

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВО ВРЕМЕНИ СИГНАЛА ТОКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселев, В. Н. Горюнов, Е. П. Жиленко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В работе производилось разложение сигнала тока распределительной сети с классом напряжения 0,4 кВ с применением пакетного вейвлет-преобразования (ВП). Декомпозиция сигнала производилась до пятого уровня, так как это позволило сузить частотные коридоры и описать каждую гармонику тока отдельным вейвлет-коэффициентом. С помощью пакетного ВП авторы определили действующие значения каждой гармонической составляющей и их вклад в суммарную энергию сигнала. Кроме того, пакетное ВП позволило определить гармонический состав кривой тока каждой из фаз в нестационарном несимметричном режиме работы сети на каждом интервале.

Ключевые слова: *высшие гармоники, качество электрической энергии, несимметричный режим, нестационарный нестационарный режим, пакетное вейвлет-преобразование, нелинейная нагрузка.*

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-81-89

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире невозможно представить жизнь человека и общества без энергии – количественной меры взаимодействия различных форм материи и её перехода из одной формы в другую согласно закону сохранения энергии. Из всего многообразия различных видов энергии наиболее удобным видом для передачи и транспортировки на большие расстояния является электрическая энергия.

Электрическую энергию можно рассматривать как особый вид товара, так как за потребленную энергию производятся расчеты с энергоснабжающей организацией. Следовательно, она должна обладать надлежащим качеством.

Согласно действующему на территории РФ ГОСТ 32144-2013 «качество электрической энергии (КЭ) – степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ» [1].

Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) показывают соответствие действительных (полученных в результате замеров) параметров электрической энергии нормированным значениям, указанных в нормативно-технической документации. Под параметрами понимается напряжение, частота, форма кривой питающего напряжения, тока и т.п.

В РФ нормативной документацией, регламентирующей ПКЭ, является ГОСТ 32144-2013, который вступил в силу 01.07.2014.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачи предлагаемой работы:

- подтверждение актуальности проведения научных исследований по направлению «Качество электрической энергии» с помощью проведенного литературного обзора по данной тематике;
- определение действующих значений гармонических составляющих тока и их вклад в результирующий (суммарный) ток системы;
- определение гармонического состава сигнала тока системы в нестационарном несимметричном режиме работы на каждом интервале;
- применение пакетного вейвлет-преобразования для решения поставленных задач.

III. ТЕОРИЯ

В настоящее время наиболее приоритетными направлениями по повышению КЭ распределительных сетей 0,4 кВ являются следующие: наличие в распределительных сетях значительной доли нелинейных электроприемников (превышение регламентированного значения коэффициента n -й гармонической составляющей, как для отдельных гармоник, так и суммарного) [2–5], значительная несимметрия напряжений в таких сетях (проявляется при неравномерном распределении группы однофазных потребителей по фазам трехфазной электрической сети, а также при несимметрии элементов распределительных сетей) [6–8], а также возможность появления резонансных режимов вблизи частот каких-либо высших гармоник [9–11].

В работе [2] была произведена модернизация методов, позволяющих свести к минимуму потери электроэнергии при наличии нелинейной нагрузки в системах электроснабжения (СЭС) индивидуального жилищного

строительства. Для снижения уровней высших гармоник (ВГ) и потерь энергии авторы предлагают установить резонансные пассивные (для подавления 3 и 5 гармоник) и активные фильтры (АФГ). По мнению авторов, пассивные фильтры необходимо установить через каждые 100 метров на 3 опорах, начиная с конечной, а активный фильтр – на шинах низкого напряжения питающей трансформаторной подстанции.

На основании данных проведенных исследований авторами [3] проведен анализ изменения коэффициента искажения кривой напряжения K_U . Исследователи связывают максимальные значения коэффициента K_U с подключением к сети огромного числа бытовых нелинейных электроприемников.

В [4] авторами предложены различные подходы, позволяющие производить фильтрацию высших гармонических составляющих.

В [5] предложено использование АФГ для компенсации высших гармоник в сети и разработан алгоритм работы системы управления, позволяющий повысить эффективность использования АФГ.

