

# О предельных значениях отклонения частоты напряжения генерирующих установок ТЭЦ и гистограммах ее распределения

УДК 621.311.1:621.316

**В статье рассмотрены характер и пределы отклонения частоты напряжения, вырабатываемого генерирующими установками ТЭЦ. Построены гистограммы частоты напряжения, позволяющие оперативно получать дополнительную информацию о работе генерирующих устройств в течение каждых суток. Отклонения частоты напряжения от его основного значения составляют за одну неделю не более  $\pm 0,065$  Гц. Пояснен механизм возможных преобразований таких уровней отклонения частоты напряжения в дополнительные «медленные изменения напряжения» электросети.**

**Тукшаитов Р.Х.,**  
профессор кафедры  
«Электрооборудование  
и электрохозяйство  
предприятий, организаций  
и учреждений»  
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

**Семенова О.Д.,**  
аспирант кафедры  
«Электрооборудование  
и электрохозяйство  
предприятий, организаций  
и учреждений»  
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

**Иванова В.Р.,**  
к.т.н., доцент кафедры  
«Электрооборудование  
и электрохозяйство  
предприятий, организаций  
и учреждений»  
ФГБОУ ВО «КГЭУ»

## Ключевые слова:

отклонение основной частоты, резонансный контур, преобразование нестабильности частоты, гистограмма, электросеть

**В** связи с внедрением силовой электроники происходит повышение эмиссии высших гармоник в электросеть, а это, в свою очередь, искажает форму кривой изменения напряжения в электросети [1, 2]. Обеспечиваемый уровень стабилизации частоты напряжения (ЧН) в энергосистеме является настолько высоким, что изучение данного вопроса до сих пор представлялось неактуальным.

Для анализа влияния нестабильности частоты электросети на электрооборудование необходимы, прежде всего, сведения о предельных отклонениях частоты напряжения электросети во времени, степени их соизмеримости с нормативными предельно допустимыми отклонениями частоты напряжения промышленной частоты. Согласно ГОСТ 32144-2013 [3] установлены сравнительно высокие требования к поддержанию частоты у потребителей — в пределах  $(50,0 \pm 0,2)$  Гц (нормально допустимый уровень частоты) не менее 95% времени в неделю без выхода за величину  $(50,0 \pm 0,4)$  Гц (предельно допустимый уровень частоты).

В последующем нормативном документе [4] в п. 11 приведено еще более высокое требование к поддержанию частоты в Единой энергосистеме России — в пределах  $(50,00 \pm 0,05)$  Гц (нормально допустимый уровень частоты) при допустимости нахождения значений частоты в пределах  $(50,0 \pm 0,2)$  Гц (предельно допустимый уровень частоты) с восстановлением нормального уровня частоты за время не более 15 минут. Поэтому последний нормативный документ следует, соответственно, относить к документам более высокого уровня. В отношении вновь введенного показателя «кратковременное отклонение» ЧН (п. 110) и его осуществленного нормирования в пределах уже от 47 до 55 Гц этот документ следует рассматривать также, как документ более высокого уровня. В результате анализа выявлено, что п. 110 несколько противоречит п. 11, поскольку в нем для «длительных отклонений» предлагается значительно более широкий диапазон ЧН (49–50,5 Гц).

Несмотря на небольшой предел допустимого «длительного отклонения» ЧН, выше отмеченный уровень нестабильности, исходя из частотных характеристик фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) [5–7], может быть источником дополнительного снижения качества электричества. В соответствии с нормативами [4], при «кратковременных отклонениях» ЧН качество электричества должно снижаться в большей степени, чем при «длительных» ее отклонениях.

Механизм негативного влияния неустойчивости ЧН на электрооборудование можно кратко пояснить следующим образом. Напряжение в электросети при наличии некоторой его неустойчивости по частоте можно рассматривать как частотно-модулированное (ЧМ) колебание с небольшой девиацией (отклонением) частоты, вызываемой случайными отклонениями режима работы генераторов ТЭЦ, которое в последующем при использовании ФКУ преобразовывается в амплитудные колебания.

Среди пассивных ФКУ наибольшее применение находит параллельное подключение последовательных контуров, настроенных на соответствующие нечетные высшие гармоники тока нагрузки. Каждое ФКУ обычно предназначено для подавления одной, двух или одновременно трех нечетных гармоник [5, 7]. Его избирательность по частоте определяется добротностью каждого контура. В радиотехнике полоса пропускания фильтра по частоте обычно определяется на уровне 0,7 значения максимума уровня подавления напряжения. Чем выше добротность, тем уже полоса пропускания частот тока и больше крутизна обеих ниспадающих ветвей частотной характеристики резонансного контура [8].

