

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА МАТЕРИНСКОГО ВЕЙВЛЕТА В ЗАДАЧЕ РАСЧЕТА АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В работе представлена методика расчета активной и реактивной мощности отдельных высших гармоник с помощью вейвлет-преобразования. Данный расчет позволит повысить точность технико-экономической оценки внедрения фильтрокомпенсирующих устройств при решении актуальной проблемы подавления гармоник и сокращения потерь в токоведущих частях. Разработан критерий для выбора оптимального типа вейвлета в задачах расчета и моделирования несинусоидальных режимов систем электроснабжения. Критерий основан на определении локальной энергетической плотности исследуемой гармонической группы и на возможности провести обратное вейвлет-преобразование (реконструкцию сигнала) с наименьшей погрешностью.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, несинусоидальные режимы, высшие гармоники, энергия спектра, амплитудно-частотная характеристика вейвлета.

Введение. Существенное увеличение доли электроприёмников, имеющих нелинейную вольт-амперную (вебер-амперную) характеристику в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий и гражданских зданий (частотно-регулируемый электропривод, вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, светодиодные источники света, импульсные блоки питания компьютеров и др.) явилось причиной повышенного внимания исследователей к вопросам измерения, анализа, нормирования и моделирования несинусоидальных режимов. Несинусоидальные режимы систем электроснабжения (СЭС) являются причиной возникновения дополнительных потерь [1], резонансных перенапряжений, ухудшению работы систем релейной защиты и автоматики. Действующий в РФ ГОСТ 32144–2013 во многом аналогичен действующим в странах ЕС и США нормативным документам, регламентирующим показатели качества электроэнергии (ПКЭ). Проблема обеспечения требуемых норм ПКЭ зачастую вызывает серьезные противоречия между энергоснабжающей организацией (АО Энерго) и потребителем электрической энергии. Одной из существенных методологических задач является определение фактического виновника в ухудшении ПКЭ на границе раздела балансовой принадлежности [2]. Наиболее часто встречающиеся трудности при реализации разработанных методов заключаются в том, что гармоники имеют вероятностный характер [3]. Амплитуда, частота и время появления отдельных гармоник зависят от состава подключенных электроприёмников и режима их работы. Для сетей 110 кВ

нечётные высшие гармоники «достаточно хорошо сглаживаются рядами, основанными на нормальном законе распределения» [4]. Виновником в ухудшении ПКЭ может оказаться как питающая энергосистема, так и потребитель. Увеличивается доля не промышленных электроприёмников, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока [5]. При присоединении нелинейной нагрузки «активные мощности гармоник направлены из сети в нагрузку и из нагрузки в сеть» [3]. В некоторой степени, в зависимости от спектра приложенного напряжения, источником высших гармоник (ВГ) может стать и сам силовой автотрансформатор [6]. Для анализа нестационарных несинусоидальных режимов исследователи всё чаще применяют аппарат вейвлет-преобразования (ВП). В научнотехнической литературе принято различать непрерывное (1), дискретное (2) и пакетное ВП.

$$\hat{F}(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; \quad (1)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt, \quad (2)$$

где $\varphi_{j,k}(t)$, $\psi_{j,k}(t)$ — функция материнского вейвлета и масштабирующая функция.

Обзор широкого спектра использования ВП для решения задач моделирования, анализа и расчета ПКЭ на основе передового мирового опыта приводится в работе [7]. В современных условиях нельзя ограничиваться исключительно мониторингом качества электроэнергии, возникают дополнительные

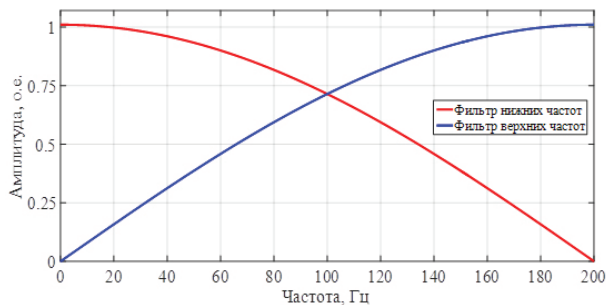


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика вейвлета Хаара

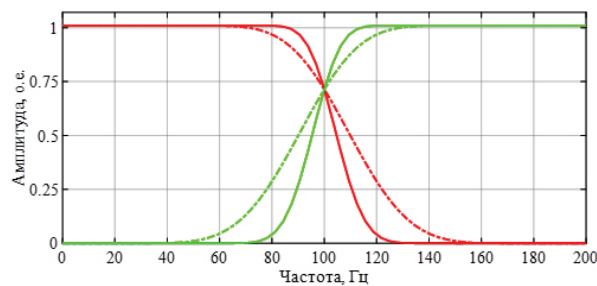


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика вейвлетов Добеши 10-го и 44-го порядков

