulink package of the MATLAB program. A technique for studying ripple compensators using the simulation models of a symmetrical 12-pulse rectifier that has been developed is presented. The results of simulation of passive ripple compensators, performed in two versions, showed their effectiveness, while the scheme was relatively simple and economic costs were relatively low. Also, the time of setting the set current in the system in the presence of a ripple compensator increases by no more than 3 %, and the accuracy and stability of operation do not change.

Keywords: DC regulation, load, voltage and current ripple, ripple compensation, demagnetization circuit, bifilar winding, modeling, simulation model

For citation: Lur'e M. S., Lur'e O. M., Frolov A. S. (2022) Suppression of Ripples of Controllable Rectifiers for Power Supply of Magnetic Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (4), 317–330. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-317-330> (in Russian)

Введение

В современных установках для физических исследований, системах точного электропривода в радиоэлектронной, электрохимической и других отраслях промышленности в ряде случаев необходимы мощные регулируемые источники постоянного тока для питания магнитных систем. Обычно их мощность превышает 10 кВт. Основное требование к данным устройствам – малые пульсации напряжения и тока в нагрузке (менее 0,01 %) и широкий (до 100) диапазон изменения выходного тока. Такие устройства часто называют прецизионными стабилизаторами тока [1]. Их строят на управляемых выпрямителях (УВ) [2] или широтно-импульсных преобразователях (ШИП) [3, 4]. На выходе УВ и ШИП всегда присутствуют пульсации напряжения, которые существенно возрастают при регулировании выходного напряжения преобразователей [5, 6].

Недостатком ШИП является высокий уровень электромагнитных помех, нарушающих работу расположенной поблизости электронной аппаратуры, что вынуждает принимать сложные меры по экранированию всего силового оборудования [7]. В УВ частота пульсаций и уровень гармоник выходного напряжения даже при глубоком регулировании значительно ниже, чем в ШИП, поэтому они создают меньше электромагнитных помех, но требуют специальных мер по снижению пульсаций напряжения и тока в нагрузке.

Нагрузкой прецизионных стабилизаторов тока служит мощный электромагнит с кованым или литым сердечником, схема замещения которого показана на рис. 1, где R_M , L_M – сопротивление и индуктивность обмотки электромагнита; L_S , R_S – индуктивность рассеяния и эквивалентное сопротивление потерь в сердечнике. Активно-индуктивный характер нагрузки способствует снижению пульсаций тока, но из-за потерь энергии в цельном сердечнике и большой индуктивности рассеяния реальная проводимость электромагнита для первой гармоники пульсаций может быть значительно больше, чем у идеальной активно-индуктивной цепи. Например, на рис. 1 сплошной линией показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) электромагнита ядерного магнитного анализатора на ток 100 А [8]. Параметры его схемы замещения: $R_M = 5$ Ом; $L_M = 5$ Гн, $L_S = 0,1$ Гн; $R_S = 200$ Ом. Для сравнения на рис. 1 пунктирной линией показана АЧХ идеальной активно-индуктивной цепи с теми же значениями активного сопротивления и индуктивности.

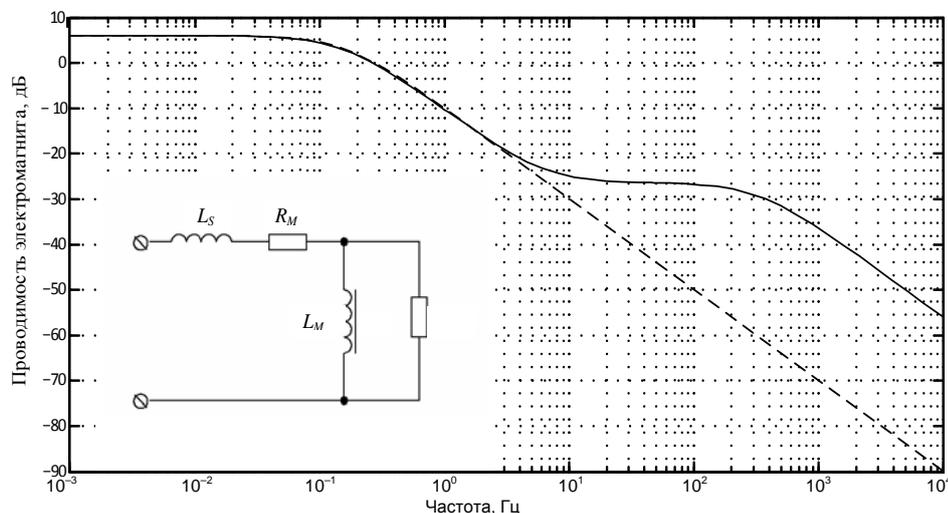


Рис. 1. Схема замещения и амплитудно-частотная характеристика мощного электромагнита на литом ферромагнитном сердечнике

Fig. 1. Equivalent circuit and amplitude-frequency response of a powerful electromagnet on a cast ferromagnetic core

Для снижения пульсаций питающего постоянного напряжения применяют многофазные управляемые выпрямители, имеющие 12, 18 и более

фаз [9, 10]. Но амплитуды первых гармоник пульсаций их выходных напряжений все же остаются значительными для питания прецизионных систем. На рис. 2 приведены постоянная составляющая $U_d(0)$ и амплитуды первых пяти гармоник (от 600 до 3000 Гц) пульсаций выходного напряжения 12-пульсного УВ в зависимости от угла регулирования.

