

На правах рукописи



БОБРОВ Алексей Васильевич

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕВЕРНЫХ НАСЕЛЕННЫХ
ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ
ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

05.14.01 — Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2010

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тремясов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ченцов Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Бастрон Андрей Владимирович

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Защита состоится «22» декабря 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета, по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

Автореферат разослан «22» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Т. М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Большая часть обширной территории России с малой плотностью населения до сих пор не присоединена к централизованным энергетическим системам. В соответствии со статистическими данными, около 10 млн. населения, проживающих в северных территориях, на Дальнем Востоке и в некоторых других регионах, не присоединены к электрическим сетям энергосистем. Они получают электроэнергию от автономных систем электроснабжения (СЭС), в которых источниками электроэнергии являются дизельные генераторы (ДГ) небольшой мощности. Необходимое топливо завозится из отдаленных центров автотранспортом, водными путями и авиацией.

По принципу электроснабжения, север Красноярского края можно условно поделить на две части. Централизованное электроснабжение потребителей осуществляется от Таймырско-Норильской энергосистемы, расположенной в Юго-западной части Таймыра (Норильские ТЭЦ – Усть-Хантайская ГЭС – Курейская ГЭС). Оставшаяся часть территорий Таймыра и севера Эвенкии получает электроэнергию от дизельных электростанций (ДЭС). На территории Таймыра на сегодняшний день функционирует 24 автономные ДЭС общей мощностью 30 МВт. Эти ДЭС обеспечивают жизнедеятельность примерно 40 населенных пунктов на площади 880 тыс. кв. км с численностью населения около 17 тыс. чел. Ежегодный завоз дизельного топлива на территорию Таймыра составляет около 15,3 тыс. тонн. В этих условиях себестоимость 1 кВт·ч произведенной электроэнергии превышает 25 руб.

Применение ветроэнергетических установок (ВЭУ) в составе ветродизельных комплексов (ВДК) позволит снизить себестоимость потребляемой электроэнергии, приведет к существенной экономии топлива, что в свою очередь благоприятно скажется на экономической и экологической обстановке региона.

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ за № 1-р от 08.01.2009 г. «Об использовании возобновляемых источников энергии» и федеральным законом «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» за № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. актуальной является, на основе системного подхода, разработка моделей и методов для оценки технико-экономических характеристик ВДК и конкретных рекомендаций по их применению.

Объект исследования – автономные СЭС северных населенных пунктов с применением ВЭУ с учетом технических, климатических, экономических условий и характеристик ветроэнергетического потенциала (ВЭП) территории.

Предмет исследования – условия функционирования и энергоэффективность автономных СЭС в населенных пунктах на территории Таймыра с использованием ВДК.

Целью диссертационной работы является исследование автономных систем электроснабжения с применением ветродизельных комплексов и разработка рекомендаций по повышению их энергоэффективности на примере северных населенных пунктов Таймыра.

Задачи исследования:

1. Провести анализ структуры электроснабжения децентрализованных зон Таймыра и обосновать необходимость применения ВДК.

2. Исследовать ветроэнергетический потенциал населенных пунктов Таймыра в целях производства электроэнергии.

3. На основе теории Марковских процессов разработать математическую модель для оценки выработки электроэнергии ВЭУ с учетом надежности и изменения погодных условий.

4. Предложить варианты построения ВДК в существующих децентрализованных СЭС региона.

5. Разработать методику выбора оптимального состава агрегатов ВДК в процессе проектирования на основе факторного эксперимента и комплексного критерия эффективности технических решений.

6. Сформулировать предложения по коррекции топливно-энергетического баланса автономных СЭС населенных пунктов Таймыра путем использования ветроэнергетического потенциала (ВЭП) местности.

Основная идея диссертации: разработка методической основы проектных решений по составу агрегатов ВДК, позволяющей повысить энергоэффективность автономных СЭС северных поселков.

Методы исследования: теория Марковских процессов, теория исследования операций, метод многофакторного эксперимента, методы математической статистики и теории вероятности, методы системного анализа, оценки экономической эффективности.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Анализ ВЭП в населенных пунктах Таймыра, заключающийся в оценке среднегодовой удельной энергии ветра, удельной мощности и валового потенциала электроэнергии в год.

2. Математическая модель для оценки выработки электроэнергии ВЭУ с применением аппарата Марковских процессов, учитывающая надежность и изменение погодных условий в процессе эксплуатации.

3. Методика выбора оптимального состава агрегатов ВДК в условиях неопределенности исходной информации с использованием многофакторного эксперимента и комплексного критерия эффективности технических решений.

4. Основные направления реконструкции автономных СЭС Таймыра с применением ВДК, обеспечивающих повышение энергоэффективности электроснабжения потребителей.

Научная новизна:

1. Выявлены районы и населенные пункты Таймыра, перспективные по ВЭП для внедрения ВЭУ в энергобаланс автономных СЭС.

2. Построена математическая модель для определения объема выработки электроэнергии ВЭУ, отличающаяся учетом надежности оборудования и погодных условий.

3. Разработана методика выбора оптимального состава оборудования ВДК в условиях неопределенности исходной информации на основе метода многофакторного эксперимента и комплексного критерия эффективности технических решений.

Значение для теории. Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, создают теоретическую основу для совершенствования существующих СЭС северных населенных пунктов и проработки перспективных структур ВДК с целью повышения их экономичности, надежности, безопасности и снижения вредного воздействия на окружающую среду.

Значение для практики состоит в том, что разработанные алгоритм, методики, а также соответствующий программный комплекс позволяют на этапе проектирования производить исследование характеристик энергоэффективности ВДК при использовании ВЭУ в реальных автономных СЭС северных территорий.

Достоверность полученных результатов. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются приведенными теоретическими положениями, удовлетворительной сходимостью результатов, полученных другими авторами при решении аналогичных задач и опытом эксплуатации оборудования.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы используются в Красноярском филиале ОАО «Электропроект», учебном процессе кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» политехнического института Сибирского федерального университета в курсах «Основы надежности электроустановок», «Проектирование электростанций» и дипломном проектировании.

