



Quyosh panellari integratsiyalashgan past kuchlanishli elektr tarmoqlarida kuchlanish nossimmetriyasini bartaraf etishning markazlashtirilmagan boshqaruv usuli

Ikhombek X. Xoliddinov^{1a)}, Muxlisaxon M. Begmatova¹

^{1a)} DSc, dotsent, Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona, 150110, O'zbekiston; i.xoliddinov@ferpi.uz, <https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

¹ doktorant, Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona, 150110, O'zbekiston; muxlisa_begmatova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Dolzarbli: markazlashtirilgan boshqaruv tamoyillariga asoslangan zamonaviy elektr energiyasi tizimlari favqulodda holatlar va nostandart vaziyatlarga nisbatan hali tayyor emas. Bunday holatlar barqarorlikni oshirish va muvozanatni ta'minlashga qaratilgan yangi, markazlashtirilmagan boshqaruv yondashuvlariga o'tish zarurligini ko'rsatadi. Ayniqsa, past kuchlanishli tarmoqlarga taqsimlangan quyosh energiyasi (PV) manbalarining faol integratsiyasi sharoitida bu dolzarb ahamiyat kasb etadi. O'zbekistonda energetika almashinuvi doirasida raqamlashtirish, "yashil" energiya ishlab chiqarish va Smart Grid texnologiyalarini joriy etish bilan bir qatorda, kuchlanish simmetriyasini saqlash va ta'minot tizimining ishonchligini oshirish masalalari alohida e'tibor talab qiladi. Ushbu muammolarning samarali yechimlaridan biri sifatida mahalliy darajadagi aqlli kontrollerlarga asoslangan markazlashtirilmagan boshqaruv konsepsiyasi taklif etilgan, bu esa tizimning avtonomligi, moslashuvchanligi va barqarorligini ta'minlaydi.

Maqsad: IoT texnologiyalaridan tashkil topgan infratuzilma hamda fazalarni qayta taqsimlash usullaridan foydalanish va past kuchlanishli tarmoqlarda integratsiyalashgan quyosh panellari bilan kuchlanish darajasini kamaytirish va tarmoq barqarorligini oshirish maqsadida markazlashtirilmagan boshqaruv tizimi samaradorligini asoslash.

Usullari: smart Grid konsepsiyasi doirasida boshqaruv arxitekturalarini solishtirish, bir fazali quyosh generatsiyasining kuchlanish assimetriyasiga ta'sirini tahlil qilish, shuningdek kaskad va umumiy turdagi markazlashtirilmagan boshqaruv sxemalari asosida tizimli modellashtirish.

Natijalar: taklif qilingan markazlashtirilmagan boshqaruv arxitekturasida PV tarmoqlarida yuqori moslashuvchanlikni, amalga oshirish qulayligini ta'minlaydi va keng ko'lamlı aloqa infratuzilmasiga bo'lgan ehtiyojni kamaytiradi.

Kalit so'zlar: past kuchlanishli tarmoqlar, markazlashtirilmagan boshqaruv, fotoelektrik tizimlar, kuchlanish nossimmetriyasi, aqlli kontrollerlar, IoT, Smart Grid.

Децентрализованный метод управления для устранения несимметрии напряжения в низковольтных электрических сетях с интегрированными солнечными панелями

Илхомбек Х. Холитдинов^{1а)}, Мухлисaxon М. Бегматова¹

^{1a)} DSc, доцент, Ферганский государственный технический университет, Фергана, 150110, Узбекистан; i.xoliddinov@ferpi.uz, <https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

¹ докторант, Ферганский государственный технический университет, Фергана, 150110, Узбекистан; muxlisa_begmatova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Актуальность: современные электроэнергетические системы, основанные на централизованной архитектуре управления, демонстрируют уязвимость при аварийных и нестандартных ситуациях. Подобные события указывают на необходимость перехода к новой модели управления, ориентированной на децентрализованные и устойчивые решения, особенно в условиях активной интеграции распределённых фотоэлектрических источников (PV) в низковольтные сети. В условиях энергетического перехода в Узбекистане, сопровождающегося цифровизацией, развитием «зелёной» генерации и внедрением элементов Smart Grid, особую актуальность приобретает задача обеспечения симметрии напряжений и надёжности электроснабжения при высокой доле ВИЭ. Одним из наиболее эффективных подходов к решению этих задач является децентрализованное управление на основе локальных интеллектуальных контроллеров, обеспечивающее автономность, адаптивность и устойчивость работы электрических сетей.

