

# ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ МОЩНОСТЬЮ ДО 350 МВт

Антонюк О.В.  
Главный конструктор  
ОАО «Силовые машины», филиал «Электросила»  
С-Петербург, Россия

Турбогенераторы с воздушным охлаждением отличаются высокой надежностью, взрывобезопасностью, простотой и удобством в эксплуатации. С учетом возрастающего спроса в ОАО «Силовые машины» филиале «Электросила» в Санкт-Петербурге разработана новая серия турбогенераторов с воздушным охлаждением для паровых и газовых турбин номинальной активной мощностью до 350 МВт (Рис.1). К настоящему моменту изготовлены и успешно эксплуатируются на местах установки около сорока единиц турбогенераторов этой серии.



Рис.1. Турбогенератор мощностью 160 МВт для газовой турбины.

ПГУ-450

Турбогенераторы имеют статические системы возбуждения со стопроцентным резервированием тиристорных выпрямителей и двухканальным цифровым регулятором возбуждения. В случае использования турбогенераторов в составе газотурбинных установок в комплект поставок также входят тиристорные микропроцессорные пусковые устройства. Микропроцессорные устройства управления и регулирования оснащены цифровыми средствами коммуникаций с общестанционными автоматизированными системами.

В табл.1 показаны этапы освоения в производстве генераторов рассматриваемой серии.

Таблица 1

Год начала изготовления	1999	2007	1998	1999	2008	2009
Мощность турбогенератора, МВт	63	90	110	160	250	350

**Основная цель**, поставленная при разработке новой серии турбогенераторов - получение высокого коэффициента полезного действия (КПД) при обеспечении надежности, низких уровнях вибрации и нагрева. Решение этой задачи оказалось возможным при пересмотре ряда традиционных концепций расчета, проектирования и технологии производства. Рассмотрим конструктивные особенности турбогенераторов.

### ОБМОТКА И СЕРДЕЧНИК СТАТОРА

В серии турбогенераторов с воздушным охлаждением использована традиционная двухслойная стержневая обмотка статора с транспозицией элементарных проводников, как в пазовой, так и в лобовой зоне. Верхний и нижний стержень имеют разное количество элементарных проводников для выравнивания удельных потерь по высоте стержня.

Существенное значение имеет качество высоковольтной изоляции обмотки статора. Применение сухой утоненной изоляции стержней с последующей вакуумно–нагнетательной пропиткой статора с обмоткой по технологии «Global VPI» (Рис.2) снизило трудоемкость изготовления, позволило уменьшить перепад температуры по толщине изоляции и повысить удельные токовые нагрузки при обеспечении нагрева изоляции класса F по классу В. При вакуумно-нагнетательной пропитке статора с обмоткой зазоры между обмоткой и сталью

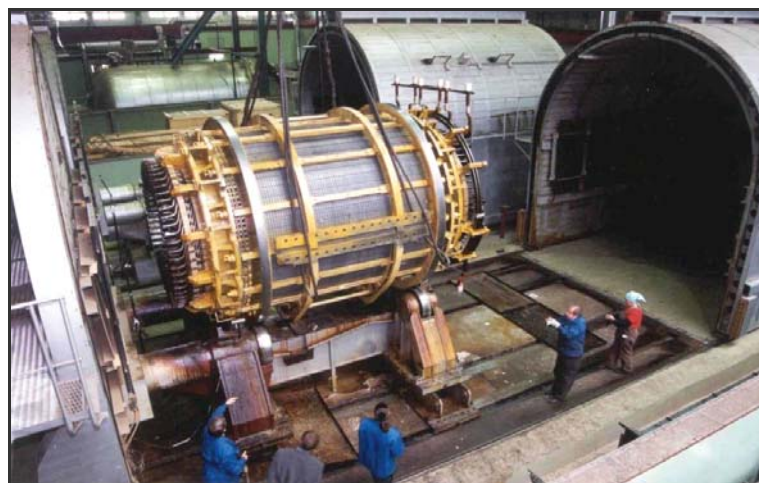


Рис.2. Статор перед вакуумно-нагнетательной пропиткой

сердечника полностью заполняются компаундом, повышается теплопроводность изоляции и увеличивается жесткость сердечника по отношению к изгибным колебаниям под действием радиальных электромагнитных сил.

В связи с большими габаритами турбогенератора мощностью 350 МВт при изготовлении обмотки статора применяется технология вакуумно-нагнетательной пропитки отдельных стержней (Single VPI).

