

УДК 621.316.1

Юрий Иванович Ханин

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70, e-mail: haninyu5@gmail.com

Татьяна Андреевна Кузнецова

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», старший преподаватель кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70, e-mail: takuznetsova@list.ru

Андрей Петрович Панчишкин

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70, e-mail: panchishckin2011@yandex.ru

Исследование электромагнитного компенсатора тока третьей гармоники в нейтрали силового трансформатора

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальность исследования связана с увеличением числа нелинейных электроприемников, таких как компьютеры, телевизоры, светодиодные лампы и другие устройства, в бытовых электрических сетях сельской местности. Рост числа таких устройств приводит к искажению формы потребляемого тока и напряжения, отклоняя их от идеальной синусоидальной формы. Широкое использование силовых трансформаторов с конфигурацией обмоток «звезда–звезда с нулем», обладающих высоким сопротивлением нулевой последовательности, усугубляет негативное воздействие гармонических составляющих тока. Целью исследования является изучение работы электромагнитного устройства, предназначенного для компенсации токов третьей гармоники в нейтрали силового трансформатора, используемого в сельских электрических сетях.

Материалы и методы. Исследуемый электромагнитный компенсатор тока третьей гармоники для нейтрали силового трансформатора реализован в виде схемы, включающей шесть трансформаторов тока, установленных по фазам сети, трехфазный однополупериодный выпрямитель, фильтрующий дроссель и дополнительный трансформатор тока в нейтрали. Техническое решение с использованием шести трансформаторов и выпрямителя позволяет компенсировать именно токи, кратные третьей гармонике, что особенно эффективно в сетях с конфигурацией обмоток «звезда–звезда с нулем» и высокой чувствительностью к нулевой последовательности гармоник.

Результаты. Для оценки эффективности устройства проведены измерения на низковольтных шинах тринадцати трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, питающих бытовую сектор в Волгоградской области. Применен анализатор качества электроэнергии, фиксирующий параметры тока, напряжения, мощности и гармонического состава с временным разрешением одна минута в течение суток. Установлено, что третья гармоника тока является ключевым фактором паразитных энергопотерь в силовых трансформаторах бытовых сетей, формируя в среднем 67,2 % от общего объема потерь, вызванных высшими гармоническими составляющими. Практические испытания в четырехпроводных сетях сельских подстанций 10/0,4 кВ показали высокую эффективность электромагнитного компенсатора, установка которого позволила снизить амплитуду третьей гармоники в нейтрали на 64,4 %, что привело к уменьшению общих потерь электроэнергии на 9,95 %.

Выводы. Целенаправленное подавление третьей гармоники не только повышает стабильность сети, но и обеспечивает значительную экономию ресурсов, особенно в условиях роста числа нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: силовой трансформатор, электромагнитный компенсатор, несинусоидальность токов, третья гармоника тока, компенсация гармонических составляющих тока

Yuri Ivanovich Khanin

Volgograd State Agricultural University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply and Energy Systems Department, Russia, Volgograd, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: haninyu5@gmail.com

Tatiana Andreevna Kuznetsova

Volgograd State Agricultural University, Senior Lecturer of Power Supply and Energy Systems Department, Russia, Volgograd, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: takuznetsova@list.ru

Andrey Petrovich Panchishkin

Volgograd State Agricultural University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Senior Lecturer of Power Supply and Energy Systems Department, Russia, Volgograd, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: panchishckin2011@yandex.ru

Study of the electromagnetic compensator of the third harmonic current in the neutral of a power transformer

Abstract

Background. The study is relevant due to the increase in the number of non-linear electrical receivers, such as computers, televisions, LED lamps and other devices, in household electrical networks in rural areas. The increase in the number of such devices leads to distortion of the consumed current and voltage waveforms, causing deviations from the ideal sinusoidal shape. The widespread use of power transformers with “star-star- with neutral” winding configurations, which have high zero-sequence impedance increase the negative impact of harmonic current components. The primary objective of the research is to study an electromagnetic device aimed at compensating third harmonic currents in the neutral conductor of power transformers in rural electrical systems.

