

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14564095>

## ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**Илхомбек Хосилжонович Холиддинов**  
**Мухлисахон Муталибжон кизи Бегматова**  
Ферганский политехнический институт  
[begmatova.muxlisaxon@gmail.com](mailto:begmatova.muxlisaxon@gmail.com)

### АННОТАЦИЯ

*Использование солнечных панелей в распределительных сетях низкого напряжения имеет особую значимость в контексте страны. В сельских и удаленных районах, где доступ к централизованным электросетям ограничен, солнечные системы обеспечивают доступное и стабильное энергоснабжение. Эти технологии не только способствуют энергетической доступности, но и играют ключевую роль в улучшении экологической ситуации, снижая нагрузку на традиционные тепловые станции, которые остаются основными источниками генерации в республике.*

*Одним из ключевых факторов, ограничивающих проникновение солнечной энергии, являются несимметрии напряжения, вызванные неравномерным распределением нагрузок и подключением однофазных PV-систем к распределительным линиям. Чтобы минимизировать такие эффекты, в статье предлагается инновационный подход к устранению несимметрии напряжения, основанный на оптимизации фазового подключения фотоэлектрических систем. Методика предполагает динамическое изменение фазы подключения PV-модулей в зависимости от текущих условий сети, что позволяет более равномерно распределить генерируемую энергию.*

*Сравнительный анализ предложенного метода перефазировки с традиционным фиксированным фазовым подключением показывает его эффективность в снижении общей несимметрии напряжения. Результаты моделирования, выполненного на основе почасовых данных, подтверждают, что адаптивная перефазировка способна значительно улучшить параметры сетевого баланса, особенно в пиковые часы генерации и потребления.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрические системы, низковольтные сети, несимметрия напряжения, фазовая балансировка, перефазировка.

## INCREASING THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

**I.H. Kholiddinov, M.M. Begmatova**

Ferghana polytechnical institute

[begmatova.muxlisaxon@gmail.com](mailto:begmatova.muxlisaxon@gmail.com)

### **ABSTRACT**

*The use of solar panels in low voltage distribution networks is of particular importance in the context of the country. In rural and remote areas where access to centralized power grids is limited, solar systems provide affordable and stable energy supply. These technologies not only contribute to energy accessibility, but also play a key role in improving the environmental situation, reducing the load on traditional thermal power plants, which remain the main sources of generation in the republic.*

*One of the key factors limiting the penetration of solar energy is voltage asymmetries caused by uneven load distribution and connection of single-phase PV systems to distribution lines. To minimize such effects, the article proposes an innovative approach to eliminating voltage asymmetry based on optimizing the phase connection of photovoltaic systems. The technique involves a dynamic change in the connection phase of PV modules depending on the current network conditions, which allows for a more evenly distributed energy generated.*

*A comparative analysis of the proposed method of rephasing with a traditional fixed phase connection shows its effectiveness in reducing the overall voltage asymmetry. The results of the simulation performed on the basis of hourly data confirm that adaptive re-phasing can significantly improve the parameters of the network balance, especially during peak hours of generation and consumption.*

**Keywords:** *photovoltaic systems, low-voltage networks, voltage asymmetry, phase balancing, paraphrasing.*

### **ВВЕДЕНИЕ:**

С учетом того, что борьба с изменением климата стала глобальным приоритетом, страны активно внедряют меры для перехода на устойчивое производство электроэнергии. В этом контексте использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) продолжает стремительно расти. Среди различных технологий особую популярность приобретают солнечные фотоэлектрические системы (PV), которые все чаще подключаются к низковольтным распределительным сетям.

Однако масштабная интеграция солнечных систем в электрические сети низкого напряжения сопровождается необходимостью соблюдать строгие технические нормы и ограничения, установленные энергетическими компаниями. Это обусловлено тем, что неконтролируемое подключение PV-систем может негативно повлиять на стабильность работы сети, создавая риски перенапряжения, нарушения баланса фаз и ухудшения качества электроэнергии.

