

УДК 621.316.11.001.5

К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Харлов Николай Николаевич¹,

rcr@tpu.ru

Ушаков Василий Яковлевич¹,

vyush@tpu.ru

Тарасов Евгений Владимирович¹,

rcr@tpu.ru

Булыга Леонид Леонидович¹,

rcr@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью исследования несинусоидальных режимов распределительных электрических сетей для получения более полной информации об эффективности транспорта электрической энергии. Прогнозирование показателей качества напряжения и потерь электрической энергии в элементах сети должно обеспечить минимизацию уровня потерь и тенденцию к улучшению качества.

Цель работы: исследование корреляционных связей и статистических распределений высших гармонических составляющих узловых напряжений и узловых токов распределительных электрических сетей 110 кВ, определение сглаживающих функций для расчета режима сетей в вероятностной постановке.

Методы исследования. Для моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей использован программный комплекс, реализованный на языке программирования Fortran. Данные для расчета были получены при проведении энергетического обследования Межрегиональной распределительной сетевой компании Сибири, а именно таких филиалов как: «Алтай-энерго», «Бурятэнерго» и «Красэнерго». Сбор необходимых данных был проведен при помощи анализатора количества и качества электрической энергии AR-5 «Circuitor». Осциллограммы напряжений и токов, содержащие 128 точек, были разложены в ряд Фурье. Проанализированы корреляционные зависимости между основной гармонической составляющей и высшими гармониками напряжения и тока. Сглаживание статистических распределений и получение их аналитических зависимостей осуществляется посредством представления закона распределения в виде ряда, основанного на нормальном законе распределения.

Результаты. Установлены статистические свойства распределений гармонических составляющих узловых напряжений и токов. Исследованы статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых напряжений, позволившие определить зависимости уни- и мультимодальных статистических распределений и качества сглаживания.

Ключевые слова:

Несинусоидальность, несимметрия, режимы электрических сетей, высшие гармоники тока и напряжения, статистические распределения.

1. Постановка задачи

Проблема моделирования несинусоидальных режимов распределительных электрических сетей вытекает из необходимости расчета и прогнозирования показателей качества напряжения и потерь в элементах сети с целью обеспечения эффективности транспорта электрической энергии. Ее решение даст возможность улучшить качество напряжения и минимизировать потери электрической мощности и энергии на основе рационализации выбора оборудования и внедрения мероприятий управления режимами. Широкомасштабные обследования режимов распределительных сетей различных энергосистем России показали повышенный уровень несинусоидальности и несимметрии узловых напряжений и токов [1–2]. Несинусоидальные узловые напряжения вызывают загрузку линий токами гармонических составляющих, которые в условиях резонанса, вызванного нали-

чием распределенных вдоль трассы линий индуктивностей и емкостей проводов, увеличивают потери. Несимметрия токов и напряжений также влияет на величину потерь [3–8]. Таким образом, задачи улучшения качества напряжения и минимизации потерь электрической мощности и энергии в распределительных электрических сетях в аспекте обеспечения эффективности транспорта электроэнергии по существу представляют собой общую задачу. Решение ее возможно лишь на основе математических моделей, определяющих как качество режимных параметров (прежде всего напряжений и токов), так и общность режима сети. Разработка таких моделей – первоочередная задача на пути к сформулированной цели.

В настоящей статье обсуждаются результаты обследования режимов и соответствующих математических моделей для несинусоидальных режимов распределительных сетей.

2. Методика исследования

Приведенные ниже данные получены на основе обследований режимов десяти районных энергосистем России, отличающихся климатическими условиями и структурой нагрузки. При обследовании использованы анализаторы количества и качества электрической энергии производства фирмы Circutor (Испания). Обработка результатов осуществлялась с использованием как стандартного математического обеспечения, поставляемого с прибором, так и специализированных авторских программ. Прежде всего, проведены измерения модулей, действительных и мнимых составляющих узловых напряжений и токов. За начало отсчета принята первая гармоническая составляющая фазного узлового напряжения фазы «А», вектор которой совмещается с действительной осью. Время измерений составляло, как правило, одни сутки, а интервал между отдельными измерениями – 2,5 минуты. Таким образом, по каждому обследованному узлу получены следующие результаты: 570–580 измерений для каждой фазы. Осциллограммы напряжений и токов содержали 128 точек, что вполне достаточно для получения гармонических составляющих до пятидесятой гармоники включительно (согласно теореме Котельникова).