В [6] произведены физические замеры ПКЭ сети, производящей питание жилого микрорайона, с использованием сертифицированного анализатора КЭ «Chavin Arpoux SA8335». Замеры ПКЭ показали значительное превышение уровней ВГ в сети, а также несимметрию нагрузки. Для исправления ситуации исследовательский коллектив предлагает установить АФГ в СЭС.

В работах [7, 8] приводятся результаты замеров ПКЭ в распределительных сетях 0,4 кВ различных организаций. Авторы произвели всесторонний анализ многочисленных результатов исследований ПКЭ в таких сетях и пришли к выводу, что распределительные электрические сети имеют значительную несимметрию (коэффициенты несимметрии по току и напряжению составляют 30 %, что превышает регламентированные ГОСТ 32144-2013 значения).

В [9] научно исследовательским коллективом была разработана программа, с помощью которой можно вычислить резонансные частоты в СЭС при наличии в распределительной сети конденсаторных батарей и нелинейной нагрузки. Расчет резонансных частот производится на основании построения частотных характеристик импеданса от частоты сети.

Превышение уровней ВГ в сети промышленных предприятий было также выявлено исследовательским коллективом в работах [10, 11]. Кроме того, на основании замеров ПКЭ в СЭС одного из предприятий нефтегазодобывающей отрасли, проведенных с использованием анализатора «Ресурс-UF2M» и построению частотных характеристик импеданса сети, обнаружено возникновение резонансных режимов при определенных сочетаниях нелинейных нагрузок и наличия конденсаторных батарей.

В настоящее время подавляющее большинство измерительных приборов производят цифровую обработку исходных сигналов для их последующей записи, либо сохранения результатов. Для обработки сигналов можно использовать различные методы, однако наибольшее распространение в настоящий момент получило преобразование Фурье и вейвлет-преобразование.

Преобразование Фурье (ПФ) широко применяется для обработки стационарных во времени сигналов с приемлемой точностью. Однако, при разложении нестационарных сигналов наблюдается совсем иная картина: в амплитудно-частотном спектре в этом случае мы видим множество ложных частот, возникает эффект «растекания спектра» (рис. 1) [12].

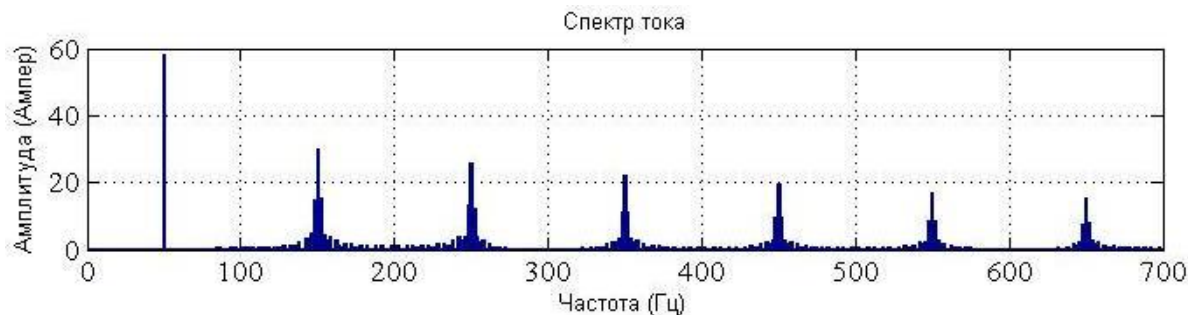


Рис. 1. Фурье-спектр нестационарного сигнала тока

Эффект растекания спектра может быть преодолен различными способами: используя дополнительную оконную функцию (оконное преобразование Фурье), либо применяя другой метод цифровой обработки сигналов – вейвлет-преобразование, которое получило наибольшее распространение для решения различных задач в электроэнергетике [12–18].