Materials and methods. The electromagnetic compensator of the third harmonic current for the neutral of a power transformer under study is implemented in the form of a circuit that includes six current transformers installed in the network phases, a three-phase half-wave rectifier, a filter choke and an additional current transformer in the neutral. The technical solution using six transformers and a rectifier allows for compensation of currents that are multiples of the third harmonic, which is especially effective in networks with a “star-star with neutral” winding configuration and high sensitivity to zero-sequence harmonics.

Results. To evaluate the efficiency of the device, measurements have been conducted on low-voltage buses of thirteen 10/0,4 kV transformer substations supplying the household sector in the Volgograd region. A power quality analyzer has been employed to record current, voltage, power, and harmonic composition parameters at a one-minute resolution over a 24-hour cycle. The findings have confirmed that the third current harmonic is the dominant factor in parasitic power losses within residential grid power transformers, contributing an average of 67,2 % of the total losses caused by higher-order harmonics. Field tests in four-wire networks of rural 10/0,4 kV substations have demonstrated the high efficiency of the electromagnetic compensator. After installation, the neutral third harmonic amplitude has decreased by 64,4 %, resulting in a 9,95 % reduction in total electricity losses.

Conclusions. Thus, targeted suppression of the third harmonic not only enhances network stability but also ensures significant resource savings, particularly under conditions of growing non-linear loads.

Key words: power transformer, electromagnetic compensator, non-sinusoidal currents, third harmonic of current, compensation of harmonic components of current

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.3.052-058

Введение. Повышение качества электроэнергии является одной из актуальных задач современных энергосистем, особенно в сельских регионах, где бытовые потребители все чаще используют оборудование, формирующее высшие гармоники. Нелинейные нагрузки – компьютеры, современные телевизоры, аудиотехника, СВЧ-печи, а также энергосберегающие и светодиодные лампы – вносят существенные искажения в спектр токов и напряжения, ухудшая технические параметры сети и приводя к значительным энергопотерям. Преобладание трансформаторов с обмотками «звезда–звезда с нулем» увеличивает чувствительность системы к паразитным токам третьей гармоники и искажениям нулевой последовательности, что требует поиска новых компенсационных технологий [1, 2].

Проблематика влияния высших гармоник на качество электроэнергии и надежность работы распределительных сетей неоднократно освещалась в отечественной и зарубежной литературе. Различные группы авторов отмечают, что насыщение сети нелинейными нагрузками приводит к росту потерь, перегреву оборудования и нестабильности работы трансформаторов, особенно при несимметричном характере нагрузки. Для описания суммарного гармонического состава современных сетей наиболее оправдано применение статистических методов, так как индивидуальный спектр каждого устройства можно считать ста-

бильным, а совокупный – вариативным и зависящим от режима включения потребителей [3, 4].

В научных работах выделяется проблема циркуляции токов третьей гармоники в нейтрали системы, обусловленная спецификой нулевой последовательности и высоким сопротивлением для этих компонент. Традиционные методы борьбы с высшими гармониками – фильтры, компенсаторы, выбор оптимальных режимов работы – демонстрируют различную эффективность при массовом распространении бытовых нелинейных приемников [5, 6].

Поскольку нагрузка в сельских сетях часто носит несимметричный характер, а число нелинейных потребителей, которые формируют высшие гармоники тока, неуклонно растет, традиционные силовые трансформаторы показывают недостаточную эффективность и способствуют значительным потерям электроэнергии. Для повышения качества работы сельских сетей необходимо внедрение технических решений, направленных на компенсацию гармонических составляющих тока [7, 8].

Методы исследования. Исследуемый электромагнитный компенсатор тока третьей гармоники для нейтрали силового трансформатора (рис. 1) реализован в виде схемы, включающей шесть трансформаторов тока, установленных по фазам сети, трехфазный однополупериодный выпрямитель, фильтрующий дроссель и дополнительный трансформатор тока в нейтрали.