Цель: обоснование эффективности применения децентрализованной системы управления для снижения несимметрии напряжения и повышения устойчивости низковольтных электрических сетей с интегрированными солнечными панелями, с использованием локальных измерений, IoT-инфраструктуры и фазового перераспределения.

For citation: Kholiddinov I.Kh., Begmatova M.M. A decentralized control method for eliminating voltage asymmetry in low-voltage electric networks with integrated solar panels. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 95-103.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19998867>

Received: 25.10.2025

Revised: 18.11.2025

Accepted: 11.02.2026

Published: 26.03.2026

Copyright: © Ilkhombek Kh. Kholiddinov, Muxlisaxon M. Begmatova, 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/>).



Методы: использованы сравнительный анализ архитектур управления в Smart Grid, оценка влияния однофазной генерации на симметрию напряжения, а также структурное моделирование схем управления по каскадной и общей децентрализованной структуре

Результаты: предложенная архитектура децентрализованного управления в PV-сетях обеспечивает высокую адаптивность, простоту внедрения и снижает потребность в масштабной коммуникационной инфраструктуре.

Ключевые слова: низковольтные сети, децентрализованное управление, фотоэлектрические установки, несимметрия напряжений, интеллектуальные контроллеры, IoT, Smart Grid.

A decentralized control method for eliminating voltage asymmetry in low-voltage electric networks with integrated solar panels

Ilkhombek Kh. Kholiddinov^{1a)}, Mukhlisakhon M. Begmatova¹

^{1a)} DSc, Fergana State Technical University, Fergana, 150110, Uzbekistan; i.xoliddinov@ferpi.uz
<https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

¹ doctoral student, Fergana State Technical University, Fergana, 150110, Uzbekistan; muxlisa_begmatova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Relevance: modern electric power systems based on a centralized management architecture demonstrate vulnerability in emergency and non-standard situations. Such events indicate the need to move to a new management model focused on decentralized and sustainable solutions, especially in the context of the active integration of distributed photovoltaic (PV) sources into low-voltage networks. In the context of the energy transition in Uzbekistan, accompanied by digitalization, the development of "green" generation and the introduction of Smart Grid elements, the task of ensuring voltage symmetry and reliability of power supply with a high proportion of renewable energy sources is of particular relevance. One of the most effective approaches to solving these problems is decentralized management based on local intelligent controllers, which ensures the autonomy, adaptability and stability of electrical networks.

Aim: to substantiate the effectiveness of using a decentralized control system to reduce voltage asymmetry and increase the stability of low-voltage electric networks with integrated solar panels, using local measurements, IoT infrastructure and phase redistribution.

Methods: comparative analysis of Smart Grid control architectures, assessment of the influence of single-phase generation on voltage symmetry, as well as structural modeling of cascade and general decentralized control circuits were used.

Results: the proposed architecture of decentralized management in PV networks provides high adaptability, ease of implementation and reduces the need for a large-scale communication infrastructure.

Keywords: low-voltage networks, decentralized management, photovoltaic installations, voltage asymmetry, intelligent controllers, IoT, Smart Grid.

1. Введение (Introduction)

25 января 2022 года в Объединённой энергосистеме Центральной Азии произошла крупномасштабная авария, вызвавшая внезапное отключение электроэнергии в Узбекистане, Казахстане и Кыргызстане. По данным официального телеграм канала Министерства Энергетики Республики Узбекистан [1] в результате блэкаута без электроснабжения остались более 40 миллионов человек, включая объекты социальной инфраструктуры, стратегические предприятия и миллионы жилых домов. Электроэнергия была восстановлена поэтапно, но авария продемонстрировала уязвимость централизованной архитектуры энергоснабжения, в особенности в условиях растущей нагрузки, высокой зависимости от смежных систем и слабой адаптивности к нештатным ситуациям.

