

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗАВОДА НА ОСНОВЕ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Проведя анализ результатов физических испытаний системы электроснабжения завода, было выявлено, что значения отдельных гармонических составляющих превышают значения, установленные ГОСТ-32144 2013. На основании полученных данных сформирована имитационная модель и выполнен анализ высших гармоник методом пакетного вейвлет-преобразования. Целью работы является анализ и расчет высших гармоник и дополнительных потерь от них в нулевом проводнике на основе метода пакетного вейвлет-преобразования. Моделирование проведено при помощи программного комплекса Simulink. В результате проведенного исследования установлено, что пакетное вейвлет-преобразование с высокой точностью позволяет определить наличие высших гармоник в системе электроснабжения, показана эффективность применения вейвлет-преобразования для расчета дополнительных потерь в нулевом проводнике.

Ключевые слова: система электроснабжения, высшие гармоники, вейвлет-преобразование, пакетное вейвлет-преобразование, несинусоидальный режим.

С развитием и совершенствованием оборудования и технологий появилась новая проблема в области электрической энергии. Вызвана она тем, что на различных промышленных предприятиях и в быту получило свое широкое распространение использование нелинейной нагрузки. С ростом числа внедряемых на производстве вентильных преобразователей и таких установок, как электродуговые сталеплавильные печи, сварочные аппараты, газоразрядные лампы и др. [1], проблема становится все более актуальной. Все эти установки потребляют из сети несинусоидальные токи, вызывают искажения сигнала напряжения сети, что и приводит к несинусоидальному режиму работы.

В результате несинусоидального режима работы возникают высшие гармоники, которые приводят к неблагоприятным факторам. Нарушается работа силового оборудования, релейной защиты и автоматики, уменьшается срока службы электрооборудования, увеличиваются потери,

что приводит к увеличению финансовых затрат. Все эти факторы приводят к снижению надежности электрической системы. Также высшие гармоники могут привести к нарушению технологического процесса производства наиболее ответственных предприятий (литейных заводов, больниц и т.д.).

Во избежание проблем, приведенных выше, электрическую энергию необходимо контролировать и оценивать.

В рамках проведения анализа несинусоидальности системы электроснабжения завода были произведены измерения высших гармоник в сети 0,4 кВ. Измерения на объекте электроэнергетики производились при помощи многофункционального анализатора качества электроэнергии METREL MI 2892 PowerMaster.

Измерения производились в течение суток. Прибор был подключен к силовому щитку, который запитан от тиристорного ключа. Измерения, полученные многофункциональным анализатором

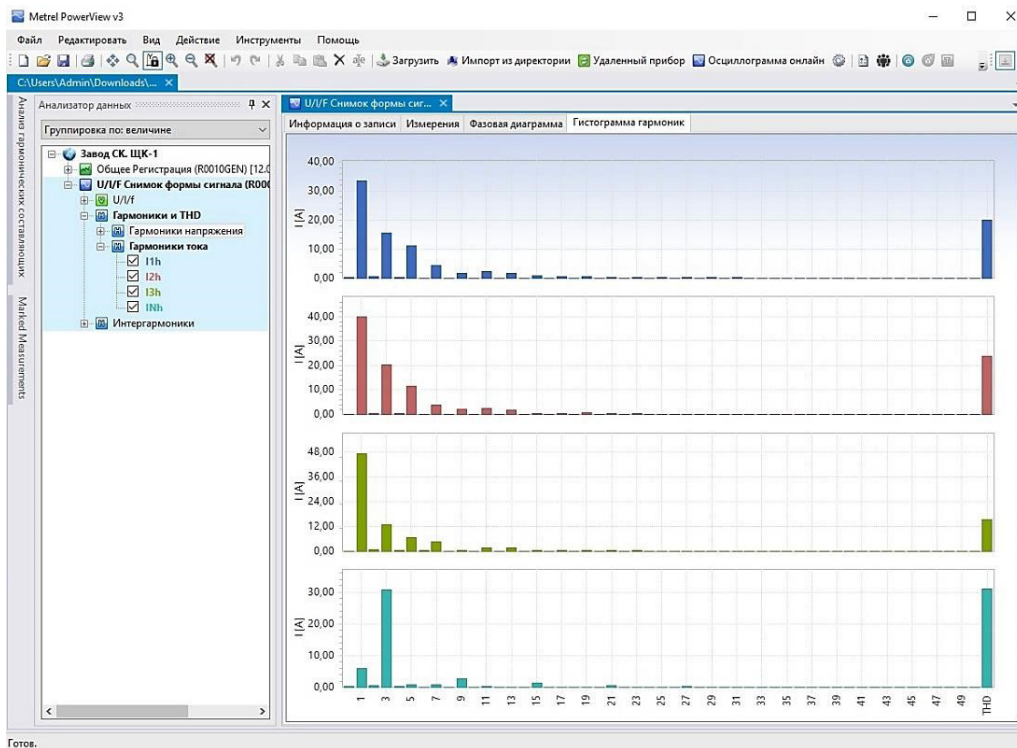


Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения PowerView (диаграмма высших гармоник тока)