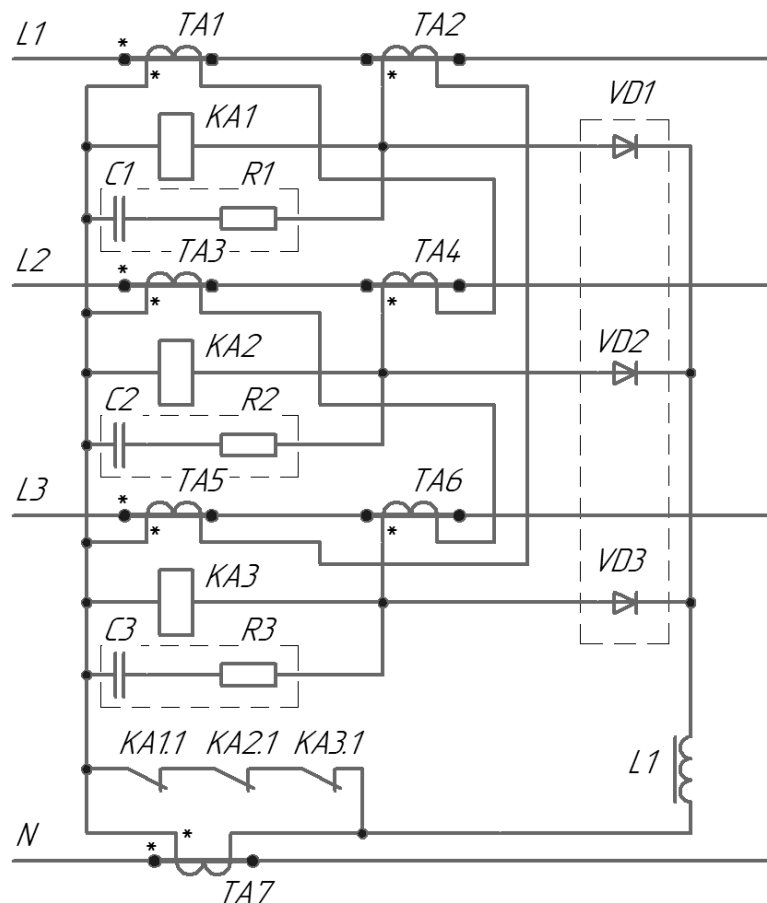


Рис. 1. Электромагнитный компенсатор тока третьей гармоники в нейтрали силового трансформатора

Принцип работы компенсатора основан на компенсации тока третьей гармоники путем формирования компенсирующего сигнала с противоположной фазой и возврата его в нейтраль силового трансформатора.

Конструкция компенсатора реализует ключевые технические решения по максимизации компенсирующего эффекта и надежности работы схемы. Так, трансформаторы тока подключены по схеме разности фазных токов, такое решение позволяет в 1,73 раза увеличить уровень компенсирующего воздействия. Компенсирующий ток сглаживается дросселем, что позволяет получить требуемую амплитуду и форму для эффективного подавления третьей гармоники. Автоматизация компенсатора предполагает включение устройства по мере увеличения нагрузки, когда влияние гармоник наиболее существенно. Реле и RC-цепочки контролируют режим работы устройства, включение и защиту в периоды уменьшенной нагрузки. Трансформатор тока, установленный в нейтрали, выполняет функцию возврата компенсирующего сигнала обратно в сеть.

Такое техническое решение обеспечивает точную компенсацию токов третьей гармоники в нейтрали, благодаря чему достигается существенное улучшение качества электроэнергии: снижаются активные потери в сетях, уменьша-

ются падения напряжения, обусловленные нелинейными нагрузками, а также предотвращается перегрузка нейтрали. В результате повышается надежность и энергоэффективность всей электрической системы.

Для оценки эффективности устройства проведены измерения на низковольтных шинах тринадцати трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, питающих бытовой сектор в Волгоградской области. Применялся анализатор качества электроэнергии, фиксировавший параметры тока, напряжения, мощности и гармонического состава с временным разрешением одна минута в течение суток.