задачи создания активно-адаптивных алгоритмов управления ПКЭ [8]. Для создания подобных алгоритмов необходимо развивать методы цифровой обработки параметров режима СЭС. Инструмент ВП вполне способен стать дополнением к известному методу преобразования Фурье для развития цифровых алгоритмов обработки результатов измерения ПКЭ и развития систем управления качеством электроэнергии.

Теоретические основы вейвлет-фильтрации параметров режима электроэнергетических систем. На первоначальном этапе при решении задач с применением ВП перед исследователем возникает задача в выборе оптимального типа материнского вейвлета. Неправильный выбор вейвлета может повлечь к значительным погрешностям в конечном результате. Вейвлет-функция является цифровым фильтром, имеющим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), которая определяется типом вейвлета и глубиной вейвлет-разложения при решении конкретной задачи. Для разработки критерия выбора оптимального типа вейвлета для анализа несинусоидальных режимов в электроэнергетической системе (ЭЭС) в настоящей работе были проанализированы наиболее часто применяемые вейвлет-функции (в том числе представленные в программе MATLAB). Вейвлет-функция может быть охарактеризована полосой пропускания и полосой заграждения. Идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ) пропускает без искажений все частоты ниже ω_0 и полностью подавляет все частоты выше ω_0 , но на практике это нереализуемо. Реальные ФНЧ вносят искажения в полосу пропускания и не до конца подавляют частоты в полосе заграждения. Наиболее часто используемый в технике вейвлет Хаара, несомненно, обладает рядом преимуществ — простота задания коэффициентов фильтра, наглядная интерпретация идей ВП, простейшая форма материнского вейвлета и масштабирующей функции. Однако анализ АЧХ вейвлета Хаара (рис. 1), особенно в сравнении с АЧХ вейвлетов Добеши 10-го и 44-го порядков (рис. 2) позволяет судить о невозможности применения вейвлета Хаара для решения практических задач электроэнергетики, связанных с разложением несинусоидальных токов, напряжений по частотным компонентам. Проведённые автором исследования [9, 10] показали, что для определения действующих значений несинусоидальных величин при расчете режимов работы ЭЭС наиболее оптимальные результаты показывают вейвлеты семейства Добеши высоких порядков. На рис. 2 сплошной линией показана АЧХ вейвлета Добеши 44-го порядка, наиболее близкая к идеальному фильтру. С учетом вышеизложенного предлагается следующая

формулировка оптимального выбора материнского вейвлета — среднее квадратичное отклонение σ значений исходного сигнала i_k должно иметь минимальное значение по сравнению с восстановленным по вейвлет коэффициентам сигналом \hat{i}_k и локальная энергия спектра выбранной гармонической группы, заданной глубиной разложения должна быть максимально полно представлена в границах исследуемого частотного диапазона:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}} \rightarrow \min \\ \Delta_{En} = \frac{E_n}{E_{\Sigma}} \frac{\sum_{k=n}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (3)$$

где E_n — энергия спектра исследуемого частотного диапазона (гармонической группы); E_{Σ} — суммарная энергия спектра; A, D — аппроксимирующий и детализирующий вейвлет-коэффициент соответственно; j, J — текущий и максимально возможный уровень вейвлет-разложения соответственно.

Основные теоретические положения применения алгоритмов дискретного ВП для расчета активной, реактивной и полной мощности изложены в [11]. Недостатком дискретного ВП является неравномерное распределение частотных диапазонов: на начальных уровнях разложения — более широкие, на максимальном уровне — узкие диапазоны. Для реализации задачи частотной декомпозиции токов и напряжений по гармоническим группам, в соответствии с ГОСТ 30804.4.7–2013, в настоящей работе было решено применить пакетное ВП.

Активная мощность через коэффициенты пакетного ВП для искомого частотного диапазона может быть определена:

$$P_{j,m} = \frac{1}{n} \left(\frac{2^{-j} n^{(m+1)-1}}{2^{-j} n^m} \sum_{k=nm}^{2^{-j} n^{(m+1)-1}} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right), \quad (4)$$

где n — количество мгновенных дискретных значений тока i и напряжения u ; k — количество вейвлет-коэффициентов заданного уровня разложения j ; m — номер узла пакетного ВП.

