

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.018.33

Степан Георгиевич Тигунцев

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем, Россия, Иркутск, e-mail: stiguncev@yandex.ru

Константин Витальевич Шафаревич

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», магистрант кафедры электрических станций, сетей и систем, Россия, Иркутск, e-mail: shafaarevich@mail.ru

Разработка мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших гармоник на линии электропередачи 35 кВ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Значительное отклонение кривой напряжения от синусоидальной в некоторых действующих линиях электропередачи энергосистемы Иркутской области является проблемой для обеспечения качества электроэнергии и надежности сети. Целью настоящего исследования является разработка организационно-технических мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших гармоник в действующей электрической сети 35 кВ, подключенной к тяговой подстанции.

Материалы и методы. Объектом исследования являются несинусоидальные режимы работы линии электропередачи 35 кВ, подключенной к обмотке среднего напряжения трехобмоточного тягового трансформатора. Используются технологические методы исследования расчетным путем по схеме замещения действующей линейной схемы электроэнергетической системы с тяговой подстанцией. Исследования проведены с использованием программного комплекса «Программа расчета несимметричных и несинусоидальных режимов электрических сетей» и пакета Microsoft Excel.

Результаты. Разработана модель электрической сети 110–35–10 кВ «Потребитель 1 – Потребитель 2 – Потребитель 3» с помощью программного комплекса «Программа расчета несимметричных и несинусоидальных режимов электрических сетей». Результаты расчетов обработаны с помощью пакета Microsoft Excel. Рассчитаны несинусоидальные электрические режимы схемы замещения электроэнергетической системы и линии электропередачи. Выполнены расчеты несинусоидальных режимов линии 35 кВ в целях демонстрации распределения напряжений высших гармоник вдоль линии. Установлено, что показатели качества электроэнергии по несинусоидальности напряжений в большинстве узлов линии электропередачи 35 кВ не соответствуют ГОСТ 32144-2013. Расчет и анализ несимметричных несинусоидальных режимов рассматриваемой сети показал наличие резонансного увеличения напряжений вдоль линии на частотах нечетных высших гармоник и устранение резонансных явлений при установке компенсационного реактора в начале линии 35 кВ. На основании полученных расчетов составлены графические отображения кривых напряжений гармонических составляющих от 3 до 39.

Выводы. На основании полученных данных предложены технические мероприятия (установка компенсационного реактора в начале линии) по устранению резонансных явлений для повышения качества электроэнергии в части несинусоидальности напряжений на шинах потребителей электроэнергии, подключенных к линии 35 кВ. Предлагаемые мероприятия позволяют повысить качество электрической энергии на шинах потребителей до норм, установленных ГОСТ 32144-2013.

Ключевые слова: компенсационный реактор, напряжение гармонических составляющих, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, резонанс, волновой процесс

Stepan Georgievich Tiguntsev

Irkutsk National Research Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Plants, Networks and Systems Department, Russia, Irkutsk, e-mail: stiguncev@yandex.ru

Konstantin Vitalyevich Shafarevich

Irkutsk National Research Technical University, Master's Degree Student of Power Plants, Networks and Systems Department, Russia, Irkutsk, e-mail: shafaarevich@mail.ru

Development of measures to eliminate resonant phenomena at higher harmonic frequencies on power line of 35 kV

Abstract

Background. One of the problems to ensure the quality of electricity and reliability of the network is significant deviation of the voltage curve from sinusoidal in some active electricity transmission lines of the energy system of the Irkutsk region. The purpose of the research is to develop organizational and technical measures to eliminate resonance phenomena at higher harmonics that occur in the active 35 kV electrical line connected to a traction power substation.

Materials and methods. The object of the research is non-sinusoidal mode of the 35 kV electric power transmission line connected to the medium voltage winding of the three-winding traction transformer. The authors have used technological research methods of calculation using an equivalent circuit of the existing linear circuit of an electrical power system with a traction substation. The software "Calculation program of non-symmetric and non-sinusoidal modes of the electric power system" and Microsoft Excel are used for the research.

Results. The authors have developed a 110–35–10 kV "Consumer 1 – Consumer 2 – Consumer 3" model using the software "Calculation program of non-symmetric and non-sinusoidal modes of the electric power system". The calculation results are processed using Microsoft Excel. Non-sinusoidal electrical modes of the equivalent circuit of the electrical power system and the power transmission lines are calculated. Calculation of non-sinusoidal modes of a 35 kV line is carried out to show the distribution of higher harmonic voltages along the line. It is established that the quality indicators of electricity in terms of non-sinusoidal voltages in most nodes of the 35 kV power transmission line do not comply with GOST 32144-2013. Calculation and analysis of non-symmetric and non-sinusoidal modes of the network have shown resonance voltage increase along the line on the odd harmonics frequencies and elimination of resonance factor when installing the compensation reactor at the beginning of the 35 kV line. Based on the calculation results, the diagrams of harmonics power-voltage curve from 3 to 39 are compiled.

Conclusions. Based on the results obtained, the authors have proposed technical measures such as installation of a compensation reactor at the beginning of the electrical power system line to prevent resonance factor to improve the electrical power quality in terms of voltage unbalance in the consumers busbars connected to the 35 kV line. The proposed measures will improve the electrical power quality in busbars of consumers and satisfy the requirements of GOST 32144-2013.

Key words: compensation reactor, voltage of harmonic components, non-sinusoidal voltage, higher harmonics, resonance, wave process

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.040-050

Введение. Проблема эффективного использования различных видов энергии, в том числе и электрической, а также повышения ее качества является важной государственной задачей. Электроэнергия как отдельный вид продукции обладает рядом характеристик, позволяющих оценить возможность ее использования в бытовых и производственных процессах. Совокупность данных характеристик, имеющих нормированные значения, при которых электроприемники работают в нормальном режиме, называется качеством электрической энергии [1].

Одним из важных показателей качества электрической энергии является несинусоидальность напряжения электропитания, вызываемая высшими гармониками (ВГ) тока и напряжения. Данное явление обусловлено нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей и распространено на тяговых электрических подстанциях и отходящих воздушных и кабельных линиях электропередачи. Несинусои-

дальность напряжения приводит к возникновению факторов, ухудшающих работу электрической сети в нормальном режиме: дополнительным потерям мощности; ускорению старения изоляции электрических приемников; уменьшению надежности и срока службы электрооборудования; сбоям в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и др. [2].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества электрической энергии в действующей электрической сети с усложненной технической конфигурацией и наличием электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой. Таким образом, ставится задача минимизировать воздействия несинусоидальности напряжения в конфигурируемой сети до нормированных значений.

