

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа, В.Е. Рудник, А.В. Киевец

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия*

Стабильная работа энергосистемы является одним из основных вопросов, рассматриваемых в электроэнергетике. Современные уровни потребления ведут к необходимости постоянно наращивать генерируемые мощности, многократно преобразуя и усложняя исходную схему. В дополнение к этому, учитывая текущий тренд на развитие цифровой энергетики и внедрение возобновляемых источников энергии, добавляется все больше неопределенностей, которые сложно предопределить стандартными методами регулирования.

События в энергосистеме являются детерминированными, т. е. случайными. Это приводит к тому, что сложно в полной мере оценить устойчивость энергосистемы, уровни напряжений в узлах, токов в ветвях или возможные потери мощности. Нахождение законов распределения вероятностных характеристик способно предоставить понимание всех возможных состояний, в которых может существовать объект. Проблема их получения заключается в сложности учета всех взаимосвязей между случайными аргументами исходных данных. Данные законы необходимы для дальнейшего определения оптимальных режимов работы ЭЭС, возможности решения задачи определения оптимальных мест установки и требуемого объема возобновляемой генерируемой энергии недетерминированным способом.

Цель данной статьи заключается в апробировании разрабатываемого метода получения полных вероятностных характеристик СГИД. Данный метод в отличие от методов семейства Монте-Карло не использует случайную выборку исходных аргументов, а полностью покрывает исследуемую функциональную зависимость. Поставленная задача была решена с использованием положений теории вероятностей и математической статистики, в энергетике в частности, численных методов оптимизации. Также использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB Matpower.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, установившийся режим, закон распределения вероятности, случайная величина, квантиль, функциональная зависимость.

Введение

В последние годы проблема нарушения устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) является одной из первостепенных, наряду с ее укрупнением и развитием. Спрос на электроэнергию возрастает, но объемы генерации являются недостаточными для удовлетворения спроса. Благодаря этому общая доля проникновения возобновляемых источников энергии расширяется, а расчеты показывают, что спрос за период с 2010 по 2040 год на альтернативные источники энергии вырастет на 92 % [1]. Это, в свою очередь, приводит к росту стохастических процессов в системе, что делает систему управления менее контролируемой, приводя к увеличению системных аварий [2]. Это напрямую связано с тем, что классическая ЭЭС имеет «вертикальную» структуру, включающую в себя заранее определенный перечень генерирующего оборудования, управляемого диспетчерскими центрами с целью обеспечения необходимого покрытия требуемой мощности. Однако в случае использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) система реструктуризируется в «вертикально-горизонтальную», а возможность регулировать выработку мощности становится не диспетчеризуемой [3].

Операторам диспетчерских управлений необходимо поддерживать надежное и эффективное функционирование ЭЭС. Для обеспечения оптимальной, устойчивой работы с минимальными потерями и флуктуациями мощности, а также возможностью установки ВИЭ необходимо определить строгий и адекватный метод устранения всех неопределенностей режима, связанных с вышеобозначенными проблемами.

Для достоверного определения всех возможных состояний системы, в которых она может пребывать, необходимо определить в недетерминированной форме [4], как токи, напряжения, потери мощности распределяются по сети, для дальнейшей оценки устойчивости, возможности, мест и объема установки ВИЭ. Основная проблема заключается в том, что получение вероятностных характеристик стандартными статистическими методами не имеет полного решения во всем спектре значений функциональной зависимости (ФЗ) [5]. Необходимо понять характер и форму вероятностных характеристик ЭЭС, чтобы понять весь спектр процессов в сети. В связи с этим предложен метод выбора интервальных границ входных и выходных данных (СГИД) и его применение для получения вероятностных характеристик электрических величин и их небалансов.

Постановка задачи

Получение функции распределения (ФРВ) и плотности распределения вероятностей (ПРВ) многомерной ФЗ, а также вероятностей ФЗ, предполагающих значения из многомерной области, в ее каноническом аналитическом варианте представляет собой функционал многомерной ФЗ в пределах, определяемых сущностью задачи.

Существует практическая задача массовых особенностей ФЗ, формирующих границы области функционала [6], обуславливающих неизмеримые аналитические сложности контроля пределов и правильной последовательности раскрытия интеграла алгоритмом вычисления. В электроэнергетике это прежде всего многомерные задачи определения вероятностных характеристик. В случае цифровых подстанций, где высокий уровень автоматизации [7], информационный обмен между её элементами осуществляется согласно различным протоколам, возможность предопределять небалансы и управлять ими будет влиять на надежность и производительность [8]. Однако аналитические трудности формирования пределов и расчета функционалов могут возникнуть, начиная с третьего или четвертого порядка ФЗ. Становится актуальным поиск других методов расчета, которые в меньшей степени зависят от размерности.

Поэтому разрабатываются и используются различные методы, связанные с численным получением вероятностных характеристик. Например, расчет значений ФЗ для каждого статистически смоделированного варианта случайного аргумента (СА), который используется только для получения статистики, т. е. требования к формированию и расчету функционалов не задаются, а полученная статистика используется по прямому назначению для получения статистической оценки вероятностных характеристик. Также методы могут быть основаны на разложении ФЗ относительно математических ожиданий СА.

Для сохранения статистической репрезентативности полученных результатов в таких методах для многомерных зависимостей требуется в геометрической прогрессии увеличивать необходимое минимальное число испытаний для соблюдения статистической представительности. Исходя из этого, актуальным является поиск других вычислительных численных методов определения ЗРВ, не критичных к размерности ФЗ.

Наиболее известные методы, используемые в этой области, включают в себя семейство методов Монте-Карло [9], основанное на создании статистической выборки исходных данных с сохранением статистической представительности, с последующим вычислением ЗРВ ФЗ. Также можно отметить следующие методы: несимметричный метод двухточечной оценки (US2PEM) [10], метод симметричной двухточечной оценки (S2PEM) [11],

метод Грамма – Шарлье и выборка латинского гиперкуба (LHS), предназначенные для замены методов Монте-Карло в ряде случаев, допускаемых увеличение погрешности по отношению к Монте-Карло [12]. Также можно отметить методы поиска оптимума системы, такие как метод пчелиного роя и генетический алгоритм, однако из-за их детерминированной логики задачи они не подходят для этой конкретной проблемы.

