

**АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Осипов Дмитрий Сергеевич
профессор, доктор технических наук
руководитель Политехнической школы,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru

Долгих Надежда Николаевна
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru

Дюба Елена Александровна
старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-20052,
<https://rscf.ru/project/22-29-20052/>.*

Предмет исследования: методы расчета и анализа несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей.

Цель исследования: разработка метода расчета активной и реактивной мощности, а также мощности искажения несинусоидальных режимов электрических сетей на основе теории вейвлет-преобразования.

Объект исследования: электрические сети и системы электроснабжения, содержащие нелинейную нагрузку, которая является причиной возникновения несинусоидальных режимов.

Методы исследования: пакетное вейвлет-преобразование токов и напряжений; теория электрических цепей.

Основные результаты исследования: в статье предложена идея использовать вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции токов и напряжений несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей. На основе вейвлет-коэффициентов предложено производить расчет активной, реактивной мощности и мощности искажения несинусоидальных режимов.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, преобразование Фурье, несинусоидальные режимы, высшие гармоники, мощность искажения.

ANALYSIS OF NON-SINUSOIDAL NON-STATIONARY MODES OF ELECTRIC NETWORKS BASED ON THE WAVELET TRANSFORMATION

Dmitry S. Osipov

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Polytechnic School
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

Nadezhda N. Dolgikh

*Senior Lecturer
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru*

Elena A. Dyuba

*Senior Lecturer
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru*

*Research was supported by the
Russian Science Foundation grant No. 22-29-20052,
<https://rscf.ru/project/22-29-20052/>.*

Subject of research: methods for calculating and analyzing non-sinusoidal non-stationary modes of electrical networks.

Purpose of research: development of a method for calculating active and reactive power, as well as the power of distortion of non-sinusoidal modes of electrical networks based on the theory of wavelet transform.

Object of research: electrical networks and power supply systems containing a non-linear load, which is the cause of non-sinusoidal modes.

Methods of research: packet wavelet transform of currents and voltages; theory of electrical circuits.

Main results of research: The paper proposes the idea of using the wavelet transform for frequency decomposition of currents and voltages of non-sinusoidal non-stationary modes of electrical networks. Based on the wavelet coefficients, it is proposed to calculate the active, reactive power and distortion power of non-sinusoidal modes.

Keywords: wavelet transform, Fourier transform, non-sinusoidal modes, higher harmonics, distortion power.

Введение

В системах электроснабжения наблюдается неуклонный рост доли электроприёмников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, что приводит к искажению синусоидальности формы кривой тока и напряжения. Допустимые уровни несинусоидальности напряжения регламентированы в России ГОСТ 32144-2013 величинами коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$ и суммарными коэффициентами гармонических искажений K_U . Проблема несинусоидальности напряжения стала характерна не только для систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем

составе частотные преобразователи, но также и для систем электроснабжения гражданских объектов и общественных учреждений. В работе [2] приведены статистические данные по измерениям кондуктивных помех для предприятия нефтедобывающей отрасли, причиной которых является станция управления погружными электродвигателями «Электрон-05».

В работе [1] приводятся результаты измерения коэффициента суммарного гармонического искажения K_U (THD) и коэффициентов n -ных гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ при работе частотно-регулируемого электропривода насосов котельных при условии питания от централизованной системы электроснабжения и для случая питания от дизель-генератора (рисунок 1 – привод. по [1, с. 143]).

