



PV panellarini integratsiyalashda past kuchlanishli tarmoqlarda fazalarni simmetriyalashning aqlli algoritmlari

Ilhombek X. Xoliddinov¹, Muxlisaxon M. Begmatova^{1,a)}

¹, DSc, dots., Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona, 150100, O'zbekiston; i.xoliddinov@ferpi.uz <https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

^{1a)} Doktorant, Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona, 150100, O'zbekiston; muxlisa_begmatova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Dolzarbli: Fotoelektrik tizimlarga (PV) asoslangan taqsimlangan past kuchlanishli elektr tarmoqlari tizimda yangi texnik muammolarni keltirib chiqarmoqda. Asosiy muammolardan biri bu bir fazali PV panellarining notekis ulanishi natijasida yuzaga keladigan fazali nossimetriyadir. Kuchlanish va tokning nossimetriyasi elektr energiyasi sifatining yomonlashishiga, yo'qotishlarning oshishiga, neytral simning ortiqcha yuklanishiga va elektr ta'minotining ishonchligining pasayishiga olib keladi. Bunday sharoitda tarmoqning barqaror ishlashini va PV panellarni integratsiyasini ta'minlaydigan fazalarni simmetriyalashning samarali usullarini ishlab chiqish vazifasi alohida ahamiyatga ega. Istiqbolli yondashuvlardan biri bu fazani tartibga solish va PV panel ish rejimlarini boshqarish uchun aqlli boshqaruv tizimlarini, xususan noaniq mantiqli (FLC) qo'llashdir.

Maqsad: Neytral tokni minimallashtirish, fazalararo simmetriyasini oshirish va tizimdagi yo'qotishlarni kamaytirishga asoslangan noaniq mantiqli (FLC) qo'llashga asoslangan taqsimlangan quyosh qurilmalari bilan past kuchlanishli tarmoqlarda fazalararo simmetriyani boshqarishning aqlli usulini ishlab chiqish.

Usullari: Tadqiqot davomida MATLAB/Simulink muhitida modellashtirish usullari, noaniq to'plamlar nazariyasi hamda fazalarni simmetriyalash algoritmlari qo'llanildi. Noaniq mantiqli (FLC) ishlab chiqildi.

Natijalar: Modellashtirish asosida noaniq mantiqli (FLC) yordamida fazalarni simmetriyalashning aqlli boshqaruv tizimi ishlab chiqildi. Ushbu tizimda kirish parametrlari sifatida fazaviy toklar va fazalar orasidagi nossimetriya burchagi qo'llanildi. Chiqish o'zgaruvchisi sifatida esa fazalarni taqsimlash tizimining ijro etuvchi qurilmalariga uzatiladigan boshqaruv signali shakllantirildi.

Kalit so'zlar: noaniq mantiq, fazalararo simmetriya, PV panel, past kuchlanishli tarmoq, neytral tok, MATLAB / Simulink, aqlli boshqaruv, FLC.

For citation: Begmatova M.M., Kholiddinov I.Kh. Intelligent phase symmetry algorithms in low-voltage networks with integrating PV panels. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 246-255.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18611730>

Received: 05.04.2025
Revised: 19.04.2025
Accepted: 10.07.2025
Published: 27.12.2025

Copyright: © Ilhombek Kh. Kholiddinov, Muxlisaxon M. Begmatova 2025. 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/>).

Интеллектуальные алгоритмы симметрирования фаз в низковольтных сетях при интеграции PV панелей

Илхоббек Х. Холиддинов¹, Мухлисaxon М. Бегматова^{1,a)}

¹ DSc, доц., Ферганский государственный технический университет, Фергана, 150100, Узбекистан; i.xoliddinov@ferpi.uz <https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

^{1,a)} Докторант, Ферганский государственный технический университет, Фергана, 150100, Узбекистан; muxlisa_begmatova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Актуальность: Развитие распределённой генерации, основанной на фотоэлектрических системах (PV панелей), вызывает новые технические вызовы в низковольтных электрических сетях. Одной из ключевых проблем становится фазовая несимметрия, вызванная неравномерным подключением однофазных PV панелей. Несимметрия напряжений и токов ведёт к ухудшению качества электроэнергии, увеличению потерь, перегрузке нейтрального провода и снижению надёжности электроснабжения. В этих условиях особую актуальность приобретает задача разработки эффективных методов симметрирования фаз, обеспечивающих устойчивую работу сети и интеграцию ВИЭ. Одним из перспективных подходов является применение интеллектуальных систем управления, в частности, нечёткой логики (FLC), для адаптивного фазового регулирования и управления режимами работы PV панелей.

Цель: Разработка интеллектуального метода управления фазовой симметрией в сетях низкого напряжения с распределёнными солнечными установками, основанного на применении нечёткой логики (FLC), с целью минимизации тока в нейтрали, повышения фазовой симметрии и снижения потерь в системе.

