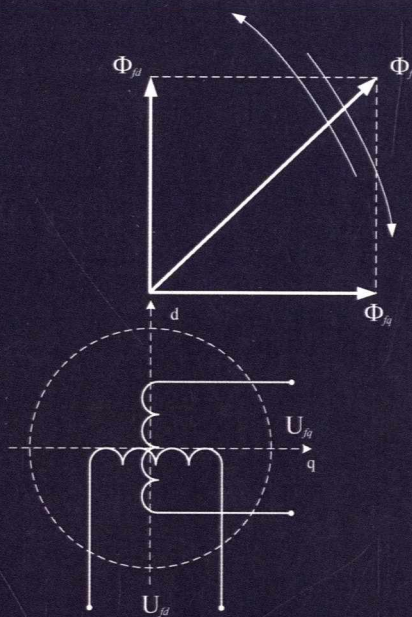


П. В. СОКУР

624.31
С599

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ И КОМПЕНСАТОРЫ



«Инфра-Инженерия»

П. В. Сокур

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ И КОМПЕНСАТОРЫ

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 621.313.3
ББК 31.261.6
С59

Рецензенты:

д. т. н., проф., главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», действительный член Академии электротехнических наук РФ *Воротницкий В. Э.*;
к. т. н., заместитель генерального конструктора по электротехническому оборудованию АО «Силовые машины» *Антонюк О. В.*

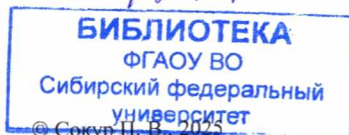
Сокур, П. В.

С59 Асинхронизированные турбогенераторы и компенсаторы : монография / П. В. Сокур. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 156 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2188-1

Рассмотрены устройство асинхронизированных турбогенераторов и компенсаторов, их конструктивные особенности, работа в установившихся и переходных режимах, резервные режимы работы, в том числе асинхронный режим работы без возбуждения. Представлена математическая модель асинхронизированного турбогенератора, даны рекомендации по моделированию в программном пакете Matlab Simulink, в том числе по работе модели в режиме реального времени. В приложениях даны подробные справочные данные по эксплуатируемым и проектируемым асинхронизированным турбогенераторам и компенсаторам.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений, специалистов проектных организаций, работников электростанций и других предприятий в сфере электроэнергетики.



УДК 621.313.39
ББК 31.261.6

ISBN 978-5-9729-2188-1

© Сокур П. В., 2025

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

Оглавление

Предисловие	5
Список сокращений	7
Введение	8
Глава 1. Асинхронизированный принцип управления	9
1.1. Обобщенная электрическая машина.....	9
1.2. Классификация электрических машин по режимам работы.....	11
1.3. Основные законы управления АС-машинами.....	12
1.4. Баланс энергии в АС-машине и мощность «возбуждения».....	15
1.5. Многообразие АС-машин и области их применения.....	17
Глава 2. Асинхронизированный турбогенератор	19
2.1. Предпосылки применения АСТГ.....	19
2.2. Устройство и структура АСТГ.....	23
2.3. АСТГ с симметричным ротором.....	26
2.4. АСТГ с несимметричным ротором.....	28
2.5. Система охлаждения.....	30
2.6. Законы управления АСТГ.....	34
2.7. Система возбуждения.....	38
2.8. Практические достижения.....	42
Глава 3. Установившиеся и динамические режимы работы	44
3.1. Установившиеся режимы работы АСТГ.....	44
3.2. Резервные режимы работы АСТГ.....	51
3.3. Асинхронный режим работы АСТГ.....	54
3.3.1. Особенности асинхронного режима синхронного турбогенератора.....	54
3.3.2. Асинхронный режим АСТГ с симметричными обмотками возбуждения.....	55
3.3.3. Асинхронный режим АСТГ с несимметричными обмотками возбуждения.....	61
3.4. Динамические режимы работы АСТГ.....	64
3.4.1. Динамическая устойчивость АСТГ с симметричными обмотками возбуждения.....	64
3.4.2. Динамическая устойчивость АСТГ с несимметричными обмотками возбуждения.....	71

Глава 4. Математическая модель АСТГ и компьютерное моделирование ..	76
4.1. Математическая модель АСТГ	76
4.2. Модель реального времени.....	85
4.3. Модель АСТГ в библиотеке Specialized Power Systems	102
4.3.1. Разработка модели АСТГ.....	102
4.3.2. Особенности подключения модели АРВ к модели АСТГ	108
4.3.3. Пример построения модели АСТГ	109
Глава 5. Асинхронизированный компенсатор	111
5.1. Конструкция АСК.....	112
5.1.1. Ротор.....	112
5.1.2. Статор.....	113
5.1.3. Система охлаждения.....	114
5.2. Особенности регулирования АСК.....	115
5.3. Статические и динамические режимы работы АСК.....	119
5.3.1. Режим пуска.....	119
5.3.2. Статические режимы	122
5.3.3. Динамические режимы	124
5.4. Резервные режимы работы АСК.....	125
Заключение.....	127
Литература.....	129
Приложение 1. Технические характеристики АСТГ	132
Приложение 2. Габаритные чертежи АСТГ и АСК	133
Приложение 3. Технические характеристики турбогенератора ТЗФА-110	137
Приложение 4. Технические характеристики турбогенератора ТЗФАУ-160	140
Приложение 5. Технические характеристики турбогенератора ТЗФСУ-320	143
Приложение 6. Технические характеристики турбогенератора АСТГ-200	146
Приложение 7. Листинг программы в Mathcad для расчета параметров эквивалентных демпферных контуров АСТГ.....	149
Приложение 8. Технические характеристики асинхронизированного компенсатора АСК-100-4УХЛ4.....	151

Предисловие

В 1955 году Михаилом Моисеевичем Ботвинником была выдвинута идея создания электрической машины, которая сочетала бы положительные свойства синхронных и асинхронных машин. Как известно, устойчивость асинхронной машины, работающей без возбуждения, лимитируется не углом нагрузки, как у синхронной машины, а её скольжением. Электрическая машина, имеющая возбуждение и обладающая устойчивостью по скольжению, была названа асинхронизированной синхронной машиной (АСМ). В дальнейшем общепринятым сокращением стало наименование асинхронизированная машина. В [1] дано следующее определение асинхронизированной синхронной машины: синхронная машина, у которой при скольжении ротора и разомкнутом статоре поток, создаваемый током возбуждения, вращается с синхронной скоростью. При этом частота тока возбуждения не задается, а вычисляется автоматическим регулятором возбуждения как разница между синхронной частотой вращения и частотой вращения ротора.

В СССР, во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ), правопреемником которого в настоящее время является АО «НТЦ ФСК ЕЭС», была создана научная школа в области теории и практики асинхронизированных машин. Во ВНИИЭ в 1964 г. была образована лаборатория «Асинхронизированные машины» под руководством М.М. Ботвинника, которой было поручено довести его теоретические идеи до практической реализации. С 1974 г. по 1987 г. эту лабораторию возглавлял проф. Ю.Г. Шакарян, а с 1987 по 2008 г. – проф. И.А. Лабунец.

Ю.Г. Шакарян, являясь научным руководителем ВНИИЭ, внёс огромный вклад в развитие теории, практики и сохранения научной школы по данному направлению.

В результате совместной работы ВНИИЭ с другими исследовательскими организациями и заводами «Электросила», «Уралэлектротяжмаш» и «Электротяжмаш» были разработаны и введены в эксплуатацию два асинхронизированных гидрогенератора мощностью по 40 МВт на Иовской ГЭС [2] и гидрогенератор мощностью 400 кВт для опытной Кислогубской приливной электростанции [3], семь асинхронизированных турбогенераторов (АСТГ) мощностью от 110 до 320 МВт и два асинхронизированных компенсатора (АСК) мощностью по 100 МВА.

Разработка первых в мире АСТГ с водородно-водяным охлаждением была выполнена на заводе «Электротяжмаш» (г. Харьков). В дальнейшем работы по совершенствованию конструкции АСТГ с воздушным и смешанным охлаждением проводились на заводе «Электросила» (г. Санкт-Петербург) при научной поддержке ВНИИЭ под руководством проф. И.А. Лабунца. Большой вклад

в работу внесли сотрудники лаборатории: Н.Н. Блоцкий, М.С. Фези-Жилинская, А.П. Лохматов, Т.В. Плотникова, И.Я. Довганюк и др.

Работы на заводе «Электросила» проводились под руководством главного инженера Н.Д. Пинчука. В разработке АСТГ принимали участие главный конструктор турбогенераторов И.А. Кади-Оглы, А.В. Сидельников, М.Б. Ройтгарц, О.В. Антонюк, Ю.Н. Дубровин и др. Реверсивная система возбуждения АСТГ была освоена в производстве на заводе «Электросила». В разработке принимали участие главный конструктор систем возбуждения А.Г. Логинов, А.А. Бурмистров, Г.А. Гоголев и др. Микропроцессорный автоматический регулятор возбуждения был разработан и изготовлен в ООО «АСУ-ВЭИ» А.В. Фадеевым.

В данной монографии обобщены результаты исследований, разработок, испытаний и эксплуатации асинхронизированных турбогенераторов и компенсаторов, проведенных ВНИИЭ в период с 2000 г. по настоящее время.

Список сокращений

АГП	– автомат гашения поля
АЗР	– автомат замыкания обмоток ротора
АРВ	– автоматический регулятор возбуждения
АС	– асинхронизированный
АСГГ	– асинхронизированный гидрогенератор
АСГД	– асинхронизированный генератор-двигатель
АСТГ	– асинхронизированный турбогенератор
АСК	– асинхронизированный (турбо)компенсатор
АСКМ	– асинхронизированный компенсатор с маховиком на валу
БСК	– батарея статических конденсаторов
ВУЗ	– высшее учебное заведение
ВНИИЭ	– всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики
ГАЭС	– гидроаккумулирующая электростанция
ГРЭС	– государственная районная электростанция
ГЭС	– гидроэлектростанция
ДУПР	– датчик углового положения ротора
ЕЭС	– единая энергетическая система
ЗР	– защитный резистор
КПД	– коэффициент полезного действия
КШР	– контактор, шунтирующий разрядник
МДС	– магнитодвижущая сила
МЭК	– международная электротехническая комиссия
ОВ	– обмотка возбуждения
ОМВ	– ограничение минимального возбуждения
ОС	– операционная система
ПК	– преобразователь координат
РПН	– регулирование под нагрузкой
СВ	– система возбуждения
СИФУ	– система импульсно-фазового управления
СК	– синхронный компенсатор
СТГ	– синхронный турбогенератор
СТК	– статический тиристорный компенсатор
ТП	– тиристорный преобразователь
ТПУ	– тиристорное пусковое устройство
ТР	– тиристорный разрядник
ТЭЦ	– теплоэлектроцентраль
УШР	– управляемый шунтирующий реактор
ШР	– шунтирующий реактор
ЭДС	– электродвижущая сила

Введение

Отечественными учеными впервые была разработана теория и совместно с машиностроительными заводами были изготовлены и введены в эксплуатацию асинхронизированные гидрогенераторы, турбогенераторы и компенсаторы. Асинхронизированные генераторы в дальнейшем нашли широкое применение за рубежом в составе гидроаккумулирующих электростанций и ветроустановок большой мощности и подтвердили на практике свою эффективность. Асинхронизированные турбогенераторы до сих пор являются уникальной отечественной разработкой и не имеют аналогов в мире.

К сожалению, немногие выпускники энергетических вузов и действующие специалисты электрических станций и сетей знают об особенностях устройства, законов управления и преимуществах асинхронизированных синхронных машин по сравнению с традиционными синхронными машинами. Автор надеется, что данная книга восполнит этот пробел и будет полезна не только студентам и преподавателям вузов, но и специалистам электроэнергетических предприятий различного профиля, в том числе осуществляющих перспективное планирование и расчеты режимов работы энергосистемы, а асинхронизированные турбогенераторы и компенсаторы найдут более широкое и достойное применение в отечественной электроэнергетике.

Книга состоит из пяти глав.

В первой главе дается описание принципов управления обобщенной электрической машиной, сформулирован асинхронизированный принцип управления асинхронизированной машиной, дана классификация различных типов асинхронизированных машин.

Во второй главе рассмотрен асинхронизированный турбогенератор, конструктивные особенности, присущие данному классу асинхронизированных машин, отличия законов управления для асинхронизированного турбогенератора с симметричными и несимметричными обмотками возбуждения.

В третьей главе рассмотрены установившиеся и динамические режимы работы асинхронизированных турбогенераторов. Приведены как расчетные, так и натурные осциллограммы переходных процессов, полученные во время испытаний. Уделено внимание резервным режимам работы, в том числе асинхронному режиму работы без возбуждения, в котором асинхронизированный турбогенератор может работать неограниченно долго.

В четвертой главе дано описание математической модели асинхронизированного турбогенератора. Рассмотрены вопросы моделирования в программном пакете Matlab Simulink, в том числе дана методика разработки модели асинхронизированного турбогенератора с использованием элементов библиотеки Specialized Power Systems.

Особенности конструкции, режимов работы и закона управления асинхронизированного компенсатора реактивной мощности приведены в пятой главе.

В приложениях даны подробные технические характеристики и электромагнитные параметры асинхронизированных турбогенераторов и компенсаторов.