

**ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Бай Ю.Д., Киевец А.В., Томалев А.А.**

Научный руководитель доцент М.В. Андреев

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

Распространение использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетических системах (ЭЭС) набирает популярность во всем мире, в том числе в странах, обладающих большими запасами нефти и газа [1]. Данный процесс вызван потребностью уменьшения негативного влияния невозобновляемых энергетических ресурсов, а также соответствующего регресса, ведущего к увеличению ущерба, наносимого окружающей среде. По оценкам Международного энергетического агентства, мощность ВИЭ, построенных в Китае в 2016 году, составила 34 ГВт, а Австралию можно считать одним из лидеров использования фотоэлектрической солнечной энергии (превышает 3 %). Для России ветроэнергетические установки (ВЭУ) более перспективны в плане широкомасштабного внедрения. Следует отметить, что конечная мощность и стабильность выработки электроэнергии носят стохастический характер. В отличие от генераторов классического типа, параметры выдаваемой мощности ВЭУ жестко зависят от географических особенностей района установки, времени года, и т.д. [4]. Из-за того, что темпы развития «зеленой» энергетики значительно опережают планы по модернизации электрических сетей, подключение объектов ВЭУ зачастую происходит без решения вопроса повышения пропускной способности сети. Минимизировать возможный рост потерь мощности при передаче энергии без существенных изменений инфраструктуры можно путем решения задачи определения оптимального объема и места подключения ВЭУ. Данный вопрос относится к классу задач глобальной оптимизации, решение которой относительно заданной целевой функции позволяет минимизировать (или максимизировать) интересующий индикатор. Сам вид и состав целевой функции может варьироваться, однако, минимизация потерь мощности выступает одним из основных индикаторов в составе целевой функции, поскольку объем выработки электроэнергии объектами ВЭУ носит переменный характер [2].

Учитывая размерность и сложную топологию современных ЭЭС, актуальными на данный момент являются стохастические и метаэвристические методы [3]. Однако, для данных методов возможность решения достигается снижением точности получаемого результата, или отсутствует гарантия получения глобального решения в соответствии с логикой цепей Маркова, которые позволяют доказать сходимость алгоритмов к глобальному оптимуму только теоретически при устремлении времени работы алгоритма к бесконечности. Для решения обозначенной проблемы формирования вероятностных характеристик параметров режима при значениях редкой повторяемости, в работе представлена разработка методики повышения достоверности формирования вероятностных характеристик параметров установившегося режима ЭЭС для уточнения (в сравнении с методом Монте-Карло) потокораспределения и возможных потерь мощности, в значительной степени определяющих выбор оптимального объема и места подключения ВЭУ.

Исходя из свойств ЭЭС, основные параметры сети в разных узлах схемы являются вероятностно-независимыми друг от друга, а в рамках одного узла они независимы или имеют парную зависимость. При этом каждое отдельное состояние энергосистемы имеет свою вероятность наступления и эта вероятность несовместная, т.к. система не может находиться в нескольких состояниях одновременно. При разных состояниях системы может происходить так, что изучаемая величина имеет то же самое значение, но вероятность иная. Из-за того, что события несовместные, их вероятности можно суммировать для каждого отдельного значения исследуемой величины [5].

Для верификации методики было выполнено сравнение с аналитическим и численным решениями на примере задач малой размерности (Таблица 1). Дополнительно была проведена проверка и сравнение разработанного метода с численным методом формирования ПРВ Монте-Карло. Эксперименты проводились с целью оценки относительных погрешностей, формируемых МО и СКО обоими методами при изменении общего количества проводимых расчетов, а также определения необходимого количества экспериментов для обеспечения статистической представительности результатов.

*Таблица 1*

*Сумма четырех разных законов*

Метод	$\mu_{\text{ФЗ}}$	$\delta_{\mu}(\%)$	$\sigma_{\text{ФЗ}}$	$\delta_{\sigma}(\%)$	$\Phi_{\text{З abs}}$	$\delta_{\text{МЕТ/МК}}$	n	Время, с	$\chi^2$
МК	-8.5000	-	8.1208	-	79.5053	1.0000	1500625	62.559	0.9996
СГИД	-8.4995	0.0058	12.4630	53.4696	79.5512	1.0000		4.219	-
МК	-8.5094	0.1105	8.1318	0.1354	72.2091	0.8790	390625	17.559	0.9994
СГИД	-8.4995	0.0058	12.4630	53.4696	79.5512	0.9695		0.823	-
МК	-8.5215	0.2529	8.1028	0.2216	69.9790	0.7471	50625	2.338	0.9156
СГИД	-8.4995	0.0058	12.4630	53.4696	79.5512	0.8698		0.069	-

Рисунок иллюстрирует проблему формирования плотности распределения при значениях редкой повторяемости методом Монте-Карло (на примере суммы четырех нормальных законов,  $n = 50000$ ), что является одной из особенностей его использования. Данная проблема относится к сложности моделирования состояния крайне низкой вероятности наступления, в то время как предлагаемый метод использует оценку ПРВ на всем интервале исследуемой ФЗ.

