

Исследование различных конструкций медного экрана в торцевой зоне мощного турбогенератора на основе трехмерного моделирования¹

ЧЭН ПЭН, ЛИ ВЭЙЛИ, ВАН ЛИКУНЬ, ДАНИЛЕВИЧ Я.Б., АНТИПОВ В.Н.,
ХАНЬ ЦЗИЧАО

Рассматривается новая конструкция медного экрана для торцевой зоны мощного турбогенератора, названная сдвоенным массивным медным экраном. Оптимизация новой конструкции проведена путем изменения ширины вентиляционного канала между внутренним и внешним медными экранами. Для различных вариантов конструкции зоны лобовых частей турбогенератора с многоструйной системой вентиляции созданы модели движения охлаждающих потоков водорода на половине длины статора по осевому направлению и трехмерные модели для расчета электромагнитного поля зоны лобовых частей. По результатам моделирования движения охлаждающих потоков водорода и расчета электромагнитного поля торцевой зоны турбогенератора для традиционной и новой конструкции медного экрана получены соответствующие значения скорости движения потоков водорода и давления (граничные условия), а также определены потери на вихревые токи (источники тепла). Разработаны модели для анализа движения потоков водорода и теплопередачи в торцевой зоне турбогенератора. Рассмотрено влияние конструкции медных экранов на распределение потоков водорода и температуру лобовых частей. Для традиционной конструкции медного экрана проведено сравнение экспериментально измеренных и расчетных значений температуры, показавшее достаточную точность расчетного метода. Новая конструкция медного экрана уменьшает температуру экрана, а увеличение ширины вентиляционных каналов ведет к дальнейшему снижению температуры.

Ключевые слова: турбогенератор, торцевая зона, конструкции медного экрана, движение охлаждающих потоков водорода, электромагнитное и температурное поля

Зона лобовых частей статора мощного турбогенератора отличается сложной геометрией и состоит из лобовой части обмотки статора, нажимного кольца, нажимных пальцев, медных экранов, изоляции лобовых частей обмоток статора и т.д. С ростом единичной мощности машины магнитная индукция в зоне лобовых частей тоже постепенно увеличивается. В лобовых частях потери на вихревые токи растут, особенно при работе турбогенераторов в режимах с недовозбуждением, что приводит к превышению температуры в зоне лобовых частей, снижению КПД генератора, уменьшает его надежность и безопасность эксплуатации. Необходим поиск более рациональной конструкции зоны лобовых частей для снижения уровня температуры ее конструктивных элементов. Проведены многочисленные исследования электромагнитных и температурных полей мощных генераторов [1–8], но лишь малая их часть рассматривает электромагнитное поле в торцевой зоне, аэродинамику потоков водорода и температурное поле в комплексе и относится к оптимизации конструкции.

В качестве объекта исследований выбран турбогенератор мощностью 330 МВт с водородным охлаждением сердечника статора. Исследованы движение потоков водорода и температурное поле в лобовых частях для новой конструкции медного экрана, проведено сравнение с традиционной конструкцией.

Моделирование движения охлаждающего потока водорода для медного экрана традиционной и сдвоенной конструкций. Для снижения температуры в зоне лобовых частей предложена конструкция экрана нового типа, состоящая из двух медных экранов и вентиляционного канала между ними. Новая конструкция получается разделением толщины традиционного экрана $H = 12$ мм на внешний и внутренний экраны $H_1 = H_2 = 4$ мм с вентиляционным каналом между ними шириной $L_a = 4$ мм. Без изменения пространственного расположения внутреннего медного экрана регулированием толщины канала вентиляции между экранами от 4 до 8 мм могут быть получены различные варианты исполнения. Схемы медного экрана традиционной и новой конструкций показаны на рис. 1.

Расчеты движения охлаждающих потоков водорода, трехмерного электромагнитного и теплового

¹ Работа поддержана грантом Фонда фундаментальных исследований для центральных университетов (Китай), № HEUCFX41401.

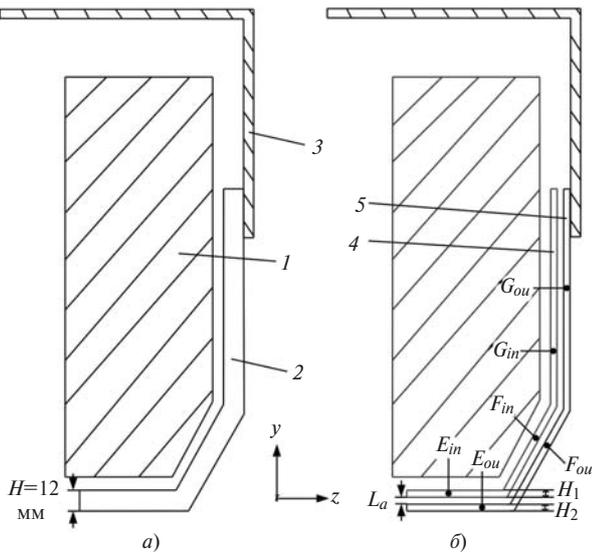


Рис. 1. Медный экран традиционной (а) и новой (б) конструкций: 1 – нажимное кольцо; 2 – традиционный медный экран; 3 – вентиляционный экран; 4 – внутренний медный экран; 5 – внешний медный экран; G – наружная зона традиционного медного экрана; F – промежуточная зона традиционного медного экрана; E – внутренняя зона традиционного медного экрана; G_{in} – наружная зона внутреннего слоя полого медного экрана; F_{in} – промежуточная зона внутреннего слоя полого медного экрана; E_{in} – внутренняя зона внутреннего слоя полого медного экрана; G_{ou} – наружная зона наружного слоя полого медного экрана; F_{ou} – промежуточная зона наружного слоя полого медного экрана; E_{ou} – внутренняя зона наружного слоя полого медного экрана