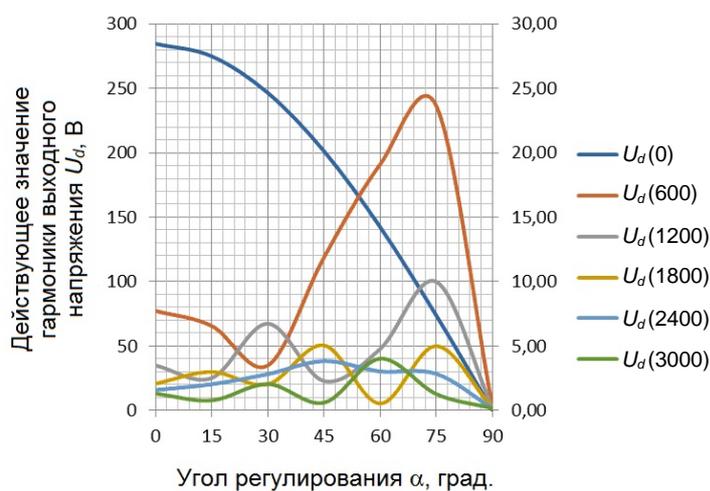


Рис. 2. Спектр выходного напряжения 12-пульсного управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке (правая шкала – для первой и высших гармоник)

Fig. 2. The spectrum of the output voltage of a 12-phase controlled rectifier at an active-inductive load (right scale – for the first and higher harmonics)

В мощных выпрямителях использование пассивных фильтров для снижения пульсаций можно считать экономически и технически нецелесообразным, так как требуется наличие дросселей с большой индуктивностью, рассчитанных на полный ток нагрузки, и конденсаторов большой емкости [11]. Намного более экономичны резонансные фильтры, но они чувствительны к частоте питающей сети [12], поэтому их характеристики оказываются недостаточно стабильными [13–15]. В данной работе рассматривается одна из возможностей по снижению уровня пульсаций выходного напряжения управляемых выпрямителей, а также имитационная модель симметричного 12-пульсного выпрямителя.

Теоретическая часть

В [8, 16] рассмотрена возможность применения компенсаторов пульсаций (КП), представляющих собой генераторы переменного компенсирующего напряжения, направленного в противофазе к напряжению пульсаций. Такие устройства могут включаться параллельно и последовательно с нагрузкой. В большинстве случаев, когда внутреннее сопротивление выпрямителя мало по отношению к сопротивлению нагрузки, предпочтительна последовательная схема КП, поэтому далее будем рассматривать только ее.

Амплитуда компенсирующего напряжения должна быть равна компенсируемой гармонике пульсаций, а фаза – сдвинута по отношению к ней на $180^\circ (2k - 1)$. Но практически между компенсирующими и компенсируемыми напряжениями i -х гармоник есть некоторые сдвиги по фазе, отличающиеся от требуемого значения, а их амплитуды неточно соответствуют друг другу.

Найдем условия для амплитуд и фаз компенсирующих напряжений, обеспечивающие эффективное подавление пульсаций. Для этого определим результирующее напряжение, полученное как разность напряжений i -й гармоники компенсируемого и компенсирующего напряжений (ΔU_i), и, разделив на него амплитуду напряжения компенсируемой гармоники U_i , запишем выражение для коэффициента подавления напряжения i -й гармоники K_i

$$K_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + 1 - 2A_i \cos \phi_i}} = \frac{U_i}{\Delta U_i}, \quad (1)$$

где $A_i = U_{ki}/U_i$ – амплитудная характеристика компенсатора пульсаций на i -й гармонике; U_{ki} – амплитуда компенсирующего напряжения i -й гармоники; U_i – то же напряжения i -й гармоники; ϕ_i – допустимое расхождение фаз между компенсируемым и компенсирующим напряжениями.

По (1) рассчитаем области, в которых должны лежать A_i и ϕ_i (на частоте i -й гармоники) для подавления пульсаций в K_i раз. На рис. 3 графически показано соотношение (1) для произвольной гармоники.

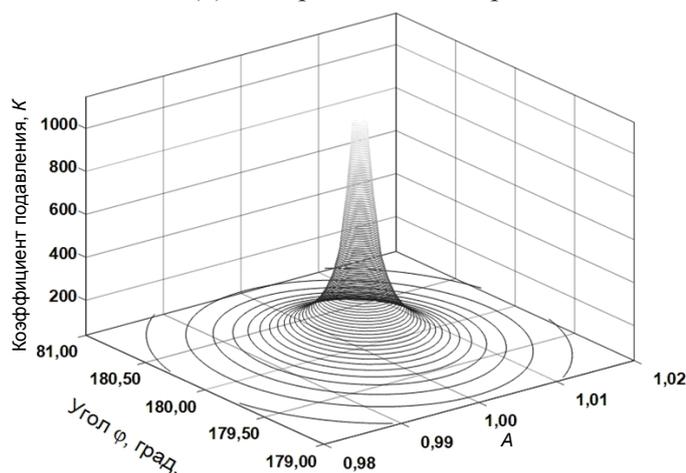


Рис. 3. Зависимость коэффициента подавления от амплитудно-частотной характеристики подавителя пульсаций

Fig. 3. Dependence of the suppression coefficient on amplitude-frequency response of the ripple suppressor

Теоретически КП позволяет получить высокий коэффициент подавления при соблюдении малых отклонений амплитуды и фазы между требуемыми значениями компенсируемой и компенсирующей гармоник выходного напряжения выпрямителя.

