

УДК 621.3
ББК 31.261.2

Р.Н. ГАНИЕВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕТЕВОГО ВХОДА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Ключевые слова: коэффициент мощности, обратимые преобразователи частоты, активный выпрямитель, пассивные составляющие мощности, управляемые ключи.

Полная мощность, потребляемая электрическими нагрузками из сети, складывается из двух составляющих – активной и реактивной. Большинство электроприводов современных промышленных предприятий работают с показателем реактивной мощности $0,7-0,8$. Это приводит к повышенному потреблению полной мощности, что увеличивает нагрузку на питающую сеть. Современные электрические приводы построены по принципу: питающая сеть – выпрямитель – звено постоянного тока-инвертор – асинхронный двигатель. Потребление полной мощности идет на стыке «сеть – выпрямитель», где может быть сформирован требуемый коэффициент активной мощности преобразовательного устройства. Чем выше коэффициент активной мощности, тем ниже реактивная составляющая в составе полной потребляемой энергии. В статье предлагается решение проблемы создания высокоэффективных преобразовательных устройств для питания электродвигателей с формированием необходимого коэффициента мощности. Поскольку частотно-регулируемые электроприводы современных механизмов на промышленных предприятиях являются основными потребителями электроэнергии, которые оказывают значительное влияние на состояние питающей сети, в статье рассматривается возможность повышения коэффициента мощности сетевого входа электроприводов с двухзвенными преобразователями частоты на основе активных (управляемых) выпрямителей с инверторами тока и инверторами напряжения. Предлагаются новые способы управления активными выпрямителями, основанные на применении устройств выпрямления переменного тока на полностью управляемых тиристорах GTO, GCT, а также на IGBT транзисторах с широтно-импульсным регулированием. Представлены варианты построения указанных выпрямителей и результаты моделирования предлагаемых способов управления, подтверждающие уменьшение пассивных составляющих сетевого тока и, как следствие, повышение коэффициента мощности сетевого входа. Результаты моделирования выполнены в программе MATLAB 10 и являются основанием для подтверждения способа увеличения коэффициента активной мощности на сетевом входе управляемого преобразователя частоты с двухзвенной структурой.

До 70% всей потребляемой мощности приходится на электрические приводы технологических установок. Большинство электроприводов питаются энергией переменного тока, а их электродвигатели, являясь активно-индуктивными нагрузками сети, потребляют значительную реактивную мощность, увеличивая полное электропотребление сети и снижая общий коэффициент мощности. В [2] предлагается решение данной проблемы за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств и установки статических батарей конденсаторов. Данные способы ведут к увеличению стоимости электроустановок и требуют разработки дополнительных конструкций и технических решений по их внедрению в производственные механизмы. В этой связи в данной статье предлагается

разработка преобразовательных устройств, способных формировать требуемый коэффициент мощности на этапе выпрямления сетевого тока в прямой ток питания инвертора, как показано в [3].

Вышеуказанные обстоятельства послужило причиной для разработки нового энергетического объекта активного выпрямителя (АВ). Название АВ отражает способность данного устройства активно влиять на энергетический баланс преобразователя с питающей сетью [5, 6].

Целью исследования является разработка АВ с возможностью обеспечения совместной работы преобразователя частоты на уровне электромагнитной совместимости, предполагающей полное устранение в составе мощности сетевого входа пассивных составляющих с учетом поднятия коэффициента мощности преобразователя и компенсации реактивной мощности входа.

В условиях синусоидальности сетевого напряжения в качестве пассивных составляющих полной мощности можно принять реактивную мощность первой гармоники, а также суммарную мощность искажений от более высоких гармонических составляющих тока. Таким образом, получаем минимальное значение токопотребления, поскольку в балансе мощности входной цепи, полностью формируемого преобразователем, останется только активная мощность основной гармоники.

Применение активного выпрямителя на полностью управляемых ключах позволяет контролировать процесс обмена энергии с сетью. Индикатором потребления либо генерации энергии в сеть служит знак активной мощности – положительный при потреблении и отрицательный при генерации. Кроме того, свойства ключей и предлагаемый способ работы активного выпрямителя позволяют формировать требуемый коэффициент мощности на входе устройства и компенсировать пассивные составляющие в составе потребляемого тока.

Исследование многодвигательного электропривода кордной линии, в составе которого имеются обратимые преобразователи частоты, подразумевает использование активных (управляемых) выпрямителей в качестве первого звена управления (рис. 1) [1, 6]. Было показано, что изменение энергетического режима АВ на одном из приводов не оказывает какого-либо влияния на величины тока и скорости другого привода, но может оказывать влияние на коэффициент мощности на сетевом входе и влиять на величину потребления тока, увеличивая или уменьшая ее.

Законы управления ключами активного выпрямителя АВ позволяют задавать энергетический режим благодаря частотным свойствам управляемых ключей. Поэтому рассматриваемые ниже варианты разработки активного выпрямителя предполагают работу на частоте, близкой к основной частоте, которая определяется числом пульсаций выпрямителя $\omega_n = m_1 \omega_1$. Поэтому в рассматриваемом случае предлагаемые способы управления ключами могут применяться в случае использования тиристорных типа *GTO*, *GCT*, *IGCT*, поскольку они в отличие от транзисторных ключей имеют меньшую полосу пропускания частот [4].

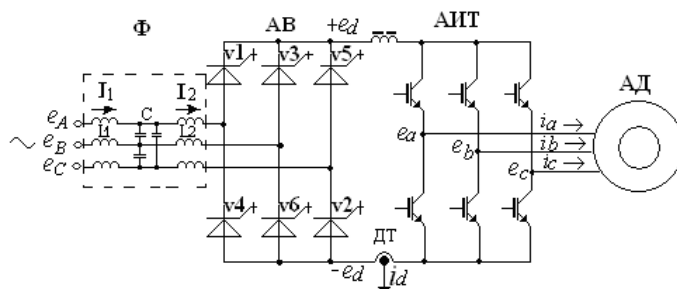


Рис. 1. АВ на двухоперационных тиристорах
в составе двухзвенного преобразователя частоты
с автономным инвертором тока

Известны недостатки традиционного способа импульсно-фазового регулирования тиристоров на основной частоте. К их числу относится невозможность средствами управления влиять на соотношение токов входных и выходных цепей АВ. Причиной служит минимальное число управляющих координат (степеней свободы) в виде единственного параметра – угла включения тиристоров α , что обуславливает жёсткую привязку потребляемого сетевого тока I_1 к величине выпрямленного тока нагрузки I_d . Новый способ переключения предполагает изменение как углов включения тиристоров (α_1), так и углов отключения (α_2). Благодаря этому получается независимое управление потоками активной и реактивной мощности во входной цепи преобразователя. Результатом может стать работа регулируемого электропривода при минимальном сетевом токе в установившихся режимах или ограничение бросков этого тока в переходных режимах работы вентильного электропривода.

Обобщённым энергетическим показателем, учитывающим влияние амплитудных и фазовых искажений потребляемого тока, служит коэффициент мощности K_M , выражение которого при синусоидальной форме сетевого напряжения имеет вид

$$K_M = P_1 / S = \frac{I_{11}}{I_1} \cos \varphi_1, \quad (1)$$

где I_{11} , φ_1 – действующее значение и фазовый сдвиг основной гармоники первичного (сетевого) тока выпрямителя.

Из выражения (1) следует, что повышения K_M в схемах АВ можно достичь лишь за счёт исключения из энергетического баланса пассивных, т.е. производительных составляющих полной мощности S . Наиболее важный результат повышения K_M заключается в уменьшении действующего значения потребляемого тока I_1 на сетевом входе преобразователя. Однако в случае работы АВ на двигательную нагрузку выявление удельно-минимального значения сетевого тока с помощью выражения (1) оказывается затруднительным, так как величины токов I_{11} , I_1 являются вторичной функцией тока I_d , т.е. тока нагрузки. Указанный прямой ток нагрузки является моментобразующим и может определять минимум потребляемого тока.

