

## МОНИТОРИНГ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**Кривошеева Наталия Юрьевна**  
лаборант,  
Югорский государственный университет,  
Россия, Ханты-Мансийск  
E-mail: Natalia.krivoscheeva2015@yandex.ru

**Осипов Дмитрий Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Югорский государственный университет,  
Россия, Ханты-Мансийск  
E-mail: d\_osipov@ugrasu.ru

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Лаборатория искусственного интеллекта электроэнергетических систем», код темы: FENG-2024-0007).*

В работе представлена имитационная модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой, работающей в нестационарном режиме. Для анализа несинусоидального режима предложено использование пакетного вейвлет-преобразования. Вейвлет-преобразование имеет ряд преимуществ, что может быть использовано для внедрения в систему мониторинга показателей качества электроэнергии.

Предмет исследования: показатели качества электроэнергии.

Цель исследования: доказательство преимущества вейвлет-преобразования при анализе несинусоидальных нестационарных режимов.

Объект исследования: система электроснабжения напряжением до 1 кВ с нелинейными нагрузками, искажающими показатели качества электроэнергии.

Методы исследования: анализ, компьютерное моделирование.

Результаты работы: доказана перспективность применения вейвлет-преобразования для организации системы мониторинга показателей качества электроэнергии; показано отсутствие эффекта растекания спектра.

**Ключевые слова:** показатели качества электроэнергии, высшие гармоники, несинусоидальность, вейвлет-преобразование.

## MONITORING OF ELECTRICITY QUALITY INDICATORS USING WAVELET TRANSFORM

**Natalia Yu. Krivosheeva**  
Laboratory assistant,  
Yugra State University,  
Russia, Khanty-Mansiysk  
E-mail: Natalia.krivoscheeva2015@yandex.ru

**Dmitry S. Osipov**  
Doctor of Technical Science, Professor,  
Yugra State University,  
Russia, Khanty-Mansiysk  
E-mail: d\_osipov@ugrasu.ru

*The research has been conducted within the national assignment by the Ministry of Science and Higher Education in the Russian Federation (theme "Laboratory of Artificial Intelligence of Electric Power Systems", theme code: FENG-2024-0007).*

The paper presents a simulation model of an electric power supply system with a nonlinear load operating in a non-stationary mode. To analyze the non-sinusoidal mode, the use of a batch wavelet transform is proposed. The wavelet transform has a number of advantages, which can be used to implement electricity quality indicators into a monitoring system.

Subject of research: power quality indices.

Purpose of research: proof of the advantage of the wavelet transform in the analysis of non-sinusoidal non-stationary modes.

Object of research: a power supply system with a voltage of up to 1 kV with non-linear loads that distort the quality of electricity.

Methods of research: analysis, computer modelling.

Main results of research: the prospects of using the wavelet transform for the organization of a system for monitoring electricity quality indicators have been proved; the absence of the spectrum spreading effect is shown.

**Keywords:** power quality indicators, higher harmonics, non-sinusoidality, wavelet transform.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире электроэнергия является одним из основных ресурсов, обеспечивающих функционирование различных отраслей экономики и повседневной жизни людей. Однако качество электроэнергии (КЭ) может существенно влиять на стабильность работы электрооборудования, надёжность электроснабжения и экономические показатели предприятий и потребителей. В связи с выходом приказа Министерства энергетики Российской Федерации от 28 августа 2023 года № 690 «Об утверждении требований к качеству электрической энергии, в том числе распределению обязанностей по его обеспечению между субъектами электроэнергетики

и потребителями электрической энергии» возникает необходимость разработки математических моделей для реализации мониторинга показателей качества электроэнергии (ПКЭ) при нестационарных режимах электроэнергетических систем.

Мониторинг ПКЭ необходим для обеспечения стабильной и надёжной работы электрооборудования, соблюдения требований законодательства, предотвращения экономических потерь и поддержания высокого уровня электроснабжения.

1. Соблюдение требований законодательства. В соответствии со статьей 542 Гражданского кодекса РФ потребители имеют право на получение качественной электроэнергии. Мониторинг позволяет контролировать

соблюдение этого права и предотвращать возможные нарушения со стороны поставщика электроэнергии.

2. Выявление отклонений от нормативов. Мониторинг ПКЭ помогает своевременно выявлять отклонения от установленных норм и стандартов, что может привести к серьёзным проблемам, таким как поломки оборудования и аварии.

3. Разработка проектов модификации электросети. Мониторинг ПКЭ позволяет собирать данные о текущих показателях и параметрах электросети, что может быть использовано для разработки проектов модернизации и улучшения системы электроснабжения.

4. Определение причин ухудшения качества электроэнергии. Мониторинг позволяет выявить причины ухудшения качества электроэнергии, которые могут быть связаны с состоянием передающих сетей, проблемами поставщика электроэнергии или другими факторами.

5. Оценка экономического ущерба.

Искажение показателей качества электроэнергии в общем случае оказывает негативное влияние на электроприемники промышленных предприятий, гражданских и общественных зданий, медицинских учреждений [1]. Значительное увеличение доли частотно-регулируемого (ЧРП) привода в системах электроснабжения обусловило актуальность задачи обеспечения электромагнитной совместимости [2].

Существенные искажения ПКЭ возникают в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог [3]. Как отмечают авторы, «существует проблема пониженного качества электроэнергии по уровням гармонических искажений, создаваемых выпрямительно-инверторными агрегатами» [4, с. 51].

В работе [4] приведен анализ ПКЭ в системе электроснабжения горно-обогатительного

комбината, где основными источниками искажений синусоидальности формы кривой напряжения и тока являются коммутационные процессы в вентилях выпрямителей.

В действующих системах мониторинга ПКЭ широкое применение находит преобразование Фурье:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ix\omega} dx. \quad (1)$$

С целью устранения эффекта «растекания спектра» может быть применено оконное преобразование Фурье:

$$F(f, x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x-x_0)e^{-ix\omega} dx. \quad (2)$$

Для решения ряда научных и практических задач анализа нестационарных режимов электрических сетей, в том числе и ПКЭ, в последнее время находит широкое применение пакетное вейвлет-преобразование:

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t)\psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt. \quad (3)$$

Существенное практическое значение приобретает исследование амплитудно-частотных характеристик систем электроснабжения с нелинейными нагрузками при подключении фильтров подавления высших гармоник [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве исследуемой сети примем систему электроснабжения предприятия, питающегося от трансформатора ТМ 1000 10/0,4. Нелинейная нагрузка по одной из отходящих из ВРУ линий представлена трехфазными 6-пульсными выпрямителями и системой светодиодного освещения. Имитационная модель представлена на рисунке 1.

