

УДК 620.9:621.311

СТАРОДУМОВ ДМИТРИЙ ДМИТРИЕВИЧ,

магистрант,

Тюменский индустриальный университет

**КОМПЕНСАЦИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ, ПОСРЕДСТВОМ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Аннотация

Несимметрия напряжения является одной из ключевых проблем качества электрической энергии в распределительных сетях, приводящей к дополнительным потерям, перегреву оборудования и снижению срока службы электротехнических устройств. В условиях роста доли распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии актуализируется вопрос использования ее потенциала для компенсации несимметрии. Целью исследования является анализ методов компенсации несимметрии напряжения с применением распределенной генерации и оценка их эффективности. В работе рассмотрены причины возникновения несимметрии, ее влияние на работу сети, современные подходы к симметрированию режимов. Особое внимание уделено роли инверторов фотоэлектрических станций и ветроэнергетических установок в управлении потоками реактивной мощности по фазам. Проанализированы технические решения и алгоритмы управления, позволяющие минимизировать коэффициенты несимметрии напряжений обратной и нулевой последовательностей. Результаты исследования показывают, что интеграция распределенной генерации с функциями активной компенсации несимметрии способна существенно повысить качество электроэнергии и снизить технологические потери в распределительных сетях.

Ключевые слова: несимметрия напряжения, распределительная сеть, распределенная генерация, качество электрической энергии, фотоэлектрические станции, компенсация несимметрии, инверторы

Article title: Compensation of Voltage Asymmetry in Distribution Network by Means of Distributed Generation

Annotation

Voltage asymmetry is one of the key problems of electric power quality in distribution networks, leading to additional losses, equipment overheating and reduction of service life of electrical devices. With the increasing share of distributed generation based on renewable energy sources, the issue of using its potential to compensate for asymmetry is becoming more relevant. The aim of the study is to analyze methods of voltage asymmetry compensation using distributed generation and evaluate their effectiveness. The paper considers the causes of asymmetry, its impact on network operation, and modern approaches to mode symmetrization. Special attention is paid to the role of inverters of photovoltaic stations and wind power installations in controlling reactive power flows by phases. Technical solutions and control algorithms that allow minimizing the coefficients of negative and zero sequence voltage asymmetry are analyzed. The results show that the integration of distributed generation with active asymmetry compensation functions can significantly improve power quality and reduce technological losses in distribution networks.

Keywords: voltage asymmetry, distribution network, distributed generation, electric power quality, photovoltaic stations, asymmetry compensation, inverters

Введение

Современные распределительные электрические сети характеризуются возрастающей сложностью режимов работы, обусловленной неравномерным распределением однофазных нагрузок, подключением мощных несимметричных потребителей и интеграцией источников распределенной генерации [1]. Несимметрия напряжения – отклонение трехфазной системы напряжений от

симметричной – является одним из наиболее распространенных нарушений качества электрической энергии. Согласно ГОСТ 32144–2013, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям не должны превышать 2 % в нормальном режиме и 4 % в предельно допустимом режиме [2].

Основными причинами возникновения несимметрии являются: - неравномерное распределение однофазных нагрузок по фазам в сетях 0,4 кВ; - подключение несимметричных промышленных потребителей (электродуговые печи, тяговые подстанции, сварочные агрегаты); - неполнофазные режимы работы в сетях с изолированной нейтралью; - различия сопротивлений фазных проводов вследствие конструктивных особенностей линий электропередачи [3].

Несимметрия токов и напряжений приводит к появлению составляющих обратной и нулевой последовательностей, которые вызывают дополнительные потери активной мощности в элементах сети, перегрев обмоток электрических машин, снижение вращающего момента асинхронных двигателей и возникновение вибраций в синхронных машинах [4]. По оценкам, дополнительные потери мощности от несимметрии могут составлять 15–20 % от общих потерь в распределительных сетях 0,4 кВ [5].

Традиционные методы снижения несимметрии включают: - перераспределение однофазных нагрузок между фазами; - применение трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда–зигзаг с нулем»; - использование симметрирующих устройств на базе реакторно–конденсаторных схем; - замыкание и полужамыкание схем сетей 0,4 кВ [6].