Методы: в ходе исследования были применены методы моделирования в среде MATLAB / Simulink, теория неопределённых множеств, а также алгоритмы фазовой симметрии. Был разработан контроллер на основе нечеткой логики (FLC).

Результаты: На основе моделирования разработана интеллектуальная система фазового симметрирования с использованием контроллера нечёткой логики (FLC). В качестве входных параметров использованы фазные токи и угол фазовой несимметрии, а выходной переменной — управляющий сигнал на исполнительные устройства системы распределения фаз.

Ключевые слова: нечёткая логика, фазовая симметрия, PV панель, низковольтная сеть, ток в нейтрали, MATLAB/Simulink, интеллектуальное управление, FLC.



Intelligent phase symmetry algorithms in low-voltage networks with integrating PV panels

Ilhombek Kh. Kholiddinov¹, Mukhlisakhon M. Begmatova^{1,a)}

¹ DSc, doc., Ferghana State Technical University, Ferghana, 150100, Uzbekistan; i.xoliddinov@ferpi.uz <https://orcid.org/0000-0002-0120-4043>

^{1,a)} doctoral student, Ferghana State Technical University, Ferghana, 150100, Uzbekistan; muxlisa_begmatova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-4405-4943>

Relevance: The development of distributed generation based on photovoltaic systems (PV) is causing new technical challenges in low-voltage electric networks. One of the key problems is the phase asymmetry caused by the uneven connection of single-phase PV. The asymmetry of voltages and currents leads to a deterioration in the quality of electricity, increased losses, overload of the neutral wire and a decrease in the reliability of the power supply. In these conditions, the task of developing effective phase symmetry methods that ensure the stable operation of the network and the integration of renewable energy becomes particularly relevant. One of the promising approaches is the use of intelligent control systems, in particular, fuzzy logic (FLC), for adaptive phase control and control of FES operating modes.

Aim: Development of an intelligent method for controlling phase symmetry in low-voltage networks with distributed solar integration based on the use of fuzzy logic (FLC) in order to minimize neutral current, increase phase symmetry and reduce losses in the system.

Methods: In the course of the research, MATLAB/Simulink modeling methods, the theory of indefinite sets, as well as phase symmetry algorithms were applied. A fuzzy logic (FLC) based controller has been developed.

Results: The existing models and methods of complex optimization of short-term modes of electric power systems based on decomposition are improved. The results of the study of its effectiveness are presented using the example of an 8-node test scheme of the EPS.

Keywords: fuzzy logic, phase symmetry, PV panel, low voltage network, neutral current, MATLAB/Simulink, intelligent control, FLC.

1. Введение (Introduction)

В последние годы в Республике Узбекистан наблюдается активное внедрение фотоэлектрических систем (PV панелей) в рамках государственной политики по переходу к устойчивым источникам энергии и снижению углеродного следа. Особенно стремительное развитие получила распределённая солнечная генерация, что обусловлено высокой инсоляцией, поддержкой со стороны государства и растущим интересом со стороны частного сектора. Однако быстрый рост количества автономных PV-панелей, в особенности в сетях низкого напряжения, создаёт целый ряд технических проблем, связанных с нарушением симметрии фазных нагрузок, ростом токов в нейтральных проводниках и нестабильностью уровней напряжения.

На рисунке 1 представлено распределение установленной мощности PV панелей по регионам Узбекистана [1], что позволяет получить представление о масштабе и характере развития распределённой генерации. Как видно из диаграммы, наибольший объём установленной мощности сосредоточен в городе Ташкент — 79,8 МВт, что связано с высокой плотностью застройки, наличием технической инфраструктуры и высоким уровнем потребления электроэнергии. Значительно меньшие, но также заметные показатели зафиксированы в Сурхандарьинской области (20,5 МВт) и Ташкентской области (14,2 МВт), где также развиваются программы интеграции ВИЭ. Большинство других регионов демонстрируют умеренные значения установленной мощности в диапазоне от 10 до 13 МВт.