Методы исследования. Главной целью исследования является разработка организационно-технических мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших

гармоник в действующей сети 35 кВ до допустимых значений. Рассматривается действующая электрическая сеть Иркутской области 110–35–10 кВ «Потребитель 1 – Потребитель 2 – Потребитель 3» с тяговой подстанцией. Для этого разрабатывается модель данной сети и выполняется расчет несинусоидальных режимов линии 35 кВ в целях демонстрации распределения напряжений высших гармоник вдоль линии при задании источников единичных токов нечетных гармоник величиной 10 А.

Объектом исследования являются несинусоидальные режимы работы линии электропередачи 35 кВ, подключенные к обмотке среднего напряжения трехобмоточного тягового трансформатора в действующей электрической сети 110–35–10 кВ. В соответствующей воздушной линии вследствие значительной длины и проблемной конфигурации сети возникают резонансные явления либо волновые процессы, которые существенно снижают итоговое качество электрической энергии у потребителя, увеличивая коэффициенты несинусоидальности и высших гармоник на шинах подстанций сети [3–6].

Проблема возникновения несинусоидальности напряжения и превышения допусти-

мых значений подтверждается результатами измерений, выполненных на шинах 35 и 10 кВ на ПС «Потребитель 1» и ПС «Потребитель 2» (рис. 1, 2). Превышение нормирующих значений и возникновение аварийных ситуаций говорит о необходимости анализа и расчета несинусоидального режима проблемных участков электрической сети. Для анализа режима работы действующей сети использована соответствующая программа расчета несинусоидального режима сети. Исходные данные задаются в соответствии с рассматриваемой схемой (рис. 3).

Для расчета установившегося режима основной частоты воздушные и прочие линии представлены активными и реактивными сопротивлениями и емкостными проводимостями. Силовые трансформаторы вводятся в расчет режима активными и реактивными сопротивлениями и проводимостями. Генерации и нагрузки потребителей отображены значениями мощностей.

Для расчета режимов на частотах ВГ генераторы представляются сопротивлениями обратной последовательности (ОП) X_2 и частично проводимостями, полученными из мощностей на основной частоте с учетом частоты рассчитываемой гармоники.

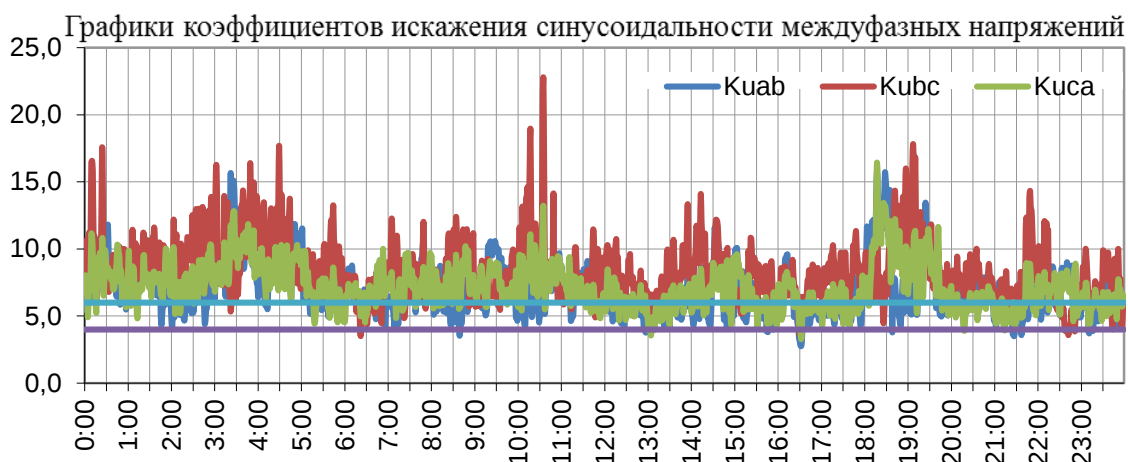


Рис. 1. Результаты измерений на шинах 35 кВ ПС «Потребитель 1»

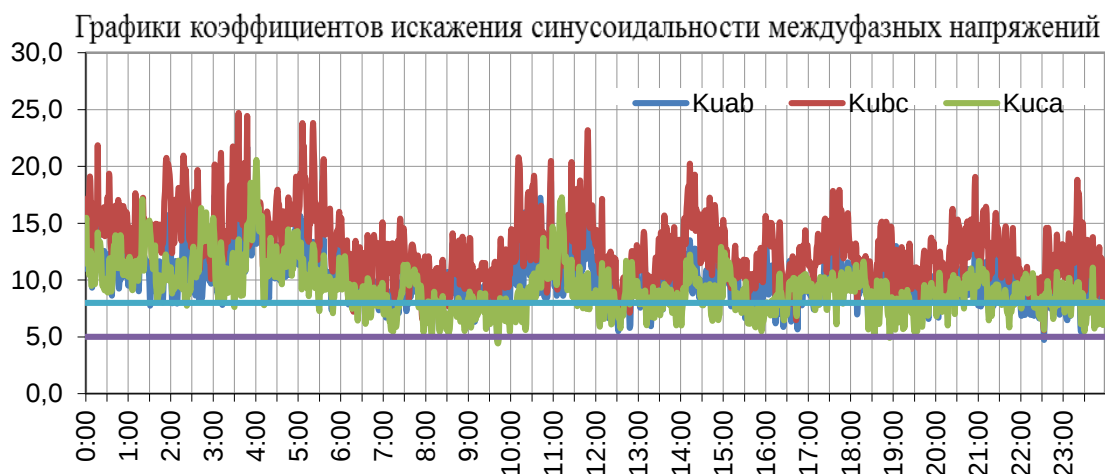


Рис. 2. Результаты измерений на шинах 10 кВ ПС «Потребитель 2»

