

## Повышение качества электроэнергии для потребления в нефтедобывающей отрасли

Ирина Геннадиевна Поспелова<sup>1,2</sup>,  
кандидат технических наук, доцент, e-mail: [pospelovaig@mail.ru](mailto:pospelovaig@mail.ru);

Татьяна Александровна Широбокова<sup>1,2</sup>,

кандидат технических наук, доцент;

Вячеслав Николаевич Кузьмин<sup>1</sup>,

кандидат ветеринарных наук, доцент;

Татьяна Николаевна Стерхова<sup>1</sup>,

кандидат технических наук, доцент;

Владислав Сергеевич Широбоков<sup>1</sup>,

студент

<sup>1</sup>Удмуртский государственный университет, Ижевск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Российская Федерация

**Реферат.** В настоящее время 50-60 процентов электропотребления на нефтяных месторождениях приходится на механизированную добычу нефти. Специфика работы погружного электроцентробежного насоса, работающего от погружного электродвигателя, как потребителей электроэнергии, обусловлена их эксплуатацией на значительном удалении от земной поверхности, переменным характером нагрузки, агрессивностью добываемой жидкости, наличием протяженной кабельной линии. Неопределенность объемов запасов жидкости и необходимость плавного изменения темпов ее отбора привели к появлению систем регулирования частоты вращения центробежного электронасоса от станций управления погружным электродвигателем с преобразователями частоты. Однако преобразователями частоты, особенно при их массовом применении, искажают форму кривой тока и питающего напряжения, создавая в сети высшие (то есть отличные от 50 герц) гармонические составляющие, что резко ухудшает качество напряжения в питающей сети. (Цель исследования) Изучить устройства для повышения качества электроэнергии в нефтедобывающей отрасли. (Материалы и методы) Представили результаты обследования параметров электропотребления Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения ПрЭО «Ямал» сетевой район №1 куст 18 КТП 10/0,4 кВ №1 ввод-2. Указали допустимые и предельно допустимые значения согласно ГОСТ 32144-2013. Произвели замер анализатором качества электроэнергии АКЭ-824. (Результаты и обсуждение) Показали по итогам исследования параметров электроэнергии на Новопортовском нефтегазоконденсатном месторождении, что целесообразно использовать устройства, повышающие качество электроэнергии. Определили, что они могут быть различными как по конструктивному исполнению, так и по сфере применения. (Выводы) Рассмотрели представленные на рынке устройства, повышающие качество электроэнергии, и установки, компенсирующие реактивную мощность. Выявили, что рационально использовать статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности производства Акционерного общества «Электроинтер», г. Серпухов.

**Ключевые слова:** нефтяные месторождения, добыча нефти, гармоники, электропотребление, преобразователи, регулирование частоты, повышение качества, нелинейные нагрузки.

**Для цитирования:** Поспелова И.Г., Широбокова Т.А., Кузьмин В.Н., Стерхова Т.Н., Широбоков В.С. Повышение качества электроэнергии для потребления в нефтедобывающей отрасли // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. №1(42). С. 23-28. DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-1-23-28.

## Improving the Quality of Electricity for Consumption in the Oil Industry

Irina G. Pospelova<sup>1,2</sup>,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: [pospelovaig@mail.ru](mailto:pospelovaig@mail.ru);

Tatiana A. Shirobokova<sup>1,2</sup>,

Ph.D.(Eng.), associate professor;

Vyacheslav N. Kuzmin<sup>1</sup>,  
Ph.D.(Vet.), associate professor;  
Tatiana N. Sterkhova<sup>1</sup>,  
Ph.D.(Eng.), associate professor;  
Vladislav S. Shirobokov<sup>1</sup>,  
student

<sup>1</sup>Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation;

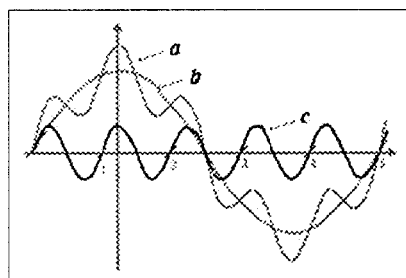
<sup>2</sup>Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russian Federation

