

# Региональные аспекты ветроэнергетики

---



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л. А. МЕЛЕНТЬЕВА

## **РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Под редакцией  
*В. А. Стенникова, В. Г. Курбацкого*

НОВОСИБИРСК  
2020

УДК 621.311.24  
ББК 31.62  
P32

DOI 10.15372/REGIONAL2020SVA

Региональные аспекты ветроэнергетики / Иванова И. Ю., Карамов Д. Н., Постников И. В. [и др.]; отв. редакторы В. А. Стенников, В. Г. Курбацкий; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. — Новосибирск : СО РАН, 2020. — 296 с.

ISBN 978-5-6044348-8-8

В монографии дан анализ современного состояния и перспектив развития мировой и отечественной ветроэнергетики. Повышенное внимание уделено северным и дальневосточным регионам России.

Приведены обзор программного обеспечения для решения задач размещения ветроэнергетических станций и методика статистического моделирования показателей ветроэнергетических станций на территориях России, стран СНГ и Балтии.

Представлены результаты многочисленных экспериментальных расчетов по прогнозу скорости ветра и мощности ветрогенерации для различных регионов мира. Исследована проблема моделирования режимов работы электрических сетей, содержащих ветроэнергетические установки. Выполнены оценки экономической и экологической эффективности в ветроэнергетике.

Рассмотрены комплексные системы электроснабжения на базе ветроэнергетических установок и тепловых электростанций, энергетических комплексов, содержащих ветроэнергетические установки и накопители энергии.

Для научных работников и инженеров, интересующихся вопросами развития ветроэнергетики и созданием современных систем электроснабжения с ветроэнергетическими установками, ориентированными на работу в отдаленных регионах с суровыми природно-климатическими условиями.

УДК 621.311.24  
ББК 31.62

Авторы:

*В. А. Стенников, В. Г. Курбацкий, Б. Г. Санеев, А. М. Клер, Д. Н. Сидоров, Н. В. Томин, И. Ю. Иванова, Т. Ф. Тугузова, О. В. Марченко, С. В. Соломин, А. В. Лебедев, С. В. Жарков, С. П. Попов, И. В. Постников, Д. Н. Карамов, К. А. Корнеев, А. В. Пеньковский, А. В. Жуков, Н. А. Халгаева, Д. В. Максакова, В. Г. Николаев, С. В. Ганага, В. В. Николаев, Ю. И. Кудряшов, Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев, В. А. Шакиров*

Утверждено к печати Ученым советом  
Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН

Рецензенты:

член-корреспондент РАН, засл. деятель науки РФ *Н. И. Вороний*  
докт. техн. наук, профессор *Н. А. Петров*

ISBN 978-5-6044348-8-8

© Сибирское отделение РАН, 2020

## **СПИСОК ОРГАНИЗАЦИЙ-УЧАСТНИКОВ И АВТОРОВ**

### **ИСЭМ СО РАН, Иркутск**

- чл.-корр. РАН Стенников В. А.
- д. т. н. Курбацкий В. Г.
- д. т. н. Сансеев Б. Г.
- д. т. н. Клер А. М.
- д. ф.-м. н. Сидоров Д. Н.
- к. т. н. Томин Н. В.
- к. э. н. Иванова И. Ю.
- к. т. н. Тугузова Т. Ф.
- к. т. н. Марченко О. В.
- к. т. н. Соломин С. В.
- к. т. н. Лебедев А. В.
- к. т. н. Жарков С. В.
- к. т. н. Попов С. П.
- к. т. н. Постников И. В.
- к. т. н. Карамов Д. Н.
- к. и. н. Корнеев К. А.
- к. т. н. Пеньковский А. В.
- Жуков А. В.
- Халгаева Н. А.
- Максакова Д. В.

### **НИЦ «АТМОГРАФ», Москва**

- д. т. н. Николаев В. Г.
- к. т. н. Ганага С. В.
- к. т. н. Николаев В. В.
- к. ф.-м. н. Кудряшов Ю. И.

### **АзНИПИИЭ, Баку**

- д. т. н. Рахманов Н. Р.
- к. т. н. Гулиев Г. Б.

### **БрГУ, Братск**

- к. т. н. Шакиров В. А.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	8
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	13
<b>СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ</b> .....	16
1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ .....	–
1.1. Современное состояние мировой ветроэнергетики .....	–
1.2. Состояние и перспективы развития ветроэнергетики в России .....	27
1.2.1. Современное состояние .....	–
1.2.2. Перспективы развития .....	32
2. СОСТОЯНИЕ И ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ СТРАН ВОСТОЧНОЙ АЗИИ .....	35
2.1. Современное состояние .....	–
2.2. Энергетическая политика в странах Восточной Азии .....	42
2.3. Прогнозы развития ветроэнергетики стран региона .....	47
2.4. Оценка влияния роста доли ветрогенерации на развитие международного энергетического сотрудничества в регионе .....	52
2.5. Особенности интеграции ветроэнергетических установок в случае создания межгосударственных энергообъединений стран Восточной Азии .....	54
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ</b> .....	57
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА .....	–
3.1. К развитию методики определения оптимального состава и типоразмера ветродизельных энергетических комплексов с учетом местных ветроклиматических условий и графиков нагрузки .....	–
3.1.1. Анализ программных комплексов и баз данных для моделирования показателей ветроэнергетических станций и характеристик ветроэнергетического потенциала .....	58
3.1.2. Программный комплекс «ВОСТОК» для моделирования характеристики ветропотенциала .....	64



3.1.3. Использование программного комплекса «ВОСТОК» для оценки энергетической и экономической эффективности ветродизельных энергетических комплексов .....	66
3.2. Методика статистического моделирования показателей ветроэнергетических установок .....	74
3.2.1. Основные положения методики .....	—
3.2.2. Численная реализация методики .....	76
3.2.3. Верификация методики .....	80
3.2.4. Новый класс функций для аппроксимации профилей скорости ветра .....	82
3.2.5. Оценка физической адекватности модели .....	86
3.2.6. Перспективы развития предложенной модели .....	90
4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК «WIND-MCA» .....	95
4.1. Состояние и тенденции развития программного обеспечения для проведения исследований в области ветроэнергетики .....	—
4.2. Использование программы «Wind-MCA» для анализа эффективности ветроэнергетических установок .....	99
4.3. Учет влияния рельефа местности на скорость ветра при выборе площадки ветроэлектростанций .....	108
5. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА И ВЫРАБОТКИ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК .....	113
5.1. Актуальность задачи прогнозирования выработки мощности ветроэнергетическими установками .....	—
5.2. Временные интервалы прогнозирования .....	116
5.3. Общая методология прогнозирования скорости ветра и выработки мощности ветроэнергетическими установками .....	118
5.3.1. Модели численного прогнозирования погоды .....	—
5.3.2. Модели на основе машинного обучения и математической статистики .....	120
5.4. Применение преобразования Гильберта—Хуанга и моделей машинного обучения для прогнозирования скорости ветра .....	129
6. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ .....	139
6.1. Моделирование режимов работы электрических сетей, содержащих ветроэнергетические установки .....	—
6.1.1. Оценка возможности подключения и совместной работы ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем .....	—
6.1.2. Вероятностное моделирование и анализ режимов энергосистемы со стохастически изменяющимися генерацией и нагрузкой .....	144
6.2. Анализ потокораспределения в энергосистеме со стохастической генерацией .....	146
6.2.1. Анализ потокораспределения в энергосистеме с ветроэлектростанциями .....	—
6.2.2. Моделирование потокораспределения в энергосистеме с различной долей интегрирования ветровой мощности .....	150

6.3. Управление режимами работы электрических сетей, содержащих ветроэнергетические установки .....	153
6.3.1. <i>Современные технологии управления ветроэнергетическими установками</i> .....	–
6.3.2. <i>Методы оценивание предела устойчивости напряжения в электрической системе с ветроэлектростанциями</i> .....	154
6.3.3. <i>Управление напряжением и реактивной мощностью в системе распределенной генерации с ветроэнергетическими установками</i> ...	161
<b>ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ</b> .....	169
7. ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК .....	–
7.1. Оценка экономической эффективности и конкурентоспособности ветроэнергетических установок .....	–
7.1.1. <i>Методы оценки экономической эффективности ветроэнергетических установок</i> .....	–
7.1.2. <i>Сопоставление конкурирующих энергоисточников по критерию стоимости энергии</i> .....	170
7.1.3. <i>Имитационное моделирование ветроэнергетических установок в автономных энергосистемах</i> .....	175
7.1.4. <i>Оптимизация структуры энергосистемы с ветроэнергетическими установками и аккумуляторами энергии</i> .....	180
7.1.5. <i>Методы стимулирования внедрения ветроэнергетических установок</i> .....	184
7.2. Оценка экономической эффективности применения ветроэнергетических установок в децентрализованном секторе восточных регионов России ....	188
7.2.1. <i>Основные положения методического подхода к оценке экономической эффективности применения возобновляемых источников энергии в децентрализованном секторе</i> .....	190
7.2.2. <i>Анализ внутригодового изменения показателей ветропотенциала на территории восточных регионов России</i> .....	194
7.2.3. <i>Оценки экономической эффективности применения ветроэнергетических установок в децентрализованном секторе восточных регионов России (по материалам разработанных региональных энергопрограмм)</i> .....	199
7.2.4. <i>Прогноз развития возобновляемой энергетики в зоне децентрализованного и неустойчивого электроснабжения на востоке России</i> .....	204
8. ПРОБЛЕМЫ ВВОДА И РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК .....	207
8.1. Многокритериальная оценка решений по вводу и размещению ветроэнергетических мощностей на региональном уровне .....	–
8.1.1. <i>Современное состояние проблемы принятия решений по вводу ветроэнергетических мощностей</i> .....	208
8.1.2. <i>Многокритериальное сравнение технологий производства электроэнергии при планировании развития электроэнергетики в регионе</i> .....	211
8.1.3. <i>Многокритериальная оценка районов и площадок для размещения ветроэлектростанций методом МАУТ</i> .....	218

8.2. Оценка экологической эффективности применения ветроэнергетических установок .....	224
8.2.1. Основные подходы к оценке экологической эффективности применения ветроэнергетических установок .....	–
8.2.2. Оценка экологических воздействий на этапе производства элементов ветроэнергетических установок .....	225
8.2.3. Оценка экологических воздействий на этапе строительства ветроэлектростанций .....	228
8.2.4. Оценка экологических воздействий на этапе эксплуатации ветроэлектростанций .....	229
8.2.5. Оценка экологических воздействий на этапе вывода ветроэлектростанций из эксплуатации и утилизации ее элементов .....	232
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ С ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ .....</b>	<b>233</b>
9. ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ С ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ .....	–
9.1. Проблемы функционирования ветроэнергетических станций в составе электроэнергетических систем .....	–
9.2. Интегрированные технологии совместной выработки энергии на базе ветроэнергетических установок и тепловых электростанций .....	235
9.3. Области применения, энергетические и экономические эффекты технологий совместной генерации энергии на ветроэнергетических установках и тепловых электростанциях .....	238
9.4. Использование ветроэлектростанций для покрытия пиковых нагрузок в электроэнергетических системах .....	243
9.5. Энергетический комплекс на базе ветроэлектростанции и воздухо-аккумулирующей газотурбинной установки .....	245
10. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ .....	249
10.1. Оптимизационные исследования автономных энергетических комплексов, использующих ветроэнергетические установки с накопителями энергии .....	–
10.2. Постановка задачи оптимизационных исследований состава оборудования автономных энергетических комплексов .....	250
10.2.1. Математическая постановка задачи оптимизации установленной мощности элементов автономной системы электроснабжения .....	251
10.3. Методика моделирования и оптимизации автономных энергетических комплексов, использующих ветроэнергетические установки и накопители энергии .....	253
10.4. Определение оптимального состава оборудования .....	258
10.5. Пример решения задачи оптимизации состава оборудования автономного энергетического комплекса, использующего ветроэнергетические установки и накопители энергии .....	260
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>269</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>271</b>