Личный вклад автора. Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором. Общая научная идея, направления исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире», г. Красноярск, 2010 г.; XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» г. Томск, 2009 г.; пятой Всероссийской конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», г. Благовещенск, 2008 г.; Всероссийской научно-технической

конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск, 2008, 2010 г.; I межвузовской научно-практической конференции «Автоматизированные информационные и электроэнергетические системы», г. Краснодар, 2010 г., а также на постоянно действующем научном семинаре кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» СФУ, г. Красноярск.

По направлению исследования был выполнен проект на тему «Применение ветроэнергетических установок для автономного электроснабжения северных потребителей Красноярского края» (конкурс молодежных научных проектов ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2009 г.).

Публикации. Основные результаты исследований по данной теме опубликованы в 11 научных работах, из которых: 2 статьи в изданиях по перечню ВАК, 8 статей по материалам международного научно-технического конгресса и конференций, 1 статья в сборнике научных трудов.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Основной текст содержит 121 страницу, включающую 34 рисунка, 34 таблицы, список использованных источников из 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы работы, излагается цель, задачи исследования, краткое содержание работы, указывается научная новизна и практическая ценность полученных результатов, отражены вопросы реализации и апробации полученных результатов.

Первый раздел посвящен анализу структуры и особенностям автономных СЭС, возможностей возобновляемой энергетики на территории Таймыра, обоснованию использования ветроэнергетики, обзору существующих методик определения выработки электроэнергии ВЭУ. Разработан алгоритм определения состава агрегатов ВДК (рис. 1.).

Определены основные потенциальные энергетические показатели использования ВЭУ в населенных пунктах, где установлены метеостанции (табл.1). Произведена классификация прилегающих населенных пунктов по ВЭП и объемам потребления электроэнергии. Проведен анализ характеристик современных ВЭУ, определены области применимости различных ВЭУ в населенных пунктах Таймыра.

В качестве исходных данных, для определения выработки ВЭУ применяются гистограммы распределения скоростей ветра и кривые изменения мощности ВЭУ. При использовании аналитической функции распределения скоростей ветра математическое ожидание средней мощности ВЭУ имеет вид:

$$P_{cp}^{BЭУ} = \int_0^{\infty} f(v)P(v)dv, \quad (1)$$

где $f(v)$ – дифференциальная функция распределения скоростей ветра; $P(v)$ – функция изменения мощности ВЭУ от скорости ветра.

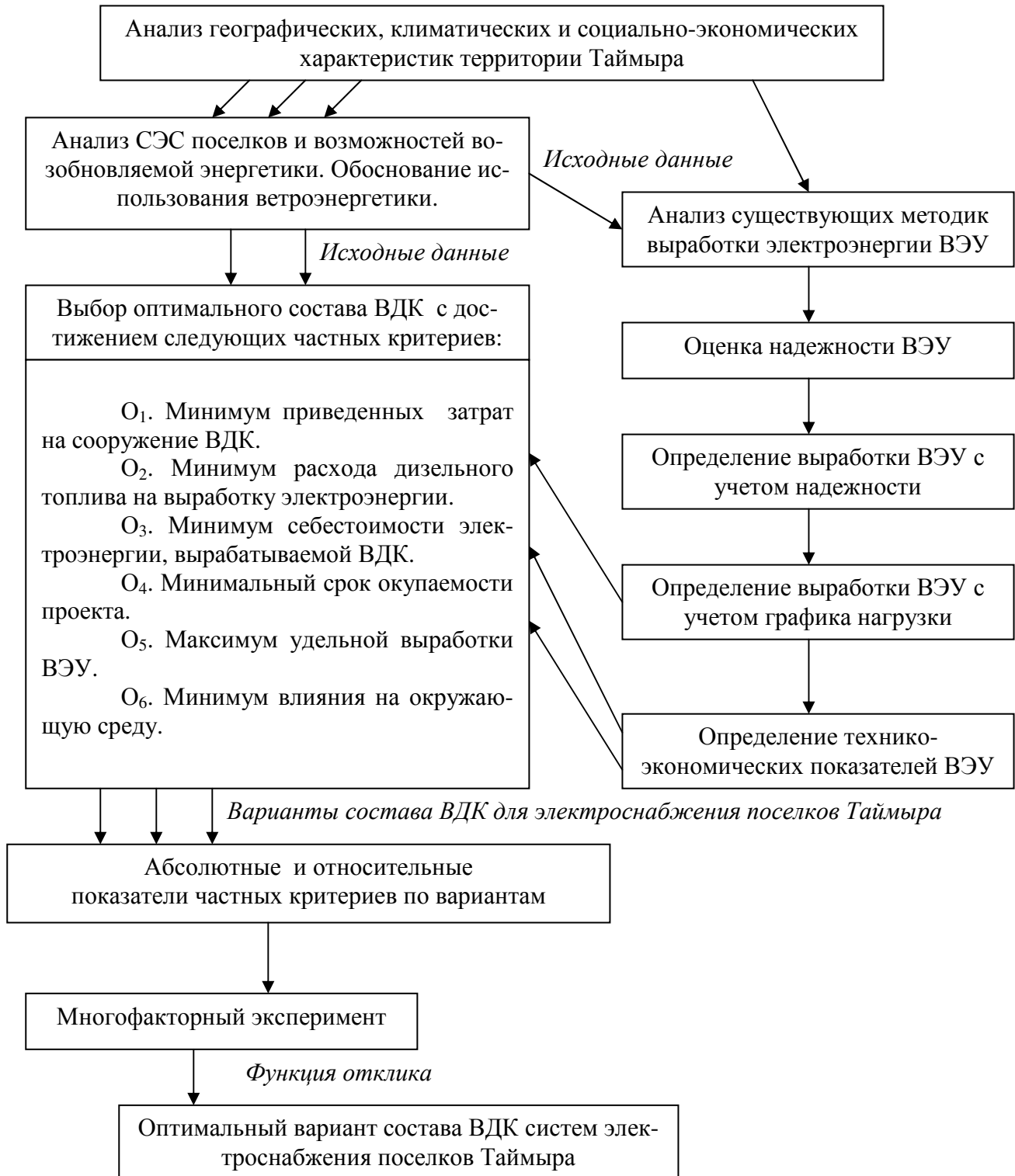


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма для определения состава ВДК

