

## АНАЛИЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ 380 В С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе представлена методика анализа нестационарных несинусоидальных режимов систем электроснабжения на основе пакетного вейвлет-преобразования. Вейвлет-преобразование, в отличие от оконного преобразования Фурье, позволяет производить анализ высших гармоник в трехмерной плоскости (амплитуда, частота, время). Отсутствие необходимости выбора ширины окна при реализации вейвлет-преобразования позволяет избежать негативного эффекта растекания спектра. Применение вейвлет-преобразования для расчета высших гармоник позволит повысить точность оценки дополнительных потерь в системах электроснабжения и разработать мероприятия по повышению энергоэффективности электроустановки.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, несинусоидальные режимы, высшие гармоники, преобразование Фурье, несимметричная нагрузка фаз, светодиодное освещение.

**Введение.** В настоящее время в РФ действует стандарт ГОСТ 32144–2013, регулирующий требования к показателям качества электроэнергии (ПКЭ). Как отмечают некоторые авторы [1], российский стандарт предъявляет повышенные требования к суммарному коэффициенту гармонической составляющей по сравнению с аналогичными документами, действующими в странах ЕС (EN 50160:2010) и США (IEEE 519). Высокие требования к показателям синусоидальности в России вынуждают энергетические службы предприятий производить замеры ПКЭ и внедрять технические мероприятия по сокращению потерь от высших гармоник (ВГ). Как показывают исследования на промышленных предприятиях с нелинейной нагрузкой, работающей в резкопеременном режиме, суммарный коэффициент гармонической составляющей  $KU$  (THD) для сетей 10 кВ может превышать 20 % [2], при допустимом ГОСТ уровне — 8 %. Эксплуатация электрооборудования при таких уровнях ВГ может быть опасна из-за повышенного старения изоляции, перегрева токоведущих частей, нарушения нормальной работы систем автоматики и телемеханики. В настоящее время на промышленных предприятиях и в гражданских зданиях все чаще используются светодиодные и газоразрядные источники света, которые оказывают существенное влияние на спектральный состав токов и напряжений питающих распределительных сетей. [3, 4]. Дополнительно следует отметить, что системы ос-

вещения — нагрузка однофазная и для них характерны несимметричные режимы работы вследствие неравномерного распределения нагрузки по фазам. В несимметричных режимах увеличивается ток в нулевом проводе. Для светодиодных систем освещения эта проблема имеет большое значение, так как блоки питания светодиодов генерируют в сеть гармоники кратные третьей [3–5], достигающей 30–70 % от амплитуды основной [5]. Таким образом, при несинусоидальных несимметричных режимах в токоведущих частях возникают дополнительные потери [6, 7], снижающие энергоэффективность установки в целом и увеличиваются затраты на транспортировку электроэнергии. Методика расчета потерь от ВГ в рабочем и нулевом проводниках с учетом несимметрии нагрузки представлена и подтверждена в [7], погрешность расчета не превысила  $\pm 3$  %.

Перед исследователями и практиками стоит задача модернизации существующих алгоритмов [8] расчета потерь от ВГ с учетом постоянно увеличивающейся доли нелинейных электроприёмников, в том числе работающих в несимметричном режиме [9]. Авторы [10] предлагают дополнительно при расчете несинусоидальных режимов учитывать возникновение возможных резонансов на ВГ, что может привести к опасным перенапряжениям и выходу из строя батарей статических конденсаторов (БСК).

Дополнительным негативным фактором, который следует учитывать при расчете потерь от ВГ,

является повышенный нагрев токоведущих частей несинусоидальными токами [11]. Авторы [11] производят сравнительный анализ методик, учитывающих увеличение активного сопротивления токоведущей жилы от нагрева высшими гармониками. Анализ температурного поля кабеля АСБ 3×35 + 1×16 при несинусоидальном токе производится в [12]. На основании проведенных исследований авторы отмечают: «Высшие гармоники тока, кратные трем, существенно влияют на пропускную способность кабельных линий 380 В» [12].