Если прямой ток нагрузки привести к условиям сетевого входа электропривода, то он вполне может быть использован как критерий минимального потребления в сравнительном анализе переключательных алгоритмов АВ. Однако при анализе наиболее удобным критерием энергоэффективности алгоритма будет коэффициент использования тока $K_i = I_1 / I_d$, т.е. отношение действующего значения тока сети к среднему прямому току нагрузки. Установить связь данного показателя с коэффициентом мощности позволяет равенство активных мощностей сетевого входа и нагрузки выпрямителя на идеальных ключах:

$$3E_\phi I_{11} \cos \varphi_1 = E_d(\alpha) I_d, \quad (2)$$

$$K_i = E_d(\alpha) / 3E_\phi K_M(\alpha), \quad (3)$$

где E_ϕ – фазная ЭДС источника питания (сети); $E_d(\alpha)$ – ЭДС выпрямителя.

При обычном способе работы СИФУ [4] регулирование угла открытия тиристоров $\alpha = 0 \div \pi/2$ приводит к регулированию зависимостей $E_d(\alpha)$ и $K_M(\alpha)$, что, в свою очередь, влияет на постоянство $K_i = \text{const}$ в выпрямителе на тиристорах.

Так, в трёхфазной мостовой схеме выпрямителя постоянство K_i свидетельствует о том, что получаемое при $\alpha \rightarrow \pi/2$ снижение ЭДС выпрямителя и мощности нагрузки происходит при постоянном составе входного тока на вводах выпрямителя. Причина этого свойства фазового регулирования при изменении угла открытия ключей $\alpha = \text{var}$ и постоянном выпрямленном токе $I_d = \text{const}$ вытекает из изменений активной и реактивной компонент тока, которые направлены противоположно.

Иными словами, уменьшение активной составляющей тока сетевого входа восполняется увеличением его реактивной составляющей. Очевидно, что при этом становится невозможным обеспечение высокого K_i в условиях традиционного регулирования тиристорных выпрямителей. Как уже отмечалось, применение запираемых вентилей позволяет прибегнуть к иным способам, приводящим к желаемому уменьшению токовой загрузки сети по мере уменьшения выпрямленного напряжения.

На рис. 2 и 3 приведены графики тока сети и тока выпрямителя с ЭДС, которые позволяют сравнить потребление тока в момент запуска машины для обычного и разработанного алгоритмов работы ключей АВ.

Суть нового разработанного алгоритма заключается в периодическом подключении цепи нагрузки к источнику питания (сети) с частотой основной гармоники и дальнейшем параллельном подключении диодов АВ, находящихся в противофазе. Для точности сравнения эксперимент проводился при одних и тех же значениях пускового тока якоря $i_d(t)$ и постоянной частоте вращения ротора $\omega(t)$.

В отличие от тиристоров *GTO* транзисторные ключи типа *IGBT* и *MOSFET* обладают большим быстродействием и потому способны работать на более высокой несущей частоте переключений. Покажем, что благодаря этому свойству выполнение АВ на транзисторных ключах (например, по схеме рис. 4) позволяет получить желаемую форму входных и выходных токов АВ модуляционным методом.

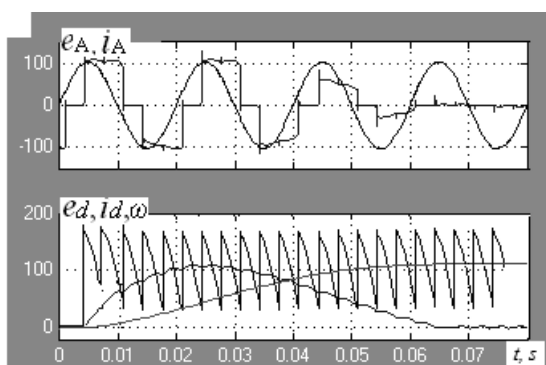


Рис. 2. Диаграммы сетевого e_A , i_A и выпрямленного e_d , i_d напряжения и тока, а также скорости вала двигателя $\omega(t)$ на выходе АВ в пусковом режиме при традиционном способе управления ключами

