

Научная статья
УДК 621.316 (470.333)

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

¹Безик Валерий Александрович, ²Шелоп Михаил Александрович

¹ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

²ПАО «Россети Центр» - «Брянскэнерго», Брянск, Россия

Аннотация. Целью исследования является определение ключевых показателей качества электроэнергии в сельских электрических сетях Брянской области и проведение их анализа на соответствие нормативным требованиям, установленным ГОСТ 32144-2013. Для сбора данных использовался измерительный комплекс «Ресурс UF». Объём выборки составил 100 измерений, выполненных на отходящих линиях трансформаторных подстанций (ТП) напряжением 10/0,4 кВ с трансформаторами мощностью от 25 до 630 кВА. В ходе анализа полученных данных установлено систематическое несоответствие ряда показателей качества электроэнергии нормативным значениям. Наиболее часто встречающимися нарушениями являются медленные отклонения напряжения, несимметрия напряжений. Также выявлены превышения нормативных значений коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям. Два показателя - отклонение напряжения и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности часто выходят за рамки допустимых значений одновременно. Несмотря на все более широкое применение современных преобразовательных устройств нормативные значения по содержанию гармонических составляющих не были превышены. Выявлены ключевые причины нарушения качества электроэнергии, среди которых: устаревшая инфраструктура, значительные расстояния воздушных линий, недостаточная оснащённость оборудованием для поддержания стабильности напряжения и неудовлетворительное состояние контуров заземления. Предлагается необходимость дальнейших исследований для совершенствования методов управления качеством электроэнергии в указанных сетевых зонах.

Ключевые слова: качество электрической энергии, медленные изменения напряжения, несиноусоидальность напряжения, несимметрия напряжений, сельские электрические сети, отклонение частоты.

Для цитирования: Безик В.А., Шелоп М.А. Анализ качества электрической энергии сельских распределительных сетей Брянской области // Вестник Брянской ГСХА. 2026. №5 (117). С. 72-77.

Original article

ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY QUALITY IN RURAL DISTRIBUTION NETWORKS OF THE BRYANSK REGION

¹Valeriy A. Bezik, ²Michail A. Shelop

¹Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia

²PJSC "Rosseti Center" – "Bryanskenergo", Bryansk, Russia

Abstract. The aim of this research is to determine key power quality indicators in rural electrical networks of the Bryansk region and analyze them for compliance with the regulatory requirements established by GOST 32144-2013. The Resurs UF measuring complex was used to collect data. The sample size consisted of 100 measurements performed on outgoing lines of transformer substations (TS) with a voltage of 10/0.4 kV with transformers with a capacity of 25 to 630 kVA. During the analysis of the obtained data, systematic non-compliance of a number of power quality indicators with the standard values was established. The most frequently encountered violations are slow voltage deviations and voltage asymmetry. Exceedances of the standard values of the zero-sequence and negative-sequence voltage unbalance coefficients were also revealed. Two indicators - voltage deviation and zero-sequence voltage unbalance coefficient - often exceed the permissible values simultaneously. Despite the increasingly widespread use of modern converter devices, the standard values for the content of harmonic components were not exceeded. Key causes of power quality problems have been identified, including: outdated infrastructure, long overhead transmission lines, insufficient voltage stability equipment, and poor grounding circuits. Further research is needed to improve power quality management methods in these network zones.

Keywords: electric energy quality, slow voltage changes, voltage non-sinusoidality, voltage unbalance, rural electrical networks, frequency deviation.

For citation: Bezik V.A., Shelop M.A. Analysis of electric energy quality in the rural distribution networks of the Bryansk region // Vestnik of the Bryansk Agricultural Academy. 2026. №5 (117). pp. 72-77.

Введение. Электрическая энергия является фундаментальным ресурсом, обеспечивающим функционирование всех отраслей хозяйственной деятельности и выступающим в качестве товара в отношениях между энергоснабжающими организациями и потребителями. Качество электроэнергии выступает важнейшим фактором, определяющим эффективность её использования и саму возможность нормальной эксплуатации электрооборудования потребителей. Качество электрической энергии определяется как степень соответствия совокупности её характеристик требованиям, необходимым для нормальной работы электроприёмников, установленным в нормативных документах.

Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) - это совокупность параметров напряжения в точке передачи, количественно описывающих его отклонение от номинальной формы и величины. Они позволяют провести количественную оценку соответствия этих характеристик установленным нормам. Потребители предъявляют к ПКЭ определённые требования, поскольку их соблюдение напрямую влияет на работоспособность электроустановок, а также на безопасность обслуживающего персонала. Отклонение показателей за пределы допустимых значений может привести к серьёзным негативным последствиям, включая отказ оборудования и создание аварийных ситуаций. Поддержание качества электроэнергии на должном уровне является необходимым условием для обеспечения штатного режима работы устройств и выполнения ими заданных функций.

В Российской Федерации требования к качеству электрической энергии в сетях общего назначения переменного тока (трёхфазного и однофазного) частотой 50 Гц регламентируются межгосударственным стандартом ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В соответствии с положениями стандарта, к основным показателям качества электрической энергии относятся:

- отклонение частоты (Δf);
- медленные изменения напряжения, оцениваемые по отрицательным ($\delta U_{(-)}$) и положительным ($\delta U_{(+)}$) отклонениям напряжения;
- колебания напряжения и фликер;
- несинусоидальность напряжения, оцениваемая по суммарному коэффициенту гармонических составляющих (k_u) и коэффициентам гармонических составляющих напряжения ($k_{u(n)}$) до 40-й гармоники;
- несимметрия напряжений в трёхфазных системах, определяемая коэффициентами несимметрии напряжений по обратной ($k_{2(u)}$) и нулевой последовательностям ($k_{0(u)}$);
- случайные события в сети, такие как прерывания напряжения, провалы напряжения, перенапряжения и импульсные напряжения.

Для расчёта и анализа отдельных показателей применяются дополнительные характеристики и методические подходы.

Цель исследования - определение ключевых показателей качества электроэнергии в сельских электрических сетях Брянской области и проведение их анализа на соответствие нормативным требованиям, установленным ГОСТ 32144-2013, формирование выводов относительно качества предоставляемой электроэнергии.

Результаты исследований и их обсуждение. Измерения проводились приборами «Ресурс UF» (измерители «Ресурс-UF2M» и «Ресурс-UF 0.1») согласно методическим рекомендациям нормативных документов (РД 153-34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии»; ГОСТ 33073-2014. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения; ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Дата введения 2014-01-01) и инструкции по контролю качества электроэнергии в распределительных сетях номинальным напряжением до и выше 1000 вольт. Измеренные значения сравнивались с нормативными по ГОСТ 32144 – 2013.

В течение 2024 года снимались показания на шинах подстанций 10/0,4 кВ расположенных в 14 сельских районах Брянской области. Мощности подстанций варьировались от 25 до 630 кВА.

По итогам анализа результатов исследований протоколов замеров построена гистограмма распределения отклонений основных показателей качества электроэнергии от нормативных значений по ГОСТ 32144 - 2013 (рисунок 1).