В настоящий момент существует несколько различных подходов к определению реактивной мощности при несинусоидальных режимах. В работе

[12] авторы проводят сравнительный анализ мощности искажения с использованием известных методов. По теории реактивной мощности Фризе «мгновенный ток во временном интервале делится на две составляющие, одна из которых переносит активную энергию (не зависит от частоты), а другая является дополнительным током» [12]:

$$i = i_a + i_r. \quad (5)$$

Реактивную мощность по Фризе определяется по формуле:

$$Q = UI_r = \sqrt{UI^2 - UI_a^2}. \quad (6)$$

Таким образом, чтобы воспользоваться формулой Фризе (6), необходимо получить активную составляющую полного тока через вейвлет-коэффициенты. Активный ток, в свою очередь, определяется произведением напряжения на активную проводимость. В интерпретации через вейвлет-коэффициенты получим:

$$g = \frac{P_{j,m}}{(U_{j,m})^2} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)}. \quad (7)$$

Искомая активная составляющая полного тока:

$$i_a = g u_{j,m} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \times \frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k). \quad (8)$$

Действующее значение активного тока определяем по:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_a^2(k)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)}. \quad (9)$$

Суммарный коэффициент гармонической составляющей КУ (THD) может быть определён через вейвлет-коэффициенты:

$$K_u = \frac{I_{(v)}}{I_{(50)}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^{k_m} (i_{j,k}^D)^2}{\sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^A)^2 + \sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^D)^2}}. \quad (10)$$

Предложенная методика позволяет определять мощности отдельных гармонических групп, не прибегая к аппарату преобразования Фурье. Следовательно, устраняется дополнительная задача выбора ширины окна и минимизируется возможность возникновения эффекта растекания спектра.

Результаты численных и физических экспериментов. Разработанная методика расчета активной и реактивной (по Фризе) мощности для отдельных гармоник (гармонических групп в соответствии с ГОСТ 30804.4.7–2013) была апробирована в СЭС

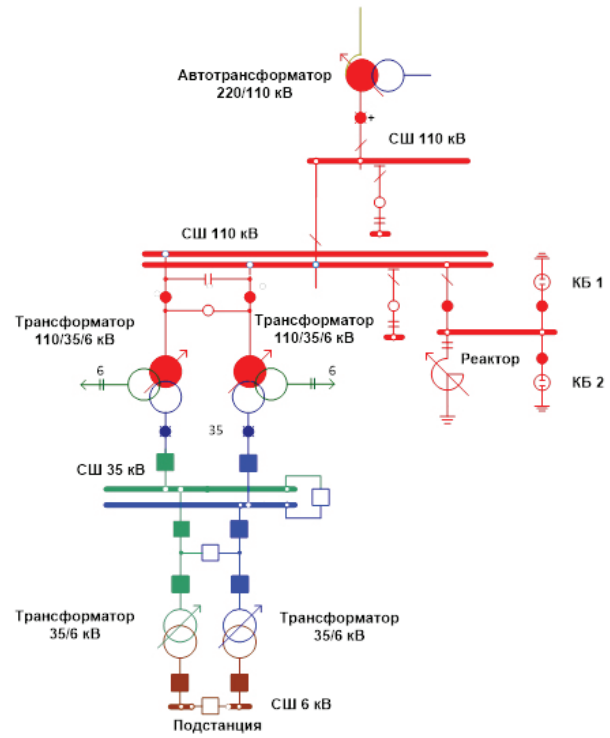


Рис. 3. Однолинейная схема исследуемого фрагмента системы электроснабжения

110/35/6 кВ Роснефть–Юганскнефтегаз (рис. 3). Физические измерения производились на сертифицированном оборудовании — с применением прибора METREL MI 2892 (номер в госреестре 57207-14), соответствующем ГОСТ 30804.4.7–2013 и измерительно-вычислительным комплексом «Омск-М». Как следует из полученных результатов измерений на шинах 6 кВ (рис. 4), коэффициенты n -ой гармонической составляющей KUn не соответствуют требованиям ГОСТ 32144–2013 по 5-й и 7-й гармоникам. Источниками гармоник являются станции управления погружными электродвигателями, установленными на стороне 0,4 кВ. Анализируя гармонический ряд спектра (рис. 4), можно сделать вывод, что основным элементом станций управления является простейший шестипульсный преобразователь, генерирующий ВГ согласно закону $bl \pm 1$ (где n — натуральное число). Существенная доля нелинейной нагрузки 0,4 кВ приводит к искажению синусоидальности на шинах 6 кВ. Для проведения численных экспериментов была составлена имитационная модель в среде MATLAB Simulink (рис. 5).