**Abstract.** Currently, 50-60 percents of power consumption in oil fields falls on mechanized oil production. The specificity of the operation of a submersible electric centrifugal pump (ESP), powered by a submersible electric motor (SEM) as consumers of electricity, is due to their operation at a considerable distance from the earth's surface, the variable nature of the load, the aggressiveness of the produced fluid, and the presence of an extended cable line. (Research objective) To study devices for improving the quality of electricity in the oil industry. (Materials and methods) The results of the survey of the parameters of power consumption of the Novoportovskoe oil and gas condensate field of the PREO «Yamal» Network district No. 1 Kust 18 KTP 10/0.4 kV No. 1 input-2. (Results and discussion) The results of studies of the parameters of electricity at the Novoportovskoye oil and gas condensate field have shown that it is advisable to use devices that improve the quality of electricity. Devices can be different, both in design and in scope. Such as voltage stabilizers, phase voltage balancing devices, reactive power compensation devices, filter compensating devices, active mains filters. (Conclusions) Having considered the variety of devices on the market that improve the quality of electricity, as well as devices that compensate for reactive power, it is advisable to use static thyristor reactive power compensators manufactured by JSC Electrointer, Serpukhov.

**Keywords:** oil fields, oil production, harmonics, power consumption, converters, frequency control, quality improvement, nonlinear loads.

**For citation:** Pospelova I.G., Shirobokova T.A., Kuzmin V.N., Sterkhova T.N., Shirobokov V.S. Povyshenie kachestva elektroenergii dlya potrebleniya v nefte dobyvayushchey otrasli [Improving the quality of electricity for consumption in the oil industry]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovaniye v APK*. 2021. Vol. 68. N1(42). 23-28. (In Russian). DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-1-23-28.

В настоящее время 50-60% электропотребления на нефтяных месторождениях приходится на механизированную добычу нефти. Специфика работы погружного электроцентробежного насоса (ЭЦН), работающего от погружного электродвигателя (ПЭД), как потребителей электроэнергии, обусловлена их эксплуатацией на значительном удалении от земной поверхности, переменным характером нагрузки, агрессивностью добываемой жидкости, наличием протяженной кабельной линии. Неопределенность объемов запасов жидкости и необходимость плавного изменения темпов ее отбора привели к появлению систем регулирования частоты вращения центробежного электронасоса от станций управления ПЭД с преобразователями частоты (ПЧ). Применение регулируемого привода ЭЦН с точки зрения технологии добычи нефти очевидно. Однако ПЧ, особенно при их массовом использовании, искажают форму кривой тока и питающего напряжения, создавая в сети высшие (то есть отличные от 50 Гц) гармонические составляющие (ВГС), что резко ухудшает качество напряжения в питающей сети, наглядно это показано на *рисунке 1* [1].



**Рис. 1.** Сумма высших гармоник с основной частотой: *a* – искаженный сигнал; *b* – сигнал основной частоты; *c* – сигнал 5-й гармоники

**Fig. 1.** Sum of higher harmonics with fundamental frequency: *a* – distorted signal; *b* – fundamental frequency signal; *c* – signal 5th harmonic

Основные источники гармоник – нелинейные нагрузки. Ток, потребляемый нелинейными нагрузками, протекает через все сопротивления (провода, кабели, обмотки трансформаторов) питающей цепи и ведет к падению напряжения на этих сопротивлениях. Характер падения напряжения также – нелинейный, так как полностью повторяет форму нелинейного тока на простых резистивных нагрузках.

Наличие гармоник приводит к перегрузкам в распределительных сетях, повышенному энергопотреблению, ложному срабатыванию защитных устройств, перегреву проводки, преждевременному старению и выходу оборудования из строя [2].

**Цель исследования** – изучить устройства для повышения качества электроэнергии в нефтедобывающей отрасли.

**Материалы и методы.** На рисунках 2, 3, 4 и в таблице привели результаты обследования параметров электропотребления Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения ПрЭО «Ямал» сетевой район № 1 куст 18 КТП 10/0,4 кВ № 1 ввод-2. Допустимые и предельно допустимые значения указали согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Замер произвели анализатором качества электроэнергии АКЭ-824.

