

На правах рукописи



Закиров Илья Валерьевич

**АВТОНОМНАЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ
С КОМБИНИРОВАННЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Зерноград – 2016

Работа выполнена в Азово-Черноморском инженерном институте – филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной аграрный университет» в г. Зернограде

Научный
руководитель

доктор технических наук, профессор
Воронин Сергей Михайлович

Официальные
оппоненты:

Григораш Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии».

Соловьёв Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии, Географического факультета.

Ведущая
организация:

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (г. Волгоград).

Защита состоится « 9 » декабря 2016 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.021.02 при ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет» по адресу: 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21, АЧИИ, в зале заседания диссертационного совета. Тел./факс (8-86359) 43-3-80

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет» в г. Зернограде и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет» <http://www.dongau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет» <http://www.dongau.ru/>.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Н.И. Шабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Истощение запасов ископаемого углеводородного топлива, устойчивый рост цен на данный вид топлива и высокая стоимость прокладки линий электропередач вынуждают более широко применять возобновляемые источники энергии, в частности, энергию ветра, для автономного электроснабжения малых сельскохозяйственных потребителей. Кроме того, активное использование возобновляемых источников энергии является одним из положений «Прогноза долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года».

Таким образом, применение в системах автономного электроснабжения ветроэнергетических установок становится все более перспективным. Однако, особенностью сельских автономных ветроэлектростанций является нерегулярность и неуправляемость поступления электроэнергии от генерирующих систем, а также нерегулярность потребления выработанной электроэнергии потребителем. В связи с этим для создания высокой степени надежности электроснабжения возникает необходимость применения аккумулирующих устройств.

Современные электрохимические аккумуляторы имеют ряд недостатков (высокая стоимость, ограниченность циклов заряда-разряда, необходимость создания собственной системы управления), которые для условий сельского хозяйства зачастую становятся критичными. В то же время существуют иные типы аккумуляторов энергии, применение которых позволило бы снизить долю электрохимических аккумуляторов без снижения надежности электроснабжения, в частности, скважинные аккумуляторы энергии. Однако отсутствие методик обоснования параметров автономных ветроэлектростанций с электрохимическими и скважинным аккумуляторами является сдерживающим фактором при создании таких систем. Поэтому исследования в данной области являются актуальными и представляют научный и практический интерес.

Степень разработанности темы. Исследованиями, связанными с применением возобновляемых источников энергии, занимались и занимаются многие ученые, как в России, так и за рубежом: например, Р.А. Амерханов, Д.С. Стребков, О.В. Григораш, А.А. Соловьёв, С.М. Воронин, Г.В. Никитенко, П.П. Безруких, В.П. Харитонов, Я.И. Шефтер, В.С. Симанков, и другие. Ведущими организациями в России в области использования возобновляемых источников энергии являются НПО «Ветроэн», ВИЭСХ, МЭИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ООО «СКБ «ИСКРА», ЧГАУ, Н.П.П. "Энерго-Экологические Системы", КБ «Радуга» и другие.

Анализ существующих систем автономного электроснабжения на возобновляемых источниках энергии показывает, что электрохимические аккумуляторы являются очень важной частью таких систем, при этом существует ряд проблем, связанных с их недостатками. Одним из путей решения этих проблем является поиск и применение альтернативных аккумулирующих устройств.

Цель работы. Разработка и обоснование параметров автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулированием энергии для сельскохозяйственных объектов, повышающим ее эффективность.

Задачи исследования:

1. Обосновать конструкцию скважинного аккумулятора энергии и структуру ветроэлектростанции с электрохимическим и скважинным аккумуляторами для сельских автономных объектов.

2. Установить закономерность чередования энергетических и аккумуляторных периодов в зависимости от скорости ветра и определить их статистические характеристики.

3. Уточнить методику и обосновать оптимальные параметры автономной ветроэлектростанции с учетом совместного применения электрохимических и скважинного аккумуляторов энергии.

4. Экспериментально проверить процессы генерирования электроэнергии при работе скважинного аккумулятора энергии и адекватность разработанной модели.

5. Оценить технико-экономические показатели автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулированием.

Объектом исследования является автономная сельская ветроэлектростанция с аккумуляторным резервом, состоящим из электрохимических аккумуляторов и скважинного аккумулятора энергии.

Предметом исследования является зависимость параметров автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулированием энергии от рабочей скорости ветра и потребности в электроэнергии.

Научная гипотеза – потенциальная энергия поднятой жидкости будет достаточна для генерирования электроэнергии и выполнения функции дополнительного аккумулирующего устройства.

Рабочая гипотеза – использование существующей системы автономного водоснабжения обеспечит улучшение технико-экономических показателей скважинного аккумулятора, что позволит использовать его в составе автономной ветроэлектростанции.

Научная новизна заключается в:

- обосновании методики определения энергетических и аккумуляторных периодов ветра;
- выявлении законов и статистических параметров распределения аккумуляторных и энергетических периодов ветра;
- обосновании методики оптимизации параметров автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумуляторным резервом.

Теоретическую и практическую значимость представляют:

- разработанная структура автономной ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом, позволяющая уменьшить емкость электрохимических аккумуляторов;
- параметры энергетических и аккумуляторных периодов ветра для Ростовской области;
- оптимальные параметры автономной ветроэлектростанции в зависимости от характеристик ветра и нагрузки.

Методы исследования:

- системный анализ;
- методы теории вероятностей и математической статистики;
- методы планирования эксперимента и техника физического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

- структура и оптимальные параметры автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулярованием энергии;
- методика оптимизации параметров ВЭС с комбинированным аккумулярованием;
- статистические параметры законов распределения аккумуляторных и энергетических периодов ветра для Ростовской области.

Степень достоверности и апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований обсуждались и были одобрены на всероссийской научной конференции «Научно-техническое обеспечение АПК юга России» (ФГБОУ ВПО АЧГАА, г. Зерноград, 2013 г.); на международной научно-практической конференции «Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона» (ФГБОУ ВПО СтГАУ, г. Ставрополь, 2014 г.); на всероссийской научной конференции «Научно-техническое обеспечение АПК юга России» (Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО ДГАУ, г. Зерноград, 2014 г.); на всероссийской научной конференции с международным участием и IX научной молодежной школы «Возобновляемые

источники энергии» (МГУ им. М.В. Ломоносова (географический факультет), г. Москва, 2014 г.); на X международная научная практическая конференция «Научный потенциал на свете – 2014» (г. София, 2014 г.); на международной научно-практической конференции в рамках Агропромышленного форума юга России «Возобновляемая и малая энергетика на сельских территориях, в рекреационных зонах и на удаленных объектах. Энергосберегающие технологии» (г. Ростов-на-Дону, 2015 г.), на международной научной конференции «Fundamental and applied science» (г. Шеффилд, 2015 г.).