С учетом того, что борьба с изменением климата стала глобальным приоритетом, страны активно внедряют меры для перехода на устойчивое производство электроэнергии. В этом контексте использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) продолжает стремительно расти. Среди различных технологий особую популярность приобретают солнечные фотоэлектрические системы (PV), которые все чаще подключаются к низковольтным распределительным сетям.

Однако масштабная интеграция солнечных систем в электрические сети низкого напряжения сопровождается необходимостью соблюдать строгие технические нормы и ограничения, установленные энергетическими компаниями. Это обусловлено тем, что неконтролируемое подключение PV-систем может негативно повлиять на стабильность работы сети, создавая риски перенапряжения, нарушения баланса фаз и ухудшения качества электроэнергии.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И МЕТОДОЛОГИЯ

В работе [1] предлагается метод оптимизации колонии муравьев, который использует теорию графов для нахождения оптимальных решений. Потеря мощности происходит из-за рассеивания тепловой энергии, что также вызывает повышение температуры соответствующего оборудования и в конечном итоге приводит к разрушению изоляции при перегрузке любого из фидеров в сети [2]. Такая перегрузка фаз происходит из-за несимметрии нагрузки на фазе в сети, поскольку это нарушает пределы подачи. Реконфигурация электрических сетей — это процесс изменения состояния соединительных и секционирующих выключателей для корректировки структуры сети. Цель работы состоит в симметрировании нагрузки, снижении потери энергии и избежание перегрузок, перераспределяя нагрузку между фидерами. Основная задача — минимизация коэффициент несимметрии нагрузки низких распределительных сетей при сохранении стабильности сети.

В статье [3] представлен гибридный метод для оптимизации реконфигурации электрической распределительной сети и определения оптимального размещения блоков распределенной генерации (DG). Цель

исследования – уменьшить потери электроэнергии, улучшить стабильность напряжения и симметрировать нагрузку на фидеры в распределительных системах. Для упрощения выбора мест для установки DG используется улучшенный аналитический метод (IA), который сокращает область поиска. Одновременно применяется алгоритм Bees Algorithm (BA), позволяющий определить оптимальные параметры реконфигурации сети и размеры блоков DG. Задача формулируется как многоцелевая оптимизация, где каждое направление представлено с помощью нечеткой логики для объединения различных целей в единую систему оценки.

Исследование [4] посвящено разработке метода симметрирования нагрузки на фидеры в активных распределительных сетях (ADN) с высокой долей распределенной генерации (DG). Проблема заключается в колебаниях мощности, вызванных DG, и несимметрированной нагрузке, что приводит к перегрузкам и снижению эффективности сети. Для решения предложен подход с использованием многополюсного устройства *soft open point* (SOP) — управляемого силового электронного устройства, заменяющего механический переключатель. Эффективность метода подтверждена на модифицированной 33-узловой тестовой системе IEEE. Результаты показывают, что многополюсный SOP улучшает распределение нагрузки, снижает потери мощности и повышает надежность работы сети.

Научная работа [5] посвящена изучению интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в распределительные электрические сети и способов повышения её эффективности. Основное внимание уделено совместной оптимизации размещения систем хранения энергии (ESS) и распределенной генерации (DGS) на основе ВИЭ, а также реконфигурации или усилению сети для повышения гибкости и устойчивости энергосистемы. Основными аспектами работы является максимизация интеграции ВИЭ в распределительные сети, уменьшение негативных эффектов, связанных с изменчивостью и неопределенностью генерации на основе ВИЭ, повышение надежности и стабильности энергосистемы.

Статья [6] посвящена актуальной проблеме несимметрии в фидерных системах электроснабжения. Несимметрия фаз приводит к негативным последствиям, таким как снижение качества электроэнергии, повышенный износ оборудования и увеличение эксплуатационных расходов. Ключевыми аспектами исследования является: Сложность фидерных систем и ограниченность ресурсов: Авторы отмечают, что традиционные методы балансировки, такие как перенастройка фидера, часто ограничены из-за сложности фидерных сетей и недостаточного количества секционирующих переключателей.

