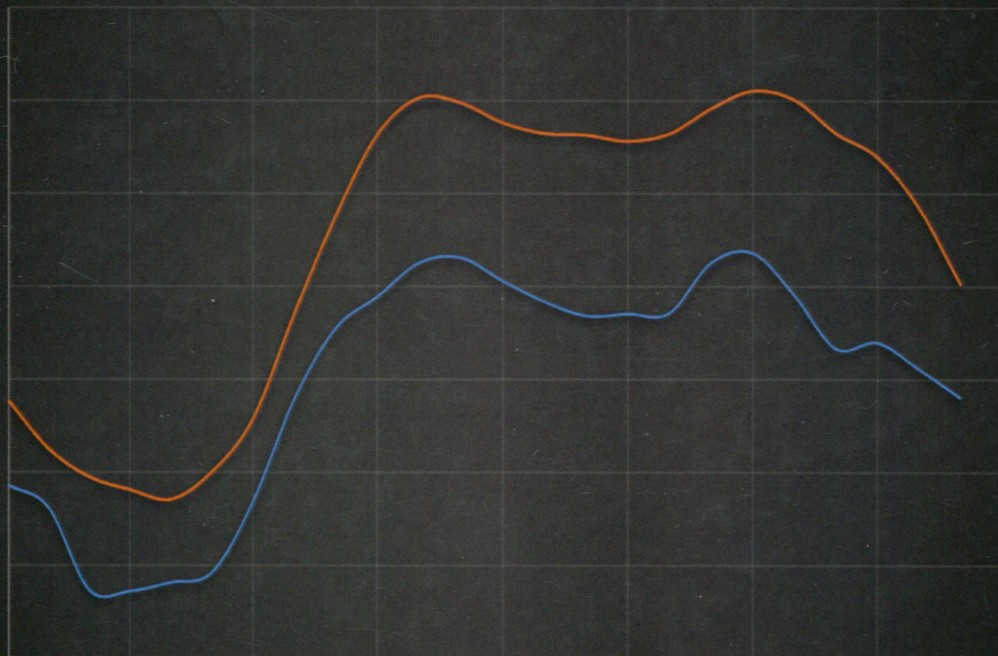


Проблемы и пути обеспечения неравномерного электропотребления в условиях растущей доли АЭС в энергосистемах



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Р.З. АМИНОВ А.Н. ЕГОРОВ

**Проблемы
и пути обеспечения
неравномерного
электропотребления
в условиях
растущей доли
АЭС
в энергосистемах**

МОСКВА НАУКА 2020

УДК 621.311+621.039+621.311.22

ББК 31.47+31.37+31.28

А62



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 20-18-00038, не подлежит продаже*

Аминов Р.З., Егоров А.Н.

Проблемы и пути обеспечения неравномерного электропотребления в условиях растущей доли АЭС в энергосистемах / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров ; Саратовский научный центр РАН. — М. : Наука, 2020. — 271 с. — ISBN 978-5-02-040802-9

В работе рассмотрены основные проблемы, связанные с функционированием энергосистем в условиях растущей доли АЭС, и пути их решения. Проведен анализ известных энергосистем и предложены альтернативные пути обеспечения АЭС базовой нагрузкой и ее участия в переменной части графика электропотребления и первичном регулировании частоты тока и мощности на основе водородных энергетических комплексов и газотурбинных установок. Рассмотрены воздушно-аккумулирующие установки, а также варианты перевода газоперекачивающих станций в режим потребителя-регулятора с потреблением электроэнергии из энергосистемы для привода компрессорных агрегатов во внепиковый период. Предложены и исследованы новые пути повышения эффективности использования водородного топлива при комбинировании АЭС с водородным энергокомплексом. Представлены разработанные авторами схемные решения на базе замкнутого водородного цикла. Затронут вопрос влияния переменных режимов работы на ресурс генерирующего оборудования в условиях работы в переменной части графика электрических нагрузок, обоснованы наиболее ресурсосберегающие схемные варианты и режимы функционирования генерирующих источников. Разработана методика расчета и проведены исследования влияния участия АЭС, ГТУ, ПГУ и конденсационного энергоблока ТЭС в первичном регулировании частоты и мощности в энергосистеме на выработку ресурса и технико-экономические показатели с учетом технологических особенностей работы этих энергоустановок. В результате определены экономически оправданные зоны использования для различного типа генерирующего оборудования.

Для работников научно-исследовательских и проектных организаций, специалистов, аспирантов и студентов старших курсов энергетических специальностей.

