

Шевченко В.В., Минко А.Н.

**РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ
ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ**



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электрические машины» НТУ «ХПИ». Инженер-физик. В 2011 г. защитила диплом на квалификацию международного педагога в рамках международной подготовки IGIP. Награжденная 5 грамотами министра образования и науки, дипломом участника областного конкурса «Высшая школа Харьковщины - лучшие имена» в номинации «Декан факультета», грамотой Главного управления образования и науки Харьковской областной государственной администрации. Область научных интересов: энергосбережение в электроэнергетике, диагностика, надежность и реабилитация турбогенераторов ТЭС и АЭС, ветроэнергетика, сверхпроводимость в электроэнергетических установках. Имеет свыше 140 научных публикаций, 60 методических разработок, три монографии, семь авторских свидетельств.
E-mail: zurbagan_@mail.ru



Минко Александр Николаевич, заведующий сектором отдела проектирования турбогенераторов ГП завод «Электротяжмаш», аспирант. Образование: магистр по специальности «Профессиональное обучение. Электроэнергетика» и магистр по специальности «Педагогика высшей школы» (УИПА). Область научных интересов: теоретические основы проектирование и созданий мощных турбогенераторов, практическое применение методов и моделей оптимизации и модернизации конструкций действующих турбогенераторов, ремонт и интенсификация систем охлаждения крупных электрических машин.

Автор программы «Fahrenheit».
Имеет свыше 30 научных публикаций, одну монографию, 6 авторских свидетельств.
E-mail: alexander.minko@list.ru



УДК 621.313
ББК 31.261.62
Ш 37

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Артюх С.Ф., заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры НТУ «ХПИ», доктор технических наук, профессор.

Маренич К.Н., заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова» Донецкого НТУ, кандидат технических наук, доцент.

Шевченко В.В., Минко А.Н.

Ш 37 Шевченко В.В., Минко А.Н. Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов: монография. – Харьков: . ., 2013. – 242 .

ISBN 978-617-7033-20-1

Монография предназначена для широкого круга читателей. Основная часть материала монографии является результатом исследований авторов. Материал представляет интерес для научных работников и инженеров, занимающихся теорией и практикой проектирования и создания турбогенераторов, выбором их систем охлаждения. Материалы монографии могут быть использованы бакалаврами, магистрами и аспирантами специальности «Электрические машины», «Электрические станции», «Электроснабжение промышленных предприятий и распределение электроэнергии», при практических расчетах на заводах электромашиностроительного профиля и на ремонтных предприятиях.

Таблиц – 40, рисунков – 67, библиография – 122 наименований.

УДК
621.313
ББК 31.261.62

© В.В. Шевченко
© А.Н. Минко

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1 СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	15
1.1 Факторы, влияющие на срок службы электрической машины	15
1.1.1 Влияние состояния изоляции на срок службы турбогенераторов	15
1.1.2. Статистический анализ срока службы машин. Правило «восьми градусов» и «сервис-фактор».....	19
1.2. Основные этапы создания серий турбогенераторов	23
1.3. Перспективы, проблемы и направления совершенствования современных турбогенераторов	50
1.3.1. Задачи совершенствования параметров и режимов работы турбогенераторов для обеспечения устойчивой работы энергосистемы	50
1.3.2. Ограничения габаритов крупных электрических машин	52
1.3.3. Системы охлаждения турбогенераторов	54
1.3.3.1. Виды хладагентов, используемых для охлаждения электрических машин	54
1.3.3.2. Естественное и искусственное охлаждение ЭМ.....	60
1.3.4. Новый период использования воздушного охлаждения в турбогенераторах	67
1.3.4.1. Этапы производства турбогенераторов с воздушным охлаждением	67
1.3.4.2. Работы по созданию турбогенераторов с воздушным охлаждением в Украине и России.....	84
2 ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАСЧЕТА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	94
2.1. Общая теория тепловых процессов в электрических машинах	94
2.1.1. Основные положения теплопроводности	94
2.1.2. Уравнение теплопроводности и гидромеханики для электрических машин	103
2.1.3. Методы анализа гидравлических и тепловых процессов в электрических машинах	106
2.1.4. Типовые уравнения тепловых сопротивлений для электрических машин	111

2.1.5. Теплопроводность конструкционных материалов, используемых для электрических машин	119
2.2 Обзор систем охлаждения и эксплуатационный динамический контроль теплового состояния крупных электрических машин	126
2.2.1 Современные типы систем охлаждения крупных электрических машин	126
2.2.2. Система эксплуатационного динамического контроля теплового состояния электрических машин.....	133
3 СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОСТРОЕНИЯ С КРИОГЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ	139
3.1. Общие положения, области использования сверхпроводимости и криогенного охлаждения в технике	139
3.1.1. Области использования низкотемпературных сверхпроводников	139
3.1.2. Области использования, технология изготовления и структура высокотемпературных сверхпроводников	147
3.2. Анализ особенностей работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для сверхпроводниковых ТГ	152
3.2.1. Области использования сверхпроводников для электротехнических устройств.....	152
3.2.2. Некоторые аспекты теории сверхпроводимости и технологии изготовления сверхпроводников	159
3.2.3. Особенности работы материалов при криогенных температурах и выбор материалов для сверхпроводниковых турбогенераторов	166
3.3. Актуальные направления развития техники низких температур в турбогенераторостроении с точки зрения снижения энергопотребления.....	173
3.4. Области использования ВТСП-щих синхронных генераторов в энергетике от возобновляемых источников.....	177
3.5. Конструктивные решения турбогенераторов с использованием сверхпроводников	180
4 ОПТИМИЗАЦИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И РЕМОНТ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	187
4.1. Обзор условий оптимизации массогабаритных параметров турбогенераторов	187
4.2. Факторы, определяющие возможность проведения оптимизации параметров, изготовления и эксплуатации электрооборудования	190
4.3. Методы оценки и показатели уровня технологической оснащенности производства турбогенераторов	192

4.4. Пути повышения прочности электромеханических конструкций электрических машин	199
4.5. Расчет материалоемкость конструкций турбогенераторов	203
4.6. Параметрическая связь физических свойств охлаждающей среды с показателями массы и габаритов турбогенераторов.....	210
4.7. Основные расчетные данные и главные размеры конструкций турбогенераторов с водородной и воздушной системами охлаждения	214
4.8. Рекомендации по проведению ремонта систем охлаждения турбогенераторов	220
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	232

АННОТАЦИЯ

Общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует оценка его конкурентоспособности, одним из главных критерием которого являются, наряду с массогабаритными характеристиками электрических машин (ЭМ), надежностью и электромагнитной загруженностью, тепловое состояние и обеспечение необходимой и достаточной системы охлаждения. К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при проектировании ЭМ, наряду с максимально допустимыми механическими и электрическими нагрузками, возможностью осуществления технологических операций, установлению массогабаритных параметров конструкций, которые характеризуют эффективность геометрии машины, степенью рациональности выбора и использования конструкционных материалов и трудоемкостью технологических операций, относятся значения допустимых температур активных элементов конструкций.

В настоящем издании использован опыт проектирования и результаты практической работы по созданию турбогенераторов (ТГ) ГП завод «Электротяжмаш» (г. Харьков), опыт авторов в подготовке специалистов в области электромашиностроения и электроэнергетики в Национальном техническом университете «ХПИ». Рассмотрены вопросы истории создания отечественных серий ТГ с учетом изменения систем охлаждения. Определены факторы, влияющие на срок службы ЭМ, задачи совершенствования параметров ТГ для обеспечения устойчивой работы энергосистемы. Особое внимание уделено рассмотрению вопросов использования воздушного охлаждения в ТГ отечественного производства, их режимов работы, особенностей конструкций и систем охлаждения, задачи, которые возникают при создании ТГ с воздушным охлаждением, а также состояние и перспективы развития криогенного и сверхпроводящего турбогенераторостроения.