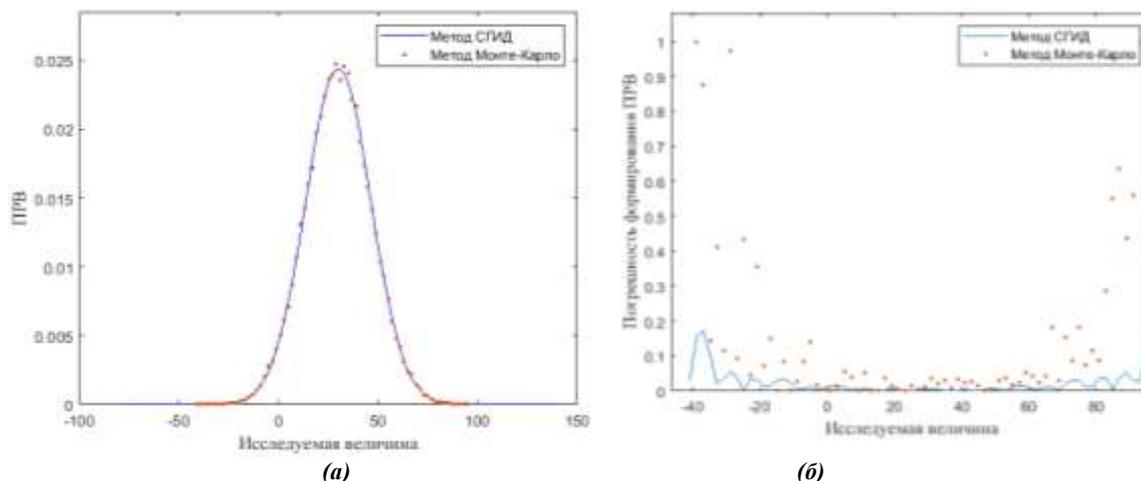


Рис. ПРВ (а) и погрешность ее формирования (б)

По полученным данным была проведена оценка изменения относительной погрешности МО и СКО при уменьшении количества проводимых статистических испытаний для обоих методов. Определена разница время затрат для достижения достоверного результата. В большинстве случаев результат аналогичной (для Монте-Карло) точности предлагаемой методикой можно получить, проведя меньшее количество испытаний, при этом скорость вычисления для нормальных и смешанных законов выше.

Данный факт обусловлен использованием уже подготовленных квантилей и порядков квантилей, в то время как решение Монте-Карло подразумевает случайное создание значений аргументов каждую итерацию расчетов и время реализации зависит от МО и СКО аргументов. Дополнительно была проведена проверка и сравнение разработанного метода с численным методом формирования ПРВ Монте-Карло для задач малой размерности и тестовых схем – IEEE-4, IEEE-14, и IEEE-57. Пример ПРВ потерь мощности для ветви №1 схемы IEEE-14 приведен в Таблице 2.

Таблица 2

Потери мощности ветви №1 схемы IEEE-14

Метод	$\mu_{\text{фз}}$	$\delta_{\mu}(\%)$	$\sigma_{\text{фз}}$	$\delta_{\sigma}(\%)$	$\Phi_{\text{Зabs}}$	$\delta_{\text{МЕТ/МК}}$	n	Время, с
МК	5.6657	-	9.3321	-	22.9743	1.0000	3100450	6867.317
СГИД	5.6658	0.0017	13.6558	46.3314	33.4909	1.0000		4025.125
МК	5.6557	0.1765	9.1765	1.6673	22.8809	0.8052	300000	664.482
СГИД	5.6658	0.0017	13.6681	46.4632	33.4909	0.8740		389.471
МК	5.6874	0.3830	9.1889	1.5344	21.3552	0.5061	83521	176.075
СГИД	5.6658	0.0017	13.6737	46.5232	33.4909	0.6168		77.054
МК	5.4175	4.3807	9.1561	1.8859	15.1069	0.1672	6400	19.470
СГИД	5.6658	0.0017	13.7345	47.1748	33.4909	0.2759		11.858

В соответствии с представленной проблемой определения оптимальных объемов и мест подключения ВЭУ по критерию минимизации потерь мощности определен вероятностный подход к решению задачи посредством формирования выходных вероятностных данных ФЗ по входным вероятностным данным аргументов и повышения самой достоверности их формирования. Проведена верификация разработанной методики на примере задач малой и средней размерности. Достоверность результатов исследований подтверждается тестовым совпадением с аналогичными результатами, полученными путем аналитического и численного решений.

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

#### Литература

1. Ahmed S. D. et al. Grid integration challenges of wind energy: A review //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 10857-10878.
2. Baseem, K. Optimal Power Flow Techniques under Characterization of Conventional and Renewable Energy Sources: A Comprehensive Analysis [Text] / K. Baseem, S. Pawan // Journal of Engineering. 2017. – V. 12. – 9539506.
3. Stanley A. P. J. et al. Objective and algorithm considerations when optimizing the number and placement of turbines in a wind power plant //Wind Energy Science. – 2021. – Т. 6. – №. 5. – С. 1143-1167.
4. Wang J., Hu J., Ma K. Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment //Renewable and sustainable energy Reviews. – 2016. – Т. 60. – С.881-899.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов-6-е изд. стер //М.: Высш. шк. – 1999. – Т. 576.