Например, в работе [13] показано преимущество использования вейвлет-преобразования перед преобразованием Фурье для анализа нестационарных во времени сигналов; применение ВП позволяет производить постоянный мониторинг режимных параметров системы [14]; расчет частотных характеристик импеданса сети и выявлять частоты, вблизи которых возможно возникновение резонансных режимов [15, 16]; определять действующие значения величин и производить расчет составляющих мощности, а также дополнительных потерь при несинусоидальных нестационарных режимах [12, 17, 18].

Вейвлет-преобразование сигналов, характеризующих параметры режима электроэнергетической системы (ток, напряжение, мощность), реализуется с помощью скалярного произведения исходного сигнала и вейвлет-функции $\psi(t)$. Например, вейвлет-преобразование сигнала тока может быть записано с использованием выражения (1):

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t)\psi(2^j t - k) dt, \quad (1)$$

где j – параметр масштаба, k – параметр временного сдвига, $1/\sqrt{2^j}$ – параметр нормировки.

В настоящей работе производится анализ несинусоидального нестационарного режима с несимметрией тока по фазам СЭС с использованием математического инструмента – пакетного вейвлет-преобразования для частотного разложения сигнала тока.

Алгоритм расчета несинусоидального несимметричного режима (для основной гармоники сети) может быть представлен следующим образом.

Пусть ЭДС фаз А, В и С представлены как:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= Ue^{j0^\circ} \\ \dot{E}_B &= Ue^{j240^\circ} \\ \dot{E}_C &= Ue^{j120^\circ} \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда проводимости фаз рассчитываются по формулам (3-5).

$$\dot{Y}_A = \frac{1}{(R_{K3} + R_A) + j(X_{K3} + X_A)}, \quad (3)$$

$$\dot{Y}_B = \frac{1}{(R_{K3} + R_B) + j(X_{K3} + X_B)}, \quad (4)$$

$$\dot{Y}_C = \frac{1}{(R_{K3} + R_C) + j(X_{K3} + X_C)}, \quad (5)$$

где R_{K3}, X_{K3} – активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора СЭС; $R_A, X_A, R_B, X_B, R_C, X_C$ – соответственно активные и индуктивные сопротивления нагрузок разных фаз сети.

Активное сопротивление короткого замыкания трансформатора определяем по выражению (6).

$$R_{K3} = \frac{P_{K3}}{3 \cdot I_{2НОМ}} \quad (6)$$

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора определим по паспортным данным трансформатора: напряжению короткого замыкания, приведенного к низшему напряжению ($U_{2К3}$) и номинальному току вторичной обмотки ($I_{2НОМ}$).

$$Z_{K3} = \frac{U_{2К3}}{I_{2НОМ}} \quad (7)$$

$$\text{где } I_{2НОМ} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_2}, \quad U_{2К3} = \frac{U_2 \cdot U_{K3\%}}{\sqrt{3} \cdot 100},$$

S_H – номинальная мощность трансформатора,

U_2 – напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора,

$U_{K3\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Зная полное и активное сопротивление трансформатора, определим его индуктивное сопротивление по формуле (8).

$$X_{K3} = \sqrt{Z_{K3}^2 - R_{K3}^2} \quad (8)$$

Проводимость нейтрали рассчитывается по выражению (9).

$$\dot{Y}_N = \frac{1}{R_N + jX_N}, \quad (9)$$

где R_N, X_N – активное и индуктивное сопротивление нейтрали распределительной сети. Напряжение смещения нейтрали определим по формуле (10).

$$U_{O'O} = \frac{\dot{E}_A \dot{Y}_A + \dot{E}_B \dot{Y}_B + \dot{E}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}. \quad (10)$$

Токи, протекающие по фазам сети, вычисляем по выражениям (11-13).