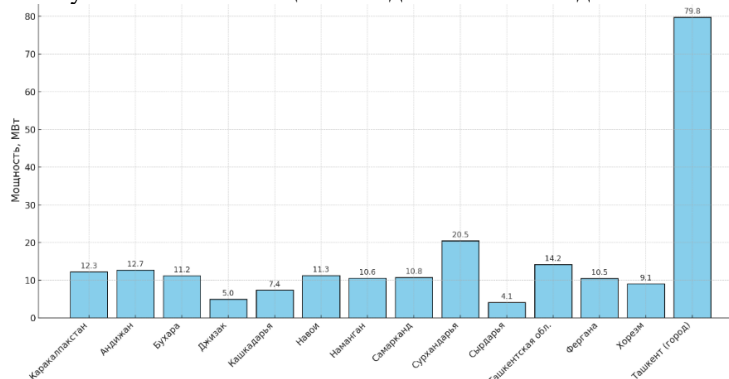


Рис. 1. Установленная мощность PV панелей в Узбекистане

Fig. 1. Installed PV panel capacity in Uzbekistan



В условиях активной реализации программ декарбонизации и перехода к устойчивому развитию, наблюдается значительное расширение масштабов интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в национальные и региональные энергосистемы. Среди различных видов ВИЭ одним из наиболее динамично развивающихся направлений является солнечная фотоэлектрическая генерация (PV панели), демонстрирующая ежегодные темпы прироста установленной мощности на уровне 35–40 % [2]. По данным на конец 2019 года глобальный совокупный объём установленной мощности солнечной генерации достиг 580 ГВт, что подчёркивает растущую значимость данного сектора в структуре мирового энергобаланса.

Современные PV панели классифицируются на три основные группы: наземные солнечные электростанции (Ground-mounted PV, GPV) [3, 4], плавающие фотоэлектрические установки (Floating PV, FPV) [5, 6] и распределённые фотоэлектрические системы на крышах зданий (Rooftop PV) [7, 8]. Следует отметить, что GPV и FPV, как правило, подключаются к энергосистеме через выделенные линии и высоковольтные фидеры, что минимизирует их локальное влияние на параметры распределительных сетей. В то же время распределённые фотоэлектрические панели на крышах чаще всего интегрируются непосредственно в сети низкого напряжения без централизованного планирования, что зачастую приводит к существенной фазной несимметрии.

Непропорциональное распределение однофазных PV-панелей по фазам вызывает несимметрию фазных напряжений и рост токов по нулевому проводу. Это, в свою очередь, приводит к увеличению активных потерь в линиях и трансформаторах распределительных сетей, а также может вызывать их перегрев и преждевременное старение оборудования [9, 10]. Дополнительно несимметрия может привести к превышению допустимых уровней тока в нейтральном проводнике и, как следствие, к ухудшению качества электроэнергии. В связи с этим многие энергоснабжающие организации вводят ограничения на предельно допустимую мощность подключаемых распределённых солнечных установок в сетях низкого напряжения [11–13].

Для решения данной проблемы в научной и инженерной литературе предлагается широкий спектр методов и подходов по снижению несимметрии напряжения. На протяжении последних десятилетий данная проблема остаётся актуальной, что обусловлено ростом доли распределённых ВИЭ и необходимостью обеспечения надёжности и качества электроснабжения. Все существующие подходы можно условно разделить на две крупные категории. Первая категория основана на использовании специализированных устройств компенсации токов нейтрали. К таким решениям относят пассивные фильтры гармоник и активные фильтры мощности, которые обеспечивают подавление нежелательных гармонических составляющих и компенсируют несимметричные токи, тем самым снижая нагрузку на нейтральный провод и улучшая качество напряжения. Вторая категория предполагает применение методов активного управления структурой распределительной сети. К ним относятся методы реконфигурации распределительных фидеров (Distribution Feeder Reconfiguration, DFR) и фазового симметрирования нагрузки. Подходы данной группы используют современные оптимизационные алгоритмы, такие как методы рою частиц, генетические алгоритмы, модифицированные алгоритмы кормления бактерий и другие комбинаторные методы [14]. Следует отметить, что данные задачи являются многокритериальными, высокоразмерными и обычно характеризуются сильной нелинейностью и недифференцируемостью целевых функций.

Несмотря на прогресс в данной области, реализация эффективных и экономически целесообразных решений по симметрированию фаз в сетях низкого напряжения остаётся одной из приоритетных задач, особенно в условиях массовой интеграции PV панелей. В связи с этим значительный интерес представляют методы автоматизированного управления фазами, интеллектуальные системы распределённого управления, а также гибридные подходы, объединяющие реконфигурацию сети и активные фильтры.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

PV панели на крыше несмотря на очевидные экологические и экономические преимущества, становятся основным источником сетевых проблем в сегменте 0.4 кВ. Отсутствие технической координации подключения приводит к нарастающей несимметрии фаз. Решение проблемы возможно только при использовании интеллектуальных алгоритмов симметрирования фаз, аккумуляторных систем и активных фильтров в сочетании с реконфигурацией фидеров.

Несимметрия фаз является одним из ключевых факторов, влияющих на качество электроэнергии в низковольтных распределительных сетях, особенно в условиях массовой интеграции однофазных фотоэлектрических установок (PV-панелей). В отличие от промышленных трехфазных нагрузок, распределённые бытовые установки зачастую

подключаются произвольно — без согласования с операторами сетей. Это приводит к несимметричным токам и напряжениям в фазах, увеличению токов в нейтральном проводе и росту активных потерь.