С целью снижения потерь в сердечнике статора применена холоднокатанная электротехническая сталь с пониженными магнитными потерями. При креплении сердечника на ребрах (Рис.3) для ограничения замыкания вихревых токов использована изоляция крайних пакетов от крепящих ребер. В генераторах мощностью более 160 МВт применены гибкие медные шины для замыкания вихревых токов, наведенных магнитным полем рассеяния сердечника статора в крепящих ребрах. Замыкание токов в шинах обеспечивает защиту крайних пакетов сердечника и нажимных колец статора от дополнительных потерь мощности и нагрева.

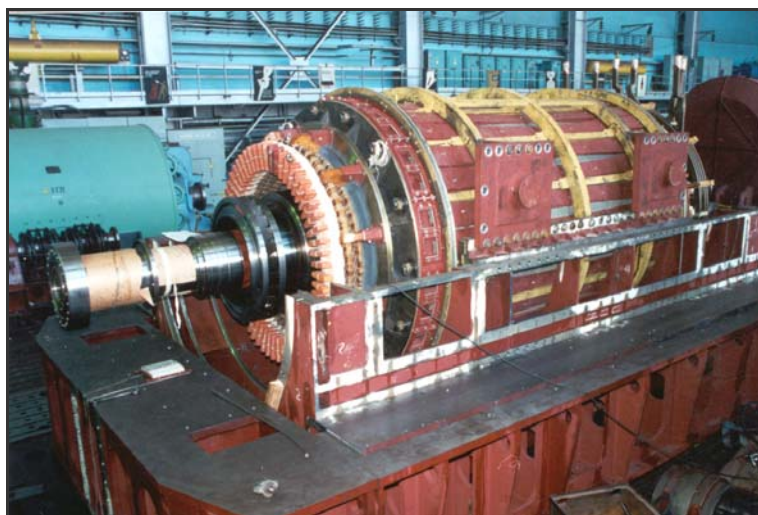


Рис.3. Статор турбогенератора мощностью 160 МВт

### ОБМОТКА И ВАЛ РОТОРА

Для изготовления ротора используется стальная поковка высокой прочности с легирующими добавками. В бочке ротора фрезеруются прямоугольные пазы для укладки обмотки. Конструкция ротора с непосредственным охлаждением показана на рис.4.



Рис.4. Ротор турбогенератора с воздушным охлаждением

При укладке обмотки в пазы ротора применена технология пайки с высокочастотным индукционным нагревом. Распределение многовитковой катушечной обмотки ротора по пазам выбрано из условия получения наилучшей формы поля, при которой магнитное поле возбуждения максимально используется для создания первой гармонической напряжения на зажимах генератора. В процессе проектирования минимизировались как основные потери в обмотке возбуждения, так и добавочные потери на поверхности статора от гармонических высших порядков поля возбуждения. Благодаря исключению третьей гармоники поля возбуждения удалось каждый турбогенератор спроектировать на два напряжения: при соединении обмотки статора в звезду и треугольник.

Важной задачей проектирования является устранение неравной жесткости (двойкой жесткости) ротора по продольной и поперечной оси. Для ее решения необходимо устранить анизотропию на каждом сечении вала ротора. Эффективно устраняют анизотропию сечений бочки ротора продольные пазы на большом зубе каждого полюса. Размеры и количество этих пазов выбираются с целью выравнивания главных моментов инерции ротора. Для того, чтобы обусловленный неравной жесткостью ротора уровень вибрации на двойной частоте вращения не превышал 1.5 мм/сек, необходимо обеспечить величину коэффициента неравной жесткости не более 1.5%. Здесь коэффициент неравной жесткости есть отношение разности максимальных статических прогибов по направлениям главных осей инерции к их сумме.

Выравнивающие пазы заполняются магнитным материалом с прокладками из текстолита. При вращении ротора вследствие сдвиговой деформации прокладок продольные усилия на заполнитель снижаются, и заполнитель не ужесточает бочку ротора. Заполнитель удерживается в выравнивающих пазах с помощью клиньев, входящих в полную демпферную



систему ротора. Система выравнивания двоякой жесткости обеспечивает предельно низкий уровень вибрации ротора и его опор с двойной оборотной частотой.

## СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ И ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ

Для повышения эффективности охлаждения активных частей применены новые технические решения (Рис.5), позволяющие рационально распределить воздушные потоки в системе охлаждения.

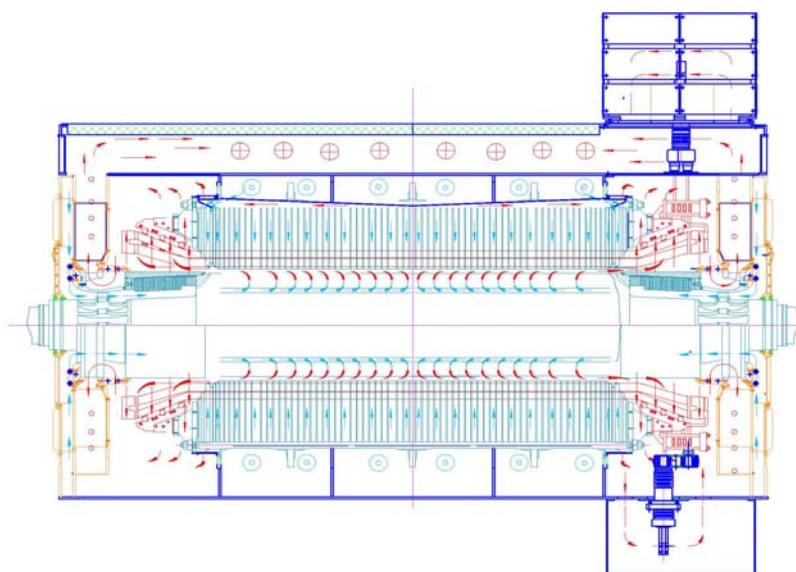


Рис.5. Система охлаждения турбогенераторов

В выбранной вытяжной схеме вентиляции применено разделение контуров циркуляции воздуха в сердечнике статора и обмотке ротора. Существенной особенностью генераторов серии является использование центробежных вентиляторов, обеспечивающих циркуляцию охлаждающего воздуха по каналам сердечника статора. Что касается движения воздуха по каналам ротора, то оно создается исключительно за счет давления, создаваемого этими каналами. Применение встроенных центробежных вентиляторов, снабженных направляющими и спрямляющими аппаратами, а также использование в полной мере напорных возможностей ротора позволило снизить уровень механических потерь.

Как и в большинстве крупных мировых компаний, для охлаждения обмотки ротора в пазовой части используются радиальные каналы, а в лобовой - аксиальные каналы. Радиальные каналы снабжаются охлаждающим воздухом при помощи подпазовых каналов.

На начальном этапе проектирования турбогенераторов с воздушным охлаждением система охлаждения роторов была подробно исследована на полномасштабной вращающейся модели. Благодаря полученным экспериментальным данным было обеспечено эффективное охлаждение обмотки ротора. В качестве примера, на рис.6 представлена зави-

симось превышения температуры обмотки ротора турбогенератора мощностью 160 МВт от потерь на возбуждение, полученная в эксплуатационных условиях. Нагрев обмотки ротора при номинальном токе возбуждения имеет существенный термический резерв.

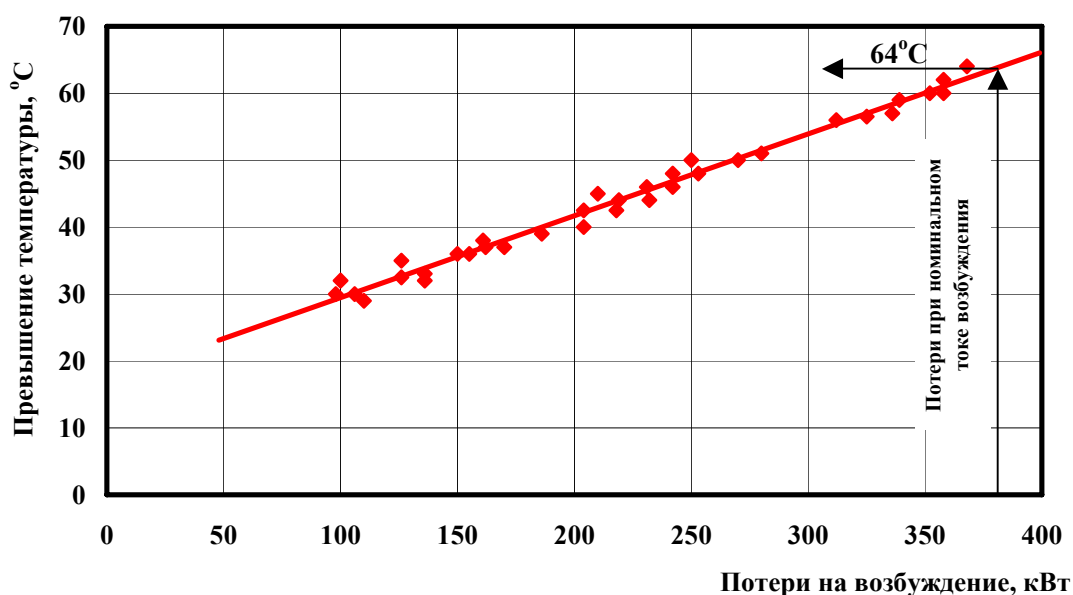


Рис. 6. Зависимость превышения температуры обмотки ротора от потерь на возбуждение

Основным преимуществом, которое достигнуто в турбогенераторах данной серии, является равномерное газоснабжение каналов сердечника статора и, как следствие, практически равномерное распределение температур обмотки и активной стали по окружности и по длине статора. В качестве примера на рис.7 для турбогенераторов

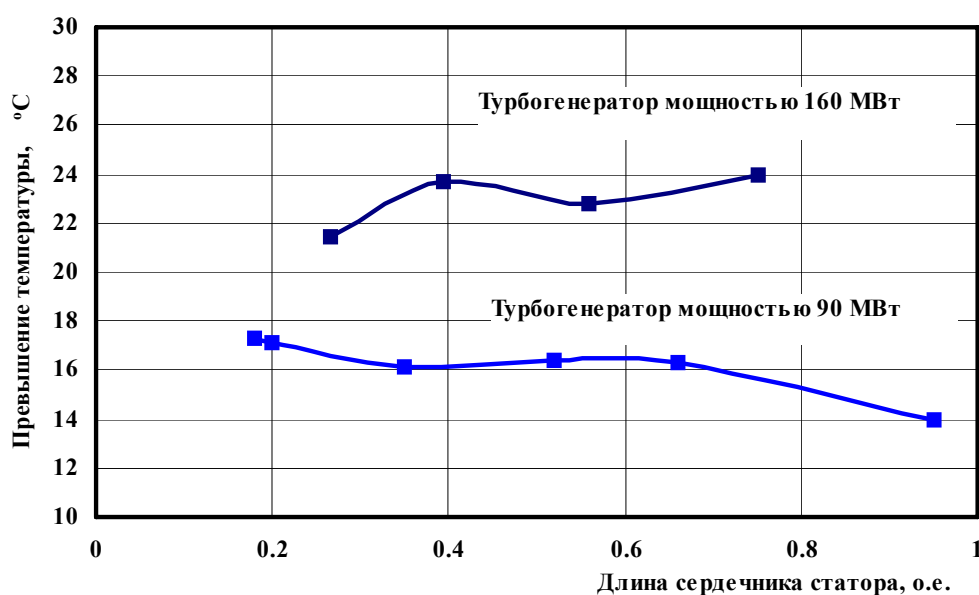


Рис.7. Распределение превышения температуры зубцов в середине толщины пакетов по длине сердечника статора

различной мощности показаны распределения превышения температуры зубцов, измеренные в середине толщины пакетов, по длине сердечника статора в режиме короткого замыкания с номинальным током статора при испытаниях на стенде завода.

Как показывают испытания в условиях эксплуатации различных образцов турбогенераторов рассматриваемой серии, отличие максимальной температуры от средней, измеренной по штатным термометрам сопротивления, для обмотки статора не превосходит величины  $7^{\circ}\text{C}$ , а для активной стали  $5^{\circ}\text{C}$  независимо от конкретного исполнения и номинальной мощности турбогенератора.

Практически равномерное распределение температуры в статоре достигнуто за счет того, что потери, выделяющиеся в пазовой части отводятся системой U-образных каналов, не сообщающихся с воздушным зазором между статором и ротором. Система U-образных каналов проиллюстрирована на рис.8. В конструкции с U-образными каналами холодный

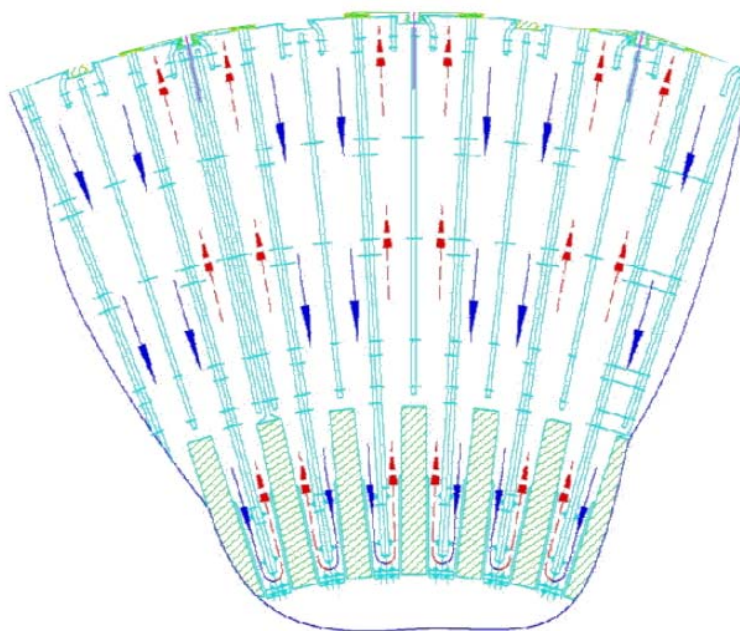


Рис.8. Система охлаждения сердечника статора

воздух из камер нагнетания, расположенных на периферии статора, попадает в радиальные каналы между пакетами активной стали и проходит последовательно вначале в направлении расточки, а затем возвращается в противоположном направлении к камерам разрежения, расположенным также на периферии статора. Система охлаждения обмотки и сердечника статора при помощи U-образных каналов используется в турбогенераторах мощностью до 160 МВт.

Одним из основных факторов, ограничивающих мощность турбогенератора с косвенным воздушным охлаждением, является нагрев обмотки статора. В турбогенераторах рассматриваемой серии превышение температуры обмотки статора на 25 - 30% определяется

конвективным перепадом с поверхности зубцов в охлаждающие каналы. По этой причине при увеличении токовых нагрузок требуются меры по улучшению охлаждения зубцов статора за счет интенсификации теплообмена в этой зоне.

Для турбогенераторов мощностью более 200 МВт разработана новая конструкция системы охлаждения обмотки и активной стали сердечника статора. Впервые новая система охлаждения была применена в турбогенераторе мощностью 225 МВт. В новой конструкции сохранена идея U-образного канала и принципа чередования разноименных зон на периферии статора. Канал, расположенный в радиально-тангенциальной плоскости, заменен на радиально-аксиальный канал. Такой канал образован за счет перепуска воздуха между соседними радиальными каналами через аксиальные щелевые каналы, выполненные в зубцах (рис.9). При этом каждый четный радиальный канал, получая холодный воздух из камеры нагнетания, сообщается с парой соседних нечетных каналов через аксиальные каналы в зубцах. Для оптимизации новой конструкции на лабораторных установках были исследованы характеристики аэродинамического сопротивления и теплоотдачи в радиальных и аксиальных щелевых каналах в широком диапазоне расходов воздуха и тепловых нагрузок.

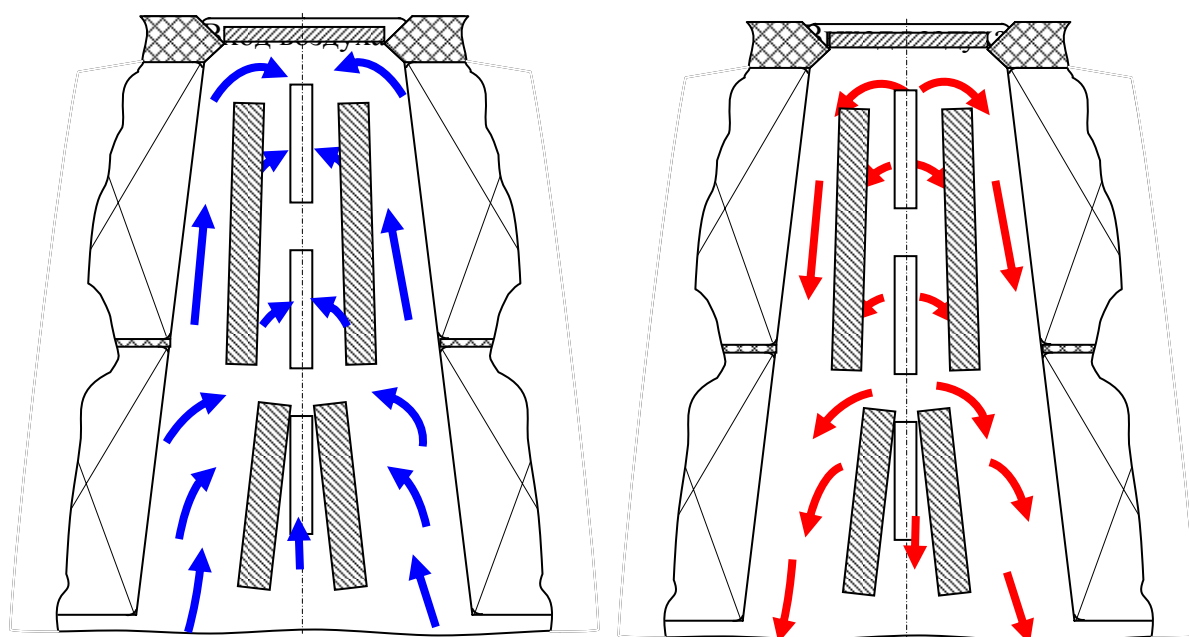


Рис.9. Направление воздушных потоков в зубцовой зоне

Достоинствами новой системы охлаждения является увеличение коэффициентов теплоотдачи в радиальных каналах в 1,5 раза по сравнению с U-образными каналами, возрастание общей поверхности охлаждения зубцовой зоны и существенное снижение термического сопротивления на пути теплового потока к охлаждающим поверхностям.



Повышение коэффициентов теплоотдачи объясняется искусственной турбулизацией и срывом пограничного слоя вследствие ответвления воздушного потока в аксиальные каналы.

Эффективность системы охлаждения статора была подтверждена тепловыми испытаниями турбогенератора мощностью 225 МВт на испытательном стенде завода.

Превышение температуры обмотки статора на 35 – 40% определяется перепадом по изоляции. По этой причине с возрастанием мощности генераторов потребовались технические мероприятия, направленные на снижение температурного перепада по изоляции. Для снижения температурного перепада по изоляции в турбогенераторе мощностью 250 МВт оказалось достаточным при производстве изоляции стержней обмотки статора по технологии Global VPI применить ленту с коэффициентом теплопроводности на 20% превышающим теплопроводность лент, используемых в турбогенераторах мощностью до 160 МВт. При этом использовалась корпусная изоляция с той же допустимой напряженностью электрического поля (кВ/мм), что и в турбогенераторах мощностью 160 МВт.

Как известно, температурный перепад по изоляции, кроме тепловой нагрузки, определяется не только коэффициентом теплопроводности изоляции, но и ее толщиной. При увеличении мощности генератора до 350 МВт для снижения температурного перепада по изоляции требуется на 10% повысить напряженность электрического поля в корпусной изоляции, т.е. уменьшить ее толщину. Кроме того, необходимо использовать корпусную изоляцию, имеющую коэффициент теплопроводности почти на 35% превышающий теплопроводность изоляции, используемой в турбогенераторах мощностью до 250 МВт.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАГРУЗКИ

Разработанный ряд турбогенераторов с воздушным охлаждением может рассматриваться как серия геометрически подобных электрических машин с одинаковой частотой вращения, схожих по электрическому и механическому исполнению. Основное различие между турбогенераторами определяется их полной расчетной мощностью.

В рассматриваемой серии с увеличением мощности возможно ограничение размеров активной зоны генераторов при больших электромагнитных нагрузках за счет повышения использования активных материалов, снижения удельных потерь и интенсификации охлаждения.

Следует отметить, что в соответствии с действующими в России стандартами в пределах серии изменяется номинальное напряжение: 10.5 кВ – до 110 МВт, 15.75 кВ – до 250 МВт, 20 кВ – более 250 МВт. Увеличение номинального напряжения при сохранении

материалов корпусной изоляции означает увеличение толщины изоляции, что при косвенном охлаждении обмотки должно приводить к снижению линейной токовой нагрузки и удельного окружного усилия. По технологическим соображениям генераторы мощностью 110 МВт на напряжение 10.5 кВ и 160 МВт на напряжение 15.75 кВ выполнены с одинаковыми диаметрами расточки, одинаковыми обмоточными данными и размерами пазов. При этом увеличение мощности компенсировано увеличением напряжения, а линейная токовая нагрузка практически не изменилась.

Турбогенераторы мощностью 250 МВт и 320 МВт разработаны с увеличением электромагнитных нагрузок по сравнению с турбогенератором мощностью 160 МВт. Линейная токовая нагрузка в этих генераторах с косвенным воздушным охлаждением обмотки статора приближается к величинам, характерным для генераторов с непосредственным водородным охлаждением. Этого удалось достигнуть за счет применения корпусной изоляции обмотки статора с повышенной теплопроводностью и повышения эффективности охлаждения. Дальнейшее возрастание потерь в обмотках с ростом мощности генераторов подтверждает необходимость повышения эффективности системы вентиляции и теплопроводности применяемых материалов в более мощных генераторах.

## ПОТЕРИ И КПД

Выбор системы вентиляции оказывает существенное влияние на соотношение потерь и КПД турбогенератора. С ростом номинальной мощности потери в стали и меди увеличиваются быстрее, чем поверхность охлаждения вентиляционных каналов. По этой причине с ростом мощности превышение температуры активных частей должно возрастать. Поэтому приходится увеличивать не только поверхность охлаждения, но и расход охлаждающего воздуха, а следовательно, скорость воздуха в вентиляционных каналах и коэффициент теплоотдачи с поверхности этих каналов. В результате с повышением мощности должно происходить увеличение вентиляционных потерь и снижение КПД мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Для получения конкурентоспособных по КПД генераторов с воздушным охлаждением потребовались конструктивные решения, направленные на повышение интенсификации теплообмена активных частей и снижение вентиляционных потерь. Величины механических потерь на трение и вентиляцию (без учета подшипников), полученные при испытаниях, в зависимости от активной мощности турбогенераторов данной серии показаны на рис.10. Доля механических потерь по отношению к суммарным потерям составляет 40 - 43%.

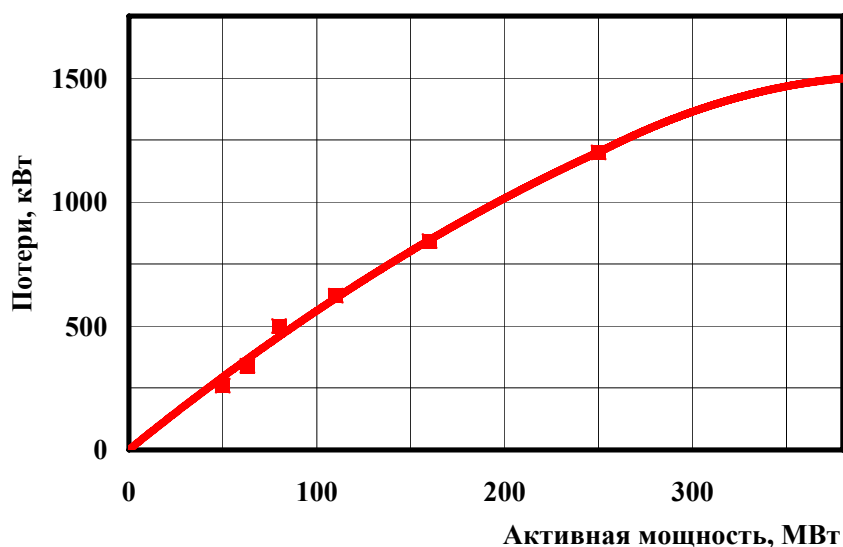


Рис.10. Экспериментальная зависимость механических потерь (без подшипников) от активной мощности генераторов

На рис.11 приведены гистограммы соотношения механических и полных потерь в сериях турбогенераторов с воздушным и водородным охлаждением. Существенное различие относительных потерь связано с повышенной плотностью воздуха по отношению к водороду.

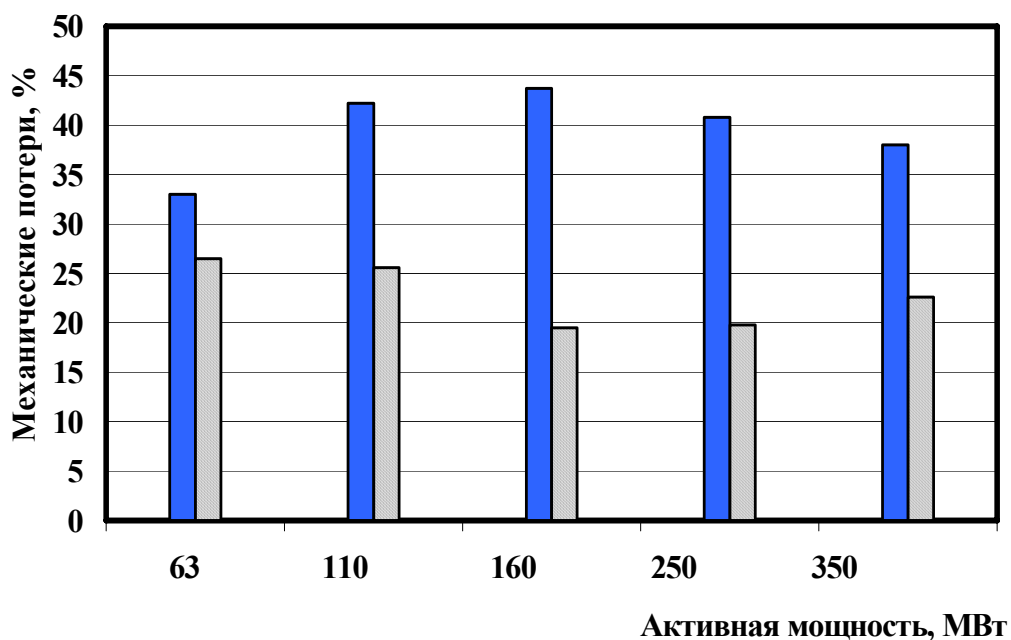


Рис.11. Относительные механические потери в зависимости от активной мощности турбогенераторов с воздушным (■) и водородным (□) охлаждением

Результаты принятых конструктивных и технологических решений видны на рис.12, где приведены экспериментально полученные значения КПД для серии турбогенераторов с

воздушным охлаждением. По КПД эти машины не уступают ранее разработанным турбогенераторам с водо - водородным охлаждением.

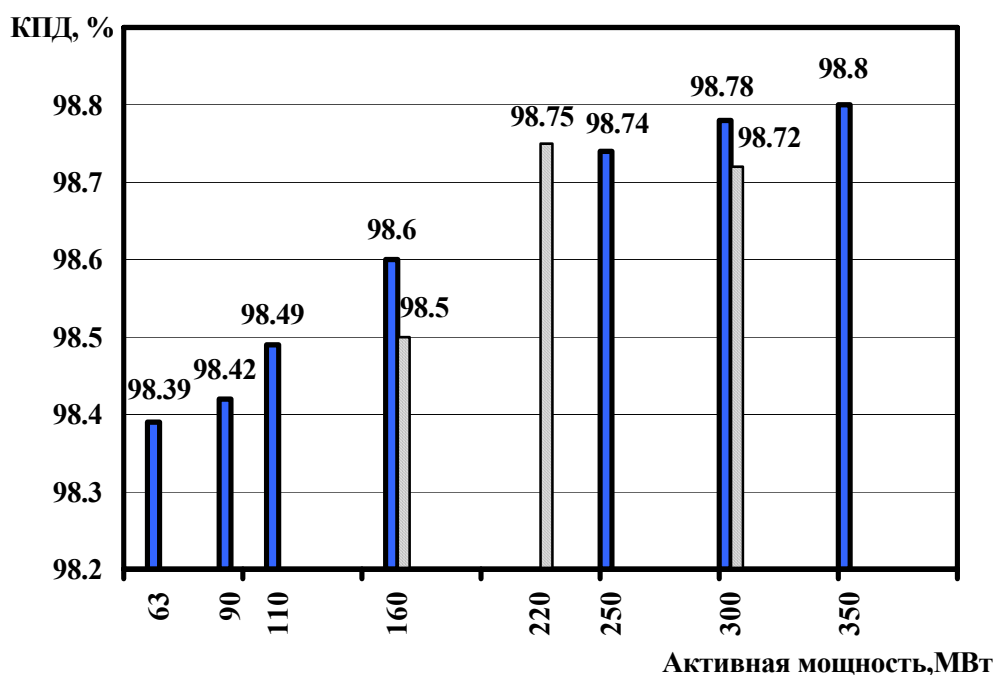


Рис.12. Зависимость КПД от активной мощности турбогенераторов с воздушным (■) и водородным (■) охлаждением

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение новых эффективных конструктивных разработок, технологий и материалов на базе современных методов расчетов и экспериментов позволили создать серию турбогенераторов с воздушным охлаждением, не уступающих по своим параметрам и техническим характеристикам соответствующим генераторам с водо-водородным охлаждением Российского и зарубежного производства.

Продолжающиеся проектные и исследовательские работы дают основание предполагать дальнейшее увеличение единичной мощности турбогенераторов с воздушным охлаждением, что соответствует тенденциям развития мирового электромашиностроения. Потребность в высоконадежных и простых в эксплуатации турбогенераторах с воздушным охлаждением подтверждается как большими сроками эксплуатации турбогенераторов на действующих станциях, так и необходимостью строительства новых электростанций.