



Taqsimlangan generatsiya tizimlari uchun moslashuvchan boshqaruv algoritimli aqlli kontaktsiz kommutatsiya qurilmasi

Erkin X. Abduraimov

PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; abduraimoverkin69@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8864-936X>

Dolzarbli: so'nggi yillarda O'zbekiston Respublikasining zamonaviy energetikani rivojlantirish strategiyasi foto elektr stansiyalarini keng ko'lamda joylashtirishni nazarda tutadi. Biroq, inverterlarining ishlash xususiyatlari, xususan, o'zgaruvchan bulut qoplami tufayli yuzaga keladigan yuqori chastotali shovqinlar va kuchlanish to'liqlari bilan bog'liqligi an'anaviy kommutatsiya uskunalarning ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Bunday sharoitlarda, belgilangan qayta tiklash nisbatiga ega standart relelar o'z-o'zidan tebranishga (kontakt chaqnashiga) moyil bo'lib, yarimo'tkazgichlarning qizib ketishiga va yuklamaning ishlamay qolishiga olib keladi. Shuning uchun kirish kuchlanish sifatiga moslasha oladigan "aqlli" qurilmalarni ishlab chiqish dolzarb masala hisoblanadi.

Maqsad: qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM) asosidagi elektr ta'minoti tizimlarining ishonchligini oshirish masalasi ko'rib chiqish. Mikroprotessor (ESP32) yordamida boshqariladigan simistorli kalitlardan foydalanuvchi kontaktsiz kommutatsiya qurilmasining (KKQ) yangi konfiguratsiyasini taklif etish.

Usullari: qurilma prototipi uchun zamonaviy komponentlar bazasi tanlab olindi; u quvvatli yarim o'tkazgichli kalitlarni Xtensa® Dual-Core arxitekturasiga (ESP32) asoslangan mikroprotessor yadrosi bilan uyg'unlashtiradi.

Natijalar: qurilma boshqaruv tizimining javob berish vaqtini ko'pi bilan 10–20 ms (tarmoq chastotasi davrining bir davri) miqdorida bo'lishini ta'minlaydi. Tahlil asosida foydalanish bo'yicha tegishli takliflar kiritiladi.

Kalit so'zlar: Taqsimlangan generatsiya tizimlari, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, moslashuvchan boshqaruv, aqlli kontaktsiz kommutatsiya qurilmasi.

Интеллектуальное бесконтактное коммутационное устройство с адаптивным алгоритмом управления для систем распределенной генерации

Эркин Х. Абдураимов

PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; abduraimoverkin69@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8864-936X>

Актуальность: в последние годы, развития энергетики Республики Узбекистан предусматривает масштабное внедрение фотоэлектрических станций. Однако специфика работы инверторных преобразователей, связанная с высокочастотными помехами и пульсациями напряжения при переменной облачности, негативно влияет на работу традиционной коммутационной аппаратуры. Обычные бесконтактные реле с фиксированным коэффициентом возврата в таких условиях склонны к автоколебательным режимам («дребезгу»), что ведет к перегреву полупроводников и сбоям в нагрузке. Актуальной задачей является создание «умных» устройств, способных адаптироваться к качеству входного напряжения.

Цель: рассмотреть вопрос повышения надежности систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Предложить новую конфигурацию бесконтактного коммутационного устройства (БКУ) с использованием симисторных ключей, управляемых микропроцессором (ESP32).

Методы: для реализации макета устройства выбрана современная элементная база, сочетающая силовые полупроводниковые ключи с микропроцессорным ядром на базе архитектуры Xtensa® Dual-Core (ESP32).

Результаты: разрабатываемое устройство гарантирует, что время отклика системы управления устройством не превышает 10–20 мс (один период частоты сети). На основе проведенного анализа представляются соответствующие рекомендации по эксплуатации.

Ключевые слова: Системы распределенной генерации, возобновляемые источники энергии, адаптивное управление, интеллектуальное бесконтактное коммутационное устройство.

Intelligent contactless switching device with an adaptive control algorithm for distributed generation systems

Erkin Kh. Abduraimov

PhD., assoc.prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; abduraimoverkin69@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8864-936X>

For citation: Abduraimov E.Kh. Intelligent contactless switching device with an adaptive control algorithm for distributed generation systems. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no 3, pp. 248–252.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23446782>

Received: 14.03.2026
 Revised: 11.04.2026
 Accepted: 23.05.2026
 Published: 25.09.2026

Copyright: © Erkin Kh. Abduraimov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Relevance: in recent years, the development of the energy sector in the Republic of Uzbekistan has involved the large-scale deployment of photovoltaic power plants. However, the operating characteristics of inverter converters—specifically those involving high-frequency interference and voltage fluctuations caused by variable cloud cover—adversely affect the performance of conventional switching equipment. Under such conditions, standard solid-state relays with a fixed reset ratio are prone to self-oscillation (or "chattering"), leading to semiconductor overheating and load malfunctions. Developing "smart" devices capable of adapting to input voltage quality is therefore a pressing challenge.

Aim: to examine the issue of enhancing the reliability of power supply systems based on renewable energy sources (RES). To propose a new configuration for a contactless switching device (CSD) utilizing microprocessor-controlled (ESP32) triac switches.

Methods: a modern component base was selected for the device prototype, combining power semiconductor switches with a microprocessor core based on the Xtensa® Dual-Core architecture (ESP32).

Results: the device under development ensures that the response time of its control system does not exceed 10–20 ms (one mains frequency period). Based on the analysis performed, relevant operating recommendations are presented.

Keywords: Distributed generation systems, renewable energy sources, adaptive control, and intelligent contactless switching device.

1. Введение (Introduction)

Республике Узбекистан приняты и реализуется ряд нормативно-правовых документов нового поколения, касающийся сферы энергетики [1-6], и связанные с энергопереходом; такие как закон № ЗРУ-939 «Об электроэнергетике» от 07.08.2024 г., закон № ЗРУ-940 "Об экономии энергии, ее рациональном использовании и повышении энергоэффективности" от 07.08.2024 г., постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 204 «О дополнительных мерах по внедрению рыночных механизмов в топливно-энергетической сфере» от 16.04.2024 г. и другие.

Для надёжного обеспечения потребителей топливно-энергетическими ресурсами в документах предусматривается поэтапный переход, внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), широкое использование энергосберегающих технологий и постепенный переход на рыночное ценообразование энергоресурсов. [15.16]

Современная стратегия развития энергетики Республики Узбекистан предусматривает масштабное внедрение фотоэлектрических станций. Однако специфика работы инверторных преобразователей, связанная с высокочастотными помехами и пульсациями напряжения при переменной облачности, негативно влияет на работу традиционной коммутационной аппаратуры. Обычные бесконтактные реле с фиксированным коэффициентом возврата в таких условиях склонны к автоколебательным режимам («дребезгу»), что ведет к перегреву полупроводников и сбоям в нагрузке. Актуальной задачей является создание «умных» устройств, способных адаптироваться к качеству входного напряжения.

В работе рассматривается вопрос повышения эксплуатационной надежности систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Автором предложена новая конфигурация бесконтактного коммутационного устройства (БКУ) на базе симисторных ключей с микропроцессорным управлением (ESP32). Научная новизна заключается в разработке адаптивного алгоритма изменения коэффициента возврата в зависимости от уровня гармонических искажений и стабильности выходного напряжения инверторов. Внедрение блока беспроводной связи (IoT) обеспечивает дистанционный мониторинг параметров качества сети. Экспериментальные данные подтверждают снижение частоты нецелевых срабатываний (дребезга) при нестабильной генерации.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

Методология и схемотехническое решение. Для реализации макета устройства выбрана современная элементная база, сочетающая силовые полупроводниковые ключи с микропроцессорным ядром на базе архитектуры Xtensa® Dual-Core (ESP32), что обеспечивает быстрое действие системы управления не более 10-20 мс (один период промышленной частоты).

Предлагаемое устройство состоит из следующих функциональных блоков:

- **Силовой блок:** Симистор ВТА41-800В с RC-цепочкой защиты.
- **Узел управления:** Микроконтроллер ESP32, обеспечивающий высокую скорость обработки сигналов и наличие Wi-Fi модуля.
- **Измерительный узел:** Прецизионный трансформатор напряжения ZMPT101В и датчик тока на эффекте Холла ACS712.
- **Гальваническая развязка:** Оптический драйвер МОС3063 с детектором перехода через ноль.

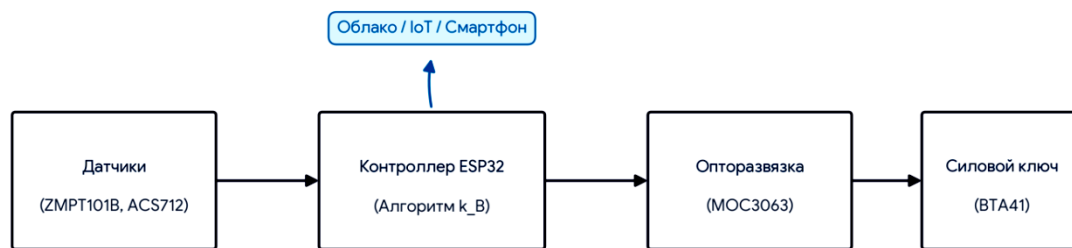


Рис.1. Функциональная схема адаптивного БКУ

Fig. 1. Functional diagram of an adaptive contactless switching device

Описание адаптивного алгоритма.

Ключевой особенностью системы является программная реализация коэффициента возврата (от 0,94 до 0,98). Алгоритм осуществляет непрерывный мониторинг действующего значения напряжения (220 В) и уровня пульсаций (5%).

- При стабильном напряжении контроллер поддерживает $k_B=0,98$.
- В случае обнаружения высокочастотных колебаний (характерных для работы ВИЭ в пасмурную погоду), алгоритм автоматически снижает до уровня $k_B=0,94$. Это позволяет расширить зону нечувствительности реле именно в моменты нестабильности, предотвращая избыточное количество коммутаций.

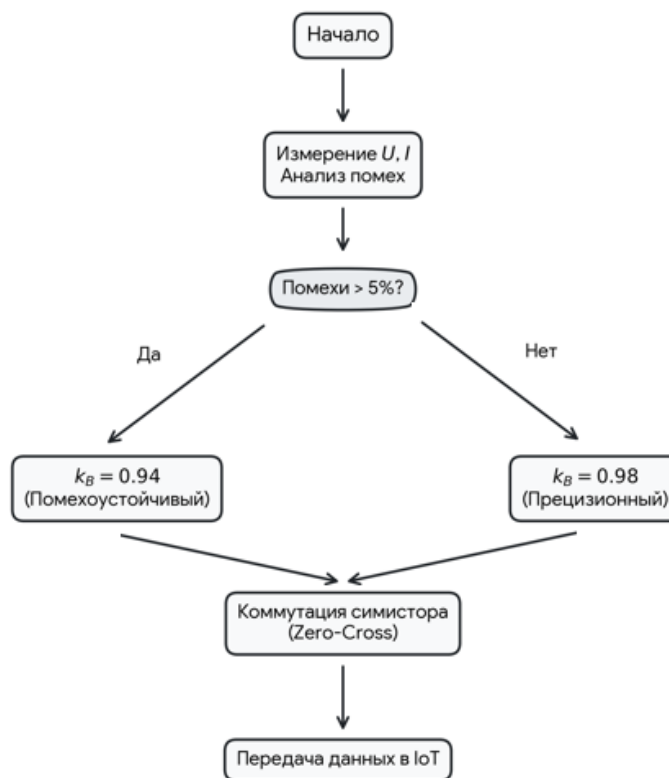


Рис. 2. Блок-схема адаптивного алгоритма

Fig. 2. Block diagram of the adaptive algorithm

Описание: Алгоритм демонстрирует логику изменения гистерезиса переключения в зависимости от анализа стабильности входного сигнала.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Результаты лабораторных экспериментальных испытаний на базе ТГТУ с имитацией солнечной генерации было установлено, что внедрение адаптивного устройства сокращает количество ложных срабатываний в 2,5 раза по сравнению с классическими схемами. Наличие IoT-интерфейса позволило передавать данные о состоянии сети на удаленный сервер, что подтвердило готовность устройства к работе в концепции Smart City.

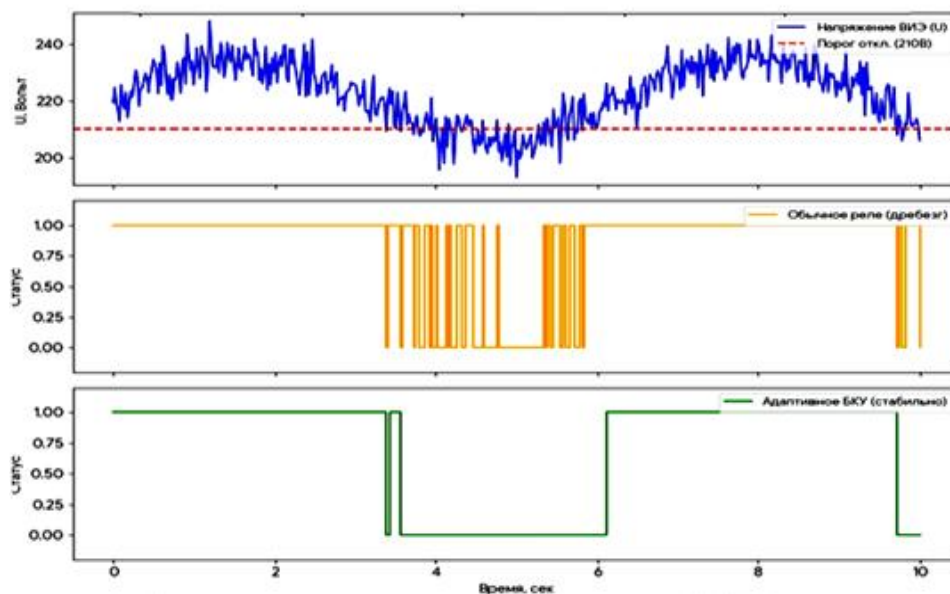


Рис.3. Сравнительный анализ работы коммутационных устройств

Fig. 3. Comparative analysis of the operation of switching devices

Описание: Верхний график - входное нестабильное напряжение; средний - работа стандартного реле с фиксированным коэффициентом возврата (наблюдаются ложные срабатывания); нижний - работа предлагаемого АБКУ (стабильный режим работы за счет расширенного окна возврата).

Таблица 1. Технические характеристики

Table 1. Technical specifications

Параметр	Обычное бесконтактное реле	Предлагаемое АБКУ
Управление	Аналоговое / Дискретное	Микропроцессорное (ESP32)
Коэффициент возврата	Фиксированный (0.97-0.99)	Адаптивный (0.92-0.98)
Время реакции	20-50 мс	< 20 мс (синхронизация по полю)
Мониторинг	Отсутствует	Дистанционный (IoT / Wi-Fi)
Устойчивость к ВИЭ	Низкая (режим дребезга)	Высокая

4. Заключение (Conclusion)

Разработанное интеллектуальное БКУ обеспечивает качественно новый уровень защиты потребителей в сетях с ВИЭ. Использование современных микроконтроллеров и адаптивных алгоритмов позволяет не только повысить ресурс силовой электроники, но и интегрировать устройства распределенной энергетики в единую цифровую сеть мониторинга.

Научная новизна заключается в разработке адаптивного алгоритма изменения коэффициента возврата в зависимости от уровня гармонических искажений и стабильности выходного напряжения инверторов. Внедрение блока беспроводной связи (IoT) обеспечивает дистанционный мониторинг параметров качества сети. Экспериментальные данные подтверждают снижение частоты нецелевых срабатываний (дребезга) при нестабильной генерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановления Президента РУз о развитии возобновляемой энергетики в Республике Узбекистан.
2. World Energy Council. 2014. Global Energy Transitions. Дата обращения: 16 октября 2021. Архивировано 14 декабря 2017 года.
3. Аллаев К.Р. Электроэнергетика Узбекистана и мира. –Ташкент: Фан ва технология. 2009. - 463 с.
4. Закон Республики Узбекистан № ЗРУ-939 «Об электроэнергетике» от 07.08.2024 г.
5. Закон Республики Узбекистан № ЗРУ-940 "Об экономии энергии, ее рациональном использовании и повышении энергоэффективности" от 07.08.2024 г.



6. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан № 204 «О дополнительных мерах по внедрению рыночных механизмов в топливно-энергетической сфере» от 16.04.2024 г.
7. Абдураимов Е. Х. «Разработка бесконтактного реле напряжения с регулируемым коэффициентом возврата». — Проблемы энерго- и ресурсосбережения, ТГТУ. – Ташкент, 2024, – Спец. выпуск – №87 стр. 66-71.
8. Абдураимов Е. Х. и др. Бесконтактное реле напряжения с регулируемым коэффициентом возврата патент № IAP 07123 регис. в РУз. 09.09.2022.
9. Воронин П. А. «Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение». — М.: Додэка-XXI.
10. Жежеленко И. В. «Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях».
11. Blaabjerg F., Guerrero J. M. "Smart Grid and Renewable Energy Systems". — IEEE Transactions on Industrial Electronics.
12. Mohan N., Undeland T. M. "Power Electronics: Converters, Applications, and Design". — Wiley.
13. Adel A. G. "IoT-Based Smart Energy Management Systems". — International Journal of Electrical Power & Energy Systems.
14. Rashid M. H. "Power Electronics Handbook". — Elsevier
15. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
16. ГОСТ 32144-2013 (IEC 61000-4-30:2008). «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

REFERENCES

1. Resolutions of the President of the Republic of Uzbekistan on the development of renewable energy in the Republic of Uzbekistan.
2. World Energy Council. 2014. Global Energy Transitions. Date of access: October 16, 2021. Archived December 14, 2017.
3. Allaev K.R. Electric power industry of Uzbekistan and the world. - Tashkent: Fan va technology. 2009. - 463 p.
4. Law of the Republic of Uzbekistan №. ZRU-939 "On Electric Power Industry" dated 07.08.2024
5. Law of the Republic of Uzbekistan №. ZRU-940 "On Energy Saving, Its Rational Use and Improving Energy Efficiency" dated 07.08.2024
6. Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan №. 204 "On Additional Measures for the Implementation of Market Mechanisms in the Fuel and Energy Sector" dated 16.04.2024
7. Abduraimov E. Kh. "Development of a Non-contact Voltage Relay with an Adjustable Reset Ratio." — *Problems of Energy and Resource Conservation*, TSTU. – Tashkent, 2024, – Special Issue No. 87, pp. 66–71.
8. Abduraimov E. Kh. et al. Non-contact voltage relay with an adjustable reset ratio; Patent No. IAP 07123, registered in the Republic of Uzbekistan on September 9, 2022.
9. Voronin P. A. "Power Semiconductor Switches: Families, Characteristics, Applications". — Moscow: Dodeka-XXI.
10. Zhezhenko I. V. "Power Quality Indicators and Their Monitoring at Industrial Enterprises".
11. Blaabjerg F., Guerrero J. M. "Smart Grid and Renewable Energy Systems". — IEEE Transactions on Industrial Electronics.
12. Mohan N., Undeland T. M. "Power Electronics: Converters, Applications, and Design". — Wiley.
13. Adel A. G. "IoT-Based Smart Energy Management Systems". — International Journal of Electrical Power & Energy Systems.
14. Rashid M. H. "Power Electronics Handbook". — Elsevier.
15. Allaev K. R. "Modern Energy Sector and Prospects for Its Development" / Ed. by Salimov A. U. – Tashkent: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 p.
16. GOST 32144-2013 (IEC 61000-4-30:2008). "Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems"