

С.Н. УДАЛОВ

# ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Допущено УМО вузов России по образованию  
в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению подготовки 140400 – «Электроэнергетика  
и электротехника», модуль «Электроэнергетика»

*3-е издание, переработанное и дополненное*



НОВОСИБИРСК  
2 0 1 4

УДК 620.9(075.8)

У 281

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. академик РАН *В.Е. Накоряков*,  
д-р техн. наук, проф. НГавт *Ю.В. Дёмин*,  
д-р физ.-мат. наук, проф. *С.М. Коробейников*,  
ген. директор ЗАО НПФ «Дата Крат» *М.В. Матюхин*,  
техн. директор ООО «СибЭкоДомСтрой» *В.В. Малых*

Работа подготовлена на кафедре  
систем электроснабжения предприятий

**Удалов С.Н.**

У 281      Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / С.Н. Удалов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 459 с. + цв. вкл. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2358-5

В настоящее время возобновляемая энергетика является наиболее быстро развивающимся направлением в энергетике. Рассмотренные в работе возобновляемые источники энергии и способы их преобразования в другие виды энергии, удобные для потребления, существенно расширят знания студентов в передовых направлениях электроэнергетики.

Учебник предназначен для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Не-традиционные и возобновляемые источники энергии» и «Электроснабжение».

УДК 620.9(075.8)

ISBN 978-5-7782-2358-5

© Удалов С.Н., 2007, 2009, 2013, 2014

© Новосибирский государственный

технический университет, 2007, 2009, 2013, 2014

• • • • • Ä

Предисловие .....	9
Введение.....	12
<b>Глава 1. Возобновляемые ресурсы земли .....</b>	<b>17</b>
1.1. Классификация и характеристика ВИЭ.....	17
1.2. Гидроэнергия.....	22
1.3. Энергия ветра .....	30
1.4. Геотермальная энергия .....	36
1.5. Солнечная энергия.....	43
1.5.1. Спектр солнечного излучения.....	43
1.5.2. Процессы в атмосфере при прохождении солнечного излучения.....	46
1.5.3. Способы преобразования солнечной энергии .....	48
1.6. Возобновляемые энергоресурсы России .....	49
<b>Глава 2. Ветроэнергетика .....</b>	<b>59</b>
2.1. Классификация ветроустановок .....	68
2.2. Параметры ветрового потока.....	73
2.2.1. Измерительные комплексы параметров ветропотока .....	75
2.2.2. Распределение скоростей ветра.....	77
2.2.3. Распределение энергии.....	86
2.2.4. Зависимость средней скорости ветра от высоты .....	88
2.3. Основы теории ветроэнергетических установок .....	90
2.3.1. Теория идеального ветроколеса в рамках линейной теории.....	90
2.3.2. Теория реального ветроколеса .....	104
2.3.2.1. Работа элементарных лопастей ветроколеса. Первое уравнение связи .....	104
2.3.2.2. Второе уравнение связи.....	109
2.3.2.3. Момент и мощность ветроколеса.....	114
2.3.2.4. Потери, возникающие при взаимодействии ветроколеса с воз- душным потоком.....	1116
2.4. Режимы работы ветроэнергетических установок .....	120
2.4.1. Режимы работы ветроколеса .....	120
2.4.2. Использование ветроколёсом энергии ветра .....	124



2.4.3. Режимы работы ветроколеса и генератора ВЭУ.....	127
2.4.3.1. Основные конфигурации компоновок ВЭУ .....	127
2.4.3.2. Режимы работы ветротурбины.....	132
2.4.4. Согласование режима работы ВЭУ с электрической нагрузкой .....	147
2.4.5. Контроль и управление ВЭУ.....	150
2.4.3. Современные стратегии управления ВЭУ .....	156
2.4.3.1. Стандартное управление в зоне 2 .....	159
2.4.3.1. Адаптивное управление в зоне 2.....	161
2.4.5.3. Нечеткое управление в зоне 2 .....	164
2.5. Конструкции ветроэнергетических установок.....	173
2.5.1. Требования к конструкциям ВЭУ .....	173
2.5.2. Генераторы для ВЭУ.....	174
2.5.2.1. Асинхронные генераторы.....	178
2.5.2.2. Синхронные генераторы.....	188
2.5.3. Конструктивная компоновка гондолы ВЭУ .....	191
2.5.3.1. Базовая компоновка гондолы ВЭУ .....	192
2.5.3.2. Упрощенная базовая конструкция ВЭУ .....	198
2.5.3.3. Простейшая конструкция на базе генератора с постоянными магнитами.....	199
2.5.3.4. ВЭУ с прямым приводом.....	204
2.5.3.5. Мультигенераторная компоновка гондолы ВЭУ на базе синхронного генератора с постоянными магнитами.....	207
2.5.3.6. Мультигенераторная компоновка гондолы ВЭУ на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором.....	210
2.6. Классификация ветроэнергетических систем .....	212
2.7. Оффшорная ветроэнергетика.....	220
2.8. Выбор мощности и количества ВЭУ.....	225
2.8.1. Ветроэнергетический расчет.....	225
2.8.2. Выбор мощности ВЭУ в составе автономной системы.....	228
2.8.3. Рекомендации при проектировании ВЭУ .....	230
2.9. Перспективы использования ВЭУ .....	235
<b>Глава 3. Энергия океана .....</b>	<b>239</b>
3.1. Энергия волн .....	239
3.1.1. Волновое движение .....	240
3.1.2. Энергия и мощность волны.....	244
3.1.3. Описание реальных волн.....	249
3.1.4. Устройства для преобразования энергии волн .....	252
3.2. Тепловая энергия океана .....	256



3.2.1. Преобразование тепловой энергии океана .....	256
3.2.2. ОТЕС, работающая по открытому циклу .....	259
3.2.3. Использование перепада температур океан – атмосфера .....	260
3.2.3. Прямое преобразование тепловой энергии океана в электроэнергию .....	262
<b>Глава 4. Нагревание жидкости солнечным излучением .....</b>	<b>265</b>
4.1. Теплоперенос .....	266
4.1.1. Метод тепловой цепи .....	266
4.1.2. Теплопроводность .....	269
4.1.3. Конвективный теплообмен .....	271
4.1.4. Радиационный теплоперенос .....	276
4.1.5. Свойства прозрачных веществ .....	285
4.1.6. Теплоперенос посредством теплоносителя .....	286
4.1.7. Смешанный теплоперенос и его тепловая цепь .....	288
4.2. Расчет теплового баланса плоского приемника .....	290
4.3. Открытые нагреватели .....	292
4.4. Закрытые нагреватели .....	296
4.4.1. Закрытые черные нагреватели .....	296
4.4.2. Металлические проточные нагреватели .....	301
4.4.3. Солнечные коллекторы с тепловыми трубами .....	304
4.4.4. Эффективность плоского пластинчатого приемника .....	305
4.5. Системы с изолированным накопителем .....	307
4.5.1. Принудительная циркуляция .....	307
4.5.2. Тепловая циркуляция .....	308
4.6. Селективные поверхности .....	311
4.6.1. Идеальные селективные поверхности .....	311
4.6.2. Структура металл – полупроводник .....	311
4.6.3. Вакуумированные приемники .....	314
4.7. Расчет теплотехнических характеристик солнечной водонагревательной установки .....	317
<b>Глава 5. Прикладные задачи применения солнечной энергии .....</b>	<b>325</b>
5.1. Подогреватели воздуха .....	325
5.2. Сушка продукции с использованием солнечного излучения .....	329
5.3. Солнечные отопительные системы .....	333
5.4. Охлаждение воздуха .....	355
5.5. Опреснение воды .....	357
5.6. Солнечные пруды .....	362
5.7. Концентраторы солнечной энергии .....	363



<b>Глава 6. Солнечные электростанции .....</b>	<b>369</b>
6.1. Электростанции на рассредоточенных коллекторах.....	369
6.2. Солнечные электростанции башенного типа .....	378
6.3. Фотоэлектрические преобразователи .....	393
6.3.1. Эквивалентная электрическая схема замещения.....	396
6.3.2. Напряжение холостого хода и ток короткого замыкания.....	398
6.3.3. Вольт-амперная и энергетическая характеристики солнечного модуля .....	398
6.3.4. Электрическое исполнение солнечных панелей .....	400
6.3.5. Определение пика мощности, генерируемого солнечной панелью.....	409
6.3.6. КПД солнечного элемента. Компоненты фотоэлектрической системы .....	410
6.4. Солнечные электростанции на базе двигателя Стирлинга.....	416
6.5. Электростанция «солнечная башня» .....	424
<b>Глава 7. Аккумуляирование энергии.....</b>	<b>431</b>
7.1. Электрохимическая батарея .....	432
7.2. Эквивалентная схема замещения.....	433
7.3. Эксплуатационные характеристики батареи .....	435
7.4. Конструкция батареи .....	440
7.5. Зарядка батареи .....	441
7.6. Наноаккумулятор на основе водородного топлива .....	444
7.7. Маховое колесо.....	446
7.7.1. Основные соотношения .....	446
7.7.2. Компоненты системы махового колеса.....	448
7.8. Сжатый воздух.....	449
7.9. Катушка индуктивности со свойствами сверхпроводимости .....	450
Заключение .....	453
Библиографический список .....	454