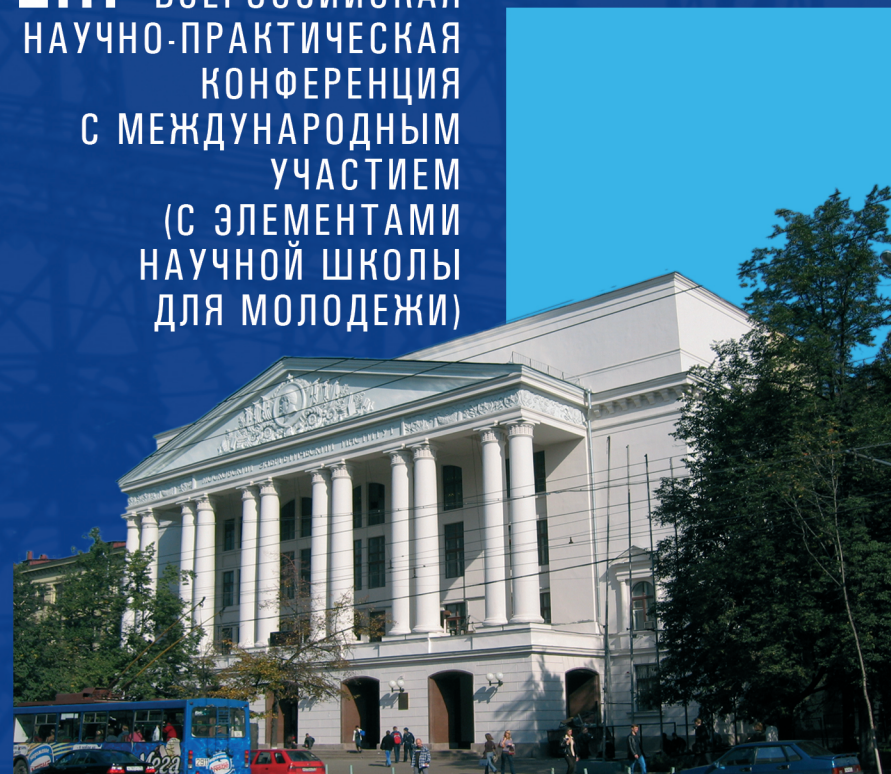


ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

III ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ
УЧАСТИЕМ
(С ЭЛЕМЕНТАМИ
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ
ДЛЯ МОЛОДЕЖИ)



Москва
15 – 17 ноября 2023 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

LIII Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием
(с элементами научной школы для молодежи)

Москва. 15 – 17 ноября 2023 г.

Москва
Издательство МЭИ
2023

УДК 620.9
ББК 31
Ф 33

Ф 33 Фёдоровские чтения – 2023: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) (Москва, 15–17 ноября 2023 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. – М.: Издательство МЭИ, 2023. – 476 с.

ISBN 978-5-7046-2925-2

Публикуются материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения – 2023», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 15–17 ноября 2023 г.

Научная тематика конференции – энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии. Публикации характеризуются охватом широкого круга проблем в области энергосбережения и энергоэффективности, электроснабжения и электрооборудования, электробезопасности и использования возобновляемых источников энергии. Сборник предназначен для участников конференции и может быть полезен широкому кругу специалистов, занятых проектированием и эксплуатацией электрического хозяйства, преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам.

УДК 620.9
ББК 31

Издано в авторской редакции

ISBN 978-5-7046-2925-2

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

<i>Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Кивчун Т.О.</i> Идентификация объекта управления в техноценозе.....	10
<i>Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Кивчун Т.О.</i> Постановка задачи управления техноценозом.....	22
<i>Войткевич С.В.</i> Метрики для оценки эффективности центров обработки данных в электроэнергетическом комплексе России...	29
<i>Маслеева О.В., Крюков Е.В., Петухов Я.И.</i> Оценка экологичности электромобилей и автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на всех этапах жизненного цикла.....	37
<i>Хугаев А.З.</i> Опыт применения процессного подхода к управлению в проектно-исследовательских организациях...	45
<i>Баширов М.Г., Баширова Э.М., Акчурин Д.Ш.</i> Разработка интеллектуальной системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла энергетического оборудования.....	49
<i>Цырук С.А.</i> Роль учебно-методической комиссии в развитии образовательной программы «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»	61
<i>Булатенко М.А., Демидова П.А.</i> Оценка конкурентоспособности отечественных приложений для обучения электротехнического персонала с применением технологий виртуальной и дополненной реальности.....	65