Особо остро инцидент отразился на газотранспортной системе. Из-за остановки электропитания 12 газоперекачивающих установок на Галлааральской компрессорной станции, объёмы добычи природного газа сократились, нарушилась подача топлива к электростанциям. По данным АО «Узтрансгаз», часовой объём добытого газа снизился с 5 490 тыс. м³/ч до 3 261 тыс. м³/ч, при этом аварийно было остановлено большинство компрессорных станций. В течение двух суток велись аварийно-восстановительные работы, и к 27 января удалось полностью восстановить электроснабжение по всей республике. Тем не менее, этот случай стал индикатором структурной уязвимости энергетической инфраструктуры, основанной на централизованных принципах управления [2].

Системные блэкауты подобного рода не являются уникальными для Центральной Азии. В мировой практике известны десятки подобных инцидентов:

В США и Канаде 14 августа 2003 года произошёл так называемый «Великий блэкаут», в ходе которого было отключено 263 электростанции, включая 10 АЭС, и 55 миллионов человек



остались без электроснабжения. Ущерб составил более 6 млрд долларов США. В Индии в июле 2012 года 650 миллионов жителей оказались без электричества в течение двух дней из-за перегрузки региональных сетей. Были остановлены более 500 железнодорожных составов, нарушена работа больниц, водоснабжения и городских систем. В Пакистане 9 января 2021 года масштабное отключение затронуло почти 200 миллионов человек, включая столицу, в результате каскадного отказа на теплоэлектростанции Гудду. В Нью-Йорке в 1977 году блэкаут, вызванный ударом молнии по магистральным линиям, спровоцировал волну грабежей и беспорядков, что нанесло ущерб на сумму более 300 миллионов долларов [3].

Все эти события объединяет ключевой фактор: централизованное управление энергосистемами оказалось не в состоянии быстро и локально реагировать на возникновение аварий, что привело к каскадным отказам и социальным потрясениям. Централизованные архитектуры обладают высокой степенью уязвимости: сбой в одном узле может парализовать всю систему.

Децентрализованное управление предполагает наличие локальных интеллектуальных узлов управления, способных самостоятельно принимать решения на основе анализа текущих данных, взаимодействовать с другими узлами и обеспечивать автономную стабильность в пределах своего сектора. Это особенно важно при высокой доле распределённой генерации — солнечных панелей, ветрогенераторов, микротурбин и батарейных систем накопления энергии (BESS), — подключённых к низковольтным сетям. Такие узлы способны предотвратить каскадные отключения, локализуя аварийные зоны, перенаправляя потоки энергии, активируя резервные источники или временно ограничивая некритическую нагрузку.

Однофазные распределённые генераторы, особенно фотоэлектрические системы, находят широкое применение в низковольтных интеллектуальных сетях. Однако их неравномерное подключение к фазам приводит к несимметрии напряжения, перенапряжениям и росту токов в нейтрали, что вызывает дополнительные потери мощности, ухудшает стабильность и влияет на чувствительные нагрузки [4–8]. Кроме того, устойчивость распределительной сети снижается при увеличении асимметрии как по нагрузке, так и по распределённым фотоэлектрическим источникам [9].

Для минимизации этих последствий применяются стратегии управления, включая перераспределение фазовой нагрузки, управление активной/реактивной мощностью, использование систем накопления энергии и технологии отклика на спрос (DR) [10]. Среди них наибольший интерес представляет метод фазовой перефазировки, при котором нагрузки перераспределяются с перегруженных фаз на менее загруженные на основе анализа тока и мощности. Такая стратегия может эффективно реализовываться в рамках децентрализованного управления: интеллектуальные счётчики обеспечивают локальные измерения, а оптимизация, например с использованием алгоритма кормления бактерий, минимизирует несимметрию напряжения по всей сети [10].

Применение децентрализованного подхода обеспечивает снижение уровня несимметрии менее 1% и не требует глубокой реконфигурации сети, в отличие от централизованных решений. В [11] представлен метод с участием OLTC и DR, использующий модифицированный алгоритм оптимизации роя. Несмотря на эффективность, он требует масштабной системы связи и подвержен сбоям. В свою очередь, децентрализованные подходы, опирающиеся на локальные измерения и управление на месте, обеспечивают устойчивость и снижают зависимость от центрального координирующего узла.