Статья [7] предлагает инновационный подход к снижению потерь электроэнергии в низковольтных распределительных сетях. Авторы разработали метод симметрирования фазных нагрузок с использованием программного обеспечения LabVIEW. В основе метода лежит нечеткая логика и экспертная система, которые позволяют анализировать текущее состояние сети, прогнозировать несимметрию и разрабатывать оптимальные стратегии перераспределения нагрузки. Основным преимуществом данного подхода является возможность автоматизации процесса симметрирования и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации сети. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность предложенного метода. Моделирование показало значительное снижение потерь электроэнергии при применении разработанного алгоритма. Авторы подчеркивают, что данный подход может быть успешно применен в реальных условиях эксплуатации низковольтных распределительных сетей и способствовать повышению энергоэффективности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью данной работы является разработка стратегии минимизации общей несимметрии напряжения в сети таким образом, чтобы можно было улучшить качество электроэнергии и надежность системы распределения. Цель этой задачи оптимизации может быть выражена как минимизация среднего коэффициента несимметрии напряжения  $k_{нес}$  сети, как в,

$$k_{нес} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N k_{несN} \quad (1)$$

где,  $(k_{несN})$  - коэффициент несимметрии напряжения на  $n$ -й шине и  $N$  общее количество шин в сети.

С учетом ограничений:

1. Несимметрия напряжения на каждой шине  $(k_{несN})$  должна быть строго ниже указанного максимального уровня несимметрии  $(k_{несNmax})$ :

$$k_{несN} \leq k_{несNmax} \quad (2)$$

для  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ .

2. Величины фазных напряжений  $U_n^a, U_n^b, U_n^c$  должны быть в пределах:

$$U_{min} \leq U_n^a, U_n^b, U_n^c \leq U_{max} \quad (3)$$

для  $n= 1,2,3,\dots , N$ , где,  $U_n^a, U_n^b, U_n^c$  величины напряжения для фаз а b с n/-й шине, соответственно.

Уравнение (1) соответствует целевой функции, которая должна быть минимизирована, и представляет общая несимметрия напряжения  $k_{нес}$  распределительной сети. Неравенство в (2) учитывает ограничение на коэффициента несимметрии напряжения и гарантирует, что отдельные коэффициенты несимметрии напряжения ( $k_{нес}$  для  $n = 1,2, . . .$ ), ниже указанного максимального значения  $k_{несNmax}$ . Неравенство в (3) касается ограничений на величины напряжения. Это гарантирует, что фазные напряжения  $U_n^a, U_n^b$  и  $U_n^c$  находиться в пределах допустимого напряжения (нижний лимит  $U_{min}$  и верхний лимит  $U_{max}$ ). В этом исследовании считалось  $V_{min}$  равным 0,94 пу, а  $U_{max}$  - считалось равным 1,06 пу. Другими словами, (2) и (3) определяют допустимые области несимметрии напряжения  $UUF_n$  и величины фазного напряжения  $U_n^a, U_n^b, U_n^c$  соответственно.

Чтобы минимизировать (1) при одновременном выполнении ограничений (2) и (3), были введены штрафные функции. Основная идея этих штрафных функций заключается в том, что оптимальная конфигурация PV (т.е. оптимальное решение) требует, чтобы ограничения были активными, так что это оптимальное решение находится в допустимых областях для значений несимметрии напряжения и фазного напряжения [9]. Чтобы обеспечить это, к возможным решениям, которые не удовлетворяют ограничениям, применяется штрафные функции. Таким образом, вышеупомянутая задача оптимизации была переформулирована как минимизация оштрафованной целевой функции  $J(x)$ , заданной формулой,

$$J(x) = k_{нес} + k_1 \sum_{n=1}^{n=N} \mu k_{несn} + k_2 (\sum_{n=1}^{n=N} \mu U_n^a + \sum_{n=1}^{n=N} \mu U_n^b + \sum_{n=1}^{n=N} \mu U_n^c) \quad (4)$$

где штрафная функция несимметрии напряжения  $\mu k_{несn}$  определяется как:

$$\mu k_{несn} = \begin{cases} k_{несn} - k_{несmax}; & \text{где } k_{несn} > k_{несmax} \\ 0 & \text{где } k_{несn} \leq k_{несmax} \text{ для } n = 1, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