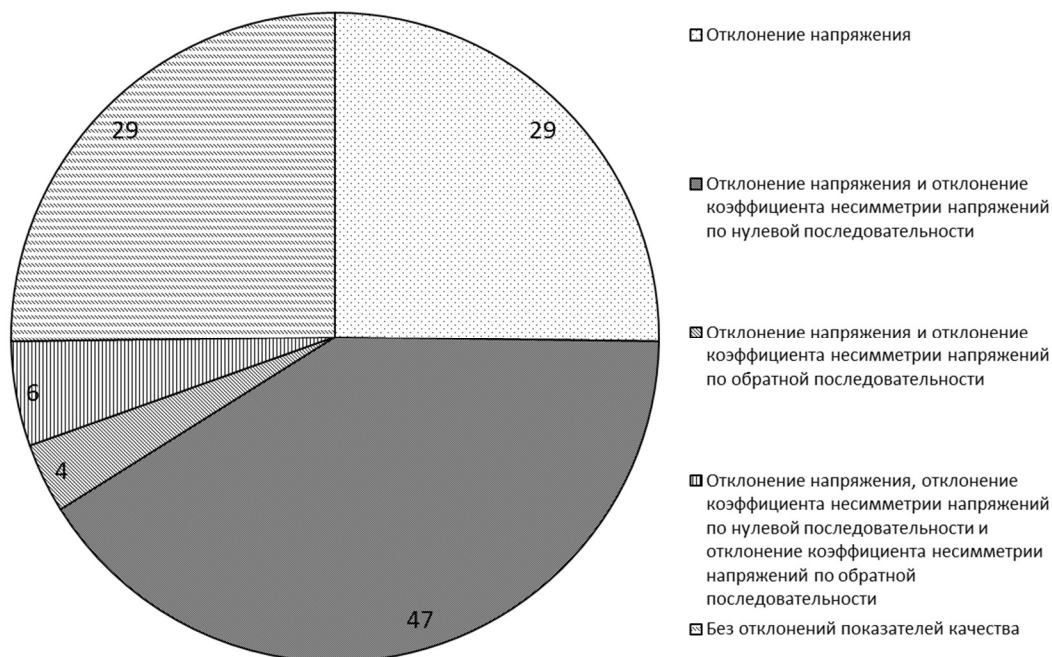


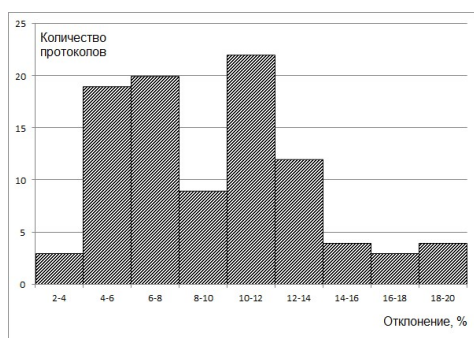
Рисунок 1 – Гистограмма распределения протоколов с отклонениями ПКЭ от нормативных значений

Распределение протоколов по видам отклонений показателей качества от общего числа протоколов составили:

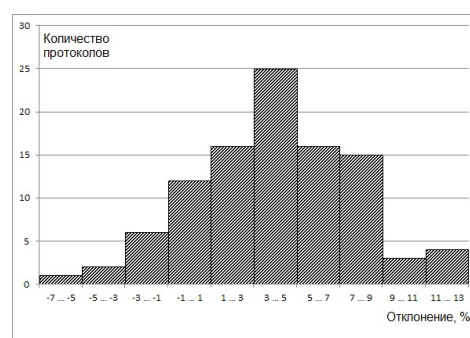
- Отклонение напряжения – 29%.
- Отклонение напряжения и отклонение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности – 47%.
- Отклонение напряжения и отклонение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности – 4%.
- Отклонение напряжения, отклонение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности и отклонение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности – 6%.
- С нормативными отклонениями показателей качества – 29%.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих K_U , частные коэффициенты гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ по результатам измерений соответствовали нормативным по ГОСТ 32144 - 2013. Также не выходили за рамки нормативных отклонения частоты Δf .

Для анализа результатов будем рассматривать минимальные и максимальные отклонения, что позволяет перейти от усредненных статистических данных к анализу граничных режимов работы сети. Это необходимо для обеспечения надежности электроснабжения, электромагнитной совместимости технических средств и выполнения требований ГОСТ 32144-2013, который предписывает оценивать качество энергии не по средним значениям, а по вероятностным характеристикам, включающим экстремумы выборки.



а)



б)

Рисунок 2 – Количество протоколов с максимальными (а) и минимальными (б) значениями установившего отклонения напряжения δU_y

Распределение протоколов по установившимся минимальным и максимальным отклонениям напряжения показаны на рисунке 2. Большое количество протоколов с максимальными отклонениями 5-12 % может быть объяснено их возникновением при сбросе нагрузки и приближении отклонения к установленным на трансформаторных подстанциях надбавкам. Большее число протоколов с минимальным отклонением напряжения 3-5% хорошо согласуется с наибольшим допустимым падением напряжения в 5%.

Большое количество протоколов с максимальными и минимальными значениями установившего отклонения напряжения приближающихся и даже превышающих границы допустимых значений сигнализирует о необходимости регулировки напряжения под нагрузкой (РПН) трансформаторов, установки конденсаторных установок или применения активных фильтров гармоник, что неизбежно приведет к увеличению затрат.

На рисунке 3 показано распределение протоколов по максимальным и минимальным значениям коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , а на рисунке 4 распределение по минимальных и максимальных значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} .