Для введения компенсирующего напряжения в силовую цепь используют трансформаторы [17]. Основные недостатки последовательной компенсации пульсаций – необходимость применения трансформатора (Тр), рассчитанного на полный ток нагрузки, и подмагничивание его сердечника. Поэтому трансформатор изготавливается с зазором или размагничивающей обмоткой.

По методу получения компенсирующего напряжения схемы КП делятся на пассивные и активные. Рассмотрим первый тип таких устройств (рис. 4). В них напряжение гармоник отсекается от постоянной составляющей на выходе выпрямителя конденсатором большой емкости C и подается на компенсирующую обмотку $w1$. Рабочая обмотка $w2$ при этом включается последовательно с нагрузкой. Обмотки имеют одинаковое число витков.

Для ликвидации подмагничивания магнитопровода трансформатора КП возможны два варианта исполнения компенсирующего трансформатора и включения КП [18]. В первом применяют третью обмотку для размагничивания $w3$ с большим числом витков, ток в которой может быть меньше тока нагрузки и пропорционален отношению $w3/w1$ (рис. 4а). Во втором варианте используют трансформатор с тремя одинаковыми по числу витков обмотками, две из которых ($w2, w3$) имеют бифилярную намотку и соединяются последовательно. Включение параллельно обмотке $w3$ конденсатора большой емкости позволяет разделить постоянную составляющую тока нагрузки, которая, проходя через данную обмотку, размагничивает сердечник и высшие гармоники компенсирующего напряжения. Последние замыкаются накоротко конденсатором $C2$ (рис. 4б).

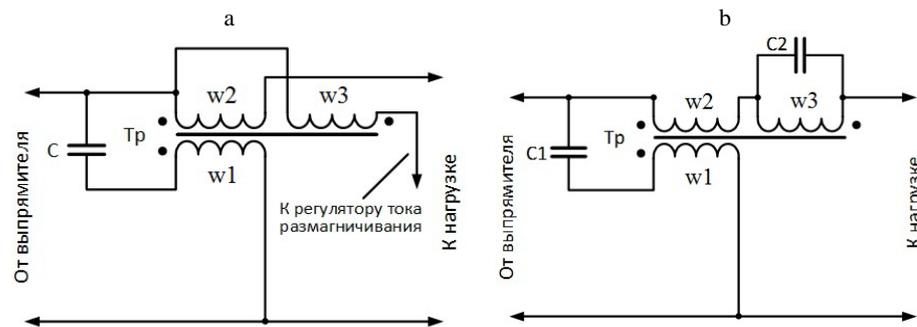


Рис. 4. Пассивные компенсаторы пульсаций:
а – с цепью размагничивания; б – с бифилярной обмоткой

Fig. 4. Passive ripple compensators:
а – with a demagnetization circuit; б – with bifilar winding

Основной проблемой при разработке КП для многофазных выпрямителей является выбор материала сердечника и расчет трансформатора, поскольку рабочие частоты гармоник достаточно велики (до 3–6 кГц). Поэтому использование обычной трансформаторной стали не дает ожида-

емого эффекта, слишком велики потери в магнитопроводе. В последнее время доступны магнитопроводы из аморфных и нанокристаллических сплавов, например из сплава ГАММАМЕТ [19]. Они изготавливаются из ленты толщиной 25 мкм с нанокристаллической структурой. Лента получается методом быстрой закалки из сплава на основе железа, имеющего высокие индукцию насыщения и магнитную проницаемость, низкие коэрцитивную силу и магнитные потери. Параметры трансформатора на основе такого магнитопровода: марка сердечника ОКЛ 140/220-50, рабочая, компенсирующая и бифилярная обмотки по 6 витков медной шиной сечением $25,205 \text{ мм}^2$ ($3,55 \times 7,10 \text{ мм}$), постоянный ток рабочей обмотки 50 А, переменная составляющая тока 5 А, основная рабочая частота 600 Гц, напряжение на рабочей обмотке 28 В при максимальной индукции 0,98 Тл. Для первого варианта КП обмотка размагничивания имеет 60 витков круглого провода диаметром 2,5 мм. Для второго варианта КП трансформатор имеет три одинаковые обмотки по шесть витков сечения $25,205 \text{ мм}^2$.

Для анализа предложенных схем разработаны имитационные модели [20] в пакете Simulink программы MATLAB.

На рис. 5 приведена модель 12-пульсного управляемого тиристорного выпрямителя с КП, имеющим размагничивающую обмотку. На рис. 6 дана модель того же выпрямителя, но с КП, снабженным бифилярной намоткой. Обе модели обеспечивают управление УВ в ручном или автоматическом режиме. При ручном управлении с помощью блока Control можно задавать любой угол управления (угол отпираания тиристорov) от 0 до 90° . В режиме автоматического управления УВ с помощью блока Constant_Id задается желаемый ток нагрузки в пределах от 0 до 56 А. Переключение с ручного на автоматический режим производится блоком переключателя Manual Switch.