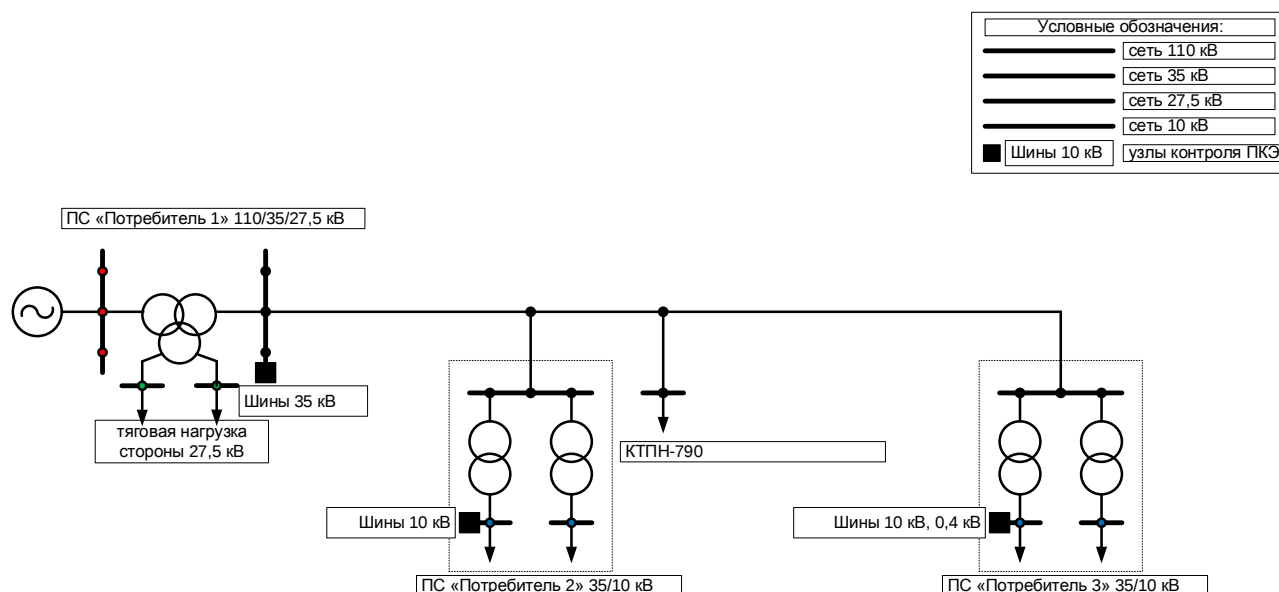


Рис. 3. Схема действующей электрической сети 110–35–10 кВ

Генерация с двух сторон транзита в выполненных расчетах представлена эквивалентными проводимостями, полученными из $X_{\text{экв}}$ и пересчитанными на частоту рассматриваемой гармоники.

Расчет выполняется путем составления схемы замещения, составления в программе системы уравнений и их решения для каждой гармоники. При этом ЛЭП 35 кВ длиной 121 км задается участками по 1 км, представленными П-образными схемами замещения.

В каждом плече контактной сети задающие токи высших гармоник определяются как ток первой гармоники, деленный на коэффициент гармоники, полученный при измерении в сети. Для целей исследования имеется возможность задания любого значения тока ВГ в любом узле сети.

Анализ характерных особенностей распространения ВГ в сети выполняется с учетом частотно-зависимых моделей элементов электрической сети и задающих токов ВГ в местах расположения нелинейных элементов [7].

В качестве алгоритма программы для расчета установившегося несимметричного не-синусоидального режима используется метод симметричных составляющих, построенный на решении системы уравнений узловых напряжений для прямой последовательности (ПП) и обратной последовательности (ОП) каждой гармоники.

В соответствии с разработанной методикой анализа высших гармонических составляющих, первоначально выполняется расчет несимметричного режима на основной частоте для проверки достоверности модели объекта путем сопоставления реальных и расчетных значений мощностей генераций в системе, потоков мощности и узловых напряжений. Кроме то-

го, из результатов расчета режима на основной частоте для дальнейших исследований используются некоторые недостающие параметры, например мощности в балансирующих узлах.

На первом этапе производится расчет установившегося несимметричного режима, т.е. режима для ПП и ОП на основной частоте действующей сети. Результатом расчета установившегося режима являются напряжения ПП и ОП в узлах сети и мощности в балансирующих узлах:

$$|Y_n| \cdot |U_n| = |I_n|, \quad (1)$$

где Y_n – матрица собственных и взаимных проводимостей схемы замещения ПП или ОП сети на частоте n -й гармоники; U_n – матрица-столбец напряжений ПП или ОП в узлах сети; I_n – матрица-столбец задающих токов n -й гармоники.

После расчета режима на основной частоте автоматически формируются системы уравнений для расчета режимов на частотах n -й гармоники. Матрица Y_n в уравнении (1) формируется из сопротивлений и проводимостей линий и трансформаторов, пересчитанных для частоты соответствующей гармоники. Активные сопротивления увеличиваются в $\sqrt{n}$ раз. Индуктивные сопротивления и емкостные проводимости увеличиваются в n раз, индуктивные проводимости уменьшаются в n раз [7].

Генерации и нагрузки для расчета режима высших гармонических составляющих представляются в матрице Y_n с учетом относительных сопротивлений ОП своими проводимостями на частоте рассчитываемой гармоники. При этом относительные сопротивления ОП и получаемая проводимость учитывают характер вводимого объекта.

В качестве задающих токов в матрицу-столбец I_n вводятся токи выпрямительных нагрузок, заданные либо непосредственно для n -й гармоники в узлах с такой нагрузкой, либо полученные из тока основной частоты, деленного на коэффициент тока гармоники.

Решением системы уравнений на частоте n -й гармоники являются узловые напряжения и токи в ветвях.

Вычисления производятся для каждой из учитываемых высших гармоник. После получения результатов расчета режима на частоте последней из заданных гармоник определяются коэффициенты гармоник и коэффициенты несинусоидальности по напряжению для всех узлов сети [8].

Блок-схема алгоритма расчета несинусоидального режима представлена на рис. 4.

