

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

杨 玉 松

Ян Юйсун

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
КОМБИНАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ  
ОРИЕНТАЦИИ И ОТБОРА МОЩНОСТИ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Соломин Евгений Викторович**

**Официальные оппоненты:** **Тягунов Михаил Георгиевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»;

**Велькин Владимир Иванович,**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»;

**Ачитаев Андрей Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Саяно-Шушенский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», р. Хакасия, пгт. Черемушки, заместитель директора по научной работе.

Защита диссертации состоится «25» июня 2024 г. в 14-30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5962>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ташлыков  
Олег Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С увеличением потребностей человека и быстрым ростом национальных энергобалансов большинства стран увеличивается и потребление ископаемых видов топлива. Истощение углеводородов рано или поздно вызовет множество локальных социально-экономических и гео-экологических проблем, совокупность которых впоследствии сложится в глобальный энергетический кризис. В связи с этим использование возобновляемых и экологически чистых источников энергии может не только смягчить последствия кризиса, но даже полностью нивелировать их. Ветер является одним из самых распространенных, чистых и возобновляемых источников энергии на нашей планете, благодаря чему многие страны используют ветроэнергетику в качестве энергетической основы стратегии устойчивого развития. Интеграция энергии ветра в энергосистему не только выгодно снижает потребление традиционной ископаемой энергии, разгружая традиционные генерирующие системы, но и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду.

Поскольку ветровые ресурсы в значительной степени являются случайными флуктуациями, когда направление и скорость ветра подвержены частым изменениям, способность системы управления к оптимальному регулированию снижается, что вызывает и снижение выходной мощности ветроэнергетической установки (ветряной турбины или ВЭУ). Кроме того, частое включение механизма ориентации (рыскания) приводит к ускоренному механическому износу и, таким образом, снижает срок службы компонентов системы ориентации. Наконец, периодическое отклонение набегающего воздушного потока вращающимися лопастями приводит к дополнительной дифференциальной ошибке ориентации. Все перечисленные проблемы снижают выработку электроэнергии, в связи с чем исследование причин возникновения проблем и их устранение имеют огромное значение в ветроэнергетике.

Для снижения влияния флуктуаций ветра на эффективность ВЭУ необходимо снизить ошибку ориентации за счет оптимизации работы системы ориентации в режиме поиска оптимального положения гондолы. Данный подход может быть реализован с использованием нейросети и поисковых алгоритмов.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования многих известных ученых посвящены повышению производительности систем преобразования энергии ветра. Н.Е. Жуковским, Л. Прандтлем и А. Бетцем были созданы теоретические основы, объясняющие основные принципы и закономерности работы ВЭУ. Создание этих основ позволило разработать различные способы управления работой ветроустановок для повышения эффективности выработки электроэнергии, в частности: питч-управление, поиск максимальной точки мощности (ПМТМ или МРРТ), управление ориентацией, управление генератором, устранение дифференциальной ошибки и т.д. В России следует особо выделить работы ведущих ученых в области ветроэнергетики: Н.Я. Жуковского, Н.А. Красовского, Г. К. Сабина, Е. М. Фатеева, В. Н. Андрианова,

П.П. Безруких, В.В. Елистратова, В.Г. Николаева, Е.В. Соломина, В.М. Лятхера, В.И. Велькина, Тягунова М.Г., В.Л. Окулова, Б.В. Лукутина и других. Ими изучены и сформулированы различные методы управления ветроэнергоустановками с целью улучшения использования энергии ветра на различных уровнях преобразования - аэродинамическом, генераторном и т.д. Зарубежные ученые Х. Бинднер, А. Ребсдорф, Р. Хоффман, О. Карлсон, Т.Г. Ван, З. Чен, и другие также внесли значительный вклад в разработку различных методов управления ветроэнергетическими установками. Очевидно, что снижение ошибок ориентации и повышение эффективности выработки энергии постоянно находятся в центре внимания многих научных групп, исследования которых имеют высокое теоретическое и практическое значение.

**Цель и задачи исследования.** Цель: 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 (ПВХ).

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Исследование и анализ экспериментальных данных SCADA действующих ВЭУ и ветроэлектростанций в части скорости и направления ветра, положения ротора (гондолы), а также выходной мощности. (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition - система сбора данных и оперативного управления);
2. Разработка компьютерной имитационной модели ВЭУ SWT-3.6-120 производства Siemens в пакете MATLAB/Simulink на основе заводских технических характеристик ВЭУ. Тестирование (верификация) имитационной модели на работоспособность и адекватность 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 ПВХ;
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.

**Предмет исследования** – влияние методов и алгоритмов управления ветроэнергетической установкой, работающей в условиях переменного направления и скорости ветра, на ее производительность.

**Научная новизна:**

1. Получены результаты анализа экспериментальных данных SCADA действующих ВЭУ и ветроэлектростанций в части графиков скорости и направления ветра, положения ротора (гондолы), а также выходной мощности.

2. С использованием пакета MATLAB/Simulink разработана новая компьютерная имитационная модель ветроэнергетической установки SWT-3.6-120, включая компьютерные модели асинхронного генератора и системы ориентации с новым виртуальным контроллером ориентации и MPPT-контроллером. Адекватность модели верифицирована путем сравнения с экспериментальными данными, полученными от системы SCADA для различных условий эксплуатации;

3. Разработан новый комбинированный алгоритм управления ориентацией ротора ВЭУ на основе данных, предсказанных ИНС и способ управления мощностью ВЭУ на основе ПВНХ. Управление активными элементами системы ориентации осуществляется в реальном времени с прогнозированием предстоящего изменения направления ветра;

4. Получены результаты тестирования верифицированной симуляционной модели ВЭУ SWT-3.6-120, демонстрирующие снижение погрешности ориентации ротора ВЭУ до  $1^\circ$ , с повышением выходной мощности ВЭУ на 6,88%.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана новая имитационная компьютерная модель ВЭУ, содержащая универсальные компоненты, которыми можно управлять с помощью различных систем внешнего управления, что отражает функциональность и гибкость применения новой модели. Верифицированная компьютерная модель может быть использована исследователями, конструкторами и пользователями в области ветроэнергетики для имитации работы системы ориентации любой ВЭУ.

2. Синтезирован новый комбинированный алгоритм управления отбором мощности ВЭУ с минимизацией ошибки ориентации и повышением коэффициента использования энергии ветра на основе использования данных ИНС и ПВНХ. Данный алгоритмический подход может быть использован на практике для программирования систем управления ВЭУ мегаваттного класса.

3. Повышение эффективности управления работой ВЭУ на основе разработанных алгоритмов было отмечено в широком диапазоне переменных составляющих скорости и направления ветра, что демонстрирует независимость алгоритмов от поведения ветра.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования и анализа экспериментальных данных SCADA действующих ВЭУ и ветроэлектростанций в виде графиков скорости и направления ветра, положения ротора (гондолы), а также выходной мощности;

2. Новая компьютерная имитационная модель ВЭУ SWT-3.6-120 производства Siemens в пакете MATLAB/Simulink, характеризующаяся полной структурой и управления, предназначенная для изучения характеристик ВЭУ в соответствии с используемыми алгоритмами управления;

3. Новый динамичный комбинированный алгоритм определения производительности ВЭУ с точным, быстрым и эффективным отслеживанием изменения направления ветра, со снижением ошибки ориентации;

4. Результаты исследований верифицированной компьютерной симуляционной модели ВЭУ SWT-3.6-120 в части влияния ошибки ориентации на параметры выходной мощности в реальном времени с поддержанием максимального значения коэффициента использования энергии ветра, в том числе с увеличением срока службы ВЭУ.

**Достоверность результатов,** научных положений, результатов работы и выводов обосновываются корректностью применения математического аппарата, обоснованностью методов моделирования, использующих известные, многократно подтвердившие свою достоверность программы, а также детально описанными методиками симуляции, позволяющими воспроизводить исследования, проведенные другими учеными. Кроме этого, достоверность подтверждается соответствием теоретических положений результатам моделирования.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты исследования были представлены и обсуждены на следующих мероприятиях:

1. Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству, ICIEAM, Сочи в 2020 году.

2. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, PEAMI 2020, Магнитогорск в 2020 году.

3. Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству, ICIEAM, Сочи в 2021 году.

4. Международная Уральская конференция по зеленой энергетике, Ural Con, Магнитогорск в 2021 году.

5. Международная конференция по промышленному инжинирингу, применению и производству, ICIEAM, Сочи в 2023 году.

**Публикации по теме диссертационной работы.** Основное содержание диссертации опубликовано 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 об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Соответствие научной специальности.** Тема диссертационного исследования соответствует пунктам 1, 2, 4 и 6 паспорта специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

**Личный вклад автора.** Автор определил направление исследования, сформулировал цель и задачи исследования, проанализировал достижения в области научных исследований. На основе проведенного анализа были выбраны методы и средства проведения исследования, разработаны компьютерные математические модели, используемые в исследовании. Разработка модели системы управления и все исследования проводились непосредственно автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка используемой литературы из 208 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 2 приложений. Общий объем

диссертации составляет 156 страниц, включающего в себя 72 иллюстрацию, 6 таблиц и 4 страниц приложений.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Во введении** дается краткое описание работы, показывающее актуальность и степень разработанности темы исследования. Указаны объект и предмет исследования, цель диссертации, задачи и методы исследования. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, а также научная и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведен библиографический обзор и тенденции развития ветроэнергетики и систем управления ориентацией, определены ключевые вопросы и проблемы при проектировании и эксплуатации систем преобразования энергии ветра, а также их систем ориентации.

Для максимального использования энергии ветра система управления ВЭУ реализует различные принципы управления в условиях случайно изменяющейся скорости и направления ветра: независимое питч-управление, регулирование скорости / крутящего момента генератора, управление ориентацией и т.д. Система ориентации предназначена для постоянного регулирования положения ротора с приведением его в максимально эффективное положение, когда в идеале ось вращения ротора коллинеарна вектору набегающего потока. Во всех ВЭУ, и особенно в ВЭУ мегаваттного класса стабильность работы системы ориентации определяет преимущество установки, а также срок ее службы. Настоящее исследование охватывает три типа целей для систем управления ориентацией, а именно: (1) Увеличение отбора энергии ВЭУ. (2) Снижение усталостной нагрузки ВЭУ. (3) Максимизация общего производства электроэнергии и оптимизация выработки энергии ВЭУ в составе ветропарке.

**Во второй главе** описаны теоретические выкладки в части зависимости вырабатываемой мощности от ошибки ориентации ВЭУ. Проведены исследования системы отбора мощности, проанализирована аэродинамическая обстановка, скорость ветра и нагрузки компонентов ВЭУ в процессе ориентации, оптимизирована ошибка, возникающая в традиционной системе ориентации. В MATLAB/Simulink создана компьютерная симуляционная (функциональная) модель ВЭУ с системой управления отбором мощности, получившей название «виртуальный контроллер». Модель далее использована для последующей оптимизации управления ориентацией для проверки предложенной стратегии управления в различных условиях эксплуатации.

На Рисунке 1 показано, что скорость ветра определяет максимальную выходную мощность ВЭУ, а направление ветра (ошибка ориентации) влияет на мгновенный коэффициент использования энергии ветра. В исследуемой ВЭУ погрешность ориентации составляет от  $5^\circ$  до  $20^\circ$ . С учетом влияния других факторов общая потеря мощности составляет 10%~15%.

На Рисунке 2 показано, принцип работы ВЭУ заключается в преобразовании кинетической энергии ветра в механическую энергию вращения ротора, и далее

за счет генератора в удобную для потребления электрическую энергию стабильной частоты через преобразователь, с дальнейшей подачей в сеть.

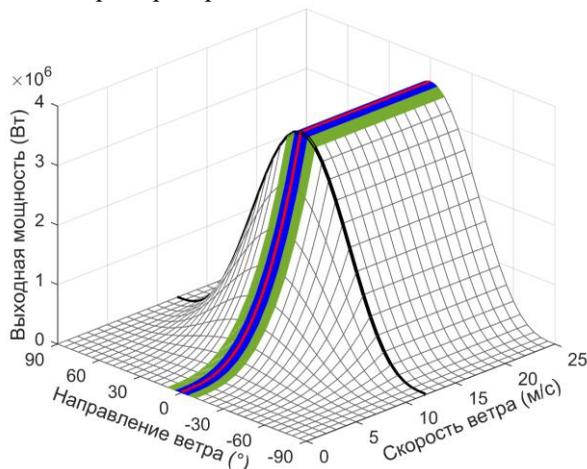


Рисунок 1 – Влияние скорости и направления ветра на выходную мощность ВЭУ

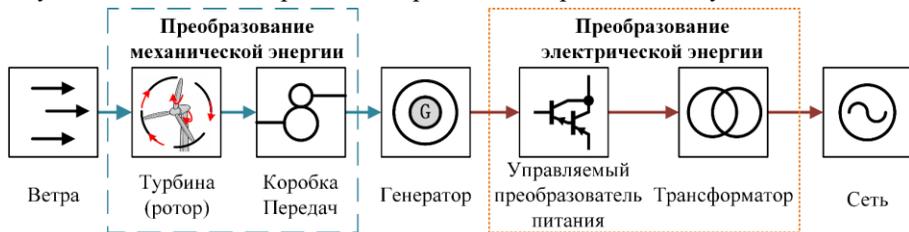


Рисунок 2 – Стадия преобразования энергии в системе ВЭУ

Выходная мощность ВЭУ  $P_{wt}$  определяется скоростью ветра  $v$  и направлением ветра  $\gamma$ , таким образом, и  $P_{wt}$  может быть записана следующим образом:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) v^3 \cos^h \gamma = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \cos^h \gamma \quad (1)$$

где:  $\rho$  - Плотность воздуха;  $S$  - Ометаемая площадь;  $C_p(\lambda, \beta)$  - Коэффициент использования энергии ветра КИЭВ (или коэффициент мощности ВЭУ), зависит от быстроходности ( $\lambda$ ),  $\beta$  - угол наклона ротора;  $h$  - 1~3;  $R$  - радиус ротора.

$C_p(\lambda, \beta)$  определяется эмпирическим уравнением:

$$\begin{cases} C_p = \left( 0,5176 * \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{121}{\lambda_i}} + 0,0068\lambda \right) \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^3} \\ \lambda = \frac{\omega_t R}{v} \end{cases} \quad (2)$$

Модель коробки передач (мультипликатора или трансмиссии) выражена:

$$T_{gen} - \frac{T_{wtr}}{K_{gear}} = \left( J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{K_{gear}^2} \right) \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (3)$$

Где:  $T_{gen}$  - крутящий момент генератора;  $T_{wtr}$  - крутящий момент ротора ВЭУ;  $K_{gear}$  - передаточное отношение коробки передач;  $J_{gen}$  - момент инерции генератора;  $J_{wtr}$  - момент инерции ВЭУ;  $\Omega_{gen}$  - скорость вращения генератора.

Далее осуществлено моделирование компонентов ВЭУ: генератора, контроллера и т.д., в результате чего сформирована имитационная компьютерная модель ВЭУ, как показано на Рисунке 3.

