

# Э.П.ВОЛКОВ

---

## ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 5

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ  
И МОДЕРНИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИИ

# Э.П.ВОЛКОВ

---

# ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

В пяти томах

Москва  
Издательский дом МЭИ  
2015

# Э.П.ВОЛКОВ

---

# ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 5

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ  
И МОДЕРНИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИИ

Москва  
Издательский дом МЭИ  
2015

УДК 620.9  
ББК 31:65  
В 676

**Волков Э.П.**

В 676 Избранные труды: в 5 т. / Э.П. Волков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014 — 2015.

ISBN 978-5-383-00877-5

Том 5. Проблемы развития и модернизации электроэнергетики России. — 2015. — 616 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00943-7

Изложены научные основы для решения задач анализа, управления режимами и развития сложных энергосистем и их объединений. Даны методические подходы к обоснованию путей развития электроэнергетики страны и составлению Программы ее модернизации. Проведен анализ мирового опыта развития технологий производства, передачи и распределения электроэнергии и современного состояния электроэнергетики России. Приведены основные аспекты модернизации электроэнергетики России на период до 2030 г. и основные технологии, используемые при этом. Показаны механизмы реализации и эффективность Программы модернизации электроэнергетики.

Книга предназначена для сотрудников научно-исследовательских институтов, аспирантов и инженерно-технических работников, интересующихся проблемами развития и модернизации электроэнергетики России, а также для студентов технических вузов.

Табл. 177. Ил. 132. Библиогр. 97 назв.

554363

УДК 620.9  
ББК 31:65

ISBN 978-5-383-00943-7 (т.5)  
ISBN 978-5-383-00877-5

© Волков Э.П., 2015

© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2015



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9
Предисловие автора.....	10
<b>Глава первая. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СТРАНЫ И СОСТАВЛЕНИЮ ПРОГРАММЫ ЕЕ МОДЕРНИЗАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2030—2035 ГГ. ....</b>	<b>15</b>
1.1. Общие положения по разработке программ развития электроэнергетики страны .....	15
1.2. Основные требования к разработке Программы модернизации электроэнергетики .....	22
1.3. Методические принципы обоснования развития электроэнергетики .....	24
1.3.1. Прогнозирование спроса на электрическую и тепловую энергию .....	24
1.3.2. Прогноз развития ресурсной базы электроэнергетики.....	26
1.3.3. Прогноз развития генерирующих мощностей .....	26
1.3.4. Определение оптимальных вариантов развития генерирующих мощностей.....	27
1.3.5. Определение оптимальных вариантов развития электрических сетей и внешних связей ЕЭС России .....	30
1.3.6. Разработка перспективных балансов мощности и электроэнергии....	32
1.3.7. Определение инвестиционных потребностей, прогноз стоимости электроэнергии на оптовом и розничных рынках .....	33
1.3.8. Оценка экологического воздействия электроэнергетических объектов на окружающую среду .....	34
1.4. Моделирующие комплексы для решения задач анализа, управления режимами и развития сложных энергосистем и их объединений.....	35
<b>Глава вторая МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА, УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ И РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ .....</b>	<b>44</b>
2.1. Общие положения .....	44
2.2. Математические модели для анализа переходных и установившихся режимов энергосистем .....	46
2.3. Методы исследования устойчивости энергосистем.....	64
2.3.1. Методы расчета установившихся режимов.....	65
2.3.2. Методы расчета статической устойчивости.....	66
2.3.3. Методы расчета переходных процессов .....	72
2.4. Методология управления сложными энергосистемами и их объединениями .....	81
2.4.1. Методы оптимального управления режимами энергосистем .....	81
2.4.2. Методология модального анализа и модального управления режимами энергосистем.....	83
2.4.3. Методы оценивания состояния энергосистем.....	86
2.5. Методы анализа и критерии обеспечения надежности энергосистем .....	88

