

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*доктора технических наук, профессора, Тягунова Михаила Георгиевича на диссертацию Ян Юйсун «Повышение эффективности работы ветроэнергетической установки путем использования комбинации интеллектуальных алгоритмов ориентации и отбора мощности» / «Improving the efficiency of the wind turbine using a combination of smart yawing and power control algorithms», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

### *Актуальность темы диссертации*

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Практика эксплуатации ветроэнергетического оборудования показывает, что частое включение механизма ориентации ветроагрегатов с горизонтальной осью вращения (рыскания) приводит к ускоренному механическому износу и, таким образом, снижает срок службы компонентов системы ориентации и всего ветроагрегата. Изменение положения гондолы вызывается периодическим отклонением набегающего воздушного потока вращающимися лопастями, что приводит к дифференциальной ошибке ориентации. Указанные проблемы снижают выработку электроэнергии, в связи с чем исследование причин возникновения проблем и их устранение имеют огромное значение в ветроэнергетике. Чтобы снизить влияние изменчивости направления ветра на эффективность ветроустановок и получить максимальную энергию ветра при решении проблем ориентации, необходимо оптимизировать работу системы ориентации ветроагрегата на ветер. Это можно сделать, например, с использованием более точного датчика измерения скорости и направления ветра и/или корректировки процесса управления ориентацией и т.д.

Таким образом, выбранная Ян Юйсун тема диссертации является актуальной и применимой для большинства ВЭУ с горизонтальной осью вращения.

### *Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Положения и выводы диссертации базируются на фундаментальных основах технической науки, а также подходах и концепциях ветроэнергетической технологии. Методология исследования включает

подробный анализ предмета и объекта исследования, систематизацию результатов анализа научных и практических исследований российских и зарубежных ученых, качественное сравнение и синтез существующих методических подходов, сбор и анализ данных.

В исследовании диссертант корректно использует прикладные методы научных исследований: логико-структурный, технический, статистический анализ, методы математического моделирования.

Выстроенная автором структура исследования, логика изложения текста диссертации позволяют оценивать работу как целостностное исследование с хорошей аргументированностью выводов.

### *Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Достоверность основных научных результатов и выводов обосновывается корректно примененными методами обработки статистических данных, совпадением с экспериментальными данными.

Полученные результаты опубликованы в 15 научных работах, в том числе 10 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 5 статей в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

Результаты работы докладывались на 5 международных конференциях:

- 1). Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству (ICIEAM 2020);
- 2). IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI 2020);
- 3). Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству (ICIEAM 2021);
- 4). Международная Уральская конференция по зеленой энергетике (Ural Con 2021);
- 5). Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству (ICIEAM 2023).

Материалы научных и теоретических исследований, изложенных в диссертационной работе, Ян Юйсун используются в учебной дисциплине ДВ.1.05.02 Комплексное использование ветроэлектростанций. Дисциплина преподается в рамках магистерской программы 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (Комплексное использование возобновляемых источников энергии на английском языке) на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Энергетического факультета ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Все изложенное позволяет сделать заключение о достоверности

положений, выносимых на защиту.

### *Характеристика структуры и содержания диссертации*

Цель работы: разработать ускоренный, точный и эффективный метод и алгоритм определения и устранения ошибки ориентации, в котором принцип управления ориентацией основан на комбинации модели прогнозирования направления ветра (алгоритм искусственной нейронной сети (ИНС)) и модели управления мощностью ВЭУ на основе поиска оптимального значения путем восхождения на холм (ПВНХ).

Для достижения поставленной цели решены задачи:

1. Анализ данных о режимах действующих ВЭУ для выявления влияния скорости, направления ветра, положения ротора, на выходную мощность ВЭУ;

2. Разработка имитационной модели ВЭУ на примере SWT-3.6-120 производства Siemens по заводским техническим характеристикам и проверка ее адекватности с помощью проведения сравнительного анализа работы модели и реальной ВЭУ на основе экспериментальных данных, полученных от SCADA;

3. Разработка нового комбинированного алгоритма управления в реальном времени ориентацией ротора ВЭУ на основе данных, предсказанных ИНС и способа управления мощностью ВЭУ на основе ПВНХ;

4. Проведение исследований верифицированной симуляционной модели ВЭУ SWT-3.6-120 в части влияния ошибки ориентации на рабочие характеристики ВЭУ. Объект исследования – система ориентации ВЭУ, включающей в себя ветроагрегат, электрогенератор, систему ориентации и систему управления

Диссертационное исследование содержит введение, четыре главы и заключение, 2 приложения, библиографический список из 208 наименований. Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 6 таблиц.