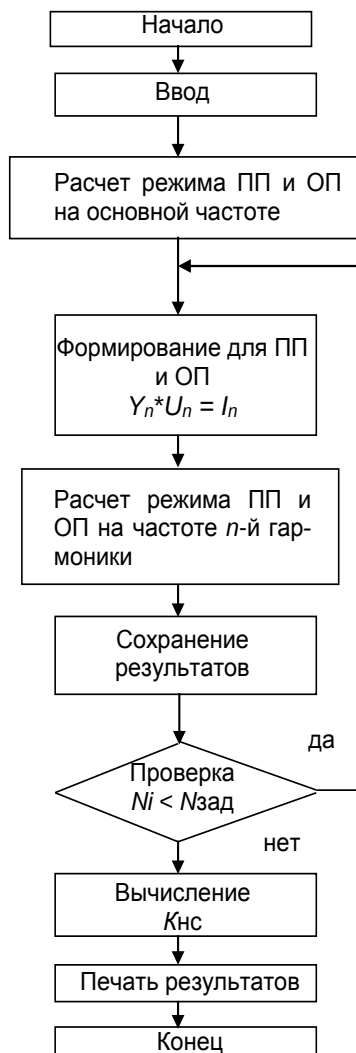


Рис. 4. Блок-схема расчета несинусоидального режима сети

Расчетные эксперименты на модели электрической сети 110–35–10 кВ выполнены для исследования возможных установившихся,

несимметричных и несинусоидальных электрических режимов. Расчет и анализ рассматриваемой сети проводятся при помощи программно-вычислительного комплекса (ПВК) «Качество электроэнергии». ПВК разработан на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ.

Результаты исследования. Результаты расчетов по заданным узлам и связям моделируемой электрической сети отображены на графиках (рис. 5–10).

На рис. 5, 6 показаны коэффициенты напряжений гармоник от 3-й до 39-й вдоль линии в виде кривых. Анализ графиков показывает, что гармоники не подвержены определённому закону распределения и изменяются хаотично. Наглядно видно, что превышены допустимые значения всех коэффициентов напряжений гармоник. Превышение норм практически в 2 раза наблюдается для гармоник, кратных трем (3-й, 9-й, 15-й и т.д.). Максимальное превышение нормированных значений зафиксировано на 13-й гармонике, оно составило свыше 20 % при норме в 1,5 %.

На рис. 7 показано относительное увеличение напряжений высших гармоник на шинах 10 кВ ПС «Потребитель 3» по отношению к началу линии 35 кВ по результатам расчета в режиме нормальных нагрузок. Анализ графика показывает, что гармоники под номерами от 11 до 17 имеют наибольшее увеличение напряжения в диапазоне от 2 до 5,5 крат.

Далее производится анализ относительного изменения напряжений гармоник вдоль линии 35 кВ при одинаковых величинах токов гармоник в начале линии.

Повторно производим расчеты режимов и составляем графическое отображение изменений коэффициентов напряжений гармоник от 3-й до 39-й (рис. 8, 9).

На рис. 10 показано относительное увеличение напряжений ВГ от начала линии 35 кВ до шин 10 кВ ПС «Потребитель 3» по результатам расчета при нормальных нагрузках потребителей и единичных токах ВГ величиной 10 А.

Анализ графиков изменений напряжений вдоль линии показывает, что характер изменения носит волновой характер в полном соответствии с теорией для цепей с распределенными параметрами. Волновой характер начинает проявляться (на графиках) для напряжений гармоник, начиная с 9-й. Для линии 35 кВ длиной более 100 км складывается такое соотношение индуктивностей и емкостей, которое приводит к увеличению напряжений гармоник от начала к концу.

Сравнение результатов разных способов задания токов гармоник показывает, что наиболее показателен способ задания одинаковых токов в начале линии.