Несимметрию фаз можно характеризовать через неравенство вектора напряжений и токов по трем фазам:

$$U_{AB} \neq U_{BC} \neq U_{CA} \quad I_A \neq I_B \neq I_C \quad (1)$$

В идеальной симметричной системе амплитуды и фазы фазных напряжений и токов должны быть равны по модулю и равномерно смещены по фазе на 120° . В реальных условиях при несимметрии наблюдаются отклонения как по амплитуде, так и по фазовому углу.

Наиболее опасное следствие — увеличение тока в нейтральном проводнике, который в идеале должен быть равен нулю. В случае несимметрии:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (2)$$

где: I_0 — ток в нейтрали, I_A , I_B , I_C — токи в фазах А, В и С соответственно.

Чем сильнее несимметричны токи фаз, тем выше ток в нейтрали. Это приводит к:

- перегреву кабельных линий и шин,
- преждевременному старению трансформаторного оборудования,
- возникновению аварийных режимов.

Для количественного анализа степени фазной несимметрии предлагается использовать функционал дисперсии тока по фазам. Пусть I_{cp} — среднее значение токов по фазам:

$$I_{cp} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (3)$$

Тогда функция оценки несимметрии может быть представлена в виде:

$$\Phi = \sum_{i \in \{A, B, C\}} (|I_i - I_{cp}|^2) \quad (4)$$

Чем выше значение Φ , тем выше степень несимметрии. Целью управления является минимизация этого критерия. Такой подход позволяет использовать как аналитические, так и численные методы оптимизации.

При проектировании систем симметрирования фаз необходимо решать следующую задачу оптимизации системы, в виде целевой функции которой дана ниже:

$$\min \Phi = \sum_{i \in \{A, B, C\}} (|I_i - I_{cp}|^2) \quad (5)$$

Общая подключённая мощность PV панелей не должна превышать допустимый предел:

$$\sum_{i=1}^n P_{PVi} \leq P_{max} \quad (6)$$

Фазовые переключения должны происходить не чаще заданного интервала времени (например, 1 раз в 15 минут) — для исключения перегрузок коммутационного оборудования. Для минимизации значения Φ в условиях динамически меняющейся генерации и нагрузки эффективно использовать алгоритмы нечеткой логики (Fuzzy Logic Controller).

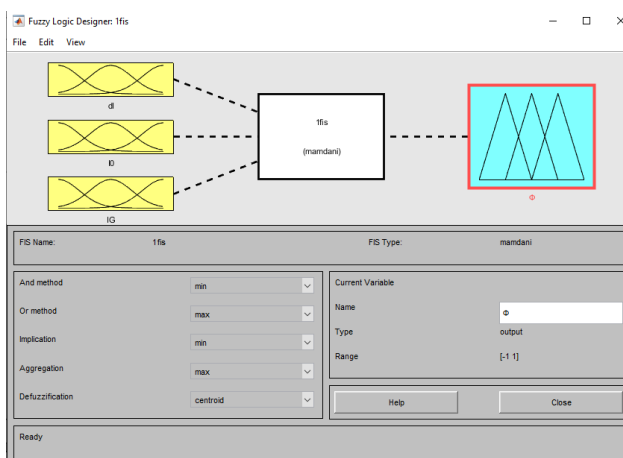


Рис.2. Входные и выходные параметры системы

Fig.2. Input and output parameters of the system

На рисунке 2 представлено окно программной среды MATLAB, демонстрирующее интерфейс Fuzzy Logic Designer. Данный модуль позволяет задавать структуру нечеткого контроллера, включая состав входных и выходной переменных. В рассматриваемой модели

входами служат отклонение фазных токов (ΔI), текущее значение тока I_0 , а также величина активной мощности, генерируемой на соответствующей фазе. Выходом системы является управляющее воздействие — распределение фазовых переключений, ток зарядки/разрядки аккумулятора или активация фильтрующих устройств. Преимущества предложенной модели заключаются в следующем: простота интеграции в системы автоматического управления, возможность численного решения с использованием разных методов и алгоритмов, масштабируемость на произвольное количество фаз и узлов распределения, совместимость с существующими SCADA и EMS платформами.

Реализация данной модели в реальном времени позволяет существенно повысить устойчивость низковольтных сетей, снизить эксплуатационные издержки и продлить срок службы оборудования. Особенно актуально это для стран с активной программой «солнечных домов», где высока доля однофазной генерации без централизованного учёта несимметрии фаз.

3. Результаты (Results)

Для оценки эффективности предложенного подхода по фазовому симметрированию с применением нечеткого регулятора (FLC) была разработана модель в среде MATLAB/Simulink. Структурная схема разработанной модели представлена на рисунке 3. Она отражает взаимодействие ключевых компонентов системы управления фазовой симметрией в условиях интеграции PV панелей в низковольтную сеть.