ISBN 978-5-02-040802-9

- © Аминов Р.З., Егоров А.Н., 2020
- © Саратовский научный центр РАН, 2020
- © ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ГЛАВА 1	
РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ. ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭНЕРГОСИСТЕМ. ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭС БАЗИСНОЙ НАГРУЗКОЙ	8
1.1. Графики потребления электроэнергии и мощности ЕЭС России	9
1.2. Режимные условия работы АЭС в ОЭС РФ на ближайшую перспективу	13
1.3. Пути обеспечения АЭС базовой нагрузкой	17
1.3.1. Сравнительный анализ разгрузки АЭС и парогазовых установок	17
1.3.2. Реализация водородных технологий на АЭС	21
1.3.2.1. Замкнутый водородный цикл	24
1.3.2.2. Бифункциональные электрохимические элементы в составе водородного комплекса при комбинировании с АЭС	28
1.3.3. Использование внепиковой ночной электроэнергии АЭС для электропривода на газоперекачивающих агрегатах	34
1.3.4. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные установки	45
1.3.4.1. Хранение сжатого воздуха	45
1.3.4.2. Схемы воздушно-аккумулирующих газотурбинных установок	49
1.3.4.3. Оценка тепловой экономичности ВАГТУ	52
ГЛАВА 2	
СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИМ УСТАНОВКАМ	64
2.1. Маневренные свойства энергоустановок	64
2.1.1. Особенности использования ПГУ в переменной части графика электрических нагрузок	64
2.1.1.1. Маневренные характеристики энергетических ПГУ	68
2.1.1.2. Допустимое число циклов изменения режима и ресурс ПГУ	72
2.1.1.3. Продолжительность пусков ПГУ и оценка затрат топлива при пусках	73
2.1.1.4. Особенности режимов работы ПГУ при переменных нагрузках	74
2.1.2. Свойства конденсационных паротурбинных энергоблоков различного типа при участии в регулировании графика электрических нагрузок	76
2.1.2.1. Приемистость энергоблоков при открытии регулирующих клапанов турбины в режимах скользящего и номинального давлений	78
2.1.2.2. Приемистость энергоблоков ТЭС при отключении ПВД	81
2.2. Экономичность работы оборудования при переменных нагрузках	82
2.2.1. Температурные напряжения при переходных режимах	82
2.2.1.1. Влияние температур на характеристики металла	82
2.2.1.2. Обобщение характеристики усталости для расчета выработки ресурса ротора турбины	83
2.2.2. Экономичность турбоустановки в зависимости от типа парораспределения и способа регулирования нагрузки	85
2.2.3. Экономичность энергоблока при форсированных режимах	88
2.3. Экономически оправданные зоны использования для различного типа оборудования	89
2.3.1. Характеристика варианта ПГУ	90
2.3.2. Оценка КПД котла утилизатора П-96 ПГУ-450	92
2.3.3. Обоснование варианта разгрузки ПГУ-450Т и оценка ее показателей	94
2.3.4. Сравнительная оценка эффективности разгрузки АЭС, КЭС и парогазовой ТЭЦ в часы провала суточного графика электрической нагрузки	97
2.4. Использование аккумулирующих свойств тепловых сетей и зданий для расширения регулировочного диапазона по отпуску электроэнергии на ТЭЦ	101
ГЛАВА 3	
ИНСОУСТОЙЧИВОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ В ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ	112
3.1. Оборудование водородного энергокомплекса	112
3.1.1. Электролизеры и металлические емкости цилиндрического типа для хранения водорода и кислорода	114
3.1.2. Компрессорные установки поршневого типа	114
3.1.3. Водород-кислородная камера сгорания	118
3.1.3.1. Термоциклические нагрузки водород-кислородного парогенератора	120

3.1.3.2. Оценка эксплуатационного ресурса водород-кислородного парогенератора.....	125
3.1.4. Системный подход к оценке технико-экономических показателей водородного энергетического комплекса в циклических условиях работы.....	131
3.2. Маломощная дополнительная ПТУ.....	137
3.3. Паротурбинные энергоблоки ТЭС.....	147
3.3.1. Расчет выработки ресурса и увеличения себестоимости электроэнергии паротурбинных энергоблоков при разном диапазоне изменения их мощности.....	150
3.4. Парогазовые установки.....	159
3.4.1. Расчет эквивалентной выработки ресурса ПГУ.....	161
3.4.2. Расчет эффективности использования ПГУ с учетом износа оборудования при переменных электрических нагрузках.....	164
3.4.3. Определение оптимального режима работы оборудования ПГУ при переменных нагрузках.....	167
ГЛАВА 4	
ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВОДОРОДНЫХ ЦИКЛОВ.....	169
4.1. Замкнутый цикл сжигания водорода.....	169
4.1.1. Водород-кислородный парогенератор для замкнутого цикла.....	169
4.1.2. Оценка технико-экономической эффективности замкнутого водородного цикла.....	174
4.1.3. Оценка эффективности сжигания водорода с избытком окислителя в замкнутом водородном цикле.....	184
4.2. Эффективность комбинирования АЭС с бифункциональными энергоустановками.....	191
4.3. Особенности учета свойств диссоциированного водяного пара при условии использования пароводородного рабочего тела.....	195
4.3.1. Обоснование расчетных отклонений параметров при разработке системы уравнений свойств диссоциированного водяного пара.....	195
4.3.2. Количество подобластей общей расчетной области для повышения точности расчетных зависимостей при разработке системы уравнений свойств диссоциированного водяного пара.....	200
4.4. Оценка недожога в водород-кислородном пароперегревателе при изменении температуры перегреваемого пара.....	205
4.5. Анализ эффективности работы водород-кислородной камеры сгорания со впрыском воды.....	208
4.6. Анализ эффективности работы водород-кислородной камеры сгорания со впрыском пара.....	220
ГЛАВА 5	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЧАСТИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК В ПЕРВИЧНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ.....	229
5.1. Системные требования к энергоблокам при участии в регулировании частоты энергосистемы.....	230
5.2. Влияние участия ГТУ в первичном регулировании частоты на ресурс лопаточного аппарата.....	233
5.3. Участие ПГУ в регулировании частоты.....	242
5.3.1. Учет технологических особенностей работы ПГУ при регулировании частоты в энергосистеме.....	242
5.3.2. Результаты расчета выработки ресурса основного оборудования ПГУ при участии в первичном регулировании частоты.....	249
5.4. Влияние участия в регулировании частоты и мощности на эффективность конденсационного энергоблока.....	250
5.4.1. Влияние участия в регулировании частоты и мощности на температурный режим металла конденсационного энергоблока.....	250
5.4.2. Оценка влияния участия энергоблоков ТЭС в регулировании мощности и частоты на экономичность их работы.....	254
5.4.3. Дополнительные эксплуатационные затраты при участии энергоблоков ТЭС в регулировании мощности и частоты.....	256
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	258
ЛИТЕРАТУРА.....	259
	271