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_A. \quad (11)$$

$$\dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_B. \quad (12)$$

$$\dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_C. \quad (13)$$

При наличии ВГ параметры рассчитываются по аналогии с вышеприведенным алгоритмом с учетом, что индуктивное сопротивление $X_L = n\omega L$, а емкостное – $X_C = \frac{1}{n\omega C}$, где n – номер гармоники.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Произведем расчет и моделирование нестационарного несимметричного режима работы СЭС, содержащую в своем составе нелинейную нагрузку. Схема фрагмента исследуемой СЭС, приведена на рис. 2, а её упрощенная схема замещения – на рис. 3. К секции шин 0,4 кВ подключена однофазная нагрузка (на схеме обозначена Н), причем потребители (в том числе нелинейные) распределены неравномерно по фазам сети. Иными словами, мы имеем дело с несинусоидальным несимметричным режимом.

Параметры нагрузки и паспортные данные трансформатора ТМГ-160/6/0.4 приведены в таблице 1.

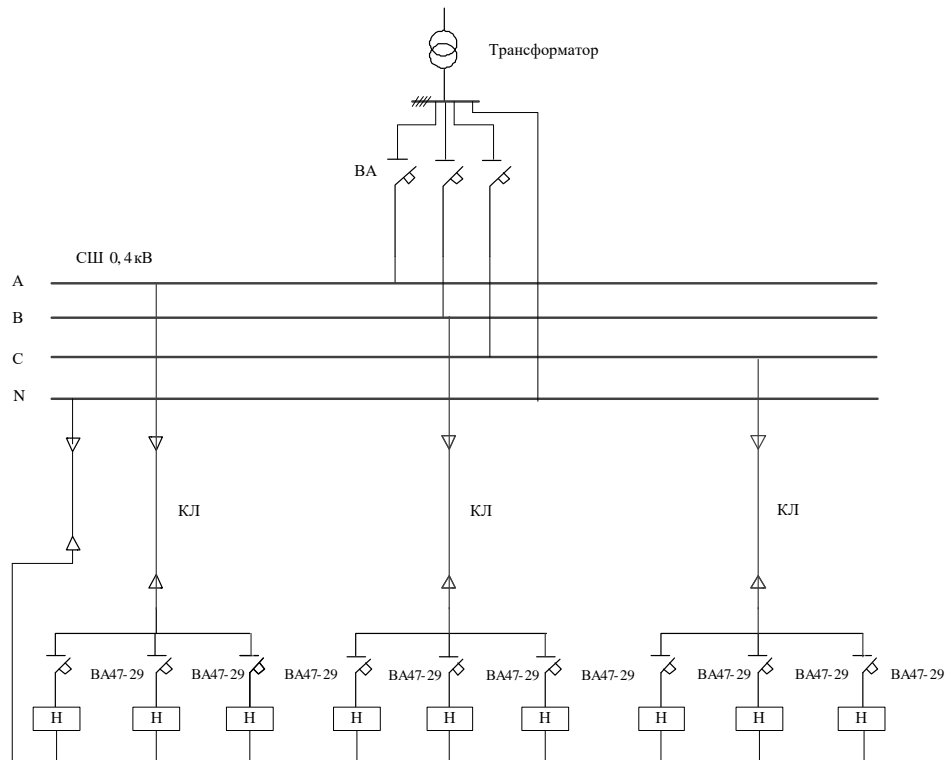


Рис. 2. Схема исследуемой СЭС

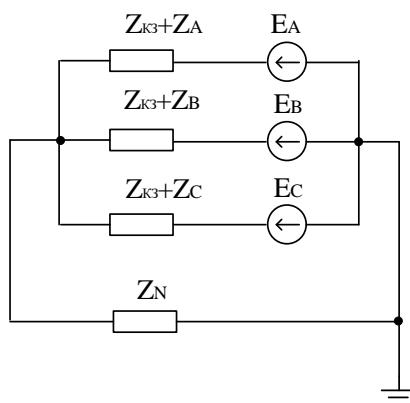


Рис. 3. Упрощенная схема замещения исследуемой СЭС

ТАБЛИЦА 1
ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА И ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

Параметры трансформатора ТМГ-160/6/0.4						
P_{xx} , Вт	$P_{к3}$, Вт	$U_{к3}$, %	I_{xx} , %	$S_{н}$, кВ·А	U_1 , кВ	U_2 , кВ
410	2600	4.5	0.5	160	6	0.4
Нагрузка						
Z_A , Ом	Z_B , Ом	Z_C , Ом	Z_N , Ом			
$2.15e^{j7}$	$2.55e^{j15}$	$2.3e^{j11}$	$0.12e^{j20}$			