Так, в работе [12] предложена двухуровневая модель управления: нижний уровень основан на снижении напряжения с помощью локальной кривой и демпфирующей матрицы, а верхний — на перераспределении активной мощности между OLTC и нагрузками. Однако даже эта модель требует централизованной координации, в то время как децентрализованные решения могут обеспечить автономное, адаптивное и масштабируемое управление несимметрией напряжения в условиях высокой доли фотоэлектрической генерации.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

В современных интеллектуальных энергосетях (Smart Grid) используются четыре базовых схем управления: локальная, централизованная, децентрализованная и распределённая. Локальное управление предполагает работу автономных контроллеров на уровне отдельных устройств, не требующих внешних коммуникаций. Оно отличается надёжностью, но не учитывает глобальное состояние сети. Централизованная схема, напротив, обеспечивает глобальную координацию всех элементов через единый управляющий центр, что позволяет оптимизировать параметры системы, но создаёт нагрузку на телекоммуникационные каналы и уязвимость к отказам связи.



Децентрализованное управление предлагает компромисс: сеть разбивается на подсистемы, каждая из которых управляется локальным контроллером с возможностью обмена данными с соседними узлами. Это снижает нагрузку на сеть, повышает отказоустойчивость и улучшает гибкость. Распределённая схема идёт дальше, обеспечивая равноправное взаимодействие всех элементов сети (peer-to-peer) без иерархии, что делает управление особенно адаптивным и устойчивым при высокой доле ВИЭ. Однако такие решения требуют развитой инфраструктуры связи, точных измерений и защищённых протоколов данных.

Для поддержки интеллектуальных функций Smart Grid широко применяется многоуровневая архитектура обмена данными, включающая домашние (HAN), районные (NAN) и глобальные (WAN) сети. HAN объединяет интеллектуальные устройства внутри домохозяйства — счётчики, инверторы, батареи и электроприборы, обеспечивая сбор и первичную обработку данных. NAN агрегирует информацию с нескольких HAN, управляя локальным распределением нагрузки, а WAN соединяет районные сегменты с диспетчерскими системами (SCADA, DMS), обеспечивая передачу больших объёмов данных на дальние расстояния.



Рис.1. Число связанных устройств в мире

Fig.1. The number of connected devices in the world

В последние годы по данным статистик наблюдается стремительный рост числа подключённых устройств, что свидетельствует о глобальном распространении технологий Интернета вещей (IoT). Согласно оценкам отраслевых аналитиков, к 2020 году общее количество таких устройств достигло порядка 50 миллиардов [13]. Интеграция IoT в энергетический сектор представляет собой качественный переход к новой парадигме управления, способствуя трансформации традиционных подходов в электроэнергетике. В настоящее время в отрасли уже активно применяются цифровые решения, включая интеллектуальные энергосети (Smart Grid), технологии управления спросом (Demand Response) и разнообразные пользовательские приложения, обеспечивающие оптимизацию процессов потребления и распределения электроэнергии.

Технология Интернета вещей (IoT) становится ключевым элементом построения гибкой и масштабируемой энергетической инфраструктуры. IoT объединяет интеллектуальные устройства в единую сеть, позволяя им обмениваться данными, принимать решения на основе локальных и внешних сигналов и адаптировать режим работы в реальном времени. Благодаря этому достигается автономность узлов, снижается нагрузка на централизованные элементы, повышается точность прогноза и устойчивость управления. IoT-инфраструктура особенно эффективна в децентрализованных и распределённых системах, где требуется автономная реакция на колебания параметров сети и надёжная передача данных между большим числом устройств. При этом остаются актуальными вызовы, связанные с обеспечением кибербезопасности, стандартизацией протоколов и защитой персональных данных.

В рамках децентрализованного управления в интеллектуальных сетях низкого напряжения с интегрированными солнечными панелями особое внимание уделяется способу организации взаимодействия между локальными контроллерами отдельных узлов сети. На практике применяются две основные схемы децентрализованного управления: каскадная и общая, каждая из которых имеет свои особенности функционирования и характер информационного обмена.

Каскадная схема децентрализованного управления строится на принципе последовательного взаимодействия контроллеров отдельных подсистем. В этом случае каждый контроллер шины или локальный контроллер определённого узла получает информацию о состоянии своей подсистемы и частично — данные о параметрах ближайшего соседнего узла. Управляющие сигналы формируются на основе текущего состояния собственной подсистемы и информации о состоянии предыдущей или соседней шины. Такая схема удобна для

обеспечения согласованной передачи управляющих воздействий от одной шины к другой и может быть реализована, например, для координации работы распределённых аккумуляторных систем, установленных на разных участках низковольтной сети.

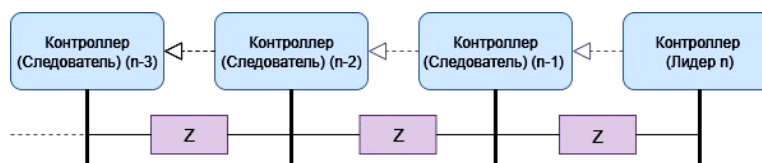


Рис. 2. Схема децентрализованного управления по каскадной схеме
Fig. 2. The scheme of decentralized cascade management

Преимуществом каскадной схемы является относительная простота алгоритмов взаимодействия между контроллерами и ограниченный объём передаваемых данных. Однако при этом существует риск накопления ошибок или запаздывания управляющих воздействий, что может приводить к несогласованности работы системы при увеличении количества звеньев каскада.

Общая схема децентрализованного управления, напротив, базируется на принципе единого опорного сигнала. В этой структуре один из контроллеров — обычно тот, который установлен на шине с наибольшей нагрузкой или наиболее высоким уровнем отклонений напряжения — выполняет роль ведущего. Все остальные контроллеры получают от него опорную информацию о допустимом уровне напряжения, мощности или других критических параметрах и формируют свои локальные управляющие сигналы, ориентируясь на эти значения. В отличие от каскадной схемы, где взаимодействие осуществляется по цепочке, в общей схеме все контроллеры имеют прямой канал связи с ведущим узлом, что обеспечивает согласованную и синхронную работу всех подсистем. Преимуществом данного подхода является высокая точность выравнивания режимов работы всех шунтовых установок или распределённых аккумуляторных блоков. В то же время общая схема требует надёжного и устойчивого канала связи между всеми контроллерами и ведущим узлом, что может стать технически сложным при увеличении масштабов сети.

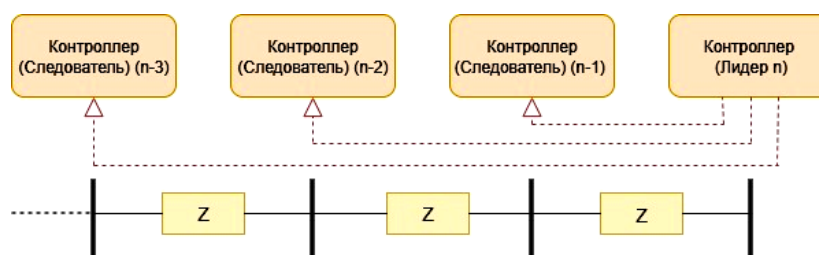


Рис. 3. Схема децентрализованного управления по общей схеме
Fig. 3. The scheme of decentralized general management

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Для реализации данной задачи разработана структурная модель энергосети, архитектура которой соответствует представленной на рисунке 4. Управление организовано в виде общей схемы децентрализованного типа, в рамках которой каждый локальный контроллер принимает решения на основе локальной информации, а координация между ними обеспечивается через обмен параметрами состояния.

На схеме представлена типовая структура децентрализованной энергосистемы низкого напряжения, в которую интегрированы распределённые фотоэлектрические установки, аккумуляторные накопители энергии, интеллектуальные измерительные приборы и локальные контроллеры. Каждый узел, представленный домохозяйством, включает в себя PV-систему, подключённую к нагрузке через инвертор, аккумуляторную батарею, а также интеллектуальный счётчик и управляющий контроллер. Связь между компонентами организована посредством единой коммуникационной шины, использующей современные протоколы IoT. Такая система обеспечивает автономную работу каждого узла, сбор и анализ данных, а также локальное принятие решений без необходимости централизованного управления. Особенностью данной архитектуры является возможность симметрирования фаз путём интеллектуального перераспределения нагрузок и фазовых подключений в зависимости от текущих значений фазных напряжений [14]. Это позволяет минимизировать несимметрию напряжения, которая часто возникает в условиях неравномерного распределения однофазных

нагрузок и генерации от солнечных панелей. Благодаря децентрализованному подходу и применению локальных алгоритмов управления достигается гибкость, отказоустойчивость и высокая адаптивность системы, особенно при колебаниях генерации и потребления.

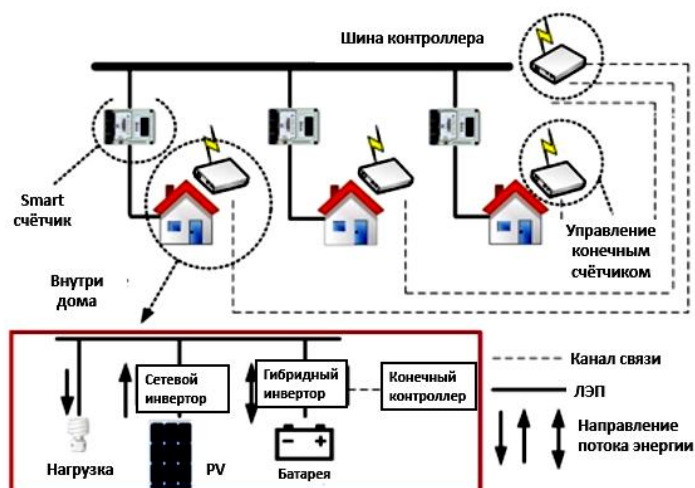


Рис. 4. Структура децентрализованного управления для любого потребителя
Fig. 4. The structure of decentralized management for any consumer

Проведённый анализ низковольтной электрической сети с распределёнными фотоэлектрическими установками позволил сформировать архитектуру децентрализованной системы управления, ориентированной на минимизацию несимметрии напряжения и повышение устойчивости функционирования энергосистемы [15].

Таблица 1. Сравнительная характеристика централизованной и децентрализованной систем управления

Table 1. Comparative characteristics of centralized and decentralized systems management

Параметр сравнения	Централизованная система управления	Децентрализованная система управления
Надёжность и отказоустойчивость	Чувствительна к сбоям центрального контроллера	Повышенная устойчивость за счёт независимости узлов
Время отклика системы	Может быть увеличенным при перегрузке центра	Быстрый отклик благодаря локальному принятию решений
Гибкость при подключении новых устройств	Требуется перепрограммирование центра	Простое масштабирование за счёт автономных агентов
Сложность передачи данных	Высокие требования к каналам связи и централизованному анализу	Локальная обработка информации снижает нагрузку на сеть
Симметрия фазных нагрузок	Возможны длительные отклонения	Улучшенное распределение нагрузок по фазам за счёт локальной перестройки
Риски при авариях (например, блэкаутах)	Резкое ухудшение управления всей системой	Удержание локальной устойчивости и сохранение функций
Интеграция IoT и цифровых решений	Частично реализуется, но с ограничениями масштабируемости	Полная интеграция, поддержка интеллектуальных решений в реальном времени
Затраты на внедрение	Ниже на старте, но дороже при масштабировании	Выше на старте (IoT, программирование), но эффективнее при расширении

В рамках исследования были сопоставлены две архитектурные концепции децентрализованного управления — каскадная и общая. Каскадная архитектура характеризуется упрощённой структурой взаимодействия между локальными контроллерами, требуя минимального объёма передаваемой информации, что снижает нагрузку на коммуникационные каналы. Общая архитектура, напротив, обеспечивает согласованное управление параметрами системы за счёт использования общего опорного сигнала от ведущего



узла, что позволяет достичь более высокой точности регулирования и выравнивания фаз.