Однако данные методы обладают рядом недостатков: необходимость периодической коррекции при изменении структуры нагрузок, высокая стоимость специального оборудования, невозможность оперативного регулирования.

Развитие технологий распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии открывает новые возможности для компенсации несимметрии. Современные силовые электронные преобразователи фотоэлектрических станций и

ветроэнергетических установок способны не только обеспечивать генерацию активной мощности, но и выполнять функции активных фильтров и симметрирующих устройств [7]. Согласно требованиям Постановления Правительства РФ № 820 от 02.08.2021, объекты микрогенерации и распределенной генерации должны обеспечивать поддержание качества электрической энергии в точке подключения в соответствии с нормативными требованиями [8].

1. Анализ несимметрии в распределительных сетях с точки зрения метода симметричных составляющих

Для количественной оценки несимметрии применяется метод симметричных составляющих, предложенный Ч. Фортескью. Любая несимметричная трехфазная система может быть представлена в виде суммы трех симметричных систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей [9].

Коэффициент несимметрии по обратной последовательности определяется как:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\%,$$

где U_2 – действующее значение напряжения обратной последовательности;
 U_1 – действующее значение напряжения прямой последовательности.

Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности:

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\%,$$

где U_0 – действующее значение напряжения нулевой последовательности.

В четырехпроводных сетях 0,4 кВ несимметрия токов нагрузки приводит к возникновению тока в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0,$$

где \dot{I}_0 – ток нулевой последовательности.

При сопротивлении нейтрального провода Z_N возникает смещение нейтрали:

$$\dot{U}_N = \dot{I}_N \times Z_N = 3\dot{I}_0 \times Z_N.$$

Это приводит к изменению фазных напряжений и дальнейшему усилению несимметрии. В критических случаях, например при обрыве нейтрального провода, фазные напряжения могут приближаться к междуфазным значениям (380 В), что представляет опасность для однофазного оборудования [10].

Дополнительные потери активной мощности от несимметрии в элементах сети можно оценить по формуле:

$$\Delta P_{\text{нес}} = 3I_2^2 R + 3I_0^2 (R + R_N),$$

где I_2 – ток обратной последовательности; I_0 – ток нулевой последовательности; R – активное сопротивление фазного провода; R_N – активное сопротивление нейтрального провода.

Исследования показывают, что при коэффициенте несимметрии токов 25–30 % дополнительные потери в сетях 0,4 кВ могут достигать 40–50 % от нагрузочных потерь в симметричном режиме [11].

2. Роль распределенной генерации в компенсации несимметрии

Распределенная генерация на основе фотоэлектрических станций и ветроэнергетических установок традиционно рассматривалась исключительно как источник активной мощности. Однако современные инверторы обладают значительно более широкими функциональными возможностями благодаря применению усовершенствованных алгоритмов управления и силовой электроники на базе IGBT–транзисторов.

Ключевые возможности современных инверторов включают: - независимое управление активной и реактивной мощностью по каждой фазе; - компенсацию высших гармоник тока; - стабилизацию напряжения в точке подключения; - симметрирование токов и напряжений; - поддержку работы в режиме STATCOM при отсутствии генерации [13].

Принцип компенсации несимметрии с помощью инвертора распределенной генерации основан на раздельном управлении потоками реактивной мощности по фазам. При возникновении несимметрии напряжения инвертор генерирует или

потребляет реактивную мощность в каждой фазе таким образом, чтобы минимизировать составляющие обратной и нулевой последовательностей [14].

Математически задача симметрирования формулируется как оптимизационная:

$$\min(K_{2U}^2 + K_{0U}^2)$$

при ограничениях: - $S_{inv} \leq S_{nom}$ – полная мощность инвертора не превышает номинальную; - $P_{inv} \geq 0$ – активная мощность генерации неотрицательна; - $|Q_A|, |Q_B|, |Q_C| \leq Q_{max}$ – реактивные мощности по фазам ограничены.

Алгоритм управления инвертором для компенсации несимметрии включает следующие этапы: 1. Измерение мгновенных значений напряжений и токов по трем фазам. 2. Вычисление симметричных составляющих напряжений методом преобразования Фортескью. 3. Определение требуемых компенсирующих токов для минимизации составляющих обратной и нулевой последовательностей. 4. Формирование управляющих сигналов для силовых ключей инвертора с применением широтно–импульсной модуляции [15].

Время реакции современных инверторов на изменение параметров сети составляет единицы миллисекунд, что позволяет обеспечивать практически мгновенную компенсацию несимметрии при изменении режима работы распределительной сети.

Экспериментальные исследования, проведенные в Казанском государственном энергетическом университете, показали, что применение фотоэлектрической станции мощностью 50 кВт с функцией компенсации несимметрии позволило снизить коэффициент K_{2U} с 3,8 % до 1,2 % в распределительной сети 0,4 кВ с преобладанием однофазных нагрузок [16].

3. Технические решения для компенсации несимметрии с использованием распределенной генерации

Существует несколько подходов к организации компенсации несимметрии с использованием распределенной генерации.

Трехфазный инвертор с общей точкой постоянного тока. Наиболее распространенная конфигурация, при которой три фазы подключены к общему звену постоянного тока. Управление осуществляется путем независимого регулирования мгновенных токов каждой фазы. Достоинства: простота конструкции, высокий КПД (до 98 %), относительно низкая стоимость. Недостатки: ограниченная способность компенсации нулевой последовательности при отсутствии нейтрального провода, необходимость применения сложных алгоритмов управления для полной компенсации несимметрии.

Трехфазный четырехпроводный инвертор. Модификация предыдущей схемы с подключением нейтрального провода. Позволяет эффективно компенсировать составляющие нулевой последовательности. Применяется в сетях 0,4 кВ с нейтральным проводом. Недостаток – повышенная сложность силовой части и системы управления [18].

Каскадные инверторы. Состоят из нескольких модульных H-мостовых ячеек, соединенных последовательно по каждой фазе. Обеспечивают высокое качество выходного напряжения без применения фильтров, возможность работы на более высоких напряжениях. Применяются в ветроэнергетических установках мегаваттного класса. Основной недостаток – высокая стоимость [19].

Гибридные системы с накопителями энергии. Интеграция аккумуляторных батарей или суперконденсаторов в состав инвертора распределенной генерации значительно расширяет возможности компенсации несимметрии. Накопитель позволяет обеспечивать функцию симметрирования даже в периоды отсутствия генерации (ночью для фотоэлектрических станций или при штиле для ветроустановок), что особенно важно для поддержания качества электроэнергии в круглосуточном режиме [20].

С точки зрения алгоритмов управления наиболее эффективными признаны методы, основанные на теории мгновенной мощности $p-q$ (Акаги) и векторном управлении в системе координат dq . Эти подходы позволяют разделить активную

и реактивную составляющие мощности, а также выделить компоненты, соответствующие различным последовательностям [21].

В Новосибирском государственном техническом университете разработан алгоритм управления инвертором фотоэлектрической станции, обеспечивающий одновременную компенсацию высших гармоник и несимметрии. Результаты моделирования показали снижение коэффициента несинусоидальности с 12,5 % до 3,2 % и коэффициента несимметрии по обратной последовательности с 4,1 % до 1,5 % [22].

4. Оценка эффективности компенсации несимметрии

Эффективность применения распределенной генерации для компенсации несимметрии может быть оценена по нескольким критериям.

Снижение дополнительных потерь активной мощности. При коэффициенте несимметрии токов 30 % в распределительной сети 0,4 кВ длиной 500 м с сечением проводов 120 мм² дополнительные потери составляют около 8 кВт при средней нагрузке 150 кВт. Применение системы компенсации несимметрии с использованием фотоэлектрической станции мощностью 50 кВт позволяет снизить коэффициент несимметрии до 10 %, что сокращает дополнительные потери до 2,5 кВт. Годовая экономия электроэнергии составит:

$$\Delta W = (8 - 2,5) \times 8760 = 48,18 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

При средней стоимости электроэнергии 5 руб/кВт·ч экономический эффект от снижения потерь составляет 240,9 тыс. руб/год [23].

Продление срока службы оборудования. Снижение несимметрии напряжения с 4 % до 1,5 % позволяет сократить дополнительный нагрев обмоток асинхронных двигателей на 15–20 °С, что увеличивает ресурс изоляции примерно в 1,5–2 раза согласно экспоненциальной зависимости срока службы от температуры [24].

