

dr.]. – Blagoveshchensk: Dalnevostochnyy GAU, 2023. – 283 s. – DOI 10.22450/9785964205814.

2. Lomakin, S. G. Analiz tekhnicheskogo urovnya zernouborochnykh kombaynov "Rostselmash" / S. G. Lomakin, V. E. Berdyshev // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina". – 2017. – No. 6 (82). – S. 34-42. – DOI 10.26897/1728-7936-2017-6-34-42.

3. Otsenka effektivnosti raboty zernouborochnogo kombayna s aksialno-rotornym molotilno-separiruyushchim ustroystvom / V. I. Orobinskiy, V. P. Shatskiy, N. M. Derkanosova [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – T. 13, No. 1 (64). – S. 12-18. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2020.1.12.

4. Belov M.I., Shreyder Yu.M. Parametry roto-rov molotilno-separiruyushchikh ustroystv zernouborochnykh kombaynov // Universum: tekhnicheskie nauki : elektron. nauchn. zhurn.

2015. № 11 (22). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2769>.

5. Bakhterev, A. A. Sovershenstvovanie protsessa obmolota zernovykh kultur / A. A. Bakhterev, G. A. Iovlev, A. G. Nesgovorov // Teoriya i praktika mirovoy nauki. – 2017. – No. 10. – S. 51-60.

6. Berdyshev, V. E. Kompleksnyy pokazatel kachestva raboty zernouborochnogo kombayna / V. E. Berdyshev // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. – 2010. – No. 2 (18). – S. 143-150.

7. Shreyder, Yu. M. Povyshenie effektivnosti zernouborochnykh kombaynov s aksialno-rotornymi molotilno-separiruyushchimi ustroystvami / Yu. M. Shreyder // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2015. – No. 2. – S. 16-19.

8. Zelenskaya, O. V. Vliyaniye privedennoy podachi na poteri i drobienie zerna pri uborke / O. V. Zelenskaya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2010. – No. 4 (27). – S. 50-51.



УДК 621.316.11

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-257-3-67-73

И.В. Наумов, А.А. Багаев, С.В. Подъячих,
Д.А. Иванов, Н.Б.Ж. Нтсама
I.V. Naumov, A.A. Bagaev, S.V. Podyachikh,
D.A. Ivanov, N.B.J. Ntsama

ОЦЕНКА УРОВНЯ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОГО ГАУ ИМ. А.А. ЕЖЕВСКОГО

ASSESSING THE LEVEL OF UNBALANCED ELECTRICITY CONSUMPTION BY AGRICULTURAL ENTERPRISES: CASE STUDY OF THE IRKUTSK STATE AGRICULTURAL UNIVERSITY NAMED AFTER A.A. YEZHEVSKY

Ключевые слова: несбалансированные режимы, показатели небаланса, балансирующее устройство, качество и потери электрической энергии.

Целью исследования является анализ несбалансированных режимов работы электрических сетей низкого напряжения, обусловленных несимметрично-несинусоидальным электропотреблением в административных и офисных зданиях. В качестве объекта выбрано учебное заведение – Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского. Для достижения поставленной цели решены задачи, в числе которых обоснование научно-методологической базы оценки несбалансиро-

ванных режимов; разработка специализированного технического средства балансировки и доказательство его эффективности по минимизации несбалансированных режимов и их последствий в электрических сетях. На основании реальных измерений в действующей внутренней электрической сети учебного заведения произведены расчет и анализ исследуемых показателей несбалансированности при отсутствии в сети разработанного балансирующего устройства (БУ) и при внедрении в исследуемую сеть имитационной модели данного устройства. В результате произведенных исследований установлено, что в действующей электрической сети вуза показатели небаланса, характеризующие качество

электроэнергии, почти на 80% превышают установленные пределы и почти на 70% превышают потери активной мощности и энергии по сравнению с идеальным (сбалансированным) режимом работы сети. Установлено, что интеграция в исследуемую сеть имитационной модели БУ позволяет снизить показатели качества на 50% и более, а показатель, характеризующий дополнительные потери мощности, – почти на 20%. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования может составить более 118 тыс. руб. Использовались методы симметричных составляющих, численного анализа, а также технология машинного обучения на основе авторского программного обеспечения. Результаты исследования могут представлять интерес для ученых и аспирантов, занимающихся исследованиями качества электрической энергии.