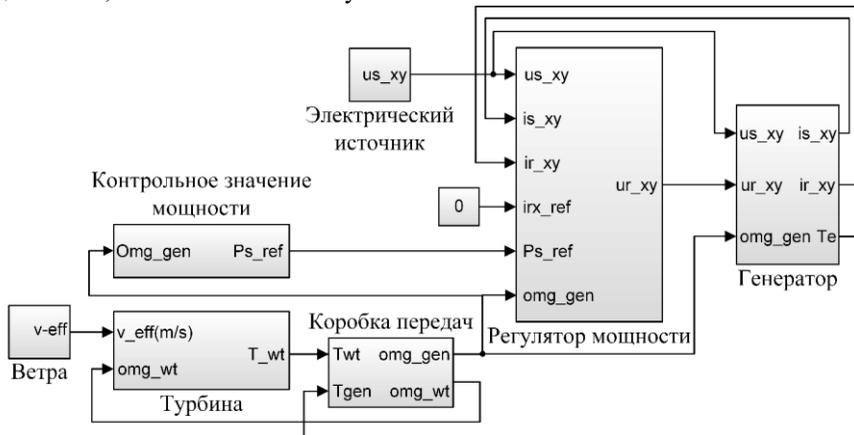


Рисунок 3 – Новая разработанная имитационная модель ВЭУ

Чтобы проверить корректность новой имитационной модели ВЭУ, были выполнены следующие проверки на адекватность. На Рисунке 4(а) показаны для примера входные данные моделирования: начальное значение скорости ветра составляет 8 м/с и через 2 секунды изменяется на 12 м/с; начальное значение направления ветра равно  $0^\circ$  и изменяется на  $30^\circ$  через 7 секунд, что означает, что ошибка ориентации составляет  $30^\circ$ .

Процесс реакции системы заключается в следующем: когда скорость ветра изменилась с 8 м/с до 12 м/с, произошло и изменение угловой скорости вращения ротора генератора  $\omega_{gen}$  (Рисунок 4(б)), а также электромагнитного момента  $T_e$  (Рисунок 4(с)), напряжения  $U_{abc}$  (Рисунок 4(д)), тока  $I_{abc}$  (Рисунок 4(е)) и выходной мощности  $P$  (Рисунок 4(ф)). Текущие параметры ВЭУ значительно изменились, причем тенденция их изменения соответствовала изменению скорости ветра. После реакции виртуального контроллера скорость вращения медленно увеличивалась, пока не достигла новой точки баланса мощности (на 4-ой секунде). При этом изменение амплитуды тока генератора следует за изменением скорости ветра и, соответственно, определяет изменение выходной мощности ВЭУ. Через 7 секунд направление ветра меняется с  $0^\circ$  на  $30^\circ$ , однако, поскольку система ориентации еще не подключена, ошибка ориентации в этот момент становится  $30^\circ$ . Ошибка ориентации приводит к снижению ометаемой площади ротора ВЭУ, и, следовательно, снижению вырабатываемой энергии, поэтому система снова начинает искать оптимальную точку работы ВЭУ, а затем стабилизируется после соответствующей реакции контроллера.

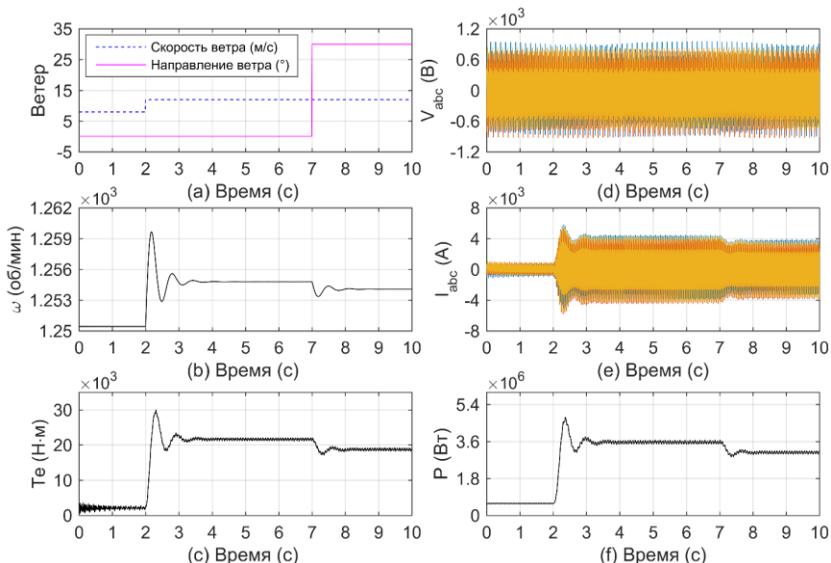


Рисунок 4 – Производительность разработанной модели ВЭУ

**В третьей главе**, чтобы решить проблему неопределенности и задержки традиционной системы рыскания, разработан новый принцип комбинированного управления рысканием ВЭУ для отслеживания направления ветра в режиме реального времени с высокой точностью. Впервые разработан алгоритм прогнозируемого управления с помощью искусственной нейронной сети ИНС и алгоритм поиска с восхождением на холм ПВНХ для системы ориентации. Затем эта разработанный комбинированный алгоритм управления ориентацией интегрирован в имитационную модель системы управления ВЭУ.

**Улучшенная система ориентации, основанная на модели прогнозирования ИНС.** Нейронная сеть Элмана — это рекуррентная нейронная сеть (RNN). Выходные данные скрытого слоя самосвязываются с входными данными скрытого слоя посредством задержки и сохранения контекстного слоя. Это позволяет сети сохранять информацию о предыдущих вводах с течением времени, позволяя ей обрабатывать последовательности данных.

Процесс обучения ИНС Элмана включает в себя прямое распространение информации и обратное распространение ошибок. При прямом распространении информация обрабатывается слой за слоем, при этом чувствительность сети повышается за счет передачи на принимающий уровень. После достижения выходного уровня, если ошибка не равна 0, ошибка передается в обратном направлении, и веса между каждым сетевым уровнем вычисляются и корректируются для амортизации ошибки, так что ошибка постепенно приближается к целевой точности. Таким образом, каждый раз, когда завершается прямое и обратное распространение, завершается итерация, и веса корректируются. Такой цикл повторяется до тех пор, пока ошибка не будет соответствовать требованиям.

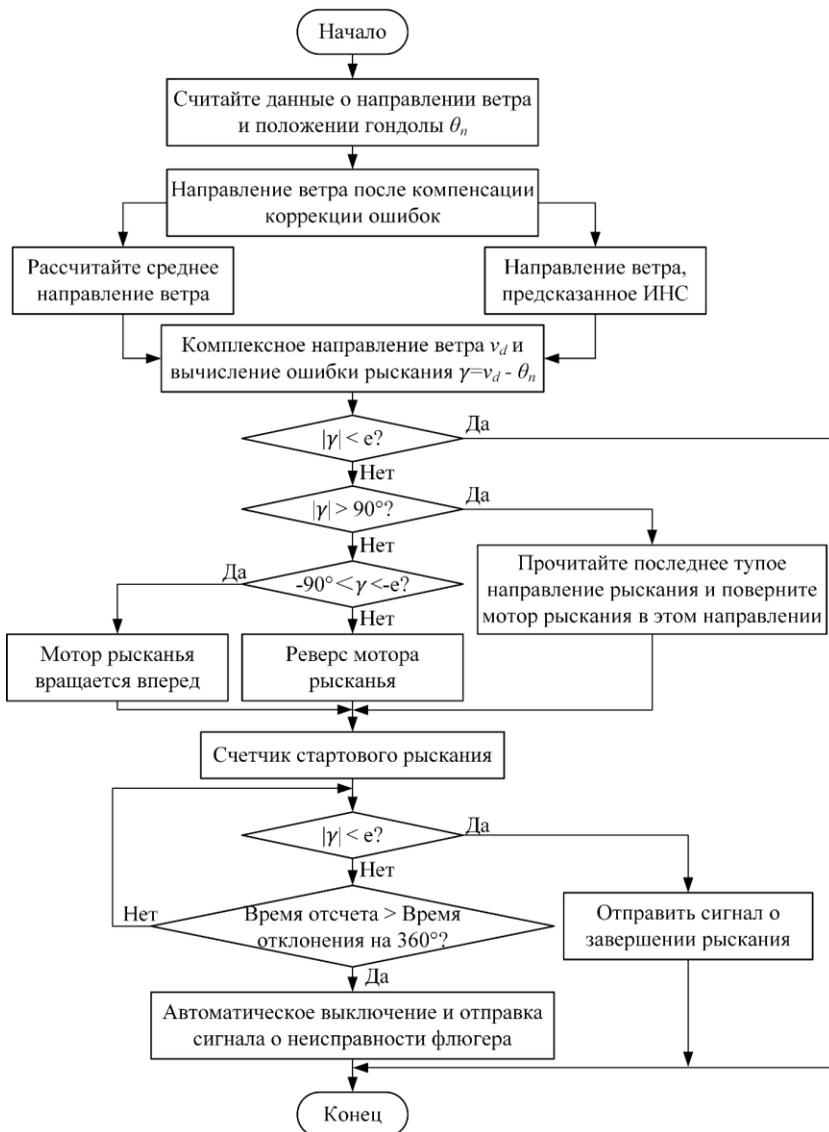


Рисунок 5 – Блок-схема системы ориентации, основанной на алгоритме прогнозирования ИНС

Предложенный способ управления ориентацией сочетает прогнозируемое направление ветра с уже полученным направлением ветра в качестве основы для выдачи команды и выполнения действий по изменению ориентации ВЭУ. Блок-схема такого процесса приведена на Рисунке 5.

