

УДК 621.313.322

В.В. Шевченко¹, А.Н. Минко², Е.М. Фомина²¹Национальный технический университет «ХПИ», Харьков²ГПЗ «Электротяжмаши», Харьков

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ПОЛНЫМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Статья посвящена обзору технико-экономических параметров турбогенераторов с полным воздушным охлаждением малой и средней мощности, оценке целесообразности выбора такого технического решения, проведена оценка выбора метода расчета системы охлаждения и конструкционных материалов.

Ключевые слова: турбогенератор, мощность, технико-экономические параметры, воздушное охлаждение.

Введение

Электромашиностроение развивается в условиях жесткой конкуренции. Электромашиностроительные фирмы стремятся, с одной стороны, повышать качество продукции, а с другой стороны, обеспечивать ее патентную чистоту. В результате на практике созданы многочисленные конструкции электрических машин, которые отличаются, в первую очередь, системами охлаждения, что во многом определяет фундаментальные характеристики: качество, надежность и экономичность.

Современные исследования в мировой практике турбогенераторостроения направлены на отказ от водородного охлаждения в турбогенераторах (ТГ) мощностью до 300 МВт (а некоторые зарубежные фирмы указывают и более высокий предел мощности, [1]) и на перевод их на полное воздушное охлаждение.

Экономический эффект от применения нового, более совершенного электрооборудования должен быть определен на основе всех факторов, которые определяются в эксплуатации.

Кроме технических преимуществ энергоэффективного электрооборудования и экономии расходов на электроэнергию, следует учитывать снижение расходов на комплектацию установок, на их техобслуживание, а также весь комплекс дополнительных услуг по обслуживанию, консультациям, диагностике и сервису.

Технико-экономическая перспективность введения в эксплуатацию ТГ определяется решением вопроса планового выделения средств на обновление установленного оборудования, принятие новых, перспективных технических решений, что повысит его КПД, надежность и ресурс в 1,2÷1,3 раза.

Одним из таких шагов является замена в объеме ТГ водорода на воздух. В табл. 1 показаны этапы производства ТГ с воздушным охлаждением на мировом рынке [3].

Таблица 1

Этапы производства ТГ с воздушным охлаждением

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

Основной материал

В связи с актуальностью проблемы увеличения единичной мощности ТГ с воздушным охлаждением, стоит задача определения их предельной допустимой мощности. Применение воздушного охлаждения возможно при использовании современных технических решений: схемы вентиляции с более интенсивной циркуляцией воздуха и непосредственным охлаждением обмоток, применение в конструкции электротехнических сталей с малыми удельными потерями и высокой нагревостойкостью изоляции. Возврат к воздушному охлаждению в ТГ большей, чем в исторически первых появившихся машинах, мощностью во многом определяется требованиями энергетики (например, в связи с вводом парогазовых установок) и новыми техническими возможностями.

Серии отечественных турбогенераторов с полным воздушным охлаждением имеют простую однолинейную нагнетательную систему охлаждения и охватывают диапазон мощностей:

серия ТА – от 1,5 до 14 МВт;

серия ТФ – от 20 до 60 МВт;

серия ТЗФ – от 60 до 160 МВт.

В турбогенераторах серии ТФ с форсированным охлаждением ротора используют замкнутую схему охлаждения с вертикально расположенными воздухоохладителями, под их наружной обшивкой располагают перепускные трубы [3, 4]. Шихтованный сердечник статора жестко закреплен на ребрах корпуса статора, с торцов сердечника статора устанавливают медные экраны для снижения влияния

потоков рассеяния. В пазах ротора выполняют подпазовые каналы, через который охлаждающий воздух попадает в радиальные каналы обмотки ротора. Ротор снабжен демпферной системой – под бандажными кольцами установлены короткозамыкающие кольца, входящие в пазы ротора.

Для предотвращения проникновения в корпус внешней пыли предусматривают поддув воздуха в полость генератора для создания небольшого избыточного давления. Корпус генератора имеет с внутренней стороны шумоизолирующее покрытие. Применяемая на всех ТГ с воздушным охлаждением замкнутая схема вентиляции вместе с системой наддува воздуха и одновременной конденсацией излишней влаги обеспечивает высокую чистоту и низкую влажность воздуха внутри генератора, исключает проникновение пыли и грязи из машинного зала электростанции. На рис. 1 представлен эскиз турбогенератора ТА-35, мощностью 35 МВт, с замкнутой системой вентиляции. Турбогенераторы серии ТЗФ производства ГПЗ «Электротяжмаш» являются в некоторой степени продолжением серии ТФ. В них используется трехконтурная система воздушного охлаждения, отличающаяся повышенной эффективностью [4, 5].

