

5. Гомонай, М. В. Ресурсосберегающие технологии измельчения древесины на щепу в рубильных машинах с многолезцовыми и ножевыми рабочими органами: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гомонай Михаил Васильевич. – Воронеж, 2003. – 38 с. – Текст: непосредственный.

6. Naimi, L., et al. (2006). Cost and Performance of Woody Biomass Size Reduction for Energy Production. DOI: 10.13031/2013.22065.

7. Banks C.J., et al. Particle size requirements for effective bioprocessing of biodegradable municipal waste: Technology Research and Innovation Fund Project Report, Defra TRIF Programme, October 2008 - January 2010. p. 22

References

1. Nikishov V.D. Kompleksnoe ispolzovanie drevesiny: uchebnik dlia VUZov / V.D. Nikishov. – Moskva: Lesn. prom-st, 1985. – 264 s.

2. Palgunov P.P. Utilizatsiia promyshlennykh otkhodov / P.P. Palgunov, M.V. Sumarokov. – Moskva: Stroizdat, 1990. – 352 s.

3. Otleв I.A., Shteinberg Ts.B. Spravochnik po drevesnostruzhechnym plitam / I.A. Otleв, Ts.B. Shteinberg. – Moskva: Lesn. prom-st, 1983. – 240 s.

4. Greb A.S. Sovremennye podkhody k protsessu izmelcheniia drevesnykh otkhodov / A.S. Greb // Vestnik molodezhnoi nauki Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta: sbornik nauchnykh trudov. – Barnaul: RIO Altaiskogo GAU, 2018. – № 1. – S. 62-64.

5. Gomonai M.V., Resursosberegaiushchie tekhnologii izmelcheniia drevesiny na shchepu v rubilnykh mashinakh s mnogoreztsovymi i nozhevymi rabochimi organami: avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk / M.V. Gomonai. – Voronezh, 2003. – 38 s.

6. Naimi, L., et al. (2006). Cost and Performance of Woody Biomass Size Reduction for Energy Production. DOI: 10.13031/2013.22065.

7. Banks C.J., et al. Particle size requirements for effective bioprocessing of biodegradable municipal waste: Technology Research and Innovation Fund Project Report, Defra TRIF Programme, October 2008 - January 2010. p. 22



УДК 621.3.11

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-226-8-89-97

М.А. Якупова

М.А. Yakupova

ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СЕЛЬСКИХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ НЕСБАЛАНСИРОВАННОМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИИ

ISSUES OF ENERGY SAVING IN RURAL LOW-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH UNBALANCED POWER CONSUMPTION

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент потерь мощности, несимметричный режим, симметрирующее устройство, дополнительные потери мощности, отклонения напряжения, полная мощность, потребители электрической энергии, токи нулевой последовательности, параметры симметрирующего устройства.

Представлены материалы исследований несимметричных режимов работы в действующих сельских распределительных электрических сетях 0,4 кВ. Для исследований приняты материалы систематических измерений параметров электрической энергии и ее показателей, характеризующих качество электрической энергии. Измерения произведены по заказу электросетевой организации, осуществляющей электроснабже-

ние объектов на территории Иркутской области. Для оценки несимметричных режимов, в соответствии с разработанными методами расчета показателей несимметрии токов и напряжений, создана программа “Unbalance-2” для определения этих показателей. В качестве средства минимизации дополнительных потерь используется специальное устройство для симметрирования токов и напряжений с саморегулируемой индуктивностью, обладающее минимально возможным сопротивлением для токов нулевой последовательности, изменяющее в автоматическом режиме свои параметры. Программа предусматривает определение параметров симметрирующего устройства в соответствии с изменяющимся уровнем несимметрии токов в любой момент времени. На основе созданного алгоритма рассчитаны и проанализированы показатели, характери-

зующие качество электрической энергии, несимметрию трёхфазной системы напряжения, а также дополнительные потери мощности и энергии, обусловленные этой несимметрией. Установлено, что качество электрической энергии соответствует требованиям Государственного Стандарта, но уровень дополнительных потерь достаточно высок. Определены суммарные потери полной мощности в отдельных элементах исследуемой электрической сети и установлена степень эффективности симметрирующего устройства по снижению этих потерь и отдельных показателей качества электрической энергии. Определена экономическая эффективность применяемого симметрирующего устройства.