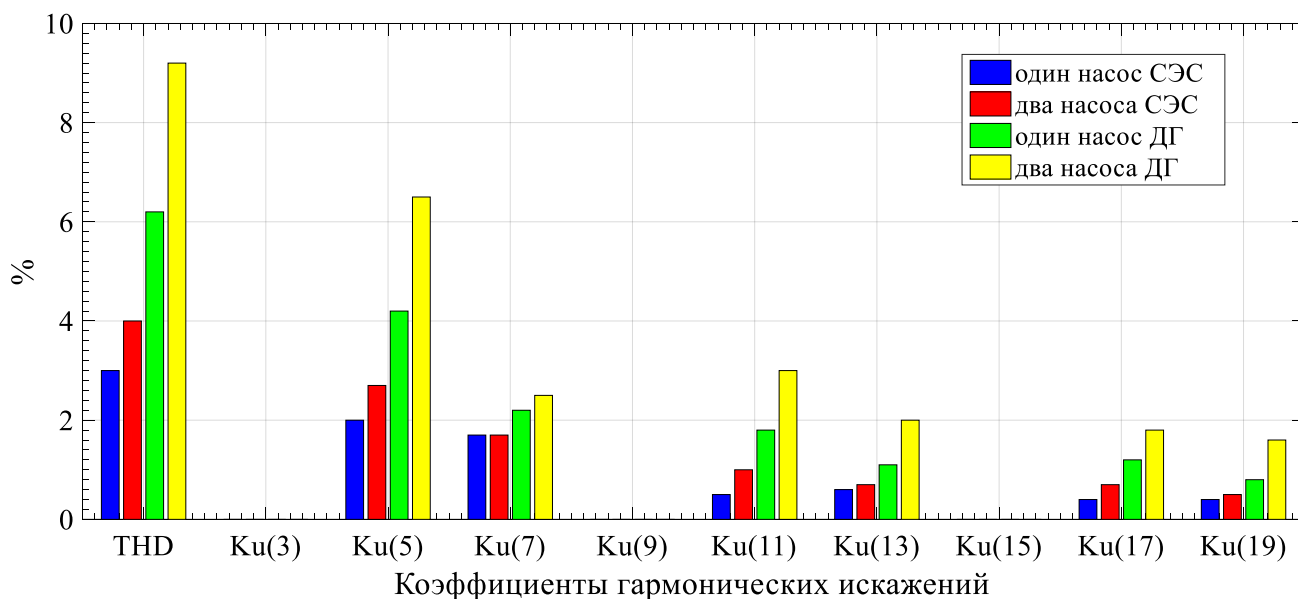


Рисунок 1 – Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих и коэффициентов n -ных гармонических составляющих для напряжения при питании от централизованной СЭС и ДГ (привод. по [1, с. 143])

Моделирование, расчет и анализ несинусоидальных процессов остаются актуальными задачами с точки зрения обеспечения показателей качества электроэнергии, сокращения потерь мощности и энергии, снижения вероятности преждевременного выхода из строя оборудования и повреждения изоляции.

Результаты и обсуждение

Активная мощность для несинусоидальных режимов, как известно, будет определяться суммой мощностей высших гармоник. Применяя преобразование Фурье для определения амплитуд отдельных гармоник тока I_n и напряжения U_n для нестационарных несинусоидальных режимов, неизбежно возникает «эффект растекания спектра». Частично нивелировать негативные последствия эффекта растекания спектра позволяет применение оконного преобразования Фурье. Недостатки быстрого преобразования Фурье (БПФ) при измерении электрических сигналов подробно рассмотрены в работе [3].

Применение вейвлет-преобразования позволяет получить информацию о сигнале в трехмерной интерпретации: амплитуда, время, частота. Вейвлет-преобразование успешно применено в работе [4] для анализа напряжения питающей сети промышленных судов и построения активных фильтров для повышения качества электроэнергии. Так, для сигнала тока, представленного на рисунке 2, в результате непрерывного вейвлет-преобразования получаем исчерпывающую информацию об амплитудно-частотных особенностях сигнала с четким разрешением по времени.