<b>Глава третья. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА, ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....</b>	95
3.1. Основные тенденции развития электроэнергетики в мире .....	95
3.2. Анализ мирового опыта развития передовых технологий в теплоэнергетике .....	112
3.2.1. Анализ развития технологий производства электроэнергии ТЭС на твердом топливе .....	112
3.2.2. Анализ мирового развития технологий производства электроэнергии на ТЭС, использующих газообразное топливо .....	129
3.2.3. Анализ мирового опыта развития одновременного производства электрической и тепловой энергии (ТЭЦ) .....	133
3.3. Анализ мирового опыта развития передовых технологий в гидроэнергетике .....	141
3.4. Анализ мирового опыта развития передовых технологий в ядерной энергетике .....	152
3.4.1. Общие положения по выбору технологий .....	152
3.4.2. Основные концепции реакторов III поколения .....	157
3.4.3. Тяжеловодные реакторы .....	162
3.4.4. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы .....	164
3.4.5. Реакторы на быстрых нейтронах .....	165
3.4.6. Реакторы IV поколения .....	169
3.4.7. Газоохлаждаемые реакторы на быстрых нейтронах и реакторы с использованием различных теплоносителей .....	171
3.5. Анализ мирового опыта развития передовых технологий в области электроэнергетики на основе ВИЭ .....	176
3.5.1. Гидроэнергия .....	176
3.5.2. Роль биомассы в долговременной энергетической стратегии .....	179
3.5.3. Роль биомассы в электроэнергетике и на транспорте .....	184
3.5.4. Ветровая электроэнергетика .....	186
3.5.5. Солнечное электричество .....	189
3.5.6. Геотермальная энергетика .....	193
3.5.7. Энергия океана .....	195
3.6. Анализ мирового опыта развития передовых технологий в области передачи и распределения электроэнергии .....	199
3.6.1. Воздушные линии электропередачи постоянного тока .....	199
3.6.2. Воздушные линии электропередачи переменного тока .....	213
3.6.3. Кабельные линии электропередачи постоянного тока .....	217
3.6.4. Кабельные линии электропередачи переменного тока .....	222
3.7. Анализ мирового и отечественного опыта и тенденций использования технологии FACTS в энергосистемах .....	229
3.7.1. Устройства компенсации реактивной мощности .....	229
3.7.2. Устройства продольного управления режимом ЛЭП .....	237
3.7.3. Устройства асинхронной связи .....	240
3.7.4. Области и перспективы применения наиболее современных устройств FACTS .....	243
<b>Глава четвертая. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ .....</b>	260
4.1. Общая информация о развитии электроэнергетики России .....	260
4.2. Современное состояние теплоэнергетики России .....	265
4.2.1. Общая характеристика .....	265

4.2.2. Анализ текущего состояния ТЭЦ, тепловых сетей и районных котельных .....	276
4.2.3. Анализ состояния турбинного оборудования ТЭС .....	282
4.2.4. Анализ планов развития энергокомпаний на перспективу до 2030 г. ....	287
4.2.5. Обобщенные данные о демонтаже низкоэкономичного оборудования .....	294
4.3. Анализ текущего состояния ГЭС .....	299
4.4. Анализ текущего состояния АЭС .....	303
4.4.1. Действующие АЭС России .....	303
4.4.2. Характеристики АЭС России .....	304
4.4.3. Анализ работы АЭС .....	308
4.5. Анализ состояния оборудования передающих и распределительных сетей .....	312
4.5.1. Анализ состояния оборудования сетей ЕНЭС .....	312
4.5.2. Анализ состояния оборудования распределительных сетей.....	315
4.5.3. Оценка технического состояния стареющего электрического оборудования электрических сетей 110—750 кВ .....	317
4.6. Анализ современного состояния выработки электроэнергии на основе ВИЭ .....	328
4.6.1. Геотермальные электростанции .....	328
4.6.2. Ветровые электростанции .....	330
4.6.3. Малая гидроэнергетика.....	331
4.6.4. Солнечные электростанции .....	335
4.6.5. Использование энергии биомассы для получения электроэнергии ..	338
4.6.6. Приливные электростанции .....	339
<b>Глава пятая. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ НА ПЕРИОД ДО 2030 Г.</b> .....	<b>341</b>
5.1. Основные цели, исходные условия и целевые показатели Программы модернизации электроэнергетики России на период до 2030 г. ....	341
5.1.1. Основные цели и исходные условия.....	341
5.1.2. Целевые показатели реализации Программы модернизации электроэнергетики России .....	345
5.2. Основные технологии и технические решения при реализации Программы модернизации электроэнергетики .....	346
5.2.1. Технологии и технические решения в области производства электроэнергии .....	346
5.2.2. Новые технологии систем передачи и распределения электроэнергии .....	385
5.2.3. Технологии и технические решения в области экологии.....	420
5.3. Основные показатели Программы модернизации электроэнергетики России.....	428
5.3.1. Общие показатели .....	428
5.3.2. Подпрограммы модернизации электроэнергетики России на период до 2030 г. ....	431
5.4. Этапы реализации Программы модернизации электроэнергетики России на период до 2030 г. ....	460
5.4.1. Этап I (до 2020 г.).....	460
5.4.2. Этап II (до 2030 г.) .....	462