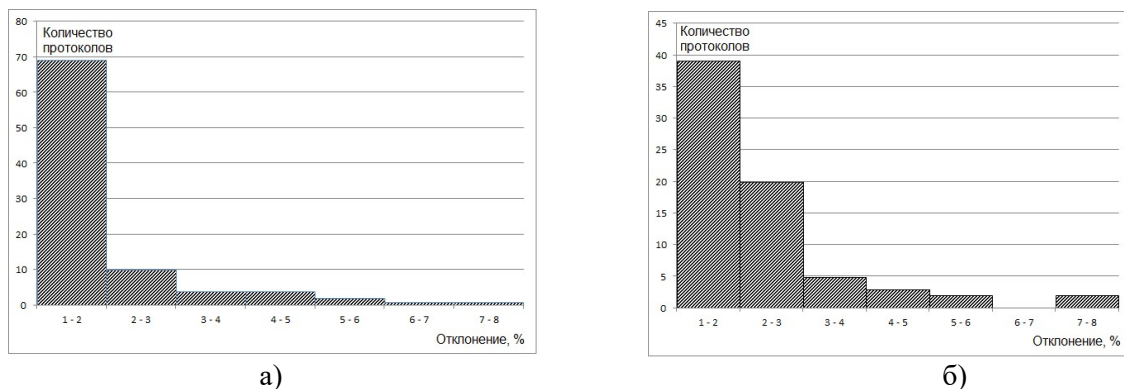


Рисунок 3 – Количество протоколов с максимальными (а) и минимальными (б) значениями коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}

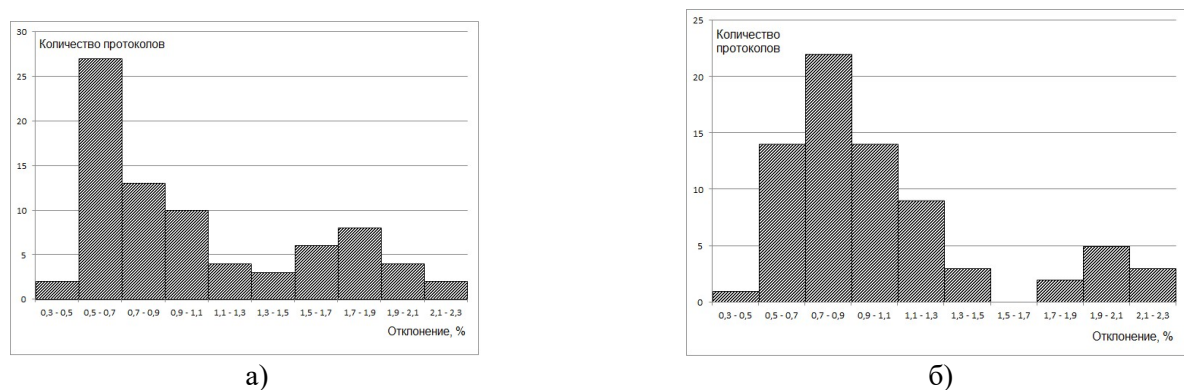


Рисунок 4 – Количество протоколов с максимальными (а) и минимальными (б) значениями коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}

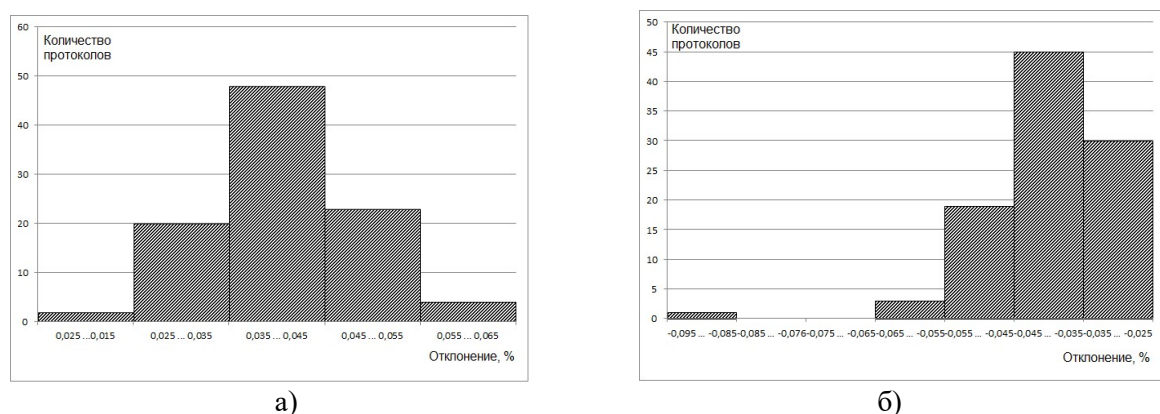


Рисунок 5 – Количество протоколов с максимальными (а) и минимальными (б) значениями отклонения частоты Δf

По результатам замеров не было зафиксировано отклонения частоты напряжения от нормативных значений, но незначительные наблюдались (рисунок 5). Эти отклонения могут быть следствием изменения режимов работы более масштабных энергосистем по сравнению с рассматриваемыми в данном исследовании.