Реализация результатов исследования.

Методика обоснования параметров автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумуляторным резервом используется в учебном процессе Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Автономная ветроэлектростанция с комбинированным аккумуляторным резервом внедрена в крестьянско-фермерском хозяйстве ИП Бондаренко С.В..

Рекомендации по применению возобновляемых источников энергии для автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов использованы при проектировании и создании ветроэлектрической станции, работающей с электрохимическим и скважинным аккумуляторами, обществом с ограниченной ответственностью «АЭРОСТАРТ».

Публикации. Результаты проведенных исследований отражены в 8 печатных работах. Из них две в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и приложения. Общий объем 132 страницы машинописного текста, включая 50 рисунков, 22 таблицы и 4 страницы приложения.

Личный вклад автора состоит: в обосновании конструкции скважинного аккумулятора энергии в составе автономной ВЭС; установлении статистических параметров законов распределения аккумуляторных и энергетических периодов ветра; уточнении и реализации методики обоснования параметров ВЭС с комбинированным аккумулярованием.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведено обоснование актуальности темы, приведена цель исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса в области автономного применения ветроэлектростанций в сельском хозяйстве» проведен анализ объектов автономного электроснабжения, анализ автономных систем электро-

снабжения, использующих как традиционные, так и нетрадиционные источники энергии, а также анализ способов аккумулирования электроэнергии.

Автономное электроснабжение малых сельскохозяйственных предприятий, которые значительно удалены от систем централизованного электроснабжения или имеют серьезные проблемы с питанием от централизованной сети, является одной из важнейших задач. При использовании ветроустановки для электроснабжения возникает проблема аккумулирования энергии, обусловленная нерегулярностью и неуправляемостью ветра. При этом для обеспечения высокой надежности электроснабжения автономные системы приходится комплектовать аккумуляторными батареями большой емкости, при которой их масса приближается к экономически критическому значению.

Решение существующей проблемы аккумулирования энергии позволит значительно повысить эффективность автономных систем электроснабжения на основе ветроустановок. Для решения этой проблемы предложено снизить долю электрохимических аккумуляторов в аккумуляторном резерве путем применения скважинного аккумулятора энергии.

Сформулирована цель работы и определены задачи исследования.

Во второй главе «Теоретическое обоснование системы автономного электроснабжения удаленного сельскохозяйственного объекта» предложена структура автономной системы электроснабжения на базе ветроустановки с использованием скважинного аккумулятора, позволяющая снизить долю электрохимических аккумуляторов (рисунок 1).

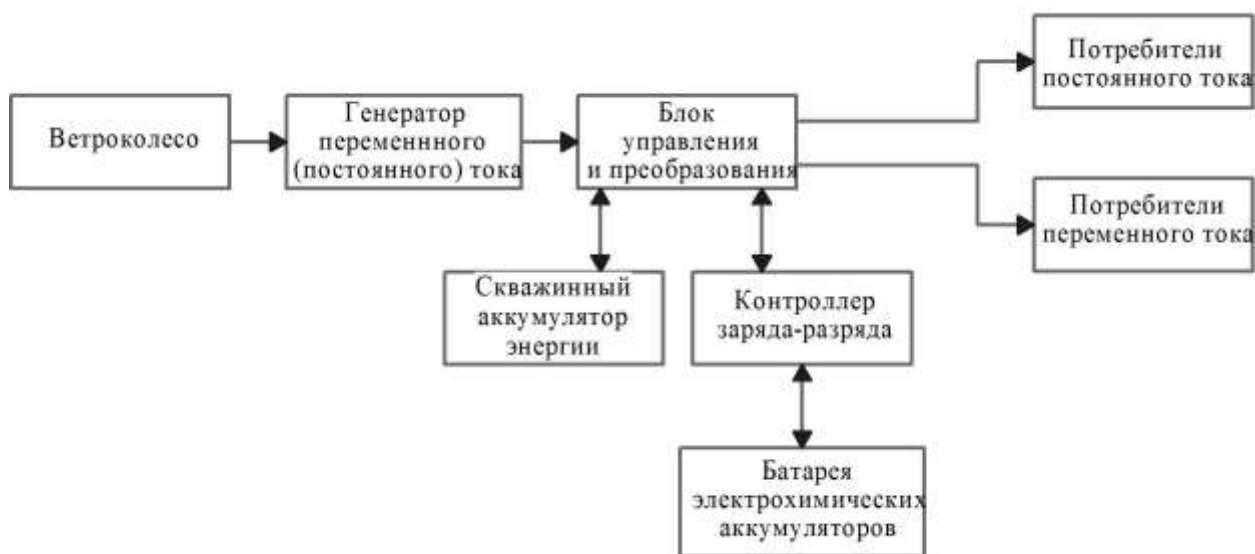


Рисунок 1 – Структурная схема автономной системы электроснабжения на основе ветроэнергетической установки со скважинным аккумулятором и электрохимическими аккумуляторами

Параметры предложенной автономной системы электроснабжения зависят от условий работы такой системы. В первую очередь от существующего ветроэнергетического потенциала той местности, где планируется сооружение данной автономной ветроэлектростанции.

Общие климатические характеристики для оценки теоретического ветроэнергетического потенциала (среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые скорости ветра, амплитуда суточного хода скорости ветра по сезонам года, плотность воздуха и др.) можно найти в метеорологических справочниках, а также вычислить, используя данные НАСА и специализированное программное обеспечение.

Специализированные же климатические характеристики, т.е. характеристики для оценки реальных ветроэнергетических ресурсов, к которым относится информация о продолжительности непрерывных энергетических (периоды со скоростью ветра большей либо равной рабочей скорости) и аккумуляторных (периоды со скоростью ветра меньше рабочей скорости) периодов ветра, не приводятся в метеорологических справочниках.

Ранее эти характеристики определялись в результате статистической обработки данных Государственных метеорологических обсерваторий, причем методика их получения включала в себя моделирование графиков по методу Монте-Карло, вызванное отсутствием информации о продолжительности периодов с той или иной скоростью ветра.

В настоящее время, проведя статистическую обработку находящихся в свободном доступе архивов погоды, которые содержат, в том числе и информацию о скорости ветра за достаточно большой период, появилась возможность получить графики распределения непрерывных энергетических (t_E) и аккумуляторных (t_A) периодов ветра для различных территорий.

Критерием оптимальности параметров автономной системы электроснабжения на основе ветроэнергетической установки с аккумуляторным резервом наиболее целесообразно принять стоимость данной системы, так как надежность ее будет несколько ниже надежности централизованного электроснабжения. Таким образом, чем ниже стоимость проектируемой системы, тем выше вероятность ее внедрения.

Целевая функция стоимости автономной системы электроснабжения, которая состоит из ветроэнергетической установки и батареи электрохимических аккумуляторов в качестве резерва, имеет вид:

$$S = N_P \left(2k_B \frac{1 + \frac{t_A}{t_{\text{Э}} \eta_A}}{\rho_B v_P^3 \eta_{\text{ВЭС}}} + k_A \frac{t_A}{U_H \eta_A} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где N_P – потребляемая мощность, Вт; k_B – удельная стоимость ветроустановки, руб/м²; $t_{\text{Э}}$, t_A – продолжительность энергетического и аккумуляторного периода соответственно, ч; η_A – КПД аккумулятора, о.е.; $\eta_{\text{ВЭС}}$ – КПД ветроэнергетической установки, о.е.; v_P – рабочая скорость ветра, м/с; k_A – удельная стоимость аккумулятора, руб/А.ч; U_H – номинальное для потребителя напряжение, В; ρ_B – плотность воздуха при ветре, кг/м³.

Удельные стоимости k_B и k_A вычислены на основе проведенного анализа цен на аккумуляторы и ветрогенераторы, и представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Удельные стоимости различных типов аккумуляторов

Тип и серия аккумулятора	Удельная стоимость k_A , руб/А.ч
Гелевые аккумуляторные батареи серии GX12	124,4
AGM аккумуляторные батареи серии HRL12	138,4
AGM аккумуляторные батареи серии DTM12	103,4
AGM аккумуляторные батареи серии HZB12	122,6

Таблица 2 – Удельные стоимости различных типов ветрогенераторов

Серия ветрогенератора	Удельная стоимость k_B , руб/м ²
NE	12416
FD	4651
EuroWind	15652

Для предложенной нами системы автономного электроснабжения (рисунк 1), целевая функция (1) принимает несколько иной вид (2). Помимо стоимости ветроустановки и стоимости аккумуляторных батарей, она содержит еще стоимость скважинного аккумулятора энергии

$$S = N_P \left(2k_B \frac{1 + \frac{(t_A - X)}{t_{\text{Э}} \eta_A \eta_{\Gamma}}}{\rho_B v_P^3 \eta_{\text{ВЭС}}} + k_A \frac{(t_A - X)}{U_H \eta_A} + k_H \frac{3600X}{mg \eta_{\Gamma}} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где k_H – удельная стоимость труб, руб/м; η_G – КПД скважинного аккумулятора энергии, о.е.; m – масса запасаемой воды, кг; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; X – время работы скважинного аккумулятора энергии на нагрузку, ч.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований автономной ветроэлектростанции и статистической обработки данных о скорости ветра» представлена программа проведения эксперимента и описана методика проведения экспериментальных исследований, а также представлены алгоритмы статистической обработки массива данных о скорости ветра за пятнадцатилетний период.

Программой предполагается проверка обоснованности допущений, принятых при теоретическом обосновании параметров ВЭС с комбинированным резервом, и способность скважинного аккумулятора генерировать электроэнергию. Для этого создана физическая модель такого аккумулятора (рисунок 2), а также выполнены следующие эксперименты:

1. Исследован процесс генерирования электроэнергии гидроагрегатом, состоящим из машины постоянного тока и гидротурбины.
2. Установлена зависимость мощности и напряжения генератора от глубины установки гидроагрегата в скважине.
3. Проверена адекватность модели скважинного аккумулятора путем получения вольт-амперной характеристики генератора.



1 – резервуар с водой; 2 – модуль, имитирующий работу гидроагрегата; 3 – измерительные приборы

Рисунок 2 – Экспериментальная установка для исследования скважинного аккумулятора энергии

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований автономной ветроэлектростанции и статистической обработки данных о скорости ветра» представлены результаты статистической обработки массива данных о скорости ветра за пятнадцатилетний период, экспериментального исследования физической модели скважинного аккумулятора, а также анализ этих результатов.

Используя архив погоды в Ростовской области с 1999 г. по 2013 г., были проведены исследования ветроэнергопотенциала данной местности, результатом которых стали законы распределения непрерывных энергетических и аккумуляторных периодов, а также статистические характеристики этих величин.

На основании данных, полученных в результате статистической обработки архивов погоды, были построены графики частоты непрерывных энергетических и аккумуляторных периодов, примеры которых приведены на рисунках 3 и 4.

Было установлено, что наиболее точно данные случайные величины описываются степенным законом распределения. Алгебраические выражения законов распределения энергетических и аккумуляторных периодов, а также коэффициенты детерминации для различных рабочих скоростей ветра представлены в таблице 3.