<b>Глава шестая. МЕХАНИЗМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ .....</b>	464
6.1. Рекомендуемые механизмы реализации Программы модернизации электроэнергетики .....	464
6.1.1. Общие положения .....	464
6.1.2. Механизмы реализации Программы в электросетевом комплексе и их влияние на тарифы сетевых компаний .....	467
6.1.3. Механизмы реализации Программы модернизации в секторе генерации и их влияние на объемы оплаты мощности на оптовом рынке .....	472
6.1.4. Влияние реализации Программы модернизации в секторе генерации на цены электроэнергии для конечных потребителей .....	484
6.1.5. Оценка источников финансирования Программы модернизации электроэнергетики .....	487
6.1.6. Механизмы взаимодействия со смежными отраслями при реализации Программы модернизации .....	492
6.2. Методологические положения определения эффективности Программы модернизации электроэнергетики .....	495
6.3. Оценка эффективности Программы модернизации электроэнергетики .....	510
6.3.1. Частный эффект в отрасли «электроэнергетика» .....	510
6.3.2. Частный эффект в топливных отраслях .....	526
6.3.3. Частный эффект у всех категорий потребителей .....	530
6.3.4. Оценка вклада всех отраслей экономики и потребителей электроэнергетики в интегральную эффективность Программы модернизации электроэнергетики .....	532
6.3.5. Снижение ущерба у потребителей от повышения балансовой надежности при реализации Программы модернизации электроэнергетики .....	534
6.4. Формирование альтернативных вариантов развития генерирующих мощностей ЕЭС России в 2010—2030 гг. и сравнение их эффективности .....	535
6.4.1. Исходные условия развития генерирующих мощностей ЕЭС России в 2021—2030 гг. ....	536
6.4.2. Формирование альтернативных вариантов развития генерирующих мощностей ЕЭС России в 2021—2030 гг. ....	546
6.4.3. Анализ и сравнение эффективности трех альтернативных вариантов развития генерирующих мощностей ЕЭС России в 2021—2030 гг. ....	554
6.5. Оценка эффективности реализации Программы модернизации электроэнергетики на перспективу до 2030 г. ....	576
6.5.1. Экономические выгоды от применения механизма реализации Программы до 2030 г. ....	576
6.5.2. Оценка ценовой ситуации для разных структурных вариантов реализации Программы до 2030 г. ....	586
<b>Глава седьмая. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ НА ПЕРИОД ДО 2030 Г. ....</b>	591
7.1. Основные положения развития генерирующих мощностей .....	591
7.2. Основные положения развития электрических сетей .....	596
7.3. Инвестиционные вложения и прогноз цен на электроэнергию .....	600
7.4. Совершенствование структуры управления электроэнергетикой России ....	603
<b>Список литературы .....</b>	611

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Уважаемые читатели!

Настоящая книга, написанная крупным ученым-энергетиком, академиком Эдуардом Петровичем Волковым, посвящена актуальным проблемам развития и модернизации электроэнергетики России. В ней дан всесторонний научно-технический и экономический анализ современного состояния электроэнергетики страны. Очерчивая круг проблем, автор предлагает и их решение. Как кардинально повысить эффективность отрасли, добиться сокращения сроков модернизации, минимизировать финансовые затраты? Отвечая на эти вопросы, автор использует свой огромный практический и научный опыт.

Профессионалам, безусловно, будет интересно познакомиться с авторитетной оценкой программы развития электроэнергетики и предложениями по ее дальнейшей реализации.

Четкая структура, понятное изложение, богатый фактологический материал делают эту книгу нужной как ученым, инженерам, студентам энергетических специальностей и сотрудникам энергетических компаний, так и широкому кругу читателей, интересующихся текущим состоянием и перспективами развития отрасли.

Министр энергетики  
Российской Федерации

А.В. Новак

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Основу производственного потенциала российской электроэнергетики в настоящее время составляют более 700 электростанций общей мощностью 227,5 ГВт и линии электропередачи всех классов напряжений протяженностью более 2,5 млн км. Около 90 % этого потенциала сосредоточено в Единой энергетической системе (ЕЭС) России — уникальном техническом комплексе, обеспечивающем электроснабжение потребителей на большей части обжитой территории страны.

В структуре генерирующих мощностей электростанций России преобладают тепловые электростанции (ТЭС), доля которых в установленной мощности составляет 68,4 %, доля атомных электростанций (АЭС) — 10,7 %, доля гидростанций — 20,9 %. Около 80 % ТЭС в европейской части России (включая Урал) работают на газе и мазуте, в то время как более 80 % ТЭС в восточной части России используют уголь.

За годы реформ ухудшились экономические показатели работы отрасли. С 1991 г. более чем в 1,5 раза увеличились относительные потери электроэнергии в электрических сетях на ее транспортировку; более чем в 1,5 раза выросла удельная численность персонала в отрасли; более чем в 2,5 раза снизилась эффективность использования капитальных вложений. В 5 раз сократился ввод новых и замещающих генерирующих мощностей по сравнению с вводами 60—80-х годов прошлого столетия. Существенно выросли в последние годы тарифы на электрическую энергию. Они приблизились к тарифам в США и других странах, притом что цена на природный газ для электростанций в России пока значительно ниже. Вместе с тем намечается дальнейшее повышение цен на электроэнергию. В целом можно констатировать, что после распада СССР существенно снизились экономическая эффективность функционирования и темпы развития электроэнергетики в России.