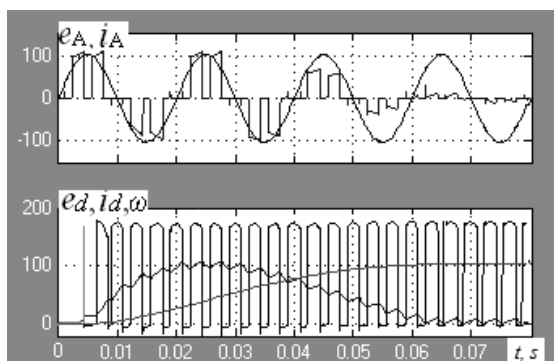


Рис. 3. Диаграммы сетевого e_A , i_A и выпрямленного e_d , i_d напряжения и тока, а также скорости вала двигателя $\omega(t)$ на выходе АВ в пусковом режиме при модифицированном способе управления

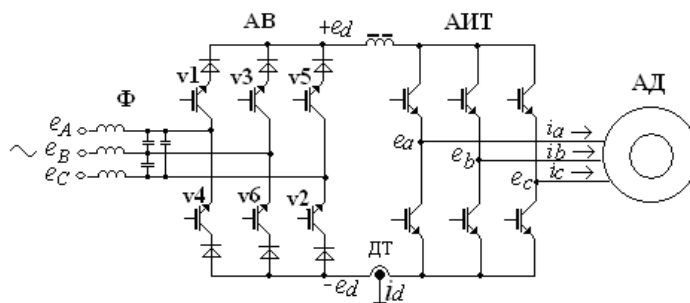


Рис. 4. АВ на IGBT-транзисторах с защитными диодами в составе двухуровневого частотного преобразователя с АИТ

Напряжение $e_d(t)$ на выходе выпрямителя формируется в результате периодического подключения входных цепей активного выпрямителя к линиям сети с напряжением двух уровней: 0,86–1,0 номинальной величины напряжение – высокий уровень и 0,5–0,86 – средний уровень. В результате получается

диапазон регулирования, который ограничен указанными пределами и является достаточным для стабилизации тока на выходе активного выпрямителя. Регулирование же частоты и выходного напряжения для питания электродвигателя, как правило, выполняет автономный инвертор.

Взаимосвязь напряжений входа и выхода в приведенной схеме выпрямления можно показать матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} +e_d \\ -e_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_A & s_B & s_C \\ s_{-A} & s_{-B} & s_{-C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в котором в качестве коэффициентов уравнения выступают управляющие сигналы транзисторов выпрямителя s_A, s_{-A}, s_B, \dots

Переключения транзисторных ключей с помощью этих импульсов приводят к гладкой квазисинусоиде сетевого тока, а также тока на выходе выпрямителя. Результаты моделирования АВ в транзисторных ключах *IGBT* при предложенном способе управления представлены на рис. 5, графики которого указывают на решение задачи электромагнитной совместимости с использованием ВЧ ШИР (высокочастотного широтно-импульсного регулирования).

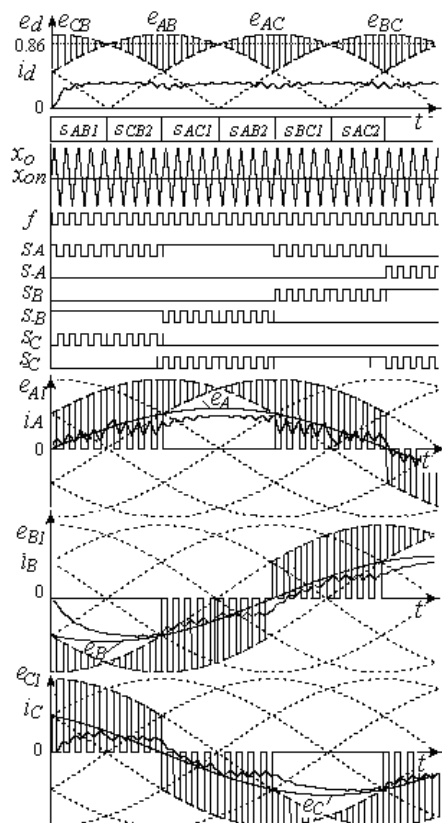


Рис. 5. Процессы управления транзисторными ключами в схеме АВ

Предлагаемый метод основан на сравнении формирования управляющих импульсов f при управляющем $x(t)$ и опорном $x_{оп}(t)$ сигналах и дальнейшем их распределении по цепям управления транзисторов согласно уравнению связи:

$$\begin{bmatrix} s_A \\ s_{-A} \\ s_B \\ s_{-B} \\ s_C \\ s_{-C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s_{CB2} + s_{BC1}) & (s_{AB1} + s_{AC2}) & (s_{AC1} + s_{AB2}) \\ (s_{BC2} + s_{CB1}) & (s_{BA1} + s_{CA2}) & (s_{CA1} + s_{BA2}) \\ (s_{AC2} + s_{CA1}) & (s_{BC1} + s_{BA2}) & (s_{BA1} + s_{BC2}) \\ (s_{AC1} + s_{CA2}) & (s_{AB2} + s_{CB1}) & (s_{AB1} + s_{CB2}) \\ (s_{AB1} + s_{BA2}) & (s_{CB2} + s_{CA1}) & (s_{CB1} + s_{CA2}) \\ (s_{AB2} + s_{BA1}) & (s_{AC1} + s_{BC2}) & (s_{BC1} + s_{AC2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f \\ f \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $s_{AB1}, s_{CB2}, \dots, s_{AC2}$ – синхронизирующие импульсы, делящие полупериод сетевого напряжения на шесть равных интервалов.

В приведенном логическом уравнении сигналы управления $s_{AB1}, s_{CB2}, \dots, s_{AC2}$ разделяют на шесть равных интервалов напряжения входа АВ. Таким образом, решение позволяет растянуть проводящее состояние ключей выпрямителя в течение периода сетевого напряжения. В результате получаем в пределе интервал $\lambda = \pi$, а не $\lambda = 2\pi/3$ при традиционном управлении, что способствует устранению в мостовой схеме выпрямителя нулевых пауз ($\pi/3$).

Анализ диаграмм показал, что периодические шунтирования нагрузки для АВ на *GTO*-тиристорах, показанных на рис. 3, удаляют реактивную компоненту в сетевом токе, что отражается в виде уменьшения ампер-секундных площадей под кривой тока $i_A(t)$. Величина площадок, сформированных током $i_A(t)$, характеризует действующее значение тока. Визуальная оценка кривых указывает на уменьшение действующего значения потребляемого тока I_1 при предлагаемом алгоритме управления АВ примерно на 35–45%.

Благодаря применению транзисторов *IGBT* выходные напряжения формируются действием сразу двух типов модуляций. Со стороны сетевого входа действует амплитудная модуляция, а со стороны выходных цепей выпрямителя – широтно-импульсной модуляция (рис. 5). Благодаря амплитудной модуляции напряжения фаз сети $e_A(t), e_B(t), e_C(t)$ совпадают по форме и по времени с основной гармоникой выходного напряжения. Формы фазных токов $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ также могут совпадать с напряжениями сети, являясь следствием влияния активно-индуктивной цепи на указанные напряжения. При этом подтверждается их совпадение при увеличении частоты коммутации транзисторов.

Оба представленных способа ведут к повышению K_M , что подтверждается уменьшением полного тока I_1 , за счет устранения реактивных составляющих тока.

Литература

1. Бизиков В.А. Системы управления тиристорными преобразователями частоты. М.: Энергоиздат, 1981. 144 с.
2. Борисовский А.П., Литвинов В.В. Современные средства компенсации реактивной мощности // Молодой ученый. 2019. № 26(264). С. 61–63.
3. Ганиев Р.Н., Шатунов С.Н. Система управления многодвигательными электроприводами производственных поточных линий: пат. РФ № 199635(52) СПКН02Р5/74(2019.08);

H02M7/493(2019.08) / заявитель патентообладатель С.Н. Шатунов. № 2019119197; заявл. 18.06.2019, опубл. 11.09.2020. Бюл. № 26.

4. Сидоров С.Н. Способ управления мощностью на сетевом входе трёхфазного вентиляционного преобразователя: пат. РФ № 2167484. H02M7/12, H02M7/155 / заявитель патентообладатель Ульяновский гос. техн. ун-т, № 99125760/09 заявл. 03.12.1999; опубл. 20.05.2001. Бюл. № 14..