При расчете потерь от высших гармоник среди учёных существует нерешенное противоречие, связанное с трактовкой реактивной мощности на ВГ [13]. Если активная мощность ВГ определена однозначно, то в части реактивной мощности существует значительное количество теорий [13], дающих существенно отличающиеся результаты.

Для преодоления трудностей, возникающих с использованием преобразования Фурье для нестационарных режимов в мировой практике все чаще применяется математический аппарат вейвлет-преобразования.

**Теоретические основы вейвлет-преобразования.** Вейвлет-анализ является эффективным алгоритмом для нелинейных и искаженных сигналов, которые имеют резкие колебания и всплески. Вейвлет-преобразование используется для преобразования сигнала времени из временной области в область временного масштаба в течение определенного периода времени с помощью функций, которые называются вейвлетами [14].

Анализируя передовой мировой опыт, можно заключить, что наибольшее применение в электроэнергетике вейвлет-преобразование (ВП) получило для анализа ПКЭ вообще и несинусоидальных режимов в частности [15, 16].

Отличие вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье заключается в форме анализирующих функций. Все функции оконного преобразования Фурье состоят из одной и той же функции-оболочки, сдвинутой во времени и имеющей одинаковую ширину. Функция вейвлет-преобразования имеет переменную ширину во времени, зависящую от частоты. Вейвлет-функции для высокочастотных составляющих сужаются, а для низкочастотных становятся шире. В итоге ВП позволяет с высокой точностью анализировать высокочастотные возмущения, имеющие короткую продолжительность.

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt. \quad (1)$$

Любой дискретный сигнал тока или напряжения может быть представлен в виде суммы аппроксимирующих (A) и детализирующих (D) коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \Phi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \Psi_{j,k}(t), \quad (2)$$

где  $\Phi_{j,k}(t)$ ,  $\Psi_{j,k}(t)$  — функция материнского вейвлета и масштабирующая функция. Максимально возможный уровень вейвлет-разложения  $J_m$  определяется количеством отсчетов сигнала  $N$ :

$$J_m = \log_2 N. \quad (3)$$

Если исследуемая функция тока задана вейвлет-коэффициентами, определёнными по формуле (2),

то для ортогональных вейвлетов действующее значение может быть найдено, как:

$$I = N^{-1/2} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{j_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2}. \quad (4)$$

**Результаты экспериментов.** Для системы электроснабжения (рис. 1) административно-лабораторного корпуса с применением сертифицированного прибора для измерения показателей качества электроэнергии Metrel MI 2792A (Словакия) были произведены замеры коэффициентов  $n$ -ной гармонической составляющей  $K_{mn}$  и коэффициента гармонических искажений  $K_U$  (THD).

В ходе физических испытаний было установлено, что подключенная к силовой сборке (СП 1) нагрузка имеет нелинейные вольтамперные характеристики, другими словами, является источником высших гармоник.

Более детальный анализ показал, что система освещения выполнена светодиодными светильниками и имеет неравномерное распределение нагрузок по фазам. Технологическая лабораторная установка постоянного тока имеет повторно-кратковременный режим работы (общее время цикла — 10 минут, время работы 30 секунд). Для анализа дополнительных потерь от ВГ в кабельной линии, питающей силовой пункт с целью разработки мероприятий по фильтрации высших гармоник, была разработана имитационная модель (рис. 2) в среде MATLAB Simulink.

**Трансформатор** ТМ 1000 10/0,4 — номинальная мощность  $S = 1000$  кВА;  $U_{вн} = 10$  кВ;  $U_{нн} = 0,4$  кВ;  $U_{кз} = 5,5$  %;  $P_{кз} = 10,8$  кВт;  $I_{кх} = 0,75$  %;  $P_{кх} = 1,6$  кВт.

**Кабельная линия** АВВГ 3×95+1×70 — длина 100 м. Погонные сопротивления кабеля:  $r_0 = 0,405$  Ом/км,  $x_0 = 0,064$  Ом/км.