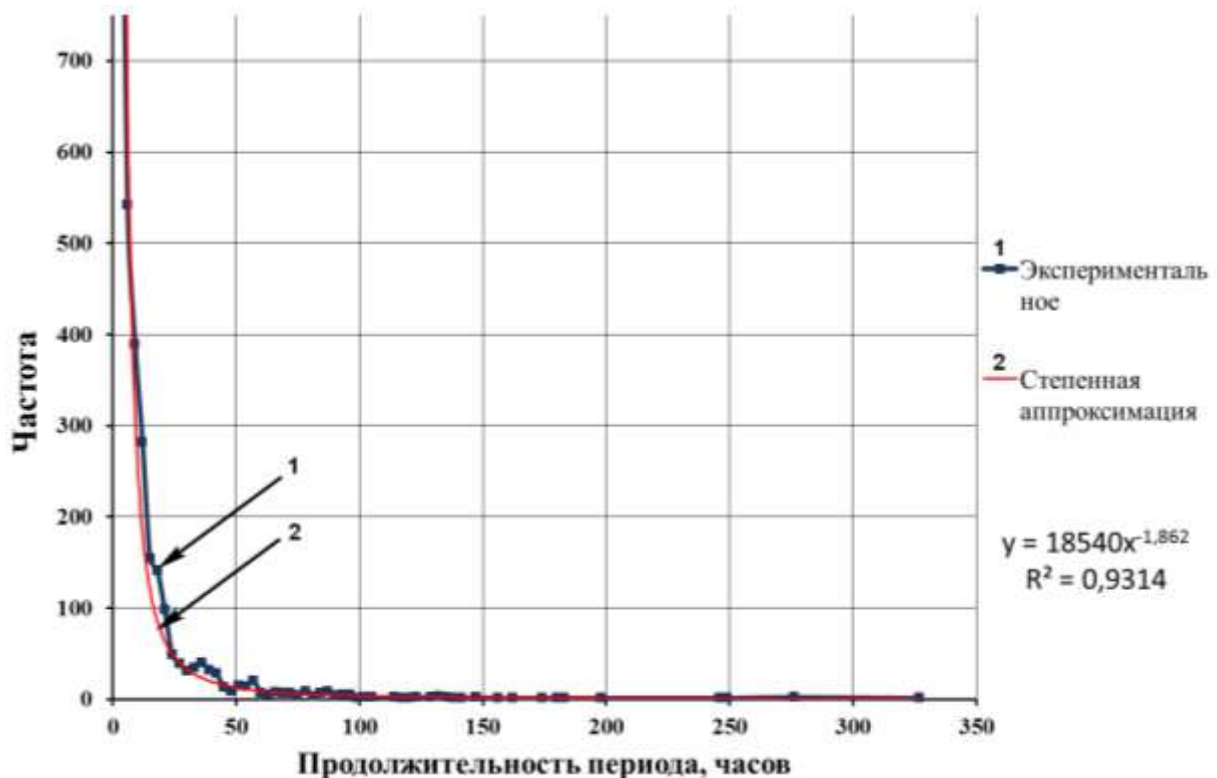


Рисунок 3 – Распределение периодов со скоростью ветра ≥ 4 м/с

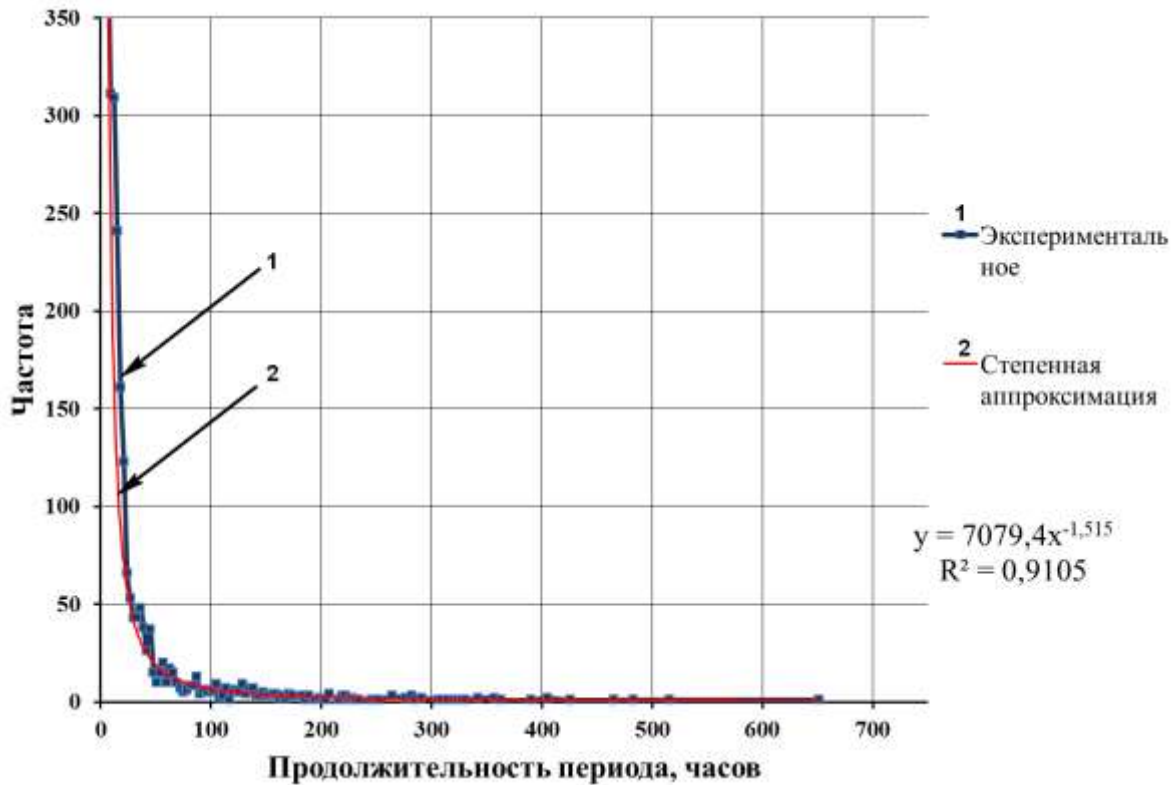


Рисунок 4 – Распределение периодов со скоростью ветра < 4 м/с

Таблица 3 – Алгебраические выражения законов распределения энергетических и аккумуляторных периодов

Рабочая скорость ветра, м/с	Математическое выражение закона распределения	Коэффициент корреляции, R	Коэффициент детерминации, R ²	Фактическое значение F-критерия, F	Табличное значение F-критерия, F _T
Энергетические периоды ветра					
2	$12932x^{-1,625}$	0,959	0,920	1116,0	3,94
4	$18540x^{-1,862}$	0,965	0,931	603,6	4,02
6	$5458x^{-1,764}$	0,958	0,917	533,5	4,12
8	$1890,7x^{-1,621}$	0,930	0,865	344,2	4,28
10	$765,37x^{-1,555}$	0,946	0,895	116,9	4,41
12	$387,99x^{-1,566}$	0,918	0,843	66,3	4,96
14	$262,86x^{-1,959}$	0,965	0,932	69,8	7,71
Аккумуляторные периоды ветра					
2	$45837x^{-2,205}$	0,970	0,941	522,9	4,12
4	$7079,4x^{-1,515}$	0,935	0,874	663,5	3,94
6	$1502,9x^{-1,174}$	0,905	0,819	652,3	3,91
8	$229,38x^{-0,822}$	0,903	0,675	309,4	3,90
10	$33,671x^{-0,498}$	0,901	0,449	131,4	3,90

Также получены графики функции изменения математического ожидания аккумуляторного и энергетического периодов (рисунки 5 и 6), которые хорошо аппроксимируются полиномами (3) и (4).