Основными причинами снижения экономической эффективности функционирования электроэнергетики являются:

отсталые энергетические технологии, применяемые в тепловой энергетике страны, особенно при генерации электроэнергии на газовых и угольных электростанциях, и в электрических сетях;

использование морально и физически устаревшего энергооборудования на электростанциях и в электрических сетях (его доля превышает 40 % всего установленного оборудования);

отсутствие в настоящее время оптимальной системы управления отраслью в условиях образования многочисленных собственников электроэнергетических объектов, которая обеспечивала бы ту минимизацию затрат на развитие и функционирование электроэнергетики, которую обеспечивала прежняя централизованная система управления отраслью;

резкое снижение научно-технического потенциала отрасли;

существенное сокращение строительного потенциала;

снижение потенциала в отраслях отечественного энергомашиностроения и электромашиностроения.

В то же время за рубежом за последние 10—15 лет наблюдается быстрое развитие перспективных технологий с радикальным повышением их эффективности, в том числе: повышение параметров и коэффициентов полезного действия (КПД) газотурбинных установок (ГТУ) до 36—40 % и парогазовых установок (ПГУ) до 56—60 %, повышение экономичности традиционных паротурбинных пылеугольных энергоблоков до 43—46 %, повышение эффективности и уменьшение стоимости природозащитных систем, в том числе развитие и широкое применение котлов с циркулирующим кипящим слоем, развитие воздушных линий (ВЛ) высокого и сверхвысокого напряжения, сверхпроводящих устройств и др.

Перед российской электроэнергетикой в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2035 г. стоят масштабные задачи. Для обеспечения прогнозируемых потребностей в электроэнергии в России на период до 2035 г., которые оцениваются 1460—1570 млрд кВт·ч, необходимо будет увеличить производство электроэнергии по сравнению с 2008 г. в 1,4—1,5 раза, что составит 1500—1620 млрд кВт·ч. Для обеспечения прогнозируемых объемов производства электроэнергии установленная мощность электростанций России к 2030 г. должна возрасти по сравнению с 2008 г. в 1,35—1,43 раза и составить 305—321 ГВт. Объем вводов линий электропередачи в Единую национальную (общероссийскую) электрическую сеть (ЕНЭС) напряжением 220 кВ и выше до 2035 г. оценивается 150 тыс. км (в распределительной сети — ВЛ напряжением 0,4—220 кВ выше 500 тыс. км). В целом инвестиционные потребности для развития ТЭС, АЭС, ГЭС и электрических сетей на период до 2035 г. оцениваются 13—

13,6 трлн руб., в том числе на развитие электрических сетей — 5,2—5,45 трлн руб.

Ключевое значение для достижения целей Энергетической стратегии и повышения эффективности работы российской электроэнергетики имеют:

модернизация электроэнергетики страны на базе передовых технологий производства, передачи и распределения электроэнергии для того, чтобы к 2030 г. получить электроэнергетику с технологической основой, адекватной таковой в наиболее развитых странах мира;

развитие научных работ по созданию новых (в том числе прорывных) технологий, обеспечивающих приоритетное развитие отечественной электроэнергетики;

создание системы целостного оптимального управления развитием и функционированием электроэнергетики России.

Для успешной реализации Энергетической стратегии важны оптимизация мощностного ряда энергоустановок на природном газе и твердом топливе, максимальная унификация и типизация разрабатываемых проектов и переход к поточному строительству и вводу в действие новых мощностей. Это даст возможность снизить затраты на проектирование и изготовление оборудования с использованием передового мирового опыта, сократить сроки проектирования и строительства, осуществить консолидацию ресурсов и крупномасштабно задействовать отечественное энергомашиностроение, создать единую ремонтную базу со стандартным набором запчастей по типам оборудования, обеспечить возможность распространения опыта эксплуатации и ремонта, подготовки квалифицированных кадров.

Важными при осуществлении модернизации являются разработка (в параллель с модернизацией и заменой старого оборудования) отечественных перспективных, в том числе и прорывных, технологий и оборудования, изготовление опытно-промышленных образцов в целях их дальнейшего серийного производства. К ним относятся:

разработка высокоэффективной отечественной ГТУ мощностью 300—350 МВт для работы в составе ПГУ с КПД 58—60 %;

создание отечественного энергоблока на угле на суперсверхкритические параметры пара 28—30 МПа, 600—620 °С мощностью 660—800 МВт;

создание мощной котельной установки с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС);