

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ
ЦИФРОВЫМИ ПРИБОРАМИ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХTHE ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF DETERMINING THE POWER FACTOR
BY THE DIGITAL INSTRUMENTS IN RURAL ELECTRIC NETWORKS

Ключевые слова: фазометр, сельские электрические сети, измерение сдвига фаз между током и напряжением, сети низкого напряжения, динамика изменения коэффициента мощности, участок электрической сети, удалённые Web-технологии, цифровой двойник.

Представлено описание различных способов определения коэффициента мощности нагрузки в сельских электрических сетях при условии использования цифровых приборов. Рассмотрены основные способы определения коэффициента мощности на основании существующих методик. Дано обоснование целесообразности применения одного из представленных способов в условиях массового применения устройств, содержащих узел определения угла сдвига фаз, в составе единой системы контроля параметров электрической энергии. Введено понятие разностного сигнала – периодического синусоидального напряжения, представляющего собой разность кривых напряжения и тока одноимённого проводника, приведённых к одному амплитудному уровню с сохранением исходного угла сдвига фазы. Описаны методики, при использовании которых будет возможно определить мгновенное и среднее значение коэффициента мощности нагрузки контролируемого присоединения при использовании различных способов определения угла сдвига фаз, а также приведено графическое обоснование корректности применения методики на примере графика амплитуды и сдвига фаз разностного сигнала в зависимости от сдвига фаз исходных сигналов тока и напряжения. Также представлен подробный алгоритм применения полученных методик, указаны границы их применимости и степень точности получаемых результатов, а также определены зависимости, влияющие на точность получаемых результатов. Методика основана на возможностях современной микроэлектроники, а именно цифровых микроконтроллеров, способных производить миллионы вычислительных операций в секунду. Пред-

полагается использование этой технологии для работы как в ручном режиме, так и в режиме непрерывного контроля за сельскими электрическими сетями.

Keywords: phase meter, rural electric networks, phase shift between current and voltage, low voltage networks, dynamics of power factor changes, electric network section, remote web-technologies, digital double.

This paper describes various methods for determining the load power factor in rural electric networks provided that digital devices are used. The paper discusses the main methods for determining the power factor based on existing techniques. The appropriateness of using one of the presented methods under the conditions of mass application of devices containing a unit for determining the phase angle, as part of a system for monitoring the parameters of electric energy is substantiated. The concept of a difference signal is introduced - a periodic sinusoidal voltage which is the difference between the voltage and current signal of the same conductor reduced to the same amplitude level while maintaining the initial phase angle. This paper describes the methods enabling the determination of the instantaneous and average value of the load power factor of the controlled connection using various methods for determining the phase angle and also provides a graphical justification for the correctness of the application of the method by the example of a graph of the amplitude and phase shift of the difference signal depending on the phase shift of the source signals of current and voltage. The paper presents a detailed algorithm for the application of the obtained methods, indicates the limits of their applicability and the limits of accuracy of the results and determines the dependencies affecting the accuracy of the results. The technique is based on the capabilities of modern microelectronics, namely digital microcontrollers capable of producing millions of computing operations per second. It is supposed to use this technology to work both in manual mode and in continuous monitoring of the rural electric networks.

Казымов Иван Максимович, аспирант, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: bahek1995@mail.ru.

Компанец Борис Сергеевич, к.т.н., доцент, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: kompbs@mail.ru.

Kazymov Ivan Maksimovich, post-graduate student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: bahek1995@mail.ru.

Kompaneyets Boris Sergeyeovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: kompbs@mail.ru.

Введение

В настоящее время цифровизация электроэнергетических систем и сетей является одним из важнейших направлений развития отечественной и мировой электроэнергетики. Так, задача цифровизации электроэнергетического комплекса была поставлена в 2018 г. Указом Президента Российской Федерации [1]. На основании данного указа ведущими электросетевыми компаниями страны были сформированы концепции проведения цифровизации сетей [2], в которых говорится о важности работ в данном направлении и планах компаний по осуществлению «Цифровой трансформации» электросетевого комплекса страны. В 2018-2019 гг. были определены ключевые направления цифровизации электрических сетей, утверждён паспорт программы «Цифровая трансформация электроэнергетики России» и определена новая парадигма развития электроэнергетики [3, 4]. Таким образом, цифровизация электрических сетей страны и создание их «цифровых двойников», являются на сегодняшний день актуальными и современными направлениями исследований.

