

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 004.021

### Методика поиска паттернов в сигналах изменения электрического тока на основе корреляционного анализа

И.О. Дудинов, А.Д. Лукьянов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

Предложена методика, основанная на корреляционном анализе сигналов для поиска паттернов в данных изменения величины электрического тока в сети питания помещения при помощи системы мониторинга на базе микроконтроллера ESP-01. В рамках развития цифровой парадигмы в области электроэнергетики предлагается возможность идентификации моментов подключения к сети питания, а также отключения дополнительной нагрузки в качестве результатов исследования. Обработка экспериментальных данных проводилась при помощи пакетов прикладных программ Matlab R2020b.

**Ключевые слова:** электрический ток, система сбора данных, паттерны, корреляционный анализ, мониторинг работы электрооборудования, Matlab

**Для цитирования.** Дудинов И.О., Лукьянов А.Д. Методика поиска паттернов в сигналах изменения электрического тока на основе корреляционного анализа. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(1):31–35.

### Methodology of Pattern Search in Electric Current Change Signals Based on Correlation Analysis

Ilya O. Dudinov, Alexander D. Lukyanov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The methodology based on signal correlation analysis has been proposed for searching the patterns across the data on electric current magnitude change in a power supply network of a room using the ESP-01 microcontroller-based monitoring system. Within development of a digital paradigm in electric power engineering, the possibility of identifying the moments of connection to the power supply network, as well as disconnection of additional load, have been proposed as the result of the study. Experimental data were processed using Matlab R2020b software packages.

**Keywords:** electric current, data acquisition system, patterns, correlation analysis, electrical equipment monitoring, Matlab

**For Citation.** Dudinov IO, Lukyanov AD. Methodology of Pattern Search in Electric Current Change Signals Based on Correlation Analysis. *Young Researcher of Don*. 2025;10(1):31–35.

**Введение.** В настоящее время идет активное развитие цифровых технологий для создания так называемых «цифровых двойников» электроэнергетических систем с целью их применения в электрических системах низкого и среднего уровня напряжений [1]. Согласно [2], цифровизация в области электроэнергетики является одним из важнейших аспектов как в отечественной, так и в зарубежной науке. На основании Указа Президента Российской Федерации были сформированы концепции проведения «Цифровой трансформации» электросетевого комплекса страны [3]. Кроме того, в 2019 году была утверждена программа «Цифровая трансформация электроэнергетики России», что обеспечило появление новой парадигмы развития электроэнергетических систем [4]. В соответствующих компаниях на территории Российской Федерации проводятся мероприятия по оснащению распределительных сетей низкого напряжения современными приборами учета с возможностью дальнейшего создания автоматизированных информационно-измерительных систем мониторинга, контроля и учета электроэнергии [2].

Согласно [1], на сегодняшний день «цифровизации» подвергнута малая часть общей энергосистемы, включающая в себя в основном межсистемные связи и другие крупные узлы высокого напряжения, например, 220 кВ и выше. При этом разработка и применение «цифровых двойников» в системах напряжений низкого и среднего уровня остается трудно реализуемой задачей из-за высокой стоимости подобных комплексов [5]. Таким образом, научные исследования в области мониторинга работы электрооборудования являются достаточно актуальными и востребованными в научном сообществе. Целью данного исследования является формирование методики анализа получаемых данных изменения электрического тока в сети питания помещения при помощи системы мониторинга на базе микроконтроллера ESP-01. В качестве результатов предполагается возможность идентификации моментов подключения к сети питания дополнительной нагрузки, а также нахождения моментов ее отключения по окончании работы.

**Основная часть.** Под термином «паттерн» или «образец» понимаются шаблонные (закономерные) изменения величины потребляемой электрической мощности во времени [6–8]. Математические основы теории паттернов, которые на сегодняшний день активно применяются при решении задач распознавания образов, были заложены американским математиком шведского происхождения Ульфом Гренандером в 1993 году [9], а варианты использования в системе диагностики промышленного оборудования можно увидеть, например, в [10].