Параметры модели. **Автотрансформатор** АДЦТН-125000/220/110 $\Delta P_{xx} = 65$ кВт; $\Delta P_{кз} = 315$ кВт; $I_{xx} = 0,4$ %. **Трансформатор** ТДТН-40000/110/35 $\Delta P_{xx} = 39$ кВт; $\Delta P_{кз} = 200$ кВт; $I_{xx} = 0,46$ %. **Трансформатор** ТМН-6300/35/6 $\Delta P_{xx} = 3,3$ кВт; $\Delta P_{кз} = 18$ кВт. **ЛЭП 110 кВ** выполнена проводом марки АС-120 $r_0 = 0,244$ Ом/км; $x_0 = 0,423$ Ом/км; $b_0 = 2,69$ мкСм/км. Нагрузка, вносящая искажение синусоидальности имитировалась источниками тока, включенными параллельно линейной нагрузке в узле 6 кВ. Амплитуды и фазы гармоник тока соответствовали величинам, полученным в результате физического эксперимента. Частота дискретизации в модели Simulink принималась равной 2 кГц, что, в соответствии с теоремой Котельникова, позволяет анализировать гармоники до 40-й (согласно требованиям ГОСТ 32144–2013).

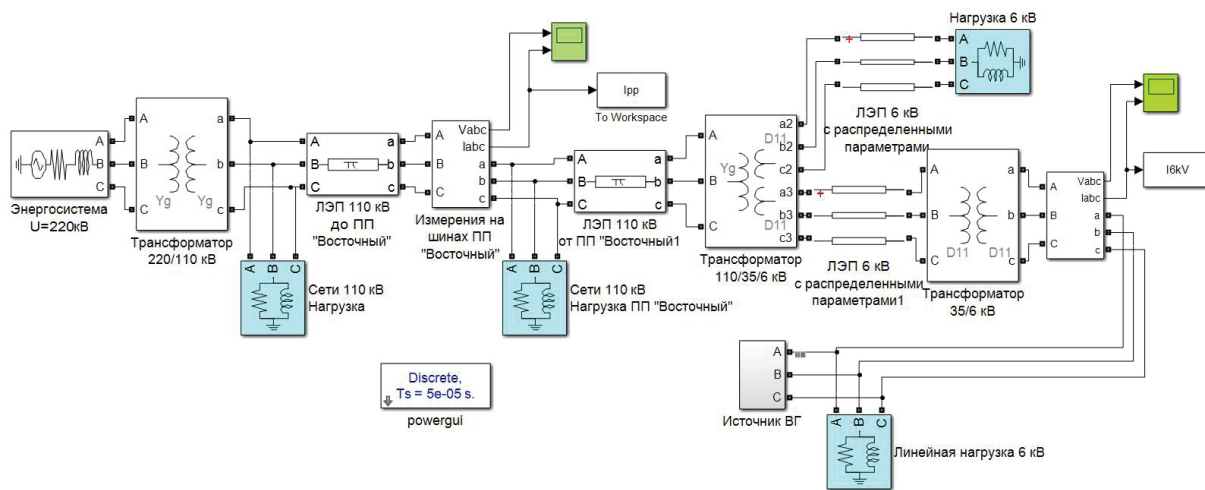


Рис. 4. Имитационная модель MATLAB Simulink

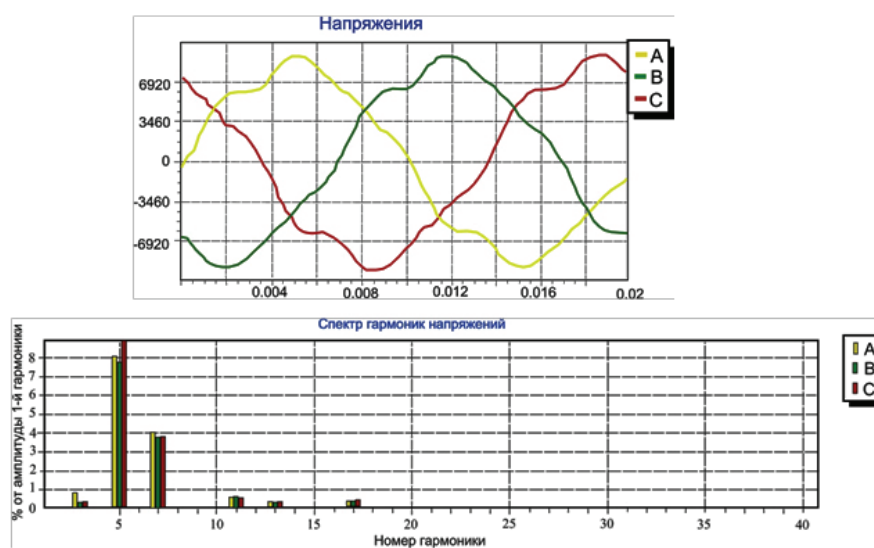


Рис. 5. Результаты физического измерения уровней высших гармоник на ПС 6 кВ

Таблица 1

Расчет параметров режима по вейвлет-коэффициентам

Параметр	Частота, Гц	Обозначение, единица измерения	Фактическое значение	Значение, вычисленное через вейвлет-коэффициенты
Активная составляющая тока	50	I_{a1} , А	402,3	402,2
	250	I_{a3} , А	68,4	69,1
	350	I_{a3} , А	42,1	43,1
Активная мощность	50	P_1 , кВт	4 386	4 380
	250	P_3 , кВт	746	752
	350	$P_{3'}$, кВт	459	463
Реактивная мощность и мощность искажения	50	$Q_1 + N_1$, квар	3 156	3 158
	250	$Q_3 + N_{3'}$, квар	560	559
	350	$Q_5 + N_{5'}$, квар	362	360

Сравнение результатов имитационного моделирования и физических испытаний (табл. 1) позволяет судить о приемлемом уровне погрешности (менее 2 %) предложенной методики.

Заключение. В настоящей работе был предложен критерий выбора оптимального типа материнского вейвлета для решения задач расчета несинусоидальных режимов СЭС. Критерий основан на локальном энергетическом спектре и минимуме погрешности при восстановлении сигнала. Представлена методика расчета активной и реактивной (по теории Фризе) мощности для сетей 6 кВ предприятия нефтедобывающей отрасли. Показана перспективность использования методов ВП для реализации задач по внедрению в электроэнергетику цифровых технологий.

Библиографический список

1. Белицкий А. А., Шклярский Я. Э. Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 86–93.