Уравнение аппроксимации для аккумуляторного периода:

$$t_A = -47,717 - 0,0444v^4 + 1,4513v^3 - 12,213v^2 + 47,459v, \quad (3)$$

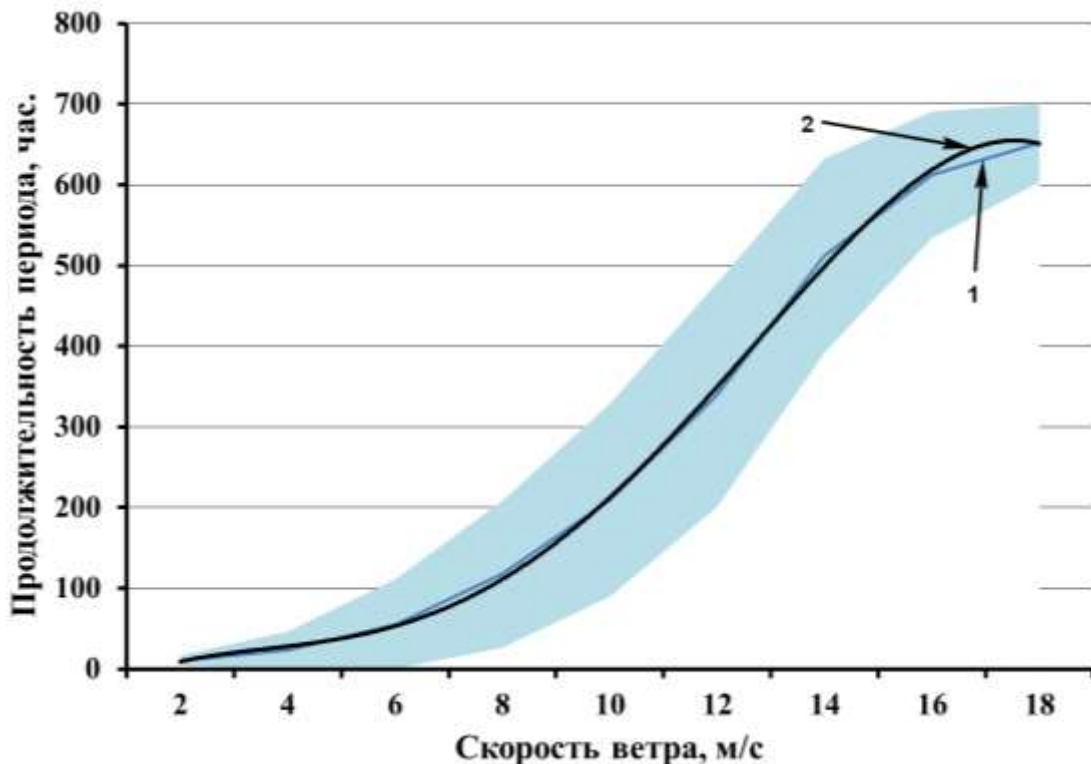
Уравнение аппроксимации для энергетического периода:

$$t_E = 65,454 - 0,0004v^5 + 0,0232v^4 - 0,5197v^3 + 5,5091v^2 - 28,088v \quad (4)$$

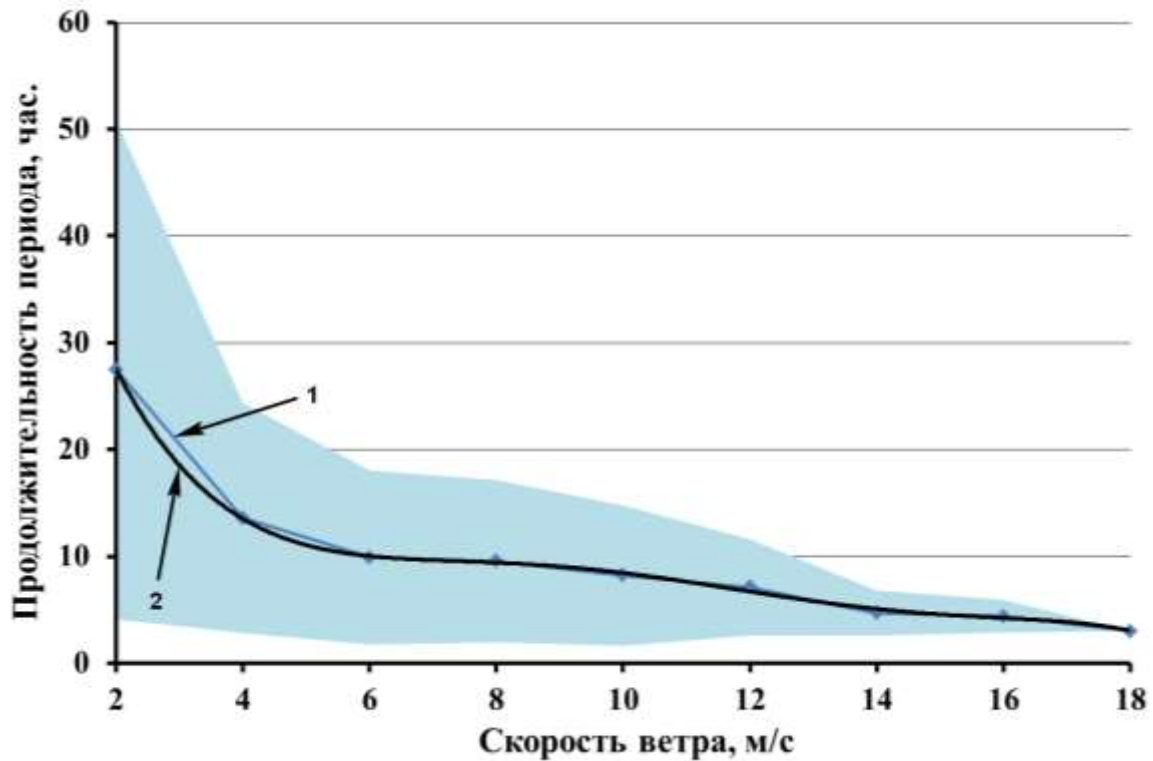
где v – скорость ветра, м/с.

Полученные функции изменения математического ожидания необходимы для оптимизации параметров автономной системы электроснабжения на основе ветроэнергетической установки с аккумуляторным резервом.

Путем подстановки в выражение (2) полученных зависимостей (3) и (4), было получено уравнение зависимости стоимости ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом от рабочей скорости ветра.



