

УДК 536.7

К. А. КОБЗАРЬ, П. Г. ГАКАЛ, Е. А. ОВСЯННИКОВА

ОХЛАЖДЕНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ВОДОРОДОМ

В статье обосновано применение водорода для охлаждения машин большой мощности. Предложено соотношение для определения коэффициента теплоотдачи между водородом и внутренними стенками охлаждающих каналов в проводниках обмотки ротора, представляющее собой граничные условия III-го рода. Описаны методики проведения испытаний, позволяющие определить температуру обмотки ротора турбогенератора, и представлены результаты проведенных экспериментов. Выполнено исследование теплового состояния обмотки ротора методом конечных элементов.

Ключевые слова: турбогенератор, ротор, обмотка, граничные условия.

Введение. Объектом исследования данной работы является ротор турбогенератора, так как он представляет собой особо нагруженный узел. Обмотка ротора выполняет токопроводящую функцию, находясь при этом под действием центробежных сил. В турбогенераторах большой мощности применяется способ непосредственного охлаждения обмоток ротора, при котором охлаждающая среда движется непосредственно по внутренним каналам в проводниках обмотки ротора [1]. Для интенсификации теплопередачи в качестве охлаждающей среды целесообразно использовать водород, который имеет высокий коэффициент теплоотдачи.

В турбогенераторе мощностью 550 МВт осуществлен переход на водородное охлаждение ротора. До настоящего момента в турбогенераторах большой мощности применялось непосредственное охлаждение обмоток ротора водой. Замена охлаждающей среды в роторе на водород позволит избавиться от трудности организации водоподвода, эрозии и кавитационных явлений в медных проводниках обмотки ротора, характерных для систем с водяным охлаждением. Это позволит эффективно использовать водород, нагнетаемый вентиляторами, установленными по обоим торцам вала, и применить его как для охлаждения сердечника статора, так и для охлаждения обмотки ротора. Для исследуемого генератора избыточное давление водорода в системе охлаждения составляет 5 атм.

Анализ основных достижений и литературы. Распределение температуры в теле ротора и в его узлах описывается стационарным нелинейным дифференциальным уравнением Пуассона в частных производных [2]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + w = 0,$$

где θ – разность температур, К;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

w – объемная плотность тепловыделения, Вт/м³.

Для непосредственно охлаждаемого проводника с током решение уравнения Пуассона в одномерной постановке (вдоль оси x) впервые было получено и решено С.Б. Васютинским и Г.П. Ногаенко [3]. Более подробно данный метод рассмотрен в книге А.И. Москвитина [4]. Результаты расчета в одномерной постановке теплового состояния проводника, охлаждаемого различными средами, а, именно: водой, воздухом, водородом, представлены в книге И.Ф. Филиппова [1].

Наиболее распространенным методом определе-

ния теплового состояния элементов турбогенератора является метод тепловых схем замещения. К его достоинствам можно отнести достаточную простоту в использовании. Согласно данному методу превышение температуры есть произведение тепловой нагрузки на сопротивление теплоотдачи на границе между элементом и охлаждающей средой. Так для обмотки ротора тепловая нагрузка определяется как отношение мощности потерь, выделяемых в медных проводниках, к площади поверхности тепловыделения. Сопротивление теплоотдачи обратно пропорционально произведению площади сечения охлаждающего канала и коэффициента теплоотдачи. Данный метод использован при моделировании теплового состояния обмоток ротора турбогенератора мощностью 200 МВт с непосредственной системой охлаждения [2]. Недостаток метода состоит в том, что он не предоставляет возможности установить распределение температуры по всему объему ротора, а также учесть различие в условиях теплопередачи на разных участках ротора. С помощью данного метода возможно оценить только среднее превышение температуры узлов ротора.

Задача определения температурного поля ротора турбогенератора мощностью 20 МВт с непосредственным охлаждением обмотки воздухом решена в [5] методом конечных элементов в двумерной постановке. Учтен теплообмен на поверхности зуба ротора, теплообмен между медью витков и воздухом в радиальном вентиляционном канале, а также теплообмен между сердечником и воздухом в подпазовом канале. Однако, в данной работе рассмотрено течение только в радиальном канале, что не позволяет перенести полученные результаты на течение в аксиальном канале ротора турбогенератора большой мощности и распространить результаты расчетов на водород; не рассмотрено трехмерное распределение температур в роторе.