Расчет несимметричного режима производится с использованием выражений (2–13). Полученные значения параметров схемы замещения (для основной гармоники сети) приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
ПАРАМЕТРЫ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

\dot{E}_A , В	\dot{E}_B , В	\dot{E}_C , В	$\dot{U}_{O'O}$, В
219.393	-109.697-190j	-109.697+190j	0.405+1.935j
\dot{Y}_A	\dot{Y}_B	\dot{Y}_C	\dot{Y}_N
0.457-0.064j	0.374-0.105j	0.422-0.088j	j2.85-7.831
\dot{I}_A	\dot{I}_B	\dot{I}_C	
99.849-14.837j	-61.384-60.174j	-29.778+89.008j	

Исследуемая нами распределительная сеть имеет 4 характерных интервала (это видно из графиков осциллограмм, приведенных на рис. 4). Кроме того, анализ приведенных осциллограмм свидетельствует о том, что система имеет несимметрию по фазам.

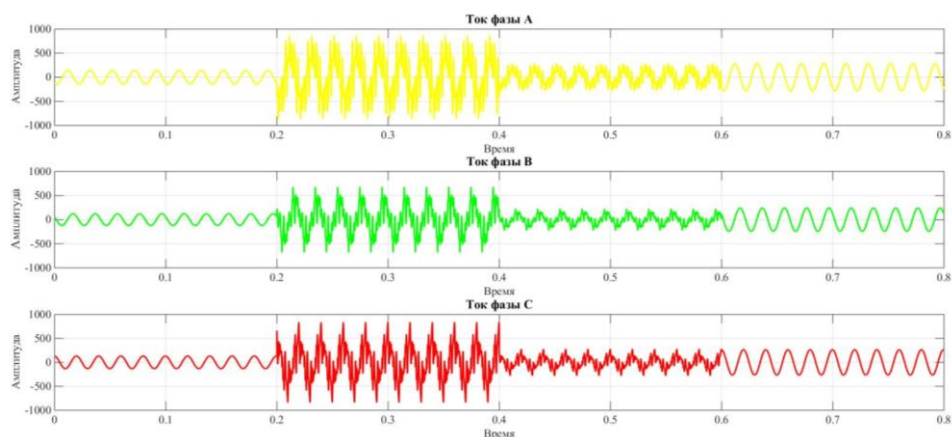


Рис. 4. Токи разных фаз исследуемой распределительной сети

Произведем декомпозицию сигналов тока разных фаз распределительной сети, используя пакетное ВП (рис. 5). Разложение сигнала необходимо для определения гармонического состава, действующих значений токов отдельных гармоник, их вклад в суммарную энергию спектра (разложение сигнала производится до 5 уровня разложения, так как в этом случае каждая из гармоник сигнала описывается своим вейвлет-коэффициентом). Результаты расчета приведены в табл. 3.

