


На правах рукописи

ШЕЛУБАЕВ Максим Викторович



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СТАНЦИИ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2015

Работа выполнена на кафедре электроснабжения сельского хозяйства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шерязов Сакен Койшыбаевич

Официальные оппоненты: **Обухов Сергей Геннадьевич**,
доктор технических наук, доцент, доцент
кафедры электроснабжения промышленных
предприятий ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»

Чиндяскин Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроснабжения
сельского хозяйства ФГБОУ ВПО
«Оренбургский государственный
аграрный университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина»

Защита состоится «9» июня 2015 г., в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» <http://www.csaа.ru>.

Автореферат разослан «17» апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета



Плаксин
Алексей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электроснабжение сельскохозяйственных потребителей (СХП) остается в числе приоритетных задач для обеспечения устойчивого развития отрасли. Большая протяженность и разветвленность линий электропередач, износ сельских электрических сетей вызывают значительные потери электроэнергии. В результате наблюдается рост затрат на электроснабжение СХП, что в целом снижает эффективность производства сельскохозяйственной продукции и ухудшает условия комфортного проживания на селе.

Одним из путей повышения эффективности электроснабжения СХП является развитие распределенной генерации (РГ), представляющей собой электростанции малой мощности, располагаемые вблизи потребителей и использующие местные энергоресурсы. При этом развитие РГ возможно на основе использования возобновляемой энергии. Наиболее перспективным возобновляемым источником по признаку доступности для СХП является энергия ветрового потока.

В мире действует огромный парк ветроэнергетических установок (ВЭУ), установленная мощность которых составляет более 300 ГВт. Развитие ветроэнергетики происходит за счет использования ВЭУ средней и большой мощности, устанавливаемой в районах с высокой скоростью ветра.

В районах с низкой скоростью ветра актуальными являются ВЭУ малой мощности (до 100 кВт). Данные ВЭУ не позволяют подключить генератор к электрической сети без преобразовательного устройства.

Для обеспечения потребной энергии с минимальными затратами возможно объединение нескольких ВЭУ малой мощности, подключенных к общему преобразовательному устройству посредством линий электропередач (ЛЭП) в составе ветропарка (ВП). Совокупность нескольких ВП представляет собой ветроэлектрическую станцию (ВЭС).

Вопросы использования ВЭУ малой мощности в составе ВЭС недостаточно исследованы. Снижение затрат на электроснабжение СХП путем обоснования и выбора оптимальных показателей ВЭУ малой мощности и параметров ВП в составе ВЭС является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации (РФ) № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности

и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», распоряжением Правительства РФ № 1-р от 8.01.2009 г. «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.», постановлением Правительства РФ № 47 от 23.01.2015 г. «О стимулировании использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электроэнергии».

Цель работы: повышение эффективности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей путем использования ветроэнергетических установок малой мощности в составе ветроэлектрической станции.

Задачи исследования:

1. Установить основные показатели ВЭУ, параметры ВП и ВЭС, влияющие на эффективность электроснабжения СХП с заданными техническими характеристиками.

2. На основе экспериментальных данных исследовать выходные параметры генератора ВЭУ малой мощности.

3. Разработать технические решения для обеспечения показателей качества электроэнергии от ВЭУ малой мощности, схемное решение ВЭС в системе электроснабжения.

4. Определить технико-экономические показатели ВЭУ малой мощности и ВЭС, разработать рекомендации для их выбора в системе электроснабжения СХП.

Объект исследования: процесс генерации, преобразования и передачи электроэнергии от ВЭУ малой мощности, работающих в составе ВЭС, для электроснабжения СХП.

Предмет исследования: взаимосвязь показателей ВЭУ и ВП, работающих в составе ВЭС, с характеристиками ветрового потока и системой электроснабжения СХП.

Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:

1. Математическая модель для определения показателей ВЭУ (диаметр ветроколеса, рабочая скорость) и параметров ВЭС (количество ВЭУ, занимаемая площадь) в принятых ограничениях по минимальным удельным затратам на электроснабжение СХП.

2. Зависимость минимальной длины линии электропередачи от диаметра ветроколеса (ВК) и количества ВЭУ в составе ВП.

3. Методика согласования параллельной работы ВЭУ с системой централизованного электроснабжения или с источником автономного электроснабжения.

4. Методика выбора показателей ВЭУ и ВЭС, обеспечивающих минимум удельных затрат на выработку и передачу электроэнергии.

Практическая значимость работы и реализация ее результатов. Разработанная математическая модель на стадии проектирования позволяет выбрать количество, мощность и диаметр ВК в зависимости от характеристик ветрового потока и показателей системы электроснабжения, обеспечивающие минимум удельных затрат на выработку электроэнергии от ВЭС. Полученная аналитическая зависимость минимальной длины ЛЭП от диаметра ВК и количества ВЭУ в составе ВП позволяет минимизировать удельные затраты на передачу электроэнергии.

Предложенные технические решения (патенты) позволяют ВЭУ в составе ВЭС вырабатывать качественную электроэнергию и включить на параллельную работу с существующими традиционными источниками энергии.

Разработанные на основе результатов диссертационной работы рекомендации по выбору показателей ВЭУ малой мощности и параметров ВЭС в системе электроснабжения СХП внедрены в ООО «Гиперпроектплюс», приняты к использованию в ОАО «Челябоблкоммунэнерго», ООО «Спецпромсервис». Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов по специальности «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались и получили одобрение на международных научно-технических конференциях: ЧГАА (г. Челябинск, 2009–2014 гг.), «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (ВИЭСХ, г. Москва, 2010 г.); на всероссийской научно-практической конференции УрФУ (г. Екатеринбург, 2009–2011 гг.); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы транспорта и энергетики и пути инновационного поиска решения» (г. Астана, 2013 г.).

