

ОТЗЫВ

официального оппонента Обухова Сергея Геннадьевича
на диссертационную работу **Ерошенко Станислава Андреевича**
на тему «Краткосрочное прогнозирование и планирование режимов фотоэлектрических
электростанций» по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и
электроэнергетические системы»
на соискание учёной степени кандидата технических наук.

1. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 176 библиографических источников, одного приложения. Основное содержание работы изложено на 212 странице, включая список литературы, содержит 57 рисунков, 63 таблицы.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы в необходимом объеме.

2. Анализ содержания диссертационной работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы, приведены сведения о практической реализации и апробации результатов.

В **первой главе** проведен анализ существующих подходов планирования ввода новых генерирующих мощностей в рамках реализации целевых показателей развития объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Представлен обзор международных стандартов и нормативных документов, регламентирующих основные технические требования к генерирующим установкам на базе ВИЭ, а также процедуры и системные ограничения при их подключении на параллельную работу с электроэнергетической системой (ЭЭС). Рассмотрены механизмы поддержки ВИЭ в России на оптовом и розничном рынках электроэнергии и мощности, установлены основные факторы, определяющие эффективность практического применения установок возобновляемой энергетики.

Вторая глава работы посвящена разработке многопараметрической модели оптимального размещения объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии.

В представленной в диссертационной работе постановке задачи выбор оптимального типа генерирующего объекта выполняется между фотоэлектростанциями, ветроэнергетическими установками и многотопливными установками на базе газопоршневых агрегатов. Автором предложен оригинальный способ оптимизации типов генерирующих объектов ВИЭ и площадок их территориального размещения на основе анализа карт географического и технологического районирования. Для качественной и количественной оценки полезности применения генерирующих объектов на основе ВИЭ автор использует метод иерархий, позволяющий проводить сравнительную оценку возможных решений по группам технических, экономических и экологических параметров. В качестве математического аппарата автор применяет генетический алгоритм, обеспечивающий высокую эффективность решения многокритериальных задач оптимизации. Предложенная математическая модель апробирована на примере анализа энергосистемы Свердловской области, в котором доказана эффективность ее применения для планирования и развития генерации на основе ВИЭ в региональных электроэнергетических системах.

В **третьей главе** представлены результаты исследований по разработке моделей краткосрочного и оперативного прогнозирования режимов фотоэлектрических станций.

В результате проведенных исследований автором разработаны новые математические модели и алгоритмы краткосрочного и оперативного прогнозирования выработки

электрической энергии фотоэлектрическими станциями, основанные на статистических методах, методах машинного обучения, законах распространения солнечного излучения в атмосфере и его пространственно-временных характеристиках. Предложенная методика краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии ФЭС построена на статистической модели множественной регрессии и позволяет определять значение коэффициента прозрачности атмосферы на каждый час на сутки вперед с ошибкой не более 20 %.

Для решения задачи оперативного прогнозирования автор применяет алгоритм градиентного бустинга над деревьями решений, что позволяет повысить точность прогноза на интервалах упреждения до шести часов за счет использования ретроспективных данных и машинного обучения. Разработанные модели прогнозирования выработки электроэнергии ФЭС имеют хорошие перспективы практического применения для планирования режимов работы энергосистем с ВИЭ, в том числе в задачах выбора состава включенного генерирующего оборудования и планирования резервов мощности на тепловых электрических станциях.

В четвертой главе работы на основе анализа влияния фотоэлектрических станций на резервы мощности в энергосистемах разработана методика оценки необходимых резервов активной мощности в ЭЭС с большой долей ВИЭ. Предложенная методика основана на оценке рисков возникновения небаланса активной мощности и позволяет избежать необходимости формирования резервов активной мощности тепловой генерации, в объеме установленной мощности генерирующих установок ВИЭ.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

Проведенный анализ содержания диссертационной работы свидетельствует о том, что диссертация Ерошенко С.А. является завершенной научной квалификационной работой, в которой содержится решение поставленных научных задач. Диссертация написана ясным и содержательным языком, принятая терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам.

3. Актуальность темы исследования для науки и практики

Тема диссертации соответствует Федеральному закону Российской Федерации № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», распоряжению Правительства РФ №1-р от 08.01.09 «Об использовании возобновляемых источников энергии».

Современные региональные энергосистемы характеризуются возрастающей долей ВИЭ, что обуславливает необходимость решения ряда проблем, связанных с решением задач размещения новых генерирующих установок и планирования режимов ЭЭС. Необходимость решения данных задач определяется правилами технологического функционирования электроэнергетических систем и базируется на формировании долгосрочных и краткосрочных балансов мощности и электроэнергии. Стохастический характер генерации ВИЭ обусловлен множеством влияющих факторов, которые зависят от метеорологических и климатологических данных, что определяет высокую сложность решения обозначенных задач, и вызывает необходимость применения новых подходов и разработки эффективных методов решения.