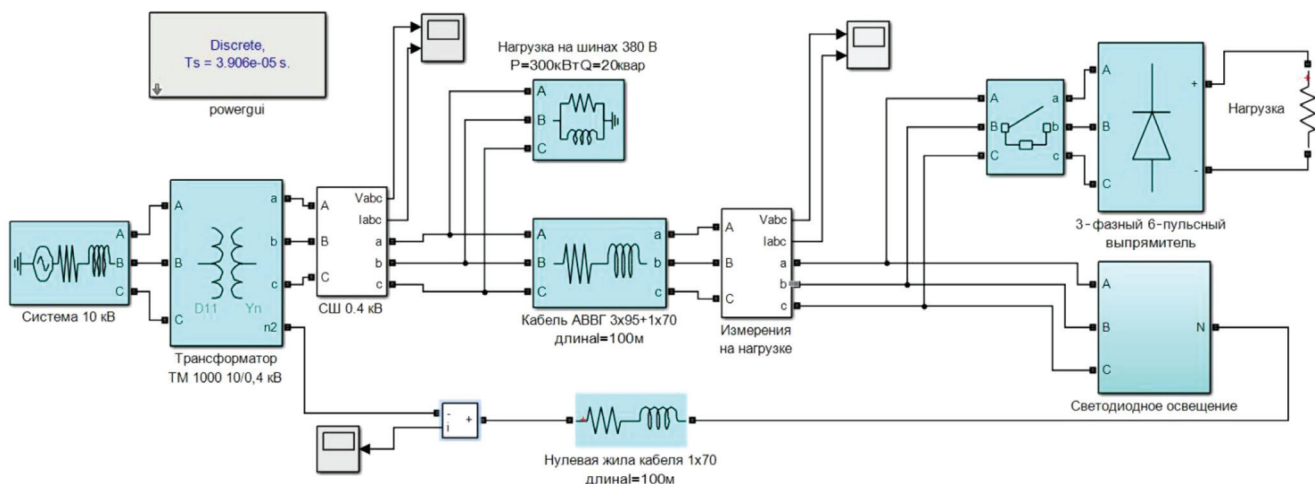
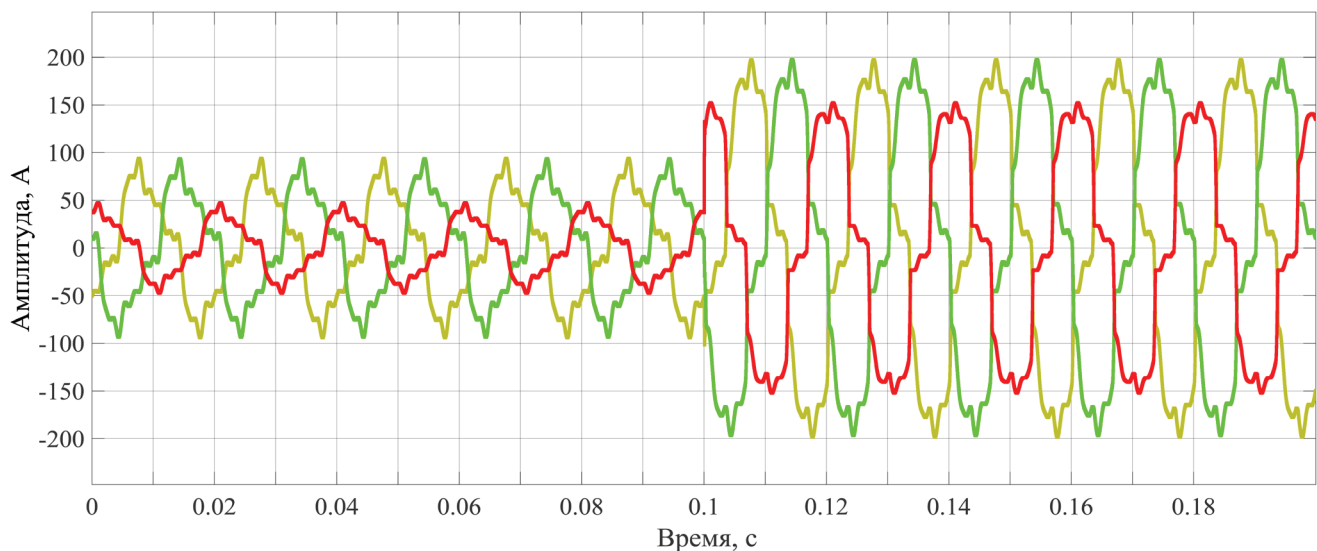


Рисунок 1. Имитационная модель для исследования несинусоидального режима в сети до 1 кВ



В результате имитационного моделирования был получен несинусоидальный

нестационарный режим с осциллограммами токов, представленными на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Результаты имитационного моделирования. Токи в кабельной линии

Для полученного фрагмента нестационарного несинусоидального сигнала проведем быстрое преобразование Фурье, используя Matlab. В результате, представленном на

рисунке 3, получаем характерный вид спектрального состава при наличии фактора – «эффект растекания спектра».



**Рисунок 3.** Результаты быстрого вейвлет-преобразования тока фазы

Проведем анализ полученных осциллограмм тока с помощью пакетного вейвлет-преобразования. Схема пакетного вейвлет-

преобразования для исходного сигнала с частотой дискретизации  $F_d=3,2$  кГц представлена на рисунке 4.