Публикации. По основным положениям диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получены два патента Российской Федерации: патент на полезную модель (Пат. № 89184) и патент на изобретение (Пат. № 2382900).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 133 наименований, приложений. Основное содержание работы изложено на 146 страницах, включая список литературы, содержит 61 рисунок, 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

В **первой главе** «*Особенности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с использованием ВЭУ*» приведены анализ системы электроснабжения СХП, особенности развития ветроэнергетики и опыт использования ВЭУ.

В настоящее время сельские электрические сети находятся в изношенном состоянии. Ввиду большой протяженности распределительных сетей 10–0,38 кВ растут потери электроэнергии при ее передаче и, соответственно, стоимость электроэнергии. РГ позволяет снизить потери электроэнергии при передаче.

В перспективе в качестве РГ могут служить ВЭУ. Использование энергии ветра позволяет экономить органическое топливо и снизить затраты на потребляемую электроэнергию СХП.

В мире и в России накоплен большой опыт использования энергии ветра. В развитие ветроэнергетики в России внесли вклад видные ученые: Н. Е. Жуковский, Г. Х. Сабинин, В. Н. Андрианов, Е. М. Фатеев и др., а вопросу использования энергии ветра посвящены труды П. П. Безруких, Л. А. Саплина, Я. И. Шефтера и др.

Анализ удельной стоимости ВЭУ малой мощности позволил установить характер ее изменения в зависимости от мощности установки (рисунок 1).

Приведенные данные показывают, что по затратам в отдельных случаях выгодно использовать несколько ВЭУ малой мощности, которые могут быть объединены в ВП. Совокупность нескольких ВП представляет собой ВЭС.

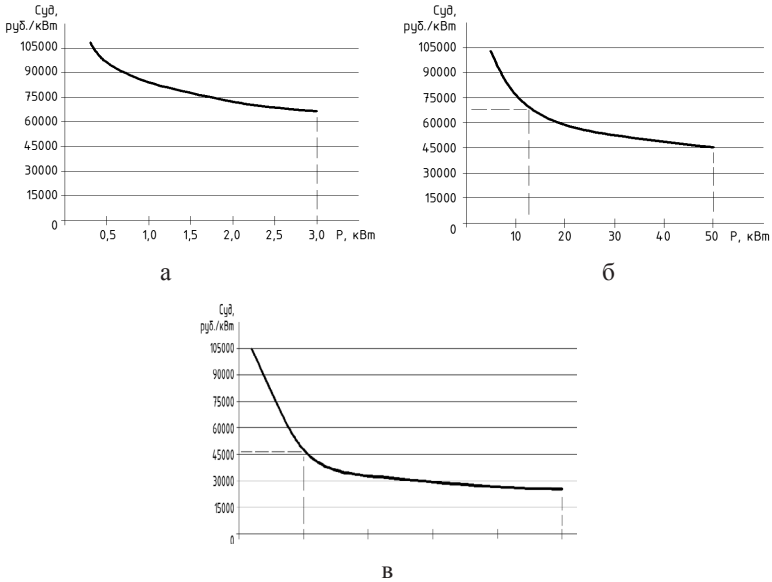


Рисунок 1 – Зависимость удельной стоимости ВЭУ от установленной мощности: а – ВЭУ до 3 кВт; б – ВЭУ от 5 до 50 кВт; в – ВЭУ более 50 кВт

Основные показатели и условия работы ВЭУ в составе ВП и ВЭС изучены недостаточно. Тогда для эффективного электроснабжения СХП необходимо оптимизировать основные показатели ВЭУ и параметры ВП и ВЭС.

Проведенный анализ позволил сформулировать задачи исследования.

Во второй главе «Теоретическое исследование параметров ВП» определена скорость ветра, при которой ожидается максимум вырабатываемой электроэнергии, разработана математическая модель для определения количества и мощности ВЭУ в составе ВЭС, установлены зависимости минимальной длины ЛЭП от показателей ВЭУ.

Для эффективного использования энергии ветра необходимо выбрать рабочую скорость ветра для ВЭУ ($v_{раб}$). Исследование зависимости удельной выработки электроэнергии от скорости ветра в условиях Челябинской области позволило определить скорость ветра, при которой ожидается максимум вырабатываемой качественной электроэнергии от ВЭУ (рисунок 2).

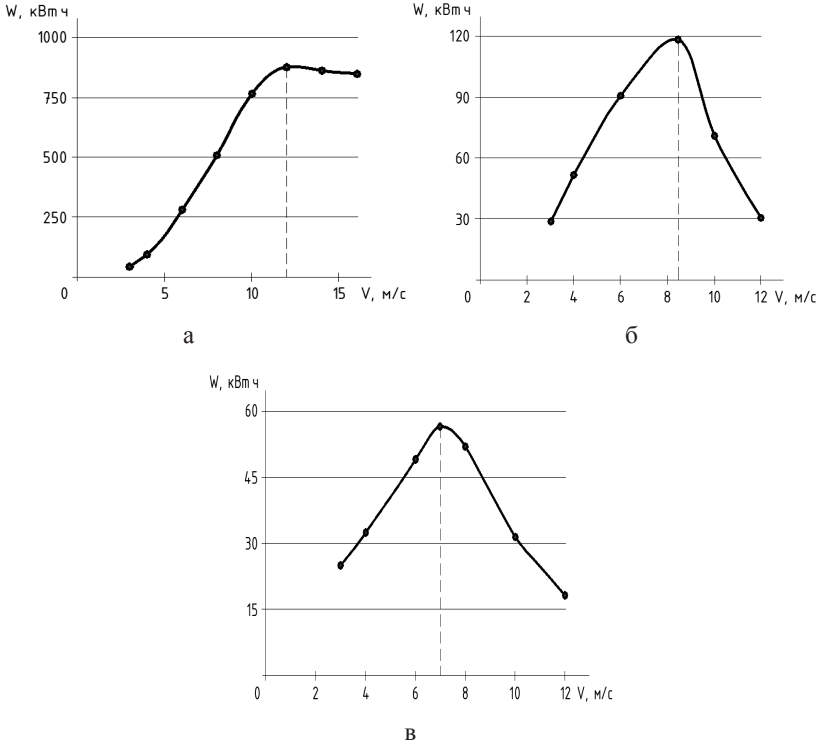


Рисунок 2 – Зависимость качественной вырабатываемой электроэнергии за год от рабочей скорости для ВЭУ в ветроэнергетических районах Челябинской области: а – первый; б – второй; в – третий районы

Исследования параметров ВЭУ и ЛЭП позволили установить факторы, влияющие на стоимость электроэнергии от ВЭС:

$$C_{\text{ВЭС}} = f(P_{\text{потр}}; U_{\text{потр}}; \cos \varphi; d_{\text{вк}}; v_{\text{раб}}; K_{\text{ВЭУ}}; x_{\text{ВЭУ}}; S; L_{\text{ВП}}; F_{\text{пров}}; U_{\text{ВП}}; K_{\text{пер}}; n_{\text{ВЭУ}}). \quad (1)$$

Анализ приведенных факторов позволил выявить группу показателей в системах: электроснабжения – z_1 ; выработки электроэнергии от ВЭС – z_2 ; передачи электроэнергии от ВП – z_3 , которые представляются как

$$z_1 = f(P_{\text{потр}}; U_{\text{потр}}; \cos \varphi); \quad (2)$$

$$z_2 = f(d_{\text{вк}}; v_{\text{раб}}; K_{\text{ВЭУ}}; x_{\text{ВЭУ}}; S); \quad (3)$$

$$z_3 = f(L_{\text{ВП}}; F_{\text{пров}}; U_{\text{ВП}}; K_{\text{пер}}; n_{\text{ВЭУ}}). \quad (4)$$

Для технико-экономического обоснования параметров ВЭС требуется установить взаимосвязи между приведенными группами факторов.

Количество ВЭУ ($x_{\text{ВЭУ}}$) с заданным диаметром ветроколеса ($d_{\text{вк}}$) зависит от наличия территории для строительства ВЭС. С учетом того, что расстояние между ВЭУ должно быть не менее ($10d_{\text{вк}}$), количество ВЭУ с соответствующим диаметром ВК ограничивается исходя из условия:

$$100d_1^2 x_1 + 100d_2^2 x_2 + \dots + 100d_i^2 x_i \leq S, \quad (5)$$

где d_i – диаметр i -й ВЭУ, м;

x_i – количество i -х ВЭУ в составе ВЭС;

S – имеющаяся площадь для размещения ВЭУ, м².

Тогда количество ВЭУ одного типа с заданным $d_{\text{вк}}$ в зависимости от занимаемой площади территории:

$$x_i = \frac{S}{100 \cdot d_i^2}, \quad (6)$$

а ожидаемое количество электроэнергии от ВЭС:

$$W_{\text{выр}} = W_{\text{уд.ВЭУ}i} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot x_i = \frac{\pi \cdot W_{\text{уд.ВЭУ}i} \cdot S}{400}, \quad (7)$$

где $W_{\text{уд.ВЭУ}i}$ – удельная выработка электроэнергии от ВЭУ, кВт·ч/м²;

$W_{\text{выр}}$ – вырабатываемая электроэнергия ВЭС, кВт·ч.

При строительстве ВЭС количество вырабатываемой электроэнергии с 1 м² занимаемой территории ($W_{\text{уд.}S}$) можно оценить как

$$W_{\text{уд.}S} = \frac{W_{\text{выр}}}{S} = \frac{\pi \cdot W_{\text{уд.ВЭУ}}}{400} \approx 0,01 \cdot W_{\text{уд.ВЭУ}}. \quad (8)$$

Тогда ожидаемая выработка электроэнергии от ВЭС ограничена условием:

$$0,785d_1^2 \cdot W_{уд.ВЭУ1} \cdot x_1 + 0,785d_2^2 \cdot W_{уд.ВЭУ2} \cdot x_2 + \dots +$$

$$+ 0,785d_i^2 \cdot W_{уд.ВЭУi} \cdot x_i \leq 0,01 \cdot W_{уд} \cdot S, \quad (9)$$

если от i -й ВЭУ ожидается выработка:

$$W_{вырi} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} x_i \cdot W_{уд.ВЭУi} = 0,785d_i^2 \cdot x_i \cdot W_{уд.ВЭУi}. \quad (10)$$

При известных $d_{вк}$, $\nu_{раб}$ ВЭУ мощность ВЭС ограничивается нагрузкой потребителя ($P_{потр}$). Для исключения излишков вырабатываемой электроэнергии мощность ВЭС можно выбирать по минимальной электрической нагрузке потребителя:

$$P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + \dots + P_i \cdot x_i \leq P_{потр.min}, \quad (11)$$

где P_i – мощность i -й ВЭУ, кВт.

Выявление взаимосвязи между показателями z_1 и z_2 позволит исследовать целевую функцию удельных затрат на выработку электроэнергии от ВЭС:

$$C_{выр} = \frac{a_1 \cdot K_{ВЭУ1}}{0,785 \cdot d_1 \cdot W_{уд.ВЭУ1}} x_1 + \frac{a_2 \cdot K_{ВЭУ2}}{0,785 \cdot d_2 \cdot W_{уд.ВЭУ2}} x_2 + \dots +$$

$$+ \frac{a_i \cdot K_{ВЭУi}}{0,785 \cdot d_i \cdot W_{уд.ВЭУi}} x_i \Rightarrow \min, \quad (12)$$

где a – амортизационные отчисления на реновацию и затраты на текущий ремонт ВЭУ;

$K_{ВЭУi}$ – удельные капиталовложения в i -ю ВЭУ, руб.

Решение поставленной задачи возможно при принятых ограничениях, согласно (5), (9) и (11). Приведенная математическая модель позволяет определить количество ВЭУ с заданными $d_{вк}$, $\nu_{раб}$ в составе ВЭС, обеспечивающее минимум затрат на выработку электроэнергии, в зависимости от характеристик потребителя (z_1) и местных ветроэнергетических ресурсов.

Для определения показателей ВЭУ и параметров ВЭС требуются исследования режимов поступления ветровой энергии и выработки качественной электроэнергии от ВЭС. При этом важно исследовать выходные параметры ВЭУ экспериментальным путем.

Для снижения затрат на передачу электроэнергии исследована взаимосвязь показателей z_2 и z_3 , которая позволила установить удельные затраты на передачу электроэнергии:

$$C_{\text{пер}} = \frac{b_1 \cdot K_{\text{пер}1}}{W_{\text{выр}1} - \Delta W} n_1 + \frac{b_2 \cdot K_{\text{пер}2}}{W_{\text{выр}2} - \Delta W} n_2 + \dots + \frac{b_i \cdot K_{\text{пер}i}}{W_{\text{выр}i} - \Delta W} n_i \Rightarrow \min, \quad (13)$$

где b – амортизационные отчисления на реновацию и затраты на текущий ремонт ЛЭП;

$K_{\text{пер}}$ – капиталовложения в ЛЭП, руб.;

ΔW – потери электроэнергии при передаче, кВт·ч;

n_i – количество i -х ВЭУ в составе ВП.

При этом решением поставленной задачи является определение оптимального количества ВЭУ в составе ВП.

Возможно неравенство количества ВЭУ в составе ВП ($n_{\text{ВЭУ}}$) и ВЭС ($x_{\text{ВЭУ}}$). Тогда при $x_{\text{ВЭУ}} > n_{\text{ВЭУ}}$ следует выбрать несколько ВП в составе ВЭС.

Капитальные затраты и потери электроэнергии при передаче зависят от мощности потребителя, напряжения и длины ЛЭП. При этом для снижения затрат на передачу электроэнергии предлагается в центре электрических нагрузок ВП установить преобразовательное устройство, к которому ВЭУ подключаются внутренней ЛЭП, а потребитель по внешней электрической сети. В качестве примера на рисунке 3 приведена схема ВП, состоящая из 9 ВЭУ малой мощности.

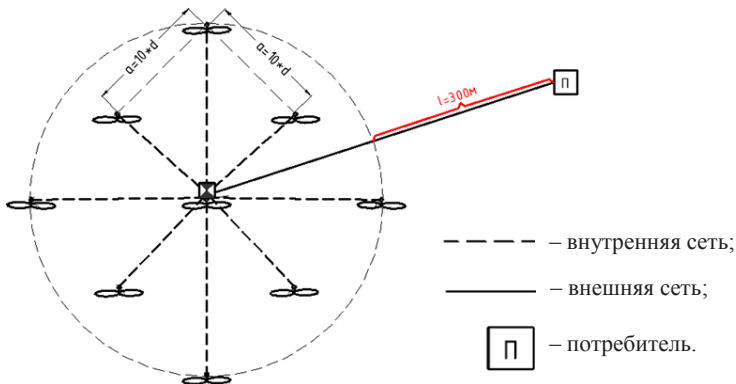


Рисунок 3 – Схема ВП из 9 ВЭУ

Проведенные исследования позволили установить зависимости суммарной длины ЛЭП как внутренней (L_1), так и внешней электрической сети (L_2):

$$\Sigma L_1 = 3,3 \cdot n^{1,536} \cdot d; \quad (14)$$

$$\Sigma L_2 = 2,861 \cdot n^{0,71} \cdot d + 300. \quad (15)$$

Длина ЛЭП зависит от схемы включения ВЭУ в составе ВП, которая в свою очередь зависит от выходных параметров ветрогенератора и схемы преобразования электроэнергии низкого качества.

В третьей главе «Экспериментальное исследование элементов существующих схем ВЭУ и режима поступления ветровой энергии» приводятся результаты наблюдения за режимом поступления скорости ветра, натурного исследования параметров генератора ВЭУ и исследования существующих схем преобразования электроэнергии низкого качества.

Для исследования режимов поступления ветровой энергии, а также существующих схем преобразования некачественной электроэнергии, вырабатываемой генератором при низких скоростях ветра, в период с октября 2008 г. по январь 2010 г. проводились исследования работы ВЭУ ВЭС-3.

Результаты эксперимента приводятся на рисунках 4, 5. Характеристика синхронного генератора линейная, напряжение и частота тока изменяются пропорционально скорости ветра. При минимальной нагрузке напряжение превышает номинальное значение, что важно учитывать для преобразовательных устройств.

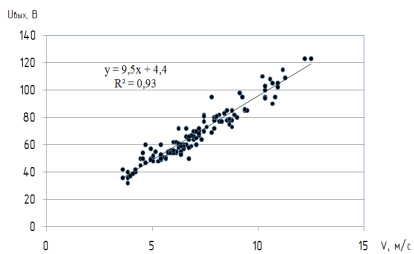


Рисунок 4 – Зависимость напряжения от скорости ветра

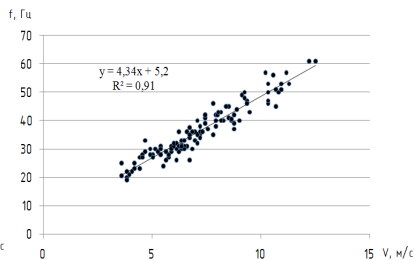


Рисунок 5 – Зависимость частоты тока от скорости ветра

Результаты экспериментальных исследований позволяют анализировать работы существующих схем ВЭУ и оценить качество электроэнергии, а также провести имитационное моделирование режима работы ВЭУ при известных схемах, обеспечивающих выработку качественной электроэнергии ВЭС.

Исследование режимов поступления ветровой энергии позволило получить график ветровой нагрузки. На рисунке 6 в качестве примера приведен график для III ветроэнергетического района Челябинской области.

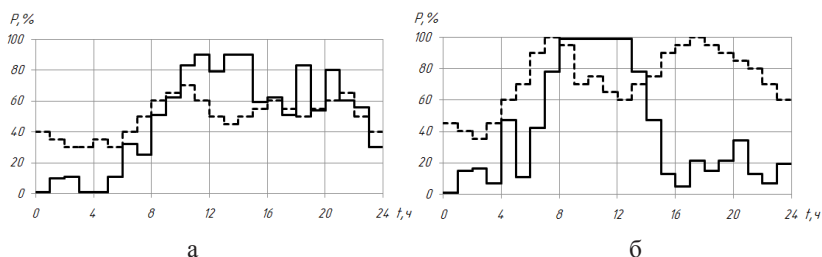


Рисунок 6 – График ветровых нагрузок в III ветроэнергетическом районе Челябинской области: а – лето; б – зима

Сравнительный анализ графиков ветровой (сплошная линия) и электрической нагрузки СХП (пунктирная линия) показывает, что в летний период максимум электрических нагрузок соответствует времени суток, при котором ожидается максимальная генерация от ВЭУ. В зимнее время совпадение роста электрических и ветровых нагрузок наблюдается в период времени с 7.00 до 9.00. Следовательно, ВЭУ способствует снижению максимальных нагрузок в электрической сети, при которых наблюдается максимум потерь электроэнергии при передаче.

Результаты натурного эксперимента ВЭУ позволили провести анализ работы схем, состоящих из синхронного генератора, стабилизатора, неуправляемого выпрямителя, сглаживающего фильтра, инвертора либо из синхронного генератора, трансформатора, управляемого выпрямителя, аккумуляторной батареи (АБ), для преобразования некачественной электроэнергии для электроснабжения потребителя.

В ходе исследования выявлены недостатки рассмотренных схем:

- при скорости ветра ниже расчетной снижается частота тока генератора, что приводит к росту потери мощности и дополнительному нагреву сердечника стабилизатора и трансформатора при его работе;

- невозможность полного сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения сглаживающими фильтрами, изменяющихся в широком диапазоне;
- питание инвертора выпрямленным пульсирующим напряжением приводит к получению на его выходе искаженной формы кривой напряжения и, соответственно, некачественной электроэнергии;
- заряд АБ выпрямленным пульсирующим напряжением и нерегулируемой величиной зарядного тока снижает срок ее службы.

Таким образом, не все существующие схемы преобразования электроэнергии, вырабатываемой генератором ВЭУ, при низких скоростях ветра могут удовлетворить условиям электроснабжения. Для обеспечения потребителей качественной электроэнергией с минимальными потерями при преобразовании необходимо совершенствовать схемы использования ВЭУ.

В четвертой главе «Разработка технических решений по эффективному использованию ВЭУ. Имитационное моделирование схемы ВП» разработаны методы согласования параллельной работы ветроэнергетической установки с системой централизованного электроснабжения, а также с источником автономного электроснабжения путем обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии. На базе экспериментальных исследований обоснована схема ВП.

Для согласования параллельной работы ВЭУ с системой централизованного электроснабжения, позволяющего максимально использовать энергию ветрового потока, и обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии разработана схема, представленная на рисунке 7, новизна которой защищена патентом РФ.

Для устранения пульсаций выходного напряжения инвертора применяется сглаживающее устройство, подключенное к общим шинам, входной и управляющей цепям инвертора и корректирующее управляющий сигнал инвертора в зависимости от выходного напряжения неуправляемого выпрямителя. Согласование величины напряжения источников энергии осуществляется стабилизатором напряжения, подключенным к общим шинам через реле обратного тока.

Для согласования параллельной работы ВЭУ с автономным источником питания (АИП) и обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии разработана схема, представленная на рисунке 8, на которую получен патент РФ.

В предлагаемой схеме блок *DD1* генерирует сигналы в зависимости от величины и пульсации выпрямленного напряжения, которые подаются на управляющий вход инвертора для получения синусоидального напряжения на выходе инвертора. Для обеспечения требуемой надежности электроснабжения к АБ подключен блок *DA1*, включающий в себя реле времени, промежуточное реле, контакты реле тока и напряжения. За инвертором для поддержания напряжения заданной величины подключен стабилизатор.

Согласование режимов работы источников питания осуществляется схемой управления, которая подключена к АБ. Для контроля параметров в цепях источников питания установлены реле тока, а за выпрямителем подключено реле напряжения. АБ заряжается от двухступенчатого зарядного устройства, подключенного к общим шинам через контактор, что обеспечивает качественную зарядку и продлевает срок ее службы.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что ветрогенераторы, как правило, работают в асинхронном режиме из-за изменчивости скорости ветра. Поэтому важно выбрать схему включения ветрогенераторов на параллельную работу. Для этого исследованы режимы работы ВЭУ с элементами преобразования качественной электроэнергии при различных схемах их включения (рисунок 9).

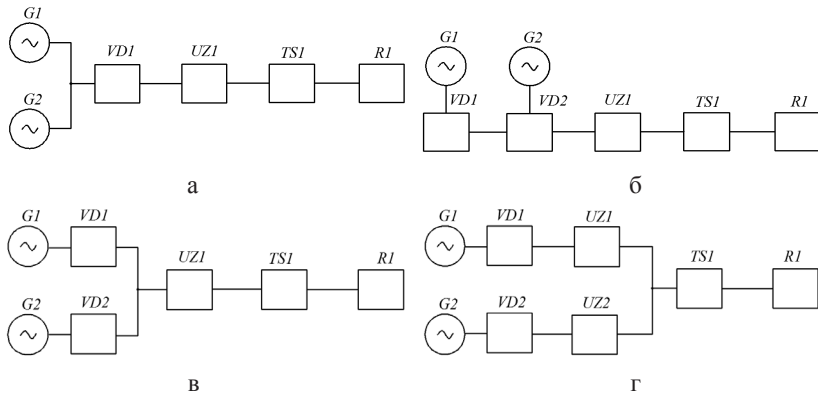


Рисунок 9 – Предлагаемые схемы включения ВЭУ малой мощности в составе ВП: а – параллельное включение генераторов; б – параллельное включение на входе выпрямителей; в – параллельное включение на выходе выпрямителей; г – параллельное включение за инвертором

На основе экспериментальных данных работы ветрогенератора производилось моделирование режимов работы ВЭУ в составе ВЭС в программе «Electronics Workbench». При работе генераторов на общее выпрямительное устройство напряжение на входе выпрямителя будет меняться от $U_{\text{ном}}$ до $0,15 U_{\text{ном}}$ генератора (рисунок 10 а), что недопустимо для рассматриваемой схемы ветроэнергетической установки.

Последовательное включение выходов выпрямителей также недопустимо из-за значительного снижения напряжения (рисунок 10 б).

Параллельное включение генераторов ВЭУ за выпрямителем на общий инвертор возможно только при синхронной работе генераторов, так как в асинхронном режиме на нагрузку будет работать только тот ветрогенератор, выходное напряжение которого выше (рисунок 10 в).

Проведенные исследования показывают, что параллельное подключение генераторов ВЭУ, работающих в асинхронном режиме, возможно только за инвертором, после синхронизации и соблюдения равенства выходного напряжения (рисунок 10 г).

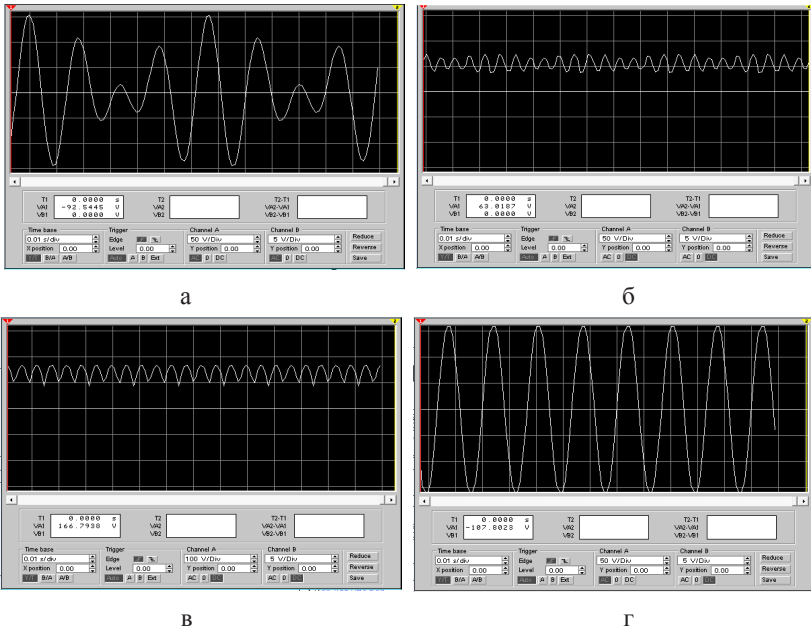


Рисунок 10 – Осциллограмма напряжения в точке параллельного включения: а – за генератором; б – на входе выпрямителей; в – на выходе выпрямителей; г – за инвертором

Результаты исследования показывают необходимость строительства радиальной распределительной электрической сети ВЭС. При этом требуется технико-экономическое обоснование показателей ВЭУ и параметров ВЭС.

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование параметров ВЭС» обоснованы показатели ВЭУ ($v_{\text{раб}}, d_{\text{вк}}, P_{\text{ген}}$) и параметры ВЭС ($S, x_{\text{ВЭУ}}$), обеспечивающие минимум затрат на электроснабжение потребителей, приведены рекомендации по выбору показателей ВЭУ, параметров ВП и ВЭС.

Исследование целевой функции стоимости вырабатываемой электроэнергии в условиях Челябинской области показывает, что себестоимость электроэнергии минимальна в I ветроэнергетическом районе при $v_{\text{раб}} = 12$ м/с; во II ветроэнергетическом районе при $v_{\text{раб}} = 8,5$ м/с; в III ветроэнергетическом районе при $v_{\text{раб}} = 7$ м/с. Следовательно, минимальная стоимость электроэнергии, вырабатываемая ВЭУ, наблюдается при рабочей скорости, когда ожидается максимальная выработка качественной электроэнергии. Проведенные исследования позволили установить себестоимость вырабатываемой электроэнергии при рекомендуемых скоростях ветра в зависимости от $d_{\text{вк}}$ (рисунок 11).

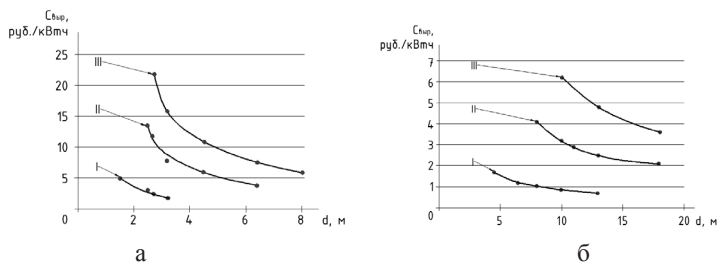


Рисунок 11 – Зависимость себестоимости вырабатываемой электроэнергии ВЭУ от $d_{\text{вк}}$: а – очень малой мощности; б – малой мощности

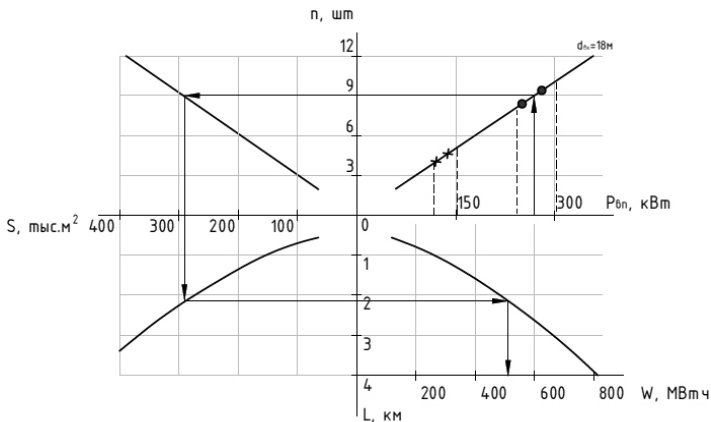
Анализ данных позволил определить $d_{\text{вк}}$ ВЭУ малой мощности в условиях Челябинской области, при котором наблюдается минимум удельных затрат на выработку электроэнергии. Установлено, что в первом ветроэнергетическом районе экономически целесообразно применение ВЭУ мощностью 50 кВт, во втором – ВЭУ мощностью 30 кВт, в третьем – ВЭУ мощностью 20 кВт.

На примере предложенной схемы ВП исследована стоимость передачи электроэнергии от ВЭУ до потребителя по электрической сети напряжением 0,4 кВ и 6–10 кВ (рисунок 12).

Приведенные зависимости указывают на наличие минимума затрат на передачу электроэнергии при определенном количестве ВЭУ заданной мощности в составе одного ВП. Так, в условиях Челябинской области в зависимости от ветроэнергетического района при напряжении сети 0,38 кВ рекомендуется установить 3–7 ВЭУ или 7–14 ВЭУ при напряжении 6–10 кВ.

По результатам исследований разработаны рекомендации для определения показателей ВЭУ, параметров ВП и ВЭС в зависимости от технических характеристик потребителя и ветроэнергетических ресурсов. Для выбора ВП с оптимальными параметрами в условиях Челябинской области разработаны номограммы.

На рисунке 13 в качестве примера приведена номограмма для выбора параметров ВП во II ветроэнергетическом районе Челябинской области.



Примечание:

1. $\times\times\times$ – рекомендуемое количество ВЭУ при напряжении питающей сети 0,4 кВ;
2. $\bullet\bullet\bullet$ – рекомендуемое количество ВЭУ при напряжении питающей сети 6–10 кВ;
3. При потребной мощности, превышающей $P_{вп}$, использовать несколько ветропарков

Рисунок 13 – Номограмма для выбора параметров ВП во II ветроэнергетическом районе Челябинской области

Разработанные номограммы позволяют определить оптимальное количество ВЭУ в составе одного ВП, занимаемую площадь территории, суммарную длину ЛЭП, количество вырабатываемой электроэнергии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Повысить эффективность электроснабжения СХП за счет снижения затрат на потребляемую электроэнергию позволяют ВЭУ малой мощности, объединенные в ВЭС. Использование ВЭУ малой мощности в районах с низкой скоростью ветра сдерживается недостаточной изученностью. Выявлено, что для выбора параметров ВЭС необходимо исследовать взаимосвязь показателей ВЭУ с ветроэнергетическими характеристиками местности и показателями системы электроснабжения. При этом для снижения затрат на передачу электроэнергии ВЭС может состоять из нескольких ВП.

2. Разработана математическая модель, позволяющая в зависимости от характеристики потребителя и местных ветроэнергетических ресурсов определить основные показатели ВЭУ (диаметр ВК, рабочую скорость ВЭУ, мощность генератора) и параметры ВЭС (количество ВЭУ, занимаемую площадь) для снижения затрат на выработку электроэнергии.

Для эффективного использования ВЭУ в составе ВЭС определены их оптимальные показатели в условиях Челябинской области: первый ветроэнергетический район: $v_{\text{раб}} = 12 \text{ м/с}$, $d_{\text{вк}} = 13 \text{ м}$, $P_{\text{ген}} = 50 \text{ кВт}$; второй ветроэнергетический район: $v_{\text{раб}} = 8,5 \text{ м/с}$, $d_{\text{вк}} = 18 \text{ м}$, $P_{\text{ген}} = 30 \text{ кВт}$; третий ветроэнергетический район: $v_{\text{раб}} = 7 \text{ м/с}$, $d_{\text{вк}} = 18 \text{ м}$, $P_{\text{ген}} = 20 \text{ кВт}$.

3. Установлена зависимость минимальной длины линий электропередач от диаметра ВК и количества ВЭУ, позволяющая оптимизировать параметры одного ВП в составе ВЭС для снижения затрат на передачу электроэнергии. При этом оптимальное количество ВЭУ в составе ВЭС ($x_{\text{ВЭУ}}$) и ВП ($n_{\text{ВЭУ}}$) может быть различным. В случае, когда $x_{\text{ВЭУ}} > n_{\text{ВЭУ}}$ следует выбрать несколько ВП в составе ВЭС.

4. Экспериментальные исследования работы ВЭУ позволили установить зависимости напряжения и частоты тока генератора от скорости ветра. В условиях минимальной нагрузки возможно повышение напряжения до 4% от номинального значения, что необходимо учитывать при разработке схем преобразования некачественной электроэнергии.

5. Для эффективного использования ВЭУ и обеспечения потребителей качественной электроэнергией разработаны технические и схемные решения, позволяющие максимально использовать энергию ветра в схеме параллельного включения ВЭУ в составе ВЭС и размещения их на занимаемой территории. Новизна технических решений защищена патентами РФ.

6. Определены технико-экономические показатели ВЭС, позволившие выбрать оптимальное количество ВЭУ малой мощности в составе одного ВП. В условиях Челябинской области в зависимости от ветроэнергетического района при передаче электроэнергии напряжением 0,38 кВ рекомендуется устанавливать 3–7 ВЭУ или 7–14 ВЭУ при напряжении 6–10 кВ.

7. Разработанные рекомендации позволяют выбрать основные параметры ВЭС и ВП на базе ВЭУ малой мощности в зависимости от электрической нагрузки потребителя, напряжения электрической сети и местных ветровых ресурсов для снижения затрат на потребляемую электроэнергию, а по номограмме выбрать оптимальные параметры одного ВП в условиях Челябинской области.

При среднестатистической цене электроэнергии 4,2 руб./кВт·ч для СХП использование ВЭУ малой мощности является эффективным за счет снижения стоимости электроэнергии от 2 до 24% в зависимости от ветроэнергетического района Челябинской области.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Шерьязов, С. К. Ветроэнергетическая установка со стабилизатором напряжения [Текст] / С. К. Шерьязов, А. А. Аверин, М. В. Шелубаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 6. – С. 18–19.

2. Шерьязов, С. К. Выбор ветроэнергетической установки [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 2. – С. 7–8.

3. Шерьязов, С. К. Использование ветроустановки в системе электроснабжения [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 4. – С. 210–212.

4. Шерьязов, С. К. Принципы разработки ветропарка в системе сельского электроснабжения [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 10. – С. 184–187.

5. Шерьязов, С. К. Разработка метода определения параметров ветропарка [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 10. – С. 182–187.

6. Шерьязов, С. К. Согласование условий использования возобновляемых источников в энергообеспечении потребителей [Текст]

/ С. К. Шерьязов, А. А. Аверин, М. В. Шелубаев // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 163–168.

Публикации в других изданиях

7. Шарипов, Э. Х. К методике выбора мощности ветроэнергетической установки [Текст] / Э. Х. Шарипов, М. В. Шелубаев // Сборник матер. Всерос. студ. олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки студ., аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : УГТУ ; УПИ, 2011. – С. 493–495.

8. Шелубаев М. В. Выбор количества трансформаторных подстанций для электрической станции // Вестник ЧГАА. – 2014. – Вып. 69. – С. 75–79.

9. Шерьязов, С. К. Возможности использования ВЭУ для электроснабжения потребителей в Челябинской области [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Материалы XLVIII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАУ, 2009. – 190 с.

10. Шерьязов, С. К. Использование ветроустановок для параллельной работы с централизованным источником питания [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Сборник матер. Всерос. студ. олимп., науч.-практ. конф. и выставки студ., аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : УГТУ ; УПИ, 2009. – С. 512–514.

11. Шерьязов, С. К. К методике выбора ВЭУ в системе электроснабжения [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Материалы LI междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2012. – С. 148–152.

12. Шерьязов, С. К. Особенности в использовании энергии ветра [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Энергетика настоящего и будущего : сб. матер. I Евроазиатской выставки и конф. – Екатеринбург : УГТУ ; УПИ, 2010. – С. 87–88.

13. Шерьязов, С. К. Особенности работы ветроэнергетических установок в составе ветропарка [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев, И. М. Сандыбаев // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы транспорта и энергетики и пути инновационного поиска решения». – Астана : ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, 2013. – С. 335–339.

14. Шерьязов, С. К. Особенности работы ветроэнергетической установки ВВС-3 по результатам экспериментальных исследований [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев, Н. А. Клементьев // Материалы XLIX междунар. науч.-техн. конф. «Достижения

науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2010. – Ч. II. – С. 363–367.

15. Шерьязов, С. К. Разработка схемы электроснабжения от ветропарка в условиях Южного Урала [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Материалы ЛII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 214–220.

16. Шерьязов, С. К. Система автономного электроснабжения с использованием ветроэнергетической установки [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : тр. 7-й междунар. науч.-техн. конф. – Ч. 4 : Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М. : ВИЭСХ, 2010. – С. 205–208.

17. Шерьязов, С. К. Техничко-экономические показатели ветропарка в условиях Челябинской области [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев // Материалы ЛIII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. III. – С. 331–337.

Патенты РФ на изобретение и полезную модель

18. Пат. на изобретение № 2382900 РФ, МПК⁷ F03D9/00. Система для автономного электроснабжения потребителей [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ЧГАУ. – БИ № 6, 2010 ; опубл. 27.02.10. – 9 с.

19. Пат. на полезную модель № 89184 РФ, МПК F03D9/00. Ветроэлектрическая установка [Текст] / С. К. Шерьязов, М. В. Шелубаев ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ЧГАУ ; заявл. 25.06.09 ; опубл. 27.11.09. – 5 с.

Подписано в печать 31.03.2015. Формат 60×84/16
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № КЗ-7.

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВПО ЧГАА
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83