

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

О.П. КОШЕВОЙ, студент, НТУ "ХПИ"

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Турбогенераторы с воздушным охлаждением отличаются высокой надежностью, взрывобезопасностью, простотой и удобством в эксплуатации. При проектировании таких генераторов следует использовать конструктивную базу турбогенераторов с водородным и водородно-водяным охлаждением.

Ключевые слова: турбогенераторы, воздушное охлаждение, проектирование.

Введение. К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при проектировании электрических машин (ЭМ), наряду с максимально допустимыми механическими и электрическими нагрузками, возможностью осуществления технологических операций, перспективными массогабаритными параметрами конструкций и трудоемкостью технологических операций, относятся значения допустимых температур активных элементов конструкций. Общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует оценка его конкурентоспособности, одним из главных критерием которых являются тепловое состояние и обеспечение необходимой и достаточной системы охлаждения, [1].

Обеспечение максимальной эксплуатационной надежности и экономичности турбогенераторов (ТГ) является важной научно-технической проблемой электромашиностроения и, в конечном счете, является вопросом энергетической независимости государства.

Цель исследований. Основная цель, которую ставят при разработке ТГ с воздушным охлаждением – создание машин с высокими КПД, высокой надежностью, с низкими уровнями вибрации и нагрева. При этом для обеспечения экономической рентабельности производства следует максимально сохранить конструктивные решения ТГ с водородным охлаждением, что позволит использовать многие технические разработки и расчеты, использовать технологические процессы и технологического оборудования заводов-изготовителей.

Конструкции турбогенераторов с воздушным охлаждением. За последние годы конструкции ТГ были значительно изменены за счет использования новых материалов (в основном, изоляционных) и новых технологий изготовления. В дополнение к обеспечению более высоких

электромагнитных характеристик, эти технологии обеспечивают улучшенные распределения потерь, позволяют организовать более эффективную вентиляцию, снизить температуры в машине и ее вибрации. Для этого необходимы более точные методы расчетов, т.е. необходимо иметь возможность точно рассчитывать основные и добавочные потери, а также учитывать распределение температуры по объему машины.

По способу охлаждения ТГ подразделяются на машины с воздушным, с косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением. В настоящее время в Украине, как и во всем мире, отмечены тенденции перехода именно в машинах мощностью до 200-300 МВт на воздушное охлаждение, т.е. замены водорода в объеме генератора на воздух. В табл. 1 приведены данные для некоторых ТГ с воздушной системой охлаждения производства Украины (ГП завод "Электротяжмаш") и России ("Электросила", г. Санкт-Петербург) [1, 2].

Таблица 1 – Данные ТГ с воздушным охлаждением

Тип турбогенератора, завод изготовитель	Мощность		Напряжение, кВ	Частота вращения, об/мин	Частота тока, Гц	Масса, т
	МВА	МВт				
ТЗВ-320-2 УЗ "Электросила"	376	320	20	3000	50	270
ТЗФП-120-2 "Электросила"	133	120	16	3000	50	178
ТА-120-2 ГП завод "Электротяжмаш"	133	120	16	3000	50	257
ТА-160-2 ГП завод "Электротяжмаш"	174	160	20	3000	50	300,5
ТЗФП-160-2М "Электросила"	174	160	20	3000	50	243
ТЗФ-220-2 "Электросила"	242	220	20	3000	50	268
ТЗФ-350-2 "Электросила"	380	350	20	3000	50	280

Возрождение интереса к ТГ с полным воздушным охлаждением в настоящее время вызвано следующим:

1) необходимость полной модернизации современных ТЭС позволила поставить вопрос изменения комплектации станций. Поэтому для многих станций рассматривают вопрос замены паровых турбин на

газотурбинные установки. Для таких установок наиболее перспективны ТГ с полным воздушным охлаждением;

2) оценка данных о выпускаемой продукции крупнейшими электромашиностроительными заводами стран СНГ и мира позволяет сделать вывод о снижении интереса к ТГ мощностью 500 и 800 МВт и о повышенном интересе к машинам в 200-300 МВт. Поэтому модернизация, совершенствование, повышение надежности ТГ этой мощности, их перевод на воздушное охлаждение становится первоочередной задачей;

3) использование воздушного охлаждения позволит исключить из комплектации ТГ систем водородного, водяного и масляного оборудования (для уплотнения вала), упростить систему уплотнений вала. Это приведет к повышению надежности ТГ, снижению его массогабаритных показателей, повышению коэффициента готовности, (до 0,997-0,998 по сравнению с водородно-водяными ТГ, у которых коэффициент готовности равен 0,95-0,995, [5]), сокращению количества и стоимости ремонтных работ, снижению себестоимости, т.е. повышению конкурентоспособности на мировом рынке.