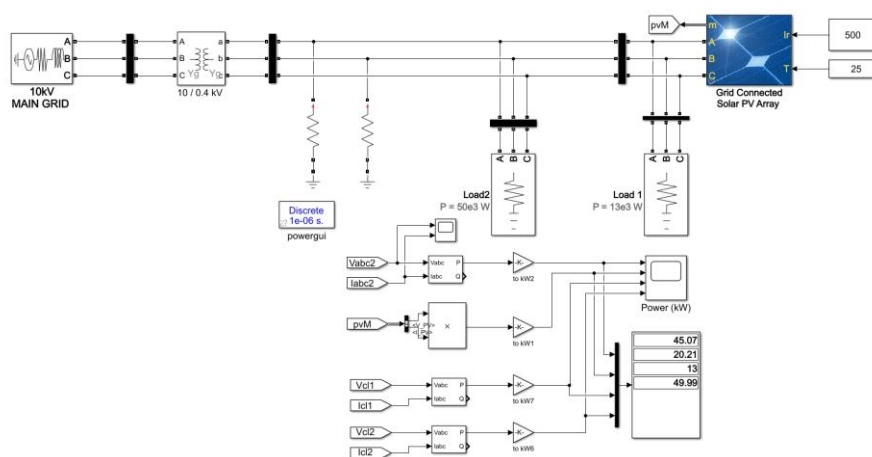


Рис.3. Структурная схема модели
Fig.3. Structural diagram of the model

Принцип работы модели следующий: Трёхфазный источник питания через понижающий трансформатор 10/0,4 кВ формирует стандартное напряжение низковольтной сети. К выходу трансформатора подключён участок трёхфазной линии, на котором размещены трёхфазные и однофазные нагрузки различной мощности. Такое построение позволяет воспроизвести реальные условия распределения потребителей и оценить влияние их неравномерного включения на формирование несимметрии токов и напряжений.

С правой стороны модели подключена фотоэлектрическая установка, включающая PV-массив и инвертор, подающий активную мощность в сеть. Управление инвертором осуществляется векторным методом на основе измерения фазных токов и напряжений. В нижней части модели отображается распределение активной мощности по фазам, что позволяет оценить взаимодействие фотоэлектрической генерации с однофазными и трёхфазными нагрузками, а также анализировать изменения режима сети при различных условиях работы.

Для реализации контроля и управления фазной симметрией в низковольтной сети с распределённой фотоэлектрической генерацией в модели был разработан нечёткий логический контроллер (Fuzzy Logic Controller, FLC). Данный регулятор обеспечивает интеллектуальное принятие решений по оптимальному перераспределению фазовых нагрузок в режиме реального времени. Его архитектура представлена на рисунке 4 и включает в себя этапы фазификации входных данных, базу правил и механизм дефазификации, что обеспечивает адаптивную и устойчивую работу системы при изменяющихся условиях генерации и потребления.

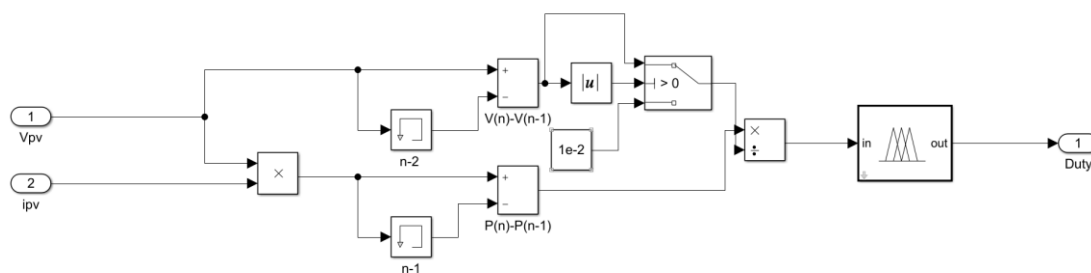


Рис.4. Архитектуры FLC-контроллера

Fig.4. FLC controller architecture

Первые два входных узла подают мгновенные значения напряжения и тока солнечной панели, после чего блок умножения формирует текущую электрическую мощность. Далее два блока задержки сохраняют предыдущие значения напряжения и мощности, что позволяет вычислить их разности в соответствующих вычитателях. Полученные изменения напряжения и мощности проходят через нормирующий и модульный блоки, а затем через логический блок сравнения, который определяет направление последующей коррекции управляющего сигнала. После этого схема формирует масштабирующий коэффициент в умножителе, который подаётся на нечеткий регулятор. Завершающий блок преобразует вычисленное управляющее воздействие в итоговой сигнал, определяющий величину управляющего параметра для коммутации силового преобразователя.

Выходной сигнал контроллера – команда на переключение фазы ($\Delta\Phi$), который принимает одно из трёх значений: «фаза А», «фаза В», «фаза С». Для формирования вывода используется правило вывода по методу Mamdani, при этом используется 9 правил типа IF–THEN, охватывающих все возможные комбинации входных состояний. Такая архитектура обеспечивает адаптивную реакцию системы на изменения в симметрии фаз и позволяет уменьшить ток в нулевом проводе, повысив устойчивость сети к несимметричным нагрузкам и распределённой генерации. В таблице 1 подробно дано описание данного контроллера.

Таблица 1. Описание FLC-контроллера

Table 1. Description of the FLC controller

№	Параметр	Роль в FLC	Тип входа/выхода	Диапазон нормализации	Тип функции принадлежности
1	$\Delta I_1 - \Delta I_3$	Вход 1	Отклонение тока по фазам А/В/С	$[-1, +1]$	Треугольная (Triangular)
2	I_0	Вход 2	Ток в нейтрали	$[0, 1]$	Треугольная (Triangular)
3	I_g	Вход 3	Величина активной генерации на фазе	$[0, 1]$	Треугольная (Triangular)
4	$\Delta\Phi$	Выход	Команда переключения фазной группы $(-1, 0, +1)$	Дискретный выход	Четкая логика (Defuzzification via centroid)

Для обеспечения корректного функционирования и повышения точности стадии фазификации в FLC-контроллере был сформирован полный набор правил нечёткого вывода. Эти правила охватывают все возможные комбинации входных состояний и соответствующие им управляющие воздействия. В результате для системы было разработано 124 правила, что позволило повысить детализированность управления и обеспечить устойчивую реакцию контроллера на различные режимы работы. На рисунке 5 представлена сформированная база нечётких правил, используемых для FLC-контроллера.

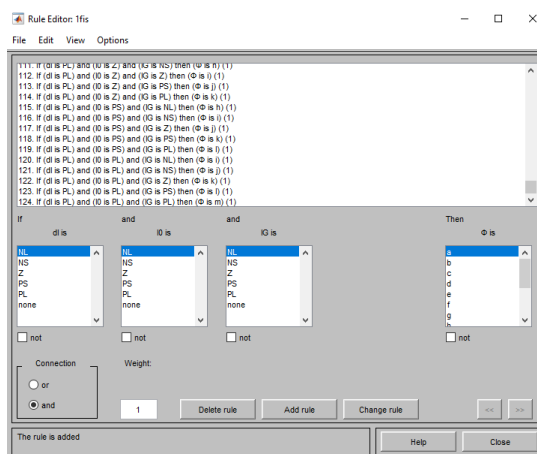


Рис.5. База правил нечёткой логики
Fig.5. Fuzzy Logic rule base

4. Обсуждение (Discussion)

В рамках проведённого исследования были получены графические зависимости, иллюстрирующие изменение выходных параметров системы до и после внедрения нечеткого логического контроллера (FLC). Эти графики наглядно демонстрируют динамику работы системы и позволяют провести качественную и количественную оценку эффективности разработанного метода управления фазовой симметрией.

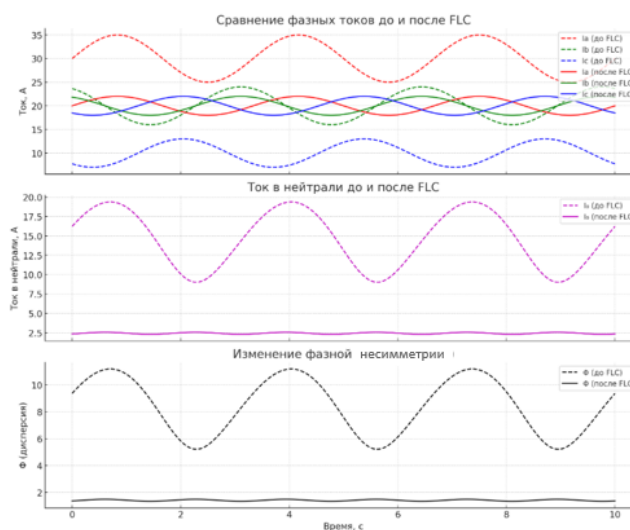


Рис.6. Изменение показателей выходных сигналов
Fig.6. Changes in output values

Анализ нормативно-правовой базы, текущих показателей развития и распределения солнечных фотоэлектрических установок в Узбекистане показывает значительный потенциал дальнейшего расширения сектора малой распределённой генерации. Вместе с тем рост количества подключённых маломощных однофазных PV панелей в низковольтных сетях создаёт новые вызовы для энергоснабжающих организаций, включая проблемы фазной несимметрии [16], роста токов нейтрали и увеличения эксплуатационных потерь.

С учётом масштабов реализации программы «Солнечный дом» и других инициатив, направленных на активное привлечение частных инвестиций в сектор ВИЭ, становится очевидной необходимость разработки и внедрения новых технических и интеллектуальных решений, способных обеспечить стабильную и качественную работу распределительных сетей в условиях высокой доли распределённой генерации.