Каждая модель состоит из источника трехфазного переменного тока промышленной частоты с заземленной нейтралью Three-Phase Programmable Voltage Source и двух трансформаторов 3-Phase Transformer 1, 3-Phase Transformer 2, один из которых включен по схеме Y/Y, второй – по схеме Δ/Y с равными фазными напряжениями на вторичных обмотках. Выпрямитель представляет собой две последовательно включенные трехфазные мостовые схемы Ларионова (блоки Universal Bridge 1, Universal Bridge 2). Нагрузка, шунтированная обратным диодом VD1, выполнена в виде подсистемы Elm по схеме, показанной на рис. 1. Блоки Three-Phase V-I Measurement, Pulse Generator (Thyristor, 12-Pulse), PLL (3ph) и Control составляют систему управления УВ. Пропорционально-интегральный регулятор PID(s) осуществляет автоматическое регулирование тока нагрузки. Блок задатчика тока Constant_Id определяет требуемый ток. Его сигнал вычитается блоком Sum из сигнала с датчика тока Id и подается на блок PID(s), замыкая тем самым обратную связь. Вольтметры и амперметры Vmd, Imd с соответствующими дисплеями Ud, Id, осциллографы Scope Ud, Scope Id позволяют осуществлять измерения переменных в модели. Блок Spectrum Analyzer – основной прибор для оценки качества работы КП, измеряет спектральный состав выходного напряжения. Компенсатор пульсаций в моделях представлен блоком ComTrans. В модели на рис. 5 конденсатор C1 большой емкости (в данной модели 10 000 мкФ) обеспечивает выделение

высших гармоник из выходного напряжения выпрямителя на компенсирующей обмотке. Трансформатор КП выполнен с дополнительной обмоткой размагничивания, ток в которой регулируется управляемым генератором тока CCS с дросселем DRz.

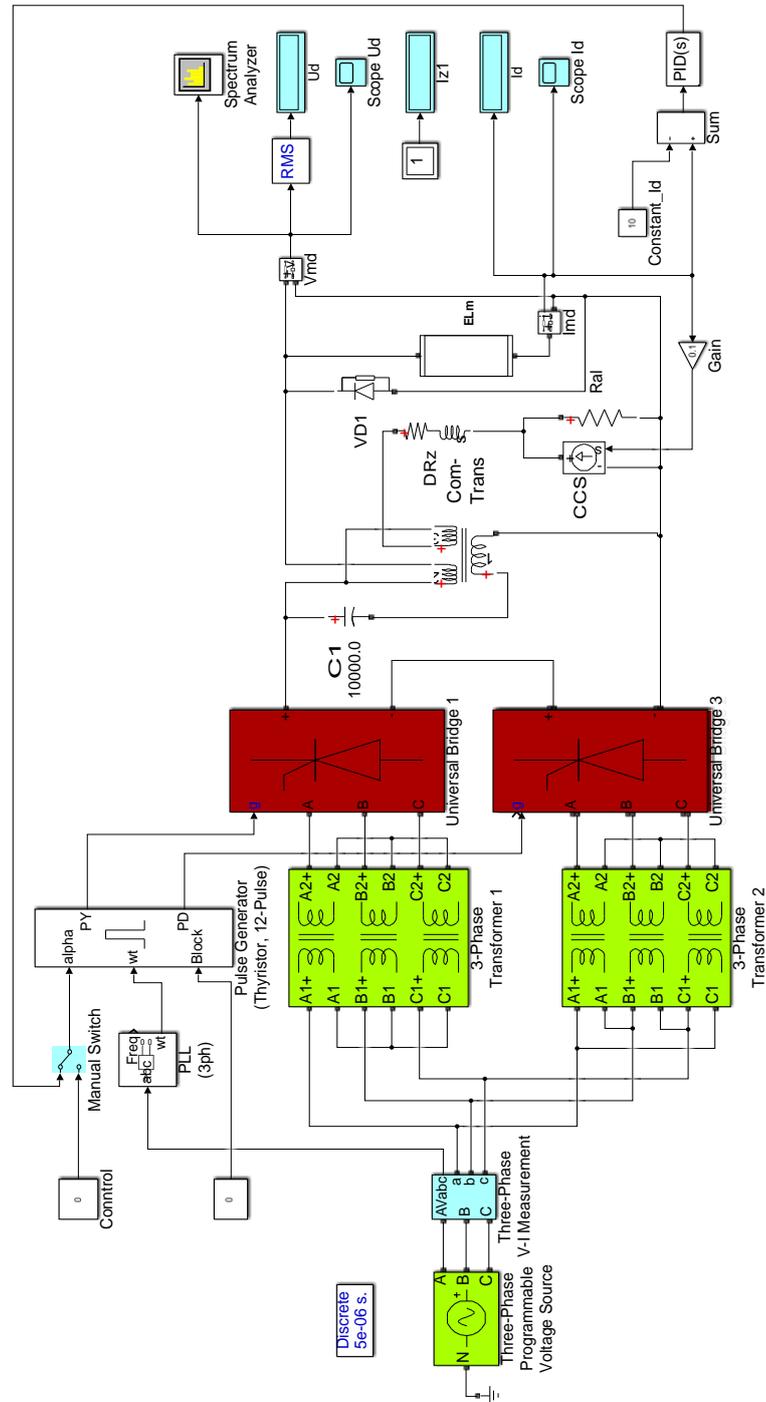


Рис. 5. Имитационная модель управляемого выпрямителя с компенсатором пульсаций с обмоткой размагничивания