На основе проведённого анализа была предложена структурная модель управления, включающая локальные контроллеры, интеллектуальные измерительные устройства, аккумуляторные накопители энергии и фотоэлектрические установки, объединённые в единую IoT-среду. Такая структура обеспечивает автономное принятие решений на уровне отдельных узлов, что исключает необходимость централизованной координации и повышает гибкость системы.

Дополнительно установлено, что разработанная архитектура обладает высокой степенью адаптивности и отказоустойчивости, в том числе при существенных колебаниях выработки солнечной генерации. Возможность оперативного локального реагирования на изменение параметров сети снижает вероятность каскадных отключений и повышает надёжность электроснабжения конечных потребителей.

Имитационное моделирование также продемонстрировало, что предложенная система управления может быть интегрирована в существующую инфраструктуру низковольтных распределительных сетей без необходимости глубокой технической реконструкции. Это подтверждает экономическую целесообразность и практическую применимость предложенного подхода в условиях современного энергетического перехода.

4. Заключение (Conclusion)

В условиях растущей децентрализации электроэнергетических систем и активного внедрения солнечных фотоэлектрических установок в низковольтные сети, необходимость в гибких и надёжных архитектурах управления становится всё более актуальной. Проведённый анализ показал, что традиционные централизованные системы управления не обеспечивают должного уровня устойчивости, особенно в случае блэкаутов, перегрузок или киберугроз.

Предложенная в работе модель децентрализованной системы управления демонстрирует целый ряд преимуществ: повышенную отказоустойчивость, снижение времени отклика, улучшенную фазную симметрию и высокую адаптивность к изменениям в энергопотреблении и генерации. Внедрение интеллектуальных узлов и интеграция решений на базе IoT и Smart Grid усиливают функциональность системы, обеспечивая локальную автономность при глобальной координации.

Таким образом, децентрализованный подход представляет собой перспективное направление развития сетей низкого напряжения с распределённой генерацией. Он открывает новые горизонты для построения более надёжных, устойчивых и интеллектуальных энергетических систем будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство энергетики РУз. Пресс-релиз о массовом отключении электроэнергии от 25.01.2022 г., Уважаемые потребители электроэнергии и газа! https://t.me/minenergy_uz/4473.
2. Министерство энергетики Республики Узбекистан. Пресс-релиз о массовом отключении электроэнергии от 25.01.2022 г., Blackout (<https://telegra.ph/file/a99b6d0ad101ecf3a970c.jpg>): крупнейшие сбои в энергосистемах, <https://t.me/c/2291979710/317>.
3. Министерство энергетики Республики Узбекистан. Пресс-релиз о массовом отключении электроэнергии от 25.01.2022 г., Информация об отключении и перезапуске компрессорных станций в системе АО «Узтрансгаз», https://t.me/minenergy_uz/4478.
4. Kharrazi, A., Sreeram, V., & Mishra, Y. (2020). Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109643. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109643>.
5. Nour, A. M. M., Helal, A. A., El-Saadawi, M. M., & Hatata, A. Y. (2021). Voltage violation in four-wire distribution networks integrated with rooftop PV systems. *IET Renewable Power Generation*, 14(13), 2395–2405. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0174>.
6. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5, 18. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00163-x>.
7. Yaghoobi, J., Islam, M., & Mithulananthan, N. (2018). Analytical approach to assess the loadability of unbalanced distribution grid with rooftop PV units. *Applied Energy*, 211, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.030>.
8. Bandara, W. G. C., Godaliyadda, G. M. R. I., Ekanayake, M. P. B., & Ekanayake, J. B. (2020). Coordinated photovoltaic re-phasing: A novel method to maximize renewable energy integration in