Цель исследования, постановка задачи. Для оценки эффективности применения непосредственного охлаждения ротора турбогенератора водородом необходимо решить ряд задач, а именно:

1. Разработать математическую модель трёхмерного теплового состояния обмотки ротора.
2. Определить условия теплообмена (граничные условия) между водородом и внутренними стенками охлаждающих каналов в проводниках обмотки ротора.
3. Определить тепловыделения в обмотке для различных режимов работы турбогенератора.
4. Провести анализ теплового состояния обмот-

© К. А. Кобзарь, П. Г. Гакал, Е. А. Овсянникова, 2015

ки ротора методом конечных элементов с использованием предложенных моделей, граничных условий.

5. Провести натурные испытания с целью определения температур в обмотке ротора для подтверждения полученных результатов расчета.

Решение уравнения Пуассона в трехмерной постановке возможно только с применением специальных численных методов. Предложено использовать метод конечных элементов, реализованный в компьютерной среде SolidWorks [6]. Для замыкания уравнения применены граничные условия III рода, отображающие условия теплопередачи на границах системы с охлаждающей средой. Граничные условия представляют собой распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке проводника обмотки ротора при турбулентном течении водорода. Для определения коэффициента теплоотдачи предложена формула [7]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re_f \cdot Pr_f \cdot \psi}{1 + \frac{900}{Re_f} + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr_f^{2/3} - 1)} \cdot \left(1 - \frac{0,45}{2,4 + Pr_f} \right) \times \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{-n} \cdot \zeta, \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);
 d_1 – эквивалентный диаметр внутреннего охлаждающего канала проводника, м;

d_2 – эквивалентный диаметр проводника по наружному периметру, м;

$d_{\text{экв}} = d_2 - d_1$ – эквивалентный диаметр проводника, м;

ζ – поправочный коэффициент, зависящий от отношения d_1/d_2 и Re_f ;

ψ – коэффициент, учитывающий свойства газа;

ξ – коэффициент сопротивления трения при изотермическом течении в гладких трубах;

Re_f – число Рейнольдса газа, определенное по эквивалентному диаметру и температуре газа;

Pr_f – число Прандтля, определенное по температуре газа.

Формула справедлива в диапазоне значений d_1/d_2 от 0,03 до 1, чисел Прандтля Pr_f от 0,7 до 100 и чисел Рейнольдса Re_f от 10^4 до 10^6 . $n=7$ в диапазоне Re_f 10^4 – 10^5 .

Для водорода число Прандтля $Pr_f \approx 0,7$ и слабо зависит от температуры. Режим установившегося течения в охлаждающих каналах ротора – турбулентный. Порядок критерия Рейнольдса $Re_f \approx 10^4$. Характер изменения плотности, вязкости и теплопроводности **водорода** описывается следующими формулами:

$$\rho_{H_2} = 0,08987 \cdot P_{H_2} \cdot \left(\frac{273}{273 + T_{H_2}} \right), \text{ кг/м}^3,$$

$$\lambda_{H_2} = 0,174 \cdot (1 + 0,0024022 \cdot T_{H_2}), \text{ Вт/м} \cdot \text{°C},$$

$$v_{H_2} = \frac{8,4 \cdot 10^6}{\rho_{H_2}} \cdot \sqrt{\frac{273 + T_{H_2}}{273}} \cdot \frac{1,267}{1 + \frac{73}{273 + T_{H_2}}}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где P_{H_2} – давление водорода, атм;

T_{H_2} – температура водорода, °C.

Методика проведения испытаний турбогенератора.

На ГП Завод "Электротяжмаш" проведены тепловые испытания генератора мощностью 550 МВт в режиме холостого хода и короткого замыкания. Температура обмотки ротора определялась косвенно. До включения машины в сеть проведено измерение сопротивления обмотки ротора в холодном состоянии, когда температура обмоток равна температуре окружающей среды. При проведении испытаний измерены сопротивления проводников при действии постоянного тока, т.е. в горячем состоянии. Для измерения сопротивлений проводников обмотки применён метод вольтметра-амперметра. По изменению сопротивления, согласно известным зависимостям для материала проводников обмотки, определяется среднее превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды на выходе из газоохладителя. Температура холодного газа на выходе из газоохладителя $t_{\text{х.г.}} = 40$ °C.