Fig. 5. Simulation model of a controlled rectifier with a demagnetization winding ripple compensator

Усилитель обратной связи Gain обеспечивает требуемую точность поддержания тока размагничивания. Мультиметр с дисплеем Iz1 позволяет контролировать ток размагничивания. В модели на рис. 6 трансформатор КП имеет бифилярную обмотку, одна половина которой закорочена конденсатором C2.

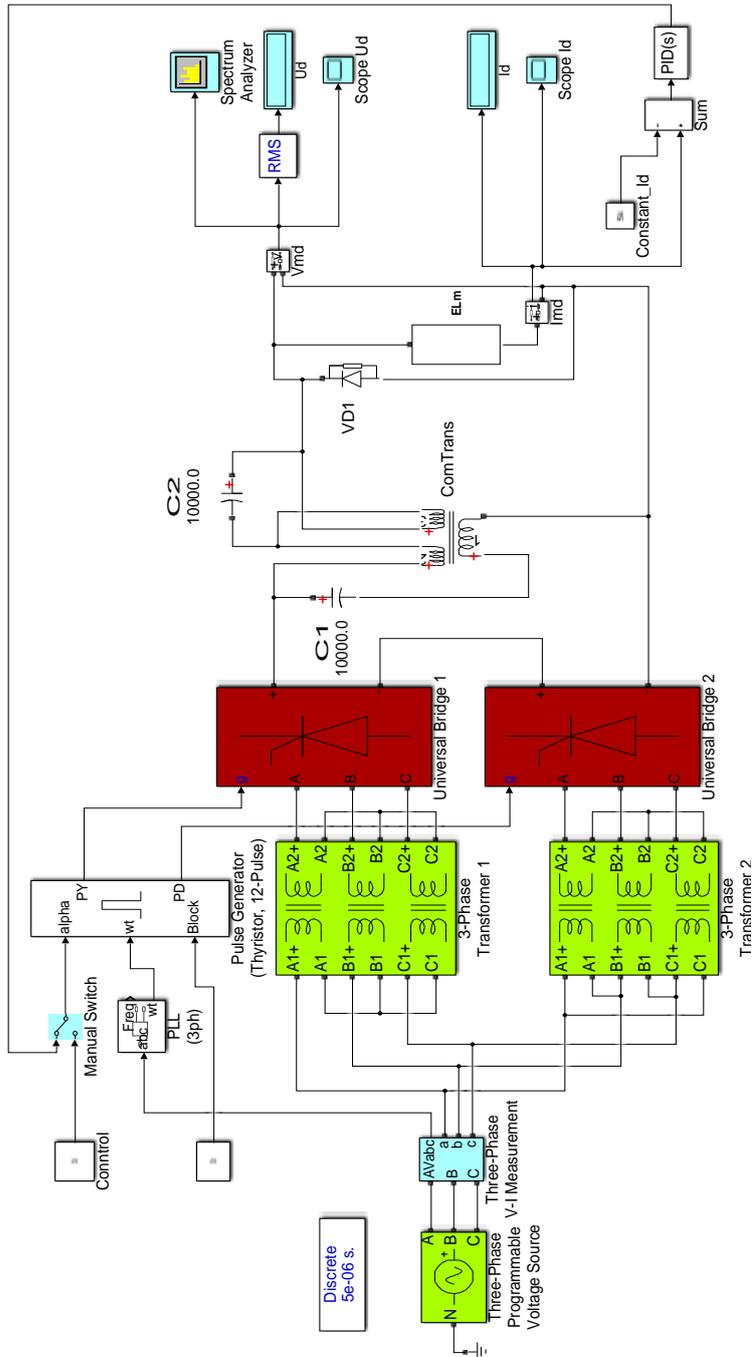


Рис. 6. Имитационная модель управляемого выпрямителя с конденсатором пульсаций с бифилярной обмоткой

Fig. 6. Simulation model of a controlled rectifier with a bifilar winding

Методика и результаты исследования

Для каждой модели в ручном режиме управления задавался угол отпирания тиристоров во всем рабочем диапазоне с шагом 15° . При этом с помощью анализатора спектра (Spectrum Analyzer) определялись постоянная составляющая (нулевая гармоника) и величины действующих значений первых восьми гармоник выходного напряжения. В качестве примера на рис. 7а приведено окно анализатора спектра для угла регулирования 30° модели УВ с КП первого варианта исполнения. На рис. 7б дан график изменения действующих значений первых пяти гармоник в функции от угла регулирования для данного варианта КП. Для второго варианта КП аналогичная зависимость приведена на рис. 7с.

