

УДК 621:735:2.043

А.П. ГРУБОЙ¹, П.Г. ГАКАЛ², А.В. ТРЕТЬЯК^{1,2}¹ГП завод «Электротяжмаши», Харьков, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ СТЕРЖНЕЙ ОБМОТКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Выявлена необходимость проведения уточненного расчета теплового состояния лобовой части обмотки с учетом трехмерного распределения электрических потерь, коэффициентов теплоотдачи. Проведен расчет поля скоростей для основных узлов турбогенератора и определены коэффициенты теплоотдачи в лобовых частях статора. Построена 3-х мерная модель лобовых частей обмотки статора. Проведен анализ температурного состояния стержней обмотки турбогенератора в режиме установившегося короткого замыкания. Определен остаточный ресурс обмотки изоляции стержня в режиме короткого замыкания.

Ключевые слова