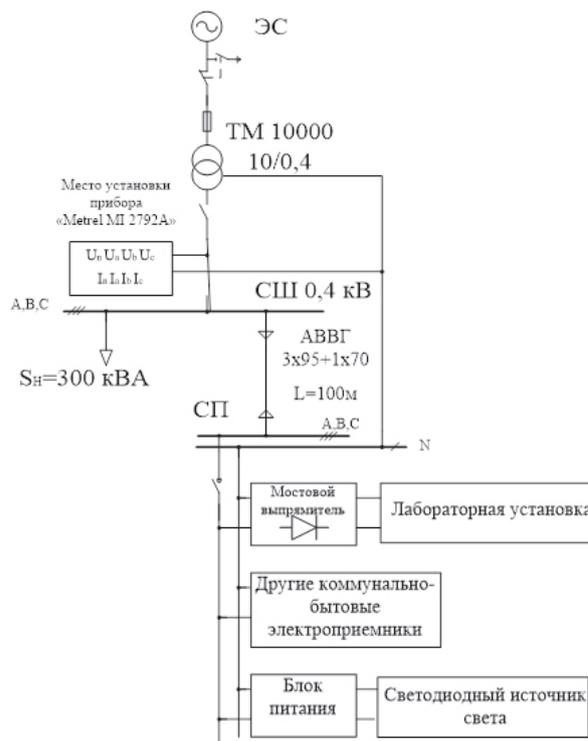


Рис. 1. Однолинейная схема исследуемой системы электроснабжения

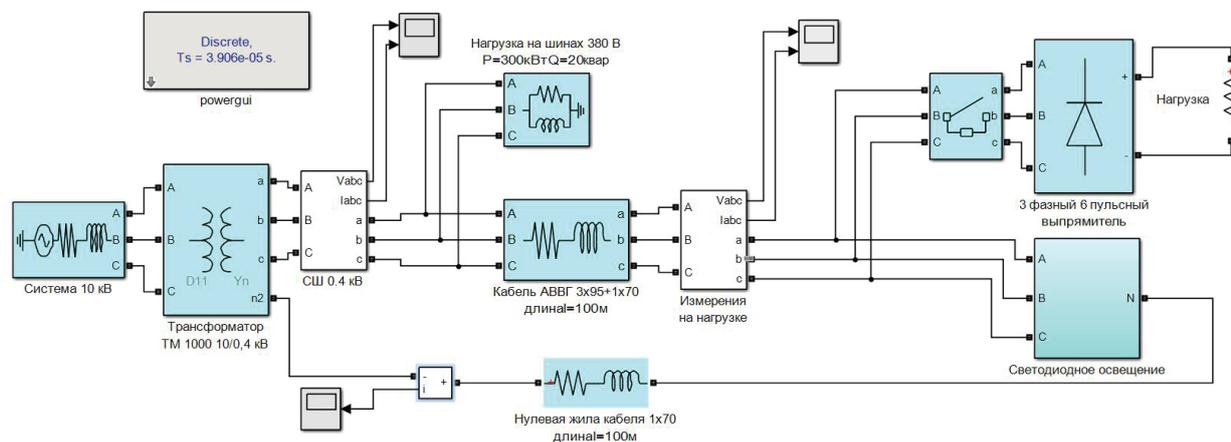


Рис. 2. Имитационная модель исследуемой системы в MATLAB Simulink

Таблица 1

Действующие значения токов отдельных гармоник

Нагрузка	Значение тока	Порядок гармоники тока							
		1	3	5	7	9	11	13	15
Освещение	о.е.	1	0,32	0,14	0,13	0,10	0,07	0,09	0,04
	A	51	16,32	7,14	6,63	5,1	3,57	4,69	2,04
Выпрямитель	о.е.	1	—	0,2	0,15	—	0,09	0,07	—
	A	80	—	16	12	—	7,2	5,6	—