<i>Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш.</i> Особенности подготовки специалистов для интеллектуальных электроэнергетических комплексов	72
<i>Васильева Ю.С., Семикашев В.В.</i> Оценка последствий вхождения Республики Коми и Архангельской области в ценовую зону оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ).....	79
<i>Еришов М.В.</i> Направления развития энергетики предприятий химической промышленности в прогрессивном бизнес-укладе.....	88
<i>Пермяков М.А.</i> Факторы энергоэффективности многоукладных бизнес-структур.....	92

Секция 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

<i>Горшенин А.Ю., Грицай А.С., Денисова Л.А.</i> Предварительная обработка данных в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления.....	96
<i>Исаев А.С.</i> Прогнозирование графика электрической нагрузки в условиях нестационарности.....	104
<i>Петров А.Р., Грачева Е.И.</i> Алгоритмы и модели оценки основных технических характеристик контактных систем низковольтных электрических аппаратов.....	114
<i>Лепешкин А.Р., Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кондрашов С.С., Сулейманов Ф.Р., Данченко А.В.</i> Исследование распределений плотности тока в двухслойной и трехслойной проводящих средах при разных режимах индукционного нагрева защитных покрытий стальных деталей с учетом оплавления покрытий и двух точек Кюри..	124

Федин М.А., Лепёшкин А.Р. Федина С.А., Василенко А.И., Дудочкин Е.Г., Кошкин Д.П., Демидов Ю.А., Чэнь Б.
Разработка и описание математической модели
и программы для расчета индукционно-резистивного
нагрева промышленных трубопроводов..... 133

Федин М.А., Кондрашов С.С., Василенко А.И., Зотов М.Л., Северин К.В., Кошкин Д.П., Демидов Ю.А.
Разработка метода увеличения длины обогреваемого
плеча индукционно-резистивной системы нагрева
с использованием градированной изоляции..... 139

Блохин А.В., Грицай А.С.
Прогнозирование потребления электроэнергии
городского ресурсоснабжающего предприятия..... 144

Староверов Б.А., Хамитов Р.Н.
Создание подсистемы прогнозирования
для системы коммерческого учета электроэнергии
на основе ансамбля нейронных сетей..... 149

Мальши М.Е., Матюнина Ю.В.
Планирование графика базовой нагрузки
при управлении спросом..... 155

Измайлов Ю.А., Кошарная Ю.В.
Управление нагрузкой предприятия
как способ снижения затрат на электроэнергию..... 162

Секция 3

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А.
Разработка физической модели распределительной
электрической сети с тиристорными регуляторами
напряжения и мощности..... 169

<i>Лансберг А.А., Виноградов А.В.</i> Обзор математической модели электрической сети 6–10/0,4 кВ..	175
<i>Пудовинников Р.Н., Вахнина В.В.</i> Модифицированная модель линии электропередачи.....	185
<i>Гагарин С.А.</i> Причины неправильной работы устройств релейной защиты на Ростовской АЭС. Остаточная намагниченность трансформаторов тока.....	194
<i>Стариков А.В., Костюков В.Д.</i> Анализ работоспособности электромагнитного подшипника при снижении напряжения питания и рациональном смещении центра магнитной системы.....	202
<i>Вахнина В.В., Марков Е.В.</i> Разработка программы графического определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе метода треугольника Дюваля.....	209
<i>Дюдяков А.А, Янченко С.А.</i> Алгоритм управления гибридным фильтром, устойчивый к искажениям напряжения сети.....	217
<i>Денисова А.Р., Семенова О.Д.</i> Исследование влияния высших гармоник напряжения и тока на электрооборудование электроэнергетических систем..	227
<i>Петрова Р.М., Грачева Е.И., Абдуллин Л.И.</i> Параметры надежности кабельных линий систем внутривзаводского электроснабжения.....	235
<i>Романов Л.Р., Крюков О.В.</i> Разработка усовершенствованных алгоритмов токовых за- щит для повышения надежности электрических сетей...	243
<i>Кронгауз Д.Э.</i> Особенности релейной и технологической защит электрооборудования.....	254

10. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** (1983) Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase currents // IEEE Transactions on Power Electronics 27(4): 1758–1772.
11. **Watanabe E., Aredes M.** (2004) The p-q theory for active filter control: some problems and solutions // Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. 15(1):78–84.
12. **Huang S., Wu J.** (1999) A control algorithm for three-phase three-wired active power filters under nonideal mains voltages // IEEE Transactions on Power Electronics 14(4):753–760.
13. **Singh B., Chandra A., Al-Haddad K.** (2015) Power Quality Problems and Mitigation Techniques. Wiley.
14. **Uener M.** (1991) Frequency, Amplitude, and Phase Tracking of Nonsinusoidal Signal in Noise with Extended Kalman Filter. Thesis, Naval Postgraduate School.

*А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru,
О.Д. Семенова, ollivka@bk.ru, КГЭУ, Казань*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время в электрических сетях сложно поддерживать должный уровень качества электроэнергии. Это связано с повсеместным вводом полупроводниковых управляющих систем, являющихся нелинейными нагрузками и источниками высших гармоник тока и напряжения. Без них в наше время невозможна автоматизация производственных и хозяйственных процессов в различных сферах. К распространенной нелинейной нагрузке можно отнести источники бесперебойного питания, преобразователи частоты (ПЧ), светодиодное освещение, пускорегулирующую аппаратуру газоразрядных ламп, промышленные термических установок, сварочное оборудование, содержащее полупроводниковые выпрямители и др.

При наличии высокочастотных гармонических составляющих затрудняется компенсация реактивной мощности, сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, возрастает аварийность в кабельных сетях [1–5]. Зачастую возникают сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи [6, 7]. Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на значения коэффициента мощности и вращающего момента электродвигателей. Большой проблемой в электрических сетях, содержащих источники высших гармоник, является компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов (БК). Было выявлено, что подключение батарей конденсаторов совместно с вентильными преобразователями (рис. 1) вызывает возникновение в этих сетях резонансных явлений. В этом случае оказывается невозможной нормальная эксплуатация конденсаторных установок без применения специальных мероприятий, направленных на устранение перегрузки конденсаторов.

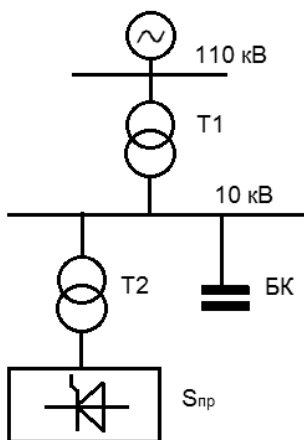


Рис. 1. Схемы электроснабжения мощного вентильного преобразователя с подключенной к шинам БК

Резонансный режим характеризуется нулевым значением суммарной реактивной проводимости резонансного контура:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}},$$

где L – суммарная индуктивность разветвленной части сети, C – суммарная емкость разветвленной части сети, R_1 и R_2 – активные сопротивления параллельных частей сети.