3. Результаты обследований и их обработка

Измерения показали, что все высшие гармонические составляющие модулей узловых напряжений и токов от измерения к измерению изменяются случайным образом (рис. 1). Это же относится к их действительным и мнимым составляющим.

Типичные многоугольники статистических распределений модулей напряжений и токов гармоник показаны на рис. 2.

Установлено, что распределения в общем случае являются как унимодальными, так и мультимодальными [9–11]. Причина мультимодальности распределений лежит в большом количестве факторов, определяющих режим, в частности в суточном изменении электропотребления (в первую очередь – состава электроприемников и их мощности). Высшие гармонические составляющие узловых токов, как правило, статистически с ними связаны. Это обстоятельство позволяет предположить, что реальные распределения высших гармонических составляющих являются суммой нескольких элементарных распределений, зависящих от режима гармоник основной частоты [12].

Модули основных и высших гармонических составляющих узловых напряжений и токов облада-



Рис. 1. Изменение модулей узловых напряжений и токов подстанции распределительной сети напряжением 110 кВ в течение суток

Fig. 1. Change of voltages and currents nodal modules of the substation of 110 kV distribution network during the day

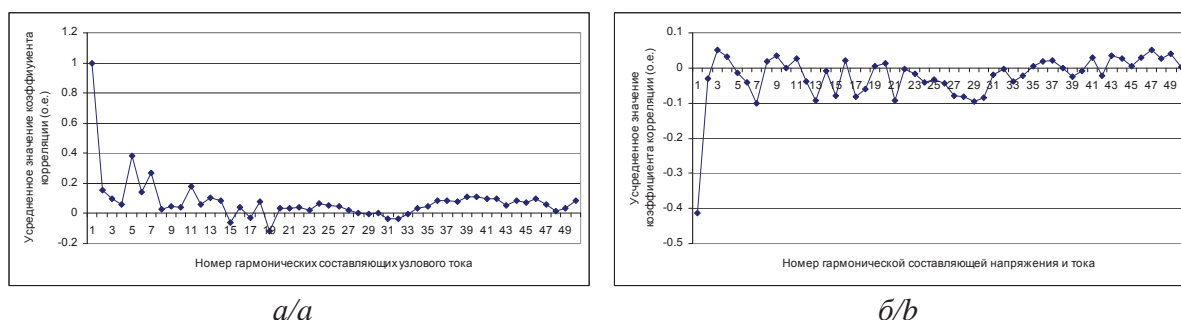


a/a

б/б

Рис. 2. Многоугольники суточных распределений статистических вероятностей модулей напряжения (а) и тока (б) четвертой гармоники фазы «А»

Fig. 2. Polygons of daily distributions of statistical probabilities of voltage (a) and current (b) modules of the fourth harmonic of the phase «А»



a/a

b/b

Рис. 3. Усредненное значение коэффициентов корреляции между модулями первой гармоники и модулями высших гармоник узлового тока (а); между модулями первой гармоники узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока (б)

Fig. 3. Average value of the correlation coefficients between the modules of fundamental harmonic and higher current harmonics (а); between the modules of fundamental voltage harmonic and higher current harmonics (b)

ют статистическими связями. Несмотря на различие в климатических условиях и в составе нагрузок, удастся установить некоторые закономерности в изменении корреляции отдельных параметров режима. Так, для обследованных энергосистем установлено, что линейная корреляция практически отсутствует между высшими гармоническими составляющими узловых напряжений. Это же относится к корреляции модуля первой гармоники узлового напряжения и к модулям высших гармоник узлового тока.

Значения коэффициентов линейной корреляции, полученные усреднением по результатам обследования 10 энергосистем, приведены на рис. 3.