Анализ показателей тока, напряжения, мощности и гармонического состава за год использования электромагнитного компенсатора на сельской бытовой подстанции 100 кВА показал, что ввод данного устройства ведет к заметному уменьшению энергетических потерь, связанных с гармоническими составляющими, что свидетельствует о повышении технологической эффективности системы и улучшении качества электроснабжения.

Результаты исследования. Исследования, проведенные на низковольтных шинах тринадцати трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, которые обеспечивают электроэнергией бытовых потребителей, выявили характер-

ное распределение гармонических составляющих в фазах силового трансформатора (рис. 2). Наиболее выраженной оказалась третья гармоника, составляющая в среднем 56 % от общего спектра высших гармоник. Пятая гармоника занимает свыше 30 %, седьмая – около 7,5 %, а девятая и остальные гармонические компоненты представлены значительно слабее, не превышая 2 и 1 % соответственно.

При переходе к нейтрали трансформатора гармонический состав заметно изменяется (рис. 3). Здесь третья гармоника становится

доминирующей в еще большей степени – ее доля достигает 87,56 %, почти в полтора раза превосходя показатели в фазах. В то же время пятая и седьмая гармоники уменьшаются до 5,85 и 0,81 % соответственно, тогда как девятая гармоника значительно увеличивается, достигая 4,36 %. Эти данные подчеркивают необходимость целенаправленной компенсации именно третьей и девятой гармоник в нейтрали для повышения эффективности работы электрической сети.

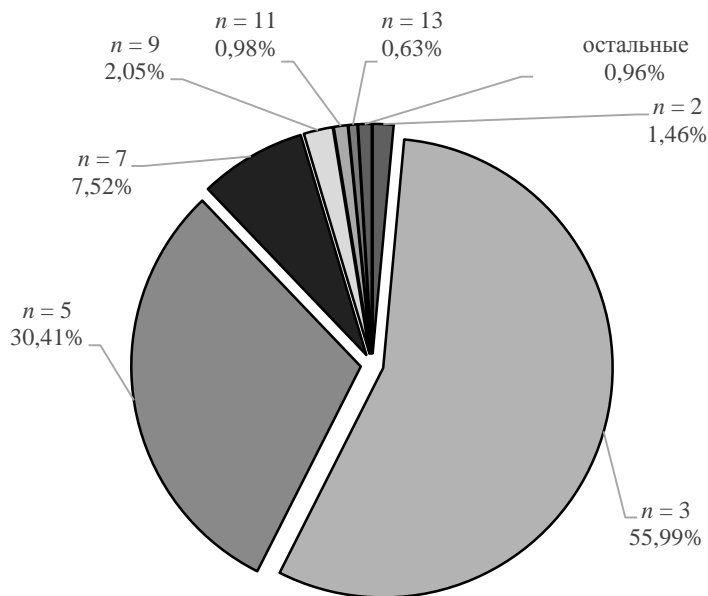


Рис. 2. Диаграмма усредненных долей токов высших гармоник в фазах силового трансформатора

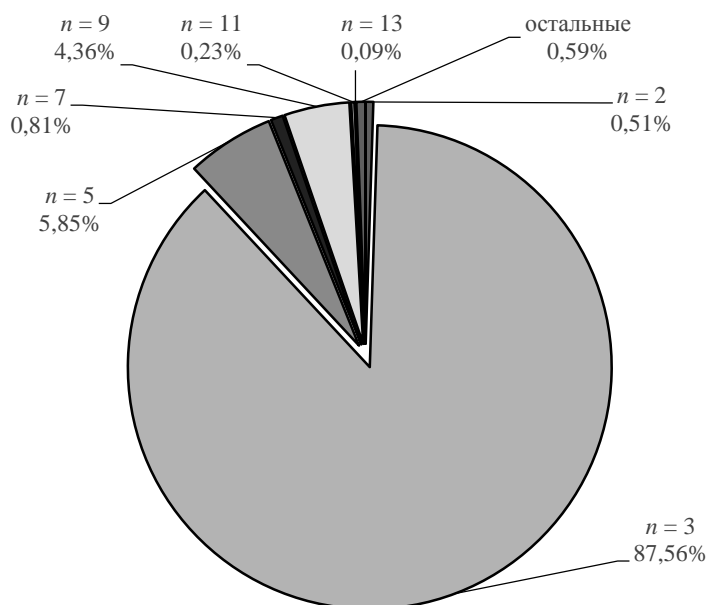


Рис. 3. Диаграмма усредненных долей токов высших гармоник в нейтрали силового трансформатора