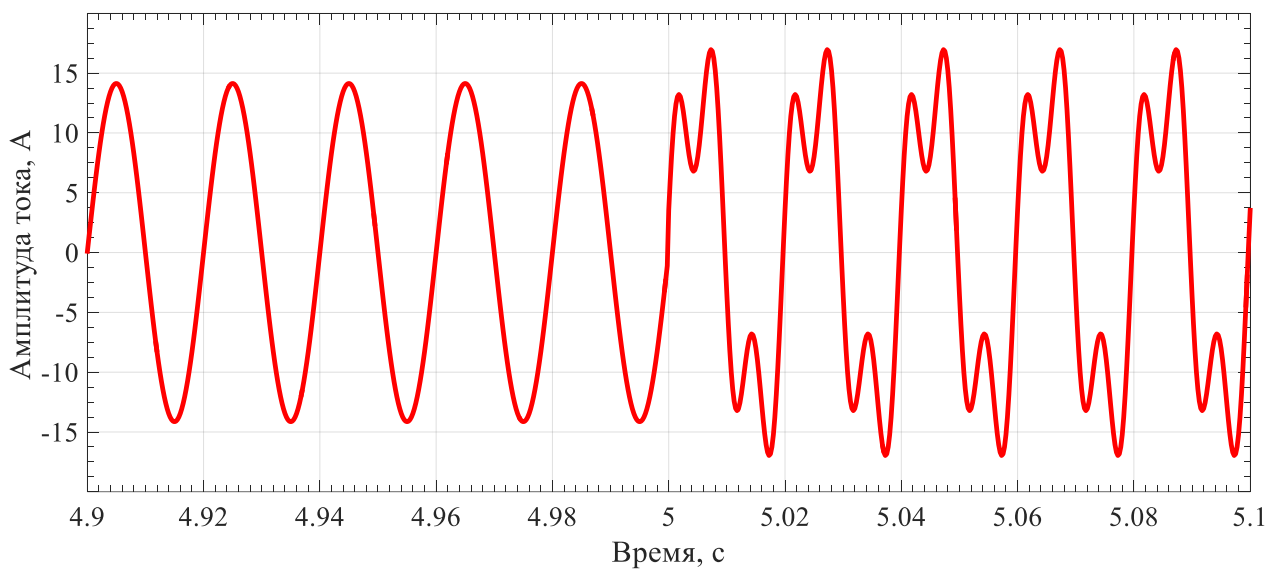


Рисунок 2 – Несинусоидальный нестационарный сигнал тока $i(t)$

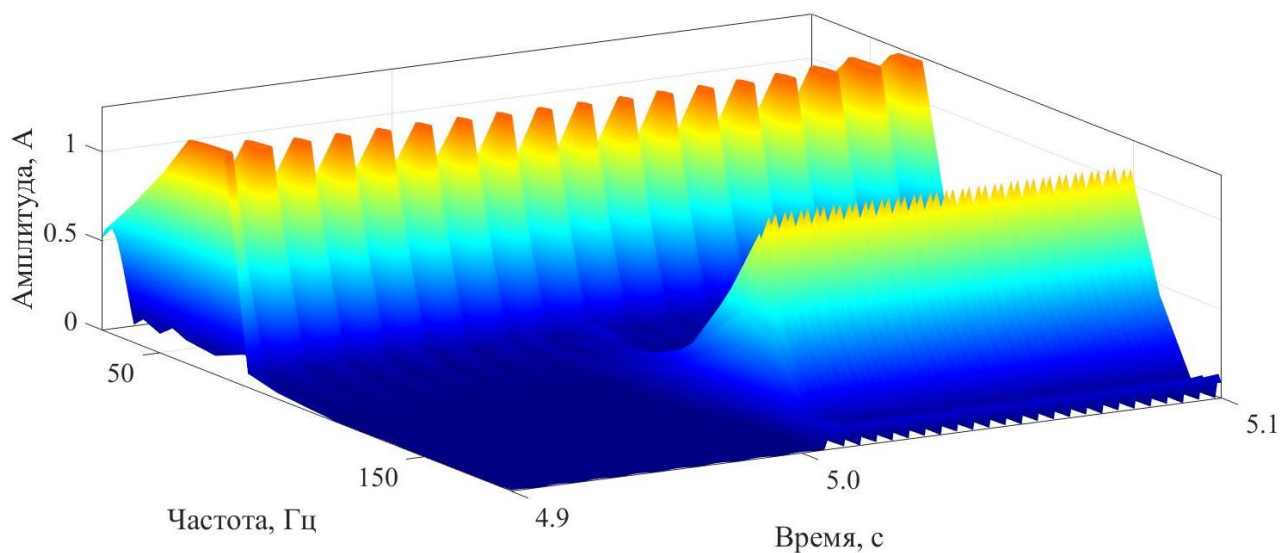


Рисунок 3 – Результат непрерывного вейвлет-преобразования тока $i(t)$, представленного на рисунке 2

Для ряда задач электроэнергетики наиболее перспективным является пакетное вейвлет-преобразование. Результат пакетного вейвлет-преобразования сигнала тока $i(t)$ представлен на рисунке 4.