2. Дворкин Д. В., Силаев М. А., Тульский В. Н. [и др.]. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.
3. Коверникова Л. И. Активные мощности гармоник в узле присоединения нелинейных нагрузок в сети высокого напряжения // Электричество. 2017. № 3. С. 12–20.
4. Харлов Н. Н., Ушаков В. Я., Тарасов Е. В. [и др.] К проблеме моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 3. С. 95–102.
5. Авербух М. А., Жилин Е. В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.
6. Шаров Ю. В., Насыров Р. Р., Олексюк Б. В. [и др.] Влияние режимов работы автотрансформаторов на качество электроэнергии // Электричество. 2014. № 6. С. 10–19.
7. Barros J., Diego R. I., de Apráiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events // Electric Power Systems Research. 2012. Vol. 88. P. 130–136. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.009.

8. Карташев И. И., Тульский В. Н., Насыров Р. Р. Основные задачи управления качеством электроэнергии в активно-адаптивной сети // Электротехника. 2015. № 10. С. 28–33.

9. Файфер Л. А., Осипов Д. С., Еремин Е. Н. [и др.]. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 136–145. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-136-145.

10. Osipov D. S., Lyutarevich A. G., Gapirov R. A. [et al.] Applications of Wavelet Transform for Analysis of Electrical Transients in Power Systems: The Review // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. NR 4. P. 162–165 DOI: 10.15199/48.2016.04.35.

11. Morsi W. G., Diduch C. P., Chang L. [et al.]. Wavelet-Based Reactive Power and Energy Measurement in the Presence of Power Quality Disturbances // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26, Issue 3. P. 1263–1271. DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2093545.

12. Чижма С. Н., Лаврухин А. А., Черемисин В. Т. [и др.]. Методы оценки мощности искажений при несинусоидальных режимах систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2015. № 4. С. 14–19.

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2220-3520

AuthorID (РИНЦ): 175832

ORCID: 0000-0002-0830-408X

AuthorID (SCOPUS): 57188873609

ResearcherID: B-1019-2016

Адрес для переписки: osipov_dmitriy@omgtu.ru

Для цитирования

Осипов Д. С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения // Омский научный вестник. № 6 (162). С. 71–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-71-75.

Статья поступила в редакцию 02.11.2018 г.

© Д. С. Осипов