Для количественной оценки соотношения токов в нейтрали и фазах силового трансформатора используется коэффициент небаланса $k_{unb(n)}$, который представляет собой отношение величины тока в нейтральном проводнике к алгебраиче-

ской сумме фазных токов для каждой гармонической составляющей [8]. Этот параметр позволяет анализировать, как распределяются гармонические токи между нейтралью и фазными проводниками при несимметричной нагрузке:

$$K_{unb(n)} = \frac{I_{N(n)}}{I_{A(n)} + I_{B(n)} + I_{C(n)}},$$

где $I_{N(n)}$ – ток n -й гармонической составляющей в нейтральном проводнике, А; $I_{A(n)}$, $I_{B(n)}$, $I_{C(n)}$ – ток n -й гармонической составляющей в фазных проводниках, А.

Экспериментальные данные показали среднее значение коэффициента небаланса для третьей гармоники на уровне 0,75, т. е. на нейтраль приходится 75 % суммарных фазных токов этой гармоники. Для пятой гармоники – 22 %, для седьмой – 16 %, для девятой – вновь 74 %, что обусловлено особенностями нулевой последовательности гармоник.

Преобладание третьей и девятой гармоник в нейтрали обуславливает повышенные потери электрической энергии. Как показывают

расчеты, около 2/3 всех потерь, вызываемых гармоническими составляющими тока, обусловлены третьей гармоникой [9–12].

Полученные результаты демонстрируют, что внедрение рассматриваемых компенсаторов третьей гармоники в нейтраль трансформатора не только повышает общую эффективность системы, но и позволяет упростить конструкцию оборудования. Благодаря этому снижается себестоимость компенсаторов при сохранении высоких показателей подавления гармонических искажений. Практические испытания (рис. 4) в сельских распределительных сетях подтвердили эффективность таких устройств, показав значительное снижение паразитных энергопотерь и улучшение качества электроснабжения при преобладании нелинейных нагрузок.

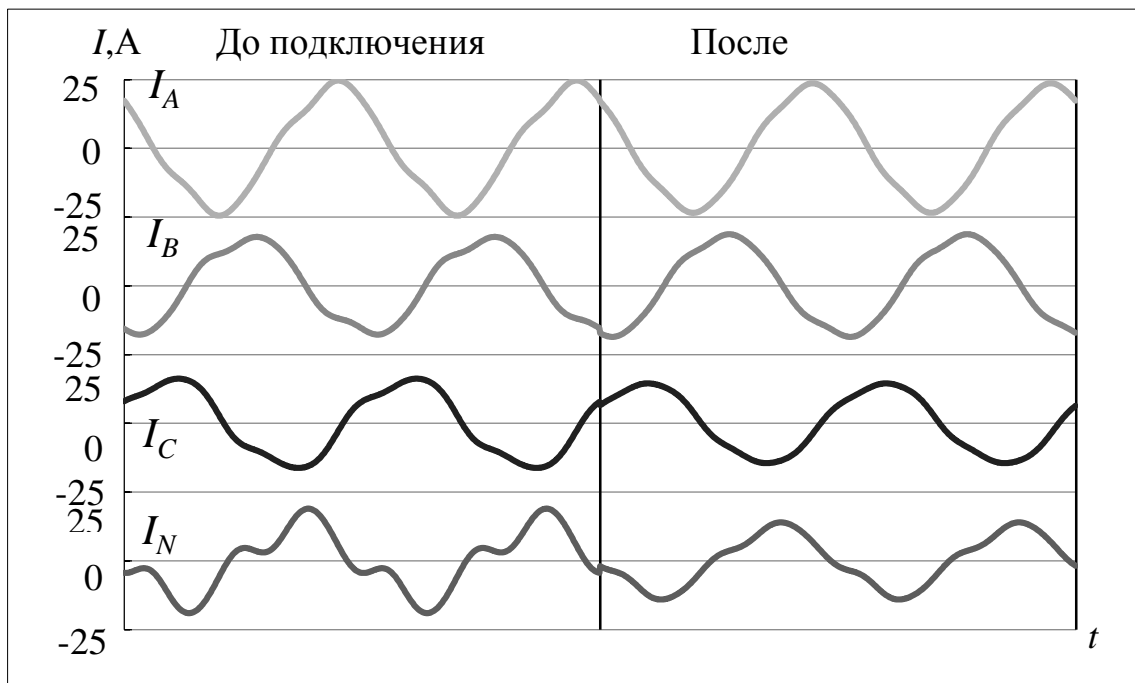


Рис. 4. Форма кривых тока до и после подключения электромагнитного компенсатора тока в нейтрали силового трансформатора

На основе осциллограмм токов, зарегистрированных в фазных и нейтральном проводниках сельской бытовой трансформаторной подстанции мощностью 100 кВА, был выполнен спектральный анализ по Фурье. Анализ выявил, что среди всех высших гармоник наибольший вклад в искажение формы тока вносит третья гармоника, значительно превосходя по амплитуде остальные частотные составляющие.

Ток третьей гармоники до подключения устройства в электрическую сеть имел следующие характеристики:

- в фазе «А» – $2,00 \cdot \sin(3\omega t + 157^\circ)$;
- в фазе «В» – $2,03 \cdot \sin(3\omega t + 125^\circ)$;
- в фазе «С» – $2,23 \cdot \sin(3\omega t + 137^\circ)$;
- в нейтрали – $5,53 \cdot \sin(3\omega t - 40^\circ)$.

Ток третьей гармоники после подключения устройств в электрическую сеть имел следующие характеристики:

- в фазе «А» – $0,88 \cdot \sin(3\omega t + 139^\circ)$;
- в фазе «В» – $1,18 \cdot \sin(3\omega t + 128^\circ)$;
- в фазе «С» – $0,98 \cdot \sin(3\omega t + 134^\circ)$;
- в нейтрали – $1,97 \cdot \sin(3\omega t - 38^\circ)$.

Таким образом, удалось снизить значение амплитуды тока третьей гармоники в нейтрали в 2,8 раза, т.е. более чем на 64 %.

Расчет годовых потерь на данной подстанции показал уменьшение объема энергопотерь на 1/5, с 18,6 до 16,75 %.

Анализ экспериментальных данных выявил, что наиболее рациональная стратегия эксплуатации компенсатора заключается в его

включении не постоянно, а исключительно в периоды максимальной нагрузки. Именно тогда амплитуда третьей гармоники достигает пиковых значений, что делает компенсацию особенно эффективной.

Адаптивная эксплуатация компенсатора (включение в периоды максимальной нагрузки) дополнительно снижает эксплуатационные затраты и обеспечивает экономичность системы. Предлагается дальнейшая модернизация устройства на базе автоматизированных систем управления, способных оперативно реагировать на изменение параметров сети.

Выводы. Третья гармоника тока является основным фактором возникновения паразитных энергопотерь в силовых трансформаторах, обслуживающих бытовые сети. Ее вклад в общий объем затрат, обусловленных действием высших гармонических составляющих, достигает в среднем 67,2 %.

Реализация электромагнитного компенсатора в четырехпроводных системах трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, обеспечивающих электроснабжение бытовых потребителей, доказала практическую эффективность предложенного подхода. После установки устройства уровень третьей гармоники в нейтрали уменьшился на 64,4 %, а энергопотери сократились на 9,95 %.