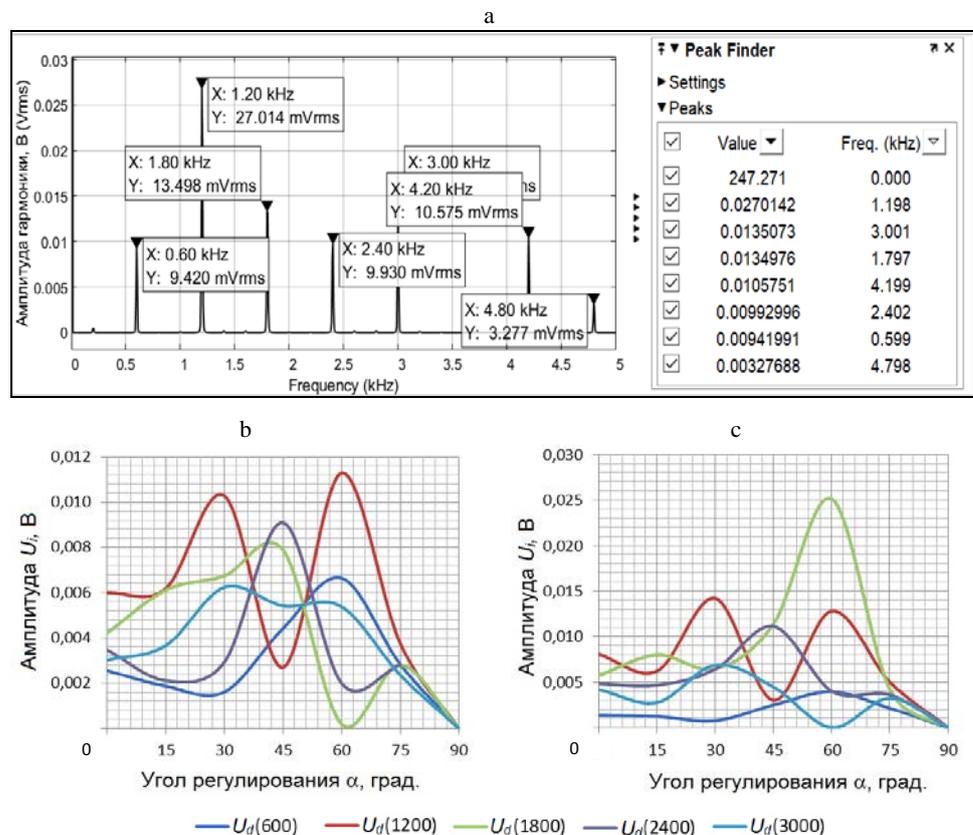


Рис. 7. Результаты моделирования: спектрограмма выходного напряжения для компенсатора пульсаций с обмоткой размагничивания (а) и действующие значения гармоник выходного напряжения для компенсатора пульсаций с обмоткой размагничивания (б) и бифилярной обмоткой (с)

Fig. 7. Simulation results: output voltage spectrogram for ripple compensator with demagnetization winding (a) and the effective values of the harmonics of the output voltage for the ripple compensator with a winding demagnetization (b) and with bifilar winding (c)

Дальнейший анализ спектров выходных напряжений моделей позволил определить коэффициенты подавления пульсаций КП разных конструкций во всем актуальном диапазоне гармоник. На рис. 8 представлены результа-

ты для первой гармоники выходного напряжения (600 Гц), где $K_{\text{пр}1}$, $K_{\text{пр}2}$ – коэффициенты подавления гармоник для первого и второго вариантов КП. Определение коэффициента подавления проводилось по (1).

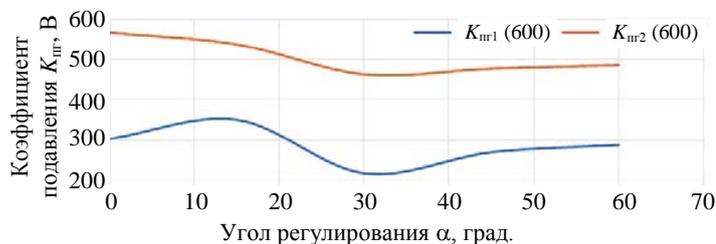


Рис. 8. Коэффициенты подавления пульсаций первой гармоники на выходе управляемого выпрямителя

Fig. 8. Coefficients of suppression of ripple of the first harmonic at the output of the controlled rectifier

Безусловно, качество работы КП полностью определяется исполнением компенсирующего трансформатора и в каждом конкретном случае будет несколько отличаться, но, как это видно из проведенного моделирования и расчетов, остается достаточно высоким.

Затем в автоматическом режиме производились испытания на время установления заданного тока при наличии в цепи КП и времени реакции УВ на его включение. Эффект от включения КП показан на рис. 9.