Keywords: *unbalanced modes, unbalance indices, balancing device, quality and loss of electrical energy.*

The research goal is to analyze the unbalanced operating modes of low-voltage electrical networks caused by asymmetrically non-sinusoidal power consumption in administrative and office buildings. The educational institution chosen as the research target is the Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevsky. There were the following research objectives: the

substantiation of the scientific and methodological basis for assessing unbalanced regimes; development of a specialized balancing technique and proof of its effectiveness in minimizing unbalanced modes and their consequences in electrical networks. Based on real measurements in the operating internal electrical network of the educational institution, the calculation and analysis of the studied imbalance indices were performed in the absence of a developed balancing device (BU) in the network and when a simulation model of this device was introduced into the studied network. It was found that in the operating electrical network of the university, the unbalance indices characterizing the quality of electricity exceeded the established limits by almost 80% and the losses of active power and energy by almost 70% compared to the ideal (balanced) mode of operation of the network. It was determined that the integration of the simulation model of the balancing device into the studied network may reduce quality indices by 50% or more, and the index characterizing additional power losses - by almost 20%. The expected yearly economic effect from the implementation of the research findings may amount to more than 118 thousand rubles. The methods of symmetric components, numerical analysis and machine learning technology based on the authors' software were used. The research findings may be of interest to scientists and post-graduate students engaged in research on the quality of electrical energy.

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: багаев710@mail.ru.

Подъячих Сергей Валерьевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: psv78@yandex.ru.

Иванов Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: ivanov-irk@yandex.ru.

Нтсана Нди Бернард Жосселин, аспирант, ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, п. Молодежный, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: dimitryntsama8@gmail.com.

Naumov Igor Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Irkutsk State Agricultural University, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: professorsnaumov@list.ru.

Bagaev Andrey Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: багаев710@mail.ru.

Podyachikh Sergey Valerevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: psv78@yandex.ru.

Ivanov Dmitriy Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Irkutsk State Agricultural University, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: ivanov-irk@yandex.ru.

Ntsama Ndi Bernard Josselin, post-graduate student, Irkutsk State Agricultural University, Irkutsk Region, Russian Federation, e-mail: dimitryntsama8@gmail.com.

Введение

Из перечня исследуемых режимов, для которых государственный стандарт [1] устанавливает нормы качества электроэнергии (ЭЭ), характеризующие уровень электромагнитной совместимости технических средств в едином электромагнитном пространстве, центральное место

занимают режимы несимметрии и несинусоидальности трёхфазной системы напряжений. Обобщенное несимметрично-несинусоидальное электропотребление можно объединить под одним определением – несбалансированного режима работы (НРР), который является объективным, поскольку отражает реальность элек-

тропотребления в низковольтных электрических сетях 0,4 кВ.

Значительное количество публикаций посвящены исследованиям ННР сетей 0,4 кВ, питающих различные объекты хозяйственной деятельности [2, 3]. Основной характеристикой несимметричного электропотребления является появление симметричных компонентов обратной и нулевой последовательностей (токов и напряже-

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3} \cdot (I_a + \underline{a}I_b + \underline{a}^2I_c); I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + \underline{a}^2I_b + \underline{a}I_c); I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c); \\ U_1 &= \frac{1}{3} \cdot (U_a + \underline{a}U_b + \underline{a}^2U_c); U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_a + \underline{a}^2U_b + \underline{a}U_c); U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_a + U_b + U_c). \end{aligned} \quad (1)$$

При этом методы определения этих симметричных компонентов представлены в [5].

Возникновение несинусоидальных режимов вызывается потоком высших гармонических составляющих (ВГС) токов и напряжений, возникающая вследствие работы оборудования, имеющего нелинейную вольтамперную характеристику. При этом происходит изменение синусоидальной формы временной диаграммы. При этом также образуются дополнительные симметричные компоненты – прямая последовательность: $\sum_4^{40} X_{APS} = X_4 + X_7 + X_{10} + \dots + X_{40}$; обратная: $\sum_2^{38} X_{ANS} = X_2 + X_5 + X_8 + \dots + X_{38}$ и нулевая: $\sum_2^{38} X_{AZS} = X_3 + X_6 + X_9 + \dots + X_{39}$, где за параметр X может приниматься любой параметр: ток (I), напряжение (U), сопротивление (Z), эдс (E).

Таким образом, **цель** исследований определяется исследованием несинусоидально-несимметричных режимов внутренних электрических сетей административных зданий. Для достижения указанной цели необходимо решить ряд **задач**: произвести измерения в действующей электрической сети объекта исследования;

$$K_{P(HPP)} = 1 + (K_{IAPS})^2 + K_{2i}^2 + (K_{IANS})^2 + \{K_{0i}^2 + (K_{IAZS})^2\}. \quad (2)$$

Составляющие, входящие в выражение (2), подробно описаны в [6].

Многочисленными исследованиями, произведенными в разное время установлено, что наиболее эффективным средством минимизации последствий несбалансированных режимов являются специализированные балансирующие устройства, представляющие собой универсальное техническое средство, совмещающее в своем составе устройства, позволяющие в автоматическом режиме создавать колебательные контуры для всех токов нулевой последовательности, как основной частоты (I_0), так и токов ВГС – ($\sum_3^{21} I_{AZS}$); дополнительных токов прямой последовательности от действия ВГС – ($\sum_4^{13} I_{APS}$) и дополнительных токов обратной последовательности от действия ВГС – ($\sum_2^{17} I_{ANS}$).

В качестве одного из таких технических средств может быть использовано балансирующее устройство (БУ) [7], параметры которого определяются по следующим выражениям [6]:

$$Y_{1\text{БУННР}}(\{U_1 + \sum_4^{40} U_{APS}\}, \{I_1 + \sum_4^{40} I_{APS}\}, t_0, \bar{t}_i) = \frac{1}{14,1428 \cdot (\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{I_1 + \sum_4^{40} I_{APS}\}(t)}{\{U_1 + \sum_4^{40} U_{APS}\}(t)} dt;$$

ний), вызванных основной частотой (50, 60 Гц). Впервые эти симметричные компоненты предложены Ч.С. Фортестью в 1918 г. в качестве метода расчета несимметричных режимов (метод симметричных составляющих) [4].

Предложенный метод позволяет определить симметричные составляющие токов и напряжений, исходя из решения следующих уравнений:

на основе авторского программного обеспечения и разработанной модели балансирующего устройства (БУ) произвести расчеты и анализ эффективности БУ по нормализации качества электрической энергии и снижению ее потерь.

Методология несбалансированных режимов. Оценить качество ЭЭ в условиях несбалансированного электропотребления можно с помощью установленных критериев, объединяющих показатели несимметрии и несинусоидальности напряжения, расчет допустимых значений которых подробно представлен в [6]. Значение установленных показателей небаланса напряжений по прямой, обратной и нулевой последовательности составляют соответственно: $K_{1\text{УННР}} = 9\%$; $K_{1\text{УННР}} = 13,5\%$ и $K_{0\text{УННР}} = 8,8\%$. При этом значение суммарного коэффициента небаланса напряжения ($K_{\text{УННР}}$) составляет 12% [6].

