

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
Раздел 1. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ДЕФЕКТЫ, ОТКАЗЫ, СРОК СЛУЖБЫ	10
Раздел 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	27
2.1. Турбогенераторы с воздушным охлаждением типов Т, Т2.....	27
и с водородным охлаждением серий ТВ и ТВ2.....	27
2.2. Турбогенераторы с непосредственным (форсированным) водородным охлаждением серий ТВФ и ТГВ	29
2.3. Турбогенераторы с непосредственным водородно-водяным охлаждением серий ТВВ и ТГВ	31
2.4. Турбогенераторы с полным водяным охлаждением серии ТЗВ.....	34
2.5. Турбогенераторы с воздушным охлаждением нового поколения серий Т, ТФ, ТЗФ, ТТК	38
Раздел 3. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	41
3.1. Эксплуатационный контроль турбогенераторов	44
3.1.1. Эксплуатационный штатный контроль	44
3.1.2. Эксплуатационный периодический контроль	46
3.2. Регламентированный контроль турбогенераторов в плановые ремонты	48
3.3. Целевое обследование турбогенераторов	55
Раздел 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	65
4.1. Технический осмотр турбогенераторов	65
4.1.1. Эндоскопический контроль	82
4.1.2. Капиллярный контроль металлов	86
4.1.3. Магнитно-порошковый контроль металлов	89
4.1.4. Металлографический контроль	89
4.2. Измерительный контроль, испытания; диагностирование.....	90
4.2.1. Линейные измерения	91
4.2.2. Общепромышленные электрические измерения и испытания	98
4.2.2.1. Измерения сопротивления обмоток статора	99
и ротора постоянному току	99
4.2.2.2. Измерение сопротивления изоляции обмоток и конструктивных составных частей турбогенераторов	101
4.2.2.3. Измерение сопротивления обмотки ротора переменному току	106
4.2.2.4. Испытание изоляции статорной обмотки повышенным выпрямленным напряжением.....	106
4.2.2.5. Испытание изоляции статорной обмотки повышенным напряжением переменного тока	108
4.2.2.6. Испытание изоляции обмотки ротора повышенным напряжением переменного тока	113
4.2.2.7. Особенности испытаний изоляции повышенными напряжениями иностранными фирмами.....	114
4.2.2.8. Безопасность проведения испытаний	114
4.2.3. Специальные измерения и испытания турбогенераторов и их составных частей ...	114
4.2.3.1. Определение мест замыканий статорных обмоток на «землю».....	115
4.2.3.2. Определение мест замыкания обмоток возбуждения на вал ротора	118
4.2.3.3. Контроль витковых замыканий в обмотках возбуждения	125

4.2.3.4. Определение места разрыва обмотки возбуждения	129
4.2.3.5. Особенности электрических испытаний изоляции статорных обмоток турбогенераторов с водяным охлаждением	130
4.2.3.6. Испытание изоляции лобовых частей обмоток статоров выпрямленным напряжением с подачей напряжения на поверхность изоляции	132
4.2.3.7. Измерение частичных разрядов в изоляции статорных обмоток.....	135
4.2.3.8. Контроль паяных соединений статорных обмоток.....	138
4.2.3.9. Испытания активной стали статора.....	140
4.2.3.10. Вибрационные и виброакустические измерения и испытания.....	145
4.2.3.11. Контроль истирания изоляции обмоток турбогенераторов и выкрашивания сегментов активной стали	158
4.2.3.12. Контроль проходимости статорной обмотки турбогенераторов с непосредственным охлаждением	160
4.2.3.13. Контроль герметичности статорной обмотки турбогенератора с водяным охлаждением.....	165
4.2.3.14. Ультразвуковой контроль (УЗК)	176
4.2.3.15. Интегральный контроль перегревов в турбогенераторе	181
4.2.3.16. Тепловизионный контроль	184
4.2.3.17. Особенности испытания турбогенераторов на нагревание	198
4.2.3.18. Электроэрозия в турбоагрегатах	204
4.2.4. Требования контроля турбогенератора по ИЕС 60034-23	207
Раздел 5. КОНТРОЛЬ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	209
Раздел 5.1. Корпус генератора, торцевые щиты	209
Раздел 5.2. Щеточно-контактный аппарат, контактные кольца.....	215
Раздел 5.3. Масляные уплотнения вала ротора	232
Раздел 5.4. Сердечник активной стали	249
Раздел 5.5. Вал ротора с клиньями	265
Раздел 5.6. Вентиляторы	273
Раздел 5.7. Обмотка возбуждения, демпферная система, токоподвод.....	277
Раздел 5.8. Бандажные кольца.....	292
Раздел 5.9. Обмотка статора	307
Раздел 5.10. Выводы концевые	330
Раздел 5.11. Тепловой контроль турбогенератора	336
Раздел 5.12. Газоохладители и воздухоохладители	343
Раздел 5.13. Крепежные и уплотнительные детали	348
Раздел 6. СИСТЕМЫ РЕМОНТА. УВЕЛИЧЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО ПЕРИОДА. ПРОБЛЕМЫ РЕМОНТА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПО ИХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ	355
Раздел 7. ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ И ПОДДЕРЖАНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. МОДЕРНИЗАЦИЯ И ЗАМЕНА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ.....	365
Турбогенераторы ПАО «Силовые машины»	400
Турбогенераторы НПО «ЭЛСИБ» ОАО.....	402
Турбогенераторы ООО «Электротяжмаш-Привод»	402
Раздел 8. ОСОБЕННОСТИ РАССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ РАБОТЫ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	404
Приложения	407

Приложение 1. Термины и определения в области технического обслуживания и ремонта турбогенераторов.....	408
Приложение 2. Карта технического контроля. Корпус статора, торцевые щиты.....	412
Приложение 3. Карта технического контроля. Щеточно-контактный аппарат.	413
Приложение 4. Карта технического контроля. Уплотнения вала ротора турбогенератора с водородным охлаждением	414
Приложение 5. Карта технического контроля. Сердечник активной стали	416
Приложение 6. Карта технического контроля. Вал ротора с клиньями.....	418
Приложение 7. Карта технического контроля. Вентиляторы	420
Приложение 8. Карта технического контроля. Обмотка возбуждения (ротора).....	421
Приложение 9. Карта технического контроля. Бандажные и центрирующие кольца ротора турбогенератора	423
Приложение 10. Карта технического контроля. Статорная обмотка, выводы концевые...	426
Приложение 11. Карта технического контроля. Тепловой контроль	428
Приложение 12. Карта технического контроля. Газоохладители (воздухоохладители)...	429
Приложение 13. Ведомость технического состояния сборочной единицы (узла) турбогенератора. Статор (корпус, сердечник, обмотка, концевые выводы.	430
Приложение 14. Ведомость технического состояния турбогенератора.....	431
Приложение 15. Сводная ведомость выполненных работ	433
Приложение 16. Сводная карта информационного анализа технического состояния турбогенератора.....	435
Приложения 17 и 18. Информационные карты (образцы-фрагменты):.....	438
Приложение 19. Опросная карта.....	439
Приложение 20. Цифровые схемы обмоток статоров (примеры).....	442
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО РАЗДЕЛАМ ПОСОБИЯ	444
ЛИТЕРАТУРА	450
1. Нормативные документы РАО «ЕЭС России», Росэнергоатома», «Ростехнадзора». .	450
11. Техническая литература.....	454
III. Государственные стандарты, стандарты МЭК, использованные при подготовке книги.....	461
IV. Федеральные законы РФ.	462

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость надежного энергоснабжения промышленных предприятий, электро-транспорта и бытовых нужд населения сегодня ни у кого не вызывает сомнения. Но только энергетики знают насколько сложно решить эту задачу комплексно. Надежность энергоснабжения – это высокое исходное качество оборудования, его долговечность, устойчивость к эксплуатационным, в т.ч. экстремальным воздействиям, это грамотная оперативная работа с оборудованием, его техническое обслуживание и ремонт. В комплексном подходе к надежности содержатся высокие требования собственно к оборудованию и людям, его обслуживающим.

В предлагаемом пособии речь идет об одном из видов генерирующего оборудования – турбогенераторах.

Изложение автором материала подразумевает, что читатель, специализирующийся в оценке технического состояния турбогенераторов, достаточно хорошо знаком с конструктивными особенностями турбогенераторов и технологией их ремонта. Информация о конструкции турбогенераторов изложена в предлагаемой работе конспективно с упором на особенность реакции конструкции на воздействующие на нее факторы. Как минимум, более подробно читатель может изучить конструкцию турбогенераторов, обратившись к [1].

В соответствии с государственными стандартами и техническими условиями на турбогенераторы, последние должны при установленной системе их обслуживания и ремонта работать, по крайней мере, в течение 25 – 40 лет, причем требования более высокого срока службы соответствует турбогенераторам, изготовленным по ГОСТ-533-2000.

Означает ли это, что турбогенераторы, изготовленные до 2000 года, должны быть ограничены в сроке их службы? Что необходимо предпринять для продления срока службы? Какие должны быть приняты меры для того, чтобы не допустить преждевременного прекращения работы турбогенераторов?

В конце 1990-х годов в РАО «ЕЭС России» появился новый для энергетики термин: «живучесть оборудования стареющих ТЭС» [2]. Разработанная для тепломеханического оборудования тепловых электростанций концепция поддержания живучести оборудования показала, что при определенных условиях его срок службы может быть увеличен практически вдвое, т.е. со 170 – 250 тыс. часов до 300 – 400 тыс. часов (с 25 – 30 лет до 50 – 60 лет).

Реализация жизненного цикла ТЭС в пределах 50 – 60 лет может быть достигнута путем совершенствования метрологического, технологического и нормативного аспектов жизнедеятельности ТЭС с улучшением культуры производства. Проблема реализации концепции рассматривается как машино-человеческая система, предусматривающая снижение опасности внешних факторов воздействия, повышение устойчивости оборудования к этим факторам, повышение качества обслуживания оборудования.

Можно с уверенностью сказать, что задача повышения живучести турбогенераторов реальна и об этом свидетельствует практика их эксплуатации на электростанциях России в течение 40 – 50 лет.

Предложенный подход поддержания живучести оборудования стареющих станций является вполне достижимой альтернативой глобальной замены оборудования и экономически целесообразен. По крайней мере, он позволит оптимизировать инвестиции в энергетику в ближайшие 10 – 20 лет. Ознакомление автора с аналогичным подходом к оборудованию, отработавшему установленный срок службы в концерне «Росэнергоатом», за границей, в частности на АЭС «Ловииса» (Финляндия) говорит об идентичности направлений в этой работе не только в России, но и за рубежом.

Проблемы живучести турбогенераторов освещены автором в его книге «Поддержание живучести турбогенераторов» («Библиотечка электротехника». 2012, № 7, приложение к журналу «Энергетик»).

В «Основных положениях (Концепции) технической политики в электроэнергетике России на период до 20130 года» [129] отмечается неудовлетворительное состояние си-

стемы поддержания надежности действующего оборудования. Одной из причин этого называется отсутствие отраслевых критериев оценки его технического состояния, мер по выводу его из эксплуатации, по продлению ресурса или срока службы, модернизации, либо замене новым, более эффективным оборудованием.

Основным средством оценки состояния оборудования и обеспечения его надёжности Концепция признаёт диагностику оборудования и на ее основе – выявление напряженных элементов, контроль остаточного ресурса и обоснование ремонта по состоянию. Поставленная электроэнергетикой задача поддержания надежной работы турбогенераторов, установленных на тепловых и атомных электростанциях, в значительной степени может быть решена за счет высокого качества оценки их состояния и своевременного принятия корректирующих мер, обеспечивающих устойчивую эксплуатацию. Наиболее сложной частью этой работы являются объективно доказанные методы оценки остаточного ресурса турбогенераторов. К сожалению, качественных работ такого направления либо нет, либо они носят неконкретный характер. Тем не менее, практический опыт, накопленный отраслевыми организациями РАО «ЕЭС России», концерном «Росэнергоатом», изготовителями и владельцами оборудования, ремонтными организациями показывает, что надежность турбогенераторов может носить управляемый процесс, обеспеченный его составляющими: оценка технического состояния, ремонт, модернизация, замена составных частей генераторов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы контроля турбогенераторов, результаты оценки технического состояния их активных и конструктивных составных частей при проведении, как правило, планового технического обслуживания и регламентированного (типового) ремонта, а также контроля, выполняемого при целевых обследованиях. Для более глубокого анализа использованных в конструкциях турбогенераторов материалов и деградиационных процессов в них автор рекомендует обратиться к нормативным документам и литературным источникам, указанным в тексте книги.

В книге уделяется большое внимание требованиям технического осмотра турбогенераторов и их составных частей. Причиной этого является то, что, несмотря на результаты оценки технического состояния, полученные измерительным контролем и испытаниями, проблемы эффективного контроля не могут быть решены без квалифицированного эксперта, выполняющего технический осмотр.

Изложенный в пособии материал способствует решению следующих задач:

- обеспечение надежности работающих турбогенераторов;
- продление сроков службы, поддержание живучести стареющих турбогенераторов, в т.ч. за счет своевременного ремонта, модернизации и замены базовых составных частей;
- оптимизация структуры ремонтного цикла турбогенераторов;
- накопление информации для перехода к ремонту по техническому состоянию.

Рекомендованные критерии технического состояния в большинстве своем соответствуют требованиям конструкторской документации и нормативным документам электроэнергетической отрасли, в т.ч. в разработке отдельных видов которых автор принимал участие. Автор является также соавтором в создании ряда описанных в книге технических средств и методов диагностики турбогенераторов, которые в настоящее время успешно используются.

В книге нет указаний по технологии восстановления технического состояния составных частей турбогенераторов после выявления его отклонений. По вопросам ремонта рекомендуется обращаться к технической литературе, например [1, 6, 7], отраслевой ремонтной документации. В разд. 7 изложены основные рекомендации по обоснованию модернизации и замены турбогенераторов.

В книге не представлены специальные методы контроля технического состояния турбогенераторов с масляным охлаждением статорных обмоток по причине небольшого их количества на электростанциях России. Не в полной мере освещены вопросы оценки со-

стояния турбогенераторов с полным водяным охлаждением, в меньшей степени турбогенераторов с воздушным охлаждением последнего поколения в связи с недостаточной информацией о них.

В приложении представлены основные термины и определения в области технического обслуживания и ремонта турбогенераторов, которыми автор оперирует в тексте книги.

В отличие от первоначального издания книги значительное количество цветных рисунков помещено не отдельным блоком в конце книги, а размещены непосредственно в тексте.

Предлагаемая работа обобщает опыт оценки технического состояния турбогенераторов, работающих на тепловых и атомных электростанциях России, и может служить пособием, прежде всего, для начинающих специалистов, занятых техническим обслуживанием и ремонтом генераторов. Можно предположить, что книга будет полезна специалистам заводов-изготовителей турбогенераторов, а также студентам технических учебных заведений.

Актуальность предлагаемой читателям работы, её тематики подтверждается выступлениями руководителей отрасли.

На Всероссийском совещании 20.11.2015 «Об итогах подготовки субъектов электроэнергетики к прохождению ОЗП 2015-2016 годов» Заместитель Министра энергетики Российской Федерации А.В.Черезов назвал актуальной задачу в эффективности управления производственными активами, в т.ч. в совершенствовании оценки технического состояния оборудования электроэнергетики, оценки рисков, включая последствия отказов.

Им же в качестве первоочередных задач названа необходимость пересмотра и актуализации отраслевых нормативных документов с учётом внедрения новых технологий и зарубежного опыта, в числе которых названы «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ» и «Объём и нормы испытаний электрооборудования».

Поставлена задача на концентрацию ресурсов отрасли в повышении надёжности оборудования, в его модернизации, в повышении квалификации ремонтно-оперативного персонала.

На этом же совещании Руководитель «Ростехнадзора А.В.Алёшин обратил внимание на непроведение объектами энергетики плановых обследований и технических освидетельствований энергоустановок с целью продления срока эксплуатации.

Материал, предлагаемой читателям работы, по мнению автора должен оказать специалистам генерирующих компаний помощь в решении поставленных задач применительно к турбогенераторам.

Можно не сомневаться, что принятое Правительством РФ Постановление от 02.03.2017 № 244 «О совершенствовании требований к обеспечению надёжности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики и внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ» будет способствовать пересмотру и разработке новых правовых актов, в т.ч. с требованиями по «... контролю технического состояния объектов электроэнергетики ... и организации субъектами электроэнергетики ремонтной деятельности».

Автор с большим удовлетворением отмечает, что на протяжении своей производственной деятельности ему посчастливилось контактировать с прекрасными специалистами в области контроля технического состояния турбогенераторов, в т.ч. с В.Б. Бережанским, Б.Д. Ваксером, Ю.Р. Воеводским, О.С. Голодной, В.В. Городовым, Э.И. Гуревичем, В.Н. Забоиным, В.В. Поповым, И.Н. Поповым, Н.А. Козыревым, Н.В. Крупениным, В.Б. Кулаковским, Л.Г. Мамиконянцем, В.А. Пикульским, Ю.Н. Самородовым, Е.П. Силиной, К.А. Шишкиной и др., чей опыт, советы для автора бесценны, чьи идеи, публикации, фотографии использованы в настоящей работе.

Автор выражает особую благодарность работникам отдела по обследованию и диагностике электрических машин ПАО «Силовые машины», с которыми он достаточно продуктивно работал несколько лет, а также инженерам завода «Электросила», ЗАО НПП «Элек-

тротехнические системы 1». Автору довелось работать со специалистами многих электростанций России, Финляндии, Украины, с которыми внедрялась изложенная в предлагаемой книге концепция и практика оценки технического состояния турбогенераторов.

Автор, исходя из ограничения объёма книги, не имел возможности полностью повторить изложение отраслевых нормативных документов и заводских инструкций, оставив их подробное изучение за читателями.

При корректировке первой редакции книги автор не изменял нумерацию ранее приведённых ссылок на информационные источники, в ряде случаев новые источники приводит в тексте или добавляет их в конце списка источников.

Можно не сомневаться, что внимательное прочтение предлагаемого материала может в отдельных случаях выявить спорные суждения и предложения, равно как в процессе практического применения полученных знаний у читателей могут возникнуть вопросы и предложения.

Автор благодарит ООО "ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг" и «Общественный Совет специалистов по диагностике силового электрооборудования при ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг», в т.ч. А.Е.Утепова и В.Н.Осотова за оказанное внимание к моей работе, за подготовку её к изданию, тиражирование, рекламу и распространение в энергетическом сообществе.

Замечания и предложения просьба направлять непосредственно автору по адресу: gvrostik@gmail.com.

С уважением к читателям, Г.В.Ростик – инженер, Почётный энергетик МЭ РФ.

Из отзыва «Петербургского энергетического института повышения квалификации» (ФГАОУ ДПО «ПЭИПК») от 24.06.2016 № 05-14/808

..... Впервые в технической литературе в одной книге создано пособие, обобщающее опыт всесторонней оценки технического состояния турбогенераторов в процессе их жизненного цикла, включая функционирование, техническое обслуживание и ремонт.

Материал книги широко использован автором при чтении лекций в ПЭИПКе по теме «Ремонт и модернизация турбогенераторов».

Книга Г.В.Ростика «Оценка технического состояния турбогенераторов. Учебно-практическое пособие» может быть рекомендована в качестве литературы в сфере обучения и повышения квалификации специалистов генерирующих компаний, занятых обеспечением надёжной работы электростанций.

Ректор ПЭИПК, д.т.н., профессор
Зав. кафедрой ЭЭСЦ, к.т.н., доцент

А.Н.Назарычев
М.К.Ярмаркин