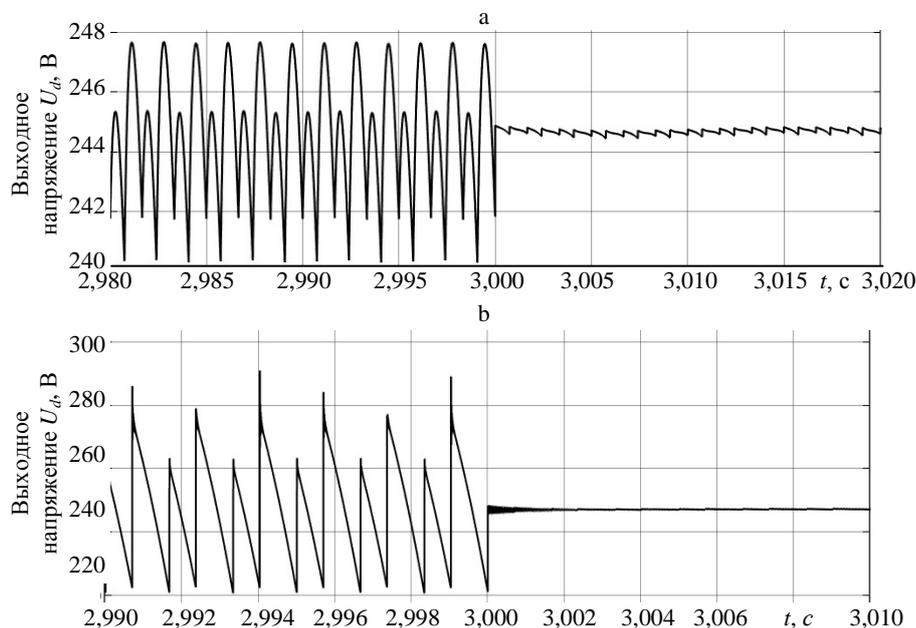


Рис. 9. Выходное напряжение выпрямителя в момент включения компенсатора пульсаций (time = 3 s): а – трансформатор компенсатора пульсаций с обмоткой размагничивания; б – с бифилярной обмоткой

Fig. 9. Rectifier output voltage at the moment of switching on the rectifier (time = 3 s): а – ripple compensator transformer with demagnetizing winding; б – ripple compensator transformer with bifilar winding

ВЫВОДЫ

1. Пассивные компенсаторы пульсаций являются эффективным средством снижения пульсаций выходного напряжения управляемых выпрямителей. Они способны значительно снизить их величину при относительно несложной схеме и невысоких экономических затратах.

2. Динамические характеристики компенсатора пульсаций позволяют применять их в системах автоматического поддержания заданного тока. Время установления заданного тока в системе при наличии компенсатора пульсаций увеличивается не более чем на 1–3 %. Точность и стабильность работы таких систем остаются постоянными.

3. Применение компенсатора пульсаций сдерживается лишь высокими требованиями к материалу магнитопровода компенсирующего трансформатора, который должен иметь значительную и постоянную магнитную проницаемость в широком диапазоне рабочих значений индукции и малые потери на частотах высших гармоник до нескольких килогерц включительно. Современные магнитные материалы позволяют успешно изготавливать такие трансформаторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Medvedko, A. Review of the Power Supplies for Electromagnetic Systems of the Storage Rings and Accelerators / A. Medvedko // The 17th International Conference on High Energy Accelerators (HEACC'98), 07.09–12.09, Dubna. 1998. 13 p. (Scientific Programme of HEACC'98).
2. Синтез алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции в девятифазном активном выпрямителе напряжения / С. В. Пантелеев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 334–345. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-334-345>.
3. Кривцов, А. Н. Мощные стабилизаторы тока / А. Н. Кривцов, М. С. Лурье, В. П. Николаев. Л.: ЛДНТП, 1976. 24 с.
4. Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits / S. R. Sanders [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 1991. Vol. 6, Iss. 2. P. 251–259. <https://doi.org/10.1109/63.76811>
5. Климов, В. П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания / В. П. Климов, А. Д. Москалев // Практическая силовая электроника. 2002. Вып 5. С. 26–32.
6. Игольников, Ю. С. 24-фазный выпрямитель / Ю. С. Игольников // Электротехника. 2004. № 10. С. 51–54.
7. Электромагнитная совместимость. «Умный город». Общие положения: ГОСТ 34594.1–2019. Введ. 01.06.20. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
8. Лурье, М. С. Снижение пульсаций мощных выпрямителей для питания магнитных систем / М. С. Лурье, А. С. Фролов, О. М. Лурье // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 141–145.
9. Степанов, А. А. Двадцатичетырехпульсный выпрямитель в системе распределенного электроснабжения постоянного тока с улучшенной электромагнитной совместимостью / А. А. Степанов, Н. И. Щуров // Наука, технологии, инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых: в 7 ч. Новосибирск: НГТУ, 2012. Ч. 5. С. 380–383.

10. Источник постоянного напряжения с шестнадцатикратной частотой пульсации / Г. Н. Ворфоломеев [и др.] // Электротехника. 2003. № 9. С. 34–38.
11. Яворский, В. Н. Расчет силовых сглаживающих фильтров, предназначенных для тиристорных управляемых выпрямителей / В. Н. Яворский, О. В. Титов // Электричество. 1969. № 9. С. 41–45.
12. Wiseman, J. C. Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction / J. C. Wiseman, B. Wu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52, Iss. 3. P. 758–764. <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.843939>.
13. Hazem, Z. Lowpass Broadband Harmonic Filter Design / Z. Hazem. Department of Electrical and Electronics Engineering, 2005. 192 p.
14. Активный фильтр гармоник [Электронный ресурс] // Матик-электро. Режим доступа: <http://www.matic.ru/harmonic-filters/active-harmonic-filters/>. Дата доступа: 17.12.2020.
15. Климов, В. П. Способы подавления гармоник в системах электропитания / В. П. Климов, А. Д. Москалева // Практическая силовая электроника. 2003. № 6. С. 24–31.
16. Лурье, М. С. Активные компенсаторы пульсаций для мощных выпрямителей / М. С. Лурье, О. М. Лурье, Ю. С. Баранов // Вестник КрасГАУ. 2010. № 6. С. 149–154.
17. New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and Output of Rectifier with Interphase Transformer / S. Miyairi [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. Vol. IA-22, Iss. 5. P. 790–797. <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504795>.
18. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. М.: Энергия, 1981. 392 с.
19. Стародубцев, Ю. Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2002. 386 с.
20. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>.

Поступила 04.02.2021 Подписана в печать 28.05.2021 Опубликована онлайн 29.07.2022

REFERENCES

1. Medvedko A. (1998) Review of the Power Supplies for Electromagnetic Systems of the Storage Rings and Accelerators. *The 17th International Conference on High Energy Accelerators (HEACC'98) 07.09–12.09, Dubna*. 1998. 13.
2. Panteleev S. V., Malashin A. N., Karkotskiy D. V., Suchodolov Yu. V. (2018) Synthesis of the Algorithm of the Vector Width-Pulse Modulation in a Nine-Phase Active Voltage Rectifier. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 334–345. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-334-345> (in Russian).
3. Krivtsov A. N., Lur'e M. S., Nikolaev V. P. (1976) *Powerful Current Stabilizers*. Leningrad, LHSTP. 24 (in Russian).
4. Sanders S. R., Noworolski J. M., Liu X. Z., Verghese G. C. (1991) Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6 (2), 251–259. <https://doi.org/10.1109/63.76811>.
5. Klimov V. P., Moskalev A. D. (2002) Problems of Higher Harmonics in Modern Power Supply Systems. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika [Practical Power Electronics]*, (5), 26–32 (in Russian).
6. Igol'nikov J. S. (2004) 24-Phase Rectifier. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, (10), 51–54 (in Russian).
7. State Standard 34594.1–2019. *Electromagnetic Compatibility. "Smart City": General Provisions*. Moscow, Standartinform Publ. 2019. 19 (in Russian).

8. Lurie M. S., Frolov A. S., Lurie O. M. (2015) Power Rectifiers Pulsations Reduction for Magnetic Systems Power Supply. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Radiotekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Ryazan State Radioengineering University*, (51), 141–145 (in Russian).
9. Stepanov A. A., Shchurov N. I. (2012) Twenty-Four Pulse Rectifier in a Distributed DC Power Supply System with Improved Electromagnetic Compatibility. *Nauka, Tekhnologii, Innovatsii: Materialy Vseros. Nauch. Konf. Molodykh Uchenykh. Ch. 5* [Science, Technology, Innovations. Materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists. Part 5]. Novosibirsk, NSTU. 380–383 (in Russian).
10. Vorfolomeev G. N., Shchurov N. I., Myatezh S. V., Evdokimov S. A. (2003) A Constant Voltage Source with a Sixteen-Fold Ripple Frequency. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], (9), 34–38 (in Russian).
11. Yavorskii V. N., Titov O. V. (1969) Calculation of Power Smoothing Filters Designed for Thyristor Controlled Rectifiers. *Elektrichestvo = Electricity*, (9), 41–45 (in Russian).
12. Wiseman J. C., Wu B. (2005) Active Damping Control of a High-Power PWM Current-Source Rectifier for Line-Current THD Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52 (3), 758–764. <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.843939>.
13. Hazem Z. (2005) *Lowpass Broadband Harmonic Filter Design*. Department of Electrical and Electronics Engineering. 192.
14. Active Harmonic Filter. *Matic-Electro*. Available at: <http://www.matic.ru/harmonic-filters/active-harmonic-filters/> (Accessed 17 December 2020) (in Russian).
15. Klimov V. P., Moskalev A. D. (2003) Methods of Harmonic Suppression in Power Supply Systems. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika* [Practical Power Electronics], (6), 24–31 (in Russian).
16. Lurye M. S., Lurye O. M., Baranov Yu. S. (2010) Active Compensators of Rippling for the Powerful Rectifier. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KrasGAU*, (6), 149–154 (in Russian).
17. Miyairi S., Iida S., Nakata K., Masukawa S. (1986) New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and Output of Rectifier with Interphase Transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22 (5), 790–797. <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504795>.
18. Leites L.V. (1981) *Electromagnetic Calculations of Transformers and Reactors*. Moscow, Energiya Publ. 392 (in Russian).
19. Starodubtsev Yu. N., Belozеров V. Ya. (2002) *Magnetic Properties of Amorphous and Nanocrystalline Alloys*. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University. 386 (in Russian).
20. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2018) Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 483–493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493> (in Russian).

Received: 4 February 2021

Accepted: 28 May 2021

Published online: 29 July 2022