Во введении дана общая характеристика работы, степень разработанности темы исследования, представлены цель, задачи, выносимые на защиту положения, описана научная новизна и теоретическая значимость результатов.

В первой главе определены основные направления развития ветроэнергетики, выявлены ключевые проблемы, возникающие при проектировании компонентов ВЭУ, дается описание системы преобразования энергии ветра с помощью ВЭУ, обосновывается актуальность исследования, приводится обзор литературы, формулируются цель и задачи диссертации.

Показано, что наиболее распространенным методом управления является система ориентации с коррекцией положения гондолы по усредненному направлению ветра. Отмечено, что среднее направление ветра определяется с

определенной задержкой времени. Снижение влияния задержки времени предложено путем построения новой модели системы управления ориентацией ротора ВЭУ, использующей для прогнозирования будущего направления ветра нейронную сеть в сочетании с поиском оптимального направления в реальном времени.

**Во второй главе** описан процесс преобразования энергии и зависимости вырабатываемой мощности от ошибки ориентации ВЭУ. Проведены исследования системы отбора мощности, проанализировано соотношение скорости ветра и нагрузки компонентов ВЭУ в процессе ориентации, оптимизирована ошибка, возникающая в традиционной системе ориентации.

Отмечено влияние рыскания ветроколеса на мощность и выработку за период наблюдения. Показано, что измерения направления ветра флюгером также имеют погрешность, связанную с местом установки флюгера на гондоле ветроагрегата.

Разработана имитационная модель ВЭУ, позволяющая изучать ориентацию ротора ВЭУ для реализации решений по устранению ошибки ориентации. Погрешность ориентации не только увеличивает крутящий момент на отдельные части лопастей, сокращая их срок службы, но и существенно снижает выходную мощность. Тогда алгоритм управления ориентацией позволяет достаточно точно и быстро устранять ошибки ориентации ВЭУ, а, следовательно, повысить эффективность эксплуатации ВЭУ.

**Третья глава** описывает разработанный новый принцип комбинированного управления рысканием ВЭУ для отслеживания направления ветра в режиме реального времени. Разработан алгоритм управления с помощью прогноза, составленного на основе искусственной нейронной сети, и комбинированного алгоритма поиска оптимальных решений, интегрированного в имитационную модель системы управления ВЭУ

Разработанный алгоритм управления ориентацией использует искусственную нейронную сеть для прогнозирования направления ветра без задержки времени и алгоритм минимизации ошибок в реальном времени. Эффективность алгоритма управления рысканием оценивается путем наблюдения за выходной мощностью ветроустановки.

**В четвертой главе** описана конструкция разработанного виртуального контроллера ВЭУ. Описан алгоритм управления, при котором разворот гондолы начинается заранее на основе прогноза скорости и направления ветра и продолжается в процессе максимизации величины мощности.

Проведено сравнение производительности различных алгоритмов ориентации ВЭУ. Если ошибка в угле ориентации для традиционной системы составляет около  $10^\circ$ , то для систем на основе прогноза нейронной сетью ошибка снижается до  $2^\circ$ , а для комплексной системы, предлагаемой в диссертации, становится менее  $1^\circ$ , причем для системы с прогнозом на основе

нейронной сети установка желаемого положения достигается за время, отличное от реального, то комбинированный алгоритм управления позволяет осуществлять управление в реальном времени. А коэффициент использования энергии ветра может быть увеличен более чем на 6.88% по сравнению с традиционной системой.

В заключении приведены основные выводы и обобщены полученные в диссертационной работе результаты и перспективы дальнейшей разработки темы исследования и рекомендации.

### *Научная новизна исследования*

1. Разработана имитационная модель ветроагрегата в составе ветроколеса SWT-3.6-120, асинхронного генератора и системы ориентации с новым виртуальным контроллером ориентации и контроллером максимальной мощности, верифицированная на основе реальных данных для различных условий эксплуатации;

2. Разработан комбинированный алгоритм управления ориентацией ротора ВЭУ на основе прогноза скорости и направления ветра, предсказанных нейросетью, и алгоритма управления максимальной мощностью ВЭУ в реальном времени;

3. Проведена экспериментальная проверка эффективности разработанного комбинированного алгоритма, показавшая при управлении в реальном времени снижение погрешности ориентации ротора ВЭУ до  $1^\circ$  с одновременным повышением коэффициента использования энергии ветра на 6,88%.