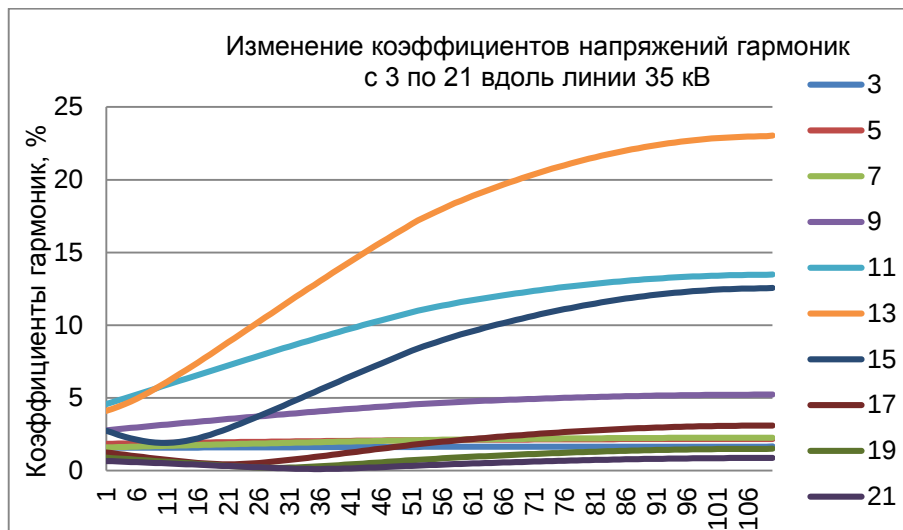


Рис. 5. Изменение коэффициентов напряжений гармоник с 3 по 21

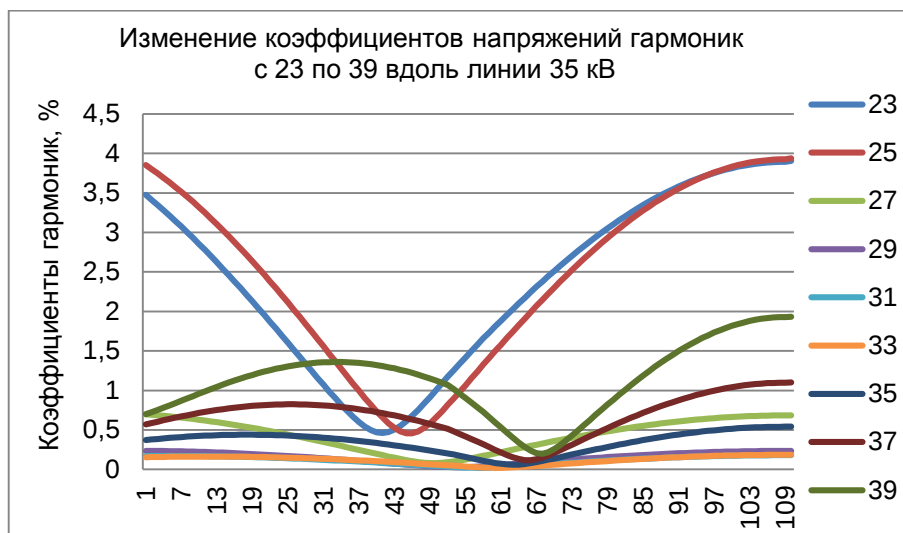


Рис. 6. Изменение коэффициентов напряжений гармоник с 23 по 39 гармоники

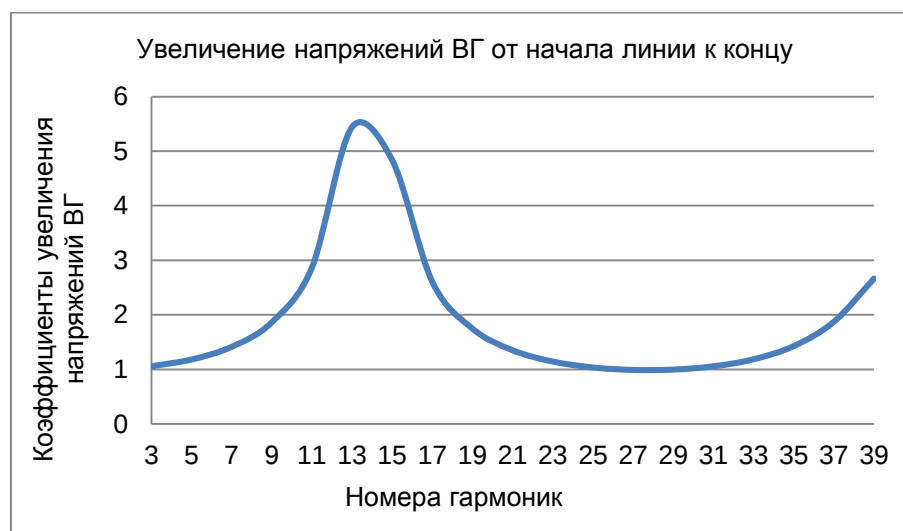


Рис. 7. Расчетные коэффициенты увеличения напряжений ВГ от начала к концу линии 35 кВ

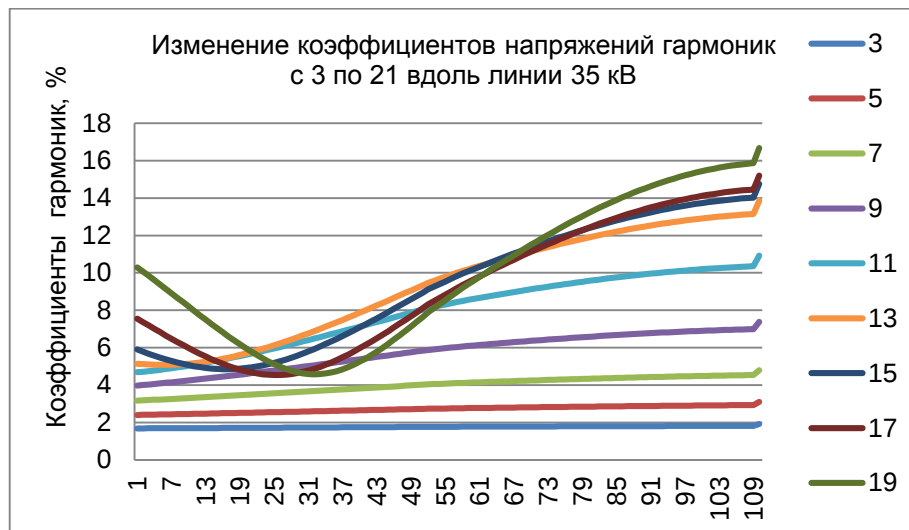


Рис. 8. Изменение коэффициентов напряжений гармоник с 3 по 21 гармоники

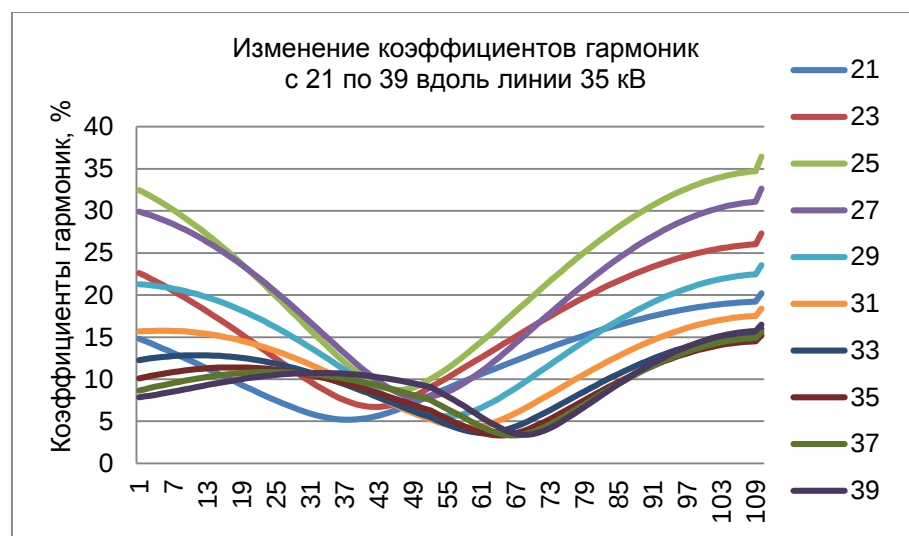


Рис. 9 Изменение коэффициентов напряжений гармоник с 23 по 39 гармоники

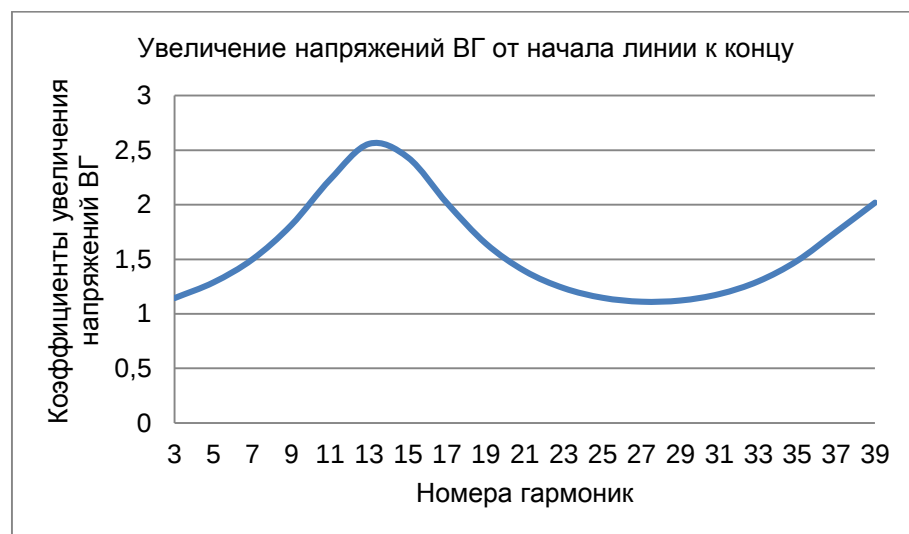


Рис. 10. Расчетные коэффициенты увеличения напряжений высших гармоник от начала к концу линии 35 кВ при единичных токах ВГ