Таким образом, компенсация третьей гармонической составляющей является действенным инструментом повышения энергетической эффективности сетей и рационального использования ресурсов, что особенно важно для сельских электрических систем с растущим числом нелинейных нагрузок.

В качестве рекомендаций и планов по дальнейшим исследованиям стоит отметить:

- проведение дополнительных исследований по влиянию девятой гармоники и развитию комплексных систем компенсации;
- разработку и внедрение автоматизированных систем мониторинга гармонических искажений в распределительных сетях;
- распространение предлагаемого технического решения среди предприятий агропромышленного комплекса других регионов России с аналогичными характеристиками сети.

Список литературы

1. **Agent-based approach** for analysis of electricity distribution technological processes in power systems / S.S. Kostinskiy, V.A. Mokhov, T.N. Kruglova, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volgograd, 20–21 November 2018. – Volgograd: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/483/1/012080.

2. **Kostinskiy S., Troitskiy A.** Impact study of non-sinusoidal load parameters on real-power losses in 3-phase double-wound power transformers: Method of constant coefficients // Journal of Engineering and

Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12. – No. 20. – P. 5058–5068. DOI: 10.3923/jeasci.2017.5058.5068.

3. **Analysis** of the harmonic composition of current in the zero-working wire at the input of the load node with the prevailing non-linear power consumers / I.V. Yudaev, M.A. Yundin, A.M. Isupova, et al. // Archives of Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 70, No. 2. – P. 463–473. DOI: 10.24425/aee.2021.136996.

4. **Ханин Ю.И., Иванова О.А., Аксенов М.П.** Оптимизация выбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств на примере сельскохозяйственного машиностроительного завода // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 4. – С. 50–56. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.050-056.

5. **The harmonic** composition of current in zero-working wire with non-linear load / I.V. Yudaev, E.V. Rud, T.Z. Ponomarenko, et al. // IJUM Engineering Journal. – 2021. – Vol. 22, No. 1. – P. 191–200. DOI: 10.31436/IJUM.EJ.V22I1.1569.

6. **On the efficiency** of power transformers with “star-zig-zag with zero” winding connection scheme in rural electricity networks supplying household consumers / Y.I. Hanin, O.V. Rodionova, A.P. Panchishkin, et al. // Journal of Physics: Conference Series: 2, Volgograd, Virtual, 06–07 May 2021. – Volgograd, Virtual, 2021. – P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012004.

7. **The optimization** of the filter compensating devices parameters choice at the enterprises of agro-industrial complex / Y.I. Hanin, A.E. Pelih, S.I. Nikolaeva, O.A. Ivanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 3, Volgograd, Virtual, 10–11 December 2020. – Volgograd, Virtual, 2021. – P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012015.

8. **Юндин М.А., Шабанов Н.И., Ханин Ю.И.** О коэффициенте небаланса наиболее значимых высших гармоник токов в сельских коммунально-бытовых сетях 0,38 кВ // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 2(14). – С. 102–104.

9. **Юндин М.А., Ханин Ю.И.** Дополнительные потери электроэнергии в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 101. – С. 74–84.

10. **Юндин М., Пономаренко Т., Юндин К.** Анализ сверхнормативных потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ, имеющих нагрузку с преобладанием нелинейных потребителей // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № S1(20). – С. 6–12.

11. **Юндин М.А., Кобзистый О.В., Рудь Е.В.** Оценка влияния уровней несимметрии и высших гармоник на ток в нулевом рабочем проводнике сети 0,38 кВ // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 3(55). – С. 33–38.

12. **Юндин М.А., Жариков Д.Т., Пономаренко Т.З.** О влиянии несимметрии и несинусоидальности токов на потери электроэнергии в силовом трансформаторе // Агротехника и энергообеспечение. – 2021. – № 4(33). – С. 114–118.

References

1. Kostinskiy, S.S., Mokhov, V.A., Kruglova, T.N., Shaikhutdinov, D.V., Vlasov, A.S. Agent-based approach for analysis of electricity distribution technological processes in power systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volgograd, 20–21 November 2018. Volgograd: Institute of Physics Publishing,

2019, p. 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/483/1/012080.