Целью диссертационной работы Ерошенко С.А. является совершенствование существующих и разработка новых математических подходов к эффективному размещению объектов генерации на основе ВИЭ и краткосрочному прогнозированию генерации фотоэлектрических станций с использованием статистических методов и методов машинного обучения, что позволяет считать ее своевременной и актуальной.

4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Объектом диссертационного исследования является региональная электроэнергетическая система с большой долей солнечных электростанций на базе фотоэлектрических преобразователей и оценка их влияния на режимы работы сети.

В диссертации и автореферате представлены результаты решения конкретных задач, направленных на разработку новых и совершенствование известных математических подходов к эффективному размещению объектов генерации на основе ВИЭ и краткосрочному прогнозированию генерации фотоэлектрических станций, что подтверждает их соответствие паспорту научной специальности 05.14.02 по техническим наукам.

5. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Основными научными и наиболее важными результатами диссертационной работы являются:

- разработана многопараметрическая математическая модель оптимизации размещения объектов генерации в ЭЭС с увеличенной долей возобновляемых источников энергии, реализованная на картах технологического районирования;
- обосновано и получено решение задачи эффективного размещения генерирующих объектов в региональных ЭЭС с большой долей возобновляемых источников энергии с учетом технических ограничений прилегающей сети;
- разработаны новые математические модели и алгоритмы краткосрочного и оперативного прогнозирования генерации электроэнергии фотоэлектрическими станциями, основанные на статистических методах, методах машинного обучения, законах распространения солнечного излучения в атмосфере и его пространственно-временных характеристиках;
- предложена методика оценки необходимых резервов активной мощности в ЭЭС с большой долей возобновляемых источников энергии, основанная на оценке рисков возникновения небаланса активной мощности.

Основные выводы и результаты работы теоретически обоснованы и получены автором впервые. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается тщательным анализом и оценкой принятых исходных положений, корректным использованием математического аппарата при проведении теоретических исследований, сопоставлением с результатами других аналогичных исследований, опубликованных в научной литературе. Результаты исследований обсуждались на международных и всероссийских конференциях, по результатам работы опубликовано достаточное количество научных работ.

6. Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в разработке эффективных методик и инструментов решения задач размещения и краткосрочного прогнозирования генерации электрической энергии фотоэлектрическими станциями в региональных электроэнергетических системах с использованием статистических методов и методов машинного обучения.

Разработанная на основе результатов диссертационной работы модель краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими станциями, реализованная в программном комплексе «Энергосфера», принята к использованию в проектной практике компании ООО «Прософт-Системы», и апробирована на действующей солнечной электростанции «Заводская».

7. Аprobация диссертационной работы

Основные положения работы обсуждались и получили одобрение на 11 международных и Российских научных конференциях: 46th CIGRE Session, 2016 (Париж, Франция); 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2016 (Рига, Латвия); Электроэнергетика глазами молодежи, 2017 (Самара, Россия); II International Conference on Control in Technical Systems, 2017 (Санкт-Петербург, Россия); 8th International Conference on Energy and Environment, 2017 (Бухарест, Румыния); 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, 2017 (Кадиз, Испания); Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2018 (Санкт-Петербург, Россия); 3rd International Conference on Advances on Clean Energy Research, 2018 (Санкт-Петербург, Россия); 3rd International Conference on Advances on Clean Energy Research, 2018 (Барселона, Испания); 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, 2018 (Екатеринбург, Россия); IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 2019 (Санкт-Петербург, Россия).

8. Подтверждение опубликования основных положений и результатов диссертации

По основным положениям диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, и 10 публикаций в материалах конференций и в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Scopus и Web of Science.

9. Основные замечания по работе

Содержание диссертационной работы Ерошенко С.А. в целом, ее основные положения, выводы и полученные результаты не вызывают возражений. Однако, можно сделать следующие замечания:

1. При расчете доступного потенциала солнечной энергии автор предлагает использовать оптимальный угол наклона солнечных панелей относительно поверхности Земли, значение которого рекомендуется принять равным 75 градусам с целью максимизации выработки электрической энергии в декабре. При этом значение данного угла используется для расчета площади землеотвода под размещение солнечных панелей.

Однако, если целью является максимизация выработки электроэнергии, оптимальный угол наклона панелей однозначно определяется широтой местности (φ) и углом склонения (δ) и легко вычисляется по известному уравнению:

$$\beta = \varphi - \delta, \text{ град.}$$

Соответственно, для дня зимнего солнцестояния для 52° с.ш. оптимальное значение угла наклона составит $\beta=75.45^\circ$, для 62° с.ш. – $\beta=85.45^\circ$. Эти значения углов и нужно использовать в уравнении (2.15) при определении площади землеотвода под размещение солнечных панелей.

2. В диссертации отсутствует сравнительная оценка эффективности мероприятий по ежемесячному изменению угла наклона фотоэлектрических панелей. В большинстве практических случаев солнечные батареи сетевых ФЭС ориентируют на Юг и устанавливают неподвижно под углом, равным широте местности. Это обеспечивает максимальную годовую выработку электроэнергии при неподвижных батареях, уменьшает площадь землеотвода, позволяет использовать простейшие конструкции систем крепления.

3. Автор определяет коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) фотоэлектрической панели через отношение вырабатываемой пиковой мощности к установленной мощности по уравнению (2.13). В данной трактовке величина КИУМ

является малоинформативной, так как она изменяется в широких пределах в течение светового дня.

Общепринятым понятием КИУМ в фотоэнергетике является отношение фактической (прогнозной) величины выработанной фотоэлектрической панелью энергии (W) за определенный интервал времени (T) к величине энергии, соответствующей установленной мощности панели ($P_{уст}$):

$$КИУМ = \frac{W}{P_{уст} \cdot T}$$

4. Из материалов диссертации неясно, что понимает автор под «необходимой выдаваемой мощностью» ФЭС (стр. 75, последний абзац), на основании которой получены результаты, представленные в табл. 2.6-2.8 и рис. 2.8, 2.9, а также что это за значения электрической нагрузки, приведенные в этих таблицах: средняя или максимальная, в узле сети, или ФЭС проектируется для работы в автономном режиме ?

Если автор использует при расчете установленной мощности ФЭС критерий покрытия электрической нагрузки, то это неверно. Для автономной ФЭС в качестве критерия нужно использовать расчетные значения потребляемой/вырабатываемой энергии для месяца с худшим энергетическим потенциалом солнечного излучения. Для сетевой ФЭС в качестве критериев используют технические ограничения прилегающей сети: допустимые токи КЗ, потери напряжения, энергии и т.д. В этом случае более информативными являются летние месяцы года.

5. Непонятно с какой целью автор приводит в табл. 2.6-2.8 расчетные значения площади поверхности панелей и максимальные мощности ФЭС для шести значений нагрузки – ведь это строго линейные зависимости, и гораздо логичнее представить их в удельной размерности.

6. Для определения энергетического потенциала ветра автор использует значение среднегодовой скорости и поправочные коэффициенты на высоту оси ветроколеса и ландшафта поверхности. Такой подход обуславливает значительную погрешность в расчетах, так как основной энергетической характеристикой ветрового потока является распределение скоростей ветра, которое автор не учитывает.

7. В тексте диссертации имеются ошибки оформительного характера, в частности: на стр.48, первый абзац приводится ссылка на несуществующий рис.1; на стр.69, первый абзац указано, что энергия солнечного излучения, приходящаяся на 1 м^2 в декабре на Юге Свердловской области составляет $6.18 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что не соответствует действительности; на рис.3.9 размерность энергии представлена в кВт.

10. Общее заключение о соответствии выполненной работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям


В целом, результаты исследований и полученные результаты доказывают, что Ерошенко С.А. выполнена актуальная научно–исследовательская работа по решению задачи совершенствования существующих и разработке новых математических подходов к эффективному размещению объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии и краткосрочному прогнозированию генерации фотоэлектрических станций с использованием статистических методов и методов машинного обучения.

Диссертация в достаточной мере является законченной научно–квалификационной работой, выполнена автором единолично, имеет научную новизну и практическую значимость. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 13 научных работах автора.

Таким образом, диссертационная работа Ерошенко Станислава Андреевича «Краткосрочное прогнозирование и планирование режимов фотоэлектрических электростанций» по уровню, объему и значимости соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской

Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор **Ерошенко Станислав Андреевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики
и электротехники Инженерной школы энергетики
Национального исследовательского Томского политехнического университета
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШЭ, ОЭЭ
тел. (382-2) 701-777, доп.1942,
e-mail: serob99@mail.ru


Сергей Геннадьевич Обухов

16.11.20 г.

Подпись С.Г.Обухова заверяю:
Ученый секретарь ТПУ

О.А. Ананьева

Отзов получен 26.11.2020 г. Д.П. / Осипов А.А. /
С отзавом ознакомлен 26.11.2020г. [Подпись] / Ерошенко С.А.