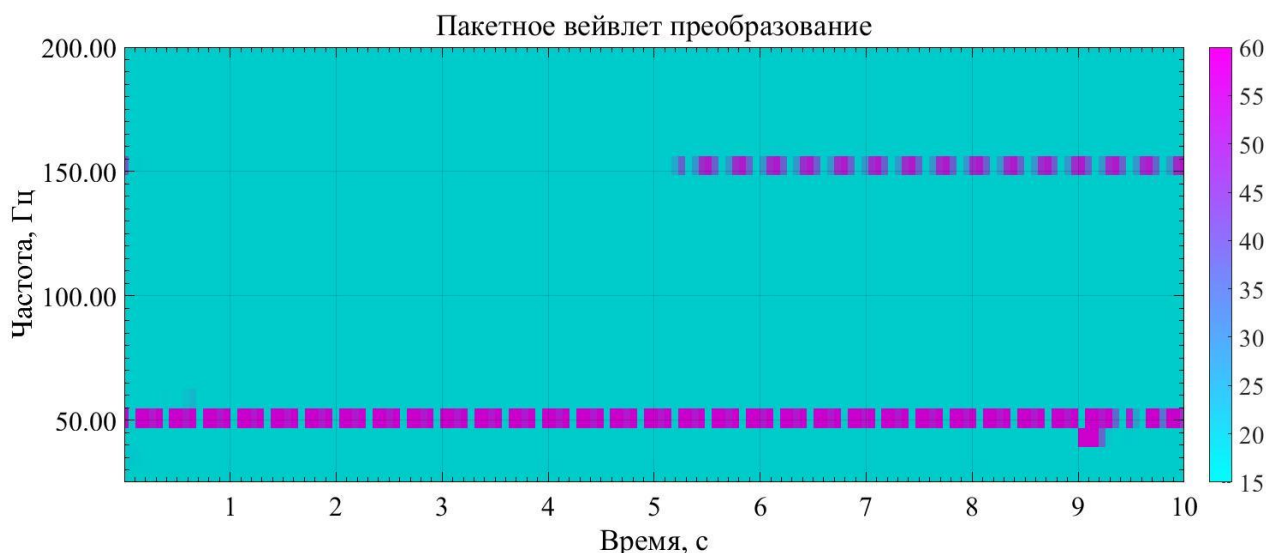


Рисунок 4 – Результат пакетного вейвлет-преобразования тока $i(t)$, представленного на рисунке 2

Ток и напряжение могут быть представлены вейвлет-коэффициентами в соответствии с формулами:

$$i(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) \cdot \psi(t), \quad (1)$$

$$u(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \cdot \psi(t), \quad (2)$$

где $\psi(t)$ – вейвлет-функция;

j – заданная глубина разложения (уровень разложения);

m – порядковый номер узла дерева разложения для уровня j ;

n – количество элементов (вейвлет-коэффициентов) в заданном узле m .

Тогда активная мощность высших гармоник также может быть определена через произведение отдельных вейвлет-коэффициентов, отвечающих за соответствующие частотные диапазоны:

$$P_{j,m} = \frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right) \quad (3)$$

Численный эксперимент будет проводиться для электрической сети 110/35/6 кВ, представленной на рисунке 5.