Наличие этих методов не исключает необходимости поиска новых, способных полностью исследовать ЗРВ ФЗ равномерно во всем диапазоне, не теряя при этом «веса» плотности конкретного значения ФЗ.

Описание метода

В тех ФЗ, которые описывают практические проблемы, рационально рассматривать все СА как независимые переменные и, следовательно, варьировать их значения произвольно [13], независимо от типов условных вероятностных характеристик, которые меняются с изменением значений СА, что является естественным. В случае с зависимыми СА, значения одного СА должны быть определены с использованием выражений условных вероятностей, которые представляют собой дополнительные процедуры.

Метод определения ФРВ и ЗРВ ФЗ, также вероятности принятия зависимостью значения из интервала ФРВ и ПРВ случайных величин заключается в естественном суммировании вероятностей каждого варианта комбинации значений СА в соответствии с заданными критериями. Многообразие вариантов значения СА, которое соответствует значению ФЗ, можно назвать ассоциацией этого значения ФЗ. Значение-ассоциация ФЗ, которое как событие состоит из общей суммы вариантов объединения значений всех СА. Варианты комбинаций этих значений-событий несовместимы, потому что они формируются из всех СА и не могут комбинироваться, кроме как в виде различных значений по меньшей мере одного СА. Значения каждого СА несовместимы друг с другом, поэтому все варианты объединения всех СА также будут несовместимы. Следовательно, вероятность значения-ассоциации ФЗ равна сумме вероятностей всех комбинаций СА, которые связаны с этим значением ФЗ, и эту вероятность можно назвать собственной вероятностью значения ФЗ. Более подробно о методе можно узнать здесь [14].

Предложен метод селекции входных и выходных границ интервалов данных, который не критичен к размерности ФЗ. Алгоритм формируется посредством процедур для случаев явных выражений исследуемых функций и реализуется программным путем. Предполагаются известными ФРВ случайных независимых аргументов. Обобщенная реализация алгоритма представлена на рис. 1.

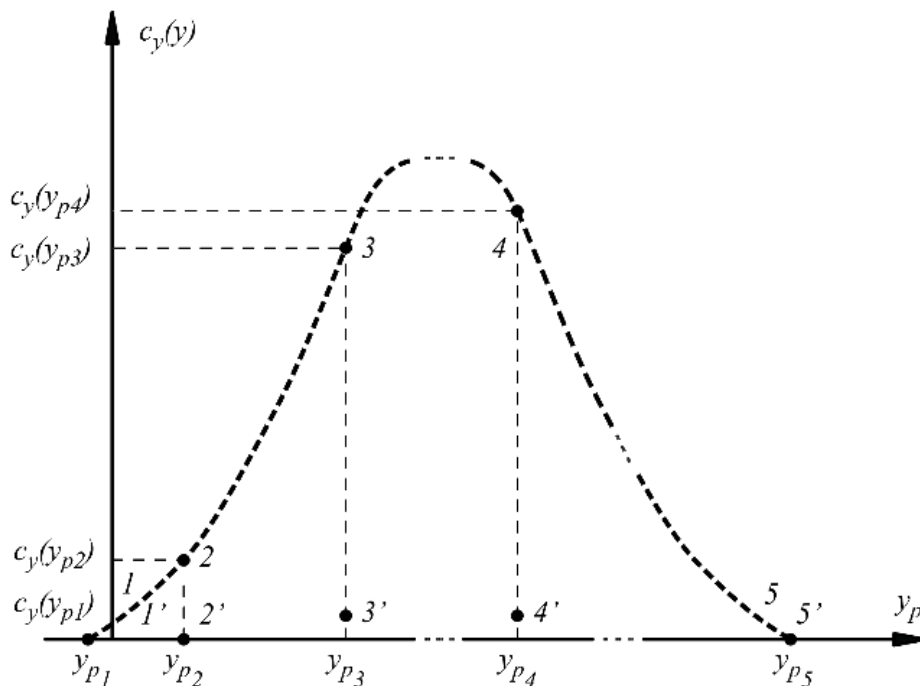


Рис. 1. Формирование ПРВ ФЗ

1. Выбор дискретных значений порядков квантилей СА: $0, p_1, \dots, p_j, \dots, 1$.

2. Подготовка дискретных квантилей, значений ФРВ и ПРВ СА одного порядка. Для нулевого порядка:

$$x_{10} = f_1^{-1}(0), \dots, x_{i0} = f_i^{-1}(0), \dots, x_{n0} = f_n^{-1}(0);$$

$$c_1(x_{10}), \dots, c_i(x_{i0}), \dots, c_n(x_{n0}); \quad (1)$$

аналогично для порядков $p_1, \dots, p_j, \dots, 1$.

3. Подготовка базовых дискретных значений ФЗ и совместных ПРВ одного порядка:

порядок 0:

$$y_0 = \varphi(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0});$$

$$c_0(x_{10}, \dots, x_{i0}, \dots, x_{n0}) = c_1(x_{10}), \dots, c_i(x_{i0}), \dots, c_n(x_{n0}); \quad (2)$$

порядок p_1 :

$$y_{p_1} = \varphi(x_{1p_1}, \dots, x_{ip_1}, \dots, x_{np_1});$$

$$c_{p_1}(x_{1p_1}, \dots, x_{ip_1}, \dots, x_{np_1}) = c_1(x_{1p_1}), \dots, c_i(x_{ip_1}), \dots, c_n(x_{np_1}); \quad (3)$$

аналогично для других порядков.

4. Полный перебор квантилей всех порядков аргументов $X_1, \dots, X_2, \dots, X_n$ ФЗ в явном или неявном виде, вычисление значений ФЗ, совместных ПРВ случайных аргументов, выбор и суммирование последних как составляющих ПРВ функциональной зависимости по принципу равенства заданному базовому значению ФЗ.

Расчет установившегося режима, равно как и определение его параметров в детерминированном виде, предопределяется методами и законами электротехники [15]. Классический детерминированный подход к рассмотрению процедуры формирования законов распределения является ресурсозатратным. Это предопределяется тем, что после обработки независимых аргументов – активной и реактивной мощностей нагрузки, активной мощности и напряжения генераторов – посредством функциональной зависимости они становятся статистически зависимыми [16]. Расчет условных законов распределения технически возможен, однако потребуются дополнительный объем вычислений, исходя из этого при нахождении ЗРВ требуется выстраивать логику работы с независимыми СА.

Между входными СА может быть вероятностная зависимость. Законы данных компонентов распределены в соответствии с нормальным законом, реже – равномерным. Нормальными будут и совместные ЗРВ. Их параметры будут определяться с учетом коэффициента корреляции [17]. Вероятностная связь внутри отдельно взятого узла никоим образом не влияет на характеристики других узлов. Таким образом, в рамках расчета установившегося режима взаимосвязь ЗРВ между разными узлами отсутствует, а в рамках одного узла либо исключена, либо определяется коэффициентом корреляции.

В соответствии с логикой метода формирования конечной ПРВ интересующей ФЗ происходит за счет критерия равенства некоторым ее значениям, определяемым расчетным путем, с использованием всей области значений ФЗ. ЗРВ аргументов при этом определяются заранее.

Алгоритм расчета установившегося режима

1. Законы вероятностей СА (активная и реактивная мощности нагрузки $N_1, Q_1, \dots, N_i, Q_i, \dots$; активная мощность и напряжение генераторов $N_{Г1}, U_{Г1}, \dots, N_{Гk}, U_{Гk}, \dots$; величина и угол напряжения балансирующего узла U_6 и Φ_6) при отсутствии корреляционной зависимости, в рамках исследуемой задачи:

для ФРВ:

$$f_1(n_1), f_{1q}(q_1), \dots, f_i(n_i), f_{iq}(q_i), f_{Г1}(n_{Г1}), f_{Г1u}(u_{Г1}), \dots, f_{Гk}(n_{Гk}), f_{Гku}(u_{Гk}); \quad (4)$$

для ПРВ:

$$c_1(n_1), c_{1q}(q_1), \dots, c_i(n_i), c_{iq}(q_i), \dots, c_{Г1}(n_{Г1}), c_{Г1u}(u_{Г1}), \dots, c_{Гk}(n_{Гk}), c_{Гku}(u_{Гk}); \quad (5)$$

для балансирующего узла: $U_6 = \text{const}$ и $\Phi_6 = 0$.

2. Определение параметров нормальных распределений:

математические ожидания (МО):

$$m(N_1), m(Q_1), \dots, m(N_i), m(Q_i), \dots, m(N_{Г1}), m(U_{Г1}), \dots, m(N_{Гk}), m(U_{Гk}), \dots; \quad (6)$$

среднеквадратические отклонения (СКО):

$$\sigma(N_1), \sigma(Q_1), \dots, \sigma(N_i), \sigma(Q_i), \dots, \sigma(N_{Г1}), \sigma(U_{Г1}), \dots, \sigma(N_{Гk}), \sigma(U_{Гk}), \dots \quad (7)$$

3. Выбор количества и самих значений порядков квантилей [2] СА из диапазона $[0, 1]$: $0, p_1, \dots, p_j, \dots, 1$ с равномерным шагом.

4. Подготовка базовой системы [10] квантилей СА одного порядка и составляющих ПРВ параметров режимов.

Порядок 0:

Квантили нулевого порядка:

$$n_{10} = f_1^{-1}(0), q_{10} = f_{1q}^{-1}(0), \dots, n_{i0} = f_i^{-1}(0), q_{i0} = f_{iq}^{-1}(0), \dots; \\ n_{Г10} = f_{Г1}^{-1}(0), u_{Г10} = f_{Г1u}^{-1}(0), \dots, n_{Гk0} = f_{Гk}^{-1}(0), u_{Гk0} = f_{Гku}^{-1}(0). \quad (8)$$

Значения ПРВ случайных аргументов от квантилей СА нулевого порядка:

$$c_1(n_{10}), c_{1q}(q_{10}), \dots, c_i(n_{i0}), c_{iq}(q_{i0}), \dots; \\ c_{Г1}(n_{Г10}), c_{Г1u}(u_{Г10}), \dots, c_{Гk}(n_{Гk0}), c_{Гku}(u_{Гk0}). \quad (9)$$

Значение совместной ПРВ случайных аргументов от квантилей СА нулевого порядка:

$$c_1(n_{10}) \cdot c_{1q}(q_{10}), \dots, c_i(n_{i0}) \cdot c_{iq}(q_{i0}), \dots; \\ c_{Г1}(n_{Г10}) \cdot c_{Г1u}(u_{Г10}), \dots, c_{Гk}(n_{Гk0}) \cdot c_{Гku}(u_{Гk0}). \quad (10)$$

Для всех остальных порядков процедура идентична.

Выполняется итерационный процесс по расчету параметров режима с вариантами исходных данных в виде квантилей разных порядков. По окончании всего процесса производится расчет ЗРВ интересующих величин, их анализ.

Практическая часть

Основная цель эксперимента данной статьи – апробировать улучшенный метод получения вероятностных характеристик для задач средней размерности, так как исследования маломерных ФЗ уже успешно проведены и полностью совпадают с классическим интегрированием [18].

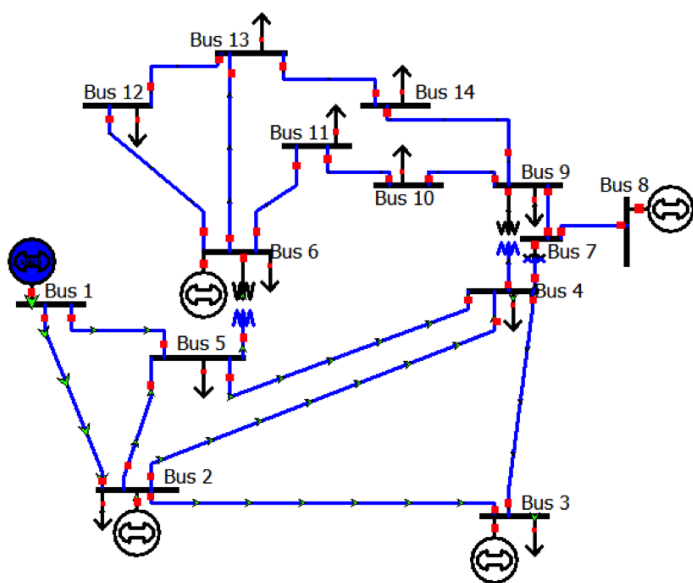


Рис. 2. Тестовая система (IEEE 14-Bus System)

Вычислительный алгоритм был протестирован на модели системы IEEE 14-Bus System. Она представляет собой часть американской энергосистемы (Midwestern US), по состоянию на февраль 1962 (рис. 2). Система имеет 14 шин, 5 генераторов и 11 нагрузок. Базисная мощность системы – 100 МВА. Подробная информация изложена в технической документации [19].

Вычислительный процесс был осуществлен с применением программного комплекса MATLAB. Для моделирования были сгенерированы ЗРВ исходных данных – квантили и порядки квантилей. Для расчета исследуемых величин – активной и реактивной мощностей генераторов, напряжений в узлах и их углов, потерь мощности – использовался Matpower (специальный пакет m-файлов MATLAB), который позволяет осуществить расчет потоков мощности в ветвях и оптимальных потоков мощности [20].

Он также обладает большой гибкостью в настройках и изменении параметров входных данных.

Входные данные, а именно активная и реактивная мощность нагрузок, активная мощность и напряжение на генераторах, устанавливаются в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Сначала определяются МО и СКО, а затем формируются массивы исходных данных в соответствии с рассчитанными ЗРВ узлов. Пример параметров исходных данных приведен относительно активной мощности нагрузки № 3 (табл. 1).

Таким же образом формируются настройки для каждого СА генерации и нагрузки. После – конфигурируется Matpower. Установившийся режим решается методом Ньютона, поскольку в ряде работ по программному моделированию ЭЭС он показал свое быстроедействие в сравнении с другими, имеющимися в Matpower, методами [21]. Промежуточные результаты выгружаются во внешний массив с целью возможности реализации расчетов на маломощных ПК. Полный алгоритм работы с программой приведен на рис. 3.

Таблица 1

Сформированные вероятностные данные нагрузки в узле № 1

Порядок квантиля	Квантили нагрузки в узле № 3	МО	СКО	ФРВ	ПРВ
1	35,911	65,94	8,0743	0,0001	0,0005
2	51,966			0,0418	0,0111
3	54,777			0,0834	0,0190
...
<i>n</i>	95,968			0,9999	0,0005

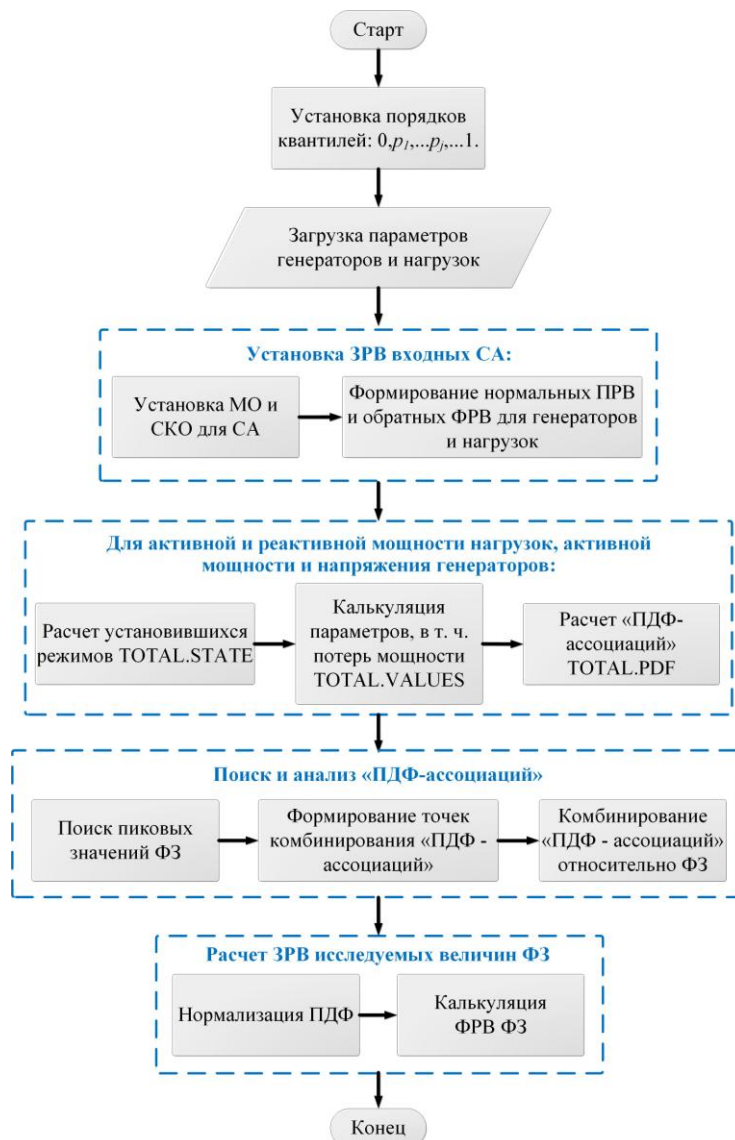


Рис. 3. Полный алгоритм расчета вероятностных характеристик с использованием системы MATLAB Matpower

Результаты

В рамках каждой итерации расчета установленного режима дополнительно выполняется расчет потерь мощности. После полного расчета всех состояний режима происходит процесс расчета совместных ФРВ, а также калькуляция и нормализация итоговых ФРВ и ФРВ-характеристик.

Первым этапом происходит определение вероятностных характеристик узлов и ветвей. Для примера была рассмотрена шина № 4 текущей схемы, а именно – величина напряжения $U_{ш4}$ и угол $\varphi_{ш4}$ соответственно (рис. 4).

Согласно полученным результатам, величина напряжения U_4 в узле может варьироваться от 1,0265 до 1,0424 о.е. Однако в рамках полученного распределения значения, находящиеся за гранью 0,99 ФРВ события, имеют наибольший разброс с минимальной вероятностью наступления. Согласно основной сути логики ФРВ, U_4 с 99%-ной вероятностью не превысит значение на отметке 1,037, что составляет 68,75 % от максимума U_4 . В случае

угла напряжения ФЗ с 99%-ной вероятностью не превысит 57,49 % своей величины. Для активной и реактивной мощности можно наблюдать схожие результаты (рис. 5).

В каждом отдельно рассматриваемом случае вид закона стремится к нормальному, однако имеет разный характер и степень нарастания, зависящий от вероятностных данных СА, характеристик самого объекта и от влияния топологии сети. Тем не менее можно произвести точную оценку вероятностных характеристик ФЗ для их дальнейшего изучения, что, впрочем, не является приоритетным в случаях оценки статической и динамической устойчивости системы или задачах небалансов. Сводные данные по ряду рассчитанных величин представлены в табл. 2.

Вторым этапом происходит определение вероятностных характеристик потерь мощности в ветвях схемы. Наибольшие потери наблюдаются в линиях 1, 2, 8, 10, 14 (рис. 6). В других линиях также наблюдались потери мощности, однако в

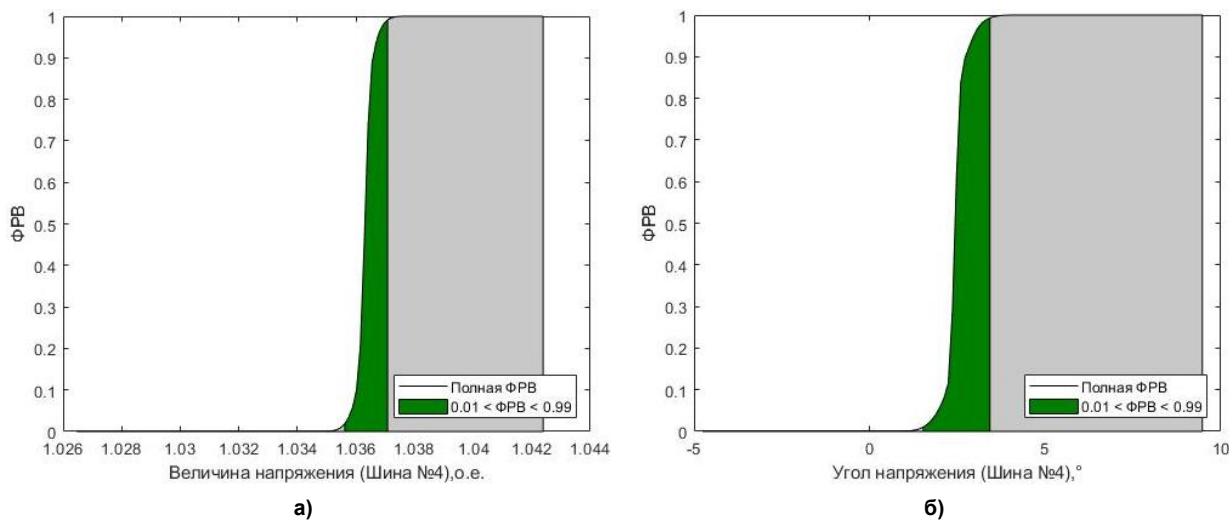


Рис. 4. ФРВ величины напряжения (а) и его угла (г) на шине № 4

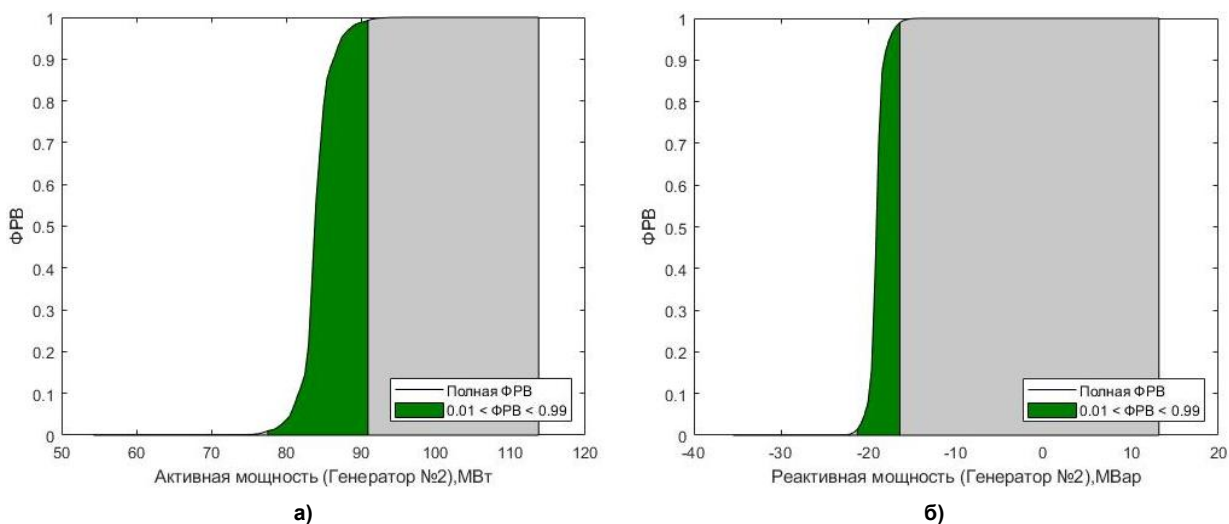


Рис. 5. ФРВ активной (а) и реактивной (г) мощности генератора № 2

соответствии с топологией ЭЭС и местами установки генераторов их потери на порядок меньше. Согласно расчетам, общие потери мощности в энергосистеме могут достигать 68,399 МВА.

Высокая степень нарастания ФРВ в ряде случаев (рис. 7а) способствует анализу потерь мощности и определению максимально возможных потерь с минимальной вероятностью наступления (табл. 3). Однако для исследования статической и динамической устойчивости этот вариант может сказаться негативно вследствие большого разброса

возможных принимаемых значений на малом интервале ФЗ с минимальной разницей ФРВ. Подобного рода исследования динамической устойчивости предлагаемым методом СГИД будут рассмотрены в следующих работах.

Несмотря на то, что в чистом виде ЗРВ рассмотренных величин не представляют практического интереса, однако именно их получение определяет возможность рассмотрения задач фактических и ресурсных величин [22], а также изучения совокупных вероятностных характеристик при

Таблица 2

Вероятностные данные выборки узлов

Величина	Минимум ФЗ	Максимум ФЗ	ФЗ (ФРВ > 0,99)	ФЗ (%) от максимума ФЗ
$U_{ш4}$, о.е.	1,026	1,042	1,037	68,75 %
$\Phi_{ш4}$, град.	-4,756	9,472	3,425	57,49 %
$P_{г2}$, МВт	54,25	113,8	90,94	61,61 %
$Q_{г2}$, МВар	-35,5	13,9	-16,43	38,6 %

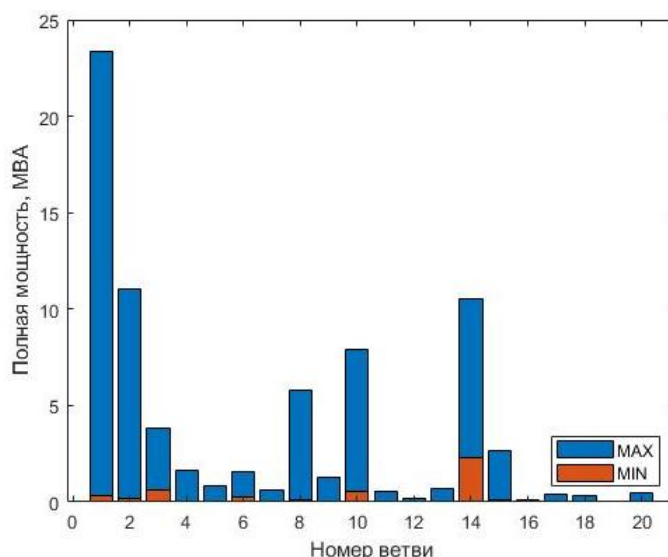


Рис. 6. Потери полной мощности в ЭЭС

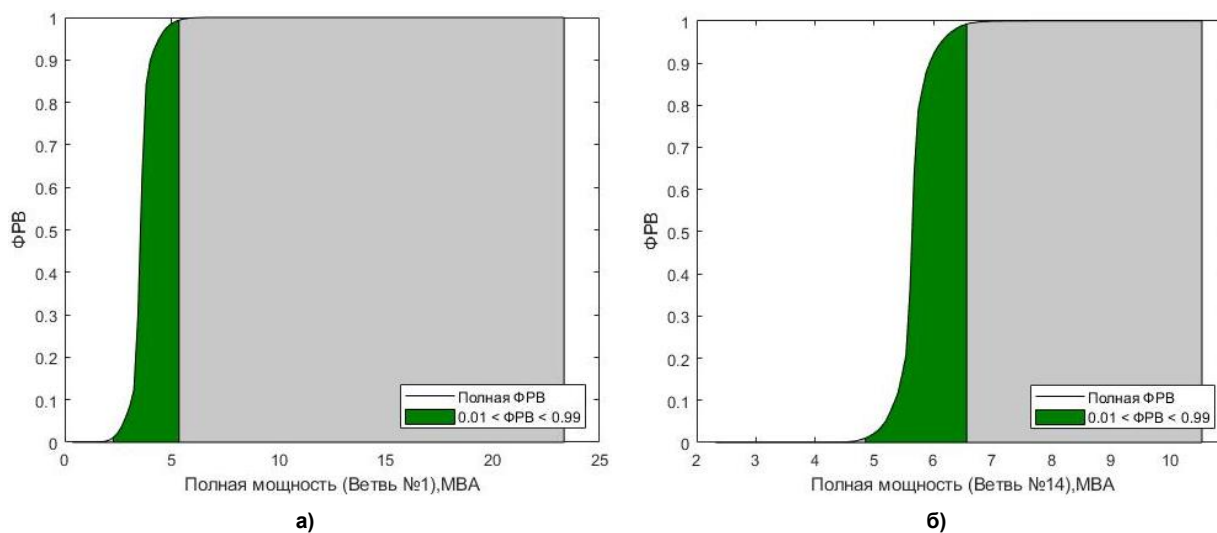


Рис. 7. ФРВ потерь мощности в ветвях № 1 (а) и № 14 (б)

Вероятностные данные выборки ветвей

Величина	Минимум ФЗ	Максимум ФЗ	ФЗ (ФРВ > 0,99)	ФЗ (%) от максимума ФЗ
$S_{п1}$, МВА	0,3617	23,3366	5,34	23,24
$S_{п2}$, МВА	0,203	11,035	5,168	47,71
$S_{п14}$, МВА	2,317	10,534	6,563	53,93

внедрении в энергосистему ВИЭ, поскольку они по природе своей изначально имеют вероятностный характер – зависимость мощности от скорости ветра, места установки, климатических условий и формата объединения в ветроферму.

Заключение

Целью исследований являлось определение вероятностных характеристик потерь мощности, так как это является одним из немаловажных параметров при дальнейшем исследовании динамической устойчивости и определении возможных мест установки возобновляемых источников энергии на основе изучения вероятностных характеристик.

Определение вероятностных характеристик в целом, как и параметров режимов, является одной из основных задач при исследовании как вертикальных, так и вертикально-горизонтальных систем, особенно в связи с увеличением генерируемой мощности и неопределенностей в системе, соответственно. С использованным алгоритмом расчета ЗРВ функциональной зависимости были получены вероятностные характеристики выходных величин установившегося режима. Причем при исследовании ряда параметров выяснилось,

что далеко не всегда предельные значения величин могут иметь высокую вероятность наступления. Немаловажным фактором в работе ЭЭС является также стоимость расходов, дешевизна конечной электроэнергии для потребителей, использование ЗРВ режимов даже в пределах 99 % ФРВ позволяет достаточно точно определять не только вероятность возникновения потерь определенной ФЗ, но самое главное – избежать учета самых маловероятных потерь. Таким образом, система исследуется полностью как в детерминированном, так и вероятностном виде, что позволяет предопределить все ее возможные состояния.

Результаты работы будут использоваться в анализе и изучении задачи фактических и ресурсных величин относительно потерь мощности в линиях и возможности установки ветрогенераторов соответственно. С точки зрения мест установки целесообразно руководствоваться принципом достижения минимальных потерь на всей протяженности значений ФЗ без нарушения устойчивости.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание «Наука» № FSWW-2020-0017.

Литература

1. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. – ИНЭИ РАН, АЦ, 2014.
2. Azmy, A. *Impact of distributed generation on the stability of electrical power system* / A. Azmy, I. Erlich // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – 2005. – Vol. 2. – P. 1056–1063. DOI: 10.1109/pes.2005.1489354
3. Вороняй, Н.И. *Требования к противоаварийному управлению ЭЭС с учетом изменения условия их развития и функционирования* / Н.И. Вороняй, Д.Н. Ефимов // *Надежность либерализованных систем энергетики*. – Новосибирск: Наука. – 2004. – С. 74–84.
4. Вентцель, Е.С. *Теория вероятностей: учеб. для вузов* / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
5. Андронов, А.М. *Теория вероятностей и математическая статистика* / А.М. Андронов, Е.А. Копытов, Л.Я. Гринглаз. – СПб.: Издательский Дом ПИТЕР, 2004. – 461 с.
6. Genz, A. *Numerical Computation of the Multivariate Normal Probabilities* / A. Genz // *Journal of Computational and Graphical Statistics*. – 1992. – Vol. 1. – P. 141–150. DOI: 10.2307/1390838
7. *The hybrid model of VSC HVDC* / R. Ufa, M. Andreev, N. Ruban et al. // *Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 101. – P. 11–18. DOI: 10.1007/s00202-018-00752-y
8. Milanović, J. *Probabilistic stability analysis: The way forward for stability analysis of sustainable power systems* / J. Milanović // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2017. – Vol. 2100. – P. 1–22. DOI: 10.1098/rsta.2016.0296
9. Huazhang, H. *Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration* / C.Y. Chung, K.W. Chan, H. Huazhang // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2013. – Vol. 28. – P. 3335–3343. DOI: 10.1109/tpwrs.2013.2254505
10. Hong, H.P. *An efficient point estimate method for probabilistic analysis* / H.P. Hong // *Reliability Engineering & System Safety*. – 1998. – Vol. 59. – P. 261–267. DOI: 10.1016/s0951-8320(97)00071-9

11. Karimishad, A. Probabilistic transient stability assessment using two-point estimate method / A. Karimishad // *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009)*. – 2009. – P. 1–36. DOI: 10.1049/cp.2009.1748

12. LI, W. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications / W. LI. – Wiley-IEEE Press, 2005. – 560 p.

13. Hsu, J. Multiple Comparisons: Theory and Methods / J. Hsu. – London: Chapman and Hall, 1996. – 277 p.

14. Bay, Y.D. The Selection of Interval Boundaries of Input and Output Data Method for Obtaining Complete Probabilistic Characteristics / Y.D. Bay // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 141. – P. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/201714101037

15. *Электроэнергетические системы в примерах и задачах* / В.А. Веников и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 504 с.

16. Шведов, А.С. Теория вероятностей и математическая статистика / А.С. Шведов. – М.: Издат. дом ГУ-ВШЭ, 2005. – 254 с.

17. Rodgers, J.L. Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient / J.L. Rodgers, W.A. Nicewander // *The American Statistician*. – 1988. – Vol. 42, no. 1. – P. 59–66.

18. Obtaining probabilistic characteristics of electrical quantities and their imbalances / Y. Bay, I. Razzhivin, A. Kievets et al. // *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*. – 2019. – Vol. 67. – P. 73–80. DOI: 10.46904/eea.20.68.3.1108004

19. IEEE 14 Bus Power Flow Test Case. – <https://eGRIDdata.org/dataset/ieee-14-bus-power-flow-test-case> (дата обращения: 29.04.2020).

20. Matpower Documentation. – <https://matpower.org/doc/> (дата обращения: 12.04.2020).

21. Suresh, V. Comparison of solvers performance for load flow analysis / V. Suresh // *Transactions on Environment and Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 1. – P. 363–378.

22. Ehsan, M. A probabilistic modeling of photovoltaic modules and wind power generation impact on distribution networks / M. Ehsan, M. Aien, A. Soroudi // *IEEE Systems Journal*. – 2012. – Vol. 6. – P. 254–259. DOI: 10.1109/jsyst.2011.2162994

Бай Юлий Дмитриевич, ассистент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; podius@tpu.ru.

Шмойлов Анатолий Васильевич, канд. техн. наук, консультант Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; shm_av@rambler.ru.

Рубан Николай Юрьевич, канд. техн. наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; rubanny@tpu.ru.

Уфа Руслан Александрович, канд. техн. наук, доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; hech@tpu.ru.

Рудник Владимир Евгеньевич, аспирант Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; ford1p006@mail.ru.

Киевец Антон Владимирович, аспирант Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; kievce.v.l@gmail.com.

Поступила в редакцию 20 мая 2020 г.

OBTAINING PROBABILITY DISTRIBUTION LAWS OF POWER SYSTEM STEADY-STATE MODE PARAMETERS

J.D. Bay, nodius@tpu.ru,
A.V. Shmoilov, shm_av@rambler.ru,
N.Yu. Ruban, rubanny@tpu.ru,
R.A. Ufa, hech@tpu.ru,
V.E. Rudnik, fordlp006@mail.ru,
A.V. Kievets, kievec.v.i@gmail.com

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Stable operation of electrical power systems is one of the crucial issues in the power industry. Current volumes of electricity consumption cause the need to constantly increase the generated capacity, repeatedly modifying and complicating the original circuit. In addition to this, given the current trend towards the use of digital power systems and renewable energy sources, more and more uncertainties difficult to predict by standard mathematical methods appear.

Events in the power system are deterministic, i.e. random. Thus, it is difficult to fully assess the system stability, voltage levels, currents, or possible power losses. Finding the probability distribution laws can give us an understanding of all the possible states in which an object can exist. Obtaining them is complicated by the difficulty of accounting for all the correlations between the random arguments of the source data. These laws are necessary to determine the optimal operating modes, the possibility of solving the problem of determining the optimal renewable energy sources installation locations and the required amount of generated energy in a non-deterministic way.

The purpose of this article is to test the developed SIBD method for obtaining the full probabilistic characteristics. This method, unlike the Monte Carlo methods, does not use a random sample of initial data, but completely covers the studied functional dependence. The problem was solved using the provisions of probability theory and mathematical statistics, numerical optimization methods in particular. The MATLAB Matpower application package was also used to solve technical computing problems.

Keywords: electric power system, steady-state mode, probability distribution law, random variable, quantile, functional dependency.

References

1. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda* [Forecast of energy development in the world and Russia until 2040], INEI RAN, ATs, 2014.
2. Azmy A., Erlich I. Impact of distributed generation on the stability of electrical power system. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, vol. 2, pp. 1056–1063. DOI: 10.1109/pes.2005.1489354
3. Voropaj N.I., Efimov D.N. [Requirements for emergency control of electric power plants taking into account changes in the conditions for their development and functioning]. *Nadezhnost' liberalizovannykh sistem jenergetiki* [Reliability of liberalized energy systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004, pp. 74–84. (in Russ.)
4. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey: ucheb. dlya vuzov* [Probability Theory: Proc. for Universities]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1999. 576 p.
5. Andronov A.M., Kopytov E.A., Gringlaz L.YA. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 461 p.
6. Genz A. Numerical Computation of the Multivariate Normal Probabilities. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1992, vol. 1, pp. 141–150. DOI: 10.2307/1390838
7. Ufa R., Andreev M., Ruban N., Suvorov A., Gusev A., Razzhivin I., Askarov A., Bay Y., Kievets A., Lozinova N., Suslova O. The hybrid model of VSC. *Electrical Engineering*, 2019, vol. 101, pp. 11–18. DOI: 10.1007/s00202-018-00752-y
8. Milanović J. Probabilistic stability analysis: The way forward for stability analysis of sustainable power systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2017, vol. 2100, pp. 1–22. DOI: 10.1098/rsta.2016.0296
9. Chung C.Y., Chan K.W., Huazhang H. Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, pp. 3335–343. DOI: 10.1109/tpwrs.2013.2254505
10. Hong HP. An efficient point estimate method for probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 1998, vol. 59, pp. 261–267. DOI: 10.1016/s0951-8320(97)00071-9

11. Karimishad A. Probabilistic transient stability assessment using two-point estimate method. *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009)*, 2009, pp. 1–36. DOI: 10.1049/cp.2009.1748
12. LI W. *Risk assessment of power systems: models, methods, and applications*. Wiley-IEEE Press Publ., 2005. 560 p.
13. Hsu J. *Multiple Comparisons: Theory and Methods*. London, Chapman and Hall Publ, 1996. 277 p.
14. Bay Y.D. The Selection of Interval Boundaries of Input and Output Data Method for Obtaining Complete Probabilistic Characteristics. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 141, pp. 1–4. DOI: 10.1051/mateconf/201714101037
15. Venikov V.A. et al. *Elektroenergeticheskiye sistemy v primerakh i zadachakh* [Electric Power Systems Examples and Tasks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 504 p.
16. Shvedov A.S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, Izd. dom GU-VShE Publ., 2005. 254 p.
17. Rodgers J.L., Nicewander W.A. Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. *The American Statistician*, 1988, vol. 42, no. 1, pp. 59–66.
18. Bay Y., Razzhivin I., Kievets A., Askarov A., Rudnik V. Obtaining probabilistic characteristics of electrical quantities and their imbalances. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2019, vol. 67, pp. 73–80. DOI: 10.46904/eea.20.68.3.1108004
19. IEEE 14 Bus Power Flow Test Case. Available at: <https://eGRIDdata.org/dataset/ieee-14-bus-power-flow-test-case> (accessed 29.04.2020).
20. Matpower Documentation. Available at: <https://matpower.org/doc/> (accessed 12.04.2020).
21. Suresh V. Comparison of solvers performance for load flow analysis. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2019, vol. 1, pp. 363–378.
22. Ehsan M., Aien M., Soroudi A. A probabilistic modeling of photovoltaic modules and wind power generation impact on distribution networks. *IEEE Systems Journal*, 2012, vol. 6, pp. 254–259. DOI: 10.1109/jsyst.2011.2162994

Received 20 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Получение законов распределения вероятностей параметров установившегося режима электроэнергетических систем / Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, Н.Ю. Рубан и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 41–51. DOI: 10.14529/power200305

FOR CITATION

Bay J.D., Shmoilov A.V., Ruban N.Yu., Ufa R.A., Rudnik V.E., Kievets A.V. Obtaining Probability Distribution Laws of Power System Steady-State Mode Parameters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 41–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200305