Следует отметить, что кроме показателей небаланса напряжений существенным критерием оценки несбалансированных режимов может служить коэффициент дополнительных потерь мощности [6]:

$$Y_{2\text{БУННRP}}(\{U_2 + \sum_2^{38} U_{ANS}\}, \{L_2 + \sum_2^{38} L_{ANS}\}, t_0, \bar{t}_i) = \frac{1}{14,1428 \cdot (\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{U_2 + \sum_2^{38} U_{ANS}\}(t)}{\{U_1 + \sum_2^{38} U_{ANS}\}(t)} dt;$$

$$Y_{0\text{БУННRP}}(\{U_0 + \sum_3^{39} U_{AZS}\}, \{L_0 + \sum_3^{39} L_{AZS}\}, t_0, \bar{t}_i) = \frac{6}{(\bar{t}_i - t_0)} \cdot \int_{t_0}^{\bar{t}_i} \frac{\{U_0 + \sum_3^{39} U_{AZS}\}(t)}{\{U_0 + \sum_3^{39} U_{AZS}\}(t)} dt. \quad (3)$$

Для производства расчетов несбалансированных режимов использовано программное обеспечение [8].

Средства измерения и инструментарий расчетов несбалансированных режимов. Все расчеты показателей несимметрии и несбалансированности, позволяющие определять исследуемые показатели небаланса по напряжению и коэффициент потерь мощности, производятся на основании измерений в действующих электрических сетях.

Для измерения исследуемых параметров электрической энергии, а также тех величин, которые лежат в основе формирования алгоритмов расчета исследуемых показателей, можно использовать любые приборы, сертифицированные в Российской Федерации. Для исследований несбалансированных режимов нами используется сертифицированный измерительный комплекс PQM-701, позволяющий производить необходимые измерения в соответствии с требованиями стандарта [8], устанавливающего недельный срок производства измерений.

В качестве инструмента расчета несбалансированных режимов используется программный комплекс «Unbalance – 4» [9]. Программа написана в MATLAB.

Результаты исследований

Объектом исследования несбалансированных режимов принята внутренняя электрическая сеть 0,4 кВ главного корпуса Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. Основными потребителями электрической энергии являются учебные аудитории и лаборатории, а также административно-хозяйственные отделы с электроприемниками освещения, лабораторного оборудования и около 500 шт. персональных компьютеров. Измерения производились в период с 10:00 ч 11 апреля по 9:50 ч 18 апреля 2023 г. Для измерений, как уже отмечалось, использовался прибор PQ-701. Рассмотрим изменение показателей небаланса в исследуемой электрической сети.

На рисунке 1 представлены временные диаграммы изменения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности (при несимметричном электропотреблении) и изменение этих же показателей в объединенном несбалансированном электропотреблении. Уровень несимметричного электропотребления мало влияет на значения компонентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям (рис. 1 а).

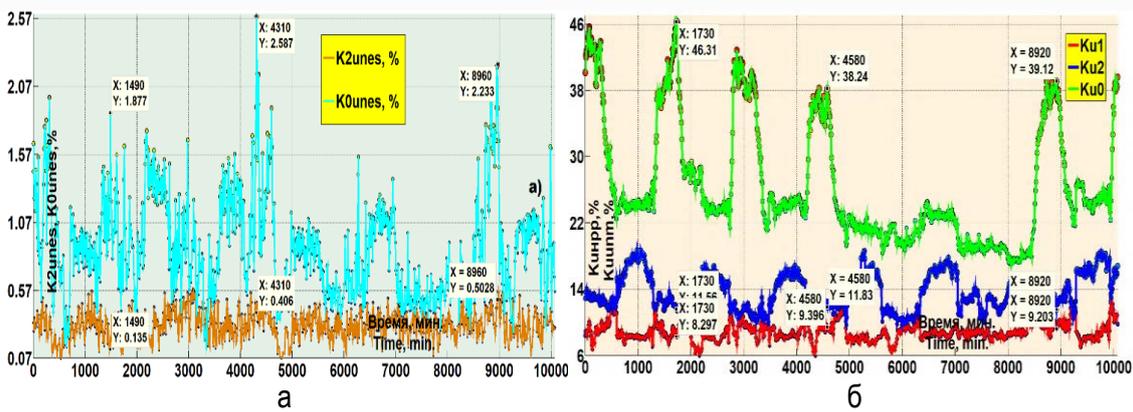


Рис. 1. Динамика изменения компонентов несимметрии напряжений (а) и компонентов несбалансированности (б) напряжений по обратной и нулевой последовательностям во внутренней сети университета