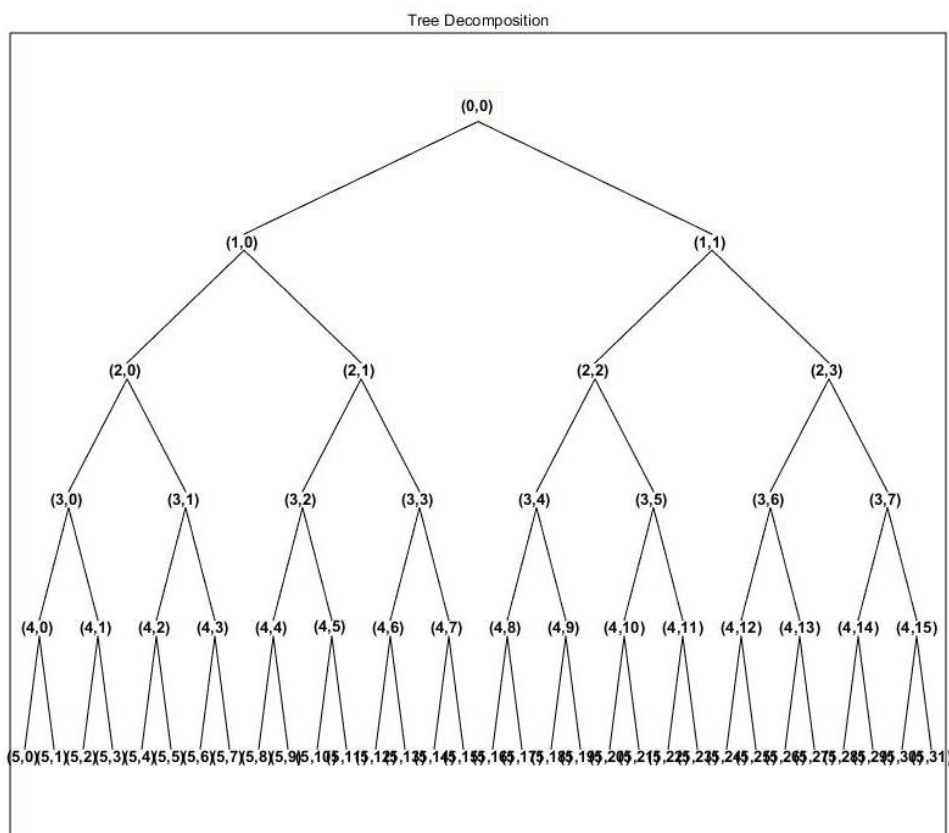


Рис. 5. Дерево разложения исходного сигнала до 5 уровня

ТАБЛИЦА 3
ВКЛАДЫ ТОКОВ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ ОТДЕЛЬНЫХ ГАРМОНИК В СУММАРНУЮ ЭНЕРГИЮ СИГНАЛА, ВЫЧИСЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Фаза А	
Вейвлет-коэффициент	Е, %
5,0	61,6756
5,1	0,281
5,2	7,4839
5,3	13,7815
5,4	0,6622
5,5	3,2488
5,6	2,2724
5,7	3,896
5,8	0,3027
5,9	0,0026
5,10	0,7377
5,11	0,6445
5,12	0,9329
5,13	2,3306
5,14	0,2207
5,15	1,1643
5,16	0,0004
5,17	0,0004

5,18	0,0003
5,19	0,0005
5,20	0,0007
5,21	0,0005
5,22	0,0006
5,23	0,0006
5,24	0,2037
5,25	0,0008
5,26	0,0758
5,27	0,0557
5,28	0,0003
5,29	0,0005
5,30	0,0213
5,31	0,0007
Фаза В	
5,0	77,2397
5,1	0,1943
5,2	4,5975
5,3	9,9145
5,4	0,3709
5,5	1,5444
5,6	1,3839
5,7	1,9297
5,8	0,0882
5,9	0,0004
5,10	0,2966
5,11	0,2082
5,12	0,2968
5,13	1,1185
5,14	0,0987
5,15	0,4563
5,16	0,0002
5,17	0,0002
5,18	0,0002
5,19	0,0002
5,20	0,0004
5,21	0,0003
5,22	0,0003
5,23	0,0003
5,24	0,1228
5,25	0,0004
5,26	0,0392
5,27	0,0842
5,28	0,0002
5,29	0,0003
5,30	0,012
5,31	0,0004
Фаза С	
5,0	70,1969
5,1	0,1899
5,2	5,4236
5,3	12,8482
5,4	0,7014
5,5	2,8365
5,6	1,6466
5,7	2,6366
5,8	0,2745
5,9	0,0067
5,10	0,4774

5,11	0,3677
5,12	0,2811
5,13	0,9621
5,14	0,139
5,15	0,818
5,16	0,0016
5,17	0,0015
5,18	0,0011
5,19	0,0015
5,20	0,0023
5,21	0,0013
5,22	0,0023
5,23	0,0019
5,24	0,0378
5,25	0,0048
5,26	0,0571
5,27	0,0532
5,28	0,0015
5,29	0,0016
5,30	0,0218
5,31	0,0024

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ литературных источников доказывает актуальность, востребованность и необходимость дальнейшего проведения научных исследований по направлению «Качество электрической энергии».