Поскольку настройка контура на требуемую частоту осуществляется всегда с некоторой неточностью, то основная частота в большинстве случаев оказывается лишь в области одного из склонов его резонансной кривой в области наибольшей ее крутизны. В этом случае любые отклонения основной ЧН ведут к тому, что контур дополнительно начинает выполнять роль простого демодулятора частотно-модулированных (ЧМ) колебаний в амплитудно-модулированных (АМ).

В случае, если частота настройки резонансного контура будет «точно» совпадать с основной частотой, что маловероятно, то и в этом случае колебания частоты напряжения электросети будут также преобразовываться в амплитудные колебания напря-

жения, но с меньшей и удвоенной амплитудой. Для более детального описания механизма преобразования частоты в дополнительные «медленные изменения напряжения» электросети [3] возникает необходимость, прежде всего, изучить характер и пределы неустойчивости частоты напряжения генераторных установок ТЭЦ.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа состояния вопроса использованы данные непрерывной регистрации частоты напряжения на ТЭЦ в течение одной недели в апреле месяце 2021 года, а также в мае того же года в электросети КГЭУ. Регистрация частоты напряжения осуществлялась в основном в конце каждой истекшей минуты. На основе полученных данных строились гистограммы частоты напряжения с разбиением частоты на 16 классов с шагом в 0,010 Гц. Сравнительно большое количество классов было предусмотрено для наглядной демонстрации наличия единичных предельных значений отклонения основной ЧН от номинального.

Для детального анализа характера отклонения ЧН строились гистограммы для каждых суток и для целой недели. Построение спектральной характеристики девиации частоты напряжения электросети в зависимости от длительности наблюдения осуществлялось по методике, аналогичной рассмотренной в работе [8].

Вычислялись средние значения размаха отклонения частоты от основной с периодами в 0,1; 1,0; 10; 100 и 1000 мин по результатам пятикратной обработки результатов измерений. На основе этих данных строился график зависимости размаха отклонения частоты от длительности наблюдения. Для удобства построения и представления данного графика методом интерполяции определялся размах основной частоты при частоте модулирующего колебания, равном 0,1; 0,01; 0,001 и 0,0001 Гц. Измерение отклонения основной частоты в электросети вуза осуществлялось энерготестером ПКЭ-А-С4 ежедневно в течение одной недели, начиная с 11.05.2021 г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунках 1.1–1.3 представлены наиболее наглядные гистограммы изменения ЧН в течение двух суток и за одну неделю регистрации ее в условиях одной из ТЭЦ. Из рисунка 1.1 следует, что в течение одних суток максимальное количество отклонений ЧН наблюдается в пределах 49,984–50,016 Гц. С вероятностью 0,95 ЧН не выходит за пределы 49,962–50,038 Гц. На другой гистограмме (рисунок 1.2) максимум отклонения ЧН более выражен и с некоторым превышением значения основной частоты. С вероятностью 0,95 ее отклонения от основной частоты на обеих гистограммах не превышает 0,038 Гц.

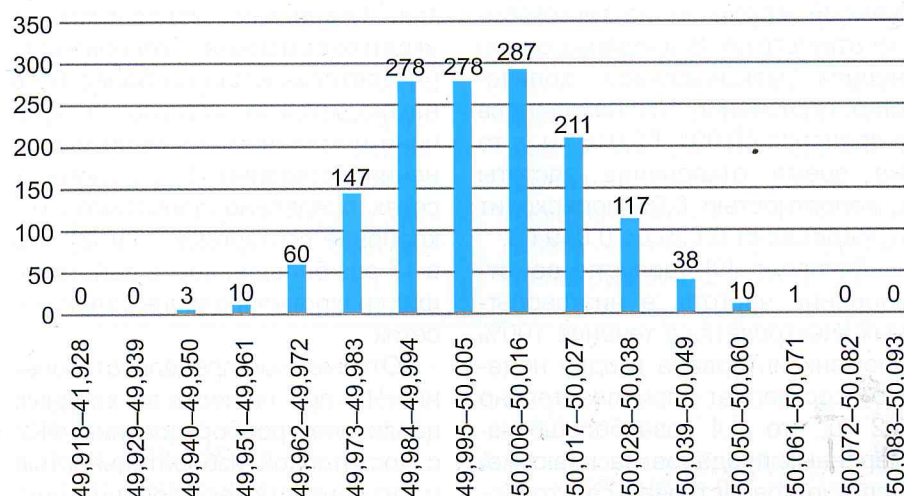


Рис. 1.1. Характер отклонения частоты напряжения ТЭЦ в течение одних суток (27.04.2021)

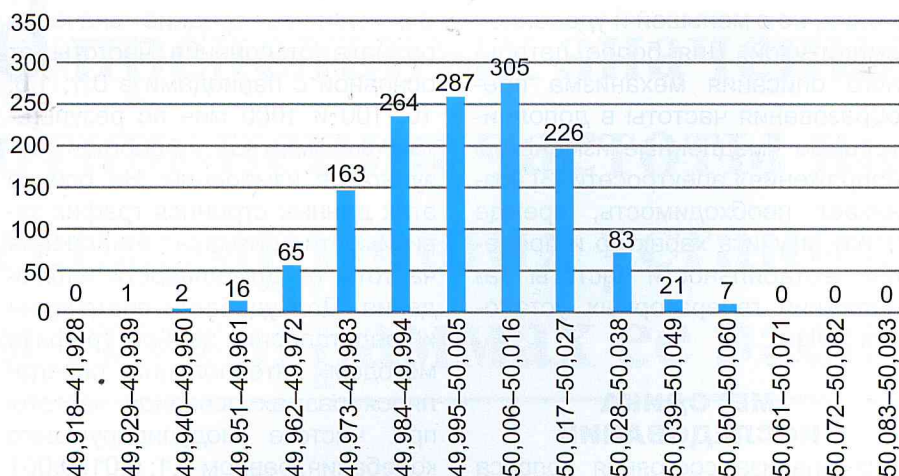


Рис. 1.2. Характер отклонения частоты напряжения ТЭЦ в течение одних суток (24.04.2021)

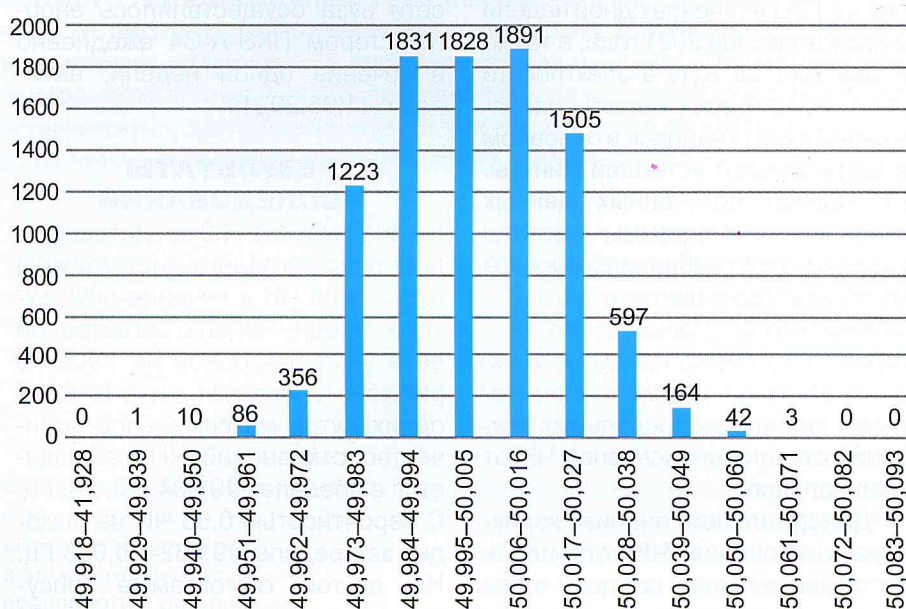


Рис. 1.3. Характер отклонения частоты напряжения ТЭЦ в течение одной недели (21.04.2021–27.04.2021)

На рисунке 1.3 представлена гистограмма, интегрально отображающая колебания ЧН за одну неделю. Как из нее следует, выраженный максимум на гистограмме отсутствует. В пределах одной недели максимальное количество отклонений ЧН находилось в пределах 49,994–50,016 Гц, в то же время отклонение частоты с вероятностью 0,95 происходит в пределах от 0,039 до 0,049 Гц.

Согласно [3], допустимое отклонение частоты в низковольтных электросетях в течение 100% времени интервала в одну неделю составляет приблизительно 0,2 Гц, что в 4 раза больше измеренных пределов на практике. Если руководствоваться требованиями [4], то нижняя граница «длительных отклонений» ЧН, по

существу, уже в 10 раз превышает показатели уровня отклонения ЧН, зарегистрированного в течение недели в двух экспериментах. Отдельные маловероятные «кратковременные отклонения» [4] длительностью не более 60 с на графиках отсутствуют по причине выбранного времени усреднения показаний. В автономных сетях предельно допустимое отклонение составляет 1 Гц [3], что в 17 раз больше, чем в действующих синхронизированных электросетях.

Отмеченные пределы отклонения ЧН при наличии во входных цепях электрооборудования ФКУ с достаточной избирательностью могут привести как к дополнительному медленному завышению напряжения питания электрообо-

рудования, так и к его занижению в зависимости от направления отклонения ЧН относительно резонансной частоты контура с одновременным проявлением «медленных изменений» питающего напряжения [3, 9].

По ширине, предельным значениям отклонения ЧН и степени асимметрии гистограмм оперативный персонал ТЭЦ и ее руководящий состав могут дополнительно получать обобщенную информацию о режиме работы электрогенераторов и степени соответствия вырабатываемой электроэнергии требованиям нормативных документов [3, 4]. Так, в одни сутки, из всего семейства построенных гистограмм, ее максимум смещен влево, в другие сутки, наоборот, вправо, а в третьи — имеет место равномерное распределение отклонения ЧН. По степени асимметрии распределения ЧН на гистограммах можно оперативно судить об уровне недогрузки ТЭЦ или ее перегрузки при передаче информации по телеметрическому каналу на рабочее место.

Определенное влияние на уровень демодуляции ЧН должна оказывать степень расстройки по разным причинам полосовых фильтров ФКУ, настроенных на 5, 7 и 9 гармоники.

Для наглядности в таблице 1 представлены предельные значения отклонения частоты в течение всех суток по результатам их измерения на ТЭЦ и в электросети КГЭУ.

Результаты обработки данных второй серии опытов достаточно близки к данным ТЭЦ и немного лучше по меньшему уровню отклонения ЧН. Так, минимальное отклонение ЧН составило  $-0,036$  Гц, а максимальное  $+0,065$  Гц. По характеру распределения ЧН на гистограммах видно, что в отдельные сутки (27.04.21) нагрузка на станцию была более равномерной, чем в другие сутки. Размах отклонения частоты напряжения, регистрируемый в электросети вуза, оказался в ряде дней меньше, чем в период регистрации на ТЭЦ.

Табл. 1. Значения отклонений частоты напряжения сети

| ТЭЦ                 | Дата                   | 21.04            | 22.04            | 23.04            | 24.04            | 25.04            | 26.04            | 27.04            | За неделю        |
|---------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                     | Отклонения частоты, Гц | +0,056<br>-0,045 | +0,063<br>-0,052 | +0,056<br>-0,053 | +0,057<br>-0,061 | +0,052<br>-0,051 | +0,061<br>-0,053 | +0,064<br>-0,060 | +0,064<br>-0,061 |
|                     | Размах частоты, Гц     | 0,101            | 0,115            | 0,109            | 0,118            | 0,103            | 0,114            | 0,124            | 0,125            |
| Электросеть<br>вуза | Дата                   | 11.05            | 12.05            | 13.05            | 14.05            | 15.05            | 16.05            | 17.05            | За неделю        |
|                     | Отклонения частоты, Гц | +0,054<br>-0,050 | +0,052<br>-0,049 | +0,065<br>-0,056 | +0,043<br>-0,040 | +0,043<br>-0,038 | +0,062<br>-0,036 | +0,039<br>-0,041 | +0,065<br>-0,056 |
|                     | Размах частоты, Гц     | 0,104            | 0,101            | 0,121            | 0,083            | 0,081            | 0,098            | 0,080            | 0,121            |

Как следует из рисунка 2, размах нестабильности ЧН возрастает по мере повышения длительности периода наблюдения или уменьшения частоты «модулирующего» колебания. При необходимости определение величины размаха основной частоты на более низких и высоких «модулирующих» частотах можно осуществить, не проводя специальных длительных измерений, воспользовавшись эмпирической формулой:

$$\Delta F_2 = \frac{\Delta F_1}{\sqrt[3]{\frac{\Omega_2}{\Omega_1}}},$$

где  $\Delta F_1$  — значение размаха основной частоты в Гц, измеренное на частоте модулирующего колебания  $\Omega_1$  в Гц, равного, например 0,01 Гц;  $\Delta F_2$  — значение размаха основной частоты в Гц, определяемого расчетным путем на частоте модулирующего колебания  $\Omega_2$  в Гц, равного, например 0,001 Гц. При этих исходных данных  $\Delta F_2$  будет равен 0,046 Гц.

Поскольку величина размаха, в целом, равна двойной амплитуде отклонения основной частоты, то предложенная формула позволяет оценивать величину амплитуды отклонения основной частоты за более длительный период времени наблюдения без дополнительных измерений. Эти результаты более детально раскрывают ранее проведенные ис-

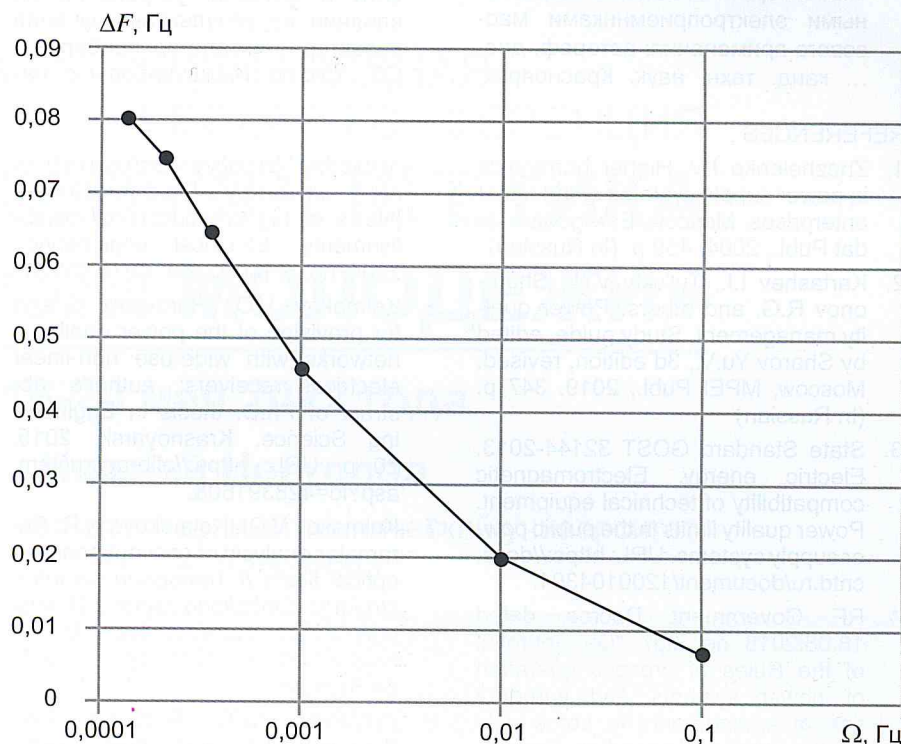


Рис. 2. Спектральная характеристика размаха нестабильности частоты генерируемого напряжения

следования предварительного характера [10].

### ВЫВОДЫ

1. Изучение нестабильности основной частоты напряжения генерирующих установок создает определенную информативную базу для раскрытия механизма ее трансформации в «медленные изменения напряжения» электросети.

2. Построение гистограмм отклонения частоты напряжения от основной дополнительно открывает возможность для оперативного контроля состояния работы электрогенераторов на ТЭЦ.

3. Выяснение структуры «медленных изменений» напряжения в электросети и удельной доли их составляющих должно осуществляться с учетом точности настройки фильтрокомпенсирующих устройств. 

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 439 с.
2. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергетики. Уч. пос. под

ред. Ю.В. Шарова, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 347 с.

3. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL:

<https://docs.cntd.ru/document/1200104301>.

4. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении

изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации (с изменениями и дополнениями). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304807/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304807/).

5. Мелентьев В.С. Анализ погрешности из-за нестабильности частоты при измерении интегральных характеристик сигналов в электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2004, № 6. С. 32–34.
6. Колмаков В.О. Схемотехническое обеспечение качества электрической энергии в сетях с нелинейными электроприемниками массового применения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск,

2015. 20 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42839160&>.

7. Колмаков В.О., Колмакова Н.Р. Анализ параметров традиционных и лучевых фильтров // Транспортная инфраструктура Сибирского региона, 2018, т. 1. С. 319–325.
8. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А. и др. Радиопередающие устройства в системах радиосвязи: учебное пособие. 4-е изд. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 176 с.
9. Тукшаитов Р.Х., Наумов А.А. Спектральный анализ «медленных колебаний напряжения» электросети и способы устранения их влияния на результаты изучения характеристик электроприборов / Сб. трудов Международной на-

учно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии». М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 29–34.

10. Тукшаитов Р.Х., Наумов А.А. К вопросу изучения спектрального состава нестабильности частоты напряжения электросети / Материалы VI Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», в 2-х т., Казань, 10–11 декабря 2020 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. С. 84–86.

## REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004. 439 p. (In Russian)
2. Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Sham-onov R.G. and others. Power quality management. Study guide, edited by Sharov Yu.V., 3d edition, revised. Moscow, MPEI Publ., 2019. 347 p. (In Russian)
3. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>.
4. RF Government Decree dated 13.08.2018 no. 937 "On approval of the Rules of process operation of power systems and introduction of amendments to some acts of the Russian Federation Government (amended and revised). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304807/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304807/).
5. Melentyev V.S. Analysis of errors caused by frequency fluctuation in the process of measuring the integral characteristics of signals in electrical

networks // *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational establishments. Electrical engineering], 2004, no. 6, pp. 32–34. (In Russian)

6. Kolmakov V.O. Hardware design for provision of the power quality in networks with wide-use non-linear electrical receivers: author's abstract of Ph.D. thesis in Engineering Science. Krasnoyarsk, 2015. 20 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42839160&>.
7. Kolmakov V.O., Kolmakova N.R. Parameter analysis of conventional and optical filters // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian Region], 2018, vol. 1, pp. 319–325. (In Russian)
8. Zyryanov Yu.T., Fedyunin P.A., Belousov O.A. and others. Radio transmitters in radio communication systems: study guide, 4th edition, Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2020. 176 p. (In Russian)
9. Tukshaitov R.Kh., Naumov A.A. Spectral analysis of 'slow voltage oscillations' in an electrical network

and methods of eliminating their impact on results of electrical device characteristics study / *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii"* [Proc. of International Scientific-Practical Conference "Electrical Energy Quality Management"]. Moscow, ООО Tsentr poligraficheskikh uslug "Raduga", 2020, pp. 29–34. (In Russian)

10. Tukshaitov R.Kh., Naumov A.A. More about investigation of the network voltage frequency fluctuation spectral composition / *Materialy VI Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Priborostroyeniye i avtomatizirovanny elektropriwod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve"* [Proc. of the VIth National scientific-practical conference "Instrumentation and automated electrical drive in fuel and energy complex and housing maintenance and utilities"], in 2 volumes, Kazan, December 10–11, 2020. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2020, pp. 84–86. (In Russian)

**ВСК-ЭНЕРГО****ОПЕРАТИВНОСТЬ  
НАДЕЖНОСТЬ  
КАЧЕСТВО**

ООО «ВСК-ЭНЕРГО» — динамично развивающаяся компания, поставщик электротехнического оборудования ведущих производителей России и стран СНГ. Ассортимент продукции позволяет удовлетворить запросы и потребности любого клиента — от государственных до частных компаний.

- ✓ **Силовые трансформаторы:** масляные герметичные трансформаторы (ТМ, ТМГ, ТМЗ, ТМФ) сухие трансформаторы (ТСЛ, ТСЗЛ)
- ✓ **Комплектные трансформаторные подстанции (КТП):** столбовые, мачтовые, киосковые, контейнерные, блочные, бетонные
- ✓ **Щитовое оборудование:** главный распределительный щит (ГРЩ), вводно-распределительное устройство (ВРУ), низковольтные устройства (НКУ), щит учета распределения (ЩУР), щит автоматического переключения (ЩАП), щит освещения (ЩО), щит аварийного освещения (ЩАО)

- ✓ **Распределительные устройства:** распределительные устройства высокого напряжения (РУВН), распределительные устройства низкого напряжения (РУНН)
- ✓ **Линейная арматура для ВЛ:** сцепная, поддерживающая, натяжная, соединительная, контактная и защитная

- ✓ **Опоры железобетонные:** СВ 95-2, СВ 95-3с, СВ 110-35, СВ 110-5, СВ 164-12, СВ 164-20

- ✓ **Виброгасящие опоры для сухих трансформаторов от 100 до 3150 кВА**

Все изделия имеют необходимую документацию и гарантию.

+7 (495) 111-78-77  
[info@vsk-energo.ru](mailto:info@vsk-energo.ru)  
[www.vsk-energo.ru](http://www.vsk-energo.ru)