1 – экспериментальная зависимость; 2 – полиномиальная аппроксимация
Рисунок 5. Зависимость продолжительности (математического ожидания) аккумуляторного периода

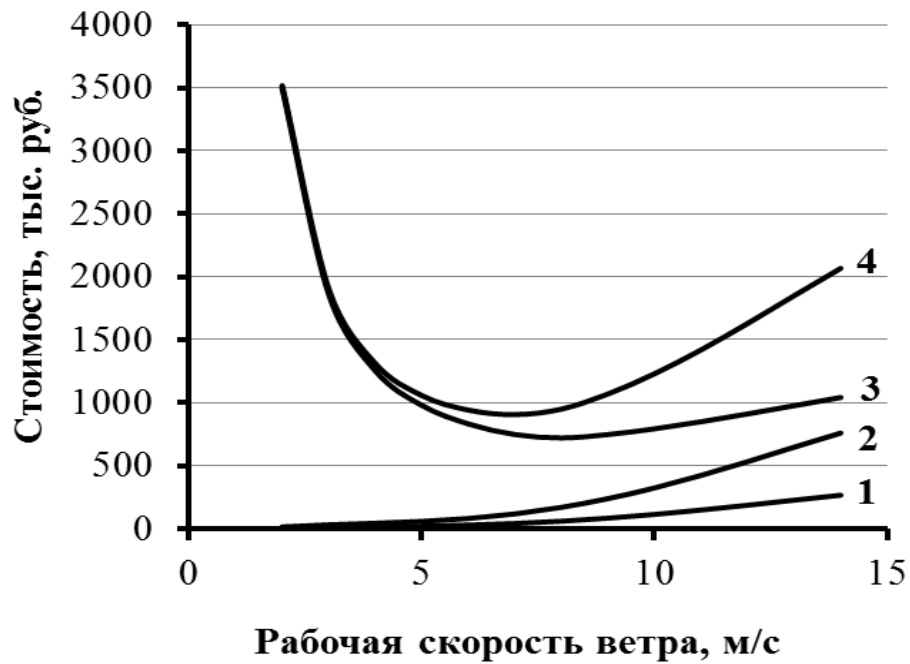


1 – экспериментальная зависимость; 2 – полиномиальная аппроксимация
 Рисунок 6. Зависимость продолжительности (математического ожидания) энергетического периода

Реализация целевой функции (2) для ветроэлектростанции со следующими характеристиками $N_P = 1000 \text{ Вт}$, $k_B = 4651 \text{ руб/м}^2$, $\eta_A = 0,85$, $\eta_{\text{ВЭС}} = 0,4$, $k_A = 124,4 \text{ руб/А.ч}$, $U_H = 220 \text{ В}$, $X = 0,2 t_A$, $k_H = 160 \text{ руб/м}$, $m = 5000 \text{ кг}$, $\eta_{\Gamma} = 0,7$ выражена графиком зависимости ее стоимости от рабочей скорости ветра (рисунок 7).

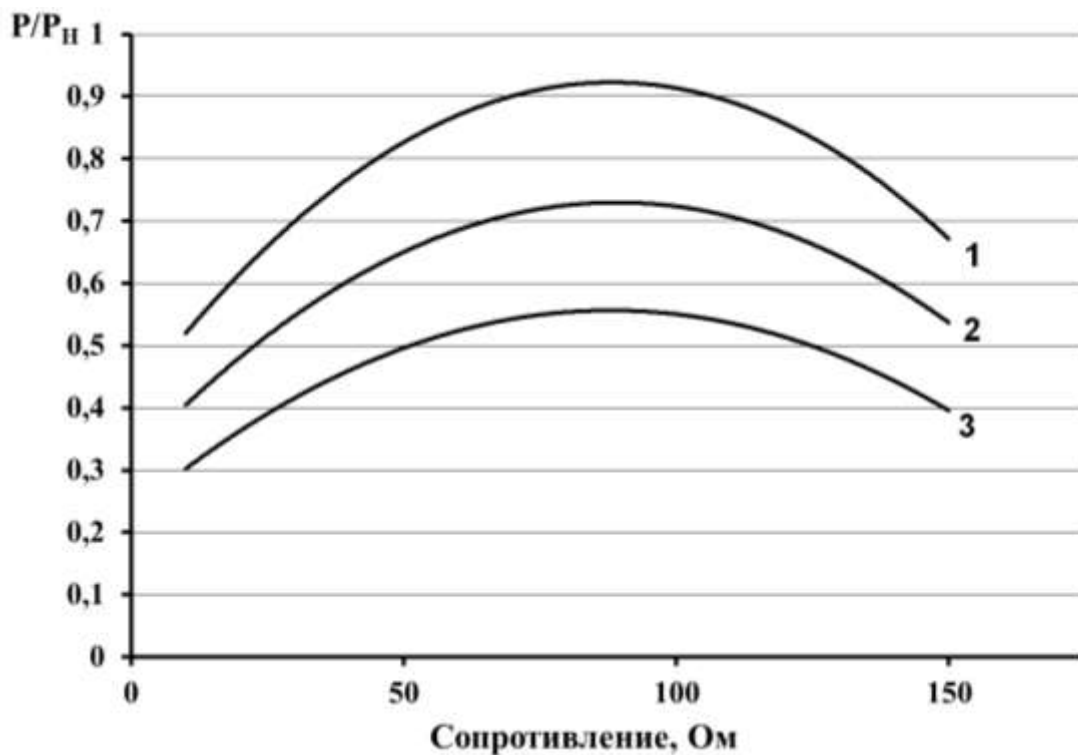
Как следует из графика (рисунок 7) целевая функция имеет ярко выраженный минимум, что предполагает целесообразность оптимизации параметров автономной сельской ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом.

Проверка способности скважинного аккумулятора энергии генерировать электроэнергию показала следующие результаты, представленные на рисунке 8.



1 – стоимость электрохимического аккумулятора; 2 – стоимость скважинного аккумулятора энергии; 3 – стоимость ветроустановки; 4 – суммарная стоимость.

Рисунок 7 – График целевой функции стоимости автономной системы электроснабжения от рабочей скорости ветра



1 – 5 метров; 2 – 4 метра; 3 – метра

Рисунок 8 – График зависимости мощности от сопротивления нагрузки при различных глубинах установки гидроагрегата.