2. Определены гармонические составляющие суммарного тока СЭС на каждом интервале. Кроме того, выполнен расчет токов однофазных электроприемников при несимметричной нагрузке фаз трехфазной СЭС. Показано, что токи разных фаз неодинаковы по величине.

3. Определение гармонического состава сигнала тока для каждой из фаз сети и вклад каждой гармоники в суммарную энергию сигнала выполнено с помощью пакетного ВП с глубиной разложения до пятого уровня.

4. Показано, что пакетное ВП справилось со своими задачами – определением гармонического состава тока и расчетом действующих значений токов высших гармонических составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

2. Авербух М. А., Жилин Е. В., Прокопишин Д. И. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Проблемы региональной энергетики. 2018. № 2 (37). С. 31–38.

3. Кобелев А. В., Зыбин А. А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17, № 1. С. 187–191.

4. Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. 2013. № 12–2. С. 27–31.

5. Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаевич А. Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 6. С. 20–24.

6. Авербух М. А., Жилин Е. В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.

7. Дед А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 2 (152). С. 63–65.

8. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии 2018. № 2 (158). С. 60–63.

9. 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.

10. Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Влияние конденсаторных установок на перетоки мощности высших гармоник в автономной энергосистеме // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 8 (139). С. 95–103.

11. Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Митрофанов Н. А. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 2 (71). С. 131–142.

12. Долгих Н. Н., Катеров Ф. В., Осипов Д. С., Птицына Е. В., Файфер Л. А. Определение коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока по вейвлет-коэффициентам // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 113. С. 814–825.

13. Santoso S., Grady W. M., Powers E.J., Lamoree J. and Bhatt S.C. “Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol. 15, no. 1. Pp. 247-254. DOI: 10.1109/61.847259.

14. Ren J., Kezunovic M. “Real-time power system frequency and phasors estimation using recursive wavelet transform” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, no. 3. Pp. 1392-1402. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2135385.

15. Gomez-Luna E., Silva D., Aponte G., Pleite J. G., Hinestroza D. “Obtaining the Electrical Impedance Using Wavelet Transform From the Time Response” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Vol. 28, Issue 2. Pp. 1242-1244. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2234942.

16. Osipov D. S., Kovalenko D. V., Dolgikh N. N. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.

17. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Goryunov V. N., Kovalenko D.V. Algorithms of packet wavelet transform for power determination under nonsinusoidal modes” // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819059.

18. 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. Сер. Приборы, машины и технологии. 2018. № 6 (162). С. 76–81.

УДК 621.6.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С ПРИМЕСЯМИ

А. Г. Михайлов, В. С. Виниченко, И. П. Пышный, А. Е. Иванова, Е. Н. Слободина
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. Важнейшая задача теплоэнергетики – увеличение эффективности работы тепловых установок. Одним из способов повышения эффективности является улучшение теплофизических свойств теплоносителей. В данной работе исследовано изменение плотности наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла Т-1500У (дисперсная среда) и различных твердых частиц (дисперсная фаза). Показано влияние природы выбранных частиц (неодим, керамика, латунь), их концентрации и размера. Установлено, что введение выбранных примесей приводит к существенному повышению плотности получаемой наножидкости по сравнению с чистым маслом. Показано, что плотность наножидкости с уменьшением размера частиц увеличивается.

Ключевые слова: наножидкость, плотность, наночастицы, суспензия.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-89-93

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности ставит новые задачи перед инженерами и исследователями. Главными вопросами по-прежнему остаются качество продукции, рентабельность производства, актуальность выпускаемой продукции и т.д. Современное производство неразрывно связано с современными научными достижениями и грамотный инженер всегда должен держать «руку на пульсе» в сфере новинок. В частности, активно идёт изу-