Корреляция между модулями высших гармоник узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока имеет место в основном между гармониками одинаковых номеров и для различных составляющих лежит в пределах 0,25–0,55 (рис. 4).

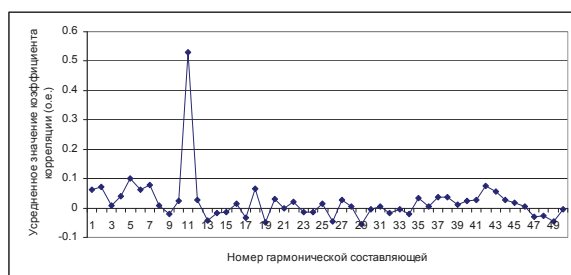


Рис. 4. Усредненное значение коэффициентов корреляции между модулем одиннадцатой гармоники узлового напряжения и модулями высших гармоник узлового тока

Fig. 4. Average value of the correlation coefficients between the module of the eleventh voltage harmonic and the higher current harmonic

На основании полученных результатов корреляционного анализа сделан вывод о линейных свойствах частотных характеристик входных сопротивлений обследованных узлов.

Сглаживание статистических распределений и получение их аналитических выражений позволяют в дальнейшем выполнять расчеты несинусоидальных режимов и потерь мощности и энергии в сложных электрических сетях в детерминированной и вероятностной постановке [13–17]. Одним из способов сглаживания статистических распределений и получения их аналитических зависимостей является представление закона распределения в виде ряда, основанного на нормальном законе распределения [18–20]. В этом случае функция плотности распределения имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x} \left[\varphi\left(\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) - \frac{1}{3!} \frac{D_{x^3}}{\sigma_x^3} \varphi^{(3)} \right. \\ \left. + \frac{1}{4!} \frac{D_{x^4}}{\sigma_x^4} \varphi^{(4)} \right. \\ \left. - \dots \right] \quad (1)$$

Здесь обозначения приняты в соответствии с [4]. Помимо общепринятых обозначений также присутствуют:

$$\varphi\left(\frac{x-m_x}{\sigma_x}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}},$$

$\varphi^{(n)}$ – n -я производная функции $\varphi(x)$ по x ; D_j – центральный момент j -го порядка случайной величины X .

Опуская исследования сходимости данного ряда, остановимся на исследовании значений коэффициентов, характеризующих статистическую асимметрию и статистический эксцесс и их влияние на сходимость сглаживающего ряда и на величину расхождения между теоретическим и статистическим распределениями (например, χ^2):

$$\gamma_{1X}^{**} = \frac{D_3^{**}}{(\sigma_X^{**})^3}; \gamma_{2X}^{**} = \frac{D_4^{**}}{(\sigma_X^{**})^4} - 3.$$

Исследования показали, что существует определенная закономерность в изменении значений γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} и значений χ^2 . На рис. 5 показаны графики изменения значений γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} для статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения на шинах класса 110 кВ одной из подстанций Восточной Сибири, определенных в результате суточных измерений, а на рис. 6 – график изменения критерия χ^2 этих же распределений. Здесь отчетливо просматривается тенденция значительного уменьшения коэффициентов γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} и критерия χ^2 , вычисленного при сглаживании статистического распределения рядом (1) при возрастании номеров гармонических составляющих. Для нечетных гармонических составляющих узлового напряжения критерий χ^2 соответствует совпадению теоретической и статистической кривых с вероятностью не менее 0,7 (70 %) при числе «степеней свободы», равном 27.