В связи с этим особый интерес представляет применение современных методов автоматизированного симметрирования фаз [17], путём динамической перенастройки подключений или использования гибридных систем управления с аккумуляторными батареями



и интеллектуальными регуляторами [18]. Решение данных задач позволит не только повысить надёжность и энергоэффективность существующих сетей низкого напряжения [19], но и расширить возможности их модернизации в условиях активного роста числа подключаемых потребителей с собственными источниками генерации [20].

5. Заключение (Conclusion)

На основе материала статьи можно сделать следующие основные выводы.

1. Симметрия фазных токов: Внедрение нечеткого регулятора (FLC) позволило значительно улучшить симметрию токов в трёх фазах. До применения FLC наблюдалась выраженная неравномерность распределения токов между фазами, в то время как после его активации токи фаз (I_a , I_b , I_c) приблизились к равным значениям, что свидетельствует об эффективном симметрировании.
2. Снижение тока в нейтральном проводнике: Анализ графиков показал, что до применения FLC ток в нулевом проводнике (I_n) достигал значительных пиковых значений, указывающих на высокий уровень фазной несимметрии. После применения FLC амплитуда тока в нейтрали существенно снизилась, что подтверждает уменьшение дисбаланса между фазами.
3. Стабилизация коэффициента фазной несимметрии (Φ): До включения FLC коэффициент фазной несимметрии демонстрировал значительные колебания. После реализации управляющего воздействия FLC наблюдается устойчивое снижение и стабилизация значения Φ , что дополнительно подтверждает эффективность предложенного метода фазового симметрирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Президента Республики Узбекистан, от 16.02.2023 г. № ПП-57 О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году.
2. Jadeja K. Major. Technical issues with increased PV penetration on the existing electrical grid // Murdoch University, 2012. <https://doi.org/https://core.ac.uk/download/pdf/11241964.pdf>.
3. Lu H, Zhao W. Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system // *Appl Energy* 2018;220:514–26. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.095>.
4. Peters L, Madlener R. Economic evaluation of maintenance strategies for ground-mounted solar photovoltaic plants // *Appl Energy* 2017;199:264–80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.060>.
5. Zhou Y, Chang F-J, Chang L-C, Lee W-D, Huang A, Xu C-Y, et al. An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies // *Appl Energy* 2020;275:115389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115389>.
6. Wang Q, Zhu Z, Wu G, Zhang X, Zheng H. Energy analysis and experimental verification of a solar freshwater self-produced ecological film floating on the sea // *Appl Energy* 2018;224:510–26. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.010>.
7. Hong T, Lee M, Koo C, Jeong K, Kim J. Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis // *Appl Energy* 2017;194:320–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.001>.
8. Cole W, Lewis H, Sigrin B, Margolis R. Interactions of rooftop PV deployment with the capacity expansion of the bulk power system // *Appl Energy* 2016;168:473–81. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.004>.
9. Carpinelli G, Mottola F, Proto D, Varilone P. Minimizing unbalances in low-voltage microgrids: Optimal scheduling of distributed resources // *Appl Energy* 2017;191:170–82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.057>.
10. Zehir MA, Batman A, Sonmez MA, Font A, Tsiamitros D, Stimoniari D, et al. Impacts of microgrids with renewables on secondary distribution networks // *Appl Energy* 2017;201:308–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.138>.
11. Wang L, Yan R, Saha TK. Voltage regulation challenges with unbalanced PV integration in low voltage distribution systems and the corresponding solution // *Appl Energy* 2019;256:113927. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113927>.
12. Ma K, Li R, Hernando-Gil I, Li F. Quantification of Additional Reinforcement Cost from Severe Three-Phase Imbalance // *IEEE Trans Power Syst* 2017;32:4143–4. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2635383>.
13. Yaghoobi J, Islam M, Mithulananthan N. Analytical approach to assess the loadability of unbalanced distribution grid with rooftop PV units // *Appl Energy* 2018;211:358–67. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.030>.



14. Islam MR, Lu H, Hossain MJ, Li L. Mitigating unbalance using distributed network reconfiguration techniques in distributed power generation grids with services for electric vehicles: A review // *J Clean Prod* 2019;239:117932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117932>.
15. Ramos-figueroa O, Quiroz-castellanos M, Mezura-montes E. Metaheuristics to solve grouping problems: A review and a case study // *Swarm Evol Comput* 2020;53:100643. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100643>.
16. Begmatova M.M., Kasimakhunova A.M., Kholiddinov I.Kh. Modeling a photovoltaic system with a bidirectional DC-DC converter in MATLAB Simulink based on Fuzzy logic. *International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing, and Communication (ICETECC) 979-8-3315-4338-9/25/\$31.00 IEEE*, pp. 1-6.
17. Xoliddinov I.X., Begmatova M.M. 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.
18. Бегматова. М.М. Интеллектуальное управление накопителями энергии в сетях с солнечной генерацией. *Международная научная и научно-техническая конференция на тему «Повышение энергоэффективности региональной системы электроснабжения Ферганской области» Фергана 2025*, стр. 216-219.
19. Аллаев К.Р., Холиддинов И.Х., Холиддинова М.М. Методология оценки эффективности электрических сетей с использованием нечеткой логики // *Электричество*, стр. 4-14 2025.
20. Ilkhombek Kholiddinov, Mirzokhid Sharobiddinov, Mashkhurakhon Kholiddinova, Sokhib Komolddinov, Afzal Qodirov, Saidislomkhon Tukhtasinov. The methodology for reactive power control to ensure voltage quality using fuzzy logic // *EPJ Web of Conferences* 318, 05011, 2025.