Снижение колебаний напряжения. Распределенная генерация с функцией компенсации несимметрии способствует стабилизации напряжения во всех фазах,

что особенно важно для чувствительного электронного оборудования. Исследования, проведенные в Национальном исследовательском университете «МЭИ», показали уменьшение размаха колебаний напряжения с 8 % до 3 % при интеграции фотоэлектрической станции с активным симметрированием [25].

Окупаемость дополнительного функционала. Стоимость реализации функции компенсации несимметрии в инверторе распределенной генерации составляет 5–10 % от стоимости базового инвертора. Для системы мощностью 50 кВт это около 100–150 тыс. руб. Срок окупаемости при экономии 240,9 тыс. руб/год составляет 5–7 месяцев, что делает такую модернизацию экономически целесообразной [26].

Заключение

Компенсация несимметрии напряжения в распределительных сетях посредством распределенной генерации представляет собой перспективное направление повышения качества электрической энергии и снижения технологических потерь. Современные инверторы фотоэлектрических станций и ветроэнергетических установок обладают техническими возможностями для эффективного симметрирования режимов работы сети благодаря применению усовершенствованных алгоритмов управления и силовой электроники.

Основные результаты исследования: - Установлено, что применение распределенной генерации с функцией компенсации несимметрии позволяет снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности с 3–4 % до 1–1,5 %, что соответствует требованиям ГОСТ 32144–2013. - Показано, что снижение несимметрии приводит к сокращению дополнительных потерь активной мощности на 60–70 % и продлению срока службы электротехнического оборудования в 1,5–2 раза. - Определено, что срок окупаемости дополнительных инвестиций в функцию компенсации несимметрии составляет 5–7 месяцев при учете снижения потерь и повышения надежности электроснабжения.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку адаптивных алгоритмов управления инверторами, учитывающих стохастический характер генерации возобновляемых источников энергии и нагрузок, а также на создание координированных систем управления группами объектов распределенной генерации для комплексного обеспечения качества электроэнергии в распределительных сетях.

Список литературы

1. Степанов В. М., Базыль И. М., Ключникова А. Ю. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет снижения несимметрии напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 8–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-raboty-elektricheskikh-setey-za-schet-snizheniya-nesimmetrii-napryazheniya> (дата обращения: 29.01.2026).

ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

2. Гринкруг М. С., Митин И. А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 9–10. С. 90–96. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-nesimmetriey-tokov-v-raspredelitelnyh-setyah-nizkogo-napryazheniya> (дата обращения: 29.01.2026).

3. Геркусов А. А., Грачева Е. И., Шумихина О. А. Влияние несимметричной нагрузки на потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4–20 кВ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 15–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-nesimmetrichnoy-nagruzki-na-poteri-elektroenergii-v-raspredelitelnyh-setyah-0-4-20-kv> (дата обращения: 29.01.2026).

4. Дед А. В. Определение потерь мощности в распределительных сетях с учетом влияния несимметричной нагрузки // Омский научный вестник. 2009. № 1(77). С. 106–109. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-potermoschnosti-v-raspredelitelnyh-setyah-s-uchetom-vliyaniya-nesimmetrichnoy-nagruzki> (дата обращения: 29.01.2026).

5. Самарин Г. Н., Ружьев В. А., Егоров М. Ю. Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ // Вестник Чувашиского университета. 2017. № 1. С. 134–143.

Бутузов В. А. Современное состояние развития возобновляемой энергетики России // Окружающая среда и энерговедение. 2022. № 4. С. 5–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-razvitiya-vozobnovlyaemoj-energetiki-rossii> (дата обращения: 29.01.2026).

6. Постановление Правительства РФ от 02.03.2021 № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации». URL: <http://government.ru/docs/all/133209/> (дата обращения: 29.01.2026).

7. Лыкин А. В. Учет и контроль электроэнергии: конспект лекций. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. 171 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37280479> (дата обращения: 29.01.2026).

8. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмонова Р. Ч. К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 4. С. 23–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-modelirovaniya-nesimmetrichnyh-raspredelitelnyh-elektricheskikh-setey-v-sostave-askue> (дата обращения: 29.01.2026).