Для создания цифрового двойника сети могут быть использованы различные устройства, способные определять параметры электрической энергии в точке подключения. Однако на данный момент единственными цифровыми устройствами в сельских сетях низкого и среднего напряжений, способными удалённо передавать информацию о параметрах электрической сети, остаются приборы учёта электрической энергии, используемые для коммерческого учёта электроэнергии с использованием АИИС КУЭ. Известны предложения о составе и характере устройств контроля сетей [5], однако список параметров, которые должны передавать подобные устройства для обеспечения создания полноценного «цифрового двойника» электрической сети, является достаточно обширным и содержит:

- ток в контролируемой линии;
- напряжение в месте присоединения;
- потребляемую мощность;
- коэффициент мощности нагрузки контролируемой линии;

- потреблённая электрическая энергия за произвольный период времени.

Очевидно, что информация об электрических величинах должна быть доступна как в виде мгновенных значений, так и в виде статистических данных.

Основную сложность в построении подобных приборов составляет выбор технического решения по определению коэффициента мощности нагрузки. Данная проблема обусловлена в основном цифровым (и, следовательно, дискретным) характером данных о мгновенных величинах тока и напряжения, и, в том числе влиянием несинусоидальности питающего напряжения.

Так как точное определение коэффициента мощности как для каждой нагрузки в частности, так и для электрической сети в целом является одним из важнейших этапов создания цифрового двойника, а также возможностью разработки эффективных мер по приведению коэффициента мощности в целом по сети к нормативным значениям. Для сельских электрических сетей это особенно актуально ввиду низкого дневного значения коэффициента мощности для большинства сельскохозяйственных нагрузок (0,70-0,75) [6].

Целью исследования является определение наиболее эффективного способа определения коэффициента мощности для применения в цифровых устройствах контроля параметров электрической энергии для первой гармонической составляющей тока и напряжения.

Объекты и методы

В основе любого устройства, предназначенного для контроля параметров электроэнергии, лежат датчики, измеряющие напряжение и ток в контролируемой линии. Ввиду аналогового характера исходного сигнала измеряемые электрические величины должны быть приведены в цифровой вид и только после этого обработаны. Таким образом, возникают два фундаментальных способа определения коэффициента мощности:

- сравнение аналоговых сигналов до преобразования и определение сдвига их фаз (аналог известного электроизмерительного прибора – фазометра);

- сравнение цифровых сигналов на основе полученной цифровой картины кривых напряжения и тока с известной и заранее определённой степенью дискретизации.

Рассмотрим вариант сравнения первичных аналоговых сигналов, точность показаний которых определяется точностью применяемых датчиков и в данной работе подразумевается абсолютной. Очевидно, что в этом случае с учётом необходимости применения только цифровой

элементной базы наиболее эффективным методом будет использование преобразования сигналов тока и напряжения в сигналы, повторяющие форму сигналов тока и напряжения (в том числе и сдвиг фаз), однако имеющие одинаковую и заранее известную амплитуду. Упрощённая принципиальная схема такого устройства приведена на рисунке 1. Далее на рисунках 2, 3 приведены графики кривых напряжения и тока до (рис. 2) и после (рис. 3) преобразования.



Рис. 1. Упрощённая принципиальная схема устройства измерения сдвига фаз между током и напряжением

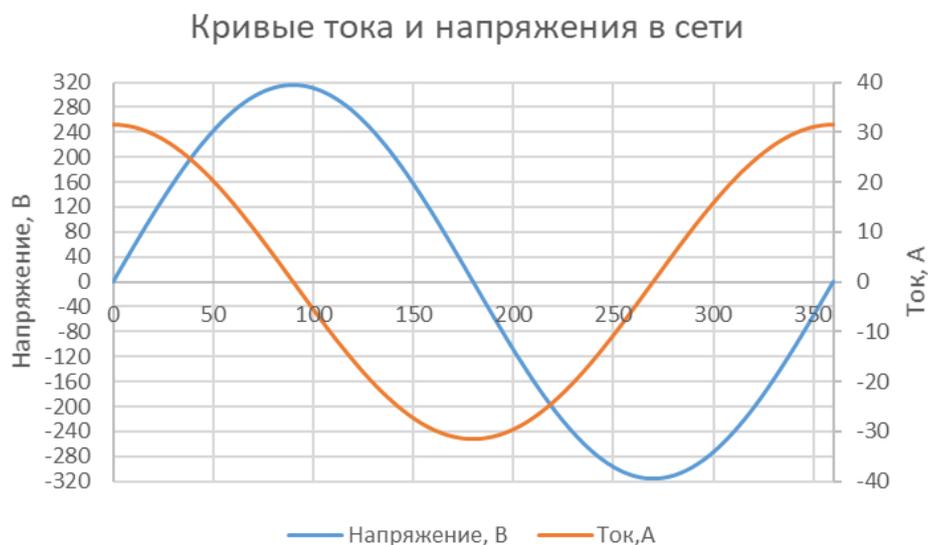


Рис. 2. График кривых тока и напряжение в сети до преобразования

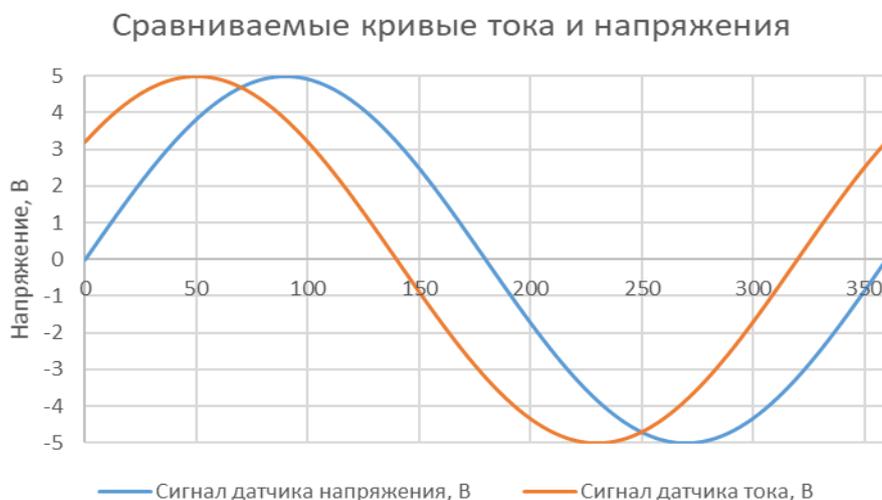


Рис. 3. График кривых тока и напряжения в сети после преобразования (случай, когда сдвиг фаз не равен нулю)

Очевидно, что ток и напряжение всегда будут иметь различный порядок величин амплитуды сигналов, поэтому для определения сдвига фаз целесообразно привести их к одному уровню напряжения, причём токовый сигнал должен быть преобразован таким образом, чтобы работа датчика тока на высокоомный измеритель сдвига фаз не влияла на работу элемента (иными словами, должен быть создан сигнал напряжения, управляемый током датчика, пропорционального току в линии и синфазному с ним). Условно примем амплитуду сигнала, равной пяти вольтам. При этом в случае нулевого сдвига фаз между током и напряжением сигналы будут накладываться друг на друга, и разность сигналов в любой момент времени будет равна нулю. Однако в случае наличия сдвига фаз (присутствия в контролируемой линии реактивной нагрузки) кривые тока и напряжения после преобразования окажутся сдвинутыми относительно друг друга на угол, соответствующий текущему значению коэффициента мощности.

Нетрудно заметить, что коэффициент мощности может быть определён из амплитуды разностного сигнала $f(t) = U(t) - I(t)$. Такой разностный сигнал показан на рисунке 4 для трёх различных углов сдвига фаз (20° ; 90° ; 0° ; -20°).

Учитывая возможности современной вычислительной техники и тот факт, что заранее известен уровень амплитуды напряжения преобразованных сигналов тока и напряжения, для определения значения сдвига фаз с заданной точностью достаточно определить амплитуду разностного сигнала и установить соответствие полученной амплитуде и сдвигу фаз исходных сигналов любым из удобных способов. Например, можно использовать таблицу соответствий.

Как видно из рисунка 4, независимо от направления сдвига фаз тока и напряжения в сети, амплитуда разностного сигнала остаётся неизменной для одинаковых значений сдвига фаз в ёмкостном и индуктивном направлении. Значит, о характере коэффициента мощности говорит значение разностного сигнала в момент перехода сигнала напряжения через нулевую

точку при переходе из отрицательной области в положительную (восходящий участок кривой). В случае, если разностный сигнал в этот момент положителен – нагрузка имеет ёмкостной характер, иначе – индуктивный.

Рассмотрим вариант сравнения преобразованных цифровых сигналов, точность которых заранее известна и определяется точностью применяемой элементной базы и частотой дискретизации цифрового представления сигнала.

В данном случае могут быть рассмотрены два варианта построения такой системы: параллельный и последовательный. В параллельном варианте сигналы с датчиков напряжения и тока подаются на центральное вычислительное устройство, обрабатываются независимо и могут быть использованы отдельно от информации о коэффициенте мощности в случае необходимости.

Упрощённая принципиальная схема такого устройства представлена на рисунке 5.

В последовательном варианте сигналы с датчиков напряжения и тока подаются на узел определения сдвига фаз, где обрабатываются и где вычисляется угол сдвига фаз между током и напряжением, коэффициент мощности и характер последнего. Затем полная информация передаётся на центральное вычислительное устройство.

Упрощённая принципиальная схема такого устройства представлена на рисунке 6.

При последовательном построении системы имеет смысл выполнять цифровое представление сигнала напряжения и тока непосредственно в узле определения сдвига фаз.

Экспериментальная часть

Узел определения сдвига фаз между током и напряжением представляет собой электронное устройство, которое принимает на вход сигналы тока и напряжения одноимённой фазы и вычисляет угол сдвига фаз между ними (результат выдаётся в градусах), а затем передаёт в цифровом виде на центральное вычислительное устройство.

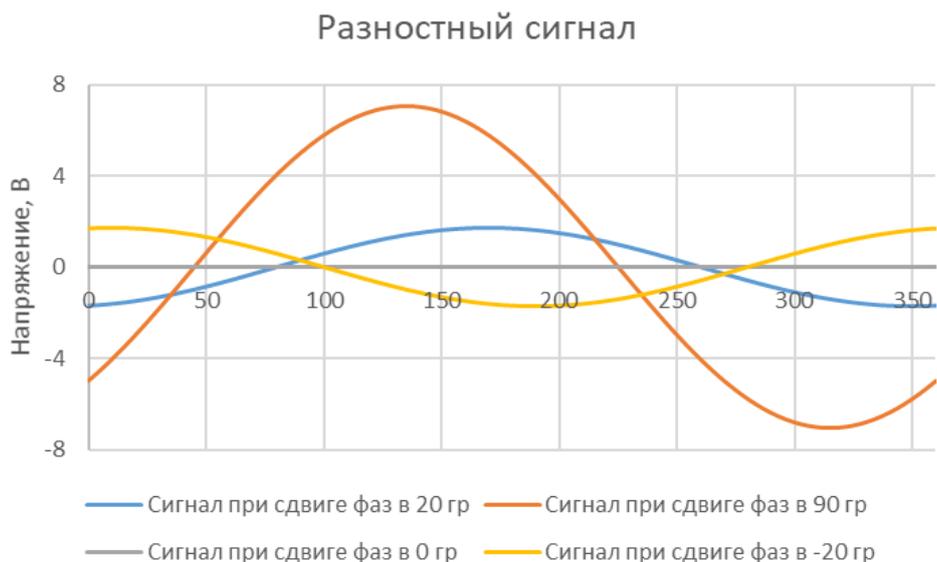


Рис. 4. График кривых разностного сигнала при различных углах сдвига фаз между током и напряжением

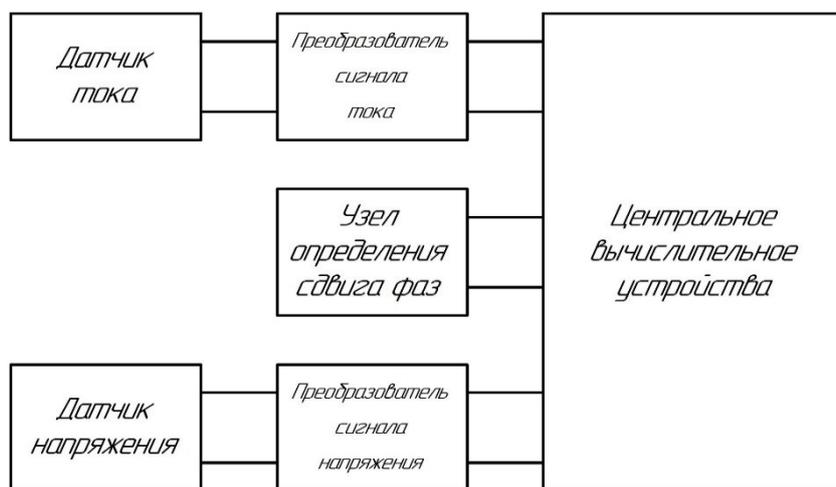


Рис. 5. Упрощенная принципиальная схема устройства контроля параметров электрической энергии, в котором определение угла сдвига фаз выполняется на основании цифрового представления сигналов тока и напряжения при параллельном построении системы

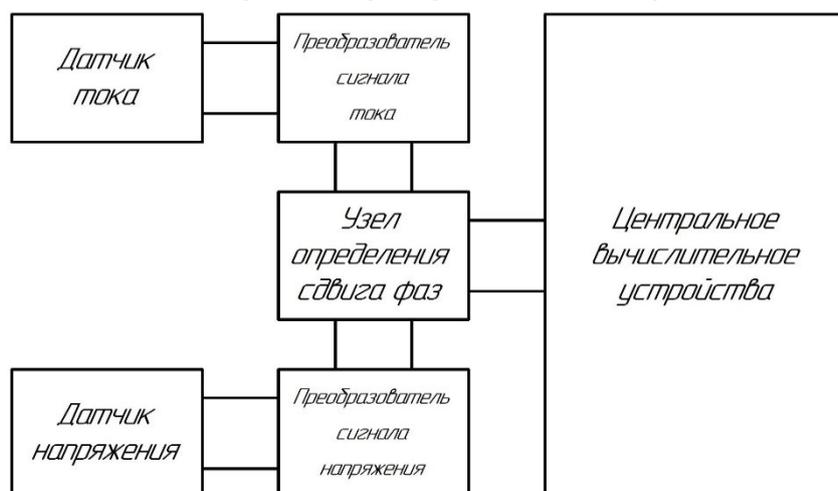


Рис. 6. Упрощенная принципиальная схема устройства контроля параметров электрической энергии, в котором определение угла сдвига фаз выполняется на основании цифрового представления сигналов тока и напряжения при последовательном построении системы

Алгоритм работы устройства состоит из следующих этапов:

- определение максимального (амплитудного) значения напряжения соответствующей фазы U_m ;
- определение максимального (амплитудного) значения тока соответствующей фазы I_m ;
- проведение выборки из двадцати значений тока i и напряжения u , зафиксированных одновременно в течение одного периода синусоиды напряжения;
- вычисление угла сдвига фаз между током и напряжением $\Delta\varphi_k$ для каждого из 20 значений выборки, согласно приведённой ниже методике;
- определение результирующего угла сдвига фаз между током и напряжением $\Delta\varphi$ как среднего арифметического от полученных значений.

Рассмотрим предлагаемую методику вычисления угла сдвига фаз между током и напряжением.

Для вычисления сдвига фаз между током и напряжением следует взять 20 мгновенных значений кривых тока и напряжения в следующих моментах времени φ_{Uk} : $[0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ, 90^\circ, 108^\circ, 126^\circ, 144^\circ, 162^\circ, 180^\circ, 198^\circ, 216^\circ, 234^\circ, 252^\circ, 270^\circ, 288^\circ, 306^\circ, 324^\circ, 342^\circ]$.

Моменты времени отсчитываются относительно кривой напряжения соответствующей фазы. Затем для каждого момента времени следует определить мгновенное значение фазы кривой тока в градусах по формуле (1):

$$\varphi_{Ik} = \arcsin\left(\frac{i}{I_m}\right), \quad (1)$$

где i – мгновенное значение тока в определённый момент времени k ;

I_m – амплитудное значение тока за рассматриваемый период времени.