Причины выявленных отклонений в сельских распределительных сетях Брянской области от нормативных значений следующие:

1. Изношенное или устаревшее оборудование;
2. Большая протяженность линий 0,4 кВ и вследствие этого высокое их сопротивление;
3. Отсутствие или неисправность систем регулирования напряжения (обычно ПБВ) в трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ;
4. Повышенные надбавки напряжения в линиях 6-10 кВ;
5. Превышающие нормативные значения сопротивлений контуров заземлений;
6. Наличие большого числа однофазной и изначально несимметричной нагрузки;
7. Некачественное проектирование эксплуатация сетей;
8. Прочие факторы.

Причины 2, 3 и 4 приводят к отклонениям напряжения, причины 5 и 6 – к несимметрии напряжения, а 1 и 2 влияют на все показатели качества. Малая доля, не превышающая нормативных значений, гармонических составляющих в исследуемых сетях может быть объяснена спецификой сельских территорий, в частности небольшой долей в общей нагрузке нелинейной нагрузки.

Указанные проблемы требуют дальнейшего изучения и детального анализа.

Выводы. В ходе исследования качества электрической энергии в сельских распределительных сетях Брянской области был выявлен ряд несоответствий показателей требованиям ГОСТ 32144-2013. Наиболее распространёнными нарушениями являются:

- Отклонения напряжения. Зафиксированы как отрицательные ($\delta U_{(-)}$), так и положительные ($\delta U_{(+)}$) отклонения, выходящие за пределы допустимых значений.
- Несимметрия напряжений в трёхфазных системах. Наблюдалось превышение нормативных значений коэффициентов несимметрии напряжений по обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательностям.

Несмотря на всё более широкое распространение современной преобразовательной техники, генерирующей высшие гармоники, гармонический состав напряжения в исследуемых сетях, как правило, не выходит за рамки установленных нормативов.

Отдельно следует отметить значительное количество протоколов измерений, в которых одновременно фиксируются отклонения по величине напряжения и по несимметрии. Данный факт свидетельствует о значительной доле однофазной нагрузки и о высоком сопротивлении линий электропередач, что усугубляет проблему несимметрии.

Таким образом, исследование текущего состояния указанной энергосистемы общего назначения остаётся актуальной научно-технической задачей.

Список источников

1. Ковалев В.В., Иванюга М.М., Бутовец Е.А. Исследование отклонения напряжения на работу асинхронных двигателей // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. Брянск, 2022. С. 107-114.
2. Дияров Р.И., Валиуллина Д.М. Управление качеством электрической энергии в России. Проблемы и решения // Технологический суверенитет и цифровая трансформация: материалы междунар. науч.-техн. конф. Казань, 2025. С. 120-124.
3. Широбокова О.Е., Магон Д.С. Мониторинг и анализ показателей качества электроэнергии в условиях сельскохозяйственного производства // Современные тенденции развития аграрной науки: сб. науч. тр. IV междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2025. С. 262-269.
4. Лакомов И.В. Особенности работы сетей при несимметричных, нелинейных и резко переменных нагрузках // Проблемы ресурсообеспеченности и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2025. С. 367-371.
5. Исследование показателей качества электроэнергии сельскохозяйственного предприятия / О.Е. Широбокова, Ю.Е. Кисель, А.А. Ульянов, Л.А. Александрович // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 3 (109). С. 66-71.
6. Гайсин Р.Р. Показатели качества электрической энергии и предъявляемые к ним требования // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, учёных и специалистов. В 2-х т. Тюмень, 2024. С. 213-215.

Информация об авторах:

В.А. Безик – кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации, физики и математики, bezikwa@mail.ru

М.А. Шелоп – Начальник восточного участка метрологии и качества электроэнергии отдела метрологии и качества электроэнергии службы релейной защиты, автоматизации, измерений и метрологии филиала ПАО «Россети Центр» - «Брянскэнерго», shelop.ma@mrsk-1.ru

Information about the authors:

V.A. Bezik - Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automation, Physics, and Mathematics. bezikwa@mail.ru.

M.A. Shelop - Head of the Eastern Section of Metrology and Power Quality of the Department of Metrology and Power Quality of the Relay Protection, Automation, Measurements, and Metrology Service of the Bryanskenergo branch of PJSC Rosseti Center. shelop.ma@mrsk-1.ru.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.04.2026; одобрена после рецензирования 18.05.2026, принята к публикации 15.08.2026.

The article was submitted 17.04.2026; approved after reviewing 18.05.2026; accepted for publication 15.08.2026.

© Безик В.А., Шелоп М.А.