Опыт холостого хода без возбуждения проводится при разомкнутой обмотке статора, когда ток в обмотке статора равен нулю $I=0$ [8]. Характеристику холостого хода снимают при питании обмотки возбуждения от постороннего источника. После включения генератора в сеть к обмотке возбуждения подводится постоянный ток. С помощью вспомогательного привода, соединенного механически с генератором, устанавливают и поддерживают постоянную частоту вращения ротора генератора. При установившейся частоте вращения увеличивают ток возбуждения, протекающий в обмотке ротора генератора, до тех пор, пока линейное напряжение в цепи статора (U_0) не достигнет значения $U_0 = 1,3 \cdot U_n$, где U_n – номинальное напряжение статора, соответствующее силе тока в обмотке статора $I=I_n$. Установив значение напряжения $U_0 = 1,3 \cdot U_n$ постепенно уменьшают ток возбуждения до $i_b=0$. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость $U=f(i_b)$. Частота вращения (n_n) измеряется частотомером с ценой деления 0,2 Гц. Напряжение статора измеряется вольтметром постоянного тока, предел измерения от 75 В до 600 В, класс точности 0,5. Напряжение возбуждения в обмотке ротора u_f измеряют при помощи пары контактных колец измерительного токосъемника, на которые выводятся провода от концов обмотки (т.е. с траверс щеточного аппарата). Ток возбуждения i_b в обмотке ротора определяется косвенно, по напряжению в шунтах, измеренному милливольтметром постоянного напряжения.

Для максимального значения измеренного тока возбуждения i_b рассчитывается сопротивление обмотки ротора по закону Ома:

$$R_r = \frac{u_f}{i_b},$$

где R_r – сопротивление обмотки возбуждения, измеренное при испытании (в горячем состоянии), Ом.

Данный способ позволяет определить среднюю температуру обмотки ротора.

$$t = \frac{R_r - R_x}{R_x} \cdot (2365 + t_x) + t_x,$$

где R_r – сопротивление обмотки возбуждения, измеренное при испытании, Ом;

R_x – сопротивление обмотки возбуждения в холодном состоянии, (приведенное к температуре $t_x=15^\circ\text{C}$);

t_x – температура при которой определялось R_x ($t_x=15^\circ\text{C}$).

Опыт установившегося трехфазного короткого замыкания проводится при замкнутых накоротко выводах генератора [8]. Схема испытания представлена на рис.1.

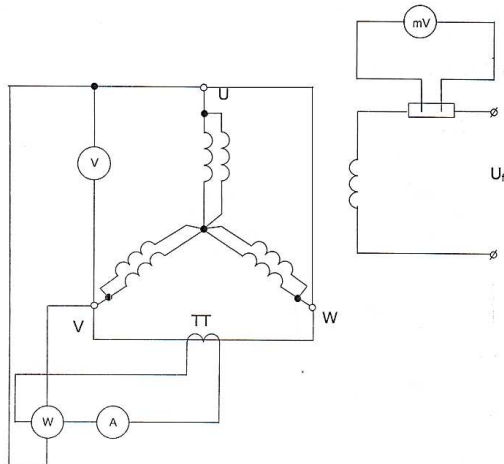


Рис. 1 – Схема испытания синхронного генератора в режиме трехфазного короткого замыкания

Фазы замкнуты друг с другом и на нейтраль через трансформатор тока. Вращение ротора генератора осуществляется вспомогательным приводом с постоянной частотой вращения $n=n_n$.

Изменяют ток возбуждения i_b от значения, при котором ток короткого замыкания $I_{к.з.}=1,1 \cdot I_n$ до $i_b=0$. Характеристика представляет собой зависимость тока в обмотке статора от тока возбуждения $I_{к.з.}=f(i_b)$. Измерение силы тока в фазах обмотки статора производится с помощью трех амперметров переменного тока с пределами измерений 5 А, класса точности 0,5. Ток возбуждения в обмотке ротора измеряется косвенно по напряжению в шунтах, измеренному милливольтметром. Применен шунт с параметрами 3000 А, 75 мВ.

Изменение температуры обмотки на различных режимах работы по результатам расчетов численным методом и результатам испытаний представлено на рис. 2.

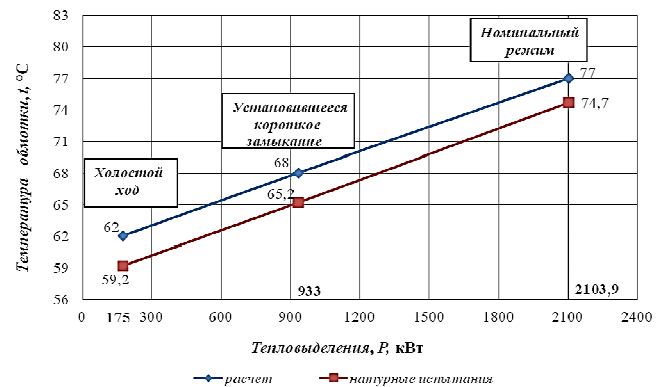


Рис. 2 – Зависимость температуры обмотки ротора от тепловыделений

При аппроксимировании прямой, полученной по результатам проведенных испытаний, максимальная температура обмотки ротора в номинальном режиме составила $74,7^\circ\text{C}$ ($347,7\text{ K}$). Допустимая предельная температура нагрева изоляции обмотки ротора составляет 105°C (класс «F»).

Результаты расчетов численным методом. В связи с особенностями организации течения теплоносителя – выход охлаждающей среды из обмотки осуществляется в средней части бочки ротора – рассматривается только половина пазовой части обмотки длиной 3 м. Исследована пазовая часть катушки обмотки ротора генератора мощностью 550 МВт. Катушка состоит из 5 проводников. Водород движется по внутренним каналам проводников. Трёхмерная модель отстроена до середины ротора длиной 3 м, т.к. в этом месте происходит выход охлаждающей среды (симметричная задача). Результаты расчётов для номинального режима, характеризующего силой тока в обмотке возбуждения $i_b=4650\text{ A}$, представлены на рис. 3.

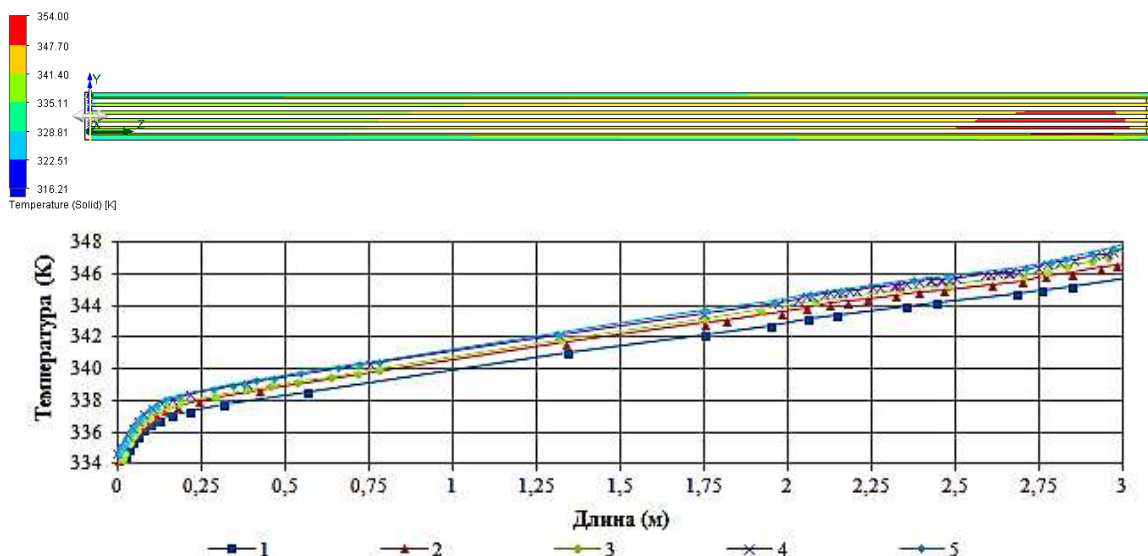


Рис. 3 – Изменение температуры вдоль пазовой части проводника катушки для номинального режима

Характер изменения температуры вдоль пазовой части обусловлен падением скорости охлаждающей среды при движении вдоль проводника и уменьшением способности водорода отбирать теплоту от проводника вследствие повышения собственной температуры.

Выводы. Применение водорода в качестве охлаждающего ротора турбогенератора мощностью 550 МВт весьма перспективно. Для определения теплового состояния обмотки ротора в трёхмерной постановке применен метод конечных элементов.

Сравнение расчётных данных и результатов испытаний показывает, что погрешность расхождения расчётных температур с результатами измерений составляет не более 10 %, что подтверждает адекватность модели и замыкающего соотношения для расчета коэффициента теплоотдачи. Анализ результатов расчёта теплового состояния ротора генератора мощностью 550 МВт позволяет сделать вывод о допустимости режима работы генератора при номинальном значении тока.