полей выполнены для традиционной конструкции медного экрана и трех вариантов новой конструкции: $L_{a1} = 4$ мм (вариант 1), $L_{a2} = 6$ мм (вариант 2), $L_{a3} = 8$ мм (вариант 3).

Схема замещения движения потоков водорода для половины осевой длины статора показана на рис. 2 для медного экрана традиционной и новой конструкций. В схеме движения потоков водорода для новой конструкции медного экрана существуют два канала вентиляции: между нажимным кольцом и внешним слоем медных экранов; между внутренним и внешним слоями медных экранов.

Решением уравнения движения потоков водорода для традиционных и двухслойных медных экранов определены и представлены в табл. 1 значения скорости потока и давления в вентиляционных каналах турбогенератора.

Как видно из табл. 1, применение различных вариантов новой конструкции приводит к увеличению скорости на входе вентилятора по мере увеличения ширины L_a канала между внутренним и внешним слоями медных экранов. При увеличении ширины канала до 8 мм давление на выходах № 2 и 4 холодного водорода и на выходе водорода в зазор генератора достигает минимальных значений, а

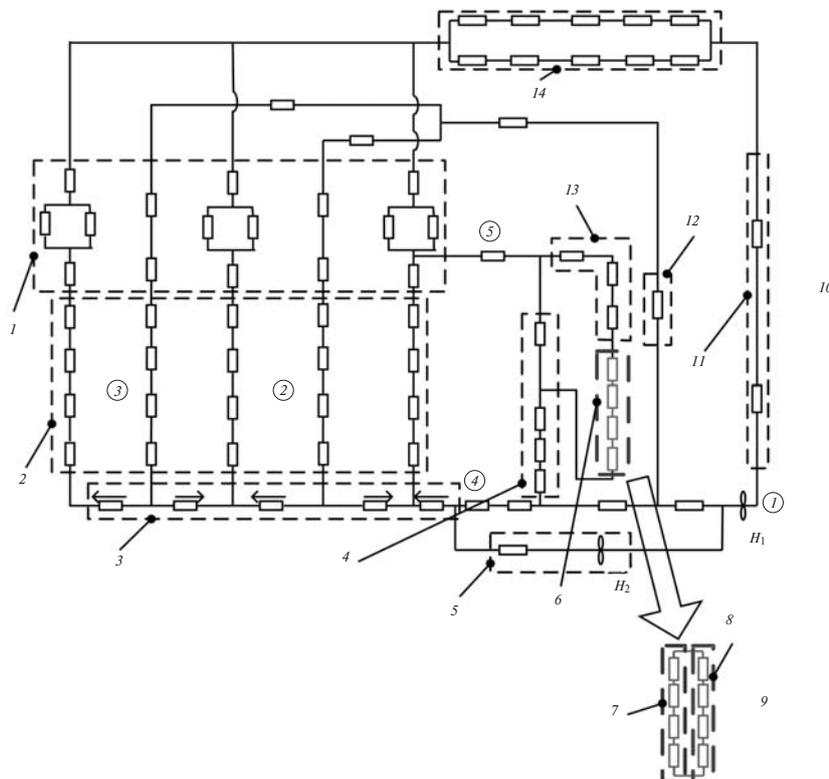


Рис. 2. Схема движения водородных потоков традиционных и полых медных экранов: 1 – каналы водородных камер между корпусом и сердечником статора; 2 – зоны горячего и холодного водорода; 3 – канал воздушного зазора; 4 – каналы для длинных и коротких нажимных пальцев; 5 – воздухозаборник ротора; 6 – канал между медным экраном и нажимным кольцом; 7 – канал между внешним слоем медных экранов и нажимным кольцом; 8 – канал между внутренним и внешним слоями медных экранов; 9 – схема движения потоков водорода для полого медного экрана; 10 – схема движения потоков водорода для традиционного медного экрана; 11 – канал к газоохладителю; 12 – выход водорода из лобовых частей статора; 13 – канал между нажимным кольцом и вентиляционным экраном; 14 – газоохладитель

Таблица 1

Конструкция экрана	Канал и узловая точка				
	Скорость / расход водорода (м/с / м ³ /с) у входа в вентилятор	Давление (Па) холодного водорода на выходе в зону № 2	Давление (Па) холодного водорода на выходе в зону № 4	Давление (Па) водорода на выходе из канала	Давление (Па) водорода на выходе между сердечником и вентиляционным экраном
Традиционная	32,43/15,55	307277	307270	306160	304713
Новая вариант 1	32,78/15,72	307250	307244	306151	304741
вариант 2	32,91/15,78	307240	307234	306147	304750
вариант 3	33,01/15,83	307233	307226	306144	304758

давление на выходе между сердечником статора и вентиляционным экраном становится максимальным. Таким образом, в новой конструкции медного экрана повышается эффективность вентиляции. Расчетные значения скорости на входе вентилятора и давление на выходе использованы в качестве граничных условий для трехмерной модели теплопередачи в зоне лобовых частей.

