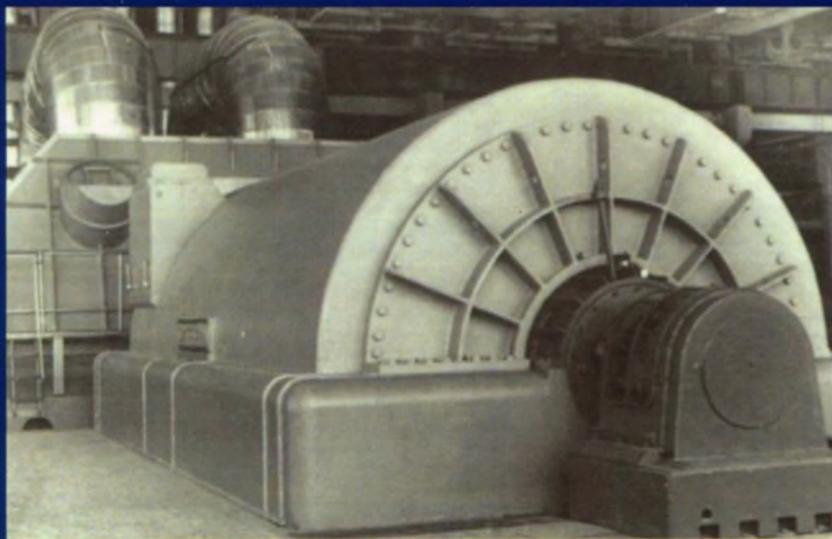


621.313.12  
К 95

К.А. КУЧИНСКИЙ

# ТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ



Киев

2020

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

**К. А. КУЧИНСКИЙ**

**ТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

Киев

2020

THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
THE INSTITUTE OF ELECTRODYNAMICS

**K. A. KUCHYNSKYI**

**THERMAL AND THERMOMECHANICAL  
PROCESSES IN TURBOGENERATORS**

Kyiv

2020

УДК 621.313.322

В монографии представлены основные результаты решения определенного класса задач при исследовании тепловых и термомеханических процессов в мощных синхронных турбогенераторах с учетом влияния различных конструктивных факторов и условий эксплуатации на состояние их отдельных элементов. Проанализированы особенности и обобщены закономерности распределения термомеханических полей в узлах машин в номинальных и некоторых аномальных режимах, в частности, при наличии термических дефектов. Обоснованы конструктивные исполнения машин и научно-технические решения по снижению диапазона изменений тепловых и термомеханических нагрузок. Полученные научные результаты использованы на практике при модернизации генераторов для оптимизации режимов их работы.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов электромеханических и электротехнических специальностей.

У монографії представлено основні результати розв'язання певного класу задач при дослідженні теплових і термомеханічних процесів у потужних синхронних турбогенераторах з урахуванням впливу різних конструктивних факторів і умов експлуатації на стан їх окремих елементів. Проаналізовано особливості та узагальнено закономірності розподілу термомеханічних полів у вузлах машин у номінальних та деяких аномальних режимах, зокрема, за наявності термічних дефектів. Обґрунтовано конструктивні виконання машин і науково-технічні рішення щодо зниження діапазону змін теплових і термомеханічних навантажень. Отримані наукові результати використано на практиці за модернізації генераторів для оптимізації режимів їхньої роботи.

Книга розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, аспірантів і студентів електромеханічних та електротехнічних спеціальностей.

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шинкаренко*  
доктор технических наук, профессор *Л. И. Мазуренко*

Утверждено к печати ученым советом Института электродинамики НАН Украины (протокол № 4 от 21.04.2020)

ISBN 978-617-7457-99-1

© К. А. Кучинский, 2020

© Институт электродинамики, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>9</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>12</b>
<b>ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....</b>	<b>16</b>
1.1. Техническое состояние турбогенераторов ТЭС и АЭС Украины. Характерные неисправности при эксплуатации.....	17
1.2. Влияние асимметричного нагрева ротора на вибрационное состояние турбогенератора.....	21
1.3. К вопросу об оценке термической стойкости ротора генератора в асинхронных режимах.....	23
1.4. Анализ результатов теоретических исследований и особенностей термомеханических процессов в элементах электроэнергетического оборудования.....	25
1.5. Анализ экспериментальных исследований термомеханических характеристик узлов турбогенераторов.....	30
1.6. Аварийные ситуации в турбогенераторах с водяным охлаждением обмотки статора.....	35
1.7. Возможности управления тепловыми и термомеханическими процессами в турбогенераторах.....	41
<b>ГЛАВА 2. МОДЕЛИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В РОТОРАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....</b>	<b>46</b>
2.1. Модели, методы и алгоритмы расчета тепловых процессов в электрических машинах.....	46
2.1.1. Классические методы.....	46
2.1.2. Метод эквивалентных тепловых схем замещения.....	48

## Содержание

---

2.1.3. Метод температурных полей.....	50
2.1.4. Решения аналитическими методами и методами интегральных преобразований.....	51
2.1.5. Численные методы расчета температурных полей.....	53
2.1.5.1. Конечно-разностное моделирование.....	53
2.1.5.2. Конечно-элементное моделирование.....	56
2.2. Тепловые процессы в роторе турбогенератора при номинальных и аномальных условиях эксплуатации.....	74
2.2.1. Тепловой дисбаланс ротора.....	74
2.2.2. Нагрев элементов ротора при асимметрии охлаждения пазовой зоны.....	75
2.2.3. Влияние неравномерных температурных полей на вибрационное состояние ротора.....	89
2.2.4. Нагревы ротора в асинхронных режимах.....	100
2.2.4.1. Тепловое состояние элементов роторов генераторов типа ТВФ-100-2 и ТВФ-120-2.....	101
2.2.4.2. Тепловые процессы в элементах роторов различной конструкции турбогенератора типа ТГВ-325 в асинхронных режимах.....	117

## **ГЛАВА 3. МОДЕЛИ И АНАЛИЗ**

### **ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ**

### **ТУРБОГЕНЕРАТОРА В УСТАНОВИВШИХСЯ И**

### **НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ..... 132**

3.1. Общие замечания. Постановка задачи термомеханических исследований.....	132
3.2. Математические модели для исследования термомеханических процессов.....	134
3.2.1. Моделирование с применением стержневых расчетных схем.....	134
3.2.2. Приближенные аналитические оценки термомеханических напряжений в обмотках турбогенератора.....	139
3.2.3. Моделирование на основе метода конечных элементов.....	142

3.3. Влияние условий охлаждения на тепловые и термомеханические характеристики элементов стержней обмотки статора в динамическом режиме работы турбогенератора.....	147
3.4. Термомеханические характеристики элементов обмотки статора при различном времени процесса набора нагрузки турбогенератора.....	157
3.5. Тепломеханические процессы в элементах статора в маневренных режимах работы турбогенератора.....	163
3.5.1. Регулирование охлаждения обмотки статора при изменении нагрузки генератора. Общие замечания.....	164
3.5.2. Термомеханические характеристики статорной обмотки турбогенератора при регулировании водяного охлаждения.....	167
3.5.3. Усовершенствованная конструкция нажимных пальцев сердечника статора турбогенератора.....	172
3.6. Зависимость термомеханических характеристик обмотки статора от материала корпусной изоляции стержней.....	175
3.7. Влияние условий закрепления обмотки статора турбогенератора на механические характеристики ее изоляции.....	177
3.7.1. Общие замечания.....	177
3.7.2. Термомеханические напряжения в изоляции обмотки статора при различных граничных условиях в лобовых частях.....	179
3.7.3. Влияние «свободного» участка стержня в торце паза статора на термомеханические характеристики изоляции обмотки.....	182
3.7.4. Численная оценка вибромеханических характеристик лобовой части обмотки статора турбогенератора. Возможности их улучшения.....	186

## Содержание

---

3.8. Влияние параметров режима работы турбогенератора на термомеханические характеристики изоляции обмотки статора.....	192
3.9. Термомеханические процессы в обмотке статора с водяным охлаждением.....	202
3.9.1. Дефекты охлаждения обмоток статора турбогенераторов АЭС.....	203
3.9.2. Способы теплового контроля обмоток.....	204
3.9.3. Термомеханическое состояние стержня обмотки статора турбогенератора мощностью 1000 МВт при наличии дефектов охлаждения.....	207
3.9.4. Мероприятия по усовершенствованию теплового контроля узлов турбогенератора.....	216
3.10. Физическое моделирование термомеханических процессов в стержне обмотки статора натурального турбогенератора.....	218
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>225</b>