Таблица 1 – Ветроэнергетические характеристики местности
в местах установки метеостанций

Населенный пункт	Среднегодовая скорость ветра, м/с	$P_{уд},$ Вт/м ²	$E_{уд},$ Дж /м ² в год	Валовый потенциал, $W_B,$ МВт·ч/ год
Волочанка	3,9	124	1086,1	1363,8
Диксон	6,5	486	4257,9	5346,7
Хатанга	4,8	143	1252,9	3552,6
Остров Правды	5,1	323	2829,1	3973,4
Караул	5,6	108	3384	4581,2
Дудинка	5,4	96,8	3096	4329,8

Анализ существующих методик определения выработки электроэнергии показал, что они не учитывают недовыработку по причине отказов ВЭУ. В свою очередь, опыт эксплуатации ВЭУ в России показывает, что выработка электроэнергии на введенных в эксплуатацию ВЭУ, почти на треть меньше расчетной. Выражение (1) выбрано для дальнейшего исследования, т. к. позволяет учитывать особенности ветроэнергетического кадастра местности и технические характеристики ВЭУ.

Во втором разделе приведена аналитическая методика оценки надежности ВЭУ. Для определения параметров надежности ВЭУ, установку представляют в виде системы, состоящей из ряда последовательно соединенных в элементов. Отказ каждого из них может привести к утрате работоспособности всей ВЭУ.

Интенсивность отказов, коэффициент простоя и среднее время восстановления ВЭУ определяются по формулам:

$$\lambda_{ВЭУ} = \sum_{i=1}^n \lambda_i + \lambda_{пл}; \quad K_{п.с.} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i + (\lambda_{пл} \tau_{пл})_{\max}; \quad \tau_{ВЭУ} = \frac{K_{п.с.}}{\lambda_{ВЭУ}}, \quad (2)$$

где $\lambda_i, \lambda_{пл}$ – интенсивности отказов и плановых ремонтов элементов ВЭУ; $\tau_i, \tau_{пл}$ – продолжительности восстановления и плановых ремонтов элементов ВЭУ.

Для построения математической модели надежности ветропарка с учетом погодных условий используется аппарат Марковских процессов. Так, ветропарк, состоящий из двух ВЭУ в любой момент времени может находиться в одном из пяти состояний: E_0 – обе ВЭУ в работоспособном состоянии; E_1 – ВЭУ 1 в аварийном состоянии, ВЭУ 2 в работоспособном; E_2 – ВЭУ 2 в аварийном состоянии, ВЭУ 1 в работоспособном; E_3 – обе ВЭУ неработоспособны или остановлены; E_4 – имеются условия для восстановления обеих ВЭУ.

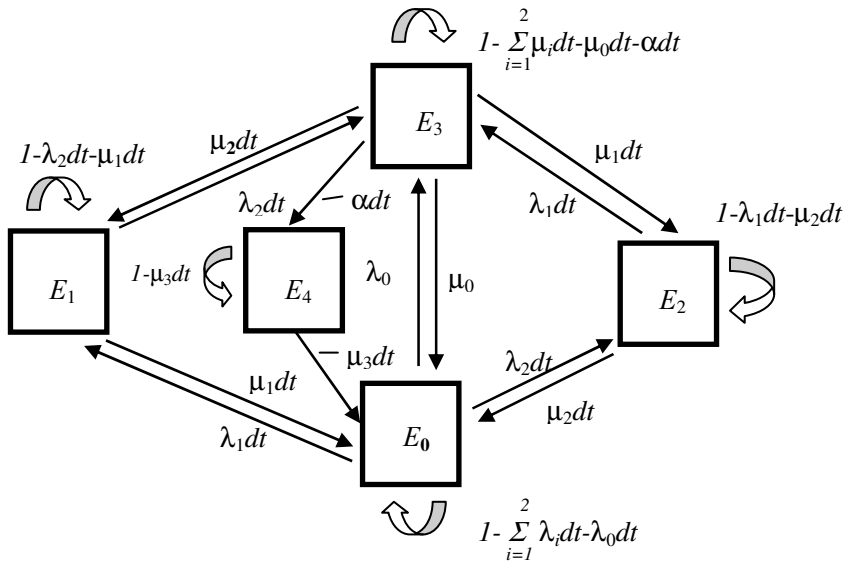


Рисунок 2 – Граф состояний для парка ВЭУ с учетом погодных условий

Все возможные переходы в такой системе описываются графом, изображенным на рис. 2. Здесь λ_i – интенсивность отказов ВЭУ ($i = 1,2$); μ_i – интенсивность восстановлений ВЭУ ($i = 1,2$); μ_3 – интенсивность одновременного восстановления ВЭУ 1 и 2; α – коэффициент, характеризующий наличие

ремонтного персонала и запасных узлов; μ_0, λ_0 – соответственно, интенсивность нормальной и неблагоприятной погоды (по скорости ветра). Математическая модель такой системы представляет собой следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\left(\sum_{i=1}^2 \lambda_i + \lambda_0\right)P_0(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\mu_i + P_4(t)\mu_3 \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + P_3(t)\mu_2 + P_0(t)\lambda_1 \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + P_3(t)\mu_1 + P_0(t)\lambda_2 \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= -\left(\sum_{i=1}^2 \mu_i + \mu_0 + \alpha\right)P_3(t) + \sum_{i=1}^2 P_i(t)\lambda_{(3-i)} + P_0(t)\lambda_0 \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= -\mu_3 P_4(t) + P_3(t)\alpha. \end{aligned}$$

Для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих модели надежности ветропарков, разработана компьютерная программа, реализованная в среде Mathcad 14. На рис. 3. показан характер изменения вероятностей состояний парка ВЭУ от времени.

Коэффициент готовности для ветропарка, состоящего из двух ВЭУ, будет определяться по формуле:

$$K_{\Gamma} = \sum_{i=0}^2 P_i. \quad (3)$$

Выражение для расчета выработки электроэнергии за 1 год на основе формулы математического ожидания средней мощности ВЭУ (1) и с учетом коэффициента готовности ВЭУ (3) можно представить в виде:

$$W^{ВЭУ} = 8760 \cdot K_{\Gamma} \cdot P_{cp}^{ВЭУ}$$

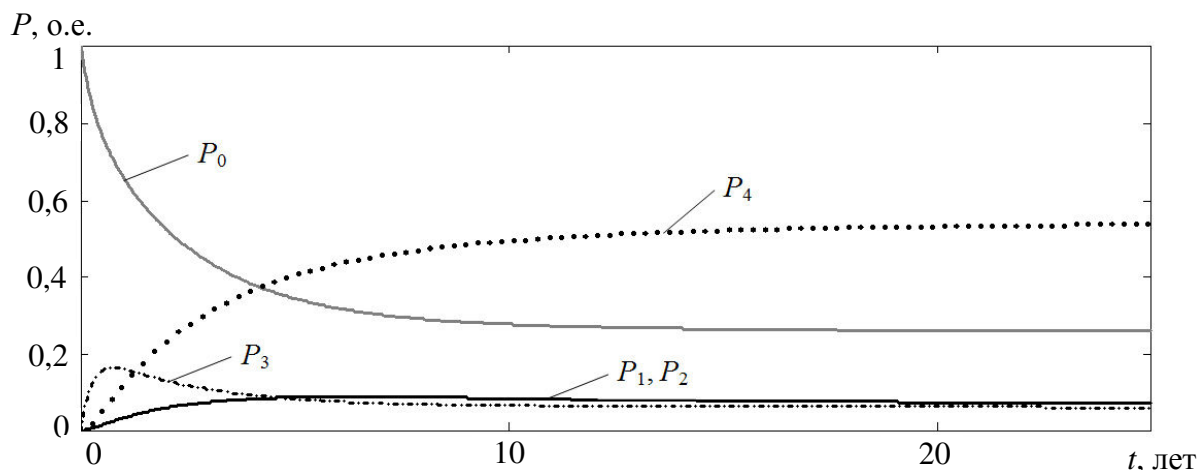


Рисунок 3 – Изменение вероятностей состояний отказа и работоспособности ВЭУ

Эффективность применения ВЭУ в автономных СЭС Таймыра главным образом характеризуется сроками окупаемости внедрения ВЭУ и дальнейшим уменьшением объемов завозимого дизельного топлива, что, в свою очередь, скажется на сокращении северных дотаций. Для определения эффективности внедрения ВЭУ в изолированные СЭС населенных пунктов Таймыра производился расчет основных технико-экономических показателей ВЭУ.

Величина приведенных затрат для ВЭУ:

$$Z_{\text{пр}}^{\text{ВЭУ}} = E \times k^{\text{ВЭУ}} \times N^{\text{ВЭУ}} + (H_{\text{ам}}^{\text{ВЭУ}} + H_{\text{проч}}^{\text{ВЭУ}}) \times k^{\text{ВЭУ}} \times N^{\text{ВЭУ}}, \quad (4)$$

где E – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $k^{\text{ВЭУ}}$ – удельные капиталовложения в ВЭУ; $N^{\text{ВЭУ}}$ – мощность ВЭУ; $H_{\text{ам}}^{\text{ВЭУ}}$, $H_{\text{проч}}^{\text{ВЭУ}}$ – доля отчислений от капиталовложений на амортизацию и прочих эксплуатационных расходов для ВЭУ.

Себестоимость электроэнергии, выработанной ВЭУ, за весь ожидаемый срок службы:

$$C^{\text{ВЭУ}} = \frac{Z_{\text{пр}}^{\text{ВЭУ}}}{W^{\text{ВЭУ}} \cdot T^{\text{ВЭУ}}}, \quad (5)$$

где $T^{\text{ВЭУ}}$ – ожидаемый срок службы ВЭУ, лет.

Объем завозимого дизельного топлива в год при отсутствии ВЭУ:

$$V_1 = G_{\text{уд}} \cdot W^{\text{сист}},$$

где $G_{\text{уд}}$ – средний удельный расход топлива ДЭС на выработку 1 кВт·ч электроэнергии; $W^{\text{сист}}$ – электроэнергия, потребленная автономной СЭС.

Требуемый объем топлива после подключения ВЭУ к СЭС определяется по выражению:

$$V_2 = G_{\text{уд}} (W^{\text{сист}} - W^{\text{ВЭУ}}). \quad (6)$$

Объем топлива, замещенный электроэнергией, выработанной ВЭУ:

$$\Delta V = V_1 - V_2.$$

Предполагая, что среднегодовое потребление электроэнергии изолированной СЭС не меняется, себестоимость электроэнергии, производимой ВДК, рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{W^{\text{ДЭС}} \times C^{\text{ДЭС}} + W^{\text{ВЭУ}} \times C^{\text{ВЭУ}}}{W^{\text{сист}}} . \quad (7)$$

Экономическая эффективность выработки электроэнергии ВЭУ включает в себя цену сэкономленного топлива, а также стоимость хранения и перевозки топлива:

$$\mathcal{E}^{\text{ВЭУ}} = \Delta V (\mathcal{C}^{\text{ДТ}} + \mathcal{Z}^{\text{ТДТ}} + \mathcal{Z}^{\text{ХДТ}}) ,$$

где $\mathcal{C}^{\text{ДТ}}$ – цена за 1 тонну дизельного топлива; $\mathcal{Z}^{\text{ТДТ}}$ – затраты на транспортировку одной тонны топлива; $\mathcal{Z}^{\text{ХДТ}}$ – затраты на хранение 1 тонны топлива.

Срок окупаемости ВЭУ:

$$T^{\text{ВЭУ}} = \frac{\mathcal{Z}_{\text{пр}}^{\text{ВЭУ}}}{\mathcal{E}^{\text{ВЭУ}}} . \quad (8)$$

При выборе варианта исполнения ВЭУ и оптимизации состава агрегатов ВДК для автономной СЭС очень часто приходится принимать решение с учетом достижения различных, иногда противоречивых критериальных свойств (КС). При этом степень достижения каждого КС характеризуется количественно величиной соответствующего частного критерия эффективности (табл. 2).

Таблица 2 – Критериальные свойства, определяющие эффективность ВЭУ

Комплексный критерий эффективности ВЭУ	Экономические:	Стоимость 1 кВт установленной мощности Количество электроэнергии, выработанной ВЭУ за 1 год
	Техническое совершенство:	Генератор Ветрогенератор Система управления, автоматики и защиты
	Надежность функционирования	Система диагностики, технического обслуживания и ремонта
	Технологичность монтажных операций	
	Экологические	

При решении такой многокритериальной задачи предлагается использовать эвристический метод, использующий обобщенный (комплексный) критерий эффективности E^* , с помощью которого нормируют значения достигнутые по частным критериям. Обычно в качестве комплексного критерия эффективности используется одна из средневзвешенных:

$$E_1^* = \sum_i v_i f_i(x); E_2^* = \sqrt{\sum_i [v_i f_i(x)]^2}; E_3^* = \prod_i [f_i(x)]^{v_i}; E_4^* = \left(\sum_i \frac{v_i}{f_i(x)} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где $f_i(x)$ – значение переменной x по шкале i -го критерия; v_i – весовой коэффициент (важность).

Многокритериальный подход означает оценку и выбор оптимального варианта технического решения одновременно по нескольким частным критериям. Комплексный критерий эффективности ВЭУ E^* определяется с использованием методов экспертных оценок на основе технико-экономических характеристик, представляемых производителями ВЭУ.

В третьем разделе рассмотрена методика определения состава и мощности ДЭС, в которой работает два и более ДГ. Так как при параллельной работе ДГ их мощности делятся пропорционально величинам нагрузки, расход дизельного топлива на протяжении одного часа на каждом режиме определяется по выражению:

$$G_1 = \alpha \cdot P_i^{b+1} + \beta \cdot P_i, \quad (10)$$

где P_i – нагрузка в i -й промежуток времени; α и β – постоянные для каждого сочетания работающих ДГ

$$\alpha = a \cdot \frac{\sum_{k=1}^n g_{\text{кном}} \cdot P_{\text{кном}}}{\left(\sum_{k=1}^n P_{\text{кном}} \right)^{b+1}}; \quad \beta = c \cdot \frac{\sum_{k=1}^n g_{\text{кном}} \cdot P_{\text{кном}}}{\sum_{k=1}^n P_{\text{кном}}},$$

где $P_{\text{кном}}$ и $g_{\text{кном}}$ – нагрузка и удельный расход топлива k -го ДГ в номинальном режиме; n – количество ДГ; a , b , c – коэффициенты аппроксимации КПД, полученные с помощью полинома четвертой степени.

Годовой расход топлива с заданным составом ДГ при заданном графике нагрузки определяется по выражению:

$$G^{\text{ДЭС}} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} G_1(P_j). \quad (11)$$

Средний удельный расход топлива ДЭС:

$$G_{\text{уд}} = \frac{G^{\text{ДЭС}}}{W_{\text{сист}}}. \quad (12)$$

Расчет расхода дизельного топлива произведен с использованием программной среды Mathcad 14.

Средний коэффициент использования установленной мощности ВЭУ может варьироваться от 20% до 50% в зависимости от конструкции ВЭУ и

возможностей ВЭП региона. При сооружении ветропарка с установленной мощностью меньше минимума нагрузки потребителей, вытеснение топливной составляющей из энергобаланса СЭС будет незначительным, т. е. внедрение ВЭУ, как показывает опыт эксплуатации, будет малоэффективным. При установке ветропарка мощностью более минимума нагрузки, часть электроэнергии не будет израсходована в СЭС.

Выработка электроэнергии ветропарком с учетом надежности и графика нагрузки автономной СЭС, при суммарной мощности ВЭУ больше минимума нагрузки, определяется по формулам:

$$W_1^{\text{ВЭУ}} = 8760 \cdot K_{\Gamma} \cdot \begin{cases} \int_0^n f(v) \cdot P(v) dv & \text{при } P(v) \leq P_1 \\ \int_n^m f(v) \cdot P(v) \cdot p_{\text{пол}} dv & \text{при } P(v) > P_1 \end{cases} ; \quad (13)$$

$$W_2^{\text{ВЭУ}} = 8760 \cdot K_{\Gamma} \cdot \begin{cases} \int_0^n f(v) \cdot P(v) dv & \text{при } P(v) \leq P_1^{\text{ВЭУ}} \\ \int_k^n f(v) \cdot P(v) \cdot p_{\text{пол}} dv & \text{при } P_2^{\text{ВЭУ}} \geq P(v) > P_1 \\ \int_k^m f(v) \cdot P(v) dv = 0 & \text{при } P(v) > P_2 \end{cases} , \quad (14)$$

где P_1 – величина минимума графика нагрузки поселка; P_2 – величина максимума графика нагрузки поселка; $p_{\text{пол}}$ – вероятность использования мощности ВЭУ графиком нагрузки при $P_2^{\text{ВЭУ}} \geq P(v) > P_1$; n – скорость ветра, при которой $P(v) > P_1$; m – максимальная рабочая скорость ВЭУ; k – скорость ветра, при которой $P(v) > P_2$.

Согласно приведенной методике, произведен расчет количества потребленной и не потребленной электроэнергии в зависимости от установленной мощности парка ВЭУ модели «Радуга 1» в п. Диксон. Результаты расчетов представлены на рис. 4.

Удельная выработка ВЭУ на 1 кВт установленной мощности, с учетом графика нагрузки системы, определяется по выражению:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W_1^{\text{ВЭУ}}}{N \cdot n} ; W_{\text{уд}} = \frac{W_2^{\text{ВЭУ}}}{N \cdot n} , \quad (15)$$

где N – мощность ВЭУ; n – количество ВЭУ в ветропарке.

$W_1^{\text{ВЭУ}}$ и $W_2^{\text{ВЭУ}}$ выбирается в зависимости от установленной мощности ветропарка по отношению к графику нагрузки (13), (14).

В процессе проектирования ВДК при выборе мощности и состава ВЭУ и ДЭС, приходится учитывать ряд независимых, а зачастую, неметрических КС (экологичность, удобство эксплуатации, степень автоматизации и т. д.).



Рисунок 4 – Изменение потребленной и не потребленной электроэнергии от количества ВЭУ в ветропарке п. Диксон (ВЭУ «Радуга»).

на окружающую среду, который определяется экспертным путем как комплексный КС на основе анализа необходимых строительных работ, а также пропорционально объему вытесненного дизельного топлива (9).

Для определения важности КС на основе экспертных оценок использовался метод ранговой корреляции. Переход от рангов к числам осуществлялся на основе гипотезы о линейной зависимости между рангом и относительной важностью КС.

При поиске оптимального состава оборудования ВДК предлагается использовать метод многофакторного эксперимента, позволяющий учесть ряд независимых друг от друга факторов.

Факторы, подлежащие исследованию, обусловлены целью эксперимента. При проектировании состава генерирующего оборудования в населенных пунктах с различными графиками нагрузки и ветроэнергетическими кадастрами, состав факторов будет изменяться. Для данного эксперимента используются управляемые факторы: установленная мощность ДГ и ВЭУ различных моделей.

План факторного эксперимента при выборе состава генерирующего оборудования ВДК определяется дробной 1/8 репликой (табл. 3). В относительных единицах значения факторов +1 отвечают верхним уровням, а значения -1 отвечают нижним уровням мощности агрегатов. Нуль соответствует среднему уровню. Оценки эффективности вариантов определяются по данным экспертов на основе комплексного критерия эффективности (9) V и по уравнению регрессии \hat{V} (16).

В математическом смысле целью многофакторных экспериментов является поиск экстремума функции отклика. Функция отклика представляется результатом ее разложения в ряд Тейлора, т. е. используется модель в виде полинома. Эмпирическое уравнение регрессии в линейной форме имеет вид:

$$\hat{V} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (16)$$

где коэффициенты b_0 и b_j определяются по формулам:

Рассматриваются следующие КС, характерные для ВДК: O_1 – минимум приведенных затрат на сооружение ВДК (4). O_2 – минимум расхода дизельного топлива на выработку электроэнергии (6). O_3 – минимум себестоимости электроэнергии, вырабатываемой системой ВЭУ-ДЭС (7). O_4 – минимальный срок окупаемости проекта (8). O_5 – максимум удельной выработки ВЭУ на 1 кВт установленной мощности (15). O_6 – минимум влияния

$$b_0 = 1/8 \sum_{k=1}^8 B_k ; \quad b_j = 1/8 \sum_{k=1}^8 x_{jk} B_k .$$

Коэффициенты уравнения регрессии соответствуют частным производным в точке, вокруг которой функция разлагается в ряд Тейлора. Проверка коэффициентов b_j на значимость производится по критерию Стьюдента, а проверка уравнения на адекватность осуществляется по критерию Фишера.

Таблица 3 – Дробная 1/8 реплика плана факторного эксперимента

Варианты	Факторы						B	\widehat{B}
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,43	0,41
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,89	0,70
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,89	0,92
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,72	0,69
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,46	0,48
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,86	0,84
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,89	0,86
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,46	0,49
Уровни факторов:								
верхний	4800	2000	1512	6000	6000	5950		
нижний	1600	0	504	0	0	0		

По условию линейности зависимости B и x максимум функции \widehat{B} будет иметь место при таком сочетании граничных значений параметров x , при котором все члены уравнения регрессии положительны, а незначимые равны нулю. Дальнейшее продвижение к оптимуму по методу Бокса-Уилсона производится с опыта варьирования, где средние уровни x равны полученным промежуточным оптимальным.

В результате решения уравнения регрессии формируется оптимальный состав ВДК, определяющий достижение максимальных значений КС O_1-O_6 в соответствии с их оценками важности.

В четвертом разделе выполнено исследование надежности ряда ВЭУ отечественного и зарубежного производства одного класса мощности. Суммарная интенсивность отказов для зарубежных ВЭУ составляет $\lambda_{ВЭУ} = 1,89$ 1/год, а для ВЭУ модели «Радуга-1» по данным завода-изготовителя – $\lambda_{ВЭУ} = 4,4$ 1/год. Среднее время восстановления для рассматриваемых ВЭУ $\tau_{ВЭУ} = 87$ ч.

Значения коэффициентов готовности для ветропарков, состоящих из ВЭУ разных моделей, приведены в табл. 4. При расчетах учитывались показатели надежности ВЭУ и особенности ветроэнергетического кадастра.

Результаты расчетов выработки электроэнергии ВЭУ и потребления ее для п. Диксон (зимний максимум нагрузки населенного пункта $P_{\max} = 5900$ кВт) представлены в табл. 5.

Таблица 4 – Значения коэффициента готовности для ветропарков в районах с разным ветроэнергетическим кадастром

Кол-во ВЭУ	пос. Диксон			пос. Хатанга			пос. Волочанка			Остров правды		
	Радуга -1	ТГ-750	Vestas V52	Радуга -1	ТГ-750	Vestas V52	Радуга -1	ТГ-750	Vestas V52	Радуга -1	ТГ-750	Vestas V52
2	0,47	0,51	0,59	0,36	0,41	0,49	0,31	0,31	0,38	0,38	0,39	0,47
3	0,53	0,55	0,63	0,45	0,46	0,56	0,42	0,39	0,49	0,47	0,45	0,54
4	0,6	0,6	0,69	0,54	0,53	0,63	0,51	0,47	0,58	0,55	0,52	0,63
5	0,66	0,66	0,74	0,61	0,6	0,69	0,59	0,54	0,65	0,62	0,58	0,68
6	0,71	0,70	0,79	0,68	0,65	0,75	0,65	0,61	0,71	0,67	0,65	0,74
7	0,75	0,74	0,82	0,72	0,70	0,79	0,7	0,66	0,76	0,72	0,69	0,78
8	0,79	0,78	0,85	0,76	0,74	0,82	0,74	0,71	0,79	0,76	0,73	0,82
9	0,81	0,81	0,87	0,797	0,77	0,85	0,78	0,74	0,83	0,79	0,76	0,84
10	0,84	0,83	0,89	0,81	0,8	0,87	0,80	0,77	0,85	0,82	0,79	0,86

Таблица 5 – Результаты расчетов выработки электроэнергии для ВЭУ «Радуга-1»

Кол-во ВЭУ	Выработка в год, кВт·ч	Удельная выработка, кВт·ч/кВт	Потребленная э/э в год, МВт·ч	Себестоимость электроэнергии от ВЭУ, руб./кВт·ч
2	2 043 531	1021,77	2043,53	2,60
3	3 450 089	1104,35	3313,04	2,41
4	5 182 743	1146,28	4585,13	2,32
5	7 141 489	1186,63	5933,16	2,24
6	9 248 065	1222,01	7332,08	2,18
7	11 443 774	1218,81	8531,66	2,18
8	13 669 918	1176,49	9411,94	2,26
9	15 926 498	1153,97	10385,71	2,30
10	18 196 122	1133,57	11335,68	2,35

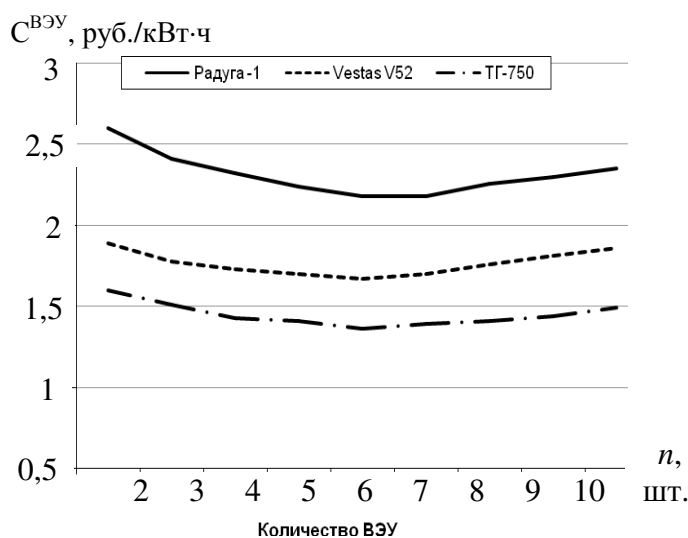


Рисунок 5 – Зависимость изменения себестоимости электроэнергии от количества ВЭУ в условиях п. Диксон

На рис. 5 показаны зависимости изменения себестоимости электроэнергии от количества ВЭУ, установленных в п. Диксон.

Для исследуемых северных населенных пунктов предложены варианты построения ВДК с использованием наиболее перспективных типов ДГ и ВЭУ. Оптимизация технических решений по составу и мощности ДГ и ВЭУ выполнялась методами фактор-

ного эксперимента и экспертных оценок.

Для многофакторного эксперимента использовалось 6 управляемых факторов (представленные факторы рекомендованы для СЭС п. Диксон): x_1 – установленная мощность дизельных генераторов 1600 кВт (VP2000CU); x_2 – установленная мощность дизельных генераторов 1000 кВт (VP1250P); x_3 – установленная мощность дизельных генераторов 504 кВт (VP630P); x_4 – установленная мощность ВЭУ 1000 кВт (Радуга-1); x_5 – установленная мощность ВЭУ 750 кВт (ТГ-750); x_6 – установленная мощность ВЭУ 850 кВт (Vestas V52).

Согласно предложенной методике план факторного эксперимента для шести факторов определяется дробной 1/8 репликой, (табл. 3), где приведены оценки эффективности B , определенные по (9) и \hat{B} – вычисленные по уравнению регрессии (16).

Для состава ВДК в п. Диксон получено уравнение регрессии:

$$\hat{B} = 0,7 + 0,0334x_1 + 0,04x_2 - 0,0313x_3 - 0,1818x_4 - 0,0374x_5 - 0,0332x_6$$

После проверки коэффициентов на значимость по критерию Фишера незначимые факторы принимаются равными нулю. Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\hat{B} = 0,7 + 0,04x_2 + 0,1818x_4 - 0,0374x_5$$

Абсолютные показатели КС по вариантам состава ВДК представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Абсолютные показатели КС по вариантам состава ВДК

Вариант	Критериальные свойства					
	O_1 , руб.	O_2 , л.	O_3 , руб / кВт · ч	O_4 , лет	O_5 , кВт · ч / кВт	O_6 , о.е.
1	1 404 878 706,00	20 935 308,27	23,19	5,08	1648,67	0,00
2	669 282 126,00	5 682 464,56	6,50	9,14	1878,04	0,78
3	604 983 348,00	6 905 932,86	7,79	6,72	1881,33	0,61
4	667 386 768,00	7 178 864,33	8,23	11,08	1222,01	0,56
5	509 362 698,00	32 087 348,15	35,53	1,87	1222,01	0,31
6	683 486 118,00	6 334 969,91	7,27	8,32	1881,33	0,62
7	659 087 340,00	7 014 717,02	7,97	7,29	1878,04	0,76
8	1 631 210 760,00	6 552 479,60	7,59	19,01	1648,67	0,23

Варьирование состава оборудования ВДК п. Диксон показывает, что функция $\hat{B} = 0,96$ достигает своего максимального значения при следующих значениях факторов x и составу оборудования: $x_1=0$ (мощность дизельных генераторов «VP2000CU» 3600 кВт); $x_2=1$ (мощность дизельных генераторов «VP1250P» 2000 кВт); $x_3=0$ (мощность дизельных генераторов «VP630P» 1008 кВт); $x_4=-1$ (мощности ВЭУ «Радуга-1» 0 кВт); $x_5=-1$ (мощность ВЭУ «ТГ-750» 0 кВт); $x_6=0$ (мощность ВЭУ «Vestas V52» 3400 кВт).

Установленная мощность ДЭС $N_{уст}=6608$ кВт. Это больше максимума нагрузки (5900 кВт) на 10,7%, что позволяет во время максимального потребления эксплуатировать ДЭС в режиме, близком к номинальному, не переходя в максимальный режим. Установленная мощность ВЭУ (3400 кВт) превышает минимум нагрузки (2600 кВт), но меньше максимума нагрузки.

Таблица 7 – Состав ВДК для СЭС поселков Таймыра

№ п/п	Поселок	Состав ДЭС	Состав ВЭУ
1	Диксон	3 ДГ VP2000CU 1 ДГ VP1000P 1 ДГ VP640P	4 ВЭУ ТГ-750
2	Хатанга	4 ДГ VP2000CU 3 ДГ VP1000P 2 ДГ VP640P	5 ВЭУ Vestas V52
3	Воронцово	1 ДГ 310000ED 1 ДГ 150000ED 1 ДГ 85000ED	2 ВЭУ WindWorld 150
4	Волочанка	1 ДГ 150000ED 1 ДГ 85000ED 1 ДГ 40000ED	1 ВЭУ VindSysse1 130

Результаты выбора состава оборудования ВДК для ряда населенных пунктов Таймыра приведены в табл. 7. Показатели экономической эффективности при использовании ВЭУ представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Показатели экономической эффективности внедрения ВЭУ

№	Поселок	Приведенные затраты, руб.	Объем вытесненного дизельного топлива, л/год	Себестоимость электроэнергии системы ВЭУ-ДЭС руб./кВт·ч	Срок окупаемости ВЭУ, лет
1	Диксон	497 652 054	1 509 934,89	5,07	3,28
2	Хатанга	460 101 397,5	693 807,40	7,49	12,16
3	Воронцово	41 660 325	112 268,16	4,88	6,68
4	Волочанка	23 869 125	14 381,89	8,53	25,07

Предполагается, что при текущем объеме завоза дизельного топлива в 15,3 тыс. тонн, после внедрения ВЭУ завозимый объем топлива будет составлять около 13 тыс. тонн, что даст значимый экономический и экологический эффект.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ структуры и состояния автономных СЭС на территории Таймыра позволил определить, что существующие СЭС с применением ДГ ха-

рактируются низкими показателями энергоэффективности и не удовлетворяют экологическим требованиям.

2. Исследование ВЭП в населенных пунктах Таймыра показало, что ветроэнергетика является наиболее перспективным направлением развития возобновляемой энергетики на данной территории.

3. Определены объемы возможной выработки электроэнергии ВЭУ в населенных пунктах Таймыра на основе разработанной математической модели, учитывающей надежность ВЭУ и погодные условия.

4. Исследована зависимость изменения себестоимости электроэнергии, производимой ВДК от количества ВЭУ в ветропарке. Предложена методика определения себестоимости электроэнергии от ВЭУ с учетом надежности ВЭУ и графика нагрузки системы.

5. Разработана методика выбора состава агрегатов ВДК на основе использования метода факторного эксперимента и комплексного критерия эффективности технических решений, которая позволяет в условиях неопределенности исходной информации провести оптимизацию состава и мощности ВЭУ и ДЭС для автономной СЭС с учетом технико-экономических характеристик оборудования и графика нагрузки потребителей.

6. На основе выполненных исследований сформулированы условия внедрения и показана экономическая эффективность первоочередного внедрения ВЭУ в 4-х населенных пунктах Таймыра. Согласно проведенным экономическим оценкам, прогнозируемый экономический эффект по отдельным критериям составляет:

- объем экономии дизельного топлива 2,3 тыс. тонн в год;
- объем экономии затрат на закупку, транспортировку и хранение топлива около 50 млн. руб. в год;
- диапазон ожидаемого срока окупаемости от 3,3 до 25 лет (в зависимости от места расположения).

Список публикаций по теме диссертации:

Статьи в изданиях по перечню ВАК:

1. **Бобров А.В.** Модель надежности парка ветроэлектрических установок с учетом погодных условий / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – №9-10/1 – 2008. – С. 36–42.

2. **Бобров А.В.** Энергоснабжение изолированных потребителей северных районов Красноярского края на базе возобновляемых источников энергии / А.В. Бобров, В.А. Тремясов, Д.А. Чернышев // Инновации. – №3 – 2009. – С. 74–77.

Публикации в прочих изданиях:

3. **Бобров А.В.** Оптимизация состава агрегатов ветродизельного комплекса в системе автономного электроснабжения / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного ис-

пользования: материалы всероссийской научно–технической конференции / Национальный исследовательский томский политехнический университет. – Изд–во Томского политехнического университета, 2010. – С. 88–90.

4. **Бобров А.В.** Анализ надежности ветроустановок для автономного электроснабжения / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы всероссийской научно–технической конференции, Томск: изд–во ТПУ, 2008. – С. 112–113.

5. **Бобров А.В.** Определение ветроэнергетического потенциала Таймыра / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы всероссийской научно–технической конференции, Томск: изд–во ТПУ, 2008. – с. 113–114.

6. **Бобров А.В.** Оценка надежности и эффективности ветроэнергетических установок в децентрализованных системах электроснабжения / А.В. Бобров, В.А. Тремясов, Д.А. Чернышев // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов пятой всероссийской конференции с международным участием. Благовещенск: издательство Амурского государственного университета, 2008. – С. 217–221.

7. **Бобров А.В.** Об использовании ветроэнергетических ресурсов для выработки электрической энергии на Таймыре / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов пятой всероссийской конференции с международным участием. Благовещенск: издательство Амурского государственного университета, 2008. – С. 346–348.

8. **Бобров А.В.** Применение ветроэнергетических установок в условиях Крайнего севера Красноярского края / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Оптимизация режимов работы электротехнических систем: межвуз. сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун–т, 2008. – С. 209–213.

9. **Бобров А.В.** Сравнение мощности, вырабатываемой ВЭС, с графиком нагрузки / А.В. Бобров// XV международная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / сборник трудов в 3–х томах. Т.1. – Томск: Изд–во Томского политехнического университета, 2009. – С. 18–20.

10. **Бобров А.В.** Перспективы использования ветроэнергетических установок в системах автономного электроснабжения северных территорий Красноярского края / А.В. Бобров, В.А. Тремясов / Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск, 2010. – С. 142-143.

11. **Бобров А.В.** Определение выработки ВЭУ с учетом графика нагрузки изолированной энергосистемы / А.В. Бобров, В.А. Тремясов // Материалы I межвузовской научно-практической конференции «Автоматизированные информационные и электроэнергетические системы» – Краснодар, 2010. – С. 9-13.

Подписано в печать 19.10.2010
Формат 60x84/16. Уч-изд. л. 1,1
Тираж 100 экз. Заказ №2710

Отпечатано:
Полиграфический центр БИК Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а