### *Практическая значимость работы*

Получены и обработаны для последующих сравнительных расчетов данные о режимах работы действующих ВЭУ. Осуществлена статистическая обработка данных скорости и направления ветра, положения ротора и выходной мощности при различных погодных условиях.

Разработанная и верифицированная имитационная модель ветроагрегата может быть использована для имитации работы системы ориентации любой ВЭУ в задачах исследований, проектирования и эксплуатации.

Комбинированный алгоритм управления ВЭУ с минимизацией ошибки ориентации и повышением коэффициента использования энергии ветра на основе нейронной сети может быть использован для программирования систем управления ВЭУ большой мощности.

### *Замечания по диссертации*

1. На рис. 4D автореферата (рис. 2.25b диссертации) никаких изменений напряжения не видно, хотя в тексте написано обратное. Тем более, что в тексте напряжение обозначено  $U$ , а на рис 4d -  $V$ . Значит ли, что скорость ветра в интервале (3-8) м/с соответствует скорости холостого хода ветроколеса? Тогда о какой выработке электроэнергии идет речь на стр.75 диссертации?
2. Чем обоснован выбор именно искусственной нейронной сети Элмана? Какими особыми свойствами она обладает для решения поставленной автором задачи?
3. Различия между паспортной энергетической характеристикой ВЭУ и фактическими значениями выработки (см. рис. 4.3 диссертации) обусловлены многими факторами, такими как обледенение лопастей, взаимное аэродинамическое затенение ВЭУ на площадке ВЭС и др. Проводилась ли «очистка данных» при формировании обучающей последовательности для использования нейронной сети?
4. Предлагаемый автором алгоритм предполагает работу в реальном времени, т.е. без потерь времени на установку оптимального угла поворота ротора, но из текста не ясно как он учитывает инерционность механических частей ветроагрегата, так как моменты инерции элементов ветроагрегата использованы только в модели мультипликатора?
5. В 4 главе диссертации автор дает весьма сомнительную оценку экономической эффективности предлагаемого им решения: «мощность ВЭУ, подключенной к электросети, составила 906 ГВт. Предполагая, что все ВЭУ работают на номинальной мощности в среднем по 6 часов в день в течение 365 дней в году, после использования комбинированного алгоритма управления рынком выходящая мощность увеличится на 6,88%, то есть выработка электроэнергии может увеличиться на:  $365 \text{ дней} \times 6 \text{ часов} \times 906 \text{ ГВт} \times 6,88\% = 1,37 \times 10^{11} \text{ кВт}$ ». Но, во-первых, приведенная мощность «всех ВЭС» не является мощностью ВЭУ с ветротурбинами с горизонтальной осью, к которым относится предлагаемое решение; во-вторых, работа ВЭУ в течении 6 часов ежедневно означает, что они имеют КИУМ 25%, а это для ВЭС России завышенный показатель, а для зарубежных – заниженный (см. данные IRENA).

## Заключение

Диссертация Ян Юйсун на тему «Повышение эффективности работы ветроэнергетической установки путем использования комбинации интеллектуальных алгоритмов ориентации и отбора мощности» / «Improving the efficiency of the wind turbine using a combination of smart yawing and power control algorithms», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является самостоятельной, законченной, актуальной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической значимостью. В результате диссертантом разработаны методы повышения точности ориентации и эффективности систем ориентации ветроэнергетических установок.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам Паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы: 1, 2, 4 и 6.

Автореферат диссертации Ян Юйсун полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

Автором опубликовано 15 научных работ, в том числе 10 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ или приравненных к ним и 2 документа Роспатента. Диссертация и автореферат соответствуют пунктам 2,3,4,6,7 Паспорта научной специальности 2.4.5 и удовлетворяют требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Ян Юйсун, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

### Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,  
кафедры гидроэнергетики и возобновляемых  
источников энергии ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»



Тягунов  
Михаил Георгиевич

« 3 » 06 2024 г.

### Почтовый адрес организации:

111250, Россия, г. Москва,  
Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1  
Справочная МЭИ: +7 495 362-75-60оЭ  
Email: universe@mpei.ac.ru  
TiagunovMG@mpei.ru

Подпись М.Г.Тягунова заверяю