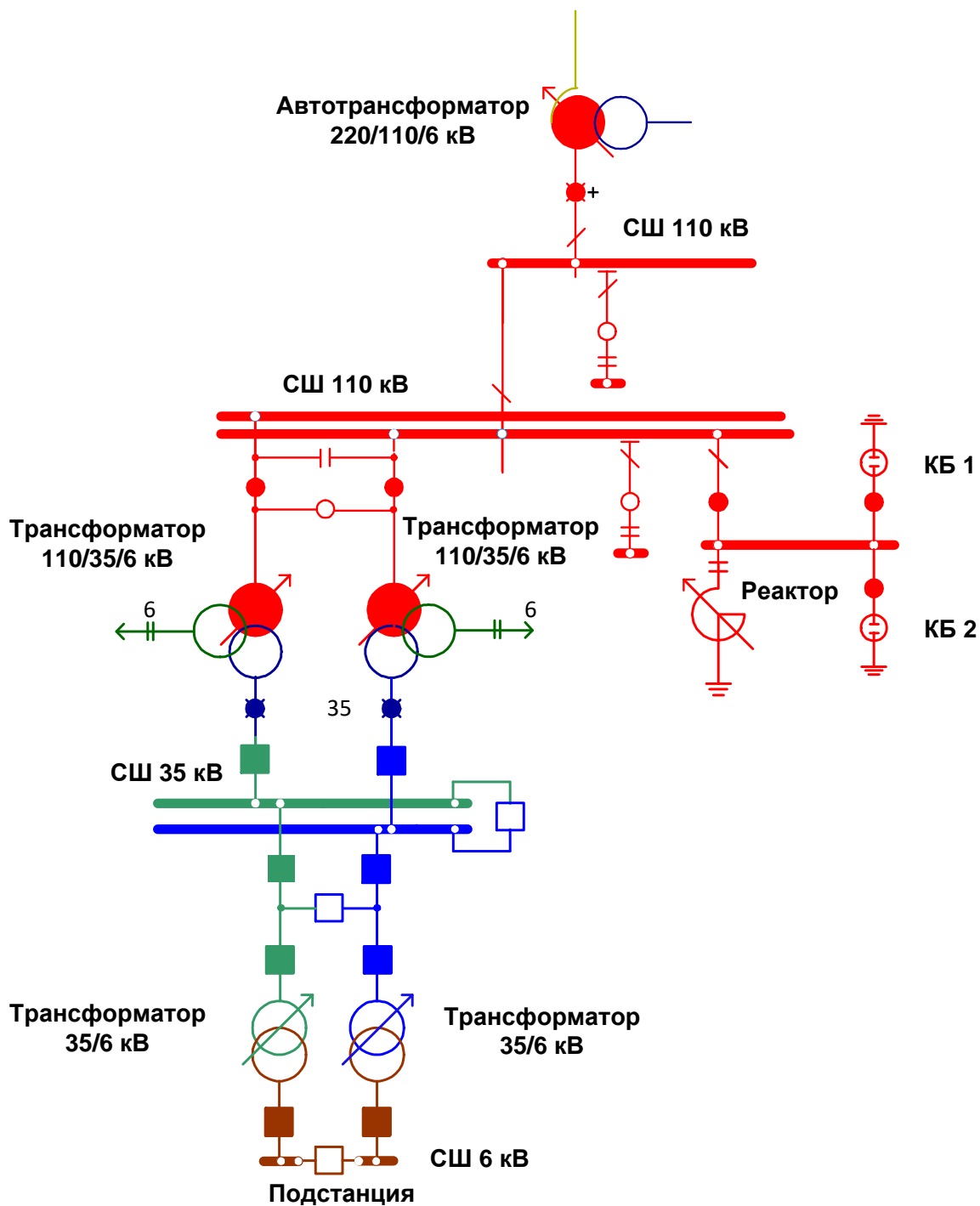


Рисунок 5 – Исследуемая электроэнергетическая система

Имитационное моделирование режимов электрической сети 110/35/6 кВ произведем в среде моделирования Matlab Simulink (рисунок 6). Нелинейная нагрузка, являющаяся источником высших гармоник, представлена на стороне 6 кВ.