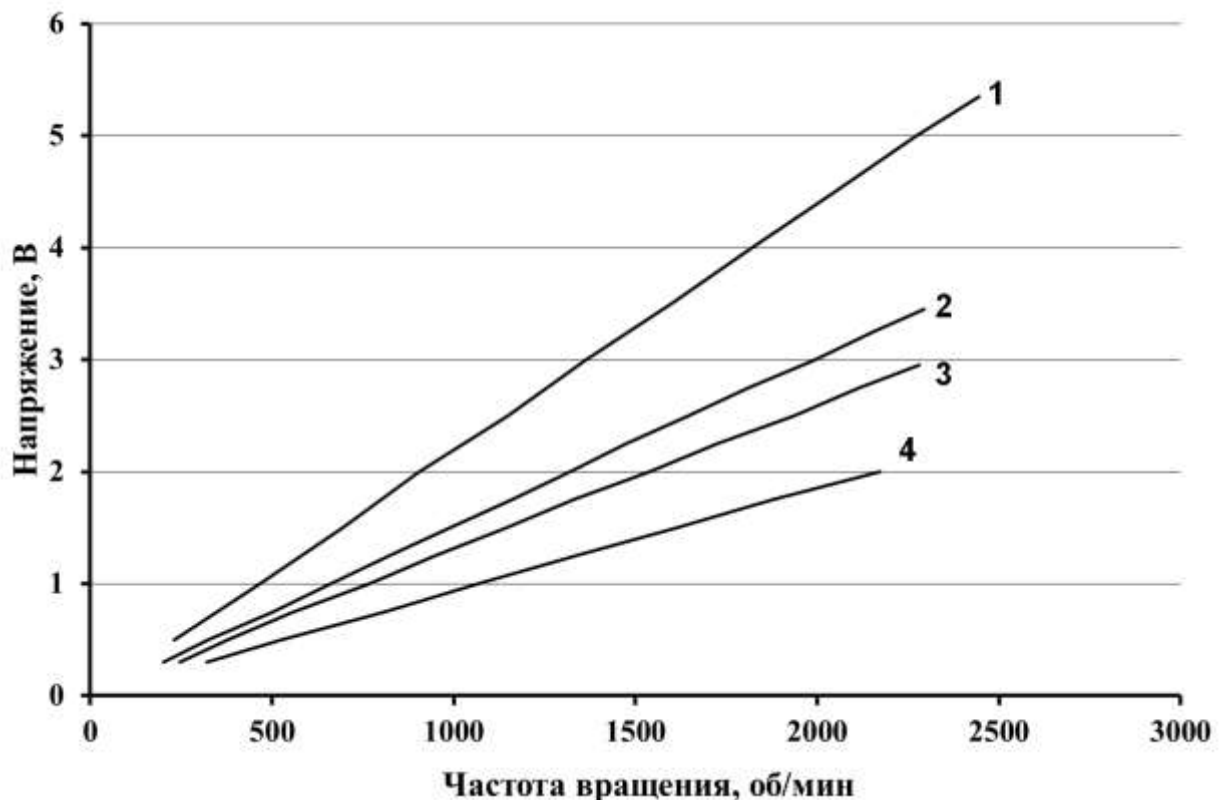
Проверка значимости регрессионных моделей по критерию Фишера показала, что все модели значимы.

Из графиков на рисунке 8 видно, что кривая мощности имеет максимум при определенном сопротивлении нагрузки. Этот максимум определяется характеристиками используемого генератора. Также очевидно, что при увеличении глубины установки гидроагрегата растет мощность, вырабатываемая генератором вплоть до номинальной величины.

Снятые характеристики генератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (рисунки 9 и 10) подтверждают теоретические положения, приведенные во второй главе.

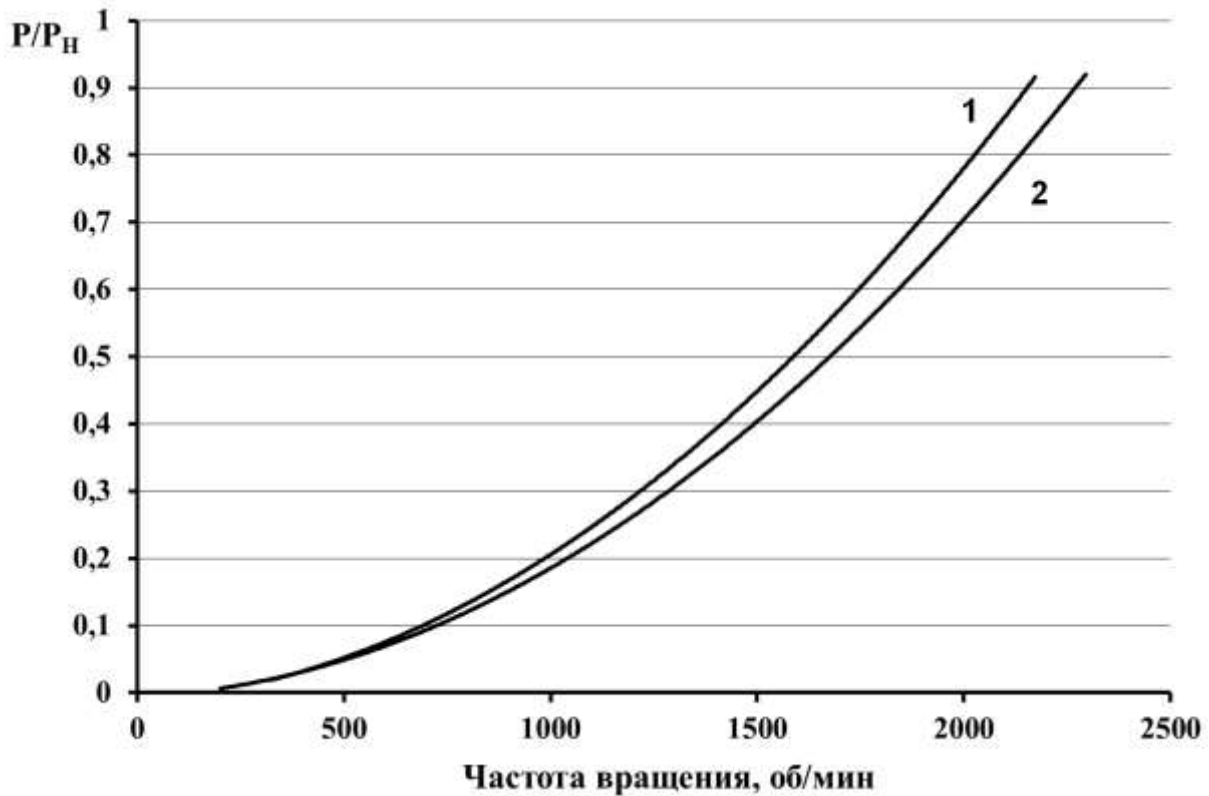
Во-первых, электродвижущая сила якоря генератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов пропорциональна только частоте вращения якоря (рисунок 9).

Во-вторых, при прочих равных условиях полная электрическая мощность генератора растёт с увеличением числа оборотов его якоря (рисунок 10).



1 – $R=99999,9$ Ом; 2 – $R=150$ Ом; 3 – $R=100$ Ом; 4 – $R=50$ Ом

Рисунок 9 – График зависимости напряжения от частоты вращения вала генератора при различных величинах сопротивления нагрузки



1 – R=50 Ом; 2 – R=150 Ом

Рисунок 10 – График зависимости мощности от частоты вращения вала генератора при различных величинах сопротивления нагрузки

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулярованием энергии» проведена сравнительная оценка экономических показателей различных вариантов электроснабжения удаленного сельскохозяйственного объекта. В качестве базовых вариантов принято электроснабжение от централизованной системы и от дизельного электрогенератора. Проектный вариант – электроснабжение от автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумуляторным резервом.

Эффективность предлагаемых решений подтверждена экономическим эффектом. Так, чистый дисконтированный доход за 10 лет, полученный в результате внедрения проектного варианта электроснабжения, составляет не менее 730 тыс. руб. при сравнении с централизованным электроснабжением и около 700 тыс. руб. при сравнении с дизельной электростанцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

1. Скважинный аккумулятор энергии эффективно использовать только при наличии артезианской скважины для водоснабжения, обустройство специальной скважины только для скважинного аккумулятора неэф-

фективно, так как увеличивает стоимость ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом.

2. Установлено, что при расходе воды в скважине $5 \text{ м}^3/\text{ч}$, уменьшение доли электрохимических аккумуляторов в аккумуляторном резерве автономной ветроэлектростанции для сельскохозяйственных объектов за счет применения скважинного аккумулятора энергии может достигать 45%. В среднем этот показатель находится на уровне 15%.
3. Продолжительность непрерывных энергетических и аккумуляторных периодов подчиняется степенному закону распределения с показателем степени, зависящем от скорости ветра. Математические ожидания продолжительности непрерывных энергетических и аккумуляторных периодов описываются полиномами пятой и четвертой степени соответственно, и зависят от выбранной скорости ветра. В частности, при рабочей скорости ветра 6 м/с энергетический период будет не меньше 9 часов, а последующий за ним аккумуляторный период будет не больше 53 часов с вероятностью 0,95. Полученные уравнения рекомендуется использовать при оптимизации параметров автономной ветроэлектростанции.
4. Установлена оптимальная рабочая скорость ветра для условий Ростовской области, которая находится в диапазоне 6 – 8 м/с. При такой скорости ветра наблюдается минимум целевой функции удельной стоимости автономной ветроэлектростанции с аккумуляторным резервом, состоящим из батареи электрохимических аккумуляторов и скважинного аккумулятора энергии. Полученные результаты рекомендуется использовать при формировании ветроэлектростанций.
5. Экспериментально установлено, что мощность генератора при сбросе воды зависит от скорости истечения воды и характеристик лопастей насоса. Подтверждено, что при свободном сбросе воды в скважину, электрическая машина постоянного тока способна вырабатывать электроэнергию с мощностью, 80 – 100% от номинальной, в зависимости от глубины скважины.
6. Анализ технико-экономических показателей разработанной ветроэлектростанции с электрохимическими и скважинным аккумулятором энергии показал ее эффективность. Так, чистый дисконтированный доход за 10 лет, полученный в результате внедрения проектного варианта электроснабжения, составляет не менее 730 тыс. руб. при сравнении с централизованным электроснабжением и около 700 тыс. руб. при сравнении с дизельной электростанцией.

Рекомендации производству. Полученные результаты (статистические параметры законов распределения аккумуляторных и энергетических периодов ветра для Ростовской области, методика их получения, оптимальные параметры автономной ветроэлектростанции с комбинированным аккумулярованием энергии) рекомендуется использовать при разработке региональных агрозоотехнических требований и организации серийного производства компонентов автономных ВЭС.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшее повышение конкурентоспособности автономных ветроэлектростанций целесообразно вести в направлении поиска альтернативных аккумулирующих систем и их совершенствования.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Закиров, И.В. Получение функций энергетического и аккумуляторного периодов ветра для заданной скорости / И.В. Закиров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №03(117). – IDA [article ID]: 1171603072. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/72.pdf>.

2. Закиров, И.В. Автономная система электроснабжения на основе ветроэнергетической установки с комбинированным аккумулированием/И.В. Закиров, С.М. Воронин//Электронный научно-производст. журнал АгроЭкоИнфо/[Электронный ресурс]- ФГУП «ВНИИ Агроэкоинформ»-2016, №4. Режим доступа: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/СТАТУИ/2016/4/st_432.doc/

В других изданиях:

3. Закиров, И.В. Аккумулирование энергии в ветроустановке / С.М. Воронин, И.В. Закиров // Вестник аграрной науки Дона. – 2013. – №4 – с. 26-30.

4. Закиров, И.В. Энергетические и аккумуляторные периоды ветра в Ростовской области» / С.М. Воронин, И.В. Закиров, Ф.В. Закиров // В сборнике: Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона Международная научно-практическая конференция. 2014. С. 18-23.

5. Закиров, И.В. Уравнения для определения энергетических и аккумуляторных периодов ветра в Ростовской области / С.М. Воронин, И.В. Закиров, Ф.В. Закиров // Вестник аграрной науки Дона – 2014. – №2 – с. 35-40.

6. Закиров, И.В. Обоснование рабочей скорости ветра для автономных ветроэлектростанций / С.М. Воронин, И.В. Закиров, Ф.В. Закиров // Материали за X международна научна практична конференция «Научният потенциал на света – 2014», – 2014. – Том 6 – с. 72-77.

7. Закиров, И.В. Обоснование рабочей скорости ветроустановки / И.В. Закиров, С.М. Воронин, Ф.В. Закиров // Возобновляемые источники энергии: Материалы всероссийской научной конференции с международным участием и IX научной молодежной школы. – М.: Университетская книга, 2014. – с. 21-25.

8. Закиров, И.В. Определение параметров автономной ветроэлектростанции малой мощности с комбинированным аккумуляторным резервом / И.В. Закиров, С.М. Воронин, Ф.В. Закиров // Materials of the XI International scientific and practical conference, «Fundamental and applied science», – 2015. Volume 18. Physics. Technical sciences. Sheffield. Science and education LTD. с. 58-62.

Подписано в печать 23.09.2016г.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 268.

РИО Азово-Черноморского инженерного института – филиала
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде

347740, г. Зерноград Ростовской области, ул. Советская, 15.