Далее следует вычислить угол сдвига фаз между током и напряжением $\Delta\varphi_k$ для момента времени k по формуле (2):

$$\Delta\varphi_k = \varphi_{Uk} - \varphi_{Ik}, \quad (2)$$

где φ_{Uk} – фаза напряжения в рассматриваемый момент времени;

φ_{Ik} – фаза тока в рассматриваемый момент времени.

Завершающим этапом определения сдвига фаз между током и напряжением будет являться определение среднего значения сдвига фаз согласно формуле (3):

$$\Delta\varphi = \frac{\sum_{k=1}^{20} \Delta\varphi_k}{20}. \quad (3)$$

Таким образом, определение сдвига фаз между током и напряжением для каждой фазы осуществляется в течение одного периода синусоиды напряжения.

Дальнейшее вычисление значения коэффициента мощности и определение его характера следует определять по табличным значениям для функции косинуса. С повышением точности определения угла сдвига фаз будет повышаться и точность определения коэффициента мощности. Определение характера коэффициента мощности следует основывать на анализе направления сдвига кривой тока относительно напряжения: в случае, если среднее значения угла сдвига фаз, определённое по формуле (3), является отрицательным, то коэффициент мощности имеет индуктивный характер, в обратном случае – ёмкостный.

Предлагаемый способ интерпретации полученных данных показан в таблице.

Таблица

Способ интерпретации получаемых значений сдвига фаз

Фаза напряжения, °	Фаза тока, °	Угол сдвига фазы, °	Среднее значение угла сдвига фаз, °	Коэффициент мощности
0	-20	-20	-20	0,94; индуктивный
18	-2	-20		
36	16	-20		
54	34	-20		
72	52	-20		
90	70	-20		
.....				
324	286	-20	-20	0,94; индуктивный
342	304	-20		

Результаты и обсуждение

Наиболее эффективным способом определения угла сдвига фаз между током и напряжением представляется способ, построенный на анализе преобразованных цифровых данных при последовательном построении системы. В этом случае становится возможным получать наиболее соответствующие друг другу данные, так как все параметры получаются расчётным аналитическим путём исходя из имеющихся цифровых представлений сигналов тока и напряжения. В таком случае требуется применить такие схемные решения, чтобы получить максимально точное цифровое представление аналогового сигнала с датчиков тока и напряжения. Очевидно, что данный вариант является более затратным ввиду того, что при его реализации требуется использовать отдельное вычислительное устройство внутри узла определения сдвига фаз, однако, в свою очередь, это решение разгружает центральное вычислительное устройство и делает возможным подключение дополнительных функций, таким как, например, обработку сигналов различных датчиков, установленных в точке присоединения устройства контроля параметров электрической энергии в распределительной сети. Получаемые при использовании предлагаемой методики результаты имеют достаточную для технических нужд точность и могут быть использованы для анализа характера нагрузки в разветвлённой сельской электрической сети низкого напряжения с целью оптимизации режима работы установок компенсации реактивной мощности, так как при совместном использовании устройств контроля параметров электрической энергии и компенсирующих устройств представляется возможным получить наиболее высокие результаты средне-взвешенного коэффициента мощности в сети, что повлечёт за собой разгрузку питающих линий высшего класса напряжения и повысит общую надёжность системы за счёт снижения темпов старения воздушных и кабельных линий электропередачи.

Выводы

Описанные в данной работе способы определения коэффициента мощности нагрузки в сельских электрических сетях с использованием цифровых приборов и обоснование эффектив-

ности в перспективе промышленного применения одного из описанных способов могут быть применены при создании «цифровых двойников» электрических сетей и общей цифровизации электроэнергетики [7]. Полученные результаты могут быть полезны для создания моделей потребления электрической энергии в АПК, а также для получения и анализа реальной картины потребления, в том числе в коммунально-бытовом секторе сельских электрических сетей [8].

Наилучшие результаты при определении коэффициента мощности нагрузки достигаются при применении ряда приборов, установленных в различных точках сети, таких как: место технологического присоединения потребителя; место разветвления питающих проводов; выключатель отходящей линии. В этом случае становится возможным на основании данных о коэффициенте мощности каждого потребителя, отдельных ветвлений сети и общего коэффициента мощности в начале линии делать выводы о целесообразности установки компенсации реактивной мощности для рассматриваемой сети и о наиболее эффективном месте её расположения.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. N 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». – 19 с. – Текст: непосредственный.
2. Концепция «Цифровая трансформация 2030». Концепция ПАО «Россети». – 2018. – 31 с. – Текст: непосредственный.
3. Главные инженеры электросетевых компаний обсудили вопросы цифровизации электрических сетей // Электроэнергия. Передача и распределение. – Москва: Кабель, 2018. – № 6 (51) – С. 12-15. – Текст: непосредственный.
4. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития / под редакцией Н. Д. Рогалева. – Москва: Изд-во МЭИ, 2019. – 300 с. – Текст: непосредственный.
5. Kazymov, I., Kompaneets, B. (2019). Definition of Fact and Place of Losses in Low Voltage Electric Networks. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manu-*

facturing (ICIEAM). 1-5. Doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743075.

6. РД 34.20.178-82. Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38-110 кВ сельскохозяйственного назначения. – 1982. – 08 с. – Текст: непосредственный.

7. Цифровизация электрических сетей АПК на платформе интернета энергии / Н. И. Цыгулев, В. К. Хлебников, В. А. Шелест, [и др.]. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники 2019: материалы национальной научно-практической конференции / Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону). – 2019. – С. 327-328.

8. Белый, В. Б. Модель процессов потребления электроэнергии коммунально-бытовым сектором в сельских электрических сетях / В. Б. Белый. – Текст: непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XVII Международной научно-практической конференции / ОГУ им. И.С. Тургенева. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. – С. 42-45.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 maya 2018 g. N 204 "O natsionalnykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda". – 19 s.

2. Kontseptsiya «Tsifrovaya transformatsiya 2030»: Kontseptsiya PAO «Rosseti». – 2018. – 31 s.

3. Glavnye inzheneriy elektrosetevykh kompaniy obsudili voprosy tsifrovizatsii elektricheskikh setey // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2018. – No. 6 (51) – S. 12-15.

4. Tsifrovaya energetika: novaya paradigma funktsionirovaniya i razvitiya / pod red. N.D. Rogaleva. – Moskva: Izd-vo MEI, 2019. – 300 s.

5. Kazymov, I., Kompaneets, B. (2019). Definition of Fact and Place of Losses in Low Voltage Electric Networks. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 1-5. Doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743075.

6. RD 34.20.178-82. Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh nagruzok v setyakh 0,38-110 kV selskokhozyaystvennogo naznacheniya. – 1982. – 108 s.

7. Tsygulev, N.I. Tsifrovizatsiya elektricheskikh setey APK na platforme interneta energii / N.I. Tsygulev, V.K. Khlebnikov, V.A. Shelest, V.V. Terebaev, L.V. Babina, E.Ya. Zubkova, V.A. Mikhaylichenko // Aktualnye problemy nauki i tekhniki. 2019. Materialy natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2019 / Donskoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet (Rostov-na-Donu). – 2019. – S. 327-328.

8. Belyy, V.B. Model protsessov potrebleniya elektroenergii kommunalno-bytovym sektorom v selskikh elektricheskikh setyakh / V.B. Belyy // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek. Materialy XVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / OGU im. I.S. Turgeneva. – Орел: ОГУ им. I.S. Turgeneva, 2019. – С. 42-45.



УДК 631.3

А.Г. Сергеев, В.Л. Андреев, А.П. Мансуров, А.И. Моисеев, А.Е. Шамин
A.G. Sergeev, V.L. Andreyev, A.P. Mansurov, A.I. Moiseyev, A.Ye. Shamin

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАГРЕВА ВОДЫ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ ЗЕРНОВОЙ ПАТОКИ

THE RESEARCH FINDINGS ON WATER HEATING IN A GRAIN MOLASSES DISINTEGRATOR

Ключевые слова: время нагрева, зерновая патока, дезинтегратор, критерий оптимизации, крыльчатка, лопатка, температура, эксперимент, удельные энергозатраты, фактор.

Keywords: heating time, grain molasses, disintegrator, optimization criteria, impeller, blade, temperature, experiment, specific energy consumption, factor.