Турбогенераторы максимальной мощности с полным воздушным охлаждением были созданы на заводах фирм *ABB* и *ALSTOM*: в 1995 г. был создан ТГ мощностью 300 МВА, в 1999 г. – мощностью 500 МВА. С учетом конъюнктуры рынка, на заводе "Электросила" (ОАО "Силовые машины", г. Санкт-Петербург) была разработана новая серия ТГ 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 ТГ этой серии. ТГ для сопряжения с паровыми турбинами изготавливаются с одним стоячковым подшипником на отдельных фундаментных плитах.



Рис. 1 – Турбогенератор мощностью 160 МВт с воздушным охлаждением для газовой турбины ПГУ – 450.

Расположение газоохладителей в статоре воздушного ТГ, выполненных на конструктивной базе серии ТВВ, мощностью 165 и 200 МВт, продольно-горизонтальное. Турбогенераторы ТВВ-320-2 имеют вертикальные газоохладители. Вентиляция – вытяжная, обеспечивается вентиляторами, расположенными по торцам ротора.

По сравнению с генераторами с водородным охлаждением, ТГ с воздушным охлаждением проще в эксплуатации; но недостатком их могут оказаться повышенные механические потери, повышение температуры активных частей, а иногда и большие размеры.

Первым шагом решения проблемы снижения и более равномерного распределения температур по объему статора и ротора было бы применение метода *Taguchi* ("активный дизайн", [3]), использование которого позволит 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. Так, например, на ГП завод "Электротяжмаш" создан "воздушный" генератор мощностью 160 МВА, с КПД 98,75 %, имеющий малый вес, уровень нагрева и высокую эффективность.

При выборе конструктивных решений ТГ с воздушным охлаждением следует предусмотреть замкнутую систему вентиляции, что позволит исключить загрязнение проходящего воздуха. Если, с целью унификации конструкции воздушного ТГ с водородным прототипом, необходимо использовать разомкнутую воздушную систему вентиляции, то, во избежание перегрева машины, следует предусмотреть меры, предотвращающие загрязнение ее вентиляционных каналов. В системе также необходимо предусмотреть систему наддува воздуха с одновременной конденсацией излишней влаги. Это позволяет отказаться от громоздких и энергоемких холодильных установок, требующих дополнительного пространства для размещения, прокладки силовых и гидравлических коммуникаций, значительных затрат на электроэнергию и обслуживание при эксплуатации.

Также необходимо предусмотреть меры по предотвращению загрязнения генератора и возбuditеля угольной пылью от контактных

колец. Воздухоохладители должны быть выполнены таким образом, чтобы машина при выводе из эксплуатации одной его части для очистки могла нести, по крайней мере, 2/3 номинальной нагрузки в течение длительного времени без превышения допустимой температуры элементов машины. Может оказаться, что при этом температура первичного охлаждающего воздуха превысит расчетное значение.

Изменяется конструкция и системы пожаротушения – при воздушном охлаждении можно ограничиться распыленной водой или инертным газом (второе, если рассматривают ТГ с водородным охлаждением, допускающие работу при воздушном охлаждении), [4].

Анализ тепловых расчетов турбогенераторов, [1, 5], выпускаемых ГП завод "Электротряжмаш", позволяет отметить, что в ТГ с водородным охлаждением существует запас по превышению температуры нагрева машины на 20-25 % по отношению к допустимой температуре нагрева принятого класса нагревостойкости изоляции. Отказ от запаса по температурным характеристикам изоляции на один класс нагревостойкости (*service – factor*), принятый еще в СССР, позволит проектировать новые воздушные ТГ с прежними, и даже большими, значениями мощности на базе ТГ с водородным охлаждением, сохраняя запас по превышению температуры в 2-4 %, что соответствует мировыми стандартами.

Одним из показателей, определяющих конкурентоспособность отечественных конструкций ТГ, является удельный вес, т.е. отношение мощности ТГ к его массе. У ТГ с водородной системой охлаждения больше масса из-за необходимости увеличения толщины стенок элементов корпуса статора для повышения безопасности их эксплуатации, [5]. В табл. 2 представлены допустимые по прочности геометрические показатели ТГ среднего класса мощности (120-320 МВт) и их масса.

Таблица 2 – Толщина элементов корпуса статора ТГ и суммарная масса ТГ.

Система охлаждения	Наружный диаметр обшивки, м	Толщина обшивки, мм	Толщина торцевых стенок, мм	Толщина поперечных стенок, мм	Опорные лапы, мм	Масса, т
Водородное	До 3,0	20	70-80	20	70	364
	Свыше 3,0	24	70-80	25-30	70	495
Воздушное	1,3	6	30-34	12-16	30-40	300,5
	1,7-2,0	8	30-34	12-16	36-42	264
	2,25-3,35	10-16	34-50	20-24	42-50	303,5

Изменение системы охлаждения, приводящее к эксплуатации обмоток ТГ с более высокими температурами, требует использования новых технологий их изготовления.

Мы рекомендуем использовать новый тип изоляции "Монолит 3", разработанный на ГП завод "Электротяжмаш", с упругим слоем, компенсирующим тепловое расширение обмотки и сердечника и обеспечивающим разборность конструкции. Другим, чрезвычайно перспективным путем совершенствования изоляции, является повышение ее теплопроводности, что достигается добавлением в эпоксидную смолу, составляющую основу фирменной изоляции "Микадур", мелкодисперсного порошка А1203. Это позволяет увеличить ее теплопроводность в два и более раза. Перспективно также для мощных ТГ типа ТЗФ использовать трехконтурную систему воздушного охлаждения, предложенную на ГП завод "Электротяжмаш", рис. 2.

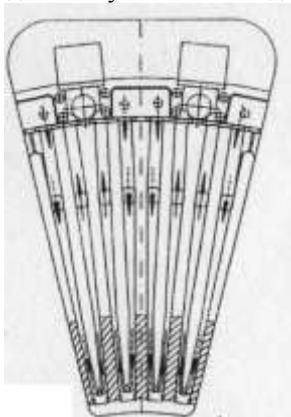


Рис. 2 – Сегмент статора ТГ на базе серии ТЗФ с трехконтурной системой воздушного охлаждения.

Улучшение характеристик, повышение КПД, надежности и перегрузочной способности достигается за счет разделения потоков воздуха, охлаждающего статор и ротор, исключения их отрицательного взаимного влияния, что позволяет снизить нагрев активных и конструктивных частей ТГ. Существенной особенностью ТГ серии ТЗФ является применение встроенных центробежных вентиляторов, снабженных специальными направляющими и спрямляющими аппаратами. Такое решение позволило снизить потери в вентиляторах и повысить КПД генераторов. ТГ серии ТЗФ мощностью 160 МВт имеет КПД 98,55 %, что выше требований ГОСТ 533-2000.

Выводы.

1) Перевод ТГ на воздушное охлаждение внутреннего объема машины возможен и целесообразен.

2) Для обеспечения надежности работы воздушных ТГ и одновременного увеличения мощности в том же габарите необходимо провести расчетные и конструктивные корректировки водородных машин, взятых за основу.

3) Для решения проблемы снижения и более равномерного рас-

пределения температур по объему статора и ротора целесообразно использовать метод *Taguchi*. Необходимо изменять (упрощать) системы вентиляции, уплотнения вала, конструкцию системы пожаротушения, использовать новый тип изоляции "Монолит 3", технологическими приемами увеличивать ее теплопроводность, использовать трехконтурную систему воздушного охлаждения, встроенные центробежные вентиляторы.

Список литературы. 1. Шевченко В.В., Минко А.Н. Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов. – Харьков, Монограф, 2013. – 242 с. **2.** Шевченко В.В., Минко А.Н. О повышении конкурентоспособности отечественных турбогенераторов // X1 міжнародна НТК, 2013. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 220-221. **3.** Шевченко В.В., Минко А.Н. Критерий оптимизации массогабаритных параметров конструкций турбогенераторов // Инновационные технологии в электроэнергетике и электромеханике. Сборник научных трудов МК. – Воронеж, 2013. – С. 138-142. **4.** ГОСТ Украины 533-2000 Турбогенераторы с воздушным охлаждением. Машины электрические вращающиеся. – Киев, 2001. – 7 с. **5.** Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. – Харьков: Монограф СПДФД Частышев А.В., 2012. – 246 с.

Поступила в редколлегию 01.10.2013

УДК 621.313.322-81

Конструктивные особенности турбогенераторов с воздушным охлаждением / Шевченко В.В., Кошевой О.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 99-106. Бібліогр.: 5 назв.

Турбогенератори з повітряним охолодженням відрізняються високою надійністю, вибухобезпечністю, простотою та зручністю в експлуатації. При проектуванні таких генераторів треба використовувати конструктивну базу турбогенераторів з водневим і воднево-водяним охолодженням.

Ключевые слова: турбогенератор, повітряне охолодження, надійність, конструкція.

The air-cooled turbogenerators are characterized by high reliability, safety from explosions, simplicity and ease of use. In the design of such generators it is necessary to use a constructive base of hydrogen-cooled and hydrogen-water-cooled ones.

Keywords: turbogenerator, air cooling, reliability, construction.



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



Кошевой Олег Петрович, студент электромашиностроительного факультета, группы ЭМС-10Б НТУ "ХПИ". Участник Всеукраинского конкурса 2013 г. студенческих научных работ по специальности "Электротехника и электромеханика". Область интересов – конструкции, новые технологии изготовления, диагностики и эксплуатации турбогенераторов.