Список литературы: 1. *Филлипов, И.Ф.* Вопросы охлаждения электрических машин / И.Ф. Филлипов. – М.: Энергия, 1964. – 334с. 2. *Извехов, В.И.* Проектирование турбогенераторов / В.И. Извехов, Н.А. Серихин, А.И. Абрамов. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 440с. 3. *Васютинский С.Б.* Тепловой расчет токоведущих трубок / С.Б. Васютинский, Г.П. Ногаенко // Вестник электропромышленности. – 1957. – № 10. 4. *Москвитин, А.И.* Непосред-

ственное охлаждение электрических машин / А.И. Москвитин. – Изд. АН ССР, 1962. 5. *Вэйли, Л.* Температурное поле ротора турбогенератора с непосредственным охлаждением с подпазовыми и радиальными каналами: дис. ... к.т.н. / Вэйли Ли. – Санкт-Петербург, 1997. 6. *Алямовский, А.А.* SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с. 7. *Теплотехнический справочник: в 2-х т.* / под ред. В.Н. Юреньева и П.Д. Лебедева Т.2. – М.: «Энергия», 1976. – 896 с. 8. *Гуревич, Э.И.* Испытание синхронных машин: Учеб. пособие / Э.И. Гуревич, Т.И. Егорова, Б.В. Сидельников, Н.А. Солдатенкова, М.В. Сочава, Н.Н. Чернышев. – СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2004. – 104с.

Bibliography (transliterated): 1. *Fillipov, I.F.* *Voprosy ohlazhdenija elektricheskikh mashin.* I.F. Fillipov. – Moscow: Energija, 1964. – 334. Print. 2. *Izvehov, V.I.* *Proektirovanie turbogeneratorov.* V.I. Izvehov, N.A. Serihin, A.I. Abramov. – Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005. – 440 p. Print. 3. *Vasjutinskij, S.B.* *Teplovoj raschet tokovedushhih trubok.* S.B. Vasjutinskij, G.P. Nogaenko. *Vestnik elektro-promyshlennosti.* – 1957. – № 10. Print. 4. *Moskvitin, A.I.* *Neposredstvennoe ohlazhdenie elektricheskikh mashin.* A.I. Moskvitin. – Izd. AN SSR, 1962. Print. 5. *Aljamovskij, A.A.* *Solid Works 2007/2008. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike.* A.A. Aljamovskij, A.A. Sobachkin, E.V., Odincov, A.I. Haritonovich, N.B. Ponomarev. – St. Peterburg: BHV-Peterburg, 2008. – 1040 p. Print. 6. *Isachenko, V.P.* *Teplperedacha: uchebnik dlja vuzov.* V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – 3-e izd. – Moscow: Energija, 1975. – 488 p. Print. 7. *Teplotehnickeskij spravocnik: v 2-h t.* pod red. V.N. Jurenevai P.D. Lebedeva T.2. – Moscow: Energija, 1976. – 896 p. Print. 8. *Vejjli, L.* *Temperaturnoe pole rotora turbogeneratora s neposredstvennym ohlazhdeniem s podpazovymi i radial'nymi kanalami:* dis. ... k. t. n. / Vjejli Li. – Sankt-Petrburg, 1997.

Поступила (received) 05.10.2015



Кобзарь Константин Александрович – главный конструктор по турбогенераторам, ГП завод «Электротяжмаш», Харьков, Украина; e-mail: kk7@ukr.net

Kobzar Konstantin Aleksandrovich – Chief Designer of turbogenerators, State Enterprise plant "Electrotyazhmash", Kharkov, Ukraine; e-mail: kk7@ukr.net



Гакал Павел Григорьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина; тел.: (057) 788-42-05, (097) 441-85-78; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com

Gakal Pavel Grigorievich – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University, Associate Professor at the Department of Thermal Engineering Aerospace



Овсянникова Елена Александровна – инженер-конструктор I категории, ГП завод «Электротяжмаш», соискатель Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина; тел.: (096) 584-38-11, (093) 308-61-54; (095) 059-81-85; e-mail: Ovsyannikova_Elena90@mail.ru

Ovsyannikova Elena Aleksandrovna – engineer-designer I category, State Enterprise plant "Electrotyazhmash", candidate at the National Aerospace University; tel: (096) 584 38 11, (093) 308-61-54; (095) 059 81 85 e-mail: Ovsyannikova_Elena90@mail.ru