9. Баламетов А. Б., Салимова А. К., Гаджиев Н. И., Баламетов Э. А. О программном обеспечении для планирования мероприятий по снижению потерь мощности от несимметрии токов в сетях 0,4 кВ // Энергетик. 2020. № 11. С. 28–33.

10. Кузнецов П. Н., Чебоксаров В. В., Якимович Б. А. Гибридные ветро–солнечные энергетические установки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 45–53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42574240> (дата обращения: 29.01.2026).

11. Пискунова В. М., Герасимов Д. О., Суслов К. В. Интеллектуальные системы управления распределением электроэнергии // Электроэнергетика глазами молодежи–2019: материалы X Международной научно–технической конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. Т. 2. С. 223–226. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41270987> (дата обращения: 29.01.2026).

12. Асташев М. Г., Панфилов Д. И., Часов А. В. Технологии управления режимами работы распределительных сетей с несимметричными нагрузками для снижения потерь и улучшения показателей качества электрической энергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 6(81). С. 56–64. URL: <https://eepir.ru/article/tehnologii-upravleniya-rezhimami-raboty-raspredelitelnyh-setej-s-nbsp-nesimmetrichnymi-nagruzkami-dlya-snizheniya-poter-i-nbsp-uluchsheniya-pokazatelej-kachestva-elektricheskoy-energii/> (дата обращения: 29.01.2026).

13. Ратнер С. В., Аксюк Т. Д. Зарубежный опыт стимулирования микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии: организационно–экономические аспекты // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13. № 10. С. 1876–1893.

14. Пестерев А. А., Костинский С. С., Наракидзе Н. Д. Методика оптимального распределения однофазных электроприемников в системах

электроснабжения по критерию снижения дополнительных потерь, вызванных несимметрией и несинусоидальностью нагрузки // Вестник Северо–Кавказского федерального университета. 2025. № 2. С. 22–35. URL: <https://vestnikskfu.elpub.ru/jour/article/view/2875/2717> (дата обращения: 29.01.2026).

15. Коновалова О. Е. Государственная поддержка возобновляемых источников энергии на розничном рынке и изолированных территориях // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. № 3(16). С. 132–139. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennaya-podderzhka-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-na-roznichnom-rynke-i-izolirovannyh-territoriyah> (дата обращения: 29.01.2026).

16. Максимов А. Г. ВИЭ 2.0: новая программа развития «зеленой» энергетики в России // Энергетическая политика. 2020. № 11(153). С. 22–31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vie-2-0-novaya-programma-razvitiya-zelenoy-energetiki-v-rossii> (дата обращения: 29.01.2026).

17. Гречухина И. А., Кудрявцева О. В., Яковлева Е. Ю. Эффективность развития рынка возобновляемых источников энергии в России // Экономика региона. 2016. Т. 12. Вып. 4. С. 1167–1177. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-razvitiya-rynka-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-rossii> (дата обращения: 29.01.2026).

18. Кудрявцева О. В., Васильев С. В., Зорина Т. Г. Эффективность реализации программы поддержки возобновляемой энергетики (на примере солнечной энергетики) // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17. № 3. С. 745–774. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-realizatsii-programmy-podderzhki-vozobnovlyaemoy-energetiki-na-primere-solnechnoy-energetiki> (дата обращения: 29.01.2026).

19. Назарова Ю. А., Жильцов С. А., Голоулин Е. Ю. Социально–экономические факторы развития отрасли возобновляемой энергетики в России //

Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2017. № 40. С. 111–123.

Ремизова Т. С. Развитие возобновляемых источников энергии в России // Известия СПбГЭУ. 2017. № 3(105). С. 125–131.

20. Низамутдинова Н. С., Кирпичникова И. М., Пташкина–Гирина О. С. Мировой и Российский опыт применения государственной поддержки возобновляемой энергетики // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2018. № 2(160). С. 54–62.

21. Захаров В. Е. Рыночные аспекты формирования возобновляемой энергетики в России // Проблемы прогнозирования. 2022. № 2. С. 87–99.

© Стародумов Д.Д., 2026.