REFERENCES

1. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan, dated 02/16/2023, No. PP-57 On measures to accelerate the introduction of renewable energy sources and energy-saving technologies in 2023. (In Russian).
2. Jadeja K. Major. Technical issues with increased PV penetration on the existing electrical grid// *Murdoch University*, 2012. <https://doi.org/https://core.ac.uk/download/pdf/11241964.pdf>.
3. Lu H, Zhao W. Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system // *Appl Energy* 2018;220:514–26. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.095>.
4. Peters L, Madlener R. Economic evaluation of maintenance strategies for ground-mounted solar photovoltaic plants // *Appl Energy* 2017;199:264–80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.060>.
5. Zhou Y, Chang F-J, Chang L-C, Lee W-D, Huang A, Xu C-Y, et al. An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies // *Appl Energy* 2020;275:115389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115389>.
6. Wang Q, Zhu Z, Wu G, Zhang X, Zheng H. Energy analysis and experimental verification of a solar freshwater self-produced ecological film floating on the sea // *Appl Energy* 2018;224:510–26. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.010>.
7. Hong T, Lee M, Koo C, Jeong K, Kim J. Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis // *Appl Energy* 2017;194:320–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.001>.
8. Cole W, Lewis H, Sigrin B, Margolis R. Interactions of rooftop PV deployment with the capacity expansion of the bulk power system // *Appl Energy* 2016;168:473–81. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.004>.
9. Carpinelli G, Mottola F, Proto D, Varilone P. Minimizing unbalances in low-voltage microgrids: Optimal scheduling of distributed resources // *Appl Energy* 2017;191:170–82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.057>.
10. Zehir MA, Batman A, Sonmez MA, Font A, Tsiamitros D, Stimoniari D, et al. Impacts of microgrids with renewables on secondary distribution networks // *Appl Energy* 2017;201:308–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.138>.
11. Wang L, Yan R, Saha TK. Voltage regulation challenges with unbalanced PV integration in low voltage distribution systems and the corresponding solution // *Appl Energy* 2019;256:113927. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113927>.
12. Ma K, Li R, Hernando-Gil I, Li F. Quantification of Additional Reinforcement Cost from Severe Three-Phase Imbalance // *IEEE Trans Power Syst* 2017;32:4143–4. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2635383>.
13. Yaghoobi J, Islam M, Mithulanathan N. Analytical approach to assess the loadability of unbalanced distribution grid with rooftop PV units // *Appl Energy* 2018;211:358–67. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.030>.



14. Islam M.R, Lu H, Hossain MJ, Li L. Mitigating unbalance using distributed network reconfiguration techniques in distributed power generation grids with services for electric vehicles: A review // *J Clean Prod* 2019;239:117932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117932>.
15. Ramos-figueroa O, Quiroz-castellanos M, Mezura-montes E. Metaheuristics to solve grouping problems: A review and a case study // *Swarm Evol Comput* 2020;53:100643. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100643>.
16. Begmatova M.M., Kasimakhunova A.M., Kholiddinov I.Kh. Modeling a photovoltaic system with a bidirectional DC-DC converter in MATLAB Simulink based on Fuzzy logic. International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing, and Communication (ICETECC) 979-8-3315-4338-9/25/\$31.00 IEEE, pp. 1-6.
17. Xoliddinov I.X., Begmatova M.M. 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, 312-320
18. Begmatova M.M. Intelligent management of energy storage devices in solar-powered networks // International Scientific and Technical Conference on "Improving the energy efficiency of the regional electricity supply system of the Ferghana region" 2025, pp. 216-219. (In Russian.)
19. Allaev K.R., Kholiddinov I.H., Kholiddinova M.M. Methodology for evaluating the efficiency of electrical networks using fuzzy logic // *Electricity* 2025, pp. 4-14. (In Russian).
20. Kholiddinov Ilkhombek, Sharobiddinov Mirzokhid, Kholiddinova Mashkhourakhon, Komolddinov Sokhib, Qodirov Afzal, Tukhtasinov Saidislomkhon. The methodology for reactive power control to ensure voltage quality using fuzzy logic. *EPJ Web of Conferences* 318, 05011, 2025.