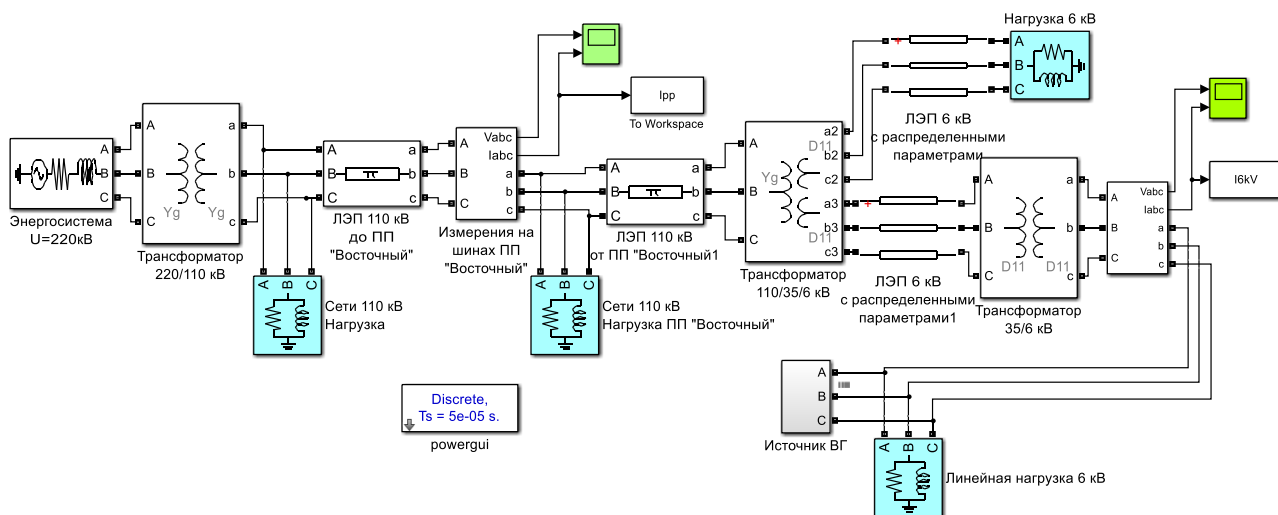


Рисунок 6 – Имитационная модель электроэнергетической системы

С помощью имитационного моделирования получена осциллограмма тока нагрузки (рисунок 7).

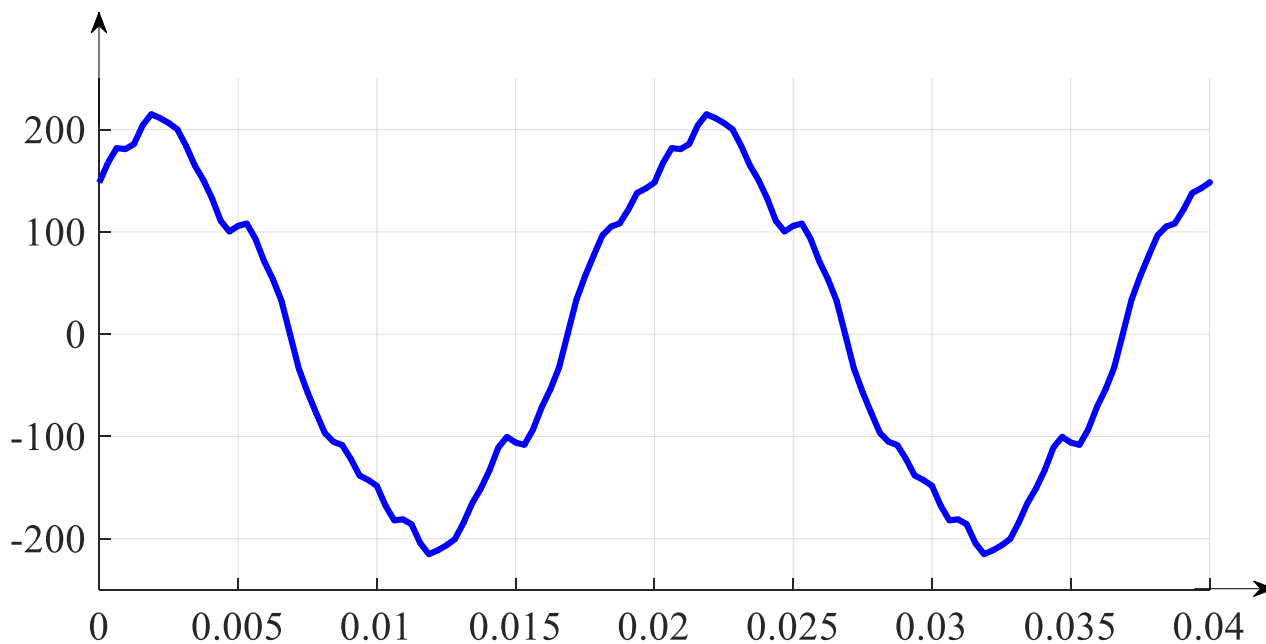


Рисунок 7 – Осциллограмма тока

Для расчета уровней токов высших гармоник, а также значений активной и реактивной мощности несинусоидального режима следует произвести пакетное вейвлет-разложение сигнала тока и напряжения до глубины 4 уровня в соответствии с деревом вейвлет-разложения, представленным на рисунке 8.