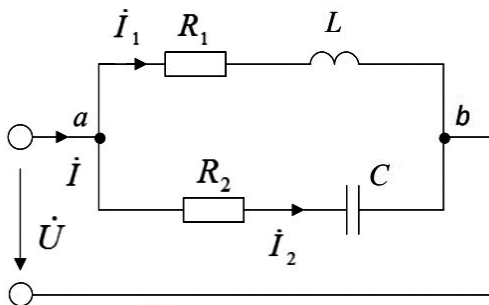


Рис. 2. Электрическая сеть с режимом резонанса токов

Для определения резонансной частоты в данной сети можно использовать выражение:

$$\omega = \sqrt{\frac{L - CR_{\Sigma}^2}{CL^2}},$$

где R_{Σ} – суммарное активное сопротивление сети.

В тяговых и промышленных электросетях с вентильными преобразователями перегрузки зафиксированы при резонансе на частотах гармоник даже весьма высоких порядков (40 – 50), в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками – на частотах 3 – 7-й гармоник [4, 5]. Батареи конденсаторов в таком режиме не выполняют своих функций и вследствие необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, выходят из строя.

В сетях, питающих нелинейную нагрузку, установка конденсаторов должна выполняться с установкой устройств защиты от высших гармоник. Самым простым решением может быть установка защитных фильтрующих реакторов на параллельную работу вместе с конденсаторами. В этом случае в цепи необходимо создать резонанс напряжений на частоте, меньшей наименьшей гармоники ν , возникающей при работе нелинейной нагрузки. Для этого индуктивное сопротивление реактора на частоте 50 Гц определяется из условия:

$$x_p \geq \frac{x_c}{\nu^2} = \frac{U_{\text{БК ном}}^2}{\nu^2 Q_{\text{БК ном}}},$$

где $Q_{\text{БК ном}}$ – реальная суммарная мощность батареи конденсаторов, $U_{\text{БК ном}}$ – номинальное напряжение батареи конденсаторов.

В остальных случаях в качестве защиты от высших гармоник применяются резонансные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) на основе конденсаторов, фильтрующих реакторов, индуктивностей и шунтирующих резисторов. Основным недостатком резонансных фильтров является их ограниченность только одной резонансной частотой.

В настоящее время на смену резонансных фильтров постепенно приходят активные фильтры гармоник (АФГ) [7]. АФГ состоит из силовой части, построенной на IGBT-транзисторах и системы управления. Принцип работы АФГ состоит в активной генерации компенсирующего тока в противофазе с током гармонических искажений нагрузки, что приводит к получению тока синусоидальной формы. АФГ являются универсальным средством, которые могут выполнять одновременно несколько функций: снижение уровня высших гармонических составляющих, коррекция коэффициента мощности, уменьшение потерь мощности, уменьшение фликера и др. АФГ представляют собой «гибкие» устройства, это значит, что параметры АФГ изменяются в зависимости от режима работы сети характеристик нагрузки. Принцип действия АФГ заключается в генерировании силовой электроникой необходимых

гармонических составляющих тока для снабжения нелинейных потребителей, чтобы форма синусоидальной кривой имела минимальные отклонения от нормы.

Для выявления проблем, связанных с высшими гармониками в низковольтных сетях, нами проводились измерения гармонических составляющих напряжения коммунально-бытовых электроприемников (ЭП) многоквартирного дома. В их число входят электроприборы с однофазными асинхронными и универсальными коллекторными двигателями, источники питания бытовой электроники и компьютерной техники со схемами пассивной и активной коррекции, освещение (все виды, кроме ламп накаливания), инверторы напряжения систем управления, микроволновые печи, преобразователи частоты, установленные на лифты, и другое [8, 9].

Исследование проводилось с помощью анализатора качества электроэнергии AR5, который способен одновременно фиксировать все необходимые параметры, включая гармонические составляющие до 49 порядка. В результате подключения анализатора качества на вводном щите многоквартирного дома был получен график трехсуточного измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения сети (рис. 3).