Сначала регистрируется направление ветра, измеренное флюгером до определенного момента времени; затем компенсируется ошибка ориентации на этом направлении ветра; после этого вычисляется среднее значение

скорректированного направления ветра и используется ИНС для прогнозирования направления ветра в течение будущих 10 минут на основе скорректированного направления ветра; после этого объединяется скорректированное среднее и прогнозируемое направление ветра, чтобы получить новое направление ветра  $v_d$ . Угол между текущим направлением ветра и положением гондолы  $\theta_n$  равен  $\gamma$  ( $\gamma = \theta_n - v_d$ ). Допустимая погрешность ориентации равна  $\epsilon$ .

Когда  $|\gamma| < \epsilon$ , нет необходимости выполнять действие ориентации; когда  $\theta > 90^\circ$ , это указывает на то, что гондолу необходимо повернуть более чем на  $90^\circ$  (слепая ориентация), для этого используются данные последнего направления слепой ориентации и осуществляется поворот ротора в этом же направлении; когда  $-90^\circ < \gamma < \epsilon$ , мотор ориентации должен вращать гондолу вперед. До тех пор  $|\gamma| < \epsilon$  и действие ориентации закончится. В противном случае необходимо проверить, превышает ли время вращения мотор ориентации время, необходимое для поворота гондолы на  $360^\circ$ . Если время вращения не превышает времени, необходимого для поворота гондолы на  $360^\circ$ , то продолжается проверка, является ли  $|\gamma|$  меньше  $\epsilon$ ; если время вращения превышает время, необходимое для поворота гондолы на  $360^\circ$ , это означает, что в сигнале ориентации имеется ошибка и это действие ориентации должно быть остановлено.

**Улучшенная система ориентации, основанная на алгоритмах поиска с восхождением на холм ПВНХ.** Чтобы точно отслеживать направление ветра, алгоритм ПВНХ используется для регулировки положения гондолы в соответствии с изменением выходной мощности турбины и определения максимальной выходной мощности. Процесс показан на Рисунке 6 и состоит из трех частей:

Блок А используется для вычисления средней выходной мощности, где  $P_S$  - значение расчетной мощности,  $k$  – счетчик текущей мощности, а  $m$  – счетчик средней мощности. Полученная средняя выходная мощность присваивается  $P_{new}$ .

Блок В определяет, когда включить мотор ориентации, где  $P_{e1}$  - допустимая погрешность мощности для принятия решения о включении мотора ориентации. Когда мотор ориентации выключен, контроллер получает значение  $P_{new}$ . Только когда  $|P_{new} - P_{max}| > P_{e1}$ , мотор ориентации начинает вращаться и далее модель переходит в блок С. Когда  $|P_{new} - P_{max}| < P_{e1}$ , это означает, что ошибка мощности приемлема, и тогда модель переходит в блок А.

Блок С определяет, когда следует выключить мотор ориентации, где  $P_{e2}$  - допустимая ошибка мощности для принятия решения о том, следует ли выключить мотор ориентации. Когда мотор ориентации запущен, сначала сравнивается  $P_{new} - P_{old}$  с  $P_{e2}$ . Если  $|P_{new} - P_{old}| > P_{e2}$ , это означает, что расчетная точность ориентации не достигнута, тогда ориентацию необходимо продолжить и перейти к блоку А: если  $P_{new} - P_{old} > 0$ , это означает, что последнее направление ориентации правильное, мотор ориентации продолжает вращаться в этом направлении и переходит к Блоку А; пока  $P_{new} - P_{old} < 0$ , это означает, что последнее направление ориентации неверно, и изменяет

направление вращения мотора ориентации, после чего переходит к блоку А. Когда  $|P_{new} - P_{old}| < P_{e2}$ , это означает, мотор ориентации можно выключить, тогда  $P_{new}$  равен  $P_{max}$ , на чем процесс ориентации завершается.

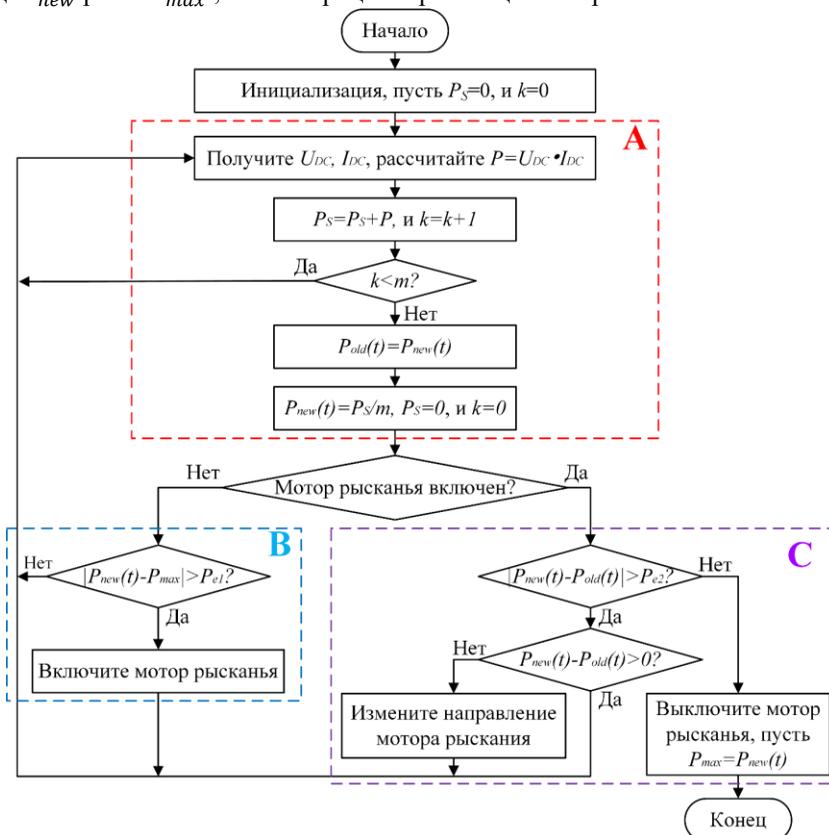


Рисунок 6 – Блок-схема системы ориентации, основанной на алгоритме ПВНХ

**Комбинированная стратегия управления рысканьем.** Алгоритм управления ориентацией улучшен за счет внедрения новой комбинированной стратегии управления, которая основана на модели прогнозирования нейронной сети ИНС и алгоритме управления мощностью на основе поиска с восхождением на холм ПВНХ. Согласно данным о направлении ветра, записанным системой SCADA, ИНС используется для прогнозирования направления ветра. Поскольку результат прогнозирования ИНС имеет ошибку (около  $2^\circ$ ), и эту ошибку невозможно измерить с помощью флюгера, необходимо использовать алгоритм управления мощностью на основе ПВНХ, чтобы устранить возникшую ошибку. Алгоритм управления мощностью, основанный на ПВНХ, регулирует положение гондолы, наблюдая за изменением выходной мощности ВЭУ и устраняя ошибку прогнозирования ИНС. Предлагаемой стратегии управления ориентацией показан на Рисунке 7. Когда запускается система контроля ориентации, а также определяется положение гондолы  $\theta_n$  и направление ветра  $v_d$ .

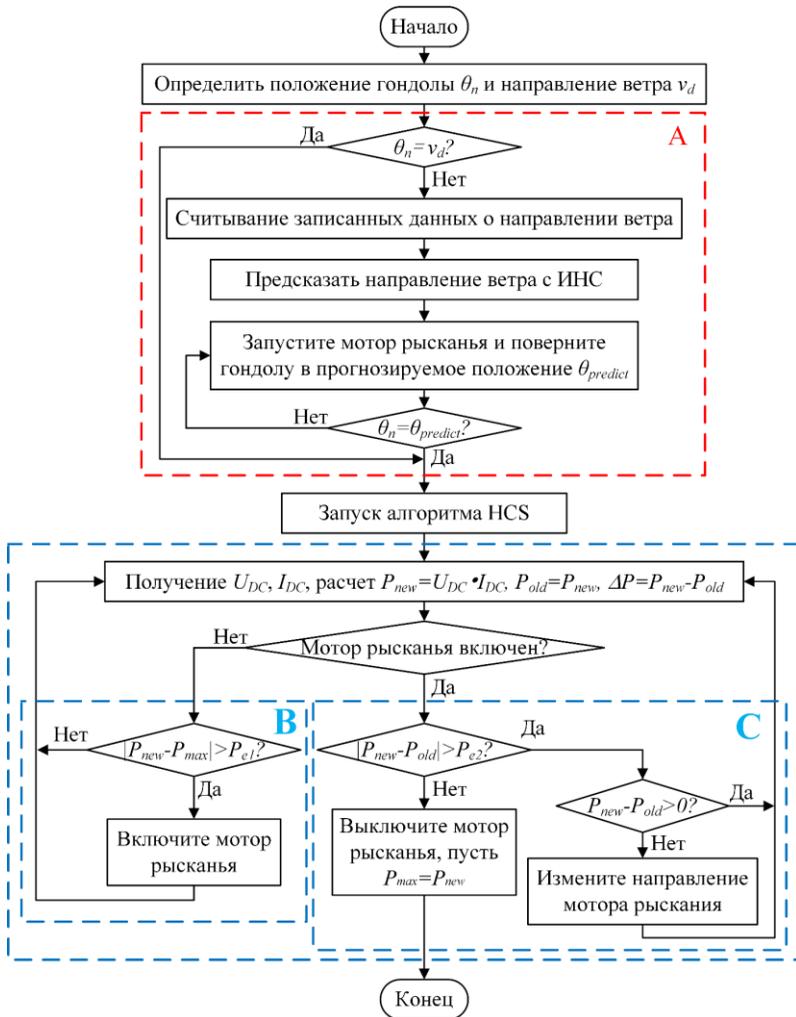


Рисунок 7 – Блок-схема комбинированной стратегии контроля ориентации

Блок А представляет процесс ориентации, основанный на модели прогнозирования ИНС. Если  $\theta_n = v_d$ , это означает, что в данный момент ошибки ориентации нет, или ошибка ориентации слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить, поэтому вводится часть, которая использует алгоритм управления мощностью на основе ПВНХ. Если  $\theta_n \neq v_d$ , это означает, что произошла ошибка ориентации и следует запустить двигатели системы ориентации. Анализируются данные о направлении ветра, записанные системой SCADA, а затем используется ИНС для их обработки. В соответствии с прогнозируемым результатом направления ветра запускается мотор ориентации для вращения гондолы до тех пор, пока гондола не будет развернута в прогнозируемое положение.

Когда процесс ориентации, основанный на модели прогнозирования ИНС в Блоке А, завершен, гондола достигла прогнозируемого положения. Однако, поскольку результаты, предсказанные ИНС, могут содержать ошибки, алгоритм управления мощностью на основе ПВНХ далее используется для устранения ошибки, вызванной ИНС и возможным изменением направления ветра.

Блок В активируется, когда мотор ориентации не включен. Если  $|P_{new} - P_{max}| > P_{e1}$ , что возникла ошибка, и необходимо включить мотор ориентации, затем вернуться в исходное положение алгоритма управления мощностью на основе ПВНХ. Если  $|P_{new} - P_{max}| < P_{e1}$ , что ошибка не достигла величины реагирования, нет необходимости включать двигатели системы ориентации.

Блок С активируется при включении двигателей ориентации. Если  $|P_{new} - P_{old}| < P_{e2}$ , что потерей мощности можно пренебречь, необходимо выключить двигатели ориентации, принять  $P_{new} = P_{old}$  и завершить процесс ориентации. Если  $|P_{new} - P_{old}| > P_{e2}$ , что потери мощности выше расчетных, двигатели ориентации должны оставаться включенными: если  $P_{new} - P_{old} > 0$ , то последнее направление вращения двигателей ориентации правильное, необходимо продолжить вращение в этом направлении, затем вернуться в исходное положение алгоритма управления ПВНХ для определения выходной мощности; если  $P_{new} - P_{old} < 0$ , что последнее направление вращения двигателей ориентации неверно, необходимо изменить направление двигателей ориентации, а затем проверить выходную мощность ВЭУ.

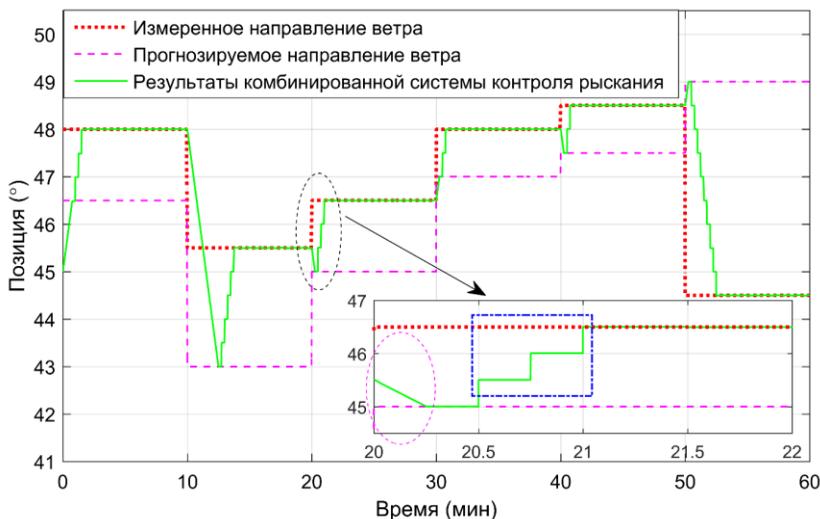


Рисунок 8 – Демонстрация комбинированной стратегии управления ориентацией

На Рисунке 8 показан принцип действия предлагаемой комбинированной системы управления ориентацией, цикл управления устанавливается равным 10 минутам. В начале каждого цикла управления приводится в действие двигатели ориентации для достижения положения гондолы по направлению ветра, предсказанному ИНС, а затем положение гондолы регулируется в соответствии с

алгоритмом управления мощностью на основе ПВНХ. Работа системы ориентации прекращается при достижении допустимой (минимальной) ошибки.

В начале цикла управления (20 мин) гондола должна достичь положения, предсказанного ИНС ( $45^\circ$ ) от предыдущего положения ( $45,5^\circ$ ), поэтому двигатели ориентации заставляют гондолу поворачиваться от положения в конце предыдущего цикла к предсказанному положению (показан красным эллипсом). Поскольку в прогнозируемом значении ИНС присутствует ошибка ( $1^\circ$ ), когда гондола достигает прогнозируемого положения, алгоритм ПВНХ начинает управлять двигателем ориентации для постепенного подхода гондолы к положению, в котором ошибка между гондолой и направлением ветра будет полностью нивелирована (показан синим прямоугольником).

В четвертой главе описывается конструкция разработанного виртуального контроллера ВЭУ. Для решения задачи моделирования работы системы управления ориентацией ВЭУ используется компьютерная функциональная модель. При этом она служит также для проверки эффективности разработанного алгоритма управления ориентацией, а результаты моделирования подлежат сравнению с фактическими эксплуатационными данными SWT-3.6-120. Схема ВЭУ с активной системой ориентации приведена на Рисунке 9.

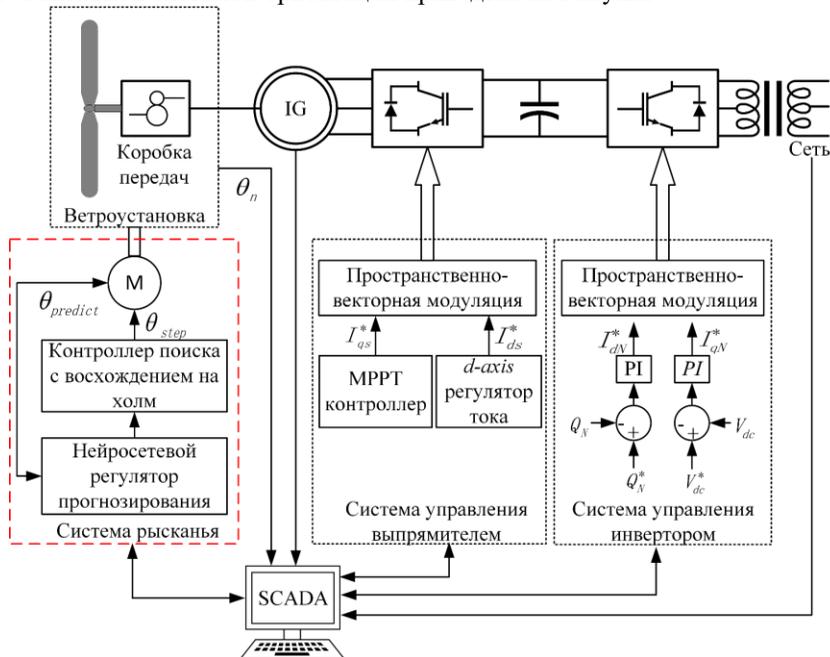


Рисунок 9 – Схема ВЭУ с разработанной системой управления ориентацией

Момент вращения ротора передается валу генератора через коробку передач (мультипликатор). Напряжение переменной частоты и амплитуды, вырабатываемое электрическим генератором, преобразуется в переменное напряжение постоянной частоты с помощью двух преобразователей с обратной

связью на основе векторного управления. Емкостный фильтр, находящийся между инвертором и сетью, служит для повышения качества генерируемой энергии, подаваемой в сеть, за счет уменьшения гармоник напряжения и тока.

В качестве активной системы управления рысканием применена стратегия управления ориентацией, сочетающая алгоритм прогнозируемого управления ИНС и алгоритм управления мощностью на основе ПВНХ. Таким образом, двигатели ориентации могут быть запущены заранее на основе прогнозирования направления ветра с помощью ИНС, чтобы отслеживать направление ветра в режиме реального времени. Когда в результате прогнозирования обнаружено отклонение (ошибка ориентации), алгоритм управления ПВНХ может быть использован для компенсации возникшей ошибки.

Скрытые размеры ИНС Элмана устанавливаются равными 35, задержки слоев устанавливаются равными 25, и результат показан на Рисунке 10.

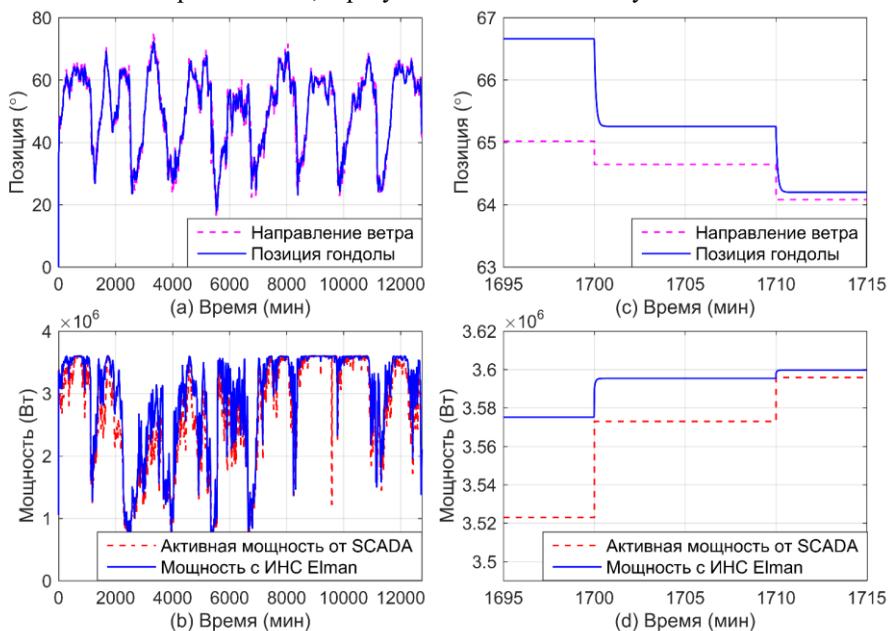


Рисунок 10 – Производительность системы ориентации на основе ИНС Элмана

На Рисунке 10(а) показано сравнение между измеренным направлением ветра и позицией гондолы (прогнозируемые результаты ИНС Элмана). После анализа и соответствующих вычислений среднеквадратичная ошибка (СКО) составляет 9,4064,  $R = 0,9701$ , средняя ошибка ориентации составляет  $2,1514^\circ$ , а данные прогноза с диапазоном ошибок в пределах  $5^\circ$  могут достигать 92,31%, что показывает, что прогнозируемое направление ветра является достаточно точным. На Рисунке 10(б) показано сравнение между активной мощностью ВЭУ и прогнозируемой мощностью ИНС Элмана. Прогнозируемая выходная мощность составляет 97,5884% от теоретической выходной мощности, что на 6,0124% выше, чем фактическая активная мощность до прогноза.

В 1700 мин гондола поворачивается из своего предыдущего положения в положение, спрогнозированное ИНС, однако конечное положение гондолы и направление ветра не совпадают из-за ошибки в результатах прогнозирования (Рисунок 10(с)), тем не менее, эта ошибка мала ( $<2^\circ$ ); в течение этого периода времени выходная мощность системы с ИНС была больше, чем фактическая активная мощность (Рисунок 10(d)), со средним улучшением на 0,8%.

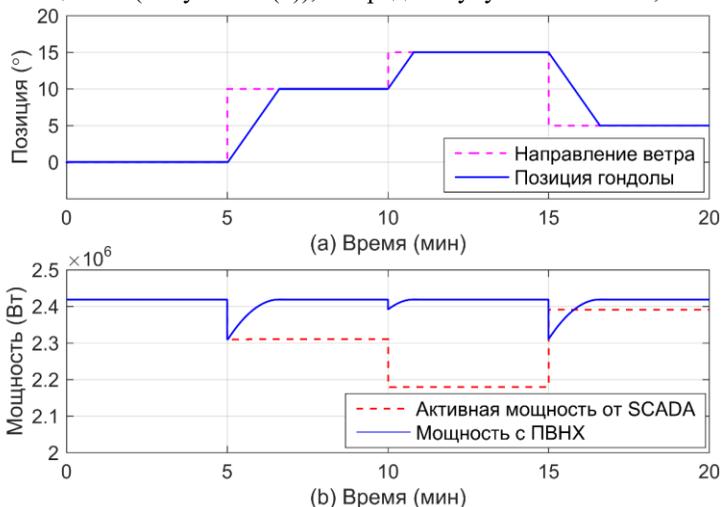


Рисунок 11 – Снижение выработки мощности солнечными модулями

На Рисунке 11 показана вся информация о системе ориентации с использованием алгоритма управления мощностью на основе ПВНХ. Входная скорость ветра была установлена равной 9 м/с; в то время как направление ветра было  $0^\circ$  в начале, затем оно изменилось на  $10^\circ$  через 5 мин, затем изменилось на  $15^\circ$  через 10 мин, затем изменилось на  $5^\circ$  через 15 мин. На Рисунке 11 (а) показано, что система ориентации смогла отследить направление ветра, устраняя ошибку ориентации. После регулирования ротор ВЭУ достиг оптимальной скорости вращения, выходная мощность также достигла максимального значения, а ошибка ориентации стала близкой к  $0^\circ$ . На Рисунке 11(б) показана выходная мощность ВЭУ. При изменении направления ветра выходная мощность уменьшилась, но в ходе регулирования система ориентации отслеживала направление ветра и устранила ошибку ориентации, при этом выходная мощность возвратилась к максимальному значению. По сравнению с ВЭУ без подобной системы ориентации выходная мощность за счет возросла на 5%.

Когда ВЭУ оснащена системой управления рысканием с комбинацией ИНС и алгоритма управления мощностью на основе ПВНХ, влияние частых изменений направления ветра сводится к минимуму. Такой вывод является чрезвычайно важным, поскольку очевиден прирост мощности. На Рисунке 12 показаны характеристики ВЭУ при работающей встроенной системе управления рысканием. Видно, что комбинированная система может хорошо прогнозировать и отслеживать изменения направления ветра и повышать выходную мощность.

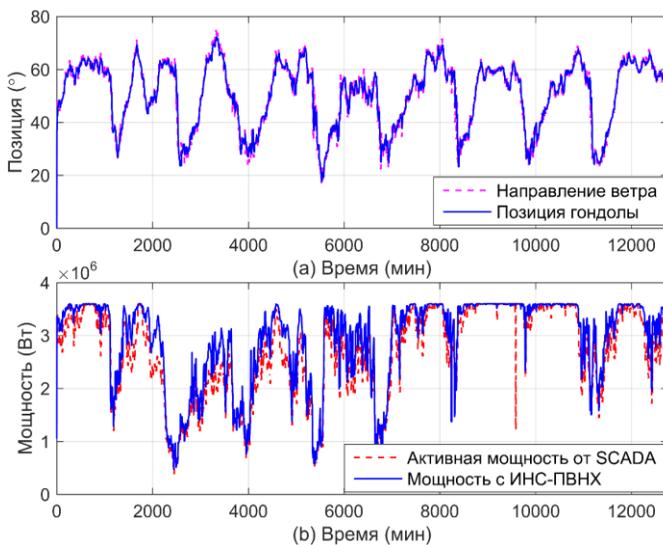


Рисунок 12 – Производительность системы ориентации на основе ИНС-ПВНХ

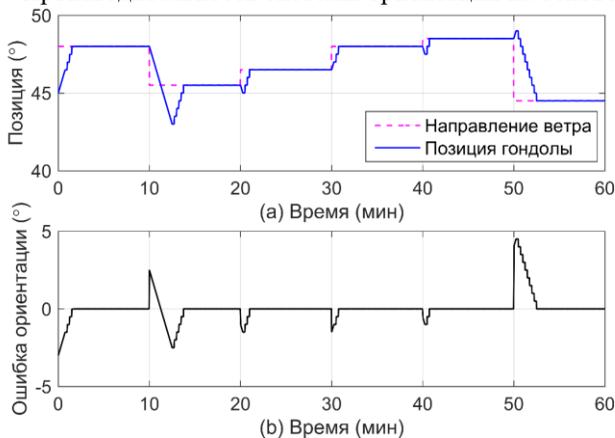


Рисунок 13 – (а) Сравнение направления ветра и положения гондолы (б) Ошибка ориентации при работе системы ориентации на основе ИНС-ПВНХ

На Рисунке 13(а) подробно показано сравнение между фактическим направлением ветра и положением гондолы. Например, через 20 минут направление ветра прогнозируется ИНС на основе данных о направлении ветра, записанных системой SCADA, и приводит в действие двигатели ориентации из предыдущего положения (45,5°), с поворотом в прогнозируемое положение (45°). Поскольку в результатах прогнозирования ИНС присутствует ошибка, (ошибка составляет 1,5°), применяется алгоритм управления мощностью на основе ПВНХ для устранения ошибки ориентации. Через 20,25 мин алгоритм управления мощностью, основанный на ПВНХ, сначала заставляет гондолу повернуться по часовой стрелке на один шаг. Если мощность увеличивается, то ошибка ориентации уменьшается, и тогда гондола продолжает вращаться в этом

направлении; если же мощность уменьшается, что ошибка ориентации увеличивается, и тогда система понимает, что гондолу необходимо вращать в противоположном направлении. Это повторяется до 21 минуты, когда изменение выходной мощности ВЭУ становится незначительным, что означает, что ошибка ориентации устранена. На Рисунке 13(b) показано изменение ошибки ориентации во время работы ВЭУ. Максимальная ошибка, предсказанная ИНС, составляет  $4,5^\circ$ , минимальная ошибка -  $1^\circ$ , а ошибка ориентации, наконец, сходится к 0 после работы алгоритма управления мощностью на основе ПВНХ.

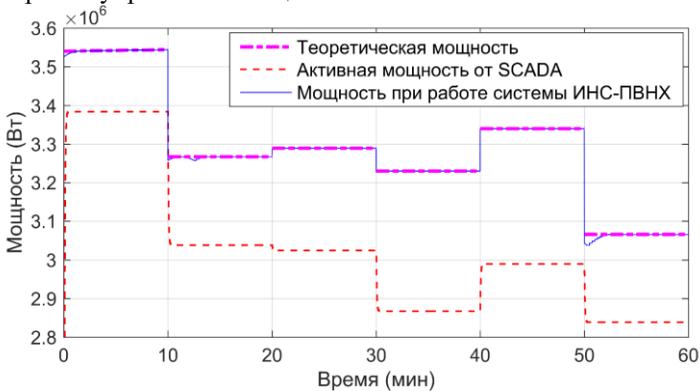


Рисунок 14 – Изменение вырабатываемой мощности

На Рисунке 14 показано изменение выходной мощности во время работы ВЭУ. Ошибка ориентации в конечном итоге сходится к 0, поэтому выходная мощность в конечном итоге приближается к теоретической выходной мощности. В среднем повышение выходной мощности составило при тестировании 6,88%. Алгоритм является интеллектуальным в связи с наличием адаптивного управления двумя системами ВЭУ и использованием решений нейросети.

В Таблице 1 показана производительность при применении различных алгоритмов в работе системе ориентации. Во-первых, ошибка ориентации составляет около  $10^\circ$  для традиционной системы ориентации, до  $2^\circ$  для прогноза ИНС Элмана, и менее  $1^\circ$  для системы ориентации с комбинированным алгоритмом управления ИНС-ПВНХ. Однако направление ветра постоянно меняется, а прогноз ИНС Элмана среднее направление за определенный период времени. Комбинированный алгоритм управления ИНС-ПВНХ разработан, напротив, именно для вычисления изменения направления ветра в реальном времени. Такой подход позволяет снизить ошибку ориентации и поднять эффективность выработки электроэнергии. Во-вторых, с точки зрения значения КИЭВ, комбинированный алгоритм рысканья ИНС-ПВНХ имеет значение 0,4312, что уже очень близко к максимальному экспериментальному значению 0,44, что указывает на высокую точность алгоритма. Наконец, эффективность выработки при использовании комбинированного алгоритма ИНС-ПВНХ составляет 98,45%, что на 6,88% больше в сравнении с традиционной системой ориентации, что является значительным улучшением для ВЭУ мегаваттного класса.

Таблица 1 - Сравнение производительности различных систем ориентации

	Средняя ошибка ориентации	КИЭВ ( $C_{pmax} =$ 0.44)	$\frac{\text{Выходная мощность}}{\text{Теоретическая мощность}} \times 100\%$
Традиционная система ориентации	10°	0,4029	91,57%
ИНС Элмана	2°	0,4294	97,58%
ИНС-ПВНХ	<1°	0,4312	98,45%

Согласно статистике глобальной ВЭУ, к концу 2022 года 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 рысканием выходная мощность увеличится на 6,88%, то есть выработка электроэнергии может увеличиться на:

$$365 \text{ дней} \times 6 \text{ часов} \times 906 \text{ ГВт} \times 6,88\% = 1,37 \times 10^{11} \text{ кВтч}$$

При цене 0,15 доллара за кВтч ежегодная экономия электроэнергии за счет уменьшения погрешности ориентации составляет :

$$1,37 \times 10^{11} \text{ кВтч} \times 0,15 \text{ доллара} = 2,05 \times 10^{10} \text{ долл. США или } \approx 2 \text{ трлн. руб}$$

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе проведены исследования и анализ экспериментальных данных SCADA, полученных от действующих ВЭУ и ветроэлектростанций. Осуществлена статистическая обработка данных скорости и направления ветра, положения ротора и выходной мощности при различных погодных условиях.

2. Впервые в пакете MATLAB/Simulink построена и верифицирована компьютерная симуляционная модель ВЭУ SWT-3.6-120 с новым виртуальным контроллером, позволяющим на основе интеллектуального алгоритма осуществлять управление системами ориентации и отбора мощности ВЭУ.

3. Проведено исследование влияния ошибки ориентации на рабочие характеристики ВЭУ, в результате которого выявлен ряд недостатков сенсорного и программного обеспечения ВЭУ. С учетом выявленных проблем разработан новый комбинированный алгоритм управления ориентацией ротора ВЭУ по результатам, предсказанным ИНС на основе данных SCADA. Также разработан способ управления мощностью ВЭУ на основе ПВНХ в реальном времени с устранения предстоящего изменения направления ветра.

4. Результаты тестирования симуляционной модели, действующей на основе разработанного алгоритма управления показывают, что угол ошибки ориентации может быть снижен до 1°, а использование энергии ветра может быть увеличено более чем на 6.88%.

## **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.**

1. Продолжить работу в части внедрения разработанных программных решений в существующие системы управления ориентацией ВЭУ в России (на ветропарках ГК Росатом) и Китае с последующей коммерциализацией.

2. Исследовать возможность применения разработанного алгоритма и метода к крупным ветропаркам с учетом взаимовлияния соседних ветроэнергоустановок.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ*

1. **Yang, Y.** Horizontal Axis Wind Turbine MPPT Control Research / **Y. Yang, E. Solomin, W. Lei** // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – Sochi, 2020. – Article № 9112043. – 6 p; 0,4 п.л./0,3 п.л. (Scopus).

2. **Yang, Y.** The Control Strategy and Simulation of the Yaw System for MW Rated Wind Turbine / **Y. Yang, E. Solomin** // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice. – Magnitogorsk, 2020. – Article № 9234343. – P. 87-92; 0,4 п.л./0,3 п.л. (Scopus).

3. **Ян, Ю.** Simulation of the Wind Turbine Yaw Control System / **Ю. Ян, Е.В. Соломин, Г.Н. Рявкин** // Вестник Московского энергетического института. – 2021. – № 1. – С. 44-55; 0,8 п.л./0,5 п.л.

4. **Yang, Y.** Theoretical and Experimental Verification of Wind Powered Hydrogen Storage Energy System / **Y. Yang, E. Solomin, G. Yang** // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – Sochi, 2021. – P. 108-113; 0,4 п.л./0,3 п.л. (Scopus).

5. Соломин, Е.В. Дифференциальная ошибка угла ориентации анеморумбометра горизонтально-осевой ветроэнергетической установки / Е. В. Соломин, А. А. Терехин, А. С. Мартьянов, А. А. Ковалёв, Д. Р. Исмагилов, А. А. Мирошниченко, **Ю. Ян, Г. Н. Рявкин** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 365-380; 1 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

6. **Yang, Y.** Hill-Climbing Algorithm for the Wind Turbine Yaw System / **Y. Yang, E. Solomin** // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – Magnitogorsk, 2021. – Article № 9559498. – P. 561-565; 0,3 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

7. Соломин, Е.В. Обоснование грядущих глобальных энергетических проблем / Е. В. Соломин, П. А. Юнусов, А. А. Ковалёв, В. В. Долгошеев, **Ю. Ян, Г. Н. Рявкин, М. А. Майоров, А. Ю. Косарев** // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2021. – № 3. – С. 2-18; 1,1 п.л./0,2 п.л.

8. Соломин, Е.В. Обоснование грядущих глобальных энергетических проблем / Е. В. Соломин, П. А. Юнусов, А. А. Ковалёв, В. В. Долгошеев, **Ю. Ян, Г. Н. Рявкин, М. А. Майоров, А. Ю. Косарев** // Альтернативная энергетика и экология. – 2021. – № 4-6. – С. 48-60; 0,8 п.л./0,2 п.л.

9. Мартьянов, А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование ветроэнергетической установки с водородным накопителем / А. С. Мартьянов, А.

А. Терехин, Д. Р. Исмагилов, **Ю. Ян**, А. А. Ковалёв, Г. Н. Рявкин, А. А. Мирошниченко, В. В. Кичатов // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2021. – № 25-27. – С. 72-89; 1,1 п.л./0,5 п.л.

10. **Yang, Y.** Non-Linear Autoregressive Neural Network Based Wind Direction Prediction for the Wind Turbine Yaw System / **Y. Yang**, E. Solomin, Y. Zhou // 2023 International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing. – Sochi, 2023. – P. 119-123; 0,3 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

*Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

11. “ Патент на полезную модель №. 206085”. Устройство преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное с функцией выработки электроэнергии / Галеев Р. Г., Соломин Е.В., Евдокимов М. В., Ковалёв А. А., Мирошниченко А. А., Кузьмищев П. А., Набеев В. В., Рявкин Г. Н., Гордиевский Е.М., Юнусов П. А., **Ян Ю.**, Станчаускас В.И. – № 2021106045; Приоритет полезной модели 10.03.2021; дата гос. регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20.08.2021.

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022615776. Модель дифференциально ошибки анеморумбометра / Соломин Е.В., Мартянов А.С., Ковалёв А.А., **Ян Ю.**, Рявкин Г.Н., Гордиевский Е.М., Косарев А.Ю. – № 2022612154; заявл. 17.02.2022; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.04.2022.

*Публикации в других изданиях*

13. Ковалёв, А.А. Проблема ориентации горизонтально-осевых ветроэнергетических установок / А. А. Ковалёв, В. В. Долгошеев, П. А. Юнусов, **Ю. Ян**, Г. Н. Рявкин // *Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0 : тезисы докладов научного семинара в рамках международной научно-технической конференции "Автоматизация"*. – Сочи, 2020. – С. 179-181; 0,3 п.л./0,1 п.л.

14. Ковалёв, А.А. Эффект взаимовлияния ветроэнергетических установок в составе ветропарка / А. А. Ковалёв, В. В. Долгошеев, П. А. Юнусов, **Ю. Ян**, Г. Н. Рявкин, А. А. Мирошниченко // *Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0 : тезисы докладов научного семинара в рамках международной научно-технической конференции "Автоматизация"*. – Сочи, 2020. – С. 14-19; 0,4 п.л./0,1 п.л.

15. **Ян, Ю.** Исследование МРРТ-управления горизонтально-осевой ветроэнергетической установкой / **Ю. Ян**, Е. В. Соломин, Ж. Сюе, А. А. Ковалёв, Г. Н. Рявкин // *Электропитание*. – 2020. – №1. – С.48–58; 0,9 п.л./0,6 п.л.

Ян Юйсун

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
УСТАНОВКИ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНАЦИИ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОРИЕНТАЦИИ И ОТБОРА  
МОЩНОСТИ

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета  
Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2024. Формат 60x84 1/16 Печать цифровая  
Усл.печ. л. 1... Уч.-изд. Л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_  
Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76