Keywords: *power quality, power loss factor, asymmetric mode, balancing device, additional power loss, voltage fluctuations, full power, electricity consumers, zero sequence currents, parameters of balancing device.*

The studies of asymmetrical modes of operation in the existing rural distribution 0.4 kV power grids are discussed. For research, the data of systematic measurements of electrical energy parameters and its indices that characterize the quality of electrical energy were taken. The measurements were taken by order of the electric grid company

that supplies power to the facilities in the Irkutsk Region. To evaluate the asymmetric modes, in accordance with the developed methods of calculation of current and voltage asymmetry indices, the "Unbalance-2" software was developed to determine these indices. As a means of minimizing additional losses, a special current and voltage symmetry device with self-regulating inductance is used, this has the lowest possible resistance for zero sequence currents and changes its parameters automatically. The software provides for determining the parameters of the symmetrical device in accordance with the changing level of current asymmetry at any time. On the basis of the created algorithm, we calculated and analyzed the indices that characterized the quality of electrical energy, characterizing the asymmetry of the three-phase voltage system as well as additional power and energy losses caused by this asymmetry. It was found that the quality of electricity met the requirements of the National standard but the level of additional losses was quite high. The total full power losses in individual elements of the investigated electrical network were determined and the degree of symmetrical device effectiveness in reducing these losses and individual indices of the quality of electrical energy were found. The economic efficiency of the symmetrical device used was determined.

Якупова Марина Андреевна, ассистент, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru.

Yakupova Marina Andreevna, Asst., Irkutsk State Agricultural University, Molodezhniy, Irkutskiy District, Irkutsk Region, e-mail: yakupovamarina199@yandex.ru.

Введение

Систематические исследования режимов работы действующих электрических сетей являются неотъемлемой частью комплексных мероприятий по повышению эффективности использования электрической энергии в различных отраслях хозяйственной деятельности человека. Создание адекватных математических моделей электрических сетей и проведение исследований на основе такого моделирования позволяют с достаточной степенью достоверности производить оценку возможных изменений в режимах работы отдельных элементов сети. Вместе с этим реальные процессы, происходящие при преобразовании, передаче и распределении электрической энергии, в значительной степени зависят от случайных факторов электропотребления, обусловленного как особенностями функционирования электроприемников, так и характером их коммутаций. При этом значительный интерес представляет апробация методов и программ расчета, созданных на основе математического моделирования, непосред-

ственно для анализа режимов работы действующих электрических сетей. Многочисленные исследования, посвященные моделированию режимов работы [1-5], а также исследования, связанные с проведением измерений и расчетов параметров электрической энергии в действующих низковольтных электрических сетях [6-10], показывают, что режимы работы этих сетей являются объективно несимметричными, что приводит к искажению качества электрической энергии.

Различные соотношения однофазных несимметричных и трехфазных симметричных электроприемников в трехфазной системе, образующие несимметричные потоки, создают многообразное искажение качества электрической энергии и увеличивают её дополнительные потери. В связи с этим разработку и создание механизмов оценки и минимизации таких измененных режимов позволяют более эффективно использовать электрическую энергию.

Целью статьи является анализ режимов работы действующей низковольтной электриче-

ской сети на основе использования разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- измерение параметров электрической энергии в действующей электрической сети 0,4 кВ;
- разработка алгоритма и программного обеспечения расчетов несимметричных режимов;
- анализ полученных результатов, выводы и рекомендации.

Методы и модели исследования

Несимметричное электропотребление в трехфазной электрической сети, с одной стороны, изменяет качество электрической энергии (КЭЭ), которое в соответствии с [11, 12] оценивается двумя показателями качества: коэффициентами несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательностям. Кроме того, возникающая несимметрия токов, обусловленная возникновением токов обратной и нулевой последовательностей, приводит к увеличению потерь электрической энергии на величину коэффициента потерь:

$$K_P = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \cdot (r_1 + 3 \cdot r_N),$$

где $K_{2i} = I_2/I_1$, $K_{0i} = I_0/I_1$, r_1 и r_N – активные сопротивления фазного (прямой последовательности) и нулевого проводников соответственно.

Действующая электрическая сеть 0,4 кВ представляет собой совокупность следующих элементов: силового трансформатора 10/0,4 кВ и магистрального участка линии электропередачи 0,4 кВ определенной длины, к которой присоединены трехфазные и однофазные потребители, имеющие ярко выраженный несимметричный характер электропотребления. В реальных условиях электропередачи такой режим работы может быть обусловлен сочетанием неравномерного распределения присоединений однофазных электроприемников в трехфазной сети, а также случайным характером их коммутаций. Для того чтобы рассчитать несимметричный режим работы, необходимо установить значение симметричных составляющих токов и напряжения. Определение симметричных составляющих можно осуществить на основе произведенных

измерений специальным прибором или же рассчитать, используя разработанные методы.

В данном случае для определения симметричных составляющих используется модульный метод расчета [13, 14], основанный на измерении действующих значений токов и напряжений в исследуемой электрической сети. Из опубликованных источников известно, что наиболее эффективным средством минимизации симметричных составляющих токов и напряжений является использование специальных симметрирующих устройств (СУ). В частности, для четырехпроводной трехфазной электрической сети таким устройством является шунто-симметрирующее устройство, обладающее минимально возможным сопротивлением для токов нулевой последовательности. Для того чтобы оценить эффект симметрирования такого устройства, необходим расчет его параметров. Эти параметры должны автоматически изменяться в соответствии с изменяющимся уровнем несимметрии токов по нулевой последовательности. Такими устройствами могут служить СУ, разработанные и описанные в [15, 16]. Отличительной особенностью этих устройств является плавное регулирование мощности СУ. Чтобы оценить эффект симметрирования предлагаемыми устройствами, необходима методика определения параметров, которая достаточно полно изложена в [17, 18]. На основе объединения разработанных методов расчета [18, 19], предложен алгоритм, реализованный в компьютерной программе «Unbalance-2». Исходными данными служат фазные токи, фазные и междуфазные напряжения, данные по параметрам силового трансформатора, а также линиям высокого и низкого напряжений. Расчет показателей несимметрии при отсутствии в сети СУ и его включении осуществлялся в соответствии с методом [15].

Экспериментальные исследования

Для производства расчетов и оценки несимметричных режимов использованы данные ежегодных измерений в действующих сетях¹. Для реального примера были приняты измерения, произведенные на шинах 0,4 кВ ТП № 3 в

¹ Протокол №2337/071 Испытаний электрической энергии (на 4 листах)/ЗАО «ИРМЕТ».

п. Петропавловске Киренского района Иркутской области. Испытания проводились по заказу СЭС ОАО «Иркутская электросетевая компания». Расстояние от 1 секции шин 10 кВ подстанции «ПС Петропавловск» до исследуемой ТПЗ составляет 0,567 км, электропередача осуществляется проводом марки СИП-3, сечением 50 мм². Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) последовательностей на участке составляют: $Z_{LH1}=Z_{LH2}=0,0243+j0,01$ Ом. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей силового трансформатора ТМГ400-10/0,4 – соответственно: $Z_{T1}=Z_{T2}=0,0055+j0,0171$ Ом, $Z_{T0}=0,0556+j0,1487$ Ом. Линия низкого напряжения (0,4 кВ) выполнена проводом марки СИП 2А, сечением 3x25+1x35 мм², длиной 0,312 км. Полные комплексные сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей этого участка линии равны, соответственно: $Z_{LL1}=Z_{LL2}=0,3744+j0,0258$ Ом; $Z_{LL0}=0,3076+j0,0219$ Ом. В качестве средства измерения использовался сертифицированный прибор «Ресурс-UF2М». Измерения производились в течение одних суток с интервалом измерения 1 минута (1440 измерений).

На основании произведенных измерений с использованием графического редактора Matlab получены временные диаграммы изменения фазных токов и напряжений (рис. 1, 2).

Результаты исследования

В соответствии с определенными параметрами СУ для изменяющегося уровня несимметрии токов и напряжений в каждый момент времени по программе “Unbalance-2” произведен расчет ПКЭ, характеризующими несимметрию трехфазной системы напряжений, а также дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией фазных токов. К показателям, характеризующим несимметрию трехфазной системы напряжений, как было отмечено, относятся коэффициенты K_{2U} и K_{0U} . Для исследуемой трехфазной четырехпроводной сети 0,4 кВ, питающей в основном коммунально-бытовую нагрузку потребителей, с точки зрения эффективности симметрирования режима работы, наибольший интерес представляет коэффициент K_{0U} . Коэффициент K_{2U} при такой нагрузке потребителей имеет незначительные изменения, и работа симметрирующего устройства практически не оказывает существенного влияния на его изменение. В соответствии с этим анализ действия симметрирующего устройства на качество электрической энергии будем оценивать по коэффициенту K_{0U} .

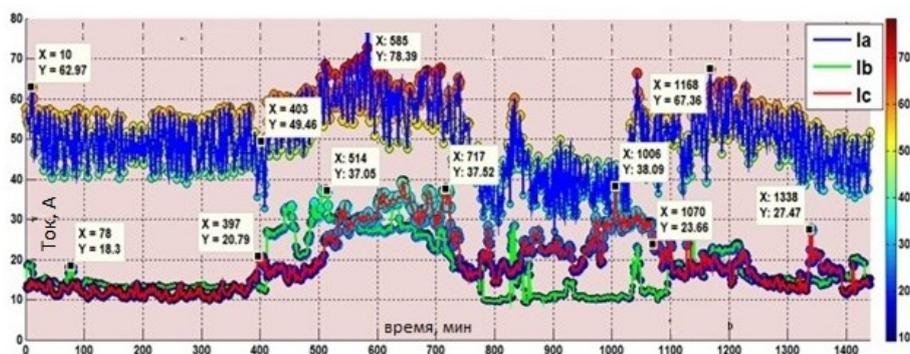


Рис. 1. Диаграмма изменения фазных токов в исследуемой линии

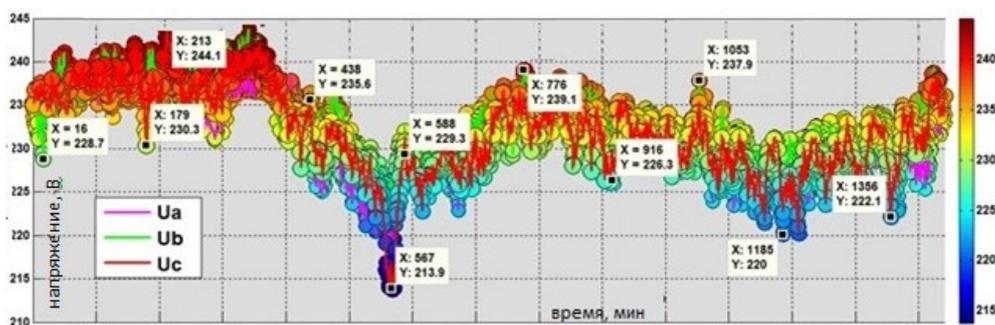


Рис. 2. Диаграмма изменения фазных напряжений в исследуемой линии

На основании произведенных расчетов получены временные диаграммы изменения коэффициентов несимметрии напряжения по нулевой последовательности в конце линии 0,4 кВ (рис. 3 а), к которой подключены потребители, а также на шинах 0,4 кВ силового трансформатора (рис. 3 б). Поскольку изменение фазных значений напряжений (рис. 2) незначительно, соответственно этому и величины коэффициента K_{OU} в измеренном промежутке времени также достигают незначительных величин.

Например, среднее значение K_{OU} в узле нагрузок (рис. 3 а) при отсутствии СУ в сети составило 0,44%, при этом его значение на шинах трансформатора (рис. 3 б) в среднем имеет значение, равное 0,26%. Как видно, эти значения вполне соответствуют нормам качества электрической энергии². Вместе с этим включение СУ в узле нагрузок в значительной степени снижает этот показатель в 4,6 раза (0,097%), а на шинах трансформатора – более чем в 15 раз (0,017%).

Таким образом, качество электрической энергии, обусловленное несимметрией трехфазной системы напряжений, в исследуемой электрической сети соответствует требованиям Государственного Стандарта. При этом использование СУ в значительной степени улучшает исследуемый показатель.

Рассмотрим, как изменяется коэффициент потерь мощности, характеризующий превышение потерь в несимметричном режиме над соответствующими потерями, обусловленными протеканием токов прямой последовательности. На рисунке 4 представлены диаграммы изменения коэффициента K_P при отсутствии СУ в электрической сети и включении его в узле нагрузок.

Анализ рисунка 4 показал, что при отсутствии симметрирующего устройства коэффициент потерь в реальном режиме работы сети, обусловленный токами обратной и нулевой последовательностей при действительном изменении фазных токов (рис. 1) в исследуемом промежутке времени, принимает различные значения от минимального, равного 1,24, до максимального – 4,75. Среднее значение этого коэффициента за период измерения составляет 2,5. Эта цифра означает, что в реальном несимметричном режиме потери электрической энергии в 2,5 раза

превышают потери, которые могли бы иметь место при протекании только токов прямой последовательности. Включение СУ в узле нагрузок позволяет значительно уменьшить значение коэффициента K_P до его среднего значения, равного 1,13, т.е. снижение этого коэффициента составило 54,8%. Рассмотрим, как это повлияло на реальные потери полной мощности в рассматриваемой электрической сети.

На рисунке 5 представлены временные диаграммы изменения полной мощности суммарных потерь в электрической сети.

Анализ рисунка 5 показывает, что среднее за период исследования значение суммарных полных потерь принимает различные значения от минимального, равного 5,6 кВА, до максимального, равного 22,1 кВА. При этом усредненное значение указанных потерь составило 12,676 кВА. Из этих указанных чисел на долю суммарных потерь в линии электропередачи в среднем приходится 5,179 кВА, в силовом трансформаторе – 7,497 кВА (на рисунке диаграммы не показаны). Включение СУ, параметры которого рассчитаны в соответствии с изменяющейся несимметричной нагрузкой, приводит к существенному снижению указанных потерь: в линии – на 49,7% (среднее значение 2,607 кВА); в силовом трансформаторе – на 85,56% (1,083 кВА). Снижение суммарных потерь полной мощности в среднем составило 70,9% (3,69 кВА). При этом суммарные потери полной мощности без учета симметрирования за сутки достигли 18253,71 кВА, а за год – 6662603,17 кВА. Средняя разность суммарных потерь полной мощности до и после включения СУ за минуту работы составила 8,98 кВА. Если предположить, что данный участок электрической сети будет работать непрерывно в течение года, количество сэкономленной полной электрической энергии в среднем за год будет 4723251,84 кВА·ч. Если принять среднее значение коэффициента активной мощности ($\cos \varphi$) для сельских сетей, питающих коммунально-бытовую нагрузку, равным 0,8 (в среднем находится в интервале от 0,75 до 0,85), то экономия активной электрической энергии (без учета стоимости затрат на симметрирующее устройство) составит 3 778 601,42 кВт·ч. В соответствии с [15] затраты на сооружение, обслуживание СУ и потери в нем составляют около 20% суммарного оказываемого им эффекта. Учитывая при этом, что стоимость электрической энергии для сель-

² В соответствии с Государственным стандартом значение K_{OU} в 95% времени интервала измерения не должно превышать 2%.

ских потребителей на 01.01.2021 равна 0,861 руб. за 1 кВт·ч, реальный годовой экономический эффект от применения СУ на исследуемом

участке электрической сети 0,4 кВ может составить 2711146,57 руб.

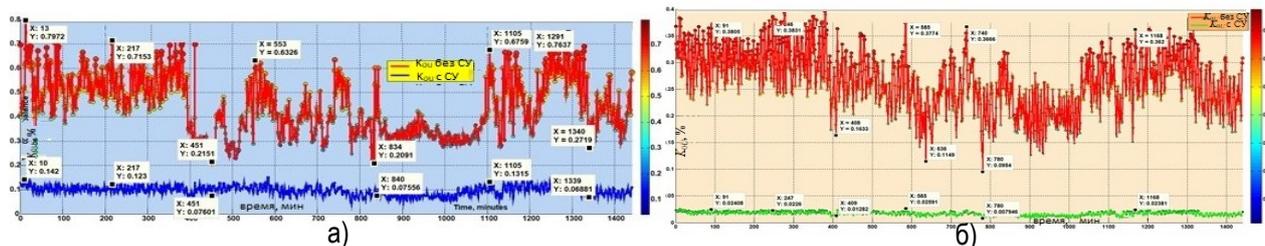


Рис. 3. Диаграммы изменения коэффициента K_{0U} в узле нагрузок (а) и на шинах трансформатора (б) при отсутствии и включении СУ

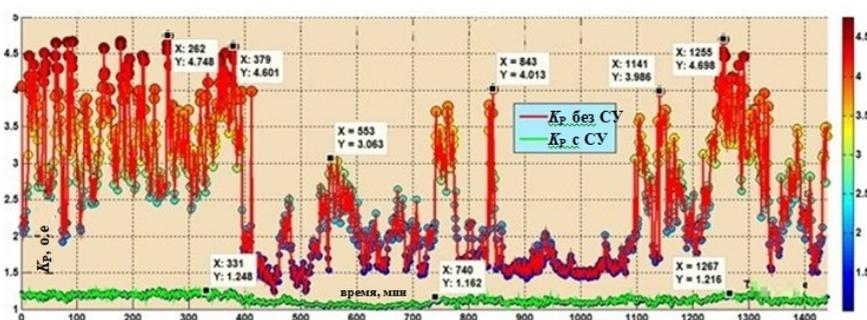


Рис. 4. Диаграмма изменения коэффициента K_p

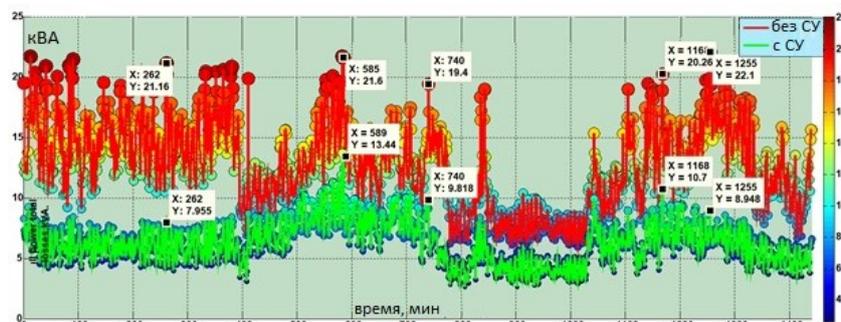


Рис. 5. Диаграммы изменения суммарных потерь полной мощности в исследуемой электрической сети при отсутствии и включении СУ

Заключение

На основе произведенных исследований в действующей электрической сети 0,4 кВ установлено следующее.

1. Несимметричный режим работы сельских распределительных электрических сетей 0,4 кВ является объективным фактором, вызывающим изменение качества электрической энергии и увеличение ее потерь.

2. Исследование режима работы конкретного участка распределительной сети показало, что уровень качества электрической энергии, оцениваемый по коэффициенту несимметрии по

нулевой последовательности, соответствует требованиям Государственного Стандарта.

3. Дополнительные электрические энергии, обусловленные несимметричным режимом работы электрической сети в исследуемой сети за год, могут составить 2711146,57 руб.

Библиографический список

1. Naumov, I.V., Savina, N.V., Shevchenko, M.V. (2018). Modeling of three-phase electric motor operation by the MATLAB system with deteriorated power quality in the 0.38 kV distribution networks. *E3S Web of Conferences*. 58. DOI: 03016. 10.1051/e3sconf/20185803016.

2. Наумов, И. В. Моделирование режимов несимметричного электропотребления в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ при многоступенчатом отборе мощности / И. В. Наумов, А. А. Багаев. – DOI <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104>. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 6 (212). – С. 90-104.
3. Козловская, В. Б. Асимметричные режимы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц. – Текст: непосредственный // Программа «Энергетика» высших учебных заведений и энергетических ассоциаций СНГ. – 2019. – № 62 (3). – С. 232-246.
4. Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral / S. Girshin, V. Goryunov, E. Kuznetsov, et al. *MATEC Web Conf.* 70 10008 (2016). DOI: 10.1051/mateconf/20167010008.
5. Фетисов, Л. В. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения / Л. В. Фетисов, Н. В. Роженцова, О. А. Булатов. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 99-106.
6. Жилин, М. И. Повышение качества электроэнергии / М. И. Жилин, О. В. Воркунов. – Текст: непосредственный // Приоритетные направления развития науки: в 2 частях. – Москва, 2017. – С. 83-85.
7. Naumov, I.V. (2018). Additional Power Losses in Low-Voltage Electrical Networks and Their Influence on People. 844-853. DOI: 10.15405/epsbs.2018.12.103.
8. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 5. DOI: 10.1186/s41601-020-00163-x.
9. Lukovenko, A., Kukartsev, V., Tynchenko, V. et al. (2019). Calculation of balancing and filter compensating devices of the power supply system. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399. 055086. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055086.
10. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгосударственный стандарт: дата введения 2014-07-01. – Москва: Стандартинформ 2014. – 16 с. – Текст: непосредственный.
11. IEEE Recommended practice for the transfer of power quality data // IEEE Std 1159.3-2003. – 2004. – P. 1-138. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2004.94416.
12. EN 50160:2010/A3:2019. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks – 2019
13. Косоухов, Ф. Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Филиппов. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 8-12
14. Косоухов, Ф. Д. Методы расчета и анализа показателей дисбаланса тока и напряжения в сельских распределительных сетях: учебное пособие / Ф. Д. Косоухов. – Ленинград, ЛСХИ, 1984. – 42 с. – Текст: непосредственный.
15. Патент на полезную модель № 61063 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами: № 2006110751/22: заявл. 03.04.2006: опубл. 10.02.2007 / Иванов Д. А., Наумов И. В., Шпак Д. А. [и др.]; заявитель Иркутская государственная сельскохозяйственная академия Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования. – Текст: непосредственный.
16. Патент № 2796074 C1 Российская Федерация, МПК H02J 3/26. устройство для симметрирования токов и напряжений с саморегулируемой индуктивностью: № 2022111636: заявл. 27.04.2022: опубл. 16.05.2023 / Наумов И. В., Федорина Э. С., Якупова М. А., Подъячих С. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского". – Текст: непосредственный.
17. Наумов, И. В. Метод и программа расчета потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством. – Ленинград: СХИ, 1989. – № 3. – 30 с. – Текст: непосредственный.
18. Наумов, И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сель-

ских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" / Наумов Игорь Владимирович. – Иркутск, 2002. – 387 с. – Текст: непосредственный.

19. Наумов, И. В. Выбор параметров устройств симметрирования в распределительных электрических сетях 0,38 кВ / И. В. Наумов, Е. А. Белоусова. – Текст: непосредственный // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (124). – С. 99-107.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610925 Российская Федерация. Unbalance-2: № 2022610152: заявл. 11.01.2022: опубл. 18.01.2022 / И. В. Наумов, Э. С. Федоринова, М. А. Якупова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского». – Текст: непосредственный.

References

1. Naumov, I.V., Savina, N.V., Shevchenko, M.V. (2018). Modeling of three-phase electric motor operation by the MATLAB system with deteriorated power quality in the 0.38 kV distribution networks. *E3S Web of Conferences*. 58. DOI: 03016. 10.1051/e3sconf/20185803016.
2. Naumov, I. V. Modelirovanie rezhimov nesimmetrichnogo elektropotrebleniia v selskikh raspredelitelnykh elektricheskikh setiakh 0,38 kV pri mnogostupenchatom otbore moshchnosti / I. V. Naumov, A. A. Bagaev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 6 (212). – S. 90-104.
3. Kozlovskaiia V. B., Kalechits V. N. Asimmetrichnye rezhimy linii naruzhnogo osveshcheniia // Programma «Energetika» vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh assotsiatsii SNG. – 2019. – No. 62 (3). – S. 232–246.
4. Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral / S. Girshin, V. Goryunov, E. Kuznetsov, et al. *MATEC Web Conf*. 70 10008 (2016). DOI: 10.1051/matecconf/20167010008.
5. Fetisov, L. V. Povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setiakh nizkogo napriazheniia / L. V. Fetisov, N. V. Rozhentsova, O. A. Bulatov // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. – 2018. – T. 20, No. 11-12. – S. 99-106.
6. Zhilin M. I., Vorkunov O. V. Povyshenie kachestva elektroenergii // Prioritetnye napravleniia razvitiia nauki. V 2-kh chastiakh. – Moskva, 2017. – S. 83–85.
7. Naumov, I.V. (2018). Additional Power Losses in Low-Voltage Electrical Networks and Their Influence on People. 844-853. DOI: 10.15405/epsbs.2018.12.103.
8. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 5. DOI: 10.1186/s41601-020-00163-x.
9. Lukovenko, A., Kukartsev, V., Tynchenko, V. et al. (2019). Calculation of balancing and filter compensating devices of the power supply system. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399. 055086. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055086.
10. GOST 32144-2013. Elektricheskaiia energiiia. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia: mezghosudarstvennyi standart: data vvedeniia 2014-07-01. – Moskva: Standartinform 2014. – 16 s.
11. IEEE Recommended practice for the transfer of power quality data // IEEE Std 1159.3-2003. – 2004. – P. 1-138. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2004.94416.
12. EN 50160:2010/A3:2019. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks – 2019.
13. Kosoukhov F. D., Vasilev N. V., Filipov A. O. Snizhenie poter ot nesimetrii tokov i povyshenie kachestva elektricheskoi energii v setiakh 0,38 kV s kommunalno-bytovymi nagruzkami // Elektrotehnika. – 2014. – No. 6. – S. 8–12.
14. Kosoukhov F.D. Metody rascheta i analiza pokazatelei disbalansa toka i napriazheniia v selskikh raspredelitelnykh setiakh: uchebnoe posobie: - Leningrad, LSKhI, 1984. – 42 s.
15. Patent na poleznuuiu model No. 61063 U1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK H02J 3/26. Simmetriuiushchee ustroistvo dlia trekhfaznoi chetyrekhprovodnoi seti s reguliruemyimi parametrami: No. 2006110751/22: zaiavl. 03.04.2006: opubl. 10.02.2007 / D. A. Ivanov, I. V. Naumov, D. A. Shpak [i dr.]; zaiavitel Irkutskaiia gosudarstvennaia selskokhoziaistvennaia akademiia Fed-

eralnoe gosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniia.

16. Patent № 2796074 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK H02J 3/26. ustroistvo dlia simmetrirovaniia tokov i napriazhenii s samoreguliruemoi induktivnostiu: No. 2022111636: zaiavl. 27.04.2022: opubl. 16.05.2023 / I. V. Naumov, E. S. Fedorina, M. A. Iakupova, S. V. Podieiachikh; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia "Irkutskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni A.A. Ezhevskogo".

17. Naumov I.V. Metod i programma rascheta poter moshchnosti i pokazatelei nesimmetrii tokov i napriazhenii v raspredelitelnoi seti 0,38 kV s simmetriruiushchim ustroistvom. – Mekh. i elektr. sots. selsk. khoz-va. – 1989. – No. 3. – 30 s. – ref. Dep. Ruk. No. 22 VS-89 Dep.

18. Naumov, I. V. Snizhenie poter i povysenie kachestva elektricheskoi energii v selskikh raspre-

delitelnykh setiakh 0,38 kV s pomoshchiu simmetriruiushchikh ustroistv: spetsialnost 05.20.02 "Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v selskom khoziaistve": dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Naumov Igor Vladimirovich. – Irkutsk, 2002. – 387 s.

19. Naumov, I. V. Vybore parametrov ustroistv simmetrirovaniia v raspredelitelnykh elektricheskikh setiakh 0,38 kV / I. V. Naumov, E. A. Belousova // Vestnik KrasGAU. – 2017. – No. 1 (124). – S. 99-107.

20. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM No. 2022610925 Rossiiskaia Federatsiia. Unbalance-2: No. 2022610152: zaiavl. 11.01.2022: opubl. 18.01.2022 / I. V. Naumov, E. S. Fedorinova, M. A. Iakupova; zaiavitel Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Irkutskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni A.A. Ezhevskogo».