В конце 20-го века первоочередным стал вопрос оптимизации технико-экономических параметров, массогабаритных показателей и экономии материалов электромеханических устройств, повышения мощности единицы установленного электрооборудования (ЭО). Появился ряд научных работ, в которых рассматривается параметрическая оптимиза-

ция конструкций и функциональных связей основных геометрических размеров с электромагнитными показателями, тепловыми и механическими характеристиками ЭМ. Кроме того, получены определенные результаты по рациональному выбору материалов и типов конструкций ЭМ с целью экономии материалов, уменьшению их себестоимости, повышению надежности и теплового состояния.

Проводится оценка методов расчета главных размеров турбогенераторов, анализ соотношения массогабаритных параметров, обеспечения механической надежности конструкций и выбора системы их охлаждения. Приведена экономическая оценка выполнения турбогенераторов (ТГ) с различными системами охлаждения, с перспективным в настоящее время воздушным охлаждением, с облегченной при этом конструкцией неактивной зоны, рассмотрены особенности унификации деталей машин и её связей с массогабаритными показателями и степенью трудоемкости выполняемых работ.

Отзывы о книге, замечания и пожелания просьба присылать на электронные адреса авторов.

ВВЕДЕНИЕ

Турбогенераторы (ТГ) – сложный тип электрических машин (ЭМ), обеспечивающих свыше 90 % общего мирового объема выработки электроэнергии. Они устанавливаются на тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанциях и предназначены для выработки электроэнергии при непосредственном соединении с паровыми или газовыми турбинами. При расчете и проектировании новых ТГ всегда решаются задачи повышения мощности и электромагнитных нагрузок при одновременном снижении массы и габаритов, вопрос снижения потерь, рассматриваются вопросы совершенствования способов охлаждения, повышения статической и динамической прочности элементов конструкций и их надежности. Обеспечение максимальной эксплуатационной надежности и экономичности ТГ является важной научно-технической проблемой электромашиностроения и, в конечном счете, является вопросом энергетической независимости государства.

За последние годы конструкции ТГ были значительно изменены за счет использования новых материалов (в основном, изоляционных) и новых технологий изготовления. В дополнение к обеспечению основных электромагнитных характеристик, эти технологии позволяют достичь улучшенного распределения потерь, организовать более эффективную вентиляцию, снизить температуру и вибрации. При этом необходимы более точные методы расчетов, т.е. необходимо иметь возможность более точно рассчитывать основные и добавочные потери, а также учитывать распределение температуры по объему машины.

Основной вклад в развитие турбогенераторостроения, в развитие теории, разработку вопросов расчета, проектирования и эксплуатации ТГ внесли многие ученые, исследователи, конструкторы, среди которых, в первую очередь, следует отметить Алексева А.Е., Лютера Р.А., Костенко М.П., Бергера А.Я., Данилевича Я.Б., Ефремова Д.В., Иванова Н.П., Глебова И.А., Казовского Е.Я., Еремина М.Я., Вольдека А.И., Жерве Г.К., Важнова А.И., Видемана Е., Келленбергера В., Шуйского В.П., Готтера Г., Данько В.Г., Хуторецкого Г.М., Кузьмина В.В. и многих других, [4, 15, 21, 22, 23, 26, 27, 29, 30, 32, 36, 45, 46, 52, 54, 65, 79, 81, 87, 104].

По способу охлаждения ТГ подразделяются на машины с воздушным, косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением.

Тепловые процессы имеют важное практическое значение на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации ЭМ. Современные методики контроля и расчетов с использованием ЭВМ позволяют решать задачи любой сложности по анализу их теплового состояния, по определению температурных полей или расчету температуры отдельных узлов, например, с помощью эквивалентных тепловых схем (ЭТС) замещения, [79]. При оптимальном проектировании, когда необходимо сравнивать несколько вариантов машины, температурные ограничения зачастую являются решающими. Использование для оценки теплового состояния относительно несложных ЭТС наталкивается на определенные трудности. Прежде всего, это относится к расчету тепловых сопротивлений. Трудности, связанные с необходимостью правильного учета процессов теплоизлучения, сложная конфигурация поверхностей охлаждения и неоднозначность коэффициентов теплоотдачи, многообразие удельных тепловых характеристик изоляционных и активных материалов, сложность определения путей движения тепловых потоков и потоков охлаждающих жидкостей и газов, приводят к тому, что ошибки при расчете тепловых сопротивлений могут быть значительны.

В настоящее время отмечены мировые тенденции перехода в машинах мощностью 200÷300 МВт и более на воздушное охлаждение, т.е. замены водорода в объеме генератора на воздух. По сравнению с генераторами с водородным охлаждением, ТГ с воздушным охлаждением просты в эксплуатации, но недостатком их могут оказаться повышенные механические потери, некоторое повышение температуры активных частей, а иногда и большие размеры. Для того чтобы разработать эффективные ТГ с воздушным охлаждением, которые имели бы малый вес, высокий КПД и работали бы при более низких температурах, следует изучать параметры узлов конструкции и определять их влияние на характеристики машины. Первым шагом решения проблемы снижения и более равномерного распределения температур по объему статора и ротора было применение метода *Taguchi* («активный дизайн», [114-120]),

использование которого позволяет рассчитать и выбрать более эффективную вентиляцию, уменьшить диаметр ротора и механические потери. Исследования по этому методу показали, что потери в стали сердечников не всегда доминирующие, а потери во внешних конструкциях статора могут составлять значительную часть от общих потерь в стали. Соответственно, необходимо анализировать факторы влияния каждого узла и, путем выбора оптимальной комбинации параметров конструкции, свести к минимуму превышение температуры, веса и потерь.

В Украине в настоящее время также ведутся работы по созданию ТГ с воздушным охлаждением мощностью до 200 МВт и более. Так, например, на ГП «Завод «Электротяжмаш» создан «воздушный» генератор мощностью 160 МВА, с КПД 98,75 %, имеющий малый вес, уровень нагрева и высокую эффективность, [54]. Турбогенераторы этого диапазона мощностей наиболее перспективны, т.к. роль ТЭС в электроэнергетике страны остается достаточно высокой, [94, 97], а значительный износ оборудования на них в ближайшее время потребует не просто модернизации, а полной замены оборудования, в том числе ТГ именно этого диапазона мощностей.

Экономическое положение в стране делает невозможным проводить полную плановую замену оборудования на ТЭС, износ которого уже к 2006 г. оценивался практически в 90–100 %, [54, 92], поэтому необходимо искать новые методы, которые позволят продлить срок эксплуатации ТГ путем проведения их реабилитации. Для этого нужны новые методы диагностики, новые материалы, интенсифицированные системы охлаждения. При этом целесообразно на прежние фундаменты устанавливать более мощные машины или даже изменять их тип. Например, к новому типу электрооборудования, эффективному, хорошо управляемому, позволяющему влиять на качество электроэнергии, следует отнести асинхронизированные турбогенераторы (АСТГ), которые обеспечивают повышение маневренности, стойкости и возможность потребления избыточной реактивной энергии, нормализацию режимов работы энергосистем по напряжению, балансу реактивной мощности, пропускной способности и стойкости. Эксплуатационные характеристики ТГ старых типов, действующих на большинстве электростанций, не всегда отвечают

требованиям обеспечения надежности их работы и работы энергосистем. Это ограничивается возможностями существующих систем охлаждения и возникающими избыточными механическими усилиями в торцевых пакетах сердечника статора, ограничениями в возможностях систем контроля, сложностями внедрения автоматизации и т.д.

Альтернативой использования АСТГ может стать изменение режимов эксплуатации классических ТГ, например, переход от номинальных режимов с $\cos\varphi = 0,9 \dots 0,91$ (опережающий) в режимы недовозбуждения с $\cos\varphi$, близким к единице, что позволит не генерировать в сеть емкостную энергию, а «откачивать» ее из энергосистемы и при этом повышать активную мощность ТГ.

Кроме перехода к «воздушным генераторам», важной тенденцией в развитии турбогенераторостроения является создание агрегатов большой единичной мощности, что позволит снизить материальные расходы на единицу оборудования, повысить экономичность и КПД установок в целом. В 80-х годах прошлого века эта тенденция была приостановлена (после изготовления на НПО «Электросила» трех ТГ мощностью 1200 МВт) из-за недостаточной мощности электросетей, [87]. Но в настоящее время потребность в генерирующих единицах большой мощности опять стала актуальна, а также и возможна – мощность электросетей возросла, и выход из строя ТГ мощностью в 1200÷1500 МВт уже не нанесет непоправимого ущерба энергосистеме. Но с ростом единичной мощности снижается механическая прочность элементов валопроводов мощных агрегатов, а при некоторых режимах (отключение, короткие замыкания, автоматическое повторное включение) механические напряжения валопровода могут превысить допустимые, [62, 66]. Поэтому обеспечение устойчивости и надежности работы ЕЭС возможно только при широком применении систем управления, важное место среди которых занимают системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) ТГ, частоты вращения турбин, активной мощности электрических станций и т.д.

К факторам, которые сдерживают повышение единичной мощности ТГ, следует также отнести состояние смежных отраслей производства (металлургия, химическая промышленность, производство турбин и ядерных реакторов), состояние энергосистемы (линий электропередач и

подстанций), а также обеспечение надежности мощных агрегатов с повышенной электромагнитной, механической и тепловой нагрузкой. Возможны также проблемы транспортировки ТГ очень большой мощности на место установки.

В действующих ТГ при изменении режима эксплуатации наблюдается избыточный нагрев конечных (торцевых) пакетов сердечников статора с нарастающими в таких режимах механическими усилиями, [64,65,71,72]. В них несовершенны способы крепления лобовых частей обмоток статоров, используются устаревшие материалы, в том числе прокладочные. Несовершенные системы крепления лобовых частей вызывают ослабление конструкции, усиление вибрации стержней, повышение вероятности замыканий в пазовых частях обмотки статора. Вибрации стержней обмоток статора ТГ с водяным охлаждением приводит к нарушению герметичности трактов подачи воды, что может спровоцировать аварию. С учетом вышеизложенного, при проектировании новых ТГ следует устанавливать, кроме основных (уточненных и новых), дополнительные требования, такие как:

- повышенная маневренность ТГ по выработке активной и реактивной энергии с возможностью глубокого потребления последней из электросети. Потребление реактивной мощности должно ограничиваться только фактором устойчивости работы генератора, а не нагревом и механическими процессами в торцевых зонах сердечника статора. Следует продолжать работы по повышению надежности систем АРВ генератора;

- при проектировании следует предусмотреть установку в генераторах тиристорных пусковых устройств для обеспечения высокой маневренности (в частности, скорости пуска и останова) частотным методом;

- обеспечение возможности регулирования частоты вращения генераторов при сохранении неизменной частоты электромагнитных параметров, высокую управляемость и контролепригодность с широкой степенью автоматизации. Это требование целесообразно и для генераторов, работающих от возобновляемых источников электроэнергии (ГЭС, ГАЭС, ветровых, приливных и др. электростанций);

- следует совершенствовать системы охлаждения мощных ТГ, вести работы, направленные на отказ в них от водородного охлаждения, что

также способствует повышению надежности и безопасности работы машин и блоков электростанций.

Повышенное внимание к воздушному охлаждению, общая тенденция отказа от водорода и, в перспективе, от воды в крупных ТГ, определяется переориентацией мировой энергетики на электростанции средней и малой мощности.

Исключение из системы охлаждения взрывоопасного водорода с обеспечением необходимого теплосъема, лучшими технико-эксплуатационными показателями (КПД, маневренность, перегрузочная способность, надежность, масса и габариты) позволит сделать отечественные ТГ конкурентоспособными на мировом рынке, увеличить срок их службы и длительность межремонтных периодов, повысить коэффициент готовности и маневренности, обеспечит запас мощности и безаварийную работу ТГ в различных режимах, снизит расходы на обслуживание и ремонты и т.д., [28,50,65,71,97,105,109].