Модель для расчета потерь на вихревые токи в зоне лобовых частей. Для построения модели в качестве прототипа выбран турбогенератор мощностью 330 МВт при водяном охлаждении обмотки статора, а ротора и сердечника статора – водородным.

На рис. 3 в разрезе показаны лобовые части турбогенератора для традиционного медного экрана, а на рис. 4 – модель для расчета электромагнитного поля методом конечных элементов [9, 10], там же отмечены места входа и выхода потоков охлаждающего водорода.

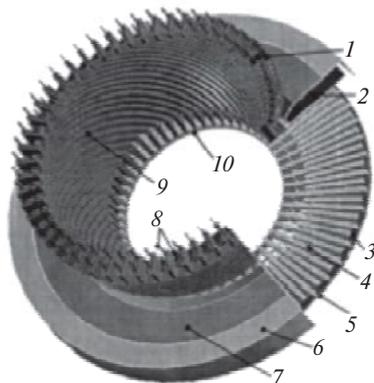


Рис. 3. Вид в разрезе лобовых частей турбогенератора: 1 – медные шины; 2 – нажимное кольцо; 3 – вентиляционный экран; 4 – нажимной палец; 5 – сердечник; 6 – дефлектор; 7 – медный экран; 8 – вход воды; 9 – изоляция обмотки; 10 – перегородка воздушного зазора

Для облегчения расчета в конструкции как традиционных, так и полых медных экранов выделены три зоны: внутренняя, промежуточная и наружная (см. рис. 1).

Потери на вихревые токи в зоне лобовых частей

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^k \dot{a} J_e^2 D_e s_r^{-1} dt,$$

где P_e – потери на вихревые токи в конструкции лобовых частей; J_e – единичная плотность вихревого тока; D_e – единичный объем; s_r – проводимость конструкции лобовых частей.

Полученные расчетом электромагнитного поля значения потерь на вихревые токи каждого элемента зоны лобовых частей для различных вариантов двухслойного и традиционного медного экрана показаны на рис. 5. При двухслойном медном экране с увеличением ширины вентиляционного канала вихревые потери постепенно увеличиваются в каждой из зон внешнего медного экрана (E_{ou} , F_{ou} и G_{ou}) и постепенно уменьшаются в зонах внутреннего медного экрана и нажимного кольца (E_{in} , F_{in} и G_{in}). Это показывает, что с уменьшением расстояния между внешним медным экраном и обмот-

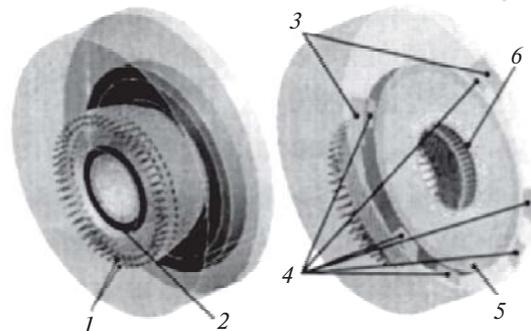


Рис. 4. Трехмерная конечноэлементная модель для расчета электромагнитного поля: 1 – вход воды; 2 – вход вентилятора; 3 – выход №4 холодного водорода; 4 – выход №2 холодного водорода; 5 – выход водорода между сердечником и вентиляционным экраном; 6 – выход в воздушный зазор

ками в лобовых частях статора эффект экранирования магнитного рассеяния внешним медным экраном усиливается и позволяет эффективно уменьшить вихревые потери во внутреннем медном экране и нажимном кольце. Поскольку нажимные пальцы располагаются за внешним медным экраном, то потери на вихревые токи в них в зависимости от ширины канала изменяются мало. Из рис. 5 видно, что наибольшие потери от вихревых токов – в области E внутреннего круга для традиционного медного экрана, причем эта область является максимальным тепловым источником в торцевой части турбогенератора.

При сравнении рис. 5, *a* и *b* можно отметить, что для всех рассмотренных вариантов двухслойного медного экрана потери от вихревых токов в медном экране и нажимном кольце всегда больше, а в нажимных пальцах всегда меньше, чем при использовании традиционного медного экрана.

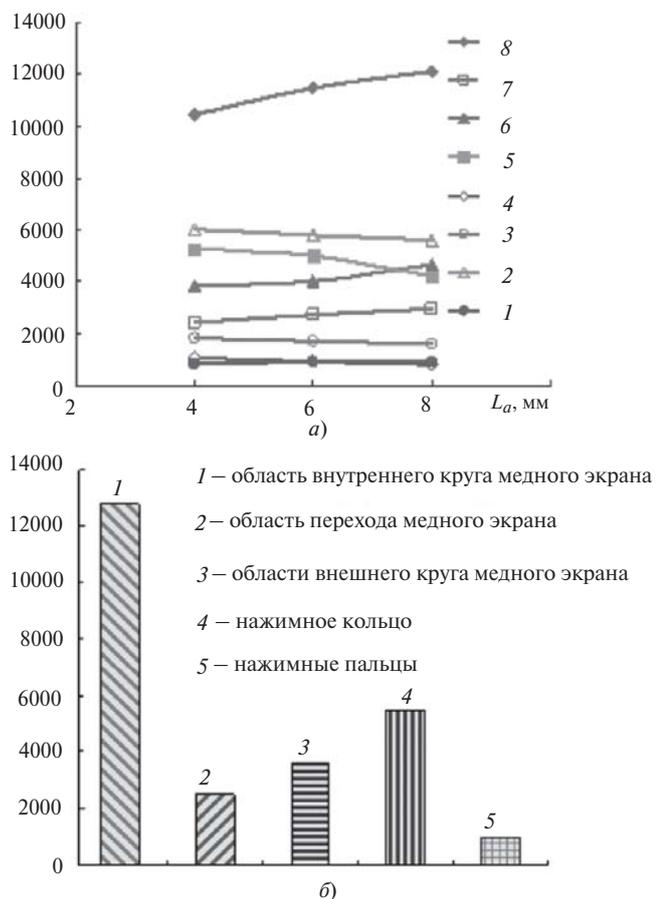


Рис. 5. Значение вихревых потерь для элементов зоны лобовых частей при традиционной (*a*) и новой (*b*) конструкциях медного экрана: 1 – наружная зона традиционного медного экрана G ; 2 – промежуточная зона традиционного медного экрана F ; 4 – нажимное кольцо; 5 – нажимные пальцы; 6 – наружная зона внутреннего слоя полого медного экрана G_{in} ; 7 – промежуточная зона внутреннего слоя полого медного экрана F_{in} ; 8 – внутренняя зона внутреннего слоя полого медного экрана E_{in} ; 9 – наружная зона внешнего слоя полого медного экрана G_{ou} ; 10 – промежуточная зона наружного слоя полого медного экрана F_{ou} ; 11 – внутренняя зона внешнего слоя полого медного экрана E_{ou}

Сравнительный анализ результатов гидравлических и тепловых расчетов до и после конструктивного изменения. Математическое моделирование аэродинамических и тепловых полей в области лобовых частей статора выполнено при следующих допущениях и граничных условиях: движение водородных потоков в турбогенераторе является турбулентным ($Re > 2300$); скорость течения воды на входе в лобовые части обмотки равна 1 м/с; температура на входе вентилятора $T = 41$ °С. За граничные условия приняты значения, указанные в табл. 1. В качестве источников тепла приняты значения потерь от вихревых токов в конечноэлементной сетке расчета трехмерного электромагнитного поля.

Рассчитанные для традиционной конструкции медного экрана средние значения скорости потока водорода в вентиляционном канале между медным экраном и нажимным кольцом (НК) составляют: 31,1 м/с во внутренней зоне E ; 53,9 м/с в промежуточной зоне F ; 37 м/с в наружной зоне G . Для новой конструкции медного экрана расчет проведен для ширины внутреннего канала, равной 4, 6 и 8 мм при ширине канала между медным экраном и НК, равной 4 мм; результаты расчета представлены на рис. 6.

Как видим из рис. 6, средние значения скорости в вентиляционных каналах между внутренним медным экраном (зон E_{in} , F_{in} и G_{in}) и нажимным кольцом снижаются в радиальном направлении от внутренней зоны к наружной, а в вентиляционных каналах между внутренним и внешним медными экранами при любой ширине канала также постепенно уменьшаются в том же направлении. С увеличением ширины канала между внутренним и

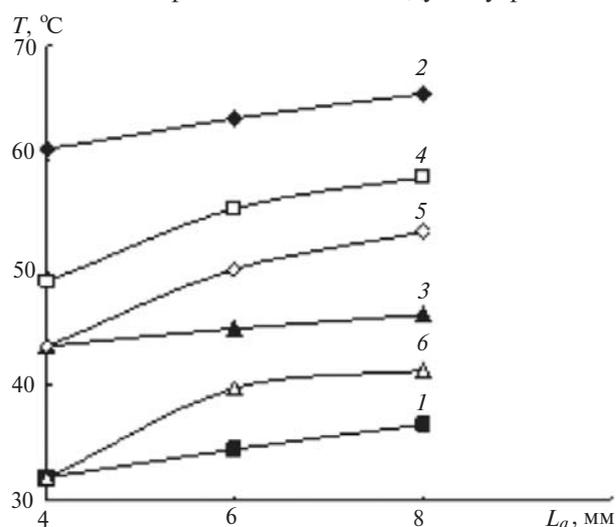


Рис. 6. Сравнение средних значений скоростей в вентиляционных каналах различной ширины вокруг медного экрана: 1 – вентиляционный канал между НК и E_{in} ; 2 – вентиляционный канал между НК и F_{in} ; 3 – вентиляционный канал между НК и G_{in} ; 4 – вентиляционный канал между E_{in} и E_{ou} ; 5 – вентиляционный канал между F_{in} и F_{ou} ; 6 – вентиляционный канал между G_{in} и G_{ou}

внешним медными экранами средние значения скорости водорода возрастают как в канале между внутренним и внешним медными экранами, так и в канале между внутренним медным экраном и нажимным кольцом. При ширине канала между внутренним и внешним медными экранами 8 мм средние значения скорости водорода самые высокие.

На рис. 7 показано распределение температуры в конструкции традиционного медного экрана: средняя температура составляет 57,3 °С, максимальная 60,2 °С – на внутреннем радиусе медного экрана.

Для проверки достоверности результатов расчета температуры медного экрана турбогенератора мощностью 330 МВт измерены на электростанции. Три датчика температуры были расположены равномерно по окружности (через 120 °) и на одинаковой высоте по внутреннему радиусу медного экрана. Результаты при номинальном режиме работы турбогенератора для трех датчиков составили: 74,3; 63,6; 56,9 °С. Сравнение с измеренными значениями свидетельствовало об удовлетворительной точности расчета.

Результаты расчета максимальных и средних значений температуры для исследуемых вариантов новой конструкции медного экрана представлены

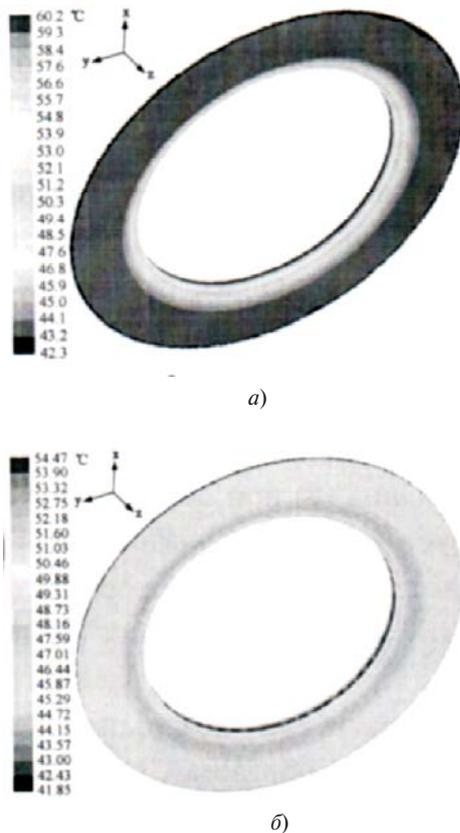


Рис. 7. Температурное поле медного экрана традиционной (а) и новой (б) конструкций; ширина вентиляционного канала 8 мм

на рис. 8. Значения рассчитаны для каждой из выделенных зон внешнего и внутреннего экранов.

Как видно из рис. 8,а, для любой ширины канала максимальная температура внешнего медного экрана всегда выше, чем внутреннего. С увеличением ширины вентиляционного канала между внутренним и внешним медными экранами максимальная температура во внутренней зоне E_{ou} внешнего экрана постепенно уменьшается; в промежуточной зоне F_{ou} сначала уменьшается, потом увеличивается; в наружной зоне G_{ou} сначала увеличивается, потом уменьшается. Это связано как с увеличением потерь от вихревых токов, так и с эффектом охлаждения внешнего медного экрана. Максимальные температуры внутреннего медного экрана с увеличением ширины вентиляционного канала постепенно уменьшаются в каждой зоне

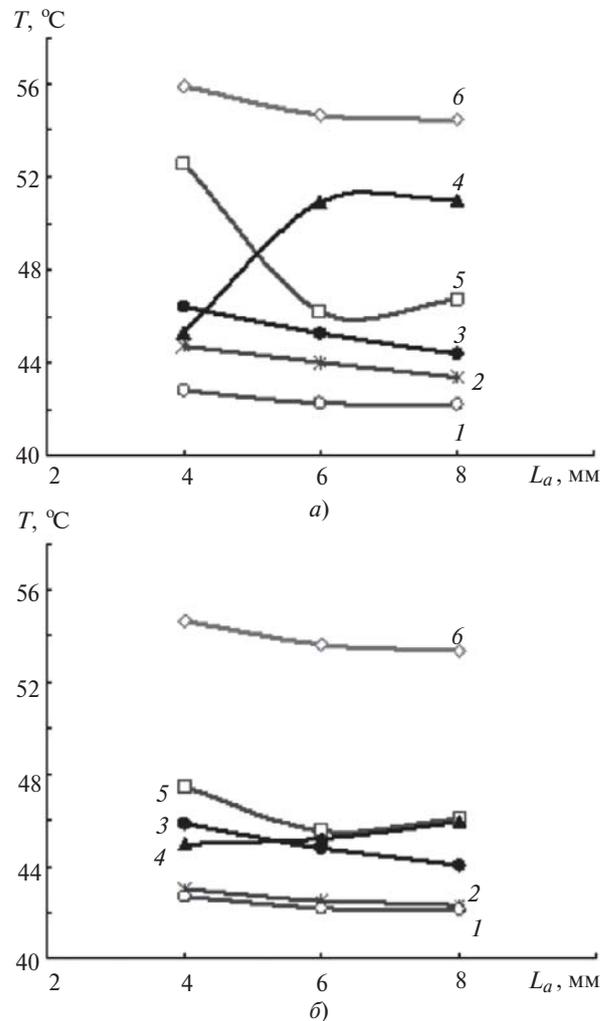


Рис. 8. Максимальные (а) и средние (б) значения температуры в выделенных зонах новой конструкции медного экрана при вентиляционных каналах различной ширины: 1 – наружная зона внутреннего слоя полого медного экрана G_{in} ; 2 – промежуточная зона внутреннего слоя полого медного экрана F_{in} ; 3 – внутренняя зона внутреннего слоя полого медного экрана E_{in} ; 4 – наружная зона внешнего слоя полого медного экрана G_{ou} ; 5 – промежуточная зона наружного слоя полого медного экрана F_{ou} ; 6 – внутренняя зона наружного слоя полого медного экрана E_{ou}