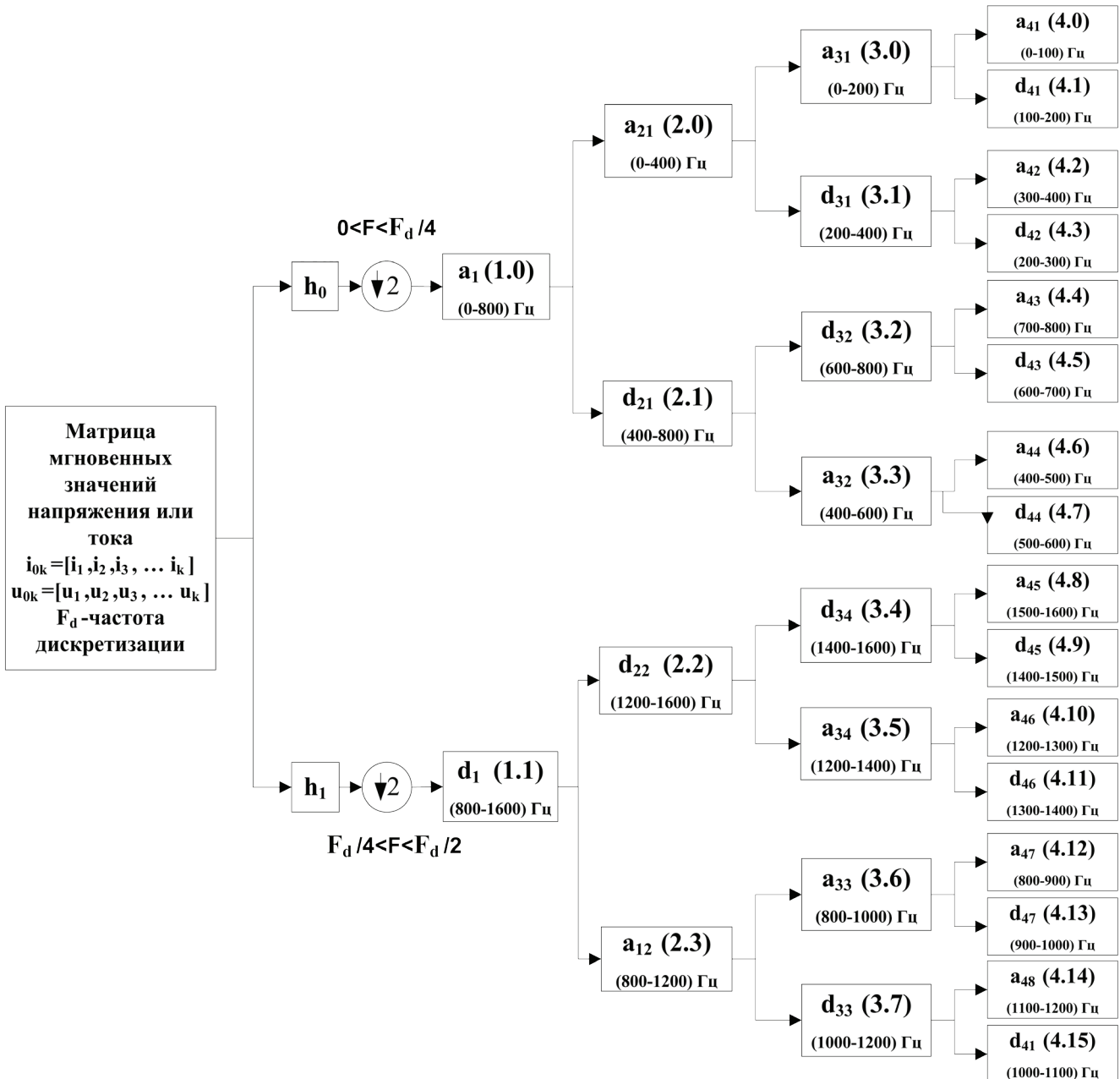


Рисунок 4. Схема пакетного вейвлет-преобразования для  $F_d=3,2$  кГц

Вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, использует специальные функции, называемые вейвлетами, которые обладают локализацией как во временной, так и в частотной области. Вейвлет-преобразование позволяет анализировать сигнал одновременно в разных масштабах времени и частоты, что делает его более гибким инструментом для анализа нестационарных и несинусоидальных сигналов. Можно выделить следующие достоинства и недостатки вейвлет-преобразования (по сравнению с преобразованием Фурье).

Достоинства вейвлет-преобразования:

- Локализация сигнала как во временной, так и в частотной области, что позволяет

анализировать сигнал одновременно в разных масштабах времени и частоты.

- Устойчивость к краевым эффектам и потерям информации о кратковременных изменениях сигнала.

- Подходит для анализа нестационарных сигналов.

Недостатки вейвлет-преобразования:

- Более сложная реализация и математический аппарат по сравнению с преобразованием Фурье.

- Трудности с интерпретацией результатов, особенно для сигналов с несколькими масштабами и частотными составляющими.

В общем случае частота дискретизации может быть увеличена (более 4 кГц)

в соответствии с теоремой Котельникова для анализа высших гармоник вплоть до сороковой.

В результате пакетного вейвлет-преобразования добиваемся локализации каждой частотной компоненты (гармоники или гармонической группы), при этом величины токов и напряжений могут быть представлены в виде суммы вейвлет-коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) \cdot \psi(t), \quad (4)$$

$$u(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \cdot \psi(k). \quad (5)$$

В результате реализации алгоритма вейвлет-разложения (в соответствии со схемой на рис. 4) получаем набор вейвлет-коэффициентов, отвечающих за соответствующую гармоническую группу (рис. 5–6).

Полученные вейвлет-коэффициенты могут быть использованы для расчета интегральных характеристик (расчета действующих значений токов, напряжений, расчета мощности) каждой гармоники в отдельности. Применяя свойства вейвлет-преобразования сжимать без существенной потери информации данные, полученные вейвлет-коэффициенты могут быть переданы системой мониторинга ПКЭ для дальнейшего хранения и обработки данных.

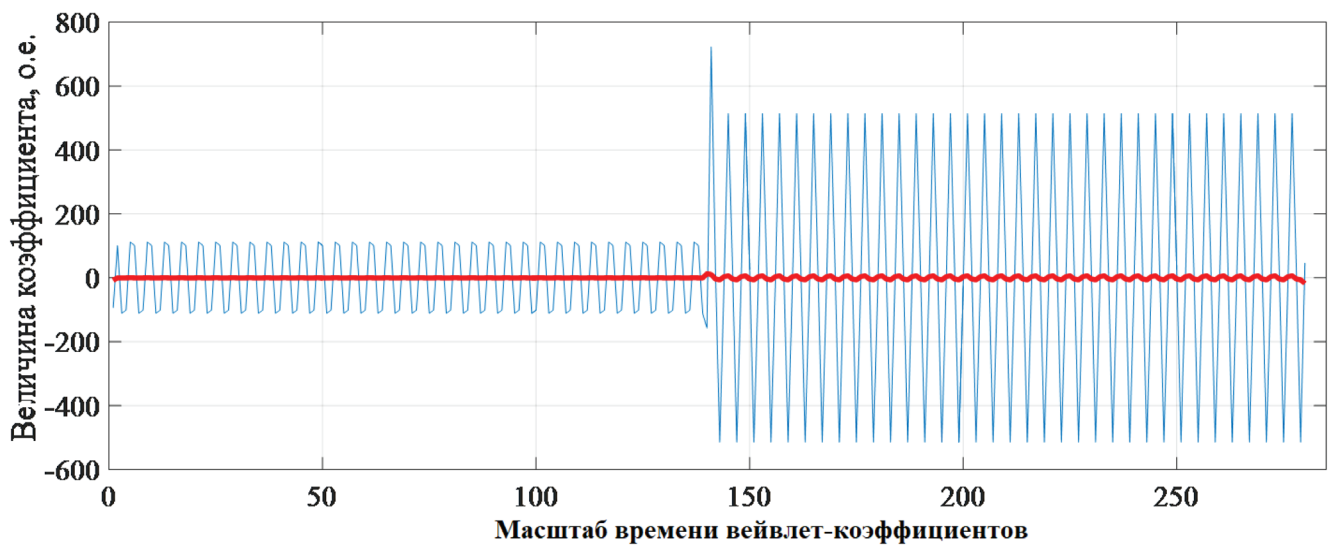


Рисунок 5. Вычисленные вейвлет-коэффициенты пакетного вейвлет-преобразования

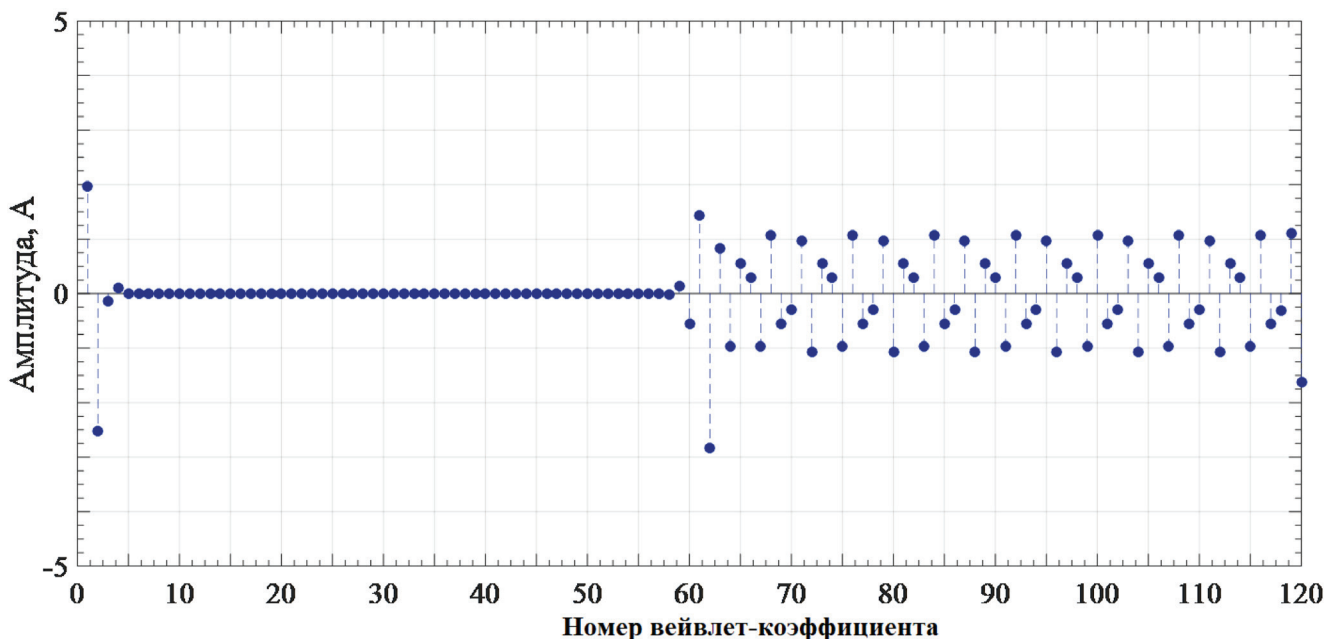


Рисунок 6. Вычисленные вейвлет-коэффициенты пакетного вейвлет-преобразования



В статье [6] приводится алгоритм расчета активной, реактивной и мощности искажения для несинусоидального режима электрической сети на основе вейвлет-преобразования. Предложенный в работе [6] метод позволяет определять уровни мощности на каждой гармонике в отдельности, что имеет существенное значение для технико-экономических расчетов при обосновании внедрения различных типов фильтрокомпенсирующих устройств [7].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По итогу исследования показано, что вейвлет-преобразование может быть использовано для организации системы мониторинга ПКЭ, поскольку обладает рядом преимуществ. Разработка системы мониторинга ПКЭ на основе вейвлет-преобразования является необходимым условием для обеспечения стабильного и надёжного функционирования электрооборудования, снижения экономических потерь и негативного воздействия на окружающую среду. Применение вейвлет-преобразования и других современных методов и инструментов позволяет получать объективные данные о качестве электроэнергии и разрабатывать эффективные меры по его улучшению, способствуя устойчивому развитию электроэнергетики и повышению экологической безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование воздействия нарушений качества электроэнергии на функционирование специализированного электротехнического оборудования в медицинском учреждении / Р. Н. Хайруллин, С. Ю. Шигаев, Л. Н. Мухамедьяров [и др.] // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 3. – С. 41–53. – DOI 10.34831/EP.2024.63.60.006.
2. Янченко, С. А. Обеспечение электромагнитной совместимости в сетях с частотно-регулируемыми приводами / С. А. Янченко, К. Ф. Шарафеддин, С. А. Цырук // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 5. – С. 43–49. – DOI 10.34831/EP.2024.11.35.006.
3. Уменьшение гармонических искажений в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог постоянного тока / А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. В. Черепанов, К. Х. Нгуен // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 4. – С. 51–57. – DOI 10.34831/EP.2024.77.35.007.
4. Костин, В. Н. Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения горно-обогатительного комбината с мощной нелинейной нагрузкой / В. Н. Костин, Ю. А. Сычев, В. А. Сериков // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 5. – С. 50–57. – DOI 10.34831/EP.2024.79.14.007.
5. Оценка влияния активно-емкостного пассивного фильтра на амплитудно-частотные характеристики промышленной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных явлениях / Ю. А. Сычев, В. А. Сериков, В. Н. Костин, А. А. Коржев // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 1. – С. 46–55. – DOI 10.34831/EP.2024.37.84.006.
6. Осипов, Д. С. Анализ несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей на основе вейвлет-преобразования / Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих, Е. А. Дюба // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2023. – № 3. – С. 117–126. – DOI 10.18822/byusu202303117-126.
7. Антонов, А. И. Применение активных и пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для снижения негативных воздействий гармонических искажений / А. И. Антонов, Д. Ю. Руди // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 118–125. – DOI 10.18822/byusu202401118-125.