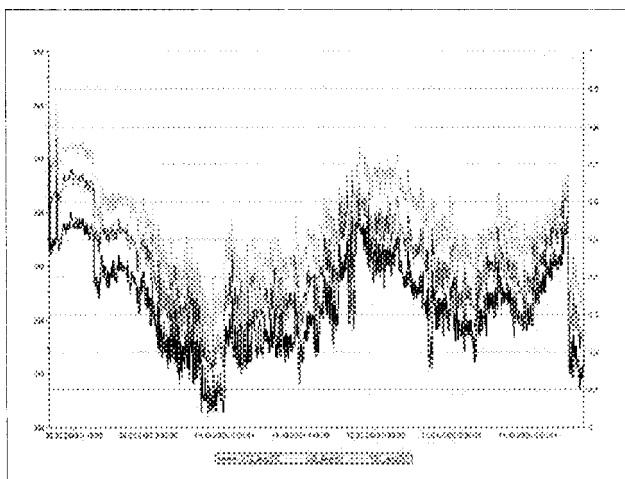


Рис. 2. График напряжения (В)  
Fig. 2. Voltage graph (V)

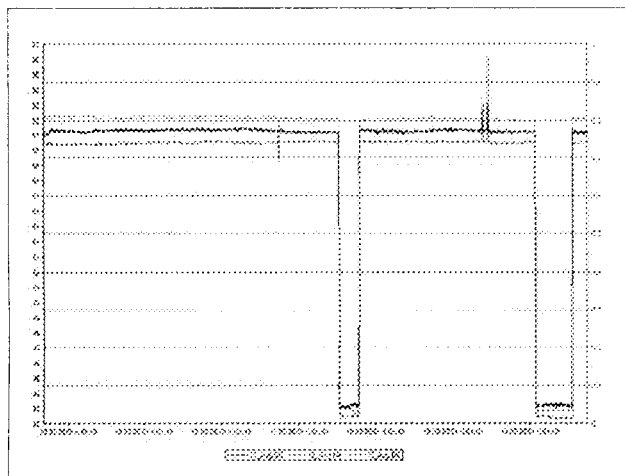


Рис. 3. График тока (А)  
Fig. 3. Graph of current (A)

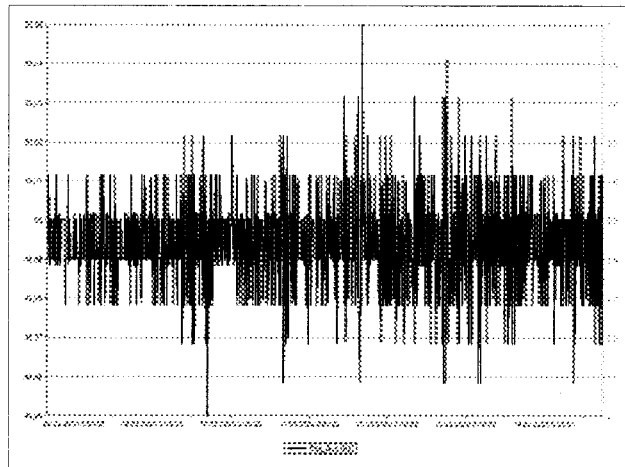


Рис. 4. График частоты напряжения (Гц)  
Fig. 4. Graph of voltage frequency (Hz)

Table		Таблица	
Гармоники напряжения Voltage harmonics			
№ гармоники № harmonics	Фактическое значение, % Actual value, %	Нормально допустимое значение (НД), $K_{U(n)}$ , % Normally the allowable value (ND), $K_{U(n)}$ , %	Предельно допустимое значение (ПД), $K_{U(n)}$ , % Maximum allowed value (PD), $K_{U(n)}$ , %
2	0,04	1,5	2,25
3	0,01	3,0	4,5
4	0,01	0,7	1,05
5	0,44	4,0	6,0
6	0,01	0,3	0,45
7	0,52	3,0	4,5
8	0,02	0,3	0,45
9	0,04	1,0	1,5
10	0,02	0,3	0,45
11	0,70	2,0	3,0
12	0,00	0,2	0,3
13	0,02	2,0	3,0
14	0,00	0,2	0,3
15	0,01	0,3	0,45
16	0,00	0,2	0,3
17	0,01	1,5	2,25
18	0,00	0,2	0,3
19	0,00	1,0	1,5
20	0,00	0,2	0,3
21	0,00	0,2	0,3
22	0,00	0,2	0,3
23	0,10	1,0	1,5
24	0,00	0,2	0,3
25	0,10	1,0	1,5

**Результаты и обсуждение.** Результаты исследований представили частично, но по этим данным обследования параметров электроэнергии на Новопортовском нефтегазоконденсатном месторождении, а также по данным других нефтегазовых месторождений можно говорить о целесообразности использования устройств, повышающих качество электроэнергии.

Установки могут быть различными как по конструктивному исполнению, так и по сфере применения. Например, стабилизаторы напряжения, устройства симметрирования фазных напряжений, устройства компенсации реактивной мощности, фильтрокомпенсирующие устройства, фильтры сетевые активные [3-5].

Широко используются вентильные преобразователи, которые решают проблему компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения. На рисунке 5 дана схема распределительной сети, питающей тиристорный преобразователь, в которой для компенсации реактивной мощности применяется конденсаторная установка.

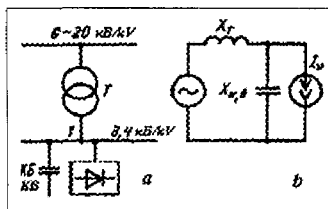


Рис. 5. Схема подключения конденсатора к преобразовательному трансформатору (а) и схема замещения (б)  
Fig. 5. Connection diagram of a capacitor to a converter transformer (a) and an equivalent circuit (b)

Известно, что конденсаторные батареи служат наиболее экономичным способом компенсации реактивной мощности. Это связано с их преимуществами по сравнению с другими средствами компенсации реактивной мощности, а именно: возможностью использования как при низком, так и при высоком напряжении; малыми потерями активной мощности (0,0025-0,005 кВт/квар); наименьшей удельной стоимостью на 1 квар по сравнению с другими компенсирующими устройствами; простотой эксплуатации. Но в сетях с высоким содержанием высших гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, применение обычных средств компенсации реактивной мощности, рассчитанных на синусоидальные токи и напряжения, сложно, поскольку связано с техническими трудностями.

Расчеты параметров схемы батарей конденсаторов с вентильными преобразователями с целью компенсации реактивной мощности показывают, что общее фактическое значение тока конденсаторной батареи будет в несколько раз превышать допустимое значение, что приведет к ее повреждению.

Непосредственное использование батарей конденсаторов в целях компенсации реактивной мощности в сетях с вентильными нагрузками проблематично. Каждый конкретный случай требует расчета токовой перегрузки батарей резонансной группой гармоник. В некоторых случаях такие расчеты необходимо производить до гармоник достаточно высокого порядка, особенно при малых емкостях конденсаторных батарей.

Еще один из наиболее перспективных способов уменьшения токов и напряжений высших гармоник в сетях нефтяных месторождений – применение силовых фильтров высших гармоник, представляющих собой последовательное соединение индуктивного и емкостного сопротивлений, настроенных в резонанс на фильтруемую гармонику [6, 7].

На рисунке 6 показана схема поперечного фильтра высших гармоник.

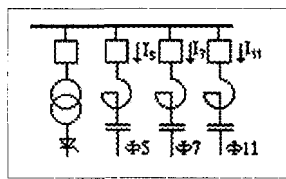


Рис. 6. Схема включения фильтров 5, 7, 11 гармоник  
Fig. 6. Scheme of switching on filters 5, 7, 11 harmonics

Звено фильтра – контур из  $n$  последовательно соединенных индуктивности и емкости, настроенных на частоту определенной гармоники. Сопротивление звена фильтра токам высших гармоник:

$$X_{\phi, n} = X_L \cdot n - X_C/n, \quad (1)$$

где  $X_L$ ,  $X_C$  – сопротивления соответственно реактора и батареи конденсаторов току промышленной частоты.

С увеличением частоты индуктивное сопротивление реактора увеличивается, а батареи конденсаторов – уменьшается пропорционально номеру гармоники.

На частоте одной из гармоник индуктивное сопротивление реактора становится равным емкостному сопротивлению батареи конденсаторов, и в цепи звена фильтра возникает резонанс напряжений. При этом сопротивление звена току резонансной частоты равно нулю, и оно шунтирует электрическую систему на этой частоте.

Параллельный фильтр представляет собой ряд звеньев, каждое из которых настроено на резонанс для частоты определенной гармоники. На практике обычно применяют фильтры, состоящие из звеньев, настроенных на частоты 5, 7, 11, 13, 23 и 25-й гармоник. Поперечный фильтр служит одновременно и источником реактивной мощности, и средством компенсации реактивных нагрузок. Параметры фильтров подбирают таким образом, чтобы звенья были

настроены в резонанс на частоты фильтруемых гармоник, а их емкости позволяли бы генерировать необходимую реактивную мощность на промышленной частоте. В ряде случаев для компенсации реактивной мощности параллельно фильтру включают батарею конденсаторов.

Главный недостаток фильтров – их высокая стоимость, обусловленная в основном стоимостью батарей конденсаторов. Поэтому применение фильтров целесообразно лишь в тех случаях, когда требуется не только не допустить проникновения в электрическую систему токов некоторых гармоник, но и скомпенсировать реактивную мощность в рассматриваемом пункте системы электроснабжения [6-8].

Статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ) – перспективное средство рациональной компенсации реактивной мощности в силу присущих им положительных свойств, таких, как быстрое действующее регулирование, подавление колебаний напряжения, симметрирование нагрузок, отсутствие вращающихся частей, плавность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в сеть. Кроме того, эти устройства могут осуществлять плавное и оптимальное распределение напряжений, обеспечивая тем самым снижение их потерь в распределительных сетях.

На рисунке 7 приведены основные варианты статических компенсирующих устройств. Они содержат фильтры высших гармоник и регулируемый дроссель в различных исполнениях.

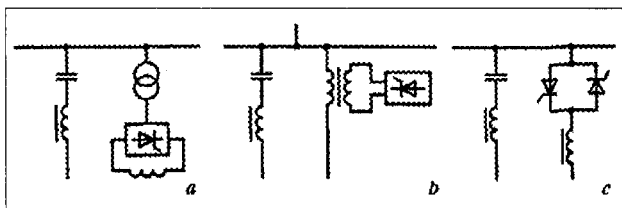


Рис. 7. Схемы статических компенсирующих устройств  
Fig. 7. Diagrams of static compensating devices

В настоящее время существует множество схем, которые можно разделить на 3 группы: источники реактивной мощности с индуктивным накопителем на стороне постоянного тока (рис. 7а); реакторы насыщения с нелинейной вольт-амперной характеристикой (рис. 7б); реакторы с нелинейной вольт-амперной характеристикой и последовательно включенными управляемыми вентилями (рис. 7с).

Статические компенсаторы реактивной мощности обеспечивают компенсацию реактивной мощности основной частоты, фильтрацию высших гармоник, компенсацию изменений напряжения, а также симметрирование напряжения распределительной сети. Они состоят из управляемой части, осуществляющей регулирование реактивной мощности и энергетических фильтров, создающих филь-

трацию высших гармоник тока нелинейной нагрузки [5, 8].

**Выводы.** Рассмотрели представленные на рынке устройства, повышающие качество электроэнергии, а также устройства, компенсирующие реактивную мощность. Выявили, что целесообразно использовать статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности, например, производителя АО «Электроинтер», г. Серпухов.

Данный выбор обусловлен тем, что устройство отечественного производства и соответствует требованиям, предъявляемым нефтяной отраслью.

Регуляторы реактивной мощности конденсаторного завода АО «Электроинтер» – это полностью автоматические приборы, осуществляющие оптимальное управление компенсацией реактивной мощности. Они оснащены точными измерительными контурами тока и напряжения, а цифровой обработкой измеренных величин достигнута высокая точность определения истинного эффективного значения напряжения, тока и коэффициента мощности. Устройство также производит вычисление основной гармонической составляющей активного и реактивного тока по алгоритму БПФ (быстрое преобразование Фурье). Подобным способом вычисляется и основная гармоника напряжения, чем обеспечивается точность измерения и регулирования, дополнительно и в условиях сильного искажения высшими гармониками.

#### Библиографический список

1. Турышева А.В. Повышение качества энергоснабжения для предприятий нефтегазовой отрасли с использованием параллельных активных фильтров // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. N5-2(49). С. 105-106.
2. Лицин К.В., Греков С.С., Евсеев И.А. Повышение качества электроэнергии за счет управления реактивной мощностью // *Наука и производство Урала*. 2017. N13. С. 22-25.
3. Кочетков Н.П., Широбокова Т.А., Трефилов Е.Г. Обоснование рационального режима питания установок наружного освещения сельских населенных пунктов // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2008. N2(16). С. 17-20.
4. Кондратьева Н.П., Стерхова Т.Н., Широбокова Т.А. и др. Обеспечение безопасности при эксплуатации распределительных сетей // *Надежность и безопасность энергетики*. 2017. Т. 10. N4. С. 287-290.
5. Широбокова Т.А., Поспелова И.Г., Набатчикова М.А. и др. Разработка энерго- ресурсосберегающих осветительных установок для АПК // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. N3(40). С. 95-102.

6. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Vagapov G.V. et al. Techniques for improving the quality of electricity on the basis of reactive power compensation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014. N11-12. 135-139.
7. Tyapin A., Kinev E. Improving the quality of electricity of a metallurgical enterprise by balancing the induction load. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020. N40-1. 33-40.
8. Bekirov E., Asanov M. Steps to optimize the work of renewable energy sources in the unified energy system. *Research in Agricultural Electric Engineering*. 2016. N2. 35-38.
4. Kondrat'eva N.P., Sterkhova T.N., Shirobokova T.A. et al. Obespechenie bezopasnosti pri ekspluatatsii raspredelitel'nykh setey [Ensuring safety in operation of distribution networks]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2017. Vol. 10. N4. 287-290 (In Russian).
5. Shirobokova T.A., Pospelova I.G., Nabatchikova M.A. et al. Razrabotka energo-resursosberegayushchikh osvetitel'nykh ustanovok dlya APK [Development of energy-resource-saving lighting installations for agriculture]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020. Vol. 67. N3(40). 95-102 (In Russian).

### References

1. Turysheva A.V. Povyshenie kachestva energosnabzheniya dlya predpriyatiy neftegazovoy otrasli s ispol'zovaniem parallel'nykh aktivnykh fil'trov [Improving the quality of supply for oil and gas industry using a parallel active filters]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2015. N5-2(49). 105-106 (In Russian).
2. Litsin K.V., Grekov S.S., Evseev I.A. Povyshenie kachestva elektroenergii za schet upravleniya reaktivnoy moshchnost'yu [Improving the quality of electricity by controlling reactive power]. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 2017. N13. 22-25 (In Russian).
3. Kochetkov N.P., Shirobokova T.A., Trefilov E.G. Obosnovanie ratsional'nogo rezhima pitaniya ustanovok naruzhnogo osveshcheniya sel'skikh naselennykh punktov [Substantiation of a rational mode of power supply for outdoor lighting installations in rural settlements]. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2008. N2(16). 17-20 (In Russian).
6. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Vagapov G.V. et al. Techniques for improving the quality of electricity on the basis of reactive power compensation. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014. N11-12. 135-139.
7. Tyapin A., Kinev E. Improving the quality of electricity of a metallurgical enterprise by balancing the induction load. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020. N40-1. 33-40.
8. Bekirov E., Asanov M. Steps to optimize the work of renewable energy sources in the unified energy system. *Research in Agricultural Electric Engineering*. 2016. N2. 35-38.

Статья поступила в редакцию 18.01.2021

Статья принята к публикации 11.03.2021