2. Kostinskiy, S., Troitskiy, A. Impact study of non-sinusoidal load parameters on real-power losses in 3-phase double-wound power transformers: Method of constant coefficients. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 20, pp. 5058–5068. DOI: 10.3923/jeasci.2017.5058.5068.

3. Yudaev, I.V., Rud, E.V., Yundin, M.A., Ponomarenko, T.Z., Isupova, A.M. Analysis of the harmonic composition of current in the zero-working wire at the input of the load node with the prevailing non-linear power consumers. *Archives of Electrical Engineering*, 2021, vol. 70, no. 2, pp. 463–473. DOI: 10.24425/ae.2021.136996.

4. Khanin, Yu.I., Ivanova, O.A., Aksenov, M.P. Optimizatsiya vybora parametrov fil'trokompensiruyushchikh ustroystv na primere sel'skokhozyaystvennogo mashinostroitel'nogo zavoda [Optimization of the selection of parameters of filter-compensating devices using the example of an agricultural engineering plant]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 4, pp. 50–56. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.050-0564.

5. Yudaev, I.V., Rud, E.V., Ponomarenko, T.Z., Yundin, M.A., Isupova, A.M. The harmonic composition of current in zero-working wire with non-linear load. *IJUM Engineering Journal*, 2021, vol. 22, no. 1, pp. 191–200. DOI: 10.31436/IJUM.EJ.V22I1.1569.

6. Hanin, Y.I., Rodionova, O.V., Panchishkin, A.P., Zaichkina, M.A., Shakhbazova, Y.E. On the efficiency of power transformers with “star-zig-zag with zero” winding connection scheme in rural electricity networks supplying household consumers. *Journal of Physics: Conference Series: 2, Volgograd, Virtual, 06–07 May 2021*. Volgograd, Virtual, 2021, p. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012004.

7. Hanin, Y.I., Pelih, A.E., Nikolaeva, S.I., Ivanova, O.A. The optimization of the filter compensating devices parameters choice at the enterprises of agro-

industrial complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 3, Volgograd, Virtual, 10–11 December 2020*. Volgograd, Virtual, 2021, p. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012015.

8. Yundin, M.A., Shabanov, N.I., Khanin, Yu.I. O koeffitsiente nebalansa naibolee znachimyykh vysshikh garmonik tokov v sel'skikh kommunal'no-bytovyykh setyakh 0,38 kV [On the unbalance factor of the most significant higher harmonics of currents in rural public utility networks of 0,38 kV]. *Vestnik APK Stavropol'ya*, 2014, no. 2(14), pp. 102–104.

9. Yundin, M.A., Khanin Yu.I. Dopolnitel'nye poteri elektroenergii v silovykh transformatorakh 10/0,4 kV [Additional power losses in 10/0,4 kV power transformers]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 101, pp. 74–84.

10. Yundin, M., Ponomarenko, T., Yundin, K. Analiz sverkhnormativnykh poter' moshchnosti v silovykh transformatorakh 10/0,4 kV, imeyushchikh nagruzku s preobladaniem nelineynykh potrebiteley [Analysis of excess power losses in 10/0,4 kV power transformers with a load dominated by non-linear consumers]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. S1(20), pp. 6–12.

11. Yundin, M.A., Kobzisty, O.V., Rud', E.V. Otsenka vliyaniya urovney nesimmetrii i vysshikh garmonik na tok v nulevom rabochem provodnike seti 0,38 kV [Assessment of the influence of asymmetry levels and higher harmonics on the current in the neutral working conductor of a 0,38 kV network]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2021, no. 3(55), pp. 33–38.

12. Yundin, M.A., Zharikov, D.T., Ponomarenko, T.Z. O vliyaniy nesimmetrii i nesinusoidal'nosti tokov na poteri elektroenergii v silovom transformatore [On the influence of asymmetry and non-sinusoidality of currents on energy losses in a power transformer]. *Agrotekhnika i energo-obespechenie*, 2021, no. 4(33), pp. 114–118.