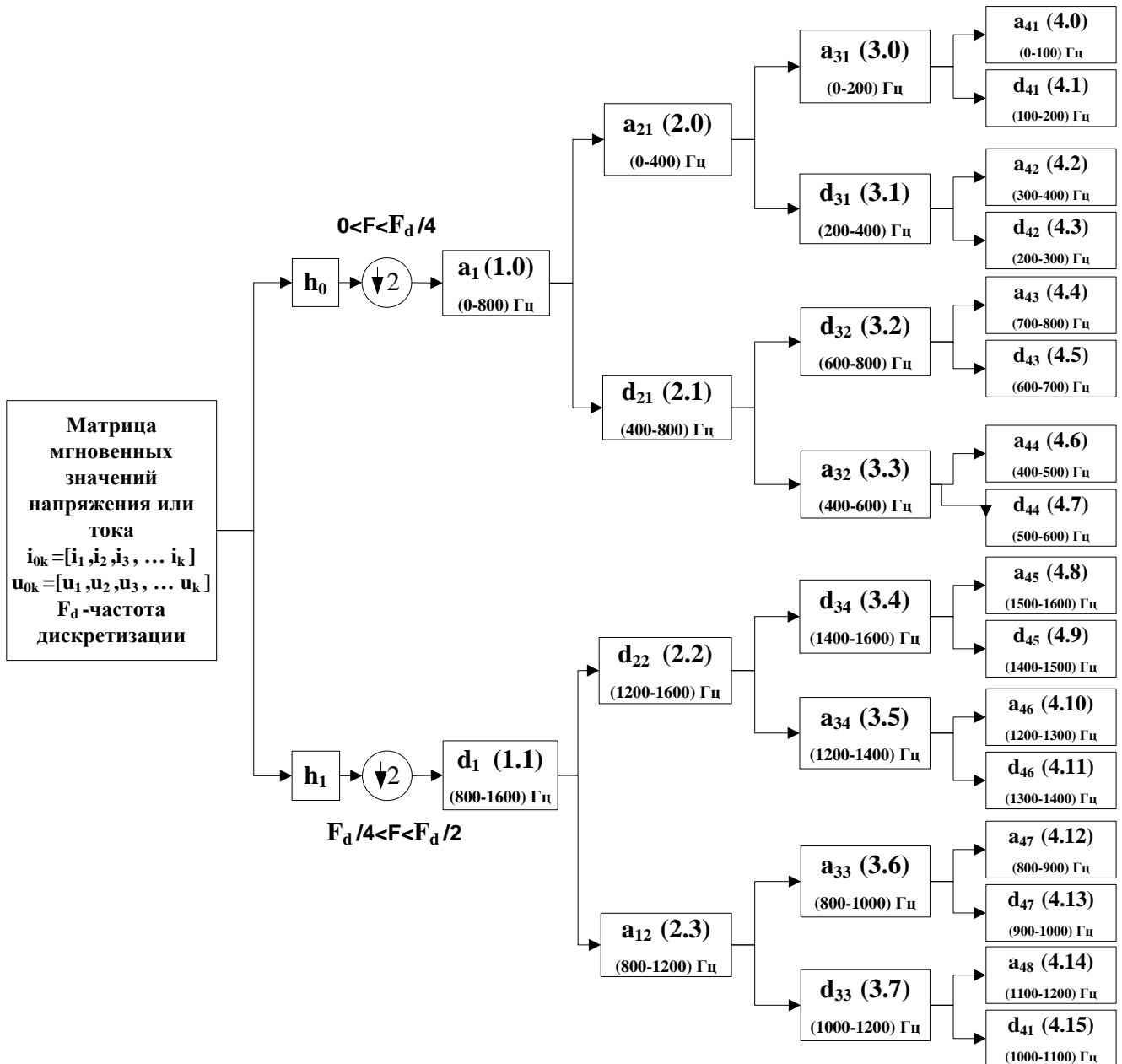


Рисунок 8 – Схема разложения тока методом пакетного вейвлет-преобразования

Для определения величины реактивной мощности несинусоидальных режимов существует ряд различных подходов. В настоящей работе не ставится задача оспаривать правомерность той или иной теории или подхода. В качестве расчетной модели примем теорию реактивной мощности по Фризе:

$$Q = UI_r = \sqrt{U^2 I^2 - U^2 I_a^2}. \quad (4)$$

Авторы работ [5, 6] также занимаются исследованиями реактивной мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения. В работе [7] для расчета реактивной мощности на ВГ предложено применение ВП.

Активная проводимость исследуемой ветви через вейвлет-коэффициенты будет определяться по формуле:

$$g = \frac{P_{j,m}}{(U_{j,m})^2} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \quad (5)$$

Активная составляющая полного тока может быть определена по следующему выражению:

$$i_a = g u_{j,m} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \cdot \frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \quad (6)$$

Действующее значение активного тока для каждой гармоники определяется исходя из соответствующих данному частотному диапазону коэффициентов:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_a^2(k)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)} \quad (7)$$

Коэффициент искажения синусоидальности:

$$K_u = \frac{I_{(v)}}{I_{(50)}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^{k_m} (i_{j,k}^D)^2}{\sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^A)^2 + \sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^D)^2}} \quad (8)$$

Таблица 1

Результаты расчета с помощью разработанной методики

Параметр	Номер гармоники	Фактическое значение	Значение, вычисленное через вейвлет-коэффициенты
Активная составляющая тока I_a , А	1	402,3	402,2
	5	68,4	69,1
	7	42,1	43,1
Активная мощность P , Вт	1	4 386	4 380
	5	746	752
	7	459	463
Реактивная мощность и мощность искажения	1	3 156	3 158
	5	560	559
	7	362	360

Результаты имитационного моделирования и численного расчета подтверждают корректность предложенной методики.

Заключение и выводы

Разработана имитационная модель для анализа несинусоидальных нестационарных режимов на основе теории вейвлет-преобразования. Разработана модель определения активной мощности через вейвлет-коэффициенты. Представлен подход определения реактивной мощности и мощности искажения с помощью вейвлет-преобразования.

Результаты работы могут быть использованы электросетевыми компаниями для анализа коэффициентов гармонических искажений. Повышение точности расчета несинусоидальных

режимов позволит произвести более точную оценку технико-экономических показателей внедрения фильтро-компенсирующих устройств высших гармоник.

Литература

1. Артюхов, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении насосов частотно-регулируемым электроприводом / И. И. Артюхов, С. В. Молот. – Текст : непосредственный // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, №1 (26). – С. 138-144.

2. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, обусловленные несинусоидальностью напряжения, в электрической сети (0,4–2) кВ механизированной скважины по добыче нефти / В. Г. Сальников [и др.]. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 150-154.

3. Коровкин, Н. В. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений / Н. В. Коровкин, С. С. Грицутенко. – Текст : непосредственный // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2017. – № 2. – С. 73-86.

4. Кузнецов, С. Е. Построение активных фильтров подавления импульсных помех в сетях электропитания промышленных судов с применением вейвлет-анализа / С. Е. Кузнецов, Т. С. Горева, Н. Н. Портнягин. – Текст : непосредственный // Эксплуатация морского транспорта. – 2011. – № 3 (65). – С. 65-70.

5. Czarnecki, L. S. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage / L. S. Czarnecki, P. M. Haley // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 2. – pp. 513-521. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253.

6. León-Martínez, V. Formulations for the apparent and unbalanced power vectors in three-phase sinusoidal systems / V. León-Martínez, J. Montañana-Romeu // Electric power systems research. – 2018. – vol. 160, July. – pp. 37-43. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.01.028.

7. Wavelet-based reactive power and energy measurement in the presence of power quality disturbances / Morsi, W. G. [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – vol. 26, issue 3. – pp. 1263-1271. DOI: 10.1109/tpwrs.2010.2093545.