(E_{in} , F_{in} и G_{in}), поскольку вихревые потери внутреннего медного экрана уменьшаются, в то же время усиливается эффект охлаждения. При ширине вентиляционного канала между внутренним и внешним экранами 8 мм максимальная температура экрана снижается на 1,4 °С по сравнению с каналом шириной 4 мм и на 5,7 °С по сравнению с традиционным медным экраном.

Из рис. 8,б видим, что для любой ширины вентиляционного канала средние значения температуры постепенно уменьшаются в радиальном направлении во всех зонах внутреннего и внешнего экранов. Наименьшая разница в значениях средних температур – в области перехода внешнего медного экрана от промежуточной зоны F_{ou} к наружной G_{ou} . С увеличением ширины вентиляционного канала изменение средних значений температуры имеет одинаковую тенденцию с максимальными. При ширине вентиляционного канала 8 мм среднее значение температуры внешнего медного экрана снижается на 3,9 °С по сравнению с традиционным экраном.

Среднее значение температуры во внутренней зоне E_{ou} внешнего медного экрана значительно выше, чем в любой другой зоне внутреннего и внешнего экранов. Из приведенного выше анализа следует, что при использовании двухслойного медного экрана можно эффективно снизить максимальное и среднее значения температуры и повысить безопасность и надежность работы турбогенератора.

Как видно из рис. 8,б, где показано распределение температур в конструкции сдвоенного медного экрана, при ширине вентиляционного канала между внутренним и внешним медными экранами 8 мм максимум температуры 54,5 °С приходится на внутреннюю зону E_{ou} внутреннего радиуса внешнего экрана.

Таблица 2

Элементы конструкции	Температура, °С	
	максимальная	средняя
Лобовые части обмотки статора	54,0	52,1
Нажимное кольцо	43,9	43,1
Нажимные пальцы	51,8	43,6

В табл. 2 представлены результаты расчета максимальных и средних значений температуры в элементах конструкции при использовании традиционного медного экрана, на рис. 9 – изменение расчетных значений максимальных и средних значе-

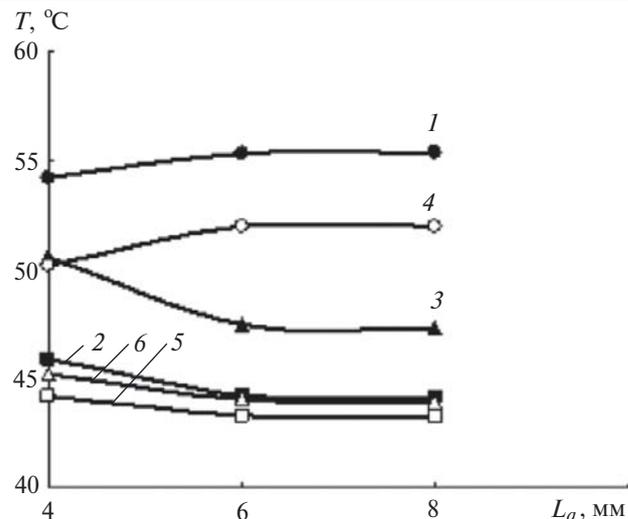


Рис. 9. Результаты расчета температуры в различных конструктивных элементах в зоне лобовых частей статора для конструкций полого медного экрана: 1 – максимальная температура в лобовых частях обмотки статора; 2 – максимальная температура в нажимном кольце; 3 – максимальная температура в нажимных пальцах; 4 – средняя температура в лобовых частях обмотки статора; 5 – средняя температура в нажимном кольце; 6 – средняя температура в нажимных пальцах

ний температуры в лобовых частях обмотки статора, нажимном кольце и нажимных пальцах для различных конструкций двухслойного медного экрана.

Как видно из рис. 9, с увеличением ширины вентиляционного канала между внутренним и внешним экранами максимальное и среднее значения температуры в лобовых частях обмотки статора постепенно увеличиваются и при ширине канала 8 мм достигают максимальных значений 55,4 и 52,0 °С соответственно. По сравнению с традиционной конструкцией медного экрана среднее значение температуры практически не меняется, а максимальное уменьшается на 1,4 °С.

Максимальное и среднее значения температуры в нажимном кольце и нажимных пальцах с увеличением ширины вентиляционного канала постепенно уменьшаются, причем более значительно в интервале ширины канала 4–6 мм. При ширине канала 8 мм максимальное и среднее значение температуры в нажимном кольце минимальны 44,2 и 43,3 °С и отличаются от температур традиционной конструкции на 0,3 и 0,2 °С. Одновременно максимальное и среднее значения температуры в нажимных пальцах также уменьшаются до минимума 47,3 и 43,9 °С. По сравнению с традиционной конструкцией медного экрана максимальная температура в нажимных пальцах меньше на 4,5 °С, а ее среднее значение выше на 0,3 °С.

Температурное поле в зоне лобовых частей статора, нажимном кольце и нажимных пальцах при ширине между внутренним и внешним экранами 8 мм показано на рис. 10.

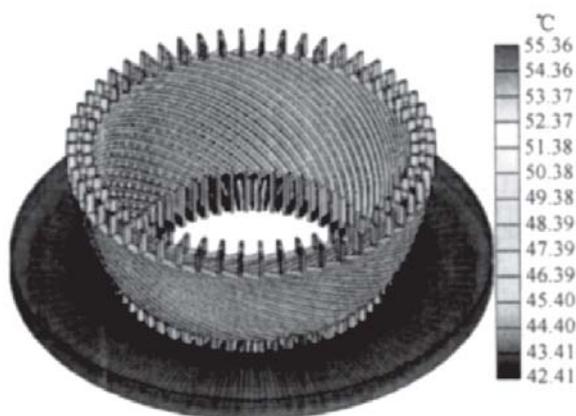


Рис. 10. Температурное поле в лобовой части обмотки статора, нажимном кольце и нажимных пальцах

Выводы. 1. Предлагаемая конструкция полого медного экрана способствует увеличению общего расхода водорода по сравнению с традиционной конструкцией, т.е. усиливает эффект охлаждения турбогенератора в целом.

2. С увеличением ширины вентиляционного канала между внутренним и внешним экранами потери на вихревые токи во внешнем экране постепенно увеличиваются, а во внутреннем и в нажимном кольце уменьшаются; потери на вихревые токи в нажимных пальцах практически не меняются.

3. Для любой ширины вентиляционного канала между внутренним и внешним экранами максимальная температура внешнего экрана всегда выше внутреннего. При ширине канала 8 мм в новой конструкции экрана по сравнению с традиционной максимальные значения температуры снизились в медном экране на 5,7 °С, в нажимных пальцах на 4,5 °С.

4. Представленная в статье конструкция медного экрана рекомендуется к применению в мощных турбогенераторах, поскольку обеспечивает рациональное распределение и более низкий уровень температурного поля, а также экономию меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1979, 176 с.
2. Данилевич Я.Б., Ли Вэйли. Температурное поле ротора турбогенератора с непосредственным воздушным охлаждением с подпазовыми и радиальными каналами. – Изв. РАН. Энергетика, 1998, с. 74–79.
3. Jack A.G., Mecrow B.C. A method to calculate turbogenerator end region fields and losses and validation using measured results. – IEEE Trans. Energy Convers., Mar. 1987, vol. EC-2, No. 1, pp. 174–181.
4. Fujita M., Ueda T., Tokumasu T., Nagakura K., Kakiuchi M. and Otaka T. Eddy current analysis in the stator and structures of large capacity turbine generators. – Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Syst., Nov. 2009, pp. 1–6.
5. Weili Li, Guan Chunwei, Zheng Ping. Calculation of a complex 3-D model of a turbogenerator with end region regarding electrical losses, cooling, and heating. – IEEE Trans. Energy Convers., Sep. 2011, vol. 26, No. 4, pp. 1073–1080.
6. Shiyuan C. Network analyses of ventilation system for large hydrogenerator. – Proc. 5th ICEMS, Aug. 2001, vol. 1, pp. 137–140.
7. Traxler-Samek G., Zickermann R. and Schwery A. Cooling airflow, losses, and temperatures in large air-cooled synchronous machines. – IEEE Trans. Ind. Electron., Jan. 2010, vol. 57, No. 1, pp. 172–180.
8. Hannalla A.Y. Numerical analysis of transient field problems in electrical machines. – Elect. Eng., Sep. 1976, vol. 123, No. 9, pp. 893–898.
9. Feiyang H., Weili L., Likun W., Chunwei G., Yihuang Z. and Yong L. Influence of copper screen thickness on three-dimensional electromagnetic field and eddy current losses of metal parts in end region of large water-hydrogen-hydrogen cooled turbo-generator. – IEEE Trans. Ind. Electron., Jul. 2013, vol. 60, No. 7, pp. 2595–2601.
10. Chen Y.C., Chen C.L. CFD modeling for motor fan system. – IEEE Inter. Electric Machines and Drives Conf. – Madison, Wisconsin (USA), 2003, pp. 764–768.

[22.09.14]

Авторы: Чэн Пэн (Cheng Peng) – доцент кафедры электротехники Харбинского инженерного университета (КНР). Кандидатскую диссертацию защитил в Кубанском государственном технологическом университете в 2003 г.

Ли Вэйли (Li Weili) – профессор кафедры электрических машин и электроаппаратов Пекинского Jiao Tong университета (КНР). Кандидатскую диссертацию защитил в Отделе электроэнергетических проблем Российской Академии Наук в 1997 г.

Ван Ликунь (Wang Likun) – аспирант Харбинского университета науки и техники (КНР).

Данилевич Януш Брониславович (1931–2011) – академик РАН, в последние годы жизни руководитель лаборатории химической энергетики и экологии Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН. Скончался в 2011.

Антипов Виктор Николаевич окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в 1963 г. Защитил в 1989 г. докторскую диссертацию «Обеспечение заданных коммутационных качеств при проектировании машин постоянного тока промышленного назначения». Ведущий научный сотрудник отдела химических проблем энергетики Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН.

Хань Цзичао (Han Jichao) – аспирант Харбинского университета науки и техники (КНР).

Studying Different Designs of a Copper Screen in the End-face Zone of a Large Turbine-generator on the Basis of 3d Modeling

CHENG PENG, LI WEILI, VANG LIKUN, **YA.B. DANILEVICH**, V.N. ANTIPOV, and HAN JICHAO

A new design of the copper screen for installing in the end-face zone of a large turbine-generator called a twin bulk copper screen is considered. The new design was optimized by varying the width of the ventilation channel between the inner and outer copper screens. Models representing the motion of cooling hydrogen flows on the stator half-length in the axial direction and 3D models for calculating the electromagnetic field in the end-face zones are developed for different design versions of the turbine-generator end-face parts with a multijet ventilation system. The results from modeling the motion of cooling hydrogen flows and from calculating the electromagnetic field in the turbine-generator end-face zone were used to obtain the corresponding values of hydrogen flow motion velocities and pressure (the boundary conditions) and eddy-current losses (heat sources) for the conventional and new copper screen designs. Models for analyzing the motion of hydrogen flows and heat transfer in the turbine-generator end-face zone are developed. The effect the copper screen design has on the distribution of hydrogen flows and on the temperature of end-face parts is considered. For the conventional copper screen design, a comparison of the experimentally measured with the calculated values of temperatures is carried out, the results of which demonstrated sufficient accuracy of the calculation method. The use of the new copper screen design results in a lower screen temperature, and increasing the width of ventilation channels leads to a further decrease of temperature.

Key words: turbine generator, end-face zone, copper screen designs, motion of cooling hydrogen flows, electromagnetic and temperature fields

REFERENCES

1. Brynskii E.A., Danilevich Ya.B., Yakovlev V.I. *Elektromagnitnye polya v elektricheskikh mashinakh* (Magnetoelectric fields in electrical machines). Leningrad, Publ. Energiya, 1979, 176 p.
2. Danilevich Ya.B., Li Veili. *Izv. Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika – in Russ.* (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering), 1998, pp. 74–79.
3. Jack A.G., Mecrow B.C. A method to calculate turbogenerator end region fields and losses and validation using measured results. – *IEEE Trans. Energy Convers.*, Mar. 1987, vol. EC-2, No. 1, pp. 174–181.
4. Fujita M., Ueda T., Tokumasu T., Nagakura K., Kakiuchi M. and Otaka T. Eddy current analysis in the stator and structures of large capacity turbine generators. – *Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, Nov. 2009, pp. 1–6.
5. Weili Li, Guan Chunwei, Zheng Ping. Calculation of a complex 3-D model of a turbogenerator with end region regarding electrical losses, cooling, and heating. – *IEEE Trans. Energy Convers.*, Sep. 2011, vol. 26, No. 4, pp. 1073–1080.
6. Shiyuan C. Network analyses of ventilation system for large hydrogenerator. – *Proc. 5th ICEMS*, Aug. 2001, vol. 1, pp. 137–140.
7. Traxler-Samek G., Zickermann R. and Schwery A. Cooling airflow, losses, and temperatures in large air-cooled synchronous machines. – *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Jan. 2010, vol. 57, No. 1, pp. 172–180.
8. Hannalla A.Y. Numerical analysis of transient field problems in electrical machines. – *Elect. Eng.*, Sep. 1976, vol. 123, No. 9, pp. 893–898.
9. Feiyang H., Weili L., Likun W., Chunwei G., Yihuang Z. and Yong L. Influence of copper screen thickness on three-dimensional electromagnetic field and eddy current losses of metal parts in end region of large water-hydrogen-hydrogen cooled turbo-generator. – *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Jul. 2013, vol. 60, No. 7, pp. 2595–2601.
10. Chen Y.C., Chen C.L. CFD modeling for motor fan system. – *IEEE Inter. Electric Machines and Drives Conf. Madison Wisconsin (USA)*, 2003, pp. 764–768.

Authors: **Chen Peng** (Harbin, KNR) – *Cand. Sci. (Eng.)*, Associate Professor, Harbin Engineering University.

Li Weili (Peking, KNR) – *Cand. Sci. (Eng.)*, Professor, Peking Jiao Tong University.

Wang Likun (Harbin, KNR) – *Ph.D. Student*, Harbin Science and Technics University.

Danilevich Yanush Bronislavovich (St. Petersburg, Russia) – *Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory, the Grebenshchikov Institute for the Chemistry of Silicates, the Russian Academy of Sciences (RAS). He died in 2011.*

Antipov Viktor Nikolayevich (St. Petersburg, Russia) – *Dr. Sci. (Eng.)*, Leading Scientific Researcher, the Grebenshchikov Institute for the Chemistry of Silicates, RAS.

Han Jichao (Harbin, KNR) – *Ph.D. Student*, Harbin Science and Technics University.