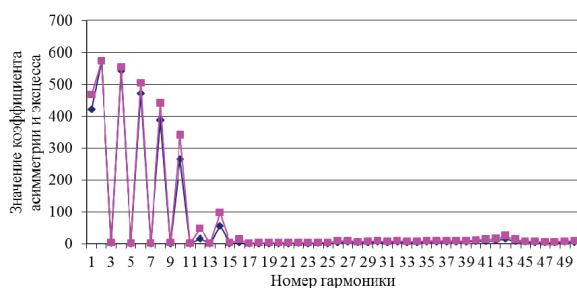


Рис. 5. Значения коэффициентов γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} для статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения сети 110 кВ

Fig. 5. Value of coefficients γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} for statistical distributions of the harmonic components modules in node voltage of the 110 kV network

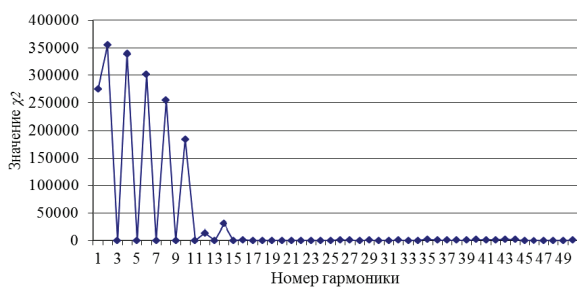


Рис. 6. Значения критерия χ^2 при сглаживании статистических распределений модулей гармонических составляющих узлового напряжения сети 110 кВ рядом из четырех первых слагаемых

Fig. 6. Values of the criterion χ^2 for smoothing the statistical distributions of the higher harmonic voltage modules (110 kV network) by the series of the first four terms

Принципиально иная картина наблюдается для модулей гармонических составляющих узловых токов, где только для отдельных гармонических составляющих наблюдались значения γ_{1X}^{**} , γ_{2X}^{**} , при которых статистическое распределение хорошо сглаживалось рядом (1).

К сожалению, рассмотренный подход к сглаживанию статистических распределений зачастую не обеспечивает сглаживание мультимодальных статистических распределений во всех случаях.

В качестве примеров «хорошего» и «плохого» сглаживания на рис. 7, 8 приведены гистограммы распределений и сглаживающие кривые, построенные на основе ряда (1) модулей седьмой гармонической составляющей узлового напряжения сети 110 кВ.

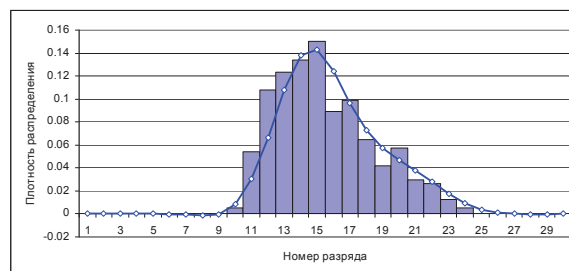


Рис. 7. Гистограмма распределения и сглаживающая кривая модулей седьмой гармонической составляющей узлового напряжения сети 110 кВ

Fig. 7. Distribution histogram and smoothing curve of the modules of the seventh higher harmonic of nodal voltages in the 110 kV network

Как показывает анализ статистических распределений, основной причиной «плохого» сглаживания на основе ряда (1) является их мультимодальность, в то время как рядом (1) достаточно хорошо сглаживаются одномодальные распределения. Для сглаживания мультимодальных статистических распределений требуются соответствующие модели, позволяющие учесть их специфику.

4. Выводы

1. В распределительных сетях энергосистем наблюдается тенденция к росту величины высших гармонических составляющих напряжений и токов. Проведенные обследования режимов позволили установить статистические свойства распределений гармонических составляющих узловых напряжений и токов. В частности, установлены корреляционные связи и их отсутствие между основными и высшими гармоническими составляющими. Так, установлено, что корреляция существует между гармоническими составляющими узловых напряжений и токов с одинаковыми номерами. Значение коэффициента корреляции изменяется в пределах 0,25–0,55, снижаясь с увеличением номера.
2. Статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых напряжений нечетных порядков в распределительных электрических сетях 110 кВ достаточно хорошо сглаживаются рядами, основанными на нормальном законе распределения, что не относится к модулям четных гармоник напряжения.