Получаемые паттерны предлагается использовать для мониторинга работы электрооборудования, а именно для нахождения интервалов времени активной работы подключаемых устройств. В теории цифровой обработки сигналов наряду со спектральным анализом особое внимание уделяется также корреляционному анализу [11]. Для формирования методики мониторинга предлагается использовать взаимную корреляционную функцию, которая позволяет количественно оценить степень сходства между шаблонным сигналом и фактическими данными изменения электрического тока, сдвинутыми во времени относительно друг друга. Ниже приведен общий вид взаимной корреляционной функции, которая представляет собой интеграл от произведения двух сигналов  $s_1$  и  $s_2$  в бесконечных пределах [11]:

$$B_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  — исходный сигнал изменения электрического тока в сети питания и полученный сигнал усредненного паттерна тока соответственно.

Для достижения поставленной цели возникает потребность в разработке специализированной системы сбора данных, способной длительное время передавать данные о параметрах электрической энергии в точке установки датчиковой аппаратуры. Для этого предлагается использовать систему сбора данных, разработанную на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (рис. 1 а). Вычислительным ядром всей системы выступает микроконтроллер ESP-01 производства китайской компании «Espressif Systems». Преимуществами этого микроконтроллера являются относительная дешевизна и наличие встроенного протокола беспроводной передачи данных по сети Wi-Fi. В качестве измерительного узла применяется неинвазивный датчик переменного тока SCT-013-030, работающий по принципу понижающего трансформатора (рис. 1 б). Система сбора данных выполняет измерения величин электрического тока и мощности каждые две секунды с последующей их передачей на облачный сервер.



Рис. 1. Система мониторинга работы электрооборудования в помещении:

а — внешний вид системы; б — способ подключения датчика переменного тока в сеть питания

По результатам визуализации данных изменения величины электрического тока в сети питания, собранных за несколько часов 26.10.2024 (рис. 2 а) и 31.10.2024 (рис. 2 б), можно заметить моменты подключения и отключения различной нагрузки, что объясняется скачками потребляемой мощности в сети электропитания, образующих исследуемые паттерны. При этом в результате обработки экспериментальных данных получены усредненные шаблоны сигналов изменения тока для конкретно этой электрической нагрузки (рис. 2 в и г).

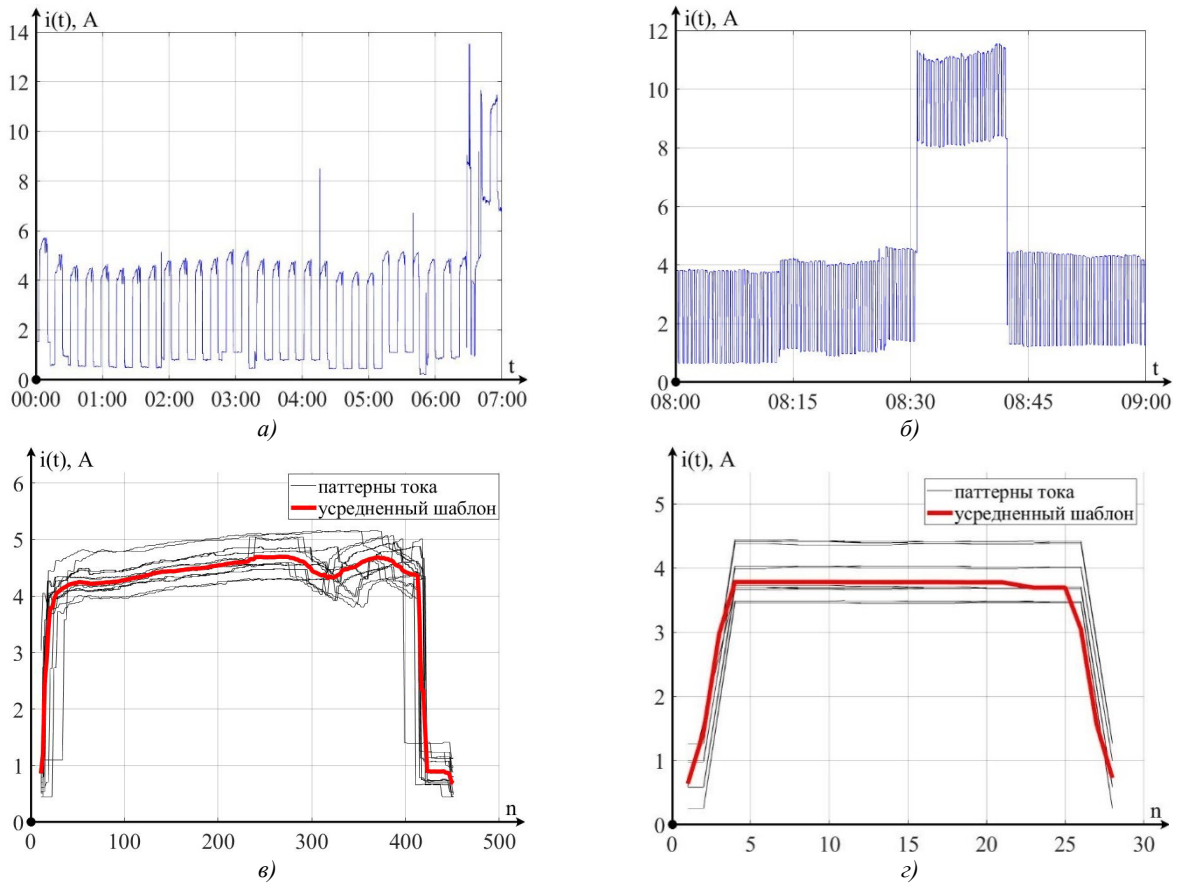
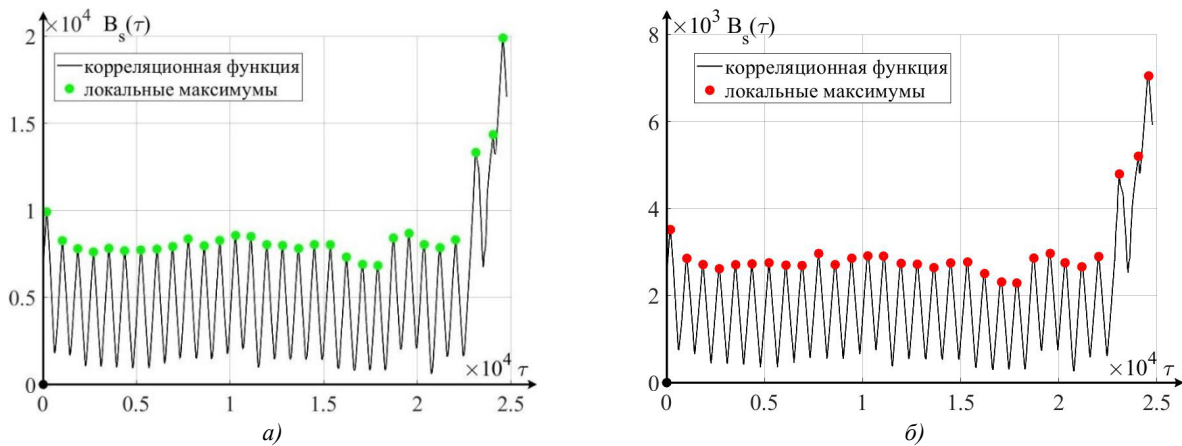


Рис. 2. Измеренные данные: а, б — сигналы изменения величины электрического тока в сети питания за 26.10.2024 и 31.10.2024 соответственно; в, г — паттерны тока за 26.10.2024 и 31.10.2024 соответственно

Согласно [11], чем больше значение корреляционной функции  $B_s$ , тем выше степень сходства между сигналами при их текущем взаиморасположении (значении величины сдвига  $\tau$ ). Так на рис. 3 представлены полученные в соответствии с уравнением 1 взаимные корреляционные функции сигналов изменения электрического тока и найденных паттернов тока, где локальные максимумы соответствуют величине сдвига, при которой достигается максимальное соответствие между сигналами. При этом зелеными точками (рис. 3 а и в) обозначены локальные максимумы, соответствующие величинам сдвига  $\tau$ , при которых идентифицированы моменты подключения электроприборов, а красными точками (рис. 3 б и г) соответственно моменты отключения устройств. Для наглядности на рис. 4 представлена графическая интерпретация найденных моментов времени подключения и отключения электрооборудования.



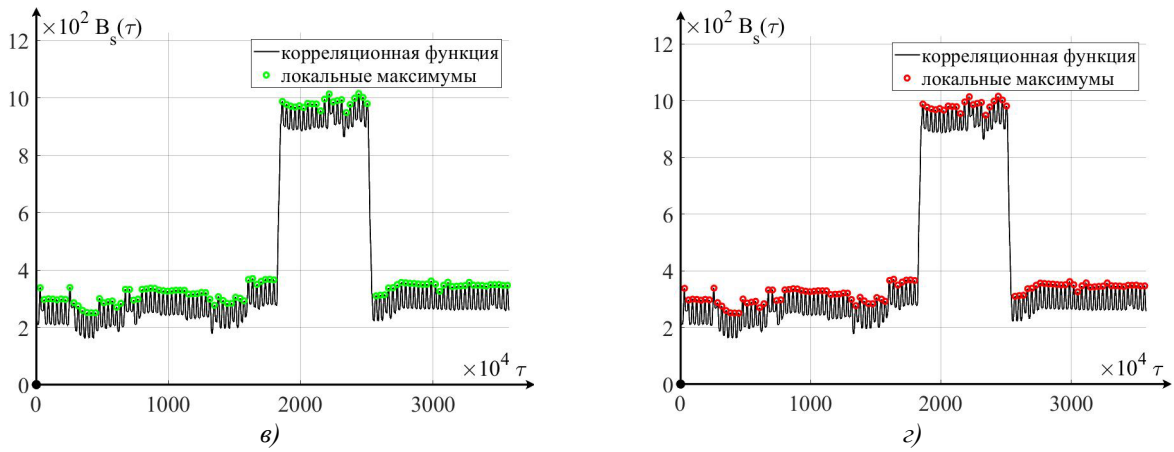


Рис. 3. Взаимные корреляционные функции сигналов изменения электрического тока и найденных паттернов тока для поиска моментов подключения и отключения устройств:  
*a, б* — данные за 26.10.2024; *в, з* — данные за 31.10.2024

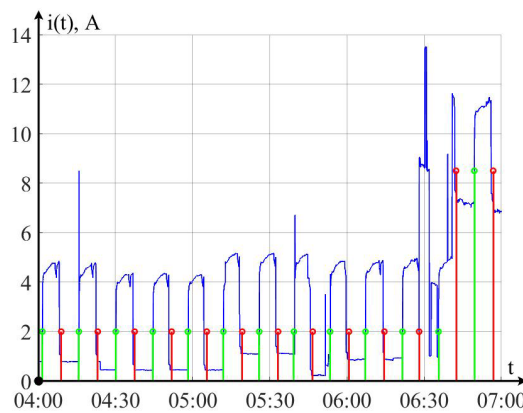


Рис. 4. Найденные моменты подключения и отключения электрооборудования в сигнале, записанном 26.10.2024

Кроме того, на рис. 5 демонстрируются результаты обработки, позволяющие «вырезать» найденные паттерны сигналов из исходных данных с целью дальнейшего анализа и возможного поиска новых паттернов в случае работы нескольких устройств одновременно.

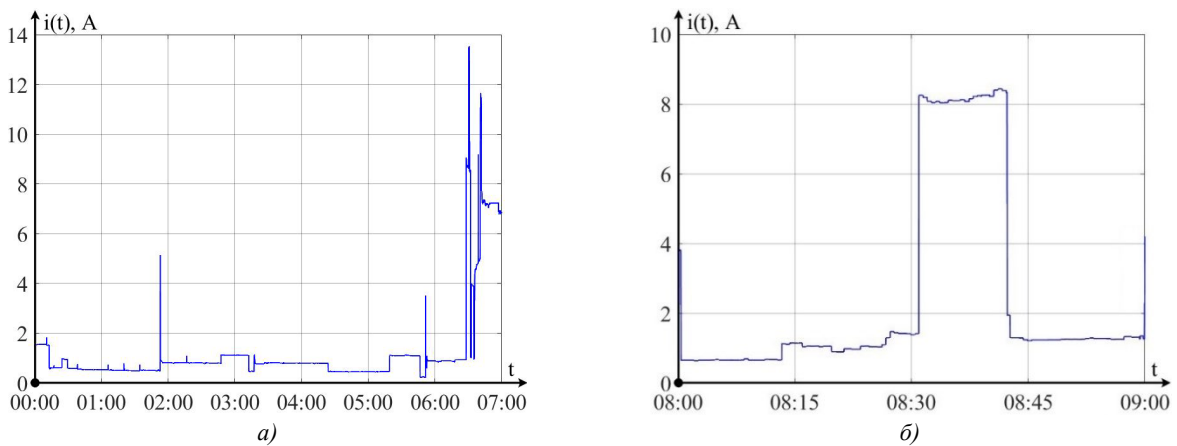


Рис. 5. Результаты обработки исходным данных посредством «вырезания» найденных паттернов тока:  
*a* — данные за 26.10.2024; *б* — данные за 31.10.2024

Исходя из полученных результатов, можно судить об адекватности предлагаемой авторами методики обработки и анализа данных изменения параметров электрической сети с целью мониторинга работы электрооборудования.

**Заключение.** В результате выполненного исследования в рамках развития цифровой парадигмы в области электроэнергетики представлена методика, основанная на корреляционном анализе сигналов, для поиска паттернов в экспериментальных данных изменения электрического тока, получаемых при помощи системы мониторинга параметров электрической энергии в сети питания. Предлагаемый способ обработки и анализа данных



предоставляет возможность идентификации моментов подключения к сети питания, а также отключения, дополнительной нагрузки. Графическая интерпретация получаемых в процессе эксперимента результатов позволяет убедиться в адекватности предлагаемой авторами методики.

### Список литературы

1. Казымов И.М., Компанец Б.С., Дробязко О.Н. Разработка устройства для контроля параметров электрической энергии в распределительной сети. *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2021;7(3):106–119. <http://doi.org/10.17816/transsyst202173106-119>
2. Казымов И.М., Компанец Б.С., Дробязко О.Н. Разработка системы контроля параметров электрической энергии в распределительной сети. *Транспортные системы и технологии*. 2021;7(2):106–118. <http://doi.org/10.17816/transsyst202172106-118>
3. *О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года*. Указ Президента Российской Федерации №204 от 7 мая 2018 г. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 18.01.2025).
4. Рогалева Н.Д. *Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития*. Москва: Издательство МЭИ; 2019. 300 с. URL: [http://ntsees.ru/sites/default/files/cifrovaya\\_energetika\\_blok.pdf](http://ntsees.ru/sites/default/files/cifrovaya_energetika_blok.pdf) (дата обращения: 18.01.2025).
5. Henriques NO, Correa Mestrando RLS. Use of Smart Grids to Monitor Technical Losses to Improve Non-Technical Losses Estimation. In: *Proceedings of the Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), May 12–16*. Niteroi, Brazil: IEEE; 2018. P. 1–6. <http://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395924>
6. Алескерев Ф.Т., Белоусова В.Ю., Егорова Л.Г., Миркин Б.Г. Анализ паттернов в статике и динамике. Часть 1: Обзор литературы и уточнение понятия. *Бизнес-информатика*. 2013;3(25):3–18. URL: [https://bijournal.hse.ru/2013--3\(25\).html](https://bijournal.hse.ru/2013--3(25).html) (дата обращения: 18.01.2025).
7. Алескерев Ф.Т., Гохберг Л.М., Егорова Л.Г., Мячин А.Л., Сагиева Г.С. *Анализ данных науки, образования и инновационной деятельности с использованием методов анализа паттернов*. Нац. исслед. ун-т «Высшая школа математики». Москва: Изд. Дом Высшей школы математики; 2012. 72 с.
8. Дудинов И.О. *Применение нейронной сети в задаче нахождения паттернов в последовательностях сигналов потребления электрической мощности*. В: Материалах Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». Том XIV. Москва: ООО «ЕВРОАЗИАТСКАЯ НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА», 2023. С. 87–89.
9. Коваленко П.П., Мусалимов П.П. Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011;54(1):38–45.
10. Lukyanov AD, Vernezi MA, Katin OI, Dolgov VV, Zimovnov IA, Studennikova SG. Development of Methods for Analyzing Patterns of Current Consumption in a System for Wireless Monitoring the Effectiveness of Metalworking Production. In: *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Science; 2020. 900 012017. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012017>
11. Сергиенко А. *Цифровая обработка сигналов*. 3-е изд. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2011. 768 с.

### Об авторах:

**Илья Олегович Дудинов**, аспирант кафедры автоматизации производственных процессов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ilya.sandman@yandex.ru](mailto:ilya.sandman@yandex.ru)

**Александр Дмитриевич Лукьянов**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [lex1998@rambler.ru](mailto:lex1998@rambler.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

### About the Authors:

**Ilya O. Dudinov**, Post-Graduate Student of the Production Processes Automation Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ilya.sandman@yandex.ru](mailto:ilya.sandman@yandex.ru)

**Alexander D. Lukyanov**, Cand.Sci. (Engineering), Head of the Production Processes Automation Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [lex1998@rambler.ru](mailto:lex1998@rambler.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final manuscript.**