штрафная функция для значений напряжения фазы-а определяется следующим образом:

$$\mu U_n^a = \begin{cases} |U_n^a - U_{min}|; & \text{где } U_n^a < U_{min} \\ 0; & \text{где } U_{min} \leq U_n^a \leq U_{max} \text{ для } n = 1, \dots, N \\ U_n^a - U_{max}; & \text{где } U_n^a > U_{max} \end{cases} \quad (6)$$

штрафная функция для значений напряжения фазы-b определяется следующим образом

$$\mu U_n^b = \begin{cases} |U_n^b - U_{min}|; \text{ где } U_n^b < U_{min} \\ 0; \text{ где } U_{min} \leq U_n^b \leq U_{max} \text{ для } n = 1, \dots, N \\ U_n^b - U_{max}; \text{ где } U_n^b > U_{max} \end{cases} \quad (7)$$

штрафная функция для значений напряжения фазы-c определяется следующим образом

$$\mu U_n^c = \begin{cases} |U_n^c - U_{min}|; \text{ где } U_n^c < U_{min} \\ 0; \text{ где } U_{min} \leq U_n^c \leq U_{max} \text{ для } n = 1, \dots, N \\ U_n^c - U_{max}; \text{ где } U_n^c > U_{max} \end{cases} \quad (8)$$

Компоненты напряжения трехфазной последовательности были получены путем симметричного преобразования.

Для повышения интеграции солнечных панелей в низковольтные сети предлагается использовать Концепцию BFOA (Bacterial Foraging Optimization Algorithm). BFOA — это метаэвристический алгоритм оптимизации, основанный на поведении бактерий при поиске пищи.

Он имитирует процессы: хемотаксиса, репродукции, элиминации и дисперсии. Алгоритм используется для решения сложных задач оптимизации благодаря способности находить глобальные экстремумы в условиях неопределенности.

Также предлагаемая Концепция DBFOA (Dynamic Bacterial Foraging Optimization Algorithm) DBFOA — является усовершенствованной версией BFOA, учитывающая динамические изменения в среде оптимизации. Основные отличия:

- Адаптация параметров алгоритма (например, скорости и направления хемотаксиса) в зависимости от текущих условий.
- Повышение эффективности поиска за счет учета изменяющихся характеристик задачи.

DBFOA лучше подходит для задач с динамическими и нелинейными условиями, таких как энергосистемы с переменными нагрузками.

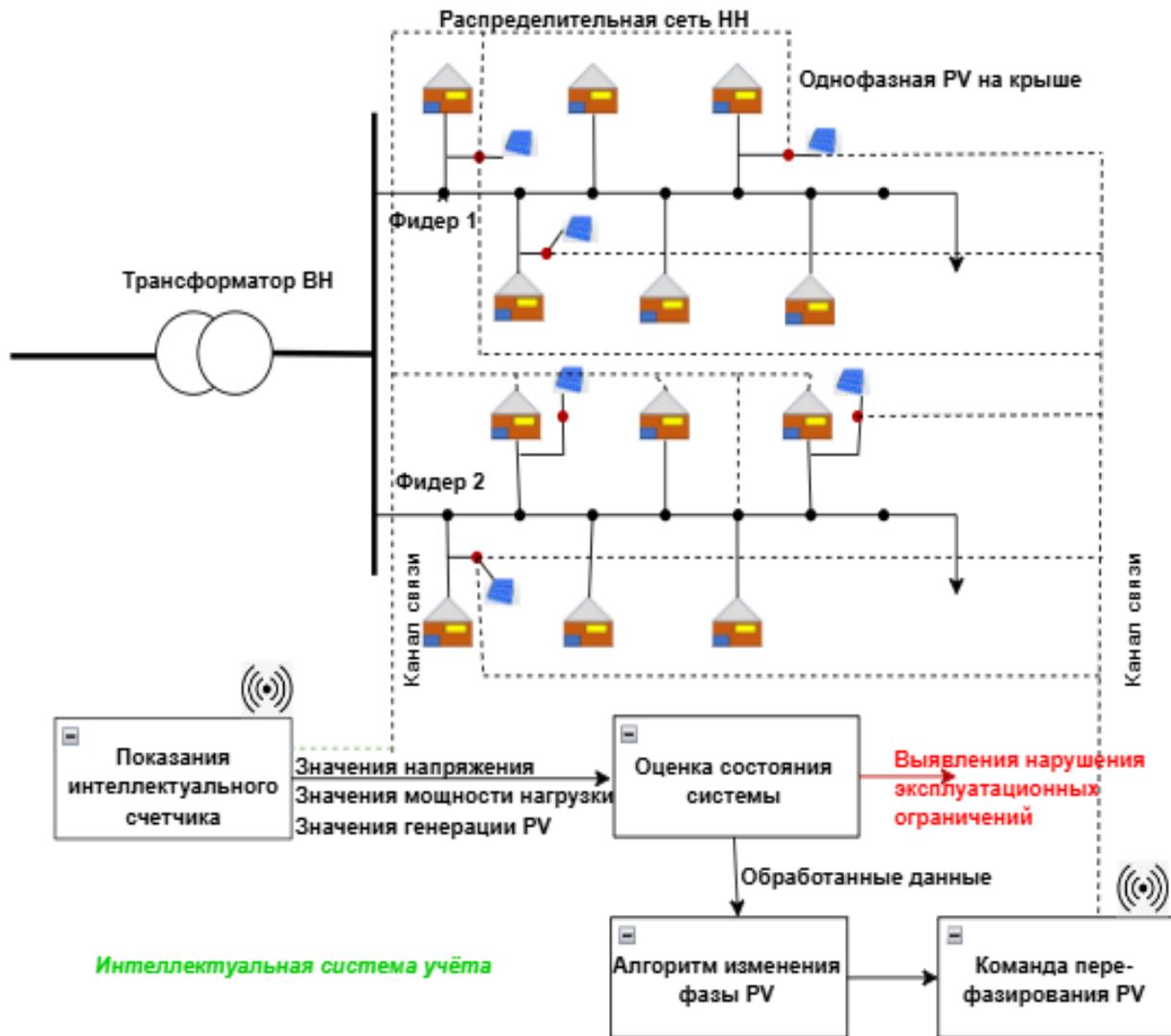


Рисунок 1. Схема устройства автоматической перефазировки фотоэлектрических панелей.

Данный рисунок иллюстрирует схему функционирования предложенной стратегии поэтапного перехода на фотоэлектрическую энергию. Данные о генерации фотоэлектрической энергии и потреблении электроэнергии, собираемые интеллектуальными счетчиками, передаются в централизованную систему управления. Перед поступлением в алгоритм оптимизации, данные подвергаются тщательной фильтрации для устранения ошибок и аномалий.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Алгоритм перефазировки фотоэлектрических систем анализирует отфильтрованные данные и определяет оптимальное распределение фаз для подключенных фотоэлектрических установок. Целью оптимизации является

минимизация несимметрии напряжения в сети [10], результаты которой передаются на исполнительные устройства через систему управления, инициируя процесс переключения фаз.

Время отклика системы определяется совокупностью временных затрат на передачу данных, обработку информации и выполнение команд. Анализ показывает, что общая длительность цикла обнаружения необходимости перефазировки и ее выполнения составляет около 43,2 секунды. Следует отметить, что фактическое время выполнения команды переключения может варьироваться в зависимости от конкретной топологии сети.

Ключевые этапы процесса:

1. Сбор данных: Интеллектуальные счетчики собирают данные о генерации и потреблении электроэнергии.
2. Предварительная обработка данных: Фильтрация данных для устранения ошибок и аномалий.
3. Оптимизация: Алгоритм определяет оптимальное распределение фаз для минимизации несимметрии напряжения.
4. Управление: Команды на переключение фаз передаются на исполнительные устройства.
5. Выполнение: Исполнительные устройства выполняют команды по переключению фаз.

Преимущества предложенной стратегии:

- Повышение качества электроэнергии: Минимизация несимметрии напряжения.
- Улучшение эффективности использования фотоэлектрических установок: Оптимальное распределение нагрузки.
- Автоматизация процесса управления: Сокращение человеческого вмешательства.

Данный подход обеспечивает эффективное управление фотоэлектрическими системами в рамках интеллектуальной электрической сети [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Предложен новый метод снижения несимметрии напряжения в электрических сетях за счет оптимизации подключения фотоэлектрических систем. Идея заключается в периодической перенастройке фаз, к которым подключены солнечные панели, для достижения наиболее сбалансированного режима работы сети. Для выбора оптимальной конфигурации фаз используется модифицированный алгоритм оптимизации, который учитывает текущую

нагрузку в сети и выработку солнечных электростанций. Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет значительно снизить несимметрию напряжения, особенно в периоды высокой солнечной активности. Оптимизация частоты переключений достигается за счёт разработка алгоритмов для определения оптимальной частоты переключений фаз. Комбинация с другими методами: использование совместно с методами регулирования реактивной мощности для улучшения качества электроэнергии в ночное время. Учет динамики нагрузки осуществляется при разработке алгоритмов, учитывающих динамические изменения нагрузки в сети.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Babu, PR., Shenoy, R., Ramya, N., Soujanya, A., Shetty, S. (2014). Implementation of ACO technique for load balancing through reconfiguration in electrical distribution system. Annu. Int. Conf. Emerg. Res. Areas Magn. Mach. Drives. IEEE, 1–5.
2. Аллаев, К., Мирзабаев, А. Шаисматов, С., Холиддинов, И., Холиддинова, М., Махмудов, Т., Мусинова, Г. (2019). Обеспечение качества электрической энергии. Фан ва технология.
3. Tolabi, HB., Ali MH., Shahrin, Bin Md Ayob., Rizwan, M. (2014). Novel hybrid fuzzy-Bees algorithm for optimal feede multi-objective reconfiguration by considering multipledistributed generation. Energy, 7–15.
4. Ji, H., Wang, C., Li, P., Zhao, J., Song, G., Ding, F., (2017). An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks. Appl Energy; 208, 86–95.
5. Santos, SF., Fitiwi, DZ., Cruz, MRM., Cabrita, CMP., Catalão, JPS. (2017). Impacts of optimal energy storage deployment and network reconfiguration on renewable integration level in distribution systems. Appl Energy; 185, 44–55.
6. Jinxiang, Zhu., Mo-Yuen, Chow., Fan, Zhang. Phase balancing using mixed-integer programming [distribution feeders] (1998). IEEE Trans Power Syst; 13:14. 87–92.
7. Chitra, R., Neelaveni, R. (2011). A realistic approach for reduction of energy losses in low voltage distribution network. Int J Electr Power Energy Syst; 33, 77–84.
8. Wen, H., Cheng, D., Teng, Z., Guo, S., Li, F. (2014). Approximate Algorithm for Fast Calculating Voltage Unbalance Factor of Three-Phase Power System. IEEE Trans Ind Informatics; 10, 799–805.
9. Холиддинов, И., Холиддинова, М., Шаисматов, С. (2020). Алгоритм

- определения уровня несинусоидальности напряжения, создаваемая электроустановками. Научно-технический журнал ФерПИ, спецвыпуск №1. стр, 41-46
10. Холиддинов, И. (2022) Устройство для регистрации дополнительных потерь электроэнергии при несимметрии нагрузок в низковольтных электрических сетях. "Инновационные технологии, - Международная научно-техническая конференция на тему "Проблемы и решения охраны труда в IT-технологиях и производстве" Андижанский машиностроительный институт. 143-150.
11. Холиддинова, М., Бегматова, М. (2021). Интеллектуальные электрические сети - эффективное решение актуальных проблем бесперебойности системы электроснабжения. Республиканская научно-техническая конференция "Эффективные решения актуальных проблем бесперебойности системы электроснабжения в электроэнергетике", 34-37.