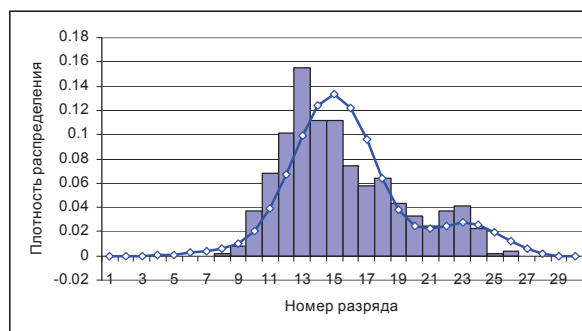
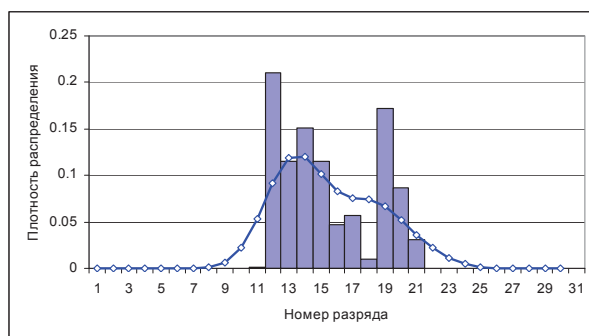


Рис. 8. Гистограммы распределения и сглаживающие кривые модулей первой и четвертой гармонической составляющей узлового тока сети 110 кВ

Fig. 8. Distribution histogram and smoothing curve of the modules of the first and the fourth higher harmonics of nodal current in the 110 kV network

3. Статистические распределения модулей высших гармонических составляющих узловых токов распределительных сетей 110 кВ как четных, так и нечетных порядков указанными рядами сглаживаются значительно хуже, но существует тенденция к улучшению сглаживания с ростом порядка гармоники.
4. «Плохое» сглаживание обусловлено, как правило, мультимодальностью статистических ра-

спределений. Причина мультимодальности распределений лежит в большом количестве факторов, определяющих режим, в частности в суточном изменении электропотребления. Для сглаживания мультимодальных статистических распределений требуются соответствующие модели, позволяющие учесть их специфику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Режимные свойства электрических сетей 110 кВ юга России в обеспечении эффективности транспорта электроэнергии / В.С. Боровиков, М.В. Волков, В.В. Иванов и др. – Томск: STT, 2013. – 268 с.
2. Силаев М.А., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. Влияние режимов работы энергосистем на несинусоидальность и несимметрию напряжений в магистральных электрических сетях // Сборник трудов Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление». – Иркутск, 2015. – С. 189–194.
3. Коверникова Л.И. Некоторые свойства параметров режимов гармоник в сети с распределенными нелинейными нагрузками // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». – Москва, 2014. – С. 101–108.
4. Смирнов С.С., Коверникова Л.И. Нормализация уровней напряжения высших гармоник в сетях высокого напряжения // Электричество. – 2000. – № 11. – С. 25–30.
5. Шаров Ю.В., Карташев И.И. Современные задачи управления качеством электроэнергии // Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга"». – Москва, 2014. – С. 74–81.
6. Zhezhelenko I.V., Sayenko Y.L., Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems // Proc. of X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. – Łagów, Poland, 2010. – P. 98–105.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Effect of High Harmonics on Electricity Consumers in Distribution Networks // Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013). – Brugge, Belgium, 2013. – P. 841–845.
8. Nicholson G., Gosbell V.J., Parsotam A. Analysis of harmonic distortion levels on a distribution network // Proc. of the Power Engineering Conference. – Perth, WA, 2007. – P. 1–7.
9. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Моделирование установившихся режимов сложных электрических сетей с нелинейными и несимметричными нагрузками // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 229–286.
10. Грунин О.М., Пушков К.А. Совершенствование моделей и методов анализа установившихся режимов электрических систем // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 361–65.
11. Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation / Z. Mahmoodzadeh, N. Ghanbari, A. Mehrizi-Sani, M. Ehsan // Power & Energy Society General Meeting. – Denver, Colorado, 2015. – P. 1–5.
12. Богатырев Л.Л., Манусов В.З., Содномдорж Д. Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем в условиях неопределенности. – Улан-Батор: Изд-во МГТУ, 1999. – 348 с.
13. Gamm A.Z., Kovernikova L.I. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements // International review on modelling and simulations. – 2011. – P. 3051–3058.
14. Войтов О.Н., Гамм А.З., Голуб И.И. Управление потокораспределением в ЭЭС при вероятностном характере информации // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сборник статей Всероссийской конференции. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 345–352.
15. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / А.З. Гамм, А.М. Глазунова, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Электричество. – 2009. – № 6. – С. 2–9.

16. Sanjib Ganguly, Dipanjan Samajpati. Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm // Sustainable energy. – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 688–697.
17. Chun-Lien Su. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models // Power systems. – 2010. – V. 25. – № 2. – P. 786–795.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
19. Лившиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления: в 2 т. Т. 1. Вероятностные и статические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы / Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – 896 с.
20. Гамм А.З., Герасимов Л.Н. Оценивание состояния в электроэнергетике. – М: Наука, 1983. – 303 с.

Поступила 04.02.2016 г.

Информация об авторах

Харлов Н.Н., кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ушаков В.Я., доктор технических наук, профессор кафедры электрических сетей и электротехники, директор Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Тарасов Е.В., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Булыга Л.Л., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.316.11.001.5

THE PROBLEM OF SIMULATION OF NON-SINUSOIDAL MODES IN DISTRIBUTED NETWORKS

Nikolay N. Kharlov¹,

rccr@tpu.ru

Vasilii Ya. Ushakov¹,

vyush@tpu.ru

Yevgeniy V. Tarasov¹,

rccr@tpu.ru

Leonid L. Bulyga¹,

rccr@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research of non-sinusoidal modes in distributed network consists in gathering full information about the efficiency of electric energy transportation. Prediction of voltage quality indices and electrical energy losses in network units should provide losses level minimization and trend to improve quality.

The main aim of the research is to study the correlations and statistical distributions of higher harmonics of nodal voltages/currents in 110 kV distributed networks, to determine smoothing functions for calculating Stochastic mode of networks.

The methods of the research. The authors have used the software implemented in Fortran programming to simulate the non-sinusoidal modes of distributed networks. The data for calculation were obtained during energy survey of Interregional Distribution Grid Company of Siberia, namely such branches as: «Altaienergo», «Buriatenergo» and «Krasenergo». The required data were collected by using portable power analyzer AR-5 «Circutor». Voltage and current oscillograms, consisting of 128 point, were expanded in the Fourier series. The authors analyzed the correlation dependences of fundamental harmonic and higher harmonics of voltage and current. Smoothing of statistical distributions and obtaining their analytical dependencies were achieved using probability distribution in a series based on the Gauss distribution.

The results. The authors determined the statistical properties of higher harmonics distributions in nodal voltages/currents and studied the statistical distributions of higher harmonics modules in nodal voltages/currents, which allowed determining uni- and multimodal dependencies of statistical distribution and smoothing quality.

Key words:

Non-sinusoidal, asymmetric, modes of electrical networks, higher harmonics of current and voltage, statistical distributions.