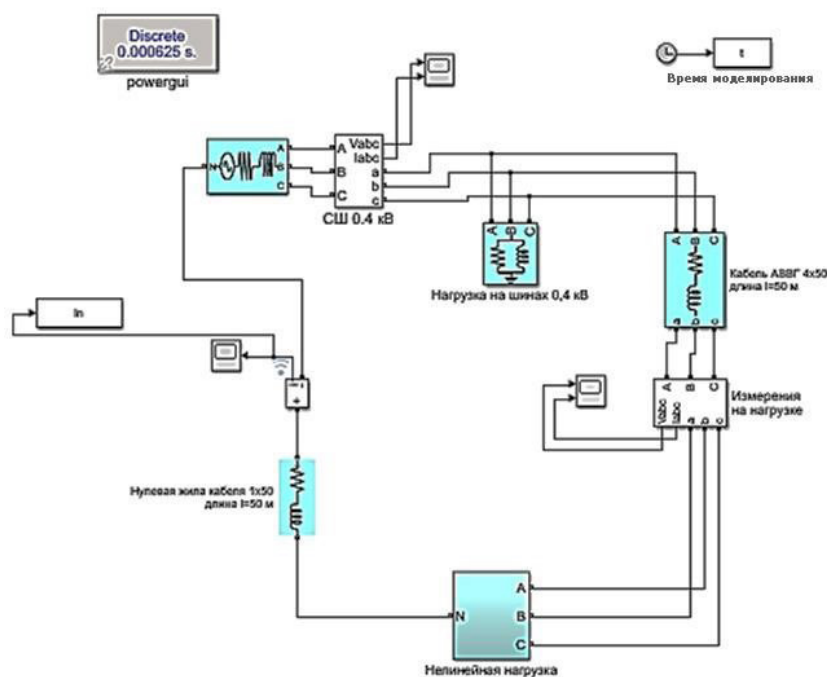


Рис. 2. Имитационная модель

ром качества электроэнергии, были выгружены при помощи специального программного обеспечения на персональный компьютер.

В ходе проведения физических испытаний было выявлено, что подключенная к силовому щитку нагрузка является источником высших гармоник. По результатам анализа выявлено, что гармоническая составляющая напряжения третьей гармоники для фаз А, В, С соответствует следующим значениям: 6,84 %; 7,059 %; 7,33 %.

Полученные значения превышают значения коэффициентов гармонической составляющей напряжения третьей гармоники ГОСТ-32144 2013 [2]. Исходя из данных, установленных межгосударственным стандартом, значение третьей гармоники не должно превышать 5 %.

Вследствие того, что имеет место неравномерная загрузка по фазам, в нулевом проводнике возникает ток небаланса. На диаграмме (рис. 1) особое внимание вызывает наличие гармониче-

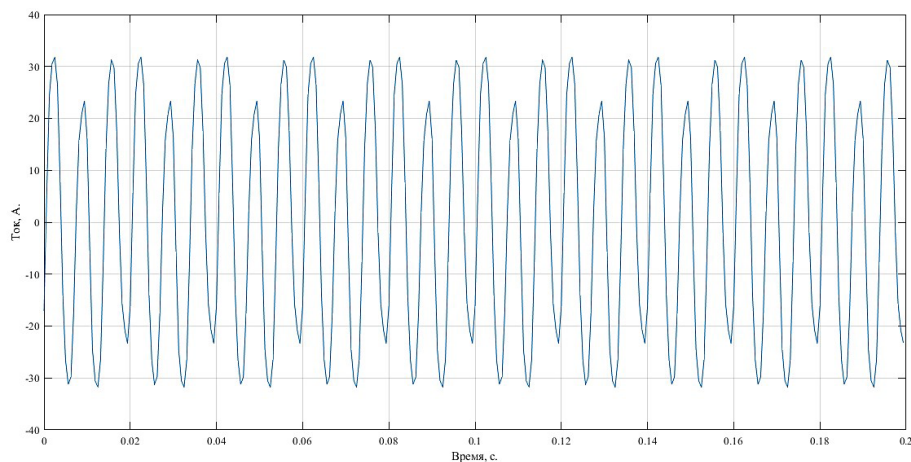


Рис. 3. Осциллограмма тока в нулевом проводнике, полученная в результате моделирования