В этих генераторах предусмотрены отдельные потоки воздуха, охлаждающего статор и ротор. Принятая конструкция позволяет снизить взаимное тепловое влияние этих потоков. Охлаждающий воздух в ТГ циркулирует по вытяжной схеме в результате действия двух центробежных вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается в охладителях, которые установлены на боковых стенках воздуходелительных кожухов. Потери, выделяющиеся в пазовой части обмотки и активной стали статора, отводятся холодным воздухом, поступающим из охладителей в U-образные каналы [3, 4], рис. 2.

Выходя из этих каналов, воздух омывает нажимную плиту и лобовые части. Холодный воздух из охладителей поступает также в радиальные каналы торцевой зоны. Теплообмен поверхности активных частей и элементов конструкции ТГ с охлаждающей средой наиболее точно определяется экспериментально с применением теории подобия.

Более точным способом расчета теплообмена поверхности активных частей и элементов конструк-

ции машины с охлаждающей средой является метод температурного поля, при котором решается дифференциальное уравнение теплопроводности при граничных условиях I – III рода. В общем случае необходимо учитывать зависимость тепловыделения λ и α от температуры и координат при граничном условии III рода на поверхностях, омываемых охладителем переменной температуры T_0 , и условия $dT/dn = 0$ на остальных поверхностях. Решение такой задачи возможно только с применением численных методов, например, метода конечных разностей.

В настоящее время трехмерную задачу расчета поля температуры электрических машин сводят к более простой, двумерной задаче и решают ее численно или аналитически. При расчете крупных и специальных машин удается получить решение для сопряженных областей (обмотка и сердечник), используя лишь граничное условие III рода и условие $dT/dn = 0$. В машинах общего применения, особенно закрытых, без внутренней вентиляции, приходится учитывать взаимное влияние всех элементов, и расчетная область получается слишком сложной. Поэтому ограничиваются расчетом поля температуры в наиболее теплонапряженном элементе (в обмотке), а влияние других элементов учитывают заданием на границах соответствующего теплового потока или граничного условия III рода в обобщенной форме [6]:

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial Y}{\partial n} \right)_g = \frac{T_g - T_n}{R_t \cdot S_n},$$

где T_n, K – средняя температура тела, граничащего с рассматриваемым элементом в направлении n ; T_g, K – средняя температура тела, который является «источником» тепла; $\lambda, Вт/(м K)$ – коэффициент теплопроводности материала; $R_t, K/Вт$ – термическое (тепловое) сопротивление между этим телом и рассматриваемым элементом

$$R_t = \frac{T_2 - T_1}{P},$$

T_1, K – температура конца рассматриваемого контактного участка; T_2, K – температура начала рассматриваемого контактного участка; $P, Вт$ – тепловой поток, протекающий через участок цепи. $S_n, м^2$ – площадь соприкосновения тел с разной температу-

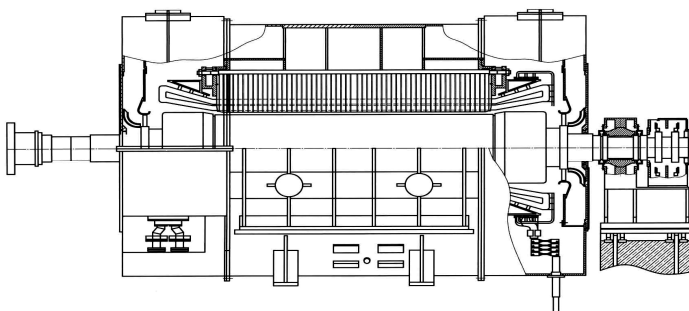


Рис. 1. Эскиз турбогенератора ТА-35 с замкнутой системой вентиляции и полным воздушным охлаждением

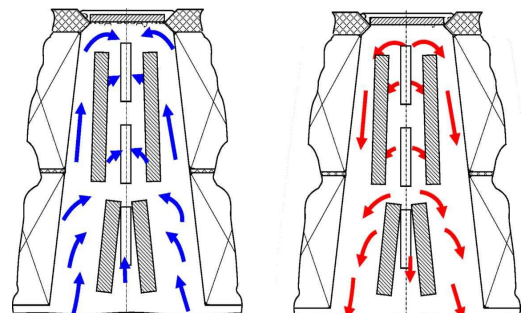


Рис. 2. Направление воздушных потоков в зубовой зоне ТГ в U-образных каналах

рой. Поле температур определяется в сечении, где достигается его максимум.

Положение этого сечения можно найти решением одномерного уравнения теплопроводности для витка обмотки совместно с аналогичными уравнениями для других элементов, связанных с нею.

Чаще используют другой путь – решают одномерную задачу только для обмотки, а связь ее с другими элементами машины и охлаждающей средой учитывают соотношениями, усреднено описывающими соответствующие процессы теплопередачи. Если температура по сечению обмотки меняется незначительно, решением одномерной задачи исчерпывается расчет распределения температуры в обмотке. Таким образом, переход к поиску распределения температуры в наиболее теплонапряженных элементах не освобождает от необходимости решения общей задачи нагрева электрической машины, поскольку связь рассматриваемого элемента с другими (в том числе с охладителем) можно задать лишь после того, как найдены тепловые потоки между ними или их средние температуры.

Достаточно часто в практике тепловых расчетов электрических машин для решения общей задачи нагрева применяют метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС), при котором тепловая система с непрерывно распределенными параметрами заменяется эквивалентной системой однородных тел (узлов), между которыми устанавливаются сосредоточенные связи, определяемые соответствующими процессами теплообмена. Метод ЭТС можно рассматривать, как приближенный для решения трехмерных задач теплопроводности. Он является, по сути, частным случаем, метода конечных разностей, когда шаг сетки становится соизмеримым с характерным размером основных элементов машины.

При решении общей задачи нагрева машины методом ЭТС основные элементы ее заменяются узлами, в которые вводятся соответствующие тепловыделения, усредненные по рассматриваемому объему элемента; зависимость потерь от температуры учитывается также усреднено. Связи между узлами, устанавливаемые на основе анализа возможных путей теплопередачи, выражаются набором термических сопротивлений для элементов без тепловыделений и для элементов, в которых имеются потери (коэффициенты теплопроводности λ берутся при ожидаемой температуре). В необходимых случаях вводятся контактные термические сопротивления R_{κ} . Связь элементов электрической машины с охладителем выражается конвективными термическими сопротивлениями, Ом:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot S},$$

где, α , Вт/(м К) – средний коэффициент теплоотдачи от поверхности площадью S , м².

ТГ с воздушным охлаждением могут рассматриваться, как серия геометрически подобных электрических машин с одинаковой частотой вращения, аналогичных по электрическому и механическому исполнению. Основное различие между ТГ определяется их полной расчетной мощностью. Выбор системы вентиляции определяет соотношение потерь и КПД турбогенератора. С ростом номинальной мощности потери в стали и меди увеличиваются быстрее, чем поверхность охлаждения вентиляционных каналов. По этой причине превышение температуры активных частей с ростом мощности ТГ должно возрастать. Поэтому следует увеличивать не только поверхность охлаждения, но и расход охлаждающего воздуха, а, следовательно, и скорость воздуха в вентиляционных каналах и коэффициент теплоотдачи с поверхности этих каналов. Поэтому с повышением мощности должно происходить увеличение вентиляционных потерь и снижение КПД турбогенераторов с воздушным охлаждением.

Для получения конкурентоспособных по КПД ТГ с воздушным охлаждением требуются конструктивные решения, направленные на повышение интенсификации теплообмена активных частей и снижение вентиляционных потерь. Доля механических потерь по отношению к суммарным потерям составляет 40 – 43 %. Существенное различие относительных потерь связано с повышенной плотностью воздуха по отношению к водороду.

Применение новых конструктивных разработок, технологий и материалов на базе современных методов расчетов и экспериментов позволили создать ТГ с воздушным охлаждением, не уступающим по своим параметрам и техническим характеристикам генераторам с водо-водородным охлаждением отечественного и зарубежного производства. Тенденции развития мирового электромашиностроения дают основание предположить дальнейшее увеличение единичной мощности ТГ с воздушным охлаждением. Потребность в высоконадежных и простых в эксплуатации ТГ с воздушным охлаждением подтверждается, как большими сроками эксплуатации ТГ на действующих станциях, так и необходимостью их использования при строительстве новых электростанций.

Особенно экономически оправдано использование ТГ малой мощности (6 – 12 МВт), первичным топливом для которых являются отходы от основного технологического процесса (избыточный пар, газ, угольная пыль и др.) [5]. Турбогенераторы мощностью 12 – 30 МВт успешно используются для электроснабжения и отопления населенных пунктов, близ которых расположены крупные металлургические цеха и цеха по производству сахара. Также достаточно востребованы ТГ мощностью 35 МВт, которые являются перспективным направлением для внедрения в энергосистемы, как регионов Ук-

раины, так и для зарубежья. Кроме того, эти генераторы обладают конструктивной конкурентоспособностью [3, 4].

Отечественные ТГ с полным воздушным охлаждением соответствуют зарубежным аналогам и успешно конкурируют на мировом рынке. Кроме того, они обладают рядом технико-экономических преимуществ: высокое значение КПД, невысокий коэффициент материалоемкости конструктивных элементов, безопасность и относительно малая трудоемкость в эксплуатации, в проведении монтажных и транспортных работ, а также отсутствие системы масляного снабжения для обеспечения газоплотности (при замкнутой системе вентиляции), в сравнении с генераторами, работающих на водороде [3, 4].

Выводы

1. Принятая радиальная система охлаждения сердечника статора позволяет набирать сегменты сердечника статора из листов электротехнической стали толщиной как 0,5 мм, так и 0,35 мм, что позволяет регулировать коэффициент заполнения сердечника и уменьшать добавочные потери;

2. Корпусная конструкция статора ТГ малой и средней мощности однорамная, с наружными опорными лапами, которые осуществляют упругое соединение статора с фундаментом;

3. Компактное заполнение приставных коробов (вентилятор, воздухоохладитель, внутренний щиток и т.д.) повышает показатели технологичности и экономичности в эксплуатации.

4. Применение нескольких ТГ малой мощности с полным воздушным охлаждением по технико-экономическим параметрам рентабельнее, чем использование одного ТГ аналогичной суммарной мощности с водородной системой охлаждения. Например, три ТГ с воздушным охлаждением мощностью по 100 МВт в изготовлении и обслуживании рентабельнее одного ТГ мощностью 300 МВт с водородным охлаждением.

5. Перспективные исследования в области оценки развития турбогенераторостроения с полной

воздушной системой охлаждения и оценка безопасности их эксплуатации позволяет сделать вывод, что со временем они заменят ТГ с водородной и водяной системами охлаждения не только малой мощности (6÷160 МВт), но и средней (160÷500 МВт) мощности.

6. Основным преимуществом использования ТГ с воздушным охлаждением является упрощение их конструкции и сопутствующих систем (исключение элементов водородной системы, упрощение системы маслообеспечения, уплотнения вала) и, что наиболее важно, исключение из рабочей зоны (машинного зала станции) взрывоопасного компонента – водорода.

Список литературы

1. Шевченко В.В. Сравнительная оценка массогабаритных параметров турбогенераторов с воздушной и водородной системами охлаждения / В.В. Шевченко, А.Н. Минко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 3. – С. 108-112.

2. Кузьмин В.В. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов: моногр. / В.В. Кузьмин, В.В. Шевченко, А.Н. Минко. – Х., 2012. – 246 с.

3. Шевченко В.В. Основные задачи, проблемы и направления развития отечественного турбогенераторостроения / В.В. Шевченко // Энергетика та електрифікація. – 2012. – № 10. – С. 33-39.

4. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю.В. Зозулін, О.Є. Антонов, А.М. Бичік та інші. – Х.: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.

5. Минко А.Н. Оптимальная геометрия и массогабаритные параметры конструкции подшипникового и щитового узлов турбогенераторов с воздушной системой охлаждения // Энергетика та електрифікація. – 2012. – №1. – С. 21-38.

6. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1986. – 256 с.

Поступила в редколлегию 25.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Т.П. Павленко, НТУ «ХПИ», Харьков.

ТЕПЛОВИЙ СТАН ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПОВНИМ ПОВІТРЯНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ

В.В. Шевченко, А.М. Минко, К.М. Фоміна

Проведено огляд техніко-економічних параметрів турбогенераторів з повним повітряним охолодженням малої і середньої потужності, проведена оцінка доцільності вибору такого технічного рішення, вибору методу розрахунку системи охолодження і конструкційних матеріалів.

Ключові слова: турбогенератор, потужність, техніко-економічні параметри, повітряне охолодження.

THE THERMAL STATE OF SMALL AND MIDDLE POWER TURBOGENERATORS WITH COMPLETE AIR-COOLING

V.V. Shevchenko, A.N. Minko, E.M. Fomina

The review of technical - economic parameters small and middle power turbogenerators with complete air-cooling is conducted, and the estimation expedience choice of these such technical decision choice of method for calculation the cooling system and constructions materials is conducted.

Keywords: turbogenerator, power, technological and economic parameters, air cooling.