REFERENCES

1. Borovikov V.S., Volkov M.V., Ivanov V.V. *Rezhimnye svoystva elektricheskikh setey 110 kV yuga Rossii v obespechenii effektivnosti transporta elektroenergii* [Modal properties of 110 kV electric networks of Southern Russia to ensure the efficiency of electricity transmission]. Tomsk, STT Publ., 2013. 268 p.
2. Silayev M.A., Tulskiy V.N., Shamonov R.G. Vliyaniye rezhimov raboty energosistem na nesinusoidalnost i nesimmetriyu napryazheniy v magistralnykh elektricheskikh setyakh [Influence of operational modes of power systems on nonsinusoidality and voltage unbalance in the main electric networks]. *Sbornik trudov Vserossiyskoy konferentsii. Energetika rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 189–194.
3. Kovernikova L.I. Nekotoryye svoystva parametrov rezhimov garmonik v seti s raspredelennymi nelineynymi nagruzkami [Some properties of the mode parameters of harmonics in the network with distributed non-linear loads]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii* [Proc. of the International scientific and practical conference. Quality management of electrical energy]. Moscow, 2014. pp. 101–108.
4. Smirnov S.S., Kovernikova L.I. Normalization of voltage harmonics in networks of high voltage electricity. *Electrical Technology Russia*, 2000, no. 11, pp. 25–30. In Rus.
5. Sharov Yu.V., Kartashev I.I. Sovremennyye zadachi upravleniya kachestvom elektroenergii [Modern power quality management tasks]. *Upravlenie kachestvom elektricheskoy energii. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Quality management of electrical energy. Proc. of the International scientific and practical conference.]. Moscow, 2014. pp. 74–81.
6. Zhezhelchenko I.V., Sayenko Y.L. Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems. *Proc. of X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. Łagów, 2010. pp. 98–105.
7. Suslov K.V., Stepanov V.S., Solonina N.N. Effect of High Harmonics on Electricity Consumers in Distribution Networks. *Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Brugge, 2013. pp. 841–845.
8. Nicholson G., Gosbel V.J., Parsotam A. Analysis of harmonic distortion levels on a distribution network. *Proc. of the Power Engineering Conference*. Perth, 2007. pp. 1–7.
9. Borovikov V.S., Kharlov N.N. Modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov slozhnykh elektricheskikh setey s nelineynymi i nesimmetrichnymi nagruzkami [Simulation of steady-state regimes of complex electrical networks with nonlinear and asymmetric loads]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye. Sbornik statey Vserossiyskoy konferentsii* [Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management. A collection of articles]. Irkutsk, 2015. pp. 229–286.
10. Grunin O.M., Pashkov K.A. Sovershenstvovaniye modeley i metodov analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem

- [Improvement of models and methods of analyzing the established modes of electrical systems]. *Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitie i upravleniye. Sbornik statey Vserossiyskoy konferentsii* [Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management. A collection of articles]. Irkutsk, 2015. pp. 361–365.
11. Mahmoodzadeh Z., Ghanbari N., Mehrizi-Sani A., Ehsan M. Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation. *Power & Energy Society General Meeting*. Denver, Colorado, 2015. pp. 1–5.
 12. Bogatyrev L.L., Manusov V.Z., Sodnomdorzh D. *Matematicheskoe modelirovanie rezhimov elektroenergeticheskikh sistem v usloviyakh neopredelennosti* [Mathematical modeling of modes of electric power systems with uncertainty conditions]. Ulan Bator, MGTU Press, 1999. 348 p.
 13. Gamm A.Z., Kovernikova L.I. Estimation of nonsinusoidal operating conditions in electric networks on the basis of measurements. *International review on modelling and simulations*, 2011, pp. 3051–3058.
 14. Voytov O.N., Gamm A.Z., Golub I.I. Upravlenie potokoraspredeleнием v EES pri veroyatnostom kharaktere informatsii [Load flow management in EES in probabilistic nature of information]. *Energetika v Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitie i upravleniye. A collection of articles* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in XXI century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 345–352.
 15. Gamm A.Z., Glazunov A.M., Grishin Yu.A., Kolosok I.N., Korokin E.S. Development of algorithms for estimating the condition of the power system. *Electrical Technology Russia*, 2009, no. 6, pp. 2–9. In Rus.
 16. Sanjib Ganguly, Dipanjan Samajpati. Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm. *Sustainable energy*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 688–697.
 17. Chun-Lien Su. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models. *Power systems*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 786–795.
 18. Ventzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 576 p.
 19. Livshits N.A., Pugachev V.N. *Veroyatnostny analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Veroyatnostnye i staticheskie kharakteristiki vozdeystviy i protsessov. Lineynye statsionarnye i nestatsionarnye sistemy* [Probabilistic analysis of automatic control systems. Vol. 1. Probability and static characteristics of effects and processes. Linear stationary and non-stationary system]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1963. 896 p.
 20. Gamm A.Z., Gerasimov L.N. *Otsenivanie sostoyaniya v elektroenergetiki* [State assessing in power sector]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 303 p.

Received: 4 February 2016.

Information about the authors

Nikolay N. Kharlov, Cand. Sc., associate professor, chief engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vasilii Ya. Ushakov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yevgeniy V. Tarasov, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid L. Bulyga, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.