



Ю.Ф. АНТОНОВ  
Я.Б. ДАНИЛЕВИЧ

# Криотурбогенератор КТГ-20

опыт создания  
и проблемы сверхпроводникового  
электромашиностроения

Ю.Ф. АНТОНОВ  
Я.Б. ДАНИЛЕВИЧ

# **Криотурбогенератор КТГ-20**

**опыт создания  
и проблемы сверхпроводникового  
электромашиностроения**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2013

УДК 621.313.1  
ББК 3.2.6  
А 72



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 12-08-07109,  
не подлежит продаже*

**Антонов Ю.Ф., Данилевич Я.Б. Криотурбогенератор КТГ-20: опыт создания и проблемы сверхпроводящего электромашиностроения.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 600 с. — ISBN 978-5-9221-1521-6.

В книге освещаются вопросы расчета, конструирования и испытаний сверхпроводниковых синхронных машин, предназначенных для работы в локальных сетях и в составе единой энергосистемы, результаты исследования сложных переходных процессов и технических средств обеспечения устойчивости. Дан обзор современного состояния разработок электрических машин на базе высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения. Актуальные вопросы технической сверхпроводимости излагаются доступно и не требуют обращения к специальной литературе. Книга содержит необходимый объем знаний для выполнения квалифицированной исследовательской и проектной работы в новой отрасли сверхпроводящего электромашиностроения.

Для научных работников, инженерно-технического персонала и аспирантов, специализирующихся в области криогенного электромашиностроения.

ISBN 978-5-9221-1521-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© Ю. Ф. Антонов, Я. Б. Данилевич, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов . . . . .	8
Предисловие . . . . .	10
<b>Глава 1. Опытнo-промышленный криотурбогенератор КТГ-20 мощностью 20 МВА. Конструкция и результаты испытаний . . .</b>	<b>15</b>
§ 1.1. Технические данные и конструкция криотурбогенератора КТГ-20 мощностью 20 МВА. Результаты стендовых испытаний . . . . .	15
1.1.1. Конструкция и основные технические данные (15).	
1.1.2. Исследование режима захолаживания (20). 1.1.3. Исследование установившегося теплового режима ротора и накопления жидкого гелия в роторе (21). 1.1.4. Испытания в режимах короткого замыкания и холостого хода (22). 1.1.5. Экспериментальные параметры и КПД криотурбогенератора КТГ-20 (24).	
§ 1.2. Экспериментальные исследования криотурбогенератора КТГ-20 с применением АСИ ТГ. . . . .	25
§ 1.3. Вибрационные испытания криотурбогенератора КТГ-20 . . . . .	35
§ 1.4. Исследование ротора криотурбогенератора КТГ-20 при температуре жидкого гелия. . . . .	42
§ 1.5. Влияние вращения на процессы в роторе сверхпроводникового синхронного генератора . . . . .	47
§ 1.6. Аномальные тепловые режимы работы ротора криотурбогенератора КТГ-20. . . . .	52
§ 1.7. Проблемы создания сверхпроводниковых обмоток возбуждения синхронных генераторов энергетического назначения. . . . .	58
§ 1.8. Теплообмен в роторе криотурбогенератора КТГ-20. . . . .	62
§ 1.9. Стенд для испытаний сверхпроводниковых магнитных систем . . . .	69
<b>Глава 2. Выбор сверхпроводникового обмоточного материала . . .</b>	<b>75</b>
§ 2.1. Низкотемпературные сверхпроводники. Характеристики. Методы стабилизации . . . . .	78
2.1.1. Критерий адиабатической стабильности (79). 2.1.2. Условия динамической стабильности (82). 2.1.3. Стационарная стабилизация (84). 2.1.4. Деградация и тренировка (86). 2.1.5. Механические свойства сверхпроводниковых обмоточных материалов и до-	

пустимый натяг при намотке (88). 2.1.6. Электрическая изоляция и скрепляющие компаунды (89).	
§ 2.2. Контактные соединения . . . . .	90
§ 2.3. Высокотемпературные сверхпроводники. Технология производства. Способы повышения критических параметров . . . . .	97
2.3.1. Хроника открытия высокотемпературных сверхпроводников (97). 2.3.2. Требования к характеристикам обмоточных материалов из высокотемпературных сверхпроводников (102). 2.3.3. Технология производства высокотемпературных сверхпроводников. Способы повышения критических параметров (104).	
§ 2.4. Разработка высокотемпературных сверхпроводниковых обмоточных материалов для работы на переменном токе . . . . .	111
§ 2.5. Разработка и производство токнесущих элементов типа Roebel на основе 2G ВТСП . . . . .	113
§ 2.6. Диборид магния . . . . .	121
§ 2.7. Диффузионная сварка 2G ВТСП тонкопленочных проводников . . . . .	123
<b>Глава 3. Сверхпроводниковая обмотка возбуждения: синтез конфигурации, расчет магнитного поля и основы конструирования</b>	<b>125</b>
§ 3.1. Предварительная оценка модуля сверхпроводниковой обмотки возбуждения. Линии равной относительной эффективности . . . . .	126
§ 3.2. Оценочные расчеты трековой катушки с прямоугольным поперечным сечением обмотки . . . . .	130
§ 3.3. Методы расчета и оптимизация сверхпроводниковых обмоток возбуждения . . . . .	134
§ 3.4. Сверхпроводниковые магнитные системы прямоугольной формы . . . . .	136
§ 3.5. Расчет магнитного поля в двумерной постановке . . . . .	138
§ 3.6. Решение трехмерной задачи расчета магнитного поля сверхпроводниковой прямоугольной катушки с прямоугольным поперечным сечением . . . . .	150
§ 3.7. Расчет трехмерного магнитного поля обмотки возбуждения методом вторичных источников . . . . .	162
§ 3.8. Синтез конфигурации обмотки возбуждения турбогенератора . . . . .	175
§ 3.9. Измерения гармонических составляющих магнитного поля обмотки возбуждения криотурбогенератора . . . . .	182
§ 3.10. Выбор радиуса электромагнитного экрана криотурбогенератора . . . . .	187
§ 3.11. Исследование эффективности экранирования электромагнитного поля статора криотурбогенератора роторным экраном конечной длины . . . . .	192
§ 3.12. Расчет совместного действия радиальных и касательных усилий на электромагнитный экран ротора криотурбогенератора . . . . .	205
§ 3.13. Расчет магнитного поля от первичных источников . . . . .	211
§ 3.14. Универсальный алгоритм для определения электромагнитных характеристик сверхпроводниковых обмоток возбуждения электрических машин . . . . .	226

3.14.1. Общее определение различных видов электромагнитных характеристик (227).	3.14.2. Структура универсального алгоритма (229).	
<b>Глава 4. Технология изготовления сверхпроводниковой обмотки возбуждения</b>		<b>234</b>
§ 4.1. Выравнивание механических напряжений по толщине сверхпроводниковой обмотки		234
§ 4.2. Исследование деформаций прямолинейных участков сверхпроводниковой обмотки трекового модуля		243
§ 4.3. Криогенные компаунды. Термоциклические испытания при низких температурах.		250
§ 4.4. Потери в сверхпроводниковой обмотке на переменном токе и в переменных магнитных полях		253
4.4.1. Способы уменьшения потерь на переменном токе (255).		
4.4.2. Измерения потерь в сверхпроводниках во вращающемся магнитном поле (257).		
4.4.3. Потери в сверхпроводниковой обмотке возбуждения (262).		
4.4.4. Защита сверхпроводниковых модулей обмотки возбуждения в режиме «незатухающего тока» (267).		
<b>Глава 5. Тепловые мосты</b>		<b>270</b>
§ 5.1. Исследования теплового моста ротора на модели		270
§ 5.2. Нестационарное температурное поле оболочек ротора		276
§ 5.3. Метод эквивалентных тепловых схем для теплового расчета ротора со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения		282
§ 5.4. Решение сопряженной задачи определения теплового поля ротора криотурбогенератора.		289
§ 5.5. Теплообмен в радиальном канале сверхпроводниковой обмотки возбуждения синхронного генератора		293
§ 5.6. Расчет тепловых мостов сверхпроводникового турбогенератора		297
§ 5.7. Экспериментальное исследование распределения температуры в компаундированной сверхпроводниковой магнитной системе при переходных тепловых процессах		302
<b>Глава 6. Термодинамическая оптимизация тоководов</b>		<b>308</b>
§ 6.1. Математическая модель токовода		310
§ 6.2. Анализ физических величин и обоснование граничных условий.		312
§ 6.3. Оптимизация параметров тоководов. Основные соотношения		319
6.3.1. Цикл Карно (320).	6.3.2. Реальный цикл (324).	
§ 6.4. Разработка и экспериментальные исследования типового ряда пористых тоководов		326
<b>Глава 7. Криогенное обеспечение</b>		<b>330</b>
§ 7.1. Методика расчета режима захолаживания ротора криотурбогенератора КТГ-20		330

§ 7.2. Термодинамические условия формирования гелиевой ванны во вращающемся криостате . . . . .	337
§ 7.3. Система охлаждения ротора криотурбогенератора КТГ-20. . . . .	344
§ 7.4. Измерение расхода криоагента в трактах вращающихся криостатов сверхпроводниковых электрических машин. . . . .	348
§ 7.5. Устройство контроля уровня жидкого гелия во вращающемся криостате . . . . .	354
§ 7.6. Устройство контроля температуры ротора криотурбогенератора КТГ-20. . . . .	356
§ 7.7. Установка для тарировки низкотемпературных датчиков. . . . .	360
§ 7.8. Дистанционный контроль вакуума во вращающемся криостате . . . . .	368
§ 7.9. Магниторазрядный датчик для измерений вакуума во вращающемся криостате ротора криотурбогенератора. . . . .	372
§ 7.10. Потери давления в канале при неизотермическом течении . . . . .	377
§ 7.11. Криокулеры. . . . .	382
§ 7.12. Запасы и дефицит гелия . . . . .	387
§ 7.13. Рынок сверхпроводникового электротехнического оборудования. . . . .	388
§ 7.14. Сопоставительная эффективность низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников . . . . .	388
<b>Глава 8. Работа сверхпроводникового синхронного генератора в энергосистеме . . . . .</b>	<b>394</b>
§ 8.1. Расчет электромеханических переходных процессов в турбогенераторе со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения. . . . .	394
§ 8.2. Сложные переходные процессы в сверхпроводниковых турбогенераторах . . . . .	403
§ 8.3. Крутильные колебания ротора в режиме короткого замыкания . . . . .	413
§ 8.4. Критические скорости ротора криотурбогенератора . . . . .	423
§ 8.5. Демпфирование качаний ротора . . . . .	435
§ 8.6. Аномальные тепловые режимы ротора . . . . .	446
§ 8.7. Допустимая скорость изменения тока в сверхпроводниковой обмотке возбуждения . . . . .	453
§ 8.8. Форсировка возбуждения сверхпроводниковых синхронных машин . . . . .	457
§ 8.9. Резистивно-сверхпроводниковый коммутатор с тепловым управлением на основе композитного провода . . . . .	465
§ 8.10. Электродинамические моменты в сверхпроводниковых электрических машинах . . . . .	471
<b>Глава 9. Электроэнергетическое оборудование на базе высокотемпературных сверхпроводников. . . . .</b>	<b>477</b>
§ 9.1. Генераторы и электродвигатели . . . . .	477
§ 9.2. Ветроэнергетика . . . . .	482
9.2.1. Возобновляемые источники энергии (482). 9.2.2. Современное состояние разработок ветрогенераторов (485). 9.2.3. Ветро-	

станции энергетического назначения мощностью 1–15 МВт (487).	
9.2.4. Конструкция и параметры ветрогенераторов различных типов мощностью 1,5 и 5,0 МВт (493).	
9.2.5. Типы применяемых ВТСП обмоток статора и ротора (502).	
9.2.6. Высоковольтные тоководы сверхпроводниковой обмотки статора (502).	
9.2.7. Криогенное обеспечение (503).	
9.2.8. Уплотнение вала ротора (503).	
9.2.9. О работе ветроагрегата в энергосистеме (504).	
9.2.10. ВТСП гидрогенератор мощностью 1,25 МВт (507).	
§ 9.3. Судовые электрические машины и устройства . . . . .	508
§ 9.4. Авиационная электроэнергетика . . . . .	523
§ 9.5. Трансформаторы и токоограничители . . . . .	527
§ 9.6. Накопители энергии . . . . .	542
9.6.1. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (542).	
9.6.2. Мобильные сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии в энергосистеме штата Каролина, США (545).	
§ 9.7. Сверхпроводниковые кабели различных классов напряжения . . . . .	545
9.7.1. Кабели из ВТСП в стадии испытаний и эксплуатации (547).	
9.7.2. Конструкция (552).	
9.7.3. Разработки и проекты (554).	
9.7.4. Стоимость ВТСП обмоточного материала (564).	
<b>Глава 10. Опыт создания сверхпроводниковых синхронных генераторов с бесщеточной системой возбуждения . . . . .</b>	<b>565</b>
§ 10.1. Требования к системам возбуждения сверхпроводниковых синхронных машин . . . . .	566
§ 10.2. Расчет параметров и характеристик топологического возбудителя . . . . .	568
§ 10.3. Сверхпроводниковый синхронный генератор со статическим топологическим возбудителем . . . . .	571
§ 10.4. Модель обращенного сверхпроводникового топологического возбудителя ТПП-5 . . . . .	573
§ 10.5. Опытная модель бесконтактного сверхпроводникового синхронного генератора . . . . .	577
10.5.1. Технические данные и конструкция сверхпроводникового синхронного генератора с топологическим возбудителем (577).	
10.5.2. Результаты экспериментального исследования (582).	
§ 10.6. Статическая модель топологического возбудителя . . . . .	585
10.6.1. Статический топологический возбудитель СТПГ-11 (586).	
10.6.2. Статический топологический генератор СТПГ-23 обращенного исполнения (588).	
Заключение . . . . .	591
Список литературы . . . . .	599