Их усредненные за период исследования значения составляют 0,31 и 0,88% соответственно, что вполне удовлетворяет требованиям стандарта (2%) [1]. Вместе с этим аналогичные коэффициенты в обобщенном несбаланси-

рованном режиме (рис. 1 б) в среднем составляют 8,9; 13,6 и 26,5% соответственно. Сравнительные предельные значения для обобщенных коэффициентов небаланса напряжения (9; 13,5 и 8,8%) с полученными реальными значениями,

можно сделать вывод о том, что среднее значение компонента небаланса прямой последовательности, равное 8,9% (по сравнению с полученным значением 9%), не превышает установленного значения; по коэффициенту небаланса по обратной последовательности значение, равное 13,64%, незначительно превышает полученное нормативное значение (13,5%). По коэффициенту небаланса по нулевой последовательности – усредненное реальное значение, равное 26,5%, превышает полученное предельное значение этого показателя (8,8%) в 3 раза. Значение суммарного коэффициента небаланса напряжения (рис. 2), которое, как установлено, не должно превышать 12%, в действительности составляет 19,5% (превышение составляет 62,5%). Рассмотрим, как изменяются значения показателей небаланса и коэффициента потерь мощности при подключении балансирующего устройства (БУ).



Рис. 2. Временная диаграмма изменения суммарного коэффициента небаланса напряжения электрической сети университета

На рисунке 3 представлены диаграммы изменения объединенных показателей несбалансированности напряжения ($K_{2УНРР}(\%)$, $K_{0УНРР}(\%)$) и коэффициента потерь мощности ($K_{P(НРР)}$) при отсутствии и при имитационном моделировании включения балансирующего устройства в исследуемой сети.

Анализ рисунка 3 показал следующее. Несбалансированность электропотребления повлияла на суммарные коэффициенты обратной и нулевой последовательностей (рис. 3 а), усредненные значения которых при отсутствии БУ составили 13,6 и 26,5% соответственно. При этом коэффициент потерь мощности (K_p) превысил свое значение, по сравнению с условным

сбалансированным режимом, на 66% ($K_p = 1,66$) (рис. 3 б).

При включении БУ эти значения снизились: $K_{2УНРР}(\%)$ – на 48,6% (до 6,8%); $K_{0УНРР}(\%)$ – на 99,8% (до величины 0,06%) и K_p – на 19% (до 1,35). Следовательно, полученные результаты подтверждают эффективность предлагаемой модели балансирующего устройства.

Рассмотрим, насколько балансирующее устройство повлияет на реальные потери активной мощности в исследуемой электрической сети.

На рисунке 4 представлено изменение потерь активной мощности в электрической сети университета. Необходимо отметить, что расчет потерь при подключении БУ в сеть производился с учетом потерь в самом устройстве. В соответствии с произведенными расчетами усредненное значение потерь активной мощности составило 3,27 кВт. При подключении балансирующего устройства в сеть эти потери уменьшились на 39% – до величины 2 кВт. Таким образом, эффективность балансирования режима составила 1,27 кВт в усредненном 10-минутном временном интервале. Если предположить, что уровень несбалансированности режима работы исследуемой электрической сети останется неизменным, среднегодовая экономия электрической энергии составила бы 66751,2 кВт·ч электрической энергии, что в ценах 2025 г. (при одноставочной тарифной ставке для первого диапазона объемов потребления электроэнергии, равной 1,78 руб/кВт·ч) [10] приведет к годовой экономии более 118817 руб.

Выводы

1. Уровень несбалансированного электропотребления в исследуемой электрической сети высшего учебного заведения достаточно высок. При этом наибольшая часть несбалансированности режима работы сети вызвана изменением гармонического состава токов и напряжений, ухудшающих качество электрической энергии и увеличивающих ее дополнительные потери.

2. Определены предельно допустимые значения показателей небаланса, которые могут использоваться для оценки уровня несбалансированности в любых низковольтных электрических сетях.