- low voltage networks by mitigating network unbalances. *Applied Energy*, 280, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116022>.
9. Rahman, M. M., Arefi, A., Shafiullah, G. M., & Hettiwatte, S. (2018). A new approach to voltage management in unbalanced low voltage networks using demand response and OLTC considering consumer preference. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.034>.
10. Bozalakov, D. V., Laveyne, J., Desmet, J., & Vandeveldel, L. (2019). Overvoltage and voltage unbalance mitigation in areas with high penetration of renewable energy resources by using the modified three-phase damping control strategy. *Electric Power Systems Research*, 168, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2018.12.001>.
11. Kontis, E. O., Kryonidis, G. C., Nousedilis, A. I., Malamaki, K. N. D., & Papa- giannis, G. K. (2019). A two-layer control strategy for voltage regulation of active unbalanced LV distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.020>.
12. Xu, J., Wang, J., Liao, S., Sun, Y., Ke, D., Li, X., Liu, J., Jiang, Y., Wei, C., & Tang, B. (2018). Stochastic multi-objective optimization of photovoltaics integrated three-phase distribution network based on dynamic scenarios. *Applied Energy*, 231, 985–996. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.168>.
13. Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025, <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>.
14. К.Р. Аллаев, И.Х. Холиддинов, М.М. Холиддинова. Методология оценки эффективности электрических сетей с использованием нечеткой логики // *Электричество*, стр. 4-14 2025.
15. I.X. Xoliddinov, M.M. Begmatova A method of load balancing based on fuzzy logic in low-voltage networks with solar panel integration // *Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology*, Volume 10, Issue 1 2025, pp. 312-320.

REFERENCES

1. Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. Press release on the massive power outage dated 01/25/2022, Dear consumers of electricity and gas! https://t.me/minenergy_uz/4473.
2. Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. Press release on the massive power outage from 01/25/2022, Blackout (<https://telegra.ph/file/a99b6d0ad101ecf3a970c.jpg>): major failures in power systems, <https://t.me/c/2291979710/317>.
3. Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. Press release on the massive power outage dated 01/25/2022, Information on the shutdown and restart of compressor stations in the Uztransgaz JSC system, https://t.me/minenergy_uz/4478.
5. Kharrazi, A., Sreeram, V., & Mishra, Y. (2020). Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109643. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109643>.
6. Nour, A. M. M., Helal, A. A., El-Saadawi, M. M., & Hatata, A. Y. (2021). Voltage violation in four-wire distribution networks integrated with rooftop PV systems. *IET Renewable Power Generation*, 14(13), 2395–2405. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0174>.
7. Li, R., Wong, P., Wang, K., et al. (2020). Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5, 18. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00163-x>.
8. Yaghoobi, J., Islam, M., & Mithulananthan, N. (2018). Analytical approach to assess the loadability of unbalanced distribution grid with rooftop PV units. *Applied Energy*, 211, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.030>.
9. Bandara, W. G. C., Godaliyadda, G. M. R. I., Ekanayake, M. P. B., & Ekanayake, J. B. (2020). Coordinated photovoltaic re-phasing: A novel method to maximize renewable energy integration in low voltage networks by mitigating network unbalances. *Applied Energy*, 280, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116022>.
10. Rahman, M. M., Arefi, A., Shafiullah, G. M., & Hettiwatte, S. (2018). A new approach to voltage management in unbalanced low voltage networks using demand response and OLTC considering consumer preference. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.034>.
11. Bozalakov, D. V., Laveyne, J., Desmet, J., & Vandeveldel, L. (2019). Overvoltage and voltage unbalance mitigation in areas with high penetration of renewable energy resources by using the modified three-phase damping control strategy. *Electric Power Systems Research*, 168, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2018.12.001>.



12. Kontis, E. O., Kryonidis, G. C., Nousedilis, A. I., Malamaki, K. N. D., & Papa- giannis, G. K. (2019). A two-layer control strategy for voltage regulation of active unbalanced LV distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.020>.

13. Xu, J., Wang, J., Liao, S., Sun, Y., Ke, D., Li, X., Liu, J., Jiang, Y., Wei, C., & Tang, B. (2018). Stochastic multi-objective optimization of photovoltaics integrated three-phase distribution network based on dynamic scenarios. *Applied Energy*, 231, 985–996. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.168>.

14. Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025, <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>.

15. K.R. Allaev, I.H. Kholiddinov, M.M. Kholiddinova. Methodology for evaluating the efficiency of electrical networks using fuzzy logic // *Electricity* 2025, pp. 4-14. (In Russian).

16. I.X. Xoliddinov, M.M. Begmatova A method of load balancing based on fuzzy logic in low-voltage networks with solar panel integration // *Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology*, Volume 10, Issue 1 2025, pp. 312-320.