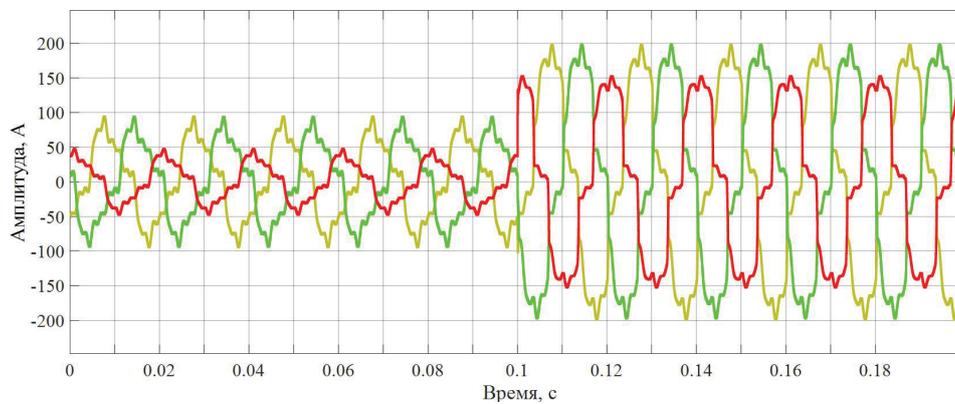


Рис. 3. Осциллограмма фазных токов в кабельной линии

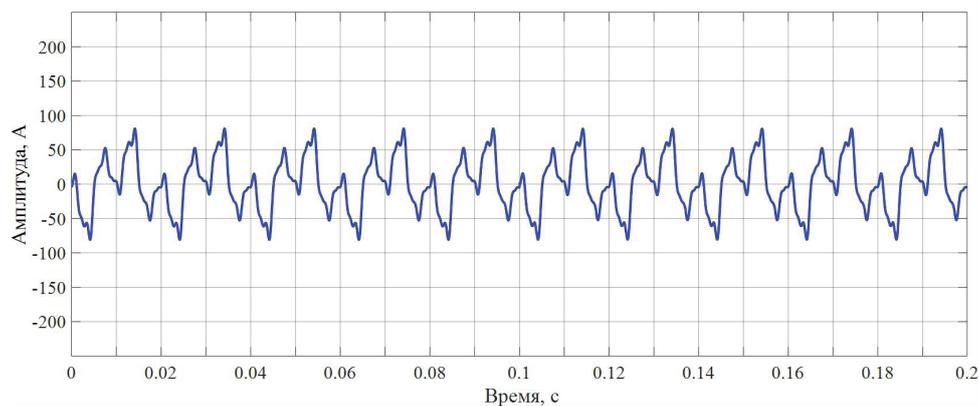


Рис. 4. Осциллограмма тока в нулевой жиле кабеля

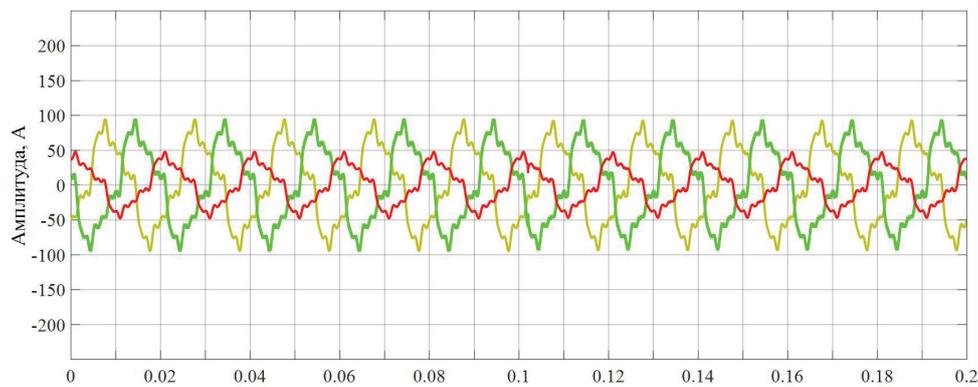


Рис. 5. Осциллограмма тока светодиодной системы освещения

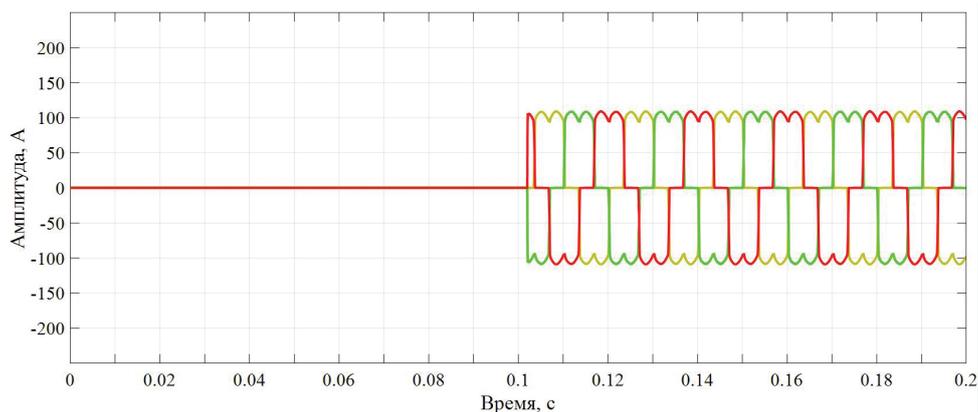


Рис. 6. Осциллограмма тока выпрямителя

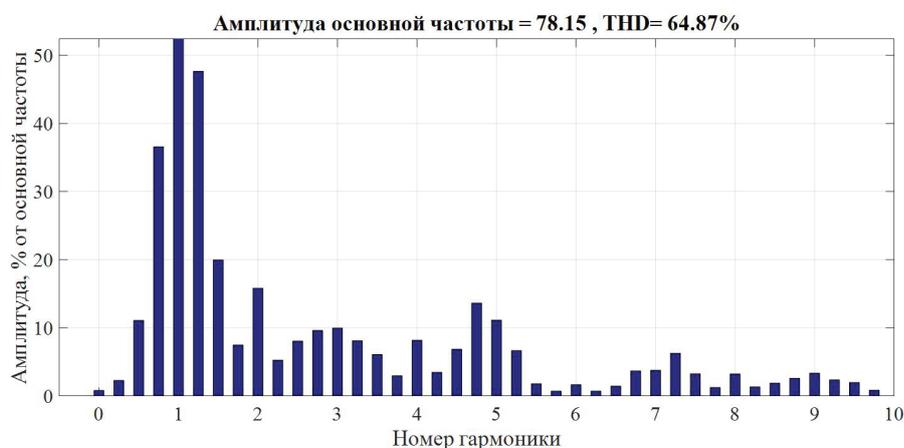


Рис. 7. Быстрое преобразование Фурье спектра тока фазы С

**Линейная нагрузка**, подключенная к шинам ТП 0,4 кВ, при моделировании была задана постоянным графиком нагрузки  $P=300$  кВт,  $Q=20$  квар.

Система светодиодного освещения задавалась блоком нелинейной нагрузки, состоящем из источников тока (табл. 1), имеющих гармонический состав в соответствии с данными, представленными в работах [3, 4].

В результате имитационного моделирования были получены осциллограммы фазных токов в кабельной линии (рис. 3) и тока в нулевой жиле кабеля (рис. 4). Степень достоверности результатов имитационного моделирования была подтверждена качественным совпадением с результатами замеров, полученных в ходе физических испытаний, а также с результатами, представленными в других

источниках [3, 4]. Следует отметить, что на величину тока в нулевой жиле кабельной линии влияет исключительно осветительная нагрузка. Несимметричное распределение осветительных приборов по фазам, фаза С загружена на 50 % меньше фаз А и В (рис. 5), обусловило появление в спектре не только гармоник, кратных третьей, но и других нечетных ВГ.

Нелинейная нагрузка, питаемая трехфазным 6-пульсным выпрямителем, как уже было отмечено, работает в повторно-кратковременном режиме. В разработанной имитационной модели время включения выпрямителя  $t_{вкл} = 0,1$  с. (рис. 6). Если по полученным осциллограммам (рис. 3) произвести оконное преобразование Фурье с целью определения спектрального состава и уровней гармоник,

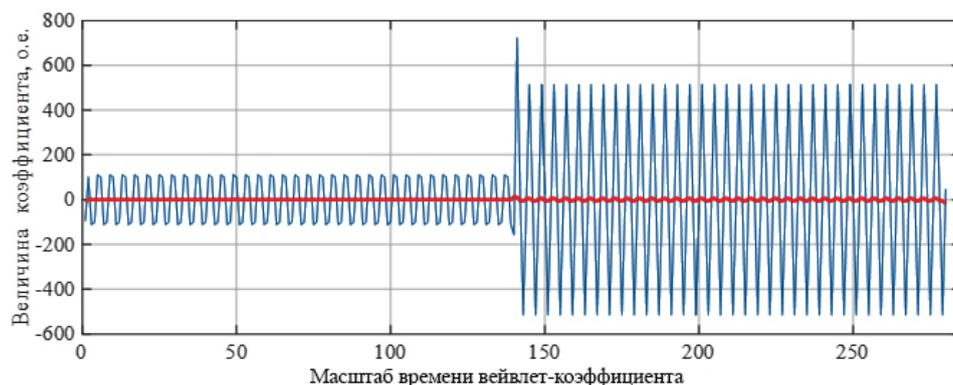


Рис. 8. Вейвлет-коэффициенты пакетного ВП

Таблица 2

Потери в кабельной линии по отдельным гармоникам

Потери мощности $\Delta P$ , Вт	Порядок гармоники тока							
	1	3	5	7	9	11	13	15
По мгновенным значениям тока и напряжения	236,02	3,72	6,14	0,94	0,54	1,16	0,21	0,11
По вейвлет-коэффициентам	234,83	3,73	6,13	0,94	0,54	1,16	0,22	0,11

то возникает дополнительная задача в выборе ширины окна. Для нестационарных режимов возможно возникновение эффекта — растекания спектра (рис. 7).

Для аппарата ВП существует возможность определять энергию спектра в пределах локализованного периода времени. Некоторые авторы вводят термин «локальный энергетический спектр». Другими словами, ВП позволяет определять плотность энергии сигнала в локальной окрестности точки времени  $t_0$ :

$$E_{\xi}(a, t_0) = \int E_V(a, b) \xi\left(\frac{b-t_0}{a}\right) db, \quad (5)$$

где  $\xi$  — оконная функция.

При использовании алгоритма вейвлет-разложения сигнала получаем вектор строку вейвлет-коэффициентов, отвечающих за конкретный частотный диапазон, определяемый частотой дискретизации исходного сигнала, глубиной вейвлет-разложения. Вейвлет-коэффициенты в соответствии с равенством 5 сохраняют энергию спектра исходного сигнала. Кроме того, по величине вейвлет-коэффициентов можно судить о наличии той или иной частоты в сигнале. На рис. 8 представлены вейвлет-коэффициенты основной частоты и частоты 2 кГц, (функция, принимающая значения, близкие к нулю). Поскольку частоты 2 кГц в исследуемом сигнале нет, то и вейвлет-коэффициенты близки к нулю (рис. 8).

На основании равенства 5, по вейвлет-коэффициентам (рис. 8) имеем возможность определить потери в элементах сети как от действия всех гармоник, так и для каждой частоты в отдельности, задавая лишь необходимые коэффициенты вейвлет-разложения:

$$\Delta P_{\Sigma \text{фазн}} = I_1^2 R_1 + \sum_{v=2}^n \left( \sum_{k \in Z} (I_{j_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{j-1} (I_{j, k}^D)^2 \right) R_v k_v. \quad (6)$$

После уточнения дополнительных потерь от ВГ на каждом частотном диапазоне (табл. 2) повышается достоверность принятия технико-экономических решений по внедрению конкретных типов фильтров для подавления ВГ [17] — активных, пассивных или гибридных.

**Заключение.** В настоящей работе был произведён анализ дополнительных потерь мощности в кабельной линии, питающей силовой пункт с нелинейной несимметричной нагрузкой, работающей в нестационарном режиме. В качестве основного математического аппарата был выбран вейвлет-анализ. Вейвлет-преобразование позволяет получить данные, аналогичные оконному преобразованию Фурье, но при этом отсутствует необходимость подбора оптимальной ширины окна. Вейвлет-преобразование позволяет избежать негативного эффекта — растекания спектра. В рамках государственной стратегии развития цифровых подстанций вейвлет-преобразование может стать одним из инструментов цифрового анализа параметров режима электроэнергетических систем.

#### Библиографический список

1. Вагин Г. Я., Юртаев С. Н. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения и ущербах от высших гармоник // Промышленная энергетика. 2017. № 1. С. 43–47.
2. Бушуева О. А., Иванова Н. С. Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения группы потребителей // Промышленная энергетика. 2017. № 11. С. 58–64.
3. Боярская Н. П., Довгун В. П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (90). С. 195–199.
4. Babacan Y., Uzunoglu C.P., Cekli S. [et al.]. Wavelet analysis of a memristor emulated model proposed for compact fluorescent lamp operated systems // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 160. P. 56–62. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.02.001.

5. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б. [и др.]. Анализ влияния нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе // *Промышленная энергетика*. 2013. № 12. С. 17–19.
6. Лютаревич А. Г., Вырва А. А., Долингер С. Ю. [и др.]. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения // *Омский научный вестник*. 2009. № 1 (77). С. 109–113.
7. 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.
8. Дёмин Ю. В., Елизаров Д. А., Манусов В. З. [и др.]. Совершенствование методов контроля и анализа показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2018. № 1. С. 200–206.
9. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Ле К. З. Моделирование несинусоидальных режимов электрических сетей // *Системы. Методы. Технологии*. 2015. № 1 (25). С. 78–86.
10. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Дрей Н. М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // *Промышленная энергетика*. 2018. № 3. С. 40–45.
11. Манусов В. З., Хрипков В. В., Фролова В. В. Сравнительный анализ математических моделей для определения коэффициента увеличения активного сопротивления проводников от высших гармоник // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2018. № 1. С. 184–188.
12. Тульский В. Н., Каргашев И. И., Насыров Р. Р. [и др.]. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В // *Промышленная энергетика*. 2013. № 5. С. 39–44.
13. Фархадзаде Э. М., Гулиев Г. Б., Сафаралиева С. М. Мощностные характеристики в электрической сети с полигармоническим напряжением и током // *Промышленная энергетика*. 2018. № 3. С. 46–52.
14. 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.
15. Thirumala K., Umarikar A. C., Jain T. Estimation of Single-Phase and Three-Phase Power-Quality Indices Using Empirical Wavelet Transform // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30, Issue 1. P. 445–454. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2355296.
16. Thirumala K., Shantanu, Jain T. [et al.]. Visualizing time-varying power quality indices using generalized empirical wavelet transform // *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 143. P. 99–109. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.017.
17. Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю. Оценка эффективности гибридного электротехнического комплекса для коррекции уровня несинусоидальности в автономных системах электроснабжения нефтепромыслов // *Промышленная энергетика*. 2018. № 1. С. 45–54.

**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

**ДОЛГИХ Надежда Николаевна**, старший преподаватель, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 3679-4944

AuthorID (РИНЦ): 828105

ORCID: 0000-0002-7404-0596

AuthorID (SCOPUS): 57193404041

ResearcherID: O-8241-2016

**ГОРОВОЙ Сергей Анатольевич**, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 8478-7760

AuthorID (РИНЦ): 998582

**ПОПЛАВСКАЯ Виолетта Евгеньевна**, магистрант гр. ЭЭМ-181 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 9548-1946

Адрес для переписки: osipov\_dmitriy@omgtu.ru

#### Для цитирования

Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Горовой С. А., Поплавская В. Е. Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет-преобразования // *Омский научный вестник*. 2018. № 6 (162). С. 76–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-76-81.

Статья поступила в редакцию 25.10.2018 г.

© Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих, С. А. Горовой, В. Е. Поплавская