Решение проблемы. В качестве метода снижения несинусоидальности напряжения на шинах потребителей рассматривается использование реактора в рассечку ВЛ 35 кВ как источника дополнительной индуктивности (рис. 11). Индуктивное сопротивление элемента 1 увеличивается с увеличением частоты тока, протекающего по нему, при этом изменяется соотношение индуктивных сопротивлений питающей сети и линии – токи высших гармоник перераспределяются обратно пропорционально сопротивлениям, т.е. чем больше с частотой становится сопротивление, тем меньше ток потечет в эту часть схемы. Соответственно, будет меньше напряжение высшей гармоники на нагрузке, подключенной к линии электропередачи [9].

Предполагается, что с помощью реактора, включенного последовательно с линией электропередачи в сети переменного тока, можно уменьшить токи высших гармоник в линии, подключенной к сети с несинусоидальным напряжением и напряжения высших гармоник на нагрузках, подключенных к линии [10–11].

В качестве реактора предлагается фильтровый реактор типа ФРТС 35-117-257,3 на номинальный ток 117 А индуктивностью 0,257 Гн (80,7 Ом на частоте 1-й гармоники) [10]. Учитывая, что номинальный ток рассматриваемой ли-

нии 35 кВ составляет 100 А, указанный реактор допустимо устанавливать в начале ВЛ. Моделирование данного режима работы электрической сети производится при помощи увеличения индуктивного сопротивления в связи между узлами 101 и 301 до значения $X = 80,391$ Ом.

На основании полученных расчетов проводится графическое отображение изменения напряжений гармоник вдоль ВЛ 35 кВ с установленным в рассечку реактором. Величина напряжения электропитания на протяжении всей длины ВЛ стала колебаться значительно меньше, мгновенные значения напряжения на участках ВЛ не изменились или незначительно уменьшились, что не является проблемой, так как поддержание напряжения в данной ситуации осуществляется за счет применения изменения коэффициента трансформации на трансформаторах с РПН [12–16].

Целесообразность установки реактора в рассечку ВЛ 35 кВ подтверждается графиками коэффициентов напряжений гармоник, значения которых кратно снижаются до допустимых на протяжении всей длины ВЛ (рис. 12, 13). Исключение составляют 23-я и 25-я гармоники, величины которых превышают допустимые в среднем на 0,5–0,8 % (рис. 13).

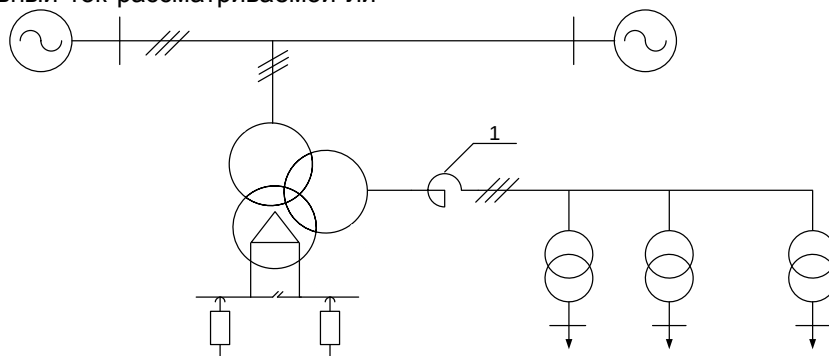


Рис. 11. Схема рассматриваемой электрической сети 110–35–10 кВ с установкой реактора в рассечку ВЛ 35 кВ: 1 – фильтровый реактор

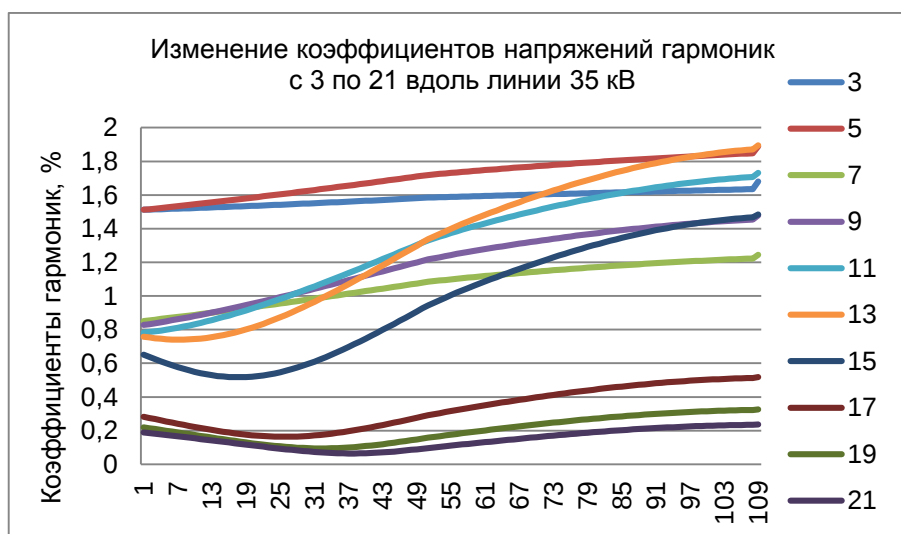


Рис. 12. Изменение напряжений гармоник с 3 по 21 после установки реактора

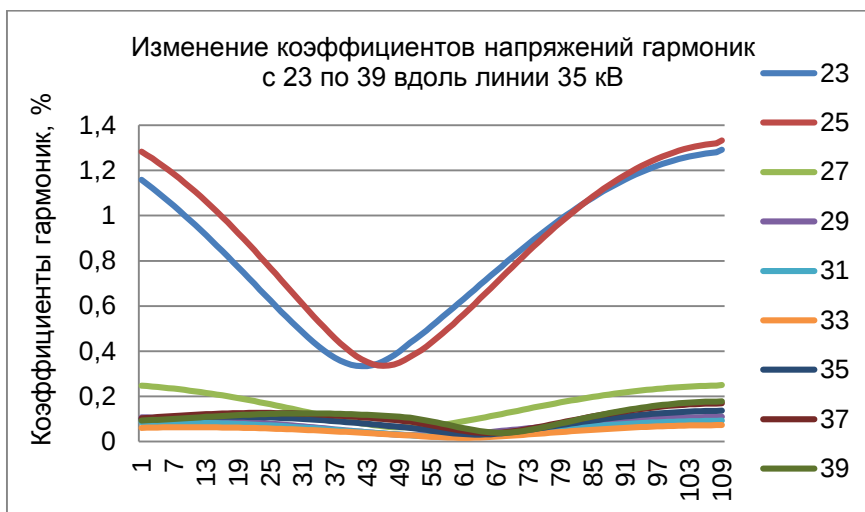


Рис. 13. Изменение кривых гармонических составляющих с 23 по 39 гармоники после установки реактора

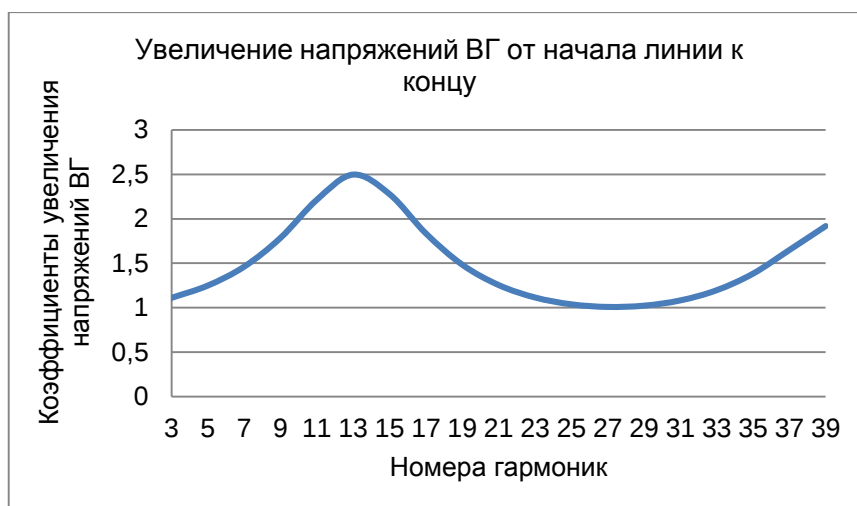


Рис. 14. Расчетные коэффициенты увеличения напряжений высших гармоник от начала к концу линии 35 кВ при включенном реакторе

Выводы. Представленные расчеты несинусоидальных режимов сети показывают, что несинусоидальность напряжений и уровень напряжений высших гармоник, составляющих на шинах 10 кВ (0,4 кВ) потребителей, зависят от соотношения L-C параметров линии 35 кВ. На частотах всех гармоник наблюдается увеличение напряжений гармоник от начала линии к ее концу, что соответствует теории волновых процессов в линиях электропередачи [17–18].

Вероятной причиной имеющихся несоответствий по ПКЭ является работа однофазной нелинейной тяговой нагрузки в сочетании с неблагоприятной схемой питающей сети (ВЛ 35 кВ длиной более 100 км), способствующей дополнительному ухудшению качества электроэнергии.

Сравнение полученных результатов до и после установки реактора показывает, что использование реактора, установленного в расщелку ВЛ 35 кВ, является эффективной мерой

по устранению влияния гармоник на действующую электрическую сеть.

Список литературы

1. Вагин Г.Я., Куликов А.Л. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. – 2019. – № 6. – С. 54–59. <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.
2. Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н. Нормализация уровня несинусоидальности напряжения в распределительных сетях // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – № 1. – С. 9–13.
3. Коверникова Л.И., Серков А.В., Шамонов Р.Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика. – 2018. – № 1. – С. 75–85.
4. Висящев А.Н., Федосов Д.С., Федчишин В.В. Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети // Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф.,

г. Москва, 26–28 ноября 2014 г. – М.: Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014. – С. 209–2165.

5. **Zhang Xiao-Ping, Yan Zuanhong.** Energy quality: a definition // *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. – 2020. – Vol. 7. – P. 430–440. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767>.

6. **Регулируемые** фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения / В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, И.Г. Важенина, А.Ф. Синяговский // *Омский научный вестник*. – 2018. – № 5. – С. 45–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.

7. **Serfontein D., Rens J., Botha G.** Harmonic impedance assessment using prevailing phasors // *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. – 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.

8. **Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н.** Эффективность снижения уровня несинусоидальности напряжения на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2021. – № 6. – С. 121–128.

9. **Способ** уменьшения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, О.С. Беляева, В.А. Кирдяшев // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2021. – Т. 29, № 1. – С. 120–132. <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.

10. **Федосов Д.С.** Методы уменьшения погрешностей экспериментального определения параметров схем замещения потребителей на высших гармониках // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2013. – № 10. – С. 254–261.

11. **Федосов Д.С.** Разработка метода оценки влияния потребителей на несинусоидальность и несимметрию напряжений в электрической сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. – 21 с.

12. **Гармонические** составляющие и насыщение электротехнической стали / Г.П. Муссонов, Д.С. Федосов, И.Н. Просекин, П.А. Никонова // *Интеллектуальная электротехника*. – 2020. – № 4. – С. 61–68.

13. **Assessing** time-varying harmonic interactions in a wind park / V. Ravindran, N. Nakhodchi, S. Rönnberg, M.H.J. Bollen // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 68151–68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.

14. **Федотов А.И., Федотов Е.А., Чернова Н.В.** Схемы замещения вентильных преобразователей для расчета гармоник тока и напряжения. Ч. II // *Электричество*. – 2007. – № 11. – С. 38–45.

15. **Андрянова Л.П., Валеев Р.И.** Проблемы обеспечения качества электроэнергии и пути снижения потерь в сельских распределительных электрических сетях 0,4 кВ // *Международный научный журнал «Инновационная Наука»*. – 2018. – № 03. – С. 20–24.

16. **Power** system control and stability / V. Vittal, J.D. McCalley, P.M. Anderson, A.A. Fouad. – 3rd Edition. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. – 832 p.

17. **Оценка** эффективности метода двух изменений при определении параметров схем замещения элементов электрической сети для высших гармонических составляющих токов и напряжений / Е.О. Анненков, Е.В. Зубова, А.С. Селезнев, Д.С. Федосов // *iPolytech Journal*. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 401–414. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>.

18. **Karimov R.Ch.** Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonics in systems of power supply // *Scientific journal "European*

Science review" Austria, Vienna. – 2015. – No. 9–10, September–October. – P. 144–146.

References

1. Vagin, G.Ya., Kulikov, A.L. Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya [The quality of electrical energy in power supply systems. Analysis of the state of the methods of rationing and control]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 6, pp. 54–59. <https://doi.org/10.34831/EP.2019.1055.44184>.

2. Kudryashev, G.S., Tret'yakov, A.N. Normalizatsiya urovnya nesinusoidal'nosti napryazheniya v raspredelitel'nykh setyakh [Normalization of the voltage unsinusoidality in distribution networks]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*, 2022, no. 1, pp. 9–13.

3. Kovernikova, L.I., Serkov, A.V., Shamonov, R.G. Ob upravlenii kachestvom elektricheskoy energii v Rossii v proshlom, nastoyashchem i budushchem [On the management of the quality of electric energy in Russia in the past, present and future]. *Energeticheskaya politika*, 2018, no. 1, pp. 75–85.

4. Visyashchev, A.N., Fedosov, D.S., Fedchishin, V.V. Otsenka vliyaniya elektropriemnikov na uroven' garmonicheskikh sostavlyayushchikh napryazheniya v elektricheskoy seti [Assessment of the influence of power receivers on the level of harmonic components of voltage in the electrical network]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii», g. Moskva, 26–28 noyabrya 2014 g.* [Proceedings of research papers of international scientific conference "Quality management of electrical energy". Moscow, 26–28 November 2014]. Moscow: Tsentr poligraficheskikh uslug «Raduga», 2014, pp. 209–216.

5. Zhang, Xiao-Ping, Yan, Zuanhong. Energy quality: a definition. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2020, vol. 7, pp. 430–440. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029767>.

6. Dovgun, V.P., Egorov, D.E., Vazhenina, I.G., Sinyagovskiy, A.F. Reguliruemye filtrokompensiruyushchie ustroystva dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Adjustable filter compensating devices for traction power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2018, no. 5, pp. 45–50. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-161-45-50>.

7. Serfontein, D., Rens, J., Botha, G. Harmonic impedance assessment using prevailing phasors. *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378872>.

8. Kudryashev, G.S., Tret'yakov, A.N. Effektivnost' snizheniya urovnya nesinusoidal'nosti napryazheniya na sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiyakh Irkutskoy oblasti [Efficiency of reducing the level of non-sinusoidal voltage at agricultural enterprises of the Irkutsk region]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, no. 6, pp. 121–128.

9. Starikov, A.V., Lisin, S.L., Belyaeva, O.S., Kir-dyashev, V.A. Sposob umen'sheniya amplitud vysshikh garmonik v vykhodnom napryazhenii chastotnogo preobrazovatelya [Method for reducing the amplitudes of higher harmonics in the output voltage of a frequency converter]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 29, no. 1, pp. 120–132. <https://doi.org/10.14498/tech.2021.1.9>.

10. Fedosov, D.S. Metody umen'sheniya pogreshnostey eksperimental'nogo opredeleniya parametrov skhem zameshcheniya potrebitel'ey na vysshikh garmoni-

kakh [Methods for reducing errors in the experimental determination of the parameters of consumer substitution circuits at higher harmonics]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 10, pp. 254–261.

11. Fedosov, D.S. *Razrabotka metoda otsenki vliyaniya potrebitel'nykh na nesinusoidal'nost' i nesimmetriyu napryazheniy v elektricheskoy seti*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of a method for assessing the influence of consumers on the non-sinusoidality and asymmetry of voltages in an electrical network. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2014. 21 p.

12. Mussonov, G.P., Fedosov, D.S., Prosekin, I.N., Nikonova, P.A. Garmonicheskie sostavlyayushchie i nasyshchenie elektrotekhnicheskoy stali [Harmonic components and saturation of electrical steel]. *Intel'ktual'naya elektrotekhnika*, 2020, no. 4, pp. 61–68.

13. Ravindran, V., Nakhodchi, N., Rönnberg, S., Bollen, M.H.J. Assessing time-varying harmonic interactions in a wind park. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 68151–68160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076879>.

14. Fedotov, A.I., Fedotov, E.A., Chernova, N.V. Skhemy zameshcheniya ventil'nykh preobrazovateley dlya rascheta garmonik toka i napryazheniya. Ch. II [Equivalent circuits for valve converters for calculating current and voltage harmonics. Part II]. *Elektrichestvo*, 2007, no. 11, pp. 38–45.

15. Andrianova, L.P., Valeev, R.I. Problemy obespecheniya kachestva elektroenergii i puti snizheniya poter' v sel'skikh raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh 0,4 kV [Problems of ensuring the quality of electricity and ways to reduce losses in rural distribution electrical networks 0,4 kV]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Innovatsionnaya Nauka»*, 2018, no. 03, pp. 20–24.

16. Vittal, V., McCalley, J.D., Anderson, P.M., Fouad, A.A. Power system control and stability. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2002. 832 p.

17. Annenkov, E.O., Zubova, E.V., Seleznev, A.S., Fedosov, D.S. Otsenka effektivnosti metoda dvukh izmereniy pri opredelenii parametrov skhem zameshcheniya elementov elektricheskoy seti dlya vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh tokov i napryazheniy [Evaluation of the effectiveness of the two-measurement method in determining the parameters of the equivalent circuits of electrical network elements for higher harmonic components of currents and voltages]. *iPolytech Journal*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 401–414. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-401-414>.

18. Karimov, R.Ch. Research of the stabilizer of current taking into account the highest harmonics in systems of power supply. *Scientific journal "European Science review" Austria, Vienna*, 2015, no. 9–10, September–October, pp. 144–146.