5. Ganiev R. Cordline multi-motor electric drive with energy recovery. *E3S Web of Conf. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED 2020)*, 2020, vol. 178, article № 01023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801023>.

6. Ganiev R. Two-way conductivity converters in the technology of tire cord rubberization/ *E3S Web of Conferences, 220, Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives, SES-2020*; St. Petersburg; Russian Federation; October 29-30; article № 01069. DOI: <https://doi.org/10.1051/-e3sconf/-202022001069>.

ГАНИЕВ РИШАТ НАИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятия, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, Нижнекамск (n7007@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-3149>).

Rishat N. GANIEV

**INCREASING THE ENERGY PARAMETERS
OF THE MAINS SUPPLY BY ACTIVE RECTIFIERS
IN THE COMPOSITION OF FREQUENCY CONVERTERS**

Key words: *power factor, reversible frequency converters, active rectifier, passive power components, controlled switches.*

The total power consumed by electrical loads from the electric mains consists of their two components – active and reactive. Most electric drives of modern industrial enterprises operate with a reactive power index of 0.7–0.8. This leads to increased consumption of full power, which increases the load on the mains supply. Modern electric drives are built according to the principle: power supply – rectifier – DC link-inverter – asynchronous motor. Full power consumption occurs at the junction of the "power supply-rectifier", where the required active power factor of the converter device can be formed. The higher the active power factor, the lower the reactive component in the total energy consumed. Thus, the article proposes a solution to the problem of creating highly efficient converter devices for powering electric motors with the formation of the necessary power factor, since frequency-controlled electric drives of modern mechanisms in industrial enterprises are the main consumers of electricity, which have a significant impact on the state of the supply network. The article considers the possibility of increasing the power factor of the mains input of electric drives with two-link frequency converters based on active (controlled) rectifiers with current inverters and voltage inverters. New methods of control of active rectifiers based on the use of AC rectifiers on fully controlled thyristors GTO, GCT, as well as IGBT transistors with pulse width adjustment are proposed. The variants of the construction of these rectifiers and the results of modeling the proposed control methods are presented, confirming a decrease in the passive components of the mains current, and as a consequence, an increase in the power factor of the network input. The simulation results are performed in the MATLAB 10 program, and are the basis for confirming the method of increasing the active power factor at the network input of a controlled frequency converter with a two-link structure.

References

1. Borisovskii A.P., Litvinov V.V. *Sovremennye sredstva kompensatsii reaktivnoi moshchnosti* [Modern means of reactive power compensation]. *Molodoi uchenyi*, 2019, no. 26(264), pp. 61–63.

2. Ganiev R.N., Shatunov S.N. *Sistema upravleniya mnogodvigatel'nyimi elektroprivodami proizvodstvennykh potochnykh linii* [Control system for multi-motor electric drives of production lines: patent of the Russian Federation]. Patent RF, no. 199635(52), 2020.

3. Ganiev R. Cordline multi-motor electric drive with energy recovery. *E3S Web of Conf. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED 2020)*, 2020, vol. 178, article № 01023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801023>.

4. Ganiev R. Two-way conductivity converters in the technology of tire cord rubberization/ *E3S Web of Conferences, 220, Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives, SES-2020*; Saint Petersburg; Russian Federation; October 29-30; article № 01069. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001069>.

5. Sidorov S.N. *Sposob upravleniya moshchnost'yu na setevom vkhode trekhfaznogo ventil'nogo preobrazovatelya* [Method of power control at the network input of a three-phase valve converter] pat. RF no 2167484, 2001.

6. Bizikov V.A. *Sistemy upravleniya tiristornymi preobrazovatelyami chastoty* [Control systems of thyristor frequency converters]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 144 p.

RISHAT N. GANIEV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Power Supply of the Enterprise, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (Branch) Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia (n7007@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9764-3149>).

Формат цитирования: *Ганиев Р.Н.* Повышение энергетических показателей сетевого входа электроприводов с помощью активных выпрямителей в составе преобразователей частоты // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 44–52. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-44-52.