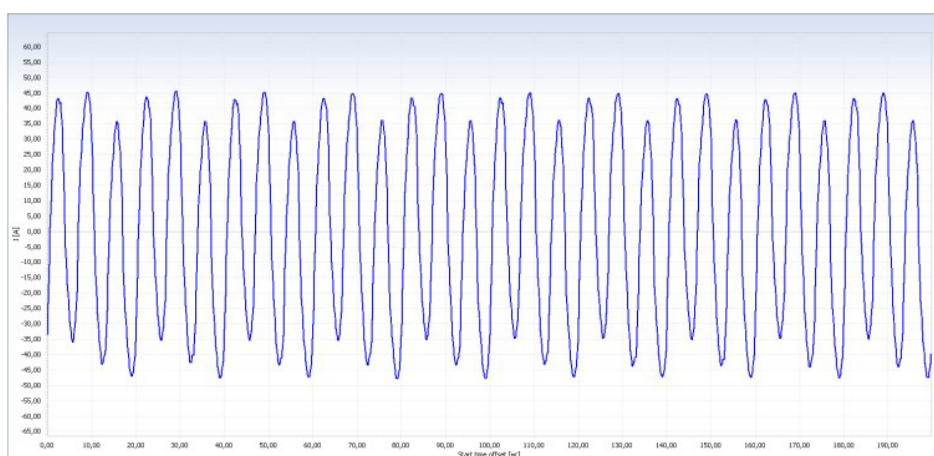


Рис. 4. Осциллограмма тока в нулевом проводнике, полученная в результате измерений

ской составляющей в нулевом проводнике. При анализе результатов видно, что третья гармоника является преобладающей. Наличие высших гармоник в нулевом проводнике имеет негативный характер. Возможен перегрев нулевого проводника или полное его обгорание. Анализ и расчету дополнительных потерь от высших гармоник посвящены работы [3, 4], в которых авторами также описывается негативное влияние и необходимость учета потерь при анализе системы электроснабжения.

Целью данной работы является анализ и расчет действующего значения тока высших гармоник и потерь мощности в нулевом проводнике методом пакетного вейвлет-преобразования.

На основе полученных в результате проведения измерений данных произведено моделирование (рис. 2) для анализа влияния, оказываемого высшими гармониками на нулевой проводник. При моделировании было принято решение пренебречь гармониками выше 11-й ввиду их незначительности. Моделирование проведено в среде Simulink программного комплекса MATLAB.

В результате моделирования получили осциллограмму тока, протекающего в нулевом проводнике (рис. 3). Полученный ток соответствует

данным физическим измерениям показателей качества электроэнергии (рис. 4).

Для анализа несинусоидального режима выбрано пакетное вейвлет-преобразование. Применению данного математического аппарата посвящены работы [5–8], в которых авторы описывают его преимущество. Помимо решения задач, таких как анализ показателей качества электроэнергии, анализ переходных процессов и др., вейвлет-преобразование применяется для прогнозирования электропотребления [9].

Произведем декомпозицию сигнала до третьего уровня разложения. В качестве вейвлет-функции будем использовать вейвлет Добеши 24, так как по результатам расчета было установлено, что выбранная вейвлет-функция показывает наименьшее значение погрешности результатов расчета. Частота дискретизации при вейвлет-разложении была принята равной 1600 Гц по условию теоремы Котельникова.

Для разложения сигнала с помощью вейвлет-преобразования используется следующая формула:

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

Локальная энергия спектра вейвлет-пакетов

0 – 100 Гц, Узел $a_{3,1}$, %	100 – 200 Гц, Узел $a_{3,2}$, %	200 – 300 Гц, Узел $a_{3,3}$, %	300 – 400 Гц, Узел $a_{3,4}$, %	400 – 500 Гц, Узел $a_{3,5}$, %	500 – 600 Гц, Узел $a_{3,6}$, %	600 – 700 Гц, Узел $a_{3,7}$, %	700 – 800 Гц, Узел $a_{3,8}$, %
9,0517	89,108	0,9315	0,0866	0,812	0,0089	0,00015	0,00016

Таблица 2

Результаты расчета действующего значения тока

Действующее значение тока по вейвлет-коэффициентам, А	Действующее значение тока по результатам моделирования, А	Погрешность в расчетах, %
22,2626	22,2398	0,102

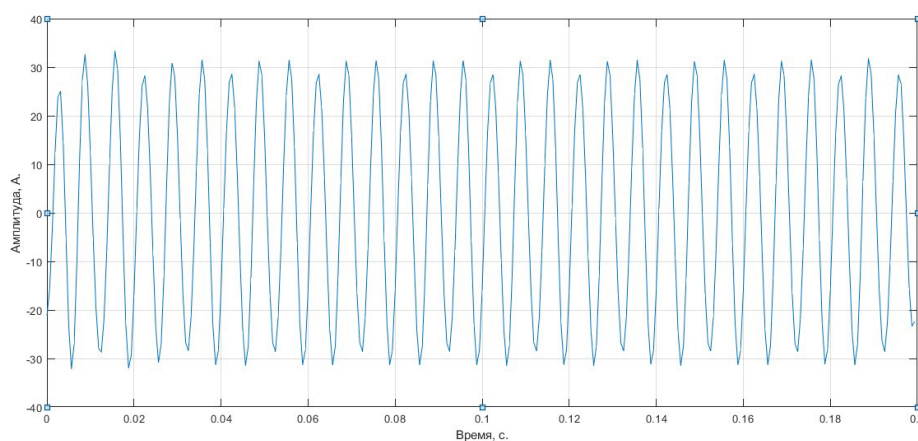


Рис. 5. Осциллограмма тока 3-й гармоники (150 Гц) в нулевом проводнике

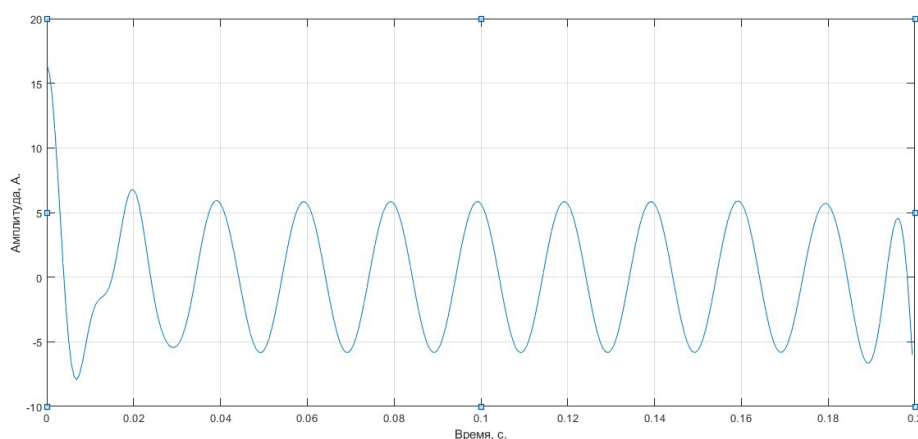


Рис. 6. Осциллограмма тока основной частоты (50 Гц) в нулевом проводнике

где $\psi_{j,k}(t)$ — функция материнского вейвлета. Если учесть, что a и b — дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0$ и $m, n \in Z$, получается:

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

После вейвлет-разложения сигнала получим наборы вейвлет-коэффициентов, входящих

в определенный частотный коридор, так называемые вейвлет-пакеты. Рассчитаем локальную энергию спектра полученных вейвлет-пакетов. Результаты сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что энергия спектра вейвлет-пакетов в частотных коридорах 600–700 Гц и 700–800 Гц близка к нулю. Результаты расчета энергии соответствуют данным имитационной модели, так как максимальная частота, которая использовалась при моделировании, составляет

Результаты расчета действующего значения тока и потерь в нулевом проводнике по вейвлет-коэффициентам

Номер гармоники	Действующее значение тока, А	Потери мощности в нулевом проводнике, В.
1	4,4807	0,143
3	21,6028	0,691

550 Гц. Произведем обратное вейвлет-преобразование сигнала тока по полученным вейвлет-коэффициентам.

$$i(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} i_{j,k} \varphi_{j,k}(t), \quad (3)$$

где j — уровень вейвлет-разложения; k — номер узла вейвлет-разложения; $\varphi_{j,k}(t)$ — базисная функция; $i_{j,k}$ — вейвлет-коэффициенты.

Выполним расчет действующего значения тока в нулевом проводнике по вейвлет-коэффициентам. Расчет произведем по формуле, приведенной авторами в работе [10]:

$$I_{j,m} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)}, \quad (4)$$

где k — порядковый номер элемента; n — количество мгновенных отсчетов; j — уровень разложения; m — номер узла пакетного вейвлет-преобразования; $i_{j,m}$ — вейвлет-коэффициент уровня разложения j и узла m .

Для проверки достоверности расчетов сравним с действующим значением тока, полученным при моделировании. Результаты сведем в табл. 2.

Таким образом, при помощи математического аппарата вейвлет-преобразования было идентифицировано наличие высших гармоник в системе электроснабжения. Погрешность при расчете действующего значения тока по вейвлет-коэффициентам, приведенная в табл. 2, показывает высокую точность при использовании данного метода. Из полученных результатов установлены амплитудные значения высших гармонических составляющих тока в нулевом проводнике. Наиболее значимой является 3-я гармоника (рис. 5), ее амплитуда превышает значение амплитуды основной частоты (рис. 6) более чем в 5 раз. Для количественной оценки произведем расчет действующего значения тока основной частоты и 3-й гармоники. Расчет произведем по полученным вейвлет-коэффициентам по формуле 4. Также рассчитаем потери мощности в нулевом проводнике. Результаты расчетов сведем в табл. 3.

В данной работе был произведен анализ влияния высших гармоник на нулевой проводник. На основе пакетного вейвлет-преобразования произведена идентификация высших гармоник в исследуемой схеме. Было выявлено значительное превышение третьей гармоники в нулевом проводнике. Для количественной оценки был произведен расчет действующего значения токов

отдельных гармоник и потери мощности от их влияния на нулевой проводник. По результатам расчетов видно, что действующее значение тока и потери мощности третьей гармоники превышают значения основной гармонической составляющей более чем в 5 раз.

Можно сделать вывод, что пакетное вейвлет-преобразование позволяет с высокой точностью рассчитать действующие значения тока и потери мощности каждой гармонической составляющей, что предоставляет возможность выполнить оценку влияния высших гармоник как на систему электроснабжения в целом, так и на отдельные элементы сети.

Библиографический список

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. Москва: Стандартинформ, 2013. 62 с.
3. Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Горовой С. А., Плазская Е. В. 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.
4. Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Киселёв Б. Ю. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2016. № 4 (148). С. 84–89.
5. Savita B. Assessment of power quality disturbances using stationary wavelet packet transform // 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies. 2019. P. 164–168. DOI: 10.1109/ICICT46008.2019.8993165.
6. Panagiotis A., Vasileios A., Pavlos S. Evaluation of harmonic contribution to unbalance in power system under non-stationary conditions using wavelet packet transform // Electric Power System Research. 2020. Vol. 178. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.106026.
7. Архипова О. В., Осипов Д. С., Парамзин А. О. Анализ режимов системы электроснабжения на основе цифровой обработки потока мгновенных значений напряжений и токов с помощью вейвлет-преобразования // Известия Трансисба. 2020. № 2 (42). С. 87–96.
8. Файфер Л. А., Осипов Д. С., Еремин Е. Н., Долгих Н. Н. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник ИрГТУ. 2016. № 8 (115). С. 136–145.

9. Aprillia H., Yang H.-T., Huang C.-M. Optimal decomposition and reconstruction of discrete wavelet transformation for shortterm load forecasting // *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 24. DOI: 10.3390/en12244654.

10. Архипова О. В., Долгих Н. Н., Долингер С. Ю., Ковалев В. З., Осипов Д. С. Алгоритм вейвлет-преобразования суточных графиков нагрузок для выбора параметров гибридных накопителей энергии // *Омский научный вестник*. 2020. № 6 (174). С. 57–62. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-57-62.

ГОРОВОЙ Сергей Анатольевич, аспирант института нефти и газа по профилю «Электротехнические комплексы и системы» Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск. SPIN-код: 8478-7760

AuthorID (РИНЦ): 8478-7760

Адрес для переписки: gorovoysergey97@gmail.com

СИМАКОВ Александр Владимирович, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 3865-0506

AuthorID (РИНЦ): 894651

ORCID: 0000-0002-9237-4469

AuthorID (SCOPUS): 57200447013

Адрес для переписки: simak_off94@mail.ru

СКОРОХОДОВ Вячеслав Игорьевич, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8609-7871

AuthorID (РИНЦ): 1068596

Адрес для переписки: skorohodov154@gmail.com

Для цитирования

Горовой С. А., Симаков А. В., Скороходов В. И. Анализ и расчет высших гармоник системы электроснабжения завода на основе пакетного вейвлет-преобразования // *Омский научный вестник*. 2022. № 1 (181). С. 67–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-67-72.

Статья поступила в редакцию 16.01.2022 г.

© С. А. Горовой, А. В. Симаков, В. И. Скороходов