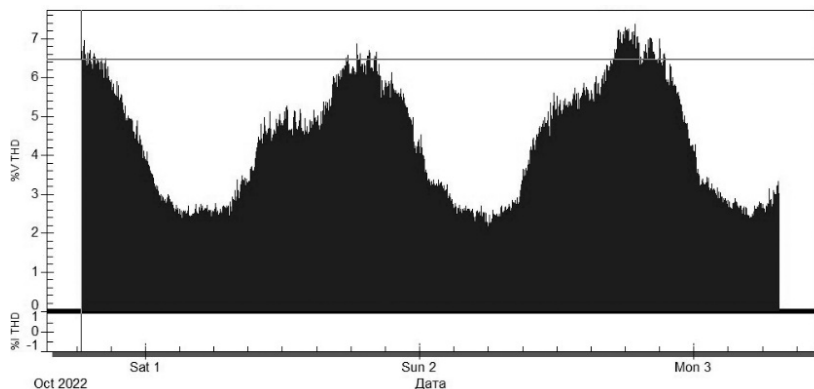


Рис. 3. График трехсуточного измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения сети в квартире многоквартирного дома

Из рисунка видно, что коэффициент искажения синусоидальности напряжения зависит от уровня потребления электроэнергии бытовыми ЭП. Во время максимального потребления электроэнергии в вечерние часы коэффициент искажения синусоидальности напряжения возрастает до 7,4 %, а в ночные часы снижается до 2,1 %. Это позволяет сделать вывод, что бытовые ЭП служат причиной ухудшения качества электроэнергии, а сохранение несинусоидальной формы напряжения в ночные часы объясняется тем, что недогруженный трансформатор на трансформаторной подстанции приобретает свойства нелинейного элемента из-за ферромагнитных свойств [10].

Измерение напряжения сети многоквартирного дома производилось параллельно измерению коэффициента нелинейных искажений напряжения в течение трех суток (рис. 4).

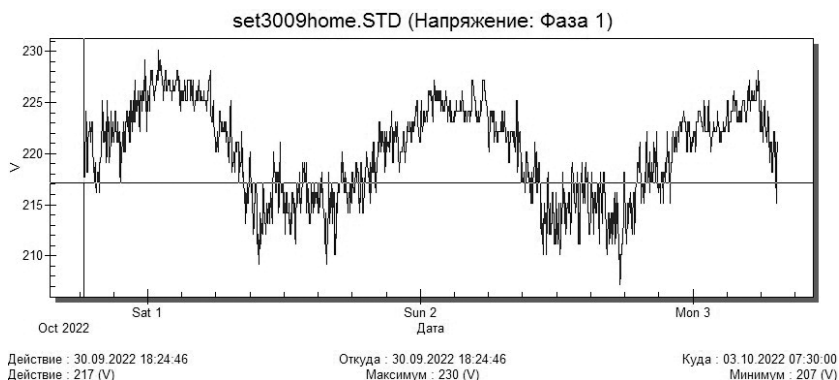


Рис. 4. График трехсуточного измерения напряжения сети многоквартирного дома

Во время максимального потребления электроэнергии в вечерние часы происходит падение напряжения до 207 В, а в периоды минимального электропотребления в ночные часы напряжение находится в пределах от 217 до 230 В.

Решить проблему можно реализовать двумя способами:

– установкой КБ на шинах трансформаторной подстанции с использованием фильтрующего реактора, который не позволит ему войти в резонанс под воздействием источников высокочастотных возмущений ЭП;

– установкой на шинах питающей трансформаторной подстанции АФГ.

АФГ могут параллельно осуществлять компенсацию реактивной мощности и стабилизацию напряжения сети. Их функционирование и применение регламентируется ГОСТ Р 59031-2020. Также в бытовых сетях возможно использование гибридных решений. В этом случае устанавливается нерезонансная система коррекции коэффициента мощности (КБ) и активный фильтр для снижения уровня высших гармоник.

Планируется разработка программного комплекса, который позволит определить оптимальный способ подавления высших гармоник коммунально-бытовой сети. Для этого необходимо производить оценку амплитудно-частотной характеристики сопротивления в различных конфигурациях сети при проектировании ФКУ, производить подбор оптимального способа подавления высших гармоник, а также оценку потерь мощности и расчет возможного ущерба от нарушения ПКЭ для определения экономической эффективности внедряемых в сеть устройств.

Заключение. Переход на повсеместную автоматизацию различных технологических и бытовых процессов, цифровизация электротехнических систем влечет за собой увеличение в них полупроводниковых нелинейных элементов. Поэтому в настоящее время недостаточно осуществлять только коррекцию коэффициента мощности. Изменения структуры нагрузки и сети делают фильтрацию гармоник всё более и более важной, особенно для систем, которые могут войти в резонанс под воздействием высших гармоник. Нами предложен способ защиты – использование фильтрующих реакторов на параллельную работу вместе с БК. В этом случае в цепи создается резонанс напряжений на частоте, меньшей наименьшей гармоники ν , возникающей при работе нелинейной нагрузки.

Литература

1. **Дюдяков А.А., Янченко С.А.** Снижение эффективности работы гибридного фильтра в реальных электрических сетях // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 40–47. DOI 10.34831/EP.2023.68.35.006. – EDN PVCYMT.

2. **Артюхов И.И., Молот С.В.** Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении насосов частотно-регулируемым электроприводом // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 1(26). С. 138–144. DOI 10.17673/Vestnik.2017.01.23. – EDN YRDUKF.

3. **Портнягин Н.Н., Ершов М.С., Барбасов П.Ю., Чернев М.Ю.** Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 1. С. 61–66. DOI 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. – EDN XWZQHL.

4. **Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Калюжный Д.Н.** Особенности выбора батарей конденсаторов в электрических сетях с источниками интергармоник // Электротехника и электромеханика. 2017. № 5. С. 67–70. DOI 10.20998/2074-272X.2017.5.11. – EDN ZMJFAN.

5. **Анучин А.С., Двоглазов П.В., Козаченко В.Ф., Трофимов С.А.** Оптимизация цифровых регуляторов тока для мощных вентильно-индукторных электроприводов // Промышленная энергетика. 2016. № 11. С. 36–42.

7. **Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В.** Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, № 1. С. 23–30. – EDN SKFUGP.

8. Янченко С.А., Рыжкова Е.Н., Цырук С.А. Программный инструмент анализа случайных уровней показателей качества электроэнергии бытовых электросетей // Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 46–54. DOI 10.34831/EP.2023.53.16.006. – EDN SPTRME.

9. Дюдяков А.А., Янченко С.А., Михеев Д.В. Анализ эффективности работы гибридного фильтра // Промышленная энергетика. 2022. № 7. С. 26–38. DOI 10.34831/EP.2022.79.15.004. – EDN KEJDRS.

10. Тукшаитов Р.Х., Семенова О.Д. О характере зависимости коэффициентов мощности и нелинейных искажений тока от уровня потребляемой мощности трансформаторами // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2022. Передовые технологии и современные тенденции: материалы Международной научно-методической конференции. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 361–364.

*Р.М. Петрова, 1998renata@mail.ru,
Е.И. Грачева, grachieva.i@bk.ru, КГЭУ, Казань
Л.И. Абдуллин, abdullin.linar@mail.ru
АО «Сетевая компания», Казань*

ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СИСТЕМ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время актуальна разработка алгоритмов и моделей для увеличения достоверности вероятностных оценок параметров надежности электроустановок и повышения качества эксплуатации внутрицехового электроснабжения [1]. Как известно, режимы эксплуатации электрооборудования также влияют на надежность работы цеховых сетей [2].

Учебное издание

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

ЛIII Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием
(с элементами научной школы для молодежи)

Москва. 15 – 17 ноября 2023 г.

Компьютерная верстка А.В. Худяковой

Подписано в печать	20.12.23.	Печать ризография	Формат 60x90 1/16
Печ. л. 29,75	Тираж 25 экз.	Изд. № 23н-143	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.