3. Предлагаемое разработанное техническое средство позволяет в значительной степени минимизировать последствия несбалансированно-

го электропотребления в исследуемой электрической сети, в результате чего эффективность его применения может превысить 118 тыс. руб. При этом происходит улучшение качества элек-

трической энергии (практически на 80%), что также позволяет судить об эффективности предлагаемых мероприятий.

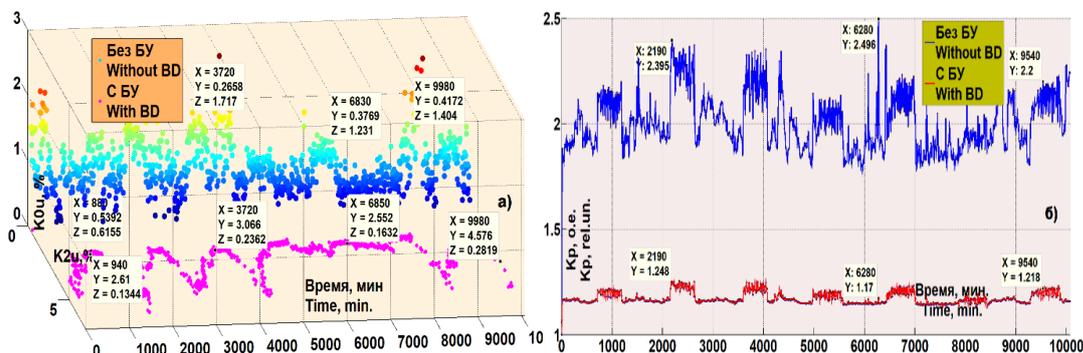


Рис. 3. Диаграммы изменения коэффициентов K_{2u} , K_{0u} и K_p до и после подключения БУ

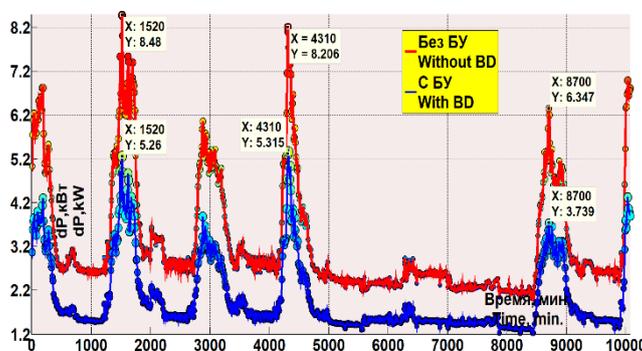


Рис. 4. Изменения потерь активной мощности во внутренней электрической сети исследуемого объекта

Библиографический список

- ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения 2014.07.01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 06.05.2025 г.). – Текст: электронный.
- Наумов, И. В. Технологические предпосылки оценки несбалансированных режимов работы в компонентах низковольтных систем электроснабжения и способы минимизаций последствий этих режимов / И. В. Наумов. – Текст: непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2024. – Т. 17, № 6. – С. 777-800.
- Килин, С. В. Анализ несинусоидальности и асимметрии в электрических сетях 0,4-10 кВ / С. В. Килин, С. В. Вендин. – Текст: непосредственный // Проблемы электрификации сельского хозяйства: сборник научных трудов по материалам Всероссийского научно-практической

- конференции, Ярославль, 15 ноября 2017 года. – Ярославль, 2018. – С. 15-21.
- Фортескью, Ч. Л. Метод симметричных координат, применяемый к решению многофазных сетей / Ч. Л. Фортескью. – Текст: непосредственный // AIEE Transactions: 34-й ежегодный съезд Американского института инженеров-электриков (AIEE). – Атлантик-Сити, штат Нью-Джерси, 1918. – Т. 37, ч. II. – С. 1027-1140.
- Косоухов, Ф. Д. Энергосбережение в низковольтных электрических сетях при несимметричной нагрузке: монография / Ф. Д. Косоухов. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар, 2016. – 280 с. – Текст: непосредственный.
- Наумов, И. В. Несбалансированные режимы работы распределительных электрических сетей низкого напряжения: монография: в 2 томах. Том 1. Методологические основы системного подхода к оценке несбалансированных режимов / И. В. Наумов. – Москва: Колос-с, 2025. – 226 с. – Текст: непосредственный.
- Патент № 2811981 С1, РФ, МПК H02J 3/26. Универсальное балансирующее устрой-

ство для четырехпроводных электрических сетей / Наумов И. В., Подъячих С. В., Ермолаев Д. С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского» – № 2023116737; заявл. 23.06.2023; опублик. 22.01.2024.

8. ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Межгосударственный стандарт: дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ 2014. – 52 с. – Текст: непосредственный.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686894 Российская Федерация. «Unbalance-4 (Программа по расчету несбалансированных режимов работы в эл. сетях 0,4 кВ)»: № 2023685700: заявл. 24.11.2023; опублик. 11.12.2023 / И. В. Наумов, С. В. Подъячих, Д. С. Ермолаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского». – EDN FVADWH. – Текст: непосредственный.

10. Тарифы на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Иркутской области на 2025 год. – URL: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/7031.html> (дата обращения: 30.08.2025). – Текст: электронный.

References

1. GOST 32144-2013. Mezhgosudarstvennyy standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Data vvedeniya 2014.07.01. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (data obrashcheniya: 06.05.2025 g.).

2. Naumov I.V. Tekhnologicheskie predposylki otsenki nesbalansirovannykh rezhimov raboty v komponentakh nizkovoltnykh sistem elektrosnabzheniya i sposoby minimizatsiy posledstviy etikh rezhimov. Zhurnal Sibirskogo federalnogo universi-

teta. Tekhnika i tekhnologii, 2024. T.17, No. 6. – S. 777-800.

3. Kilin S.V., Vendin S.V. Analiz nesinusoidalnosti i asimmetrii v elektricheskikh setyakh 0,4-10 KV. Problemy elektrifikatsii selskogo khozyaystva: sbornik nauchnykh trudov po materialam Vserossiyskogo NPK. Yaroslavl, 2018. S. 15-21.

4. Chariz L. Forteskyu, Metod simmetrichnykh koordinat, primenyaemyy k resheniyu mnogofaznykh setey. Doklad, 34-y ezhegodnyy sezd Amerikanskogo instituta inzhenerov-elektrikov (AI-EE), Atlantik-Siti, shtat Nyu-Dzhersi, 28 iyulya 1918 goda.

5. Kosoukhov F.D. Energoberezhnie v nizkovoltnykh elektricheskikh setyakh pri nesimmetrichnoy nagruzke: monografiya. Sankt-Peterburg; Moskva-Krasnodar, 2016. 280 s.

6. Nesbalansirovannye rezhimy raboty raspredelitelnykh elektricheskikh setey nizkogo napryazheniya: monografiya v 2-kh tomakh. T. 1. Metodologicheskie osnovy sistemnogo podkhoda k otsenke nesbalansirovannykh rezhimov. Moskva: Kolos-s, 2025. 226 s.

7. Naumov I.V., Podyachikh S.V., Ermolaev D.S. Universalnoe balansiruyushchee ustroystvo dlya chetyrehprovodnykh elektricheskikh setey, Patent na izobretenie No. 2811981 S1, RF, MPK H02J 3/26. Opubl. 22.01.2024.

8. GOST 30804.4.30-2013 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii. Mezhgosudarstvennyy standart: data vvedeniya 2014-01-01. – Moskva: Standartinform, 2014. – 52 s.

9. Naumov I.V. “Unbalance-4”. Programma po raschetu nesbalansirovannykh rezhimov raboty v el. setyakh 0,4 KV / I.V. Naumov, S.V. Podyachikh, D.S. Ermolaev // Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM: RU2023686894 ot 11.12.2023. Byul. No. 12.

10. Tarify na elektricheskuyu energiyu dlya naseleniya i priravnennykh k nemu kategoriy potrebiteley po Irkutskoy oblasti na 2025 god [Elektronnyy resurs]. URL: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/7031.html> (data obrashcheniya 30.08.2025).

