

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-3-83-98>

## Повышение эффективности и бесперебойности системы распределения электроэнергии на основе устройств синхронизированных векторных измерений

Я. Э. Шклярский, Н. Э. Шайхлисламов✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [nurislam.sh@yandex.ru](mailto:nurislam.sh@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассмотрен текущий уровень изученности технологии микроустройств синхронизированных векторных измерений (микроУСВИ), а также выявлены наиболее значимые и перспективные направления в рамках этой темы. Продемонстрировано преимущество этих устройств во многих вопросах мониторинга, управления и защиты распределительных систем. Кроме того, рассмотрен вопрос дороговизны коммуникационной инфраструктуры для связи УСВИ, а также вопрос определения наилучшего метода поиска минимального количества и оптимального расположения микроУСВИ в сети. Для поиска оптимального расположения микроУСВИ предложена методология на основе смешанного целочисленного линейного программирования.

**Ключевые слова:** устройства синхронизированных векторных измерений, микроУСВИ, распределительные сети, применение УСВИ, СМПР

**Для цитирования:** Шклярский Я. Э., Шайхлисламов Н. Э. Повышение эффективности и бесперебойности системы распределения электроэнергии на основе устройств синхронизированных векторных измерений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 83–98. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-83-98.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

## Improving the Efficiency and Continuity of the Power Distribution System Based on Phasor Measurement Units

Ya. E. Shklyarskiy, N. E. Shaykhlislamov✉

Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

✉ [nurislam.sh@yandex.ru](mailto:nurislam.sh@yandex.ru)

**Abstract.** The paper reviewed the current level of study of micro-phasor measurement units (micro-PMU) technology, and identified the most significant and promising areas within this topic. The paper demonstrates the advantage of these devices in many issues of monitoring, control and protection of distribution systems. In addition, considered the issue of expensive communication infrastructure for communication PMU, as well as determining the best method to find the minimum number and the optimal location of micro-PMU in the network. A methodology based on mixed integer linear programming is proposed to find the optimal location of micro-PMU.

**Keywords:** phasor measurement units, micro-PMU, distribution networks, PMU application, WAMS

**For citation:** Shklyarskiy Ya. E., Shaykhlislamov N. E. Improving the Efficiency and Continuity of the Power Distribution System Based on Phasor Measurement Units // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 83–98. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-83-98.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Цель статьи заключается в выявлении наиболее эффективного решения задачи организации связи для общения между устройствами системы мониторинга переходных режимов (СМНР), а также разработка методологии поиска минимального количества и оптимального расположения микроустройствам синхронизированных векторных измерений (УСВИ) в распределительных сетях.

Во всем мире растет нагрузка на электрические сети и, в частности, на распределительные системы в связи с неуклонно растущим внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Рост использования возобновляемых источников энергии вызывает дополнительные неопределенности в энергосистемах [1]–[3]. Одной из важных проблем использования крупномасштабных ВИЭ является избыточная генерация [4]. В этом случае накопители электрической энергии (НЭЭ) помогают обеспечить большую гибкость системы и повысить ее производительность [5]–[6]. В качестве примера [7], если проникновение фотоэлектрических электростанций в Великобритании возрастет до 100 %, 57.1 % нагрузки должно питаться через НЭЭ. Система мониторинга переходных режимов позволяет реализовать крупномасштабные НЭЭ в распределительных системах, используя измерения в реальном времени, предоставляемые (УСВИ) [8].

Распределительные сети очень сложны из-за большого количества узлов, коротких расстояний, небольших амплитуд и угловых различий между узлами, быстрой динамики и отсутствия стандартной документации [9]–[11]. Таким образом, эти сложности вызвали необходимость разработки новых систем мониторинга с высокой точностью, которые поддерживают достижение ситуационной осведомленности в распределительных сетях и позволяют операторам таких сетей принимать оперативные решения в ответ на возмущения. Для этих целей было разработано устройство синхронизированных векторных измерений уровня распределения (микроУСВИ). Это устройство способно измерять синхронизированные векторы напряжения и тока (как значение, так и фазовый угол) в режиме реального времени с более высоким разрешением и точностью, чтобы улучшить уровень осведомленности в распределительной сети [12]–[14]. МикроУСВИ использует четыре основных измерения на трех фазах, поэтому оно имеет  $4 \times 3 = 12$  измерительных каналов. Эти четыре измерения – значение и фазо-

вый угол напряжения, значение и фазовый угол тока на фазу с максимальной частотой дискретизации 120 Гц [15], [16]; если устройство снабжено антенной GPS, микроУСВИ также использует часы GPS для обеспечения точной синхронизации времени [17].

К проблемам использования УСВИ относится преобразование большого объема данных, генерируемых микроУСВИ, в информацию, пригодную к использованию. Для решения этой проблемы в публикации [18] были предложены методы на основе машинного обучения.

Несколько обзорных работ по микроУСВИ были посвящены в основном их применению в распределительных сетях, например для мониторинга и диагностики, а также для управления [19], [20]. Однако в этих публикациях не рассматривались последние исследовательские работы, связанные с микроУСВИ. В недавней обзорной статье [22] было рассмотрено применение микроУСВИ в новых активных распределительных сетях. В частности, эта статья в основном сосредоточена на мониторинге состояния и обнаружении событий.

**Применение микроУСВИ в распределительных сетях.** Все приложения, основанные на измерениях микроУСВИ в распределительных сетях, можно разделить на четыре категории, как показано на рисунке.

Используя данные микроУСВИ, можно легко обнаружить обратный поток мощности в распределительных сетях [23]. При помощи данных УСВИ несоответствие мощности между генерацией и спросом на нагрузку, которое может быть вызвано нарушениями в энергосистеме, оценивается на ранней стадии [24].

МикроУСВИ могут непосредственно измерять частоту и скорость изменения частоты (ROCOF). Формы сигналов на уровне распределения обычно содержат больше шумов и гармоник, чем на уровне системообразующих сетей, поэтому для достижения предпочтительной точности требуется больше специальных алгоритмов оценки частоты [25]. Хотя оценка частоты будет доступна при использовании сигналов от одной фазы, использование сигналов от всех трех фаз предпочтительно из-за более надежных оценок в несбалансированных распределительных системах [26]. Показания мониторинга частоты, основанные на данных УСВИ, также можно использовать в анализе поставочных событий [27].

Знание топологии распределительной сети необходимо для мониторинга и управления системой, однако данные о топологии часто устаре-



Категории приложений на основе микроУСВИ  
 Categories of micro-PMU based applications

вают из-за рассинхронизации после реконфигурации или восстановительных работ. Методы на основе распознавания образов с использованием измерений микроУСВИ позволяют получить более надежные результаты при идентификации топологии [28]–[30]. Например, в [31] рассматривается экстремальная ситуация, в которой вся распределительная сеть реконструируется по измерениям напряжения, при этом предполагается, что предварительная информация о топологии неизвестна.

Оценка состояния в энергосистеме дает операторам понимание ситуации, а также возмож-

ность реализации многих автоматических управляющих воздействий. Оценка состояния распределительных сетей затруднена из-за большого количества узлов и отсутствия синхронизированных измерений. При использовании данных микроУСВИ эти трудности могут быть устранены [32]. Существует метод оценки состояния с отслеживанием, который основан на теореме компенсации из теории цепей для создания эквивалентной схемы [33]. Он использует только два измерения микроУСВИ, установленных на подстанции и на конце главного фидера. Применяется

оценщик состояния на основе измерений параметров всех трех фаз [34], поскольку фазы распределительной сети обычно не сбалансированы. Также существует линейный метод оценки состояния системы [35] с использованием различных типов измерений, включая измерения микроУСВИ и псевдоизмерения. Динамическая оценка состояния с переменным весом с использованием измерений от микроУСВИ и системы управления и сбора данных (SCADA) повышает точность оценки состояния распределительной сети в реальном времени [36]. В [37] представлен всесторонний математический анализ с целью выявления наиболее важных факторов, влияющих на точность профиля напряжения.

В [38] W. Zhou и др. предлагают метод оценки гармонического состояния (HSE) для определения местоположения источников гармоник и оценки гармонического напряжения в распределительных сетях [39]. В [40] исследуются адекватные и экономичные характеристики микроУСВИ для обеспечения точности оценки состояния распределительной сети.

От 70 до 90 % от общего числа повреждений составляют однофазные замыкания на землю в распределительной сети [41]. Обнаружение и идентификация короткого замыкания на основе оценки состояния предложено M. Gholami и др. в [42]. В [43], [44] для радиальных распределительных сетей получено оптимальное размещение микроУСВИ, а затем на их основе выполняется оценка состояния распределительной сети.

В [45] был рассмотрен вопрос оценки состояния для распределительной сети переменного-постоянного тока на основе данных, полученных с устройств синхронизированных векторных измерений [20], [46], [47].

В [48] рассмотрена конструкция микроУСВИ для измерения синхрофазоров гармоник в трехфазных распределительных системах.

Оценка гармонического состояния (HSE) заключается в определении местоположения основных источников гармоник и оценке гармонических распределений напряжения и тока [49].

В распределительных системах могут происходить различные события, и общие методы обнаружения событий могут быть разработаны для обнаружения определенных типов событий. За обнаружением события обычно следует процедура его классификации для получения более подробной информации о событии. В некоторых работах по обнаружению событий основное вни-

мание уделяется разрушительным событиям, т. е. аномалиям или возмущениям, которые могут вызвать проблемы эксплуатационной безопасности, стабильности системы и качества электроэнергии [50], [51]. Подходы к обнаружению событий на основе микроУСВИ были подробно рассмотрены в [52]. В [53] был предложен метод нечеткой логики для обнаружения и классификации возмущений в распределительных электрических сетях на основе измерений, полученных УСВИ.

Внезапное увеличение возобновляемых источников энергии – таких, как фотоэлектрические и ветровые генераторы, с большей вероятностью может вызвать колебания напряжения, чем традиционные основные причины – неисправности и пуски электродвигателей [54], [55]. Кроме того, в отличие от линий электропередачи, распределительные фидеры имеют сравнимые импедансы и сопротивления, что делает напряжение чувствительным к изменениям активной мощности и снижает эффективность технологий регулирования напряжения на основе компенсации реактивной мощности [56], [57].

В [58] сравниваются несколько алгоритмов обнаружения с различными характеристиками для различных случаев и настроек параметров, в которых классическим алгоритмом служит вычисление среднеквадратичных значений выборок напряжения с определенными оконными функциями.

В [59] был использован метод на основе машины опорных векторов, использующий измерения микроУСВИ для прогнозирования стабильности системы до восстановления системы после аварийной ситуации.

Кроме того, микросети, которые становятся островными во время возмущений в основной сети, должны быть переподключены во время восстановления. Перед повторным подключением необходимо синхронизировать напряжения, частоты и фазовые углы напряжения островных микросетей с основной сетью [60].

В [61] для обнаружения островного режима работы сети была разработана новая методика с использованием классификатора искусственной нейронной сети на основе данных, полученных от микроУСВИ.

Оптимальный поток мощности и экономическая диспетчеризация в режиме реального времени позволяют управлять мощностью РГ каждые несколько минут для достижения минимальных эксплуатационных затрат или других конкретных

целей. Полуопределенные и конические модели второго порядка, разработанные в последние годы, показали потенциальную способность наилучшим образом решать задачи оптимального потока мощности переменного тока [62]. Однако эти методы и выводы о жесткости применимы только к радиальным распределительным сетям, а в петлевых сетях становятся недействительными.

Из-за вышеупомянутых характеристик распределительных сетей аналитическая линеаризация моделей потоков мощности неприменима, в то время как методы линеаризации на основе данных, которые напрямую обращаются к чувствительности между переменными решения, представляют собой альтернативный путь [63]. Чувствительность мощности к напряжению оценивается динамически с помощью результатов оценки состояния распределительных систем и далее используется в оптимизации напряжения на шинах [64], [65].

Данные измерений микроУСВИ могут помочь в проверке и калибровке различных моделей нагрузки, включая статические, а также сложные динамические модели (например, составные модели нагрузки [66] и синтезирующие модели нагрузки [67]).

Оценка параметров линии основана на законе Ома. Сопротивление линии может быть откалибровано с помощью векторов напряжения и тока от микроУСВИ на одном или двух концах линии [68]–[70] с помощью оценок на основе взвешенного метода наименьших квадратов.

Точная оценка ключевых параметров динамических моделей генераторов имеет первостепенное значение для анализа динамической безопасности энергосистемы. У. Ху и др. в [71] был предложен ряд недорогих методов, основанных на использовании устройств синхронизированных векторных измерений.

В [71]–[73] затронут вопрос применения УСВИ в рамках интеллектуальной сети.

В [74] А. Акрами предлагается метод, основанный на данных измерений микроУСВИ, для определения почасовой оптимальной конфигурации распределительной сети в режиме реального времени.

В [75] была рассмотрена архитектура концентратора синхронизированных векторных данных (КСВД). В [76] было определено влияние принятой телекоммуникационной инфраструктуры и логики передачи данных КСВД на достижимую задержку отчетов КСВД.

В [77] был рассмотрен вопрос создания системы диагностики событий на основе данных УСВИ для извлечения такой полезной информации, как причина или местоположение событий в распределительных системах.

В связи с повышенной вероятностью кибератак и масштабом их воздействия безопасность данных стала критическим требованием в сетях связи УСВИ [78], [79]. В [80]–[82] был рассмотрен вопрос обеспечения кибербезопасности передачи данных УСВИ на основе IEC 61850-90-5.

В [83], [84] представлена методика оценки и компенсации систематических ошибок, существующих в компонентах распределенной измерительной системы на основе УСВИ, подходящей для мониторинга трехфазных распределительных сетей. Также существует метод моделирования нагрузки на основе рекуррентной нейронной сети с использованием данных измерений УСВИ в активной распределительной системе [85].

УСВИ могут быть очень полезны при обнаружении и выявлении местоположения неисправностей в распределительных системах. Существует метод с использованием данных микроУСВИ для повышения точности локализации неисправности, который в основном основан на расчете и сравнении импеданса и провала напряжения [86]. Локализация неисправности также изучалась в статье М. Pignati и др. [87] посредством выполнения нескольких сценариев оценки состояния с одинаковым набором измерений, но различными потенциальными местами повреждения. В [88] предложен метод на основе теоремы компенсации для расчета последовательностей изменения напряжения вдоль фидера с микроУСВИ, установленными на обоих концах. М. У. Usman и М. Omar Faruque [89] предложили метод определения места повреждения для интеллектуальной распределительной сети при наличии распределенной генерации с использованием цифрового симулятора реального времени. Данный метод основан на алгоритме оценки состояния, использующем данные реального времени от моделируемых блоков УСВИ, размещенных в данной сети [90], [91]. В [91] рассматривается вопрос местонахождения повреждения при неполной наблюдаемости УСВИ. В [92] для обнаружения неисправностей предлагается использовать УСВИ для точного и достоверного измерения фазового угла напряжения и скорости изменения разности фазовых углов напряжения между общей точкой и шиной. На основе данных, полу-

ченных УСВИ, можно использовать алгоритм поиска Фибоначчи с целью определения места однофазного замыкания на землю в распределительной сети [93], [94].

#### **Коммуникационная инфраструктура СМНР.**

В СМНР используются две различные категории связи. Проводные технологии связи включают связь по ЛЭП (PLC) и оптоволокно, а беспроводные технологии связи включают Wi-Fi, WiMAX [95], LTE, сотовую связь (спутник), Bluetooth, ZigBee [96], микроволны и радио [97]. Оптоволокно имеет низкую задержку и высокую надежность. Однако из-за более высоких капитальных затрат и эксплуатационных расходов, PLC является экономически более эффективным решением, поскольку не требует дополнительных проводов или инфраструктуры. Две основные категории PLC – узкополосные (NB-PLC) [98] и широкополосные (BB-PLC). Наряду с преимуществами PLC существуют и проблемы – шум, затухание и искажение сигнала. Благодаря низкой стоимости, доступности инфраструктуры и широкому охвату PLC все еще считается возможным вариантом для связи между УСВИ на уровнях распределения среднего и низкого напряжения.

Пятое поколение мобильных сетей (5G) станет еще одним и, возможно, лучшим вариантом для связи УСВИ в будущем – в  $\approx 100$  раз быстрее существующей технологии мобильной связи (4G) со скоростью передачи данных 20 Гбит/с. Эта новая технология связи будет поддерживать три важные услуги. Первая – расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB), обеспечивающая соединения с очень высокой пиковой скоростью передачи данных [21]. Вторая – массовая связь машинного типа, которая поддерживает огромное количество устройств интернета вещей с возможностью создания соединений до  $10^6$  на квадратный километр с уровнем потери пакетов менее 1 % [99]. Последняя услуга, поддерживаемая 5G, – это сверхнадежная связь с низкой задержкой (URLLC), очень полезная для связи УСВИ в распределительных системах, особенно в случае защиты и управления, которые требуют большей точности и очень низкой задержки. Возможность использования 5G для управления частотой вторичной нагрузки в судовой микросети была исследована в [100]. В [101] предлагается гибридная беспроводная сеть для подключения УСВИ по всей системе, чтобы обеспечить удобную и недорогую среду связи. Тем не менее, эта технология еще не была реализована в реальной энергосистеме. Если эта техноло-

гия будет использоваться в будущем, необходимо гарантировать ее безопасность.

#### **Оптимальное расположение микроУСВИ.**

Несмотря на то, что устройства синхронизированных векторных измерений уровня распределения очень важны ввиду все большего и активного изменения структуры распределительной сети, их стоимость велика. Соответственно, особое значение имеет высокая стоимость установки УСВИ [102], поскольку любая новая технология добавляет затраты системным операторам. Поэтому поиск минимально необходимого количества УСВИ и оптимального места их установки важен для экономически эффективного применения УСВИ в распределительных сетях. По этой причине было проведено много исследований [103] в соответствии с теорией графов для поиска оптимального размещения УСВИ. Кроме того, были представлены методы оптимального размещения УСВИ, основанные на их применении [104]. В [105] для нахождения оптимальных местоположений УСВИ используется метод имитации отжига. Однако при использовании данного метода существует вероятность того, что набор мест размещения УСВИ, который может сделать систему наблюдаемой, будет упущен этим процессом поиска по методу имитации отжига. В статье S. Prasad и D. M. V. Kumar [106] реализован метод «поиска пополам» для нахождения минимального количества УСВИ, способного сделать систему наблюдаемой. Из результатов компьютерного моделирования в данной статье для различных тестовых систем следует, что только от одной четверти до одной трети системных шин должны быть снабжены УСВИ, чтобы сделать систему наблюдаемой. В своей публикации Z. Zhao и др. [107] предлагают исчерпывающую методологию на основе двоичного (бинарного) алгоритма поиска для определения минимального количества и оптимального расположения УСВИ для полной наблюдаемости энергосистемы.

X. Kong и др. в [108] был принят подход целочисленного линейного программирования, который позволяет легко анализировать наблюдаемость сети для смешанных наборов измерений. В [109] представлен более простой алгоритм, который затем был переработан для случаев избыточного размещения УСВИ, полной и неполной наблюдаемости. Метод ветвей и границ был предложен в [110] для решения проблемы нахождения оптимального расположения УСВИ с учетом контроля вторичного напряжения. В [111] предлагается использовать целочисленное

линейное программирование для оптимального размещения микроУСВИ в активных распределительных сетях.

В [112] для поиска оптимального расположения мини-УСВИ в распределительной сети предлагается использовать смешанное целочисленное линейное программирование совместно с генетическим алгоритмом. Также в данной работе предлагается совместное использование микроУСВИ с уже имеющимися измерительными приборами системы SCADA. Однако здесь не был рассмотрен вопрос влияния наличия шин с нулевой генерацией и нагрузкой на общее количество устройств в распределительной сети. Наличие нулевых шин в системе может уменьшить количество УСВИ, необходимых для полной наблюдаемости системы. В [113] рассматривается моделирование ограничений с нулевыми шинами.

**Обсуждение.** Несмотря на все преимущества технологии СВИ для высоковольтных и распределительных сетей, до сих пор существует ряд нерешенных вопросов, препятствующих более активному внедрению технологии в распределительные сети мира.

Один из таких вопросов – отсутствие и дороговизна коммуникационной инфраструктуры сети, что делает необходимым поиск наиболее подходящих средств связи для общения между устройствами. Системы SCADA и СМНР используют для передачи данных в основном связь по линии электропередачи, коаксиальные кабели и оптоволокно. Однако проблема заключается в существенных минусах передачи данных такими способами, например в высокой стоимости волоконно-оптической связи или существенных помехах при передаче данных по линии электропередачи. Система связи между УСВИ на основе 5G – весьма перспективное решение данной проблемы, однако это новая технология, она находится в процессе изучения и разработки и для полноценного внедрения технологии 5G необходимо решить ряд вопросов, например обеспечение высокой степени безопасности.

Минимальному количеству УСВИ и их оптимальному расположению в распределительной сети в последние годы посвящалось большое внимание. Основной задачей стало выявить наиболее подходящий метод определения оптимального располо-

жения микроУСВИ, которое приведет к полной наблюдаемости в распределительной сети. Таким методом может быть смешанное целочисленное линейное программирование с учетом совместного использования микроУСВИ с уже имеющимися измерительными приборами системы SCADA, а также учет влияния наличия шин с нулевой генерацией и нагрузкой на общее количество устройств в распределительной сети.

**Заключение.** Устройства синхронизированных векторных измерений уровня распределения или микроУСВИ предназначены для распределительных сетей и более дешевы, чем УСВИ для высоковольтной сети энергетической системы. В статье продемонстрировано преимущество этих устройств во многих вопросах мониторинга, управления и защиты распределительных систем. Ввиду этих преимуществ и стремительного роста числа источников распределенной генерации, генерации энергии на основе возобновляемых источников, увеличения числа электромобилей и т. д., что приводит к все более непредсказуемым и краткосрочным колебаниям и возмущениям, СВИ приобретают все большее значение в системах распределения, и оно будет только увеличиваться.

Несмотря на всю важность данных устройств, существует еще множество нерешенных и активно изучаемых аспектов. Один из них – это дороговизна коммуникационной инфраструктуры СМНР. Выявлено, что такие имеющиеся средства передачи данных, как оптоволокно и связь по линии электропередачи, имеют значительные недостатки. В статье предложено использование новой технологии 5G для решения данной проблемы, однако необходимо решить ряд вопросов для полноценного внедрения данной системы.

Также выявлена актуальность определения наилучшего метода поиска минимального количества и оптимального расположения микроУСВИ с учетом специфики распределительных сетей. Предложена методология на основе смешанного целочисленного линейного программирования с учетом совместного использования микроУСВИ с уже имеющимися измерительными приборами системы SCADA, а также учет влияния наличия шин с нулевой генерацией и нагрузкой на общее количество устройств в распределительной сети.

#### Список литературы

1. Jordehi A. R. How to deal with uncertainties in electric power systems? A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. P. 145–155.

2. Akrami A., Doostizadeh M., Aminifar F. Power system flexibility: an overview of emergence to evolution // *J. of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019. Vol. 7, № 5. P. 987–1007.

3. A novel control method for active power sharing in renewable-energy-based micro distribution networks / W. J. Abdallah, K. Hashmi, M. T. Faiz, A. Flah, S. Channumsin, M. A. Mohamed, D. A. Ustinov // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 1579–1604.
4. Profitability analysis of grid-connected photovoltaic facilities for household electricity self-sufficiency / A. Colmenar-Santos, S. Campiñez-Romero, C. Pérez-Molina, M. Castro-Gil // *Energy Policy*. 2012. Vol. 51. P. 749–764.
5. Lai C. S., McCulloch M. D. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage // *Applied Energy*. 2017. Vol. 190. P. 191–203.
6. Cascade frequency converters control features / A. G. Vorontsov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, Y. A. Sychev // *J. of Mining Institute*. 2020. Vol. 241, № 1. P. 37–45.
7. Gómez A., Dopazo C., Fueyo N. The «cost of not doing» energy planning: The Spanish energy bubble // *Energy*. 2016. Vol. 101. P. 434–446.
8. Optimal locations for energy storage damping systems in the Western North American interconnect / R. H. Byrne, D. J. Trudnowski, J. C. Neely, R. T. Elliott, D. A. Schoenwald, M. K. Donnelly // *IEEE Power and Energy Society General Meeting, Conf. National Harbor, MD, USA: IEEE*, 2014. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939875.
9. Optimal micro-PMU placement using mutual information theory in distribution networks / Z. Wu, X. Du, W. Gu, P. Ling, J. Liu, C. Fang // *Energies*. 2018. Vol. 11, № 7. P. 1917–1936.
10. Zanjani M. G. M., Mazlumi K., Kamwa I. Application of  $\mu$ PMUs for adaptive protection of overcurrent relays in microgrids // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018. Vol. 12, № 18. P. 4061–4069.
11. Optimal PMU-communication link placement for smart grid wide-area measurement systems / X. Zhu, M. H. F. Wen, V. O. K. Li, K.-C. Leung // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, № 4. P. 4446–4456.
12. Mohsenian-Rad H., Stewart E., Cortez E. Distribution synchrophasors: Pairing big data with analytics to create actionable information // *IEEE Power and Energy Magazine*. 2018. Vol. 16, № 3. P. 26–34.
13. Anomaly detection using optimally placed  $\mu$ PMU sensors in distribution grids / M. Jamei, A. Scaglione, C. Roberts, E. Stewart, S. Peisert, C. McParland, A. McEachern // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 4. P. 3611–3623.
14. Dusabimana E., Yoon S.-G. A survey on the micro-phasor measurement unit in distribution networks // *Electronics (Switzerland)*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 305–318.
15. A data-driven analysis of capacitor bank operation at a distribution feeder using micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, A. von Meier, L. Alvarez, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conf. (ISGT)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/ISGT.2017.8085984.
16. Distribution grid reliability analysis considering regulation down load resources via micro-PMU data / A. Shahsavari, A. Sadeghi-Mobarakeh, E. Stewart, H. Mohsenian-Rad // *IEEE Intern. Conf. on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2016. P. 472–477. doi: 10.1109/SmartGridComm.2016.7778806.
17. Autopsy on active distribution networks: A data-driven fault analysis using micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, C. Roberts, F. Megala, L. Alvarez, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // *North Am. Power Symp. (NAPS)*. Morgantown, WV, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/NAPS.2017.8107265.
18. Situational awareness in distribution grid using micro-PMU data: a machine learning approach / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. M. Stewart, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, № 6. P. 6167–6177.
19. Phasor measurement units optimal placement and performance limits for fault localization / M. Jamei, R. Ramakrishna, T. Tesfay, R. Gentz, C. Roberts, A. Scaglione, S. Peisert // *IEEE J. on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol. 38, № 1. P. 180–192.
20. Multi-terminal DC grid overall control with modular multilevel converters / M. Jiménez Carrizosa, N. Stankovic, J. C. Vannier, Y. E. Shklyarskiy, A. I. Bardanov // *J. of Mining Institute*. 2020. Vol. 243, № 3. P. 357–370.
21. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view / P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Duris // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 55765–55779.
22. Liu Y., Wu L., Li J. D-PMU based applications for emerging active distribution systems: A review // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 179. P. 106063. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619303827?via%3Dihub> (дата обращения 12.12.23).
23. A data-driven analysis of lightning-initiated contingencies at a distribution grid with a PV farm using Micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, C. Roberts, H. Mohsenian-Rad // *North Am. Power Symp. (NAPS)*. Morgantown, WV, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/NAPS.2017.8107307.
24. A fast load control system based on mobile distribution-level phasor measurement unit / W. Yao, S. You, W. Wang, X. Deng, Y. Li, L. Zhan, Y. Liu // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 895–904.
25. Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level / L. Zhan, Y. Liu, J. Culliss, J. Zhao, Y. Liu // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6, № 4. P. 2013–2022.
26. Xia Y., Kanna S., Mandic D. P. Maximum likelihood parameter estimation of unbalanced three-phase power signals // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67, № 3. P. 569–581.
27. Usman M. U., Faruque M. O. Applications of synchrophasor technologies in power systems // *J. of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019. Vol. 7, № 2. P. 211–223.
28. Topology detection in microgrids with micro-synchrophasors / R. Arghandeh, M. Gahr, A. von Meier, G. Cavraro, M. Ruh, G. Andersson // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Denver, CO, USA: IEEE, 2015. doi: 10.1109/PESGM.2015.7286053.



29. Cavarro G., Arghandeh R. Power distribution network topology detection with time-series signature verification method // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 4. P. 3500–3509.
30. Abramovich B. N., Sychev Y. A. The method for synthesis of power supply system topology of mineral resources enterprises on the basis of logical and probabilistic assessments // *J. of Mining Institute*. 2016. Vol. 218. P. 233–241.
31. Topology analysis of distribution network based on  $\mu$ PMU and SCADA / X. Zhang, Y. Li, Ch. Yang, Sh. Wang, W. Xie, P. Ling // 2018 Intern. Conf. on Power System Technol., POWERCON. Guangzhou, China: IEEE, 2019. doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602298.
32. Chen X., Tseng K. J., Amaratunga G. State estimation for distribution systems using micro-synchrophasors // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engin. Conf. (APPEEC). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2016. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7381051.
33. Farajollahi M., Shahsavari A., Mohsenian-Rad H. Tracking state estimation in distribution networks using distribution-level synchrophasor data // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Portland, OR, USA: IEEE, 2018. doi: 10.1109/PESGM.2018.8586273.
34. Almutairi S., Miao Z., Fan L. Performance of branch-current based distribution system state estimation // 2018 North Am. Power Symp. (NAPS). Fargo, ND, USA: IEEE, 2019. doi: 10.1109/NAPS.2018.8600668.
35. Farajollahi M., Shahsavari A., Mohsenian-Rad H. Linear distribution system state estimation using synchrophasor data and pseudo-measurement // *Intern. Conf. on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*. College Station, TX, USA: IEEE, 2019. doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784644.
36. Dynamic variable-weight least squares for state estimation of distribution network based on data fusion / C. Yang, Y. Li, B. Yang, M. Du, S. Wang // 2017 IEEE Conf. on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784644.
37. Uncertainty of voltage profile in PMU-Based distribution system state estimation / C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. Vol. 65, № 5. P. 988–998.
38. Bayesian learning-based harmonic state estimation in distribution systems with smart meter and DPMU data / W. Zhou, O. Ardakanian, H.-T. Zhang, Y. Yuan // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 832–845.
39. Identification of harmonic source location in power distribution network / M. H. Jopri, A. Skamyin, M. Manap, T. Sutikno, M. R. M. Shariff, A. Belsky // *Intern. J. of Power Electronics and Drive Systems*. 2022. Vol. 13, № 2. P. 938–949.
40. Kim J., Kim H.-T., Choi S. Performance criterion of phasor measurement units for distribution system state estimation // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 106372–106384.
41. Ustinov D. A., Pelenev D. N., Babyr K. V. Investigation of the influence of unbalances the single-phase ground fault current in a coal mining enterprise // *Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. St. Petersburg, RF: IEEE, 2022. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755474.
42. Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using PMU-based state estimation / M. Gholami, A. Abbaspour, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 1396–1406.
43. Micro-synchrophasor based state estimation in distribution system / I. H. Sohel, M. Kesici, M. Sengul, B. Alboyci // 7<sup>th</sup> Intern. Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG. 2019. P. 199–203.
44. A hybrid state estimator based on SCADA and PMU measurements for medium voltage distribution system / X. Kong, Y. Chen, T. Xu, C. Wang, C. Yong, P. Li, L. Yu // *Applied Sci. Switzerland*, 2018. Vol. 8, № 9. P. 1527–1545.
45. Three-Stage distributed state estimation for AC-DC hybrid distribution network under mixed measurement environment / X. Kong, Z. Yan, R. Guo, X. Xu, C. Fang // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 39027–39036.
46. Shpenst V. A., Orel E. A. Improving the reliability of DC-DC power supply by reserving feedback signals // *Energetika. Proc. of CIS Higher Education Institutions and Power Engin. Associations*. 2021. Vol. 64, № 5. P. 408–420.
47. Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V. Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve // *Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus)*. St. Petersburg, RF: IEEE, 2022. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755770.
48. Review of AI applications in harmonic analysis in power systems / A. Eslami, M. Negnevitsky, E. Franklin, S. Lyden // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 154. P. 111897.
49. Inter-harmonics monitoring method based on PMUs / H. Liu, T. Bi, J. Li, S. Xu, Q. Yang // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2017. Vol. 11, № 18. P. 4414–4421.
50. Seyedi Y., Karimi H., Guerrero J. M. Centralized disturbance detection in smart microgrids with noisy and intermittent synchrophasor data // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, № 6. P. 2775–2783.
51. Abramovich B. N., Sychev Y. A. Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector // *J. of Mining Institute*. 20016. Vol. 217. P. 132–139.
52. Zhou Y., Arghandeh R., Spanos C. J. Partial knowledge data-driven event detection for power distribution networks // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9, № 5. P. 5152–5162.
53. Proposal of a fuzzy-based PMU for detection and classification of disturbances in power distribution networks / A. S. F. Sobrinho, R. A. Flauzino, L. H. B. Liboni, E. C. M. Costa // *Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems*. 2018. Vol. 94. P. 27–40.

54. Investigating PV generation induced voltage volatility for customers sharing a distribution service transformer / A. Parchure, S. J. Tyler, M. A. Peskin, K. Rahimi, R. P. Broadwater, M. Dilek // *IEEE Transactions on Industry Appl.* 2017. Vol. 53, № 1. P. 71–79.
55. Ustinov D. A., Shafhatov E. R. Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters // *Energies*. 2022. Vol. 15(24). P. 9630–9652.
56. Real-time coordinated voltage control of PV inverters and energy storage for weak networks with high PV penetration / L. Wang, F. Bai, R. Yan, T. K. Saha // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 3. P. 3383–3395.
57. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // *J. of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. P. 132–140.
58. Macii D., Fontanelli D., Petri D. Performance of Phasor Measurement Units for power quality event detection in urban distribution grids // *IEEE 2<sup>nd</sup> Intern. Smart Cities Conf.: Improving the Citizens Quality of Life (ISC2)*. Trento, Italy: IEEE, 2016. doi: 10.1109/ISC2.2016.7580845.
59. Lassetter C., Eduardo C.-S., Kim J. A learning scheme for microgrid reconnection // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 1. P. 691–700.
60. Demetriou P., Asprou M., Kyriakides E. A real-time controlled islanding and restoration scheme based on estimated states // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019. Vol. 34, № 1. P. 606–615.
61. Kumar D., Bhowmik P. S. Artificial neural network and phasor data-based islanding detection in smart grid // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018. Vol. 12, № 21. P. 5843–5850.
62. Chordal relaxation based ACOPF for unbalanced distribution systems with ders and voltage regulation devices / Y. Liu, J. Li, L. Wu, T. Ortmeyer // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 1. P. 970–984.
63. Data-driven power flow linearization: A regression approach / Y. Liu, N. Zhang, Y. Wang, J. Yang, C. Kang // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, № 3. P. 2569–2580.
64. Augmented sensitivity estimation based voltage control strategy of active distribution networks with PMU measurement / H. Su, P. Li, P. Li, X. Fu, L. Yu, C. Wang // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 44987–44997.
65. PMU-based estimation of voltage-to-power sensitivity for distribution networks considering the sparsity of jacobian matrix / P. Li, H. Su, C. Wang, Z. Liu, J. Wu // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 31307–31316.
66. An extended composite load model taking account of distribution network / X. Qu, X. Li, J. Song, C. He // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 6. P. 7317–7320.
67. Real-time reduced steady-state model synthesis of active distribution networks using PMU measurements / F. Mahmood, H. Hooshyar, J. Lavenius, A. Bidadfar, P. Lund, L. Vanfretti // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32, № 1. P. 546–555.
68. Line impedance estimation based on synchrophasor measurements for power distribution systems / P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas, A. von Meier // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, № 4. P. 1002–1013.
69. Moffat K., Bariya M., von Meier A. Unsupervised impedance and topology estimation of distribution networks – limitations and tools // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 846–856.
70. Ren P., Lev-Ari H., Abur A. Tracking three-phase untransposed transmission line parameters using synchronized measurements // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 4. P. 4155–4163.
71. Response-surface-based Bayesian inference for power system dynamic parameter estimation / Y. Xu, C. Huang, X. Chen, L. Mili, C. H. Tong, M. Korkali, L. Min // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, № 6. P. 5899–5909.
72. A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid / N. Shaukat, S. M. Ali, C. A. Mehmood, B. Khan, M. Jawad, U. Farid, Z. Ullah, S. M. Anwar, M. Majid // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1453–1475.
73. Zamzam A. S., Sidiropoulos N. D. Physics-aware neural networks for distribution system state estimation // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, № 6. P. 4347–4356.
74. Akrami A., Doostizadeh M., Aminifar F. Optimal reconfiguration of distribution network using  $\nu$ mu PMU measurements: A data-driven stochastic robust optimization // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 420–428.
75. Architecture and experimental validation of a low-latency phasor data concentrator / A. Derviskadic, P. Romano, M. Pignati, M. Paolone // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9, № 4. P. 2885–2893.
76. Active phasor data concentrator performing adaptive management of latency / P. Castello, C. Muscas, P. A. Pegoraro, S. Sulis // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2018. Vol. 16. P. 270–277.
77. Niazazari I., Livani H. A PMU-data-driven disruptive event classification in distribution systems // *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 157. P. 251–260.
78. Effect of unbalance on positive-sequence synchrophasor, frequency, and ROCOF estimations / P. Castello, R. Ferrero, P. A. Pegoraro, S. Toscani // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67, № 5. P. 1036–1046.
79. Cyber-attacks in PMU-based power network and countermeasures / C. Tu, X. He, X. Liu, P. Li // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 65594–65603.
80. Precision micro-synchrophasors for distribution systems: A summary of applications / A. von Meier, E. Stewart, A. McEachern, M. Andersen, L. Mehrmanesh // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, № 6. P. 2926–2936.
81. Micro-synchrophasors for distribution systems / A. von Meier, D. Culler, A. McEachern, R. Arghandeh // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. (ISGT)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2014. doi: 10.1109/ISGT.2014.6816509.

82. Certificate based authentication mechanism for PMU communication networks based on IEC 61850-90-5 / S. M. Farooq, S. M. S. Hussain, S. Kiran, T. S. Ustun // *Electronics (Switzerland)*. 2018. Vol. 7, № 12. P. 370–384.
83. Compensation of systematic measurement errors in a PMU-based monitoring system for electric distribution grids / P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas, A. von Meier // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. Vol. 68, № 10. P. 3871–3882.
84. A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems / M. Hojabri, U. Dersch, A. Papaemmanouil, P. Bosshart // *Energies*. 2019. Vol. 12, № 23. P. 4552–4575.
85. A novel RNN based load modelling method with measurement data in active distribution system / C. Zheng, S. Wang, Y. Liu, C. Liu // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 166. P. 112–124.
86. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends / A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. El Shatshat, A. M. Gaouda // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, № 5. P. 2170–2185.
87. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation / M. Pignati, L. Zanni, P. Romano, R. Cherkaoui, M. Paolone // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32, № 1. P. 381–392.
88. Locating the source of events in power distribution systems using micro-PMU data / M. Farajollahi, A. Shahsavari, E. M. Stewart, H. Mohsenian-Rad // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 6. P. 6343–6354.
89. Usman M. U., Omar Faruque M. Validation of a PMU-based fault location identification method for smart distribution network with photovoltaics using real-time data // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018. Vol. 12, № 21. P. 5824–5833.
90. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things / X. Kong, Y. Xu, Z. Jiao, D. Dong, X. Yuan, S. Li // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 16, № 10. P. 6682–6692.
91. A novel fault location methodology for smart distribution networks / H. Mirshekali, R. Dashti, A. Keshavarz, A. J. Torabi, H. R. Shaker // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2021. Vol. 12, № 2. P. 1277–1288.
92. Sharma N. K., Samantaray S. R. Assessment of PMU-based wide-area angle criterion for fault detection in microgrid // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2019. Vol. 13, № 19. P. 4301–4310.
93. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system / X. Wang, F. Shi, H. Zhang, J. Xue, Z. Yun, W. Xie, P. Ling, J. Liu // *Dianwang Jishu/Power System Technol.* 2019. Vol. 43, № 3. P. 818–825.
94. Single phase fault diagnosis and location in active distribution network using synchronized voltage measurement / T. Zhang, H. Yu, P. Zeng, L. Sun, C. Song, J. Liu // *Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 117. P. 572–593.
95. Eissa M. M. New protection principle for smart grid with renewable energy sources integration using WiMAX centralized scheduling technology // *Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems*. 2018. Vol. 97. P. 372–384.
96. Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid / N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias, J. P. S. Catalão // *Energy*. 2013. Vol. 49, № 1. P. 306–315.
97. Chin W.-L., Li W., Chen H.-H. Energy big data security threats in IoT-Based smart grid communications // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, № 10. P. 70–75.
98. Lampe L., Tonello A. M., Swart T. G. Power line communications: Principles, standards and applications from multimedia to smart grid: Second edition. Wiley, 2016. 624 p.
99. 5G Mobile cellular networks: Enabling distributed state estimation for smart grids / M. Cosovic, A. Tsitsimelis, D. Vukobratovic, J. Matamoros, C. Anton-Haro // *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, № 10. P. 62–69.
100. Gheisarnejad M., Khooban M.-H., Dragicovic T. The future 5G network-based secondary load frequency control in shipboard microgrids // *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 836–844.
101. Co-optimal PMU and communication system placement using hybrid wireless sensors / A. Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, O. R. Marouzi // *Sustainable Energy Grids and Networks*. 2019. Vol. 19(3). P. 100238.
102. A distribution level wide area monitoring system for the electric power grid-FNET/GridEye / Y. Liu, S. You, W. Yao, Y. Cui, L. Wu, D. Zhou, J. Zhao, H. Liu, Y. Liu // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 2329–2338.
103. Akhlaghi S. Optimal PMU placement considering contingency-constraints for power system observability and measurement redundancy // *IEEE Power and Energy Conf. at Illinois (PECI)*. Urbana, IL, USA: IEEE, 2016. doi: 10.1109/PECI.2016.7459251.
104. Optimal PMU placement considering state estimation uncertainty and voltage controllability / C. Zhang, Y. Jia, Z. Xu, L. L. Lai, K. P. Wong // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2017. Vol. 11, № 18. P. 4465–4475.
105. Nuqui R. F., Phadke A. G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, № 4. P. 2381–2388.
106. Prasad S., Kumar D. M. V. Trade-offs in PMU and IED deployment for active distribution state estimation using multi-objective evolutionary algorithm // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 67, № 6. P. 1298–1307.

107. Optimal placement of PMUs and communication links for distributed state estimation in distribution networks / Z. Zhao, H. Yu, P. Li, X. Kong, J. Wu, C. Wang // *Applied Energy*. 2019. Vol. 256. P. 963–983.

108. Multi objective for PMU placement in compressed distribution network considering cost and accuracy of state estimation / X. Kong, Y. Wang, X. Yuan, L. Yu // *Applied Sci. (Switzerland)*. 2019. Vol. 9, № 7. P. 1515–1537.

109. Probabilistic PMU Placement in electric power networks: An MILP-based multiobjective model / J. Aghaei, A. Baharvandi, A. Rabiee, M.-A. Akbari // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2015. Vol. 11, № 2. P. 332–341.

110. Current trends on applications of PMUs in distribution systems / G. Sanchez-Ayala, J. R. Aguero, D. Elizondo, M. Dino Lelic // *IEEE PES Innovative Smart*

*Grid Technol. Conf. (ISGT)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013. doi: 10.1109/ISGT.2013.6497923.

111. Chauhan K., Sodhi R. Placement of distribution-level phasor measurements for topological observability and monitoring of active distribution networks // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, № 6. P. 3451–3460.

112. Optimal PMU placement considering load loss and relaying in distribution networks / Z. Wu, X. Du, W. Gu, Y. Liu, P. Ling, J. Liu, C. Fang // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 33645–33653.

113. Optimal placement of phasor measurement unit in distribution networks considering the changes in topology / H. Su, C. Wang, P. Li, Z. Liu, L. Yu, J. Wu // *Applied Energy*. 2019. Vol. 250. P. 313–322.

---

### Информация об авторах

**Шклярский Ярослав Элиевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей электротехники. Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия ВО, 2–4/45, Санкт-Петербург, 199106, Россия.  
E-mail: Shklyarskiy\_YaE@pers.spmi.ru

**Шайхлисламов Нурислам Эдуардович** – аспирант 2 года обучения. Санкт-Петербургский горный университет, 21-я линия ВО, 2–4/45, Санкт-Петербург, 199106, Россия.  
E-mail: nurislam.sh@yandex.ru

### References

1. Jordehi A. R. How to deal with uncertainties in electric power systems? A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. P. 145–155.

2. Akrami A., Doostizadeh M., Aminifar F. Power system flexibility: an overview of emergence to evolution // *J. of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2019. Vol. 7, № 5. P. 987–1007.

3. A novel control method for active power sharing in renewable-energy-based micro distribution networks / W. J. Abdallah, K. Hashmi, M. T. Faiz, A. Flah, S. Channumsin, M. A. Mohamed, D. A. Ustinov // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 1579–1604.

4. Profitability analysis of grid-connected photovoltaic facilities for household electricity self-sufficiency / A. Colmenar-Santos, S. Campiñez-Romero, C. Pérez-Molina, M. Castro-Gil // *Energy Policy*. 2012. Vol. 51. P. 749–764.

5. Lai C. S., McCulloch M. D. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage // *Applied Energy*. 2017. Vol. 190. P. 191–203.

6. Cascade frequency converters control features / A. G. Vorontsov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, Y. A. Sychev // *J. of Mining Institute*. 2020. Vol. 241, № 1. P. 37–45.

7. Gómez A., Dopazo C., Fueyo N. The «cost of not doing» energy planning: The Spanish energy bubble // *Energy*. 2016. Vol. 101. P. 434–446.

8. Optimal locations for energy storage damping systems in the Western North American interconnect / R. H. Byrne, D. J. Trudnowski, J. C. Neely, R. T. Elliott, D. A. Schoenwald, M. K. Donnelly // *IEEE Power and Energy Society General Meeting, Conf. National Harbor, MD, USA: IEEE*, 2014. doi: 10.1109/PESGM.2014.6939875.

9. Optimal micro-PMU placement using mutual information theory in distribution networks / Z. Wu, X. Du, W. Gu, P. Ling, J. Liu, C. Fang // *Energies*. 2018. Vol. 11, № 7. P. 1917–1936.

10. Zanjani M. G. M., Mazlumi K., Kamwa I. Application of  $\mu$ PMUs for adaptive protection of overcurrent relays in microgrids // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018. Vol. 12, № 18. P. 4061–4069.

11. Optimal PMU-communication link placement for smart grid wide-area measurement systems / X. Zhu, M. H. F. Wen, V. O. K. Li, K.-C. Leung // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, № 4. P. 4446–4456.

12. Mohsenian-Rad H., Stewart E., Cortez E. Distribution synchrophasors: Pairing big data with analytics to create actionable information // *IEEE Power and Energy Magazine*. 2018. Vol. 16, № 3. P. 26–34.

13. Anomaly detection using optimally placed  $\mu$ PMU sensors in distribution grids / M. Jamei, A. Scaglione, C. Roberts, E. Stewart, S. Peisert, C. McParland, A. McEachern // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 4. P. 3611–3623.

14. Dusabimana E., Yoon S.-G. A survey on the micro-phasor measurement unit in distribution networks // *Electronics (Switzerland)*. 2020. Vol. 9, № 2. P. 305–318.

15. A data-driven analysis of capacitor bank operation at a distribution feeder using micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, A. von Meier, L. Alvarez, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conf. (ISGT)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/ISGT.2017.8085984.

16. Distribution grid reliability analysis considering regulation down load resources via micro-PMU data / A. Shahsavari, A. Sadeghi-Mobarakeh, E. Stewart, H. Mohsenian-Rad // IEEE Intern. Conf. on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2016. P. 472–477. doi: 10.1109/SmartGridComm.2016.7778806.
17. Autopsy on active distribution networks: A data-driven fault analysis using micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, C. Roberts, F. Megala, L. Alvarez, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // North Am. Power Symp. (NAPS). Morgantown, WV, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/NAPS.2017.8107265.
18. Situational awareness in distribution grid using micro-PMU data: a machine learning approach / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. M. Stewart, E. Cortez, H. Mohsenian-Rad // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 6. P. 6167–6177.
19. Phasor measurement units optimal placement and performance limits for fault localization / M. Jamei, R. Ramakrishna, T. Tesfay, R. Gentz, C. Roberts, A. Scaglione, S. Peisert // IEEE J. on Selected Areas in Communications. 2020. Vol. 38, № 1. P. 180–192.
20. Multi-terminal DC grid overall control with modular multilevel converters / M. Jiménez Carrizosa, N. Stankovic, J. C. Vannier, Y. E. Shklyarskiy, A. I. Bardanov // J. of Mining Institute. 2020. Vol. 243, № 3. P. 357–370.
21. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view / P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Duris // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 55765–55779.
22. Liu Y., Wu L., Li J. D-PMU based applications for emerging active distribution systems: A review // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 179. P. 106063. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619303827?via%3Dihub> (дата обращения 12.12.23).
23. A data-driven analysis of lightning-initiated contingencies at a distribution grid with a PV farm using Micro-PMU data / A. Shahsavari, M. Farajollahi, E. Stewart, C. Roberts, H. Mohsenian-Rad // North Am. Power Symp. (NAPS). Morgantown, WV, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/NAPS.2017.8107307.
24. A fast load control system based on mobile distribution-level phasor measurement unit / W. Yao, S. You, W. Wang, X. Deng, Y. Li, L. Zhan, Y. Liu // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 1. P. 895–904.
25. Dynamic single-phase synchronized phase and frequency estimation at the distribution level / L. Zhan, Y. Liu, J. Culliss, J. Zhao, Y. Liu // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6, № 4. P. 2013–2022.
26. Xia Y., Kanna S., Mandic D. P. Maximum likelihood parameter estimation of unbalanced three-phase power signals // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67, № 3. P. 569–581.
27. Usman M. U., Faruque M. O. Applications of synchrophasor technologies in power systems // J. of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. Vol. 7, № 2. P. 211–223.
28. Topology detection in microgrids with micro-synchrophasors / R. Arghandeh, M. Gahr, A. von Meier, G. Cavraro, M. Ruh, G. Andersson // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015. doi: 10.1109/PESGM.2015.7286053.
29. Cavraro G., Arghandeh R. Power distribution network topology detection with time-series signature verification method // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 4. P. 3500–3509.
30. Abramovich B. N., Sychev Y. A. The method for synthesis of power supply system topology of mineral resources enterprises on the basis of logical and probabilistic assessments // J. of Mining Institute. 2016. Vol. 218. P. 233–241.
31. Topology analysis of distribution network based on  $\mu$ PMU and SCADA / X. Zhang, Y. Li, Ch. Yang, Sh. Wang, W. Xie, P. Ling // 2018 Intern. Conf. on Power System Technol., POWERCON. Guangzhou, China: IEEE, 2019. doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602298.
32. Chen X., Tseng K. J., Amaratunga G. State estimation for distribution systems using micro-synchrophasors // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engin. Conf. (APPEEC). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2016. doi: 10.1109/APPEEC.2015.7381051.
33. Farajollahi M., Shahsavari A., Mohsenian-Rad H. Tracking state estimation in distribution networks using distribution-level synchrophasor data // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA: IEEE, 2018. doi: 10.1109/PESGM.2018.8586273.
34. Almutairi S., Miao Z., Fan L. Performance of branch-current based distribution system state estimation // 2018 North Am. Power Symp. (NAPS). Fargo, ND, USA: IEEE, 2019. doi: 10.1109/NAPS.2018.8600668.
35. Farajollahi M., Shahsavari A., Mohsenian-Rad H. Linear distribution system state estimation using synchrophasor data and pseudo-measurement // Intern. Conf. on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA). College Station, TX, USA: IEEE, 2019. doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784644.
36. Dynamic variable-weight least squares for state estimation of distribution network based on data fusion / C. Yang, Y. Li, B. Yang, M. Du, S. Wang // 2017 IEEE Conf. on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/SGSMA.2019.8784644.
37. Uncertainty of voltage profile in PMU-Based distribution system state estimation / C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Vol. 65, № 5. P. 988–998.
38. Bayesian learning-based harmonic state estimation in distribution systems with smart meter and DPMU data / W. Zhou, O. Ardakanian, H.-T. Zhang, Y. Yuan // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 1. P. 832–845.
39. Identification of harmonic source location in power distribution network / M. H. Jopri, A. Skamyin, M. Manap, T. Sutikno, M. R. M. Shariff, A. Belsky // Intern. J. of Power Electronics and Drive Systems. 2022. Vol. 13, № 2. P. 938–949.
40. Kim J., Kim H.-T., Choi S. Performance criterion of phasor measurement units for distribution system state estimation // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 106372–106384.

41. Ustinov D. A., Pelenev D. N., Babyr K. V. Investigation of the influence of unbalances the single-phase ground fault current in a coal mining enterprise // Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). St. Petersburg, RF: IEEE, 2022. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755474.
42. Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using PMU-based state estimation / M. Gholami, A. Abbaspour, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 2. P. 1396–1406.
43. Micro-synchrophasor based state estimation in distribution system / I. H. Sohel, M. Kesici, M. Sengul, B. Alboyaci // 7<sup>th</sup> Intern. Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, ICSG. 2019. P. 199–203.
44. A hybrid state estimator based on SCADA and PMU measurements for medium voltage distribution system / X. Kong, Y. Chen, T. Xu, C. Wang, C. Yong, P. Li, L. Yu // Applied Sci. Switzerland, 2018. Vol. 8, № 9. P. 1527–1545.
45. Three-Stage distributed state estimation for AC-DC hybrid distribution network under mixed measurement environment / X. Kong, Z. Yan, R. Guo, X. Xu, C. Fang // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 39027–39036.
46. Shpenst V. A., Orel E. A. Improving the reliability of DC-DC power supply by reserving feedback signals // Energetika. Proc. of CIS Higher Education Institutions and Power Engin. Associations. 2021. Vol. 64, № 5. P. 408–420.
47. Shpenst V. A., Orel E. A., Babyr K. V. Reliability improvement of DC-DC power converters by means of feedback signals reserve // Conf. of Russian Young Researchers in Elect. and Electronic Engin. (ElConRus). St. Petersburg, RF: IEEE, 2022. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755770.
48. Review of AI applications in harmonic analysis in power systems / A. Eslami, M. Negnevitsky, E. Franklin, S. Lyden // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 154. P. 111897.
49. Inter-harmonics monitoring method based on PMUs / H. Liu, T. Bi, J. Li, S. Xu, Q. Yang // IET Generation, Transmission and Distribution. 2017. Vol. 11, № 18. P. 4414–4421.
50. Seyedi Y., Karimi H., Guerrero J. M. Centralized disturbance detection in smart microgrids with noisy and intermittent synchrophasor data // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 8, № 6. P. 2775–2783.
51. Abramovich B. N., Sychev Y. A. Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector // J. of Mining Institute. 20016. Vol. 217. P. 132–139.
52. Zhou Y., Arghandeh R., Spanos C. J. Partial knowledge data-driven event detection for power distribution networks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 9, № 5. P. 5152–5162.
53. Proposal of a fuzzy-based PMU for detection and classification of disturbances in power distribution networks / A. S. F. Sobrinho, R. A. Flauzino, L. H. B. Liboni, E. C. M. Costa // Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems. 2018. Vol. 94. P. 27–40.
54. Investigating PV generation induced voltage volatility for customers sharing a distribution service transformer / A. Parchure, S. J. Tyler, M. A. Peskin, K. Rahimi, R. P. Broadwater, M. Dilek // IEEE Transactions on Industry Appl. 2017. Vol. 53, № 1. P. 71–79.
55. Ustinov D. A., Shafhatov E. R. Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters // Energies. 2022. Vol. 15(24). P. 9630–9652.
56. Real-time coordinated voltage control of PV inverters and energy storage for weak networks with high PV penetration / L. Wang, F. Bai, R. Yan, T. K. Saha // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 3. P. 3383–3395.
57. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // J. of Mining Institute. 2021. Vol. 247. P. 132–140.
58. Macii D., Fontanelli D., Petri D. Performance of Phasor Measurement Units for power quality event detection in urban distribution grids // IEEE 2<sup>nd</sup> Intern. Smart Cities Conf.: Improving the Citizens Quality of Life (ISC2). Trento, Italy: IEEE, 2016. doi: 10.1109/ISC2.2016.7580845.
59. Lassetter C., Eduardo C.-S., Kim J. A learning scheme for microgrid reconnection // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 1. P. 691–700.
60. Demetriou P., Asprou M., Kyriakides E. A real-time controlled islanding and restoration scheme based on estimated states // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34, № 1. P. 606–615.
61. Kumar D., Bhowmik P. S. Artificial neural network and phasor data-based islanding detection in smart grid // IET Generation, Transmission and Distribution. 2018. Vol. 12, № 21. P. 5843–5850.
62. Chordal relaxation based ACOPF for unbalanced distribution systems with ders and voltage regulation devices / Y. Liu, J. Li, L. Wu, T. Ortmeier // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 1. P. 970–984.
63. Data-driven power flow linearization: A regression approach / Y. Liu, N. Zhang, Y. Wang, J. Yang, C. Kang // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 3. P. 2569–2580.
64. Augmented sensitivity estimation based voltage control strategy of active distribution networks with PMU measurement / H. Su, P. Li, P. Li, X. Fu, L. Yu, C. Wang // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 44987–44997.
65. PMU-based estimation of voltage-to-power sensitivity for distribution networks considering the sparsity of jacobian matrix / P. Li, H. Su, C. Wang, Z. Liu, J. Wu // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 31307–31316.
66. An extended composite load model taking account of distribution network / X. Qu, X. Li, J. Song, C. He // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 6. P. 7317–7320.
67. Real-time reduced steady-state model synthesis of active distribution networks using PMU measure-

ments / F. Mahmood, H. Hooshyar, J. Lavenius, A. Bidadfar, P. Lund, L. Vanfretti // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, № 1. P. 546–555.

68. Line impedance estimation based on synchrophasor measurements for power distribution systems / P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas, A. von Meier // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, № 4. P. 1002–1013.

69. Moffat K., Bariya M., von Meier A. Unsupervised impedance and topology estimation of distribution networks – limitations and tools // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 1. P. 846–856.

70. Ren P., Lev-Ari H., Abur A. Tracking three-phase untransposed transmission line parameters using synchronized measurements // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 4. P. 4155–4163.

71. Response-surface-based Bayesian inference for power system dynamic parameter estimation / Y. Xu, C. Huang, X. Chen, L. Mili, C. H. Tong, M. Korkali, L. Min // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10, № 6. P. 5899–5909.

72. A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid / N. Shaukat, S. M. Ali, C. A. Mehmood, B. Khan, M. Jawad, U. Farid, Z. Ullah, S. M. Anwar, M. Majid // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1453–1475.

73. Zamzam A. S., Sidiropoulos N. D. Physics-aware neural networks for distribution system state estimation // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35, № 6. P. 4347–4356.

74. Akrami A., Doostizadeh M., Aminifar F. Optimal reconfiguration of distribution network using  $\mu$  PMU measurements: A data-driven stochastic robust optimization // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 1. P. 420–428.

75. Architecture and experimental validation of a low-latency phasor data concentrator / A. Derviskadic, P. Romano, M. Pignati, M. Paolone // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 9, № 4. P. 2885–2893.

76. Active phasor data concentrator performing adaptive management of latency / P. Castello, C. Muscas, P. A. Pegoraro, S. Sulis // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2018. Vol. 16. P. 270–277.

77. Niazazari I., Livani H. A PMU-data-driven disruptive event classification in distribution systems // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 157. P. 251–260.

78. Effect of unbalance on positive-sequence synchrophasor, frequency, and ROCOF estimations / P. Castello, R. Ferrero, P. A. Pegoraro, S. Toscani // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67, № 5. P. 1036–1046.

79. Cyber-attacks in PMU-based power network and countermeasures / C. Tu, X. He, X. Liu, P. Li // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 65594–65603.

80. Precision micro-synchrophasors for distribution systems: A summary of applications / A. von Meier, E. Stewart, A. McEachern, M. Andersen, L. Mehrmanesh // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 8, № 6. P. 2926–2936.

81. Micro-synchrophasors for distribution systems / A. von Meier, D. Culler, A. McEachern, R. Arghandeh //

IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2014. doi: 10.1109/ISGT.2014.6816509.

82. Certificate based authentication mechanism for PMU communication networks based on IEC 61850-90-5 / S. M. Farooq, S. M. S. Hussain, S. Kiran, T. S. Ustun // Electronics (Switzerland). 2018. Vol. 7, № 12. P. 370–384.

83. Compensation of systematic measurement errors in a PMU-based monitoring system for electric distribution grids / P. A. Pegoraro, K. Brady, P. Castello, C. Muscas, A. von Meier // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68, № 10. P. 3871–3882.

84. A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems / M. Hojabri, U. Dersch, A. Papaemmanouil, P. Bosshart // Energies. 2019. Vol. 12, № 23. P. 4552–4575.

85. A novel RNN based load modelling method with measurement data in active distribution system / C. Zheng, S. Wang, Y. Liu, C. Liu // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 166. P. 112–124.

86. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends / A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. El Shatshat, A. M. Gaouda // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 8, № 5. P. 2170–2185.

87. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation / M. Pignati, L. Zanni, P. Romano, R. Cherkaoui, M. Paolone // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, № 1. P. 381–392.

88. Locating the source of events in power distribution systems using micro-PMU data / M. Farajollahi, A. Shahsavari, E. M. Stewart, H. Mohsenian-Rad // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 6. P. 6343–6354.

89. Usman M. U., Omar Faruque M. Validation of a PMU-based fault location identification method for smart distribution network with photovoltaics using real-time data // IET Generation, Transmission and Distribution. 2018. Vol. 12, № 21. P. 5824–5833.

90. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things / X. Kong, Y. Xu, Z. Jiao, D. Dong, X. Yuan, S. Li // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16, № 10. P. 6682–6692.

91. A novel fault location methodology for smart distribution networks / H. Mirshekali, R. Dashti, A. Keshavarz, A. J. Torabi, H. R. Shaker // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12, № 2. P. 1277–1288.

92. Sharma N. K., Samantaray S. R. Assessment of PMU-based wide-area angle criterion for fault detection in microgrid // IET Generation, Transmission and Distribution. 2019. Vol. 13, № 19. P. 4301–4310.

93. A single-phase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system / X. Wang, F. Shi, H. Zhang, J. Xue, Z. Yun, W. Xie, P. Ling, J. Liu // Dianwang Jishu/Power System Technol. 2019. Vol. 43, № 3. P. 818–825.

94. Single phase fault diagnosis and location in active distribution network using synchronized voltage measurement / T. Zhang, H. Yu, P. Zeng, L. Sun, C. Song, J. Liu // Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems. 2020. Vol. 117. P. 572–593.
95. Eissa M. M. New protection principle for smart grid with renewable energy sources integration using WiMAX centralized scheduling technology // Intern. J. of Elect. Power and Energy Systems. 2018. Vol. 97. P. 372–384.
96. Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid / N. C. Batista, R. Melício, J. C. O. Matias, J. P. S. Catalão // Energy. 2013. Vol. 49, № 1. P. 306–315.
97. Chin W.-L., Li W., Chen H.-H. Energy big data security threats in IoT-Based smart grid communications // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 10. P. 70–75.
98. Lampe L., Tonello A. M., Swart T. G. Power line communications: Principles, standards and applications from multimedia to smart grid: Second edition. Wiley, 2016. 624 p.
99. 5G Mobile cellular networks: Enabling distributed state estimation for smart grids / M. Cosovic, A. Tsitsimelis, D. Vukobratovic, J. Matamoros, C. Anton-Haro // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 10. P. 62–69.
100. Gheisarnejad M., Khooban M.-H., Dragicevic T. The future 5G network-based secondary load frequency control in shipboard microgrids // IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2020. Vol. 8, № 1. P. 836–844.
101. Co-optimal PMU and communication system placement using hybrid wireless sensors / A. Bashian, M. Assili, A. Anvari-Moghaddam, O. R. Marouzi // Sustainable Energy Grids and Networks. 2019. Vol. 19(3). P. 100238.
102. A distribution level wide area monitoring system for the electric power grid-FNET/GridEye / Y. Liu, S. You, W. Yao, Y. Cui, L. Wu, D. Zhou, J. Zhao, H. Liu, Y. Liu // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 2329–2338.
103. Akhlaghi S. Optimal PMU placement considering contingency-constraints for power system observability and measurement redundancy // IEEE Power and Energy Conf. at Illinois (PECI). Urbana, IL, USA: IEEE, 2016. doi: 10.1109/PECI.2016.7459251.
104. Optimal PMU placement considering state estimation uncertainty and voltage controllability / C. Zhang, Y. Jia, Z. Xu, L. L. Lai, K. P. Wong // IET Generation, Transmission and Distribution. 2017. Vol. 11, № 18. P. 4465–4475.
105. Nuqui R. F., Phadke A. G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, № 4. P. 2381–2388.
106. Prasad S., Kumar D. M. V. Trade-offs in PMU and IED deployment for active distribution state estimation using multi-objective evolutionary algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67, № 6. P. 1298–1307.
107. Optimal placement of PMUs and communication links for distributed state estimation in distribution networks / Z. Zhao, H. Yu, P. Li, X. Kong, J. Wu, C. Wang // Applied Energy. 2019. Vol. 256. P. 963–983.
108. Multi objective for PMU placement in compressed distribution network considering cost and accuracy of state estimation / X. Kong, Y. Wang, X. Yuan, L. Yu // Applied Sci. (Switzerland). 2019. Vol. 9, № 7. P. 1515–1537.
109. Probabilistic PMU Placement in electric power networks: An MILP-based multiobjective model / J. Aghaei, A. Baharvandi, A. Rabiee, M.-A. Akbari // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11, № 2. P. 332–341.
110. Current trends on applications of PMUs in distribution systems / G. Sanchez-Ayala, J. R. Aguerc, D. Elizondo, M. Dino Lelic // IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2013. doi: 10.1109/ISGT.2013.6497923.
111. Chauhan K., Sodhi R. Placement of distribution-level phasor measurements for topological observability and monitoring of active distribution networks // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, № 6. P. 3451–3460.
112. Optimal PMU placement considering load loss and relaying in distribution networks / Z. Wu, X. Du, W. Gu, Y. Liu, P. Ling, J. Liu, C. Fang // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 33645–33653.
113. Optimal placement of phasor measurement unit in distribution networks considering the changes in topology / H. Su, C. Wang, P. Li, Z. Liu, L. Yu, J. Wu // Applied Energy. 2019. Vol. 250. P. 313–322.

---

#### Information about the authors

**Yaroslav E. Shklyarsky** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of General Electrical Engineering, Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.  
E-mail: Shklyarskiy\_YaE@pers.spmi.ru

**Nurislam E. Shaykhlislamov** – 2<sup>nd</sup> year postgraduate student, Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.  
E-mail: nurislam.sh@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; принята к публикации после рецензирования 01.02.2024; опубликована онлайн 25.03.2024.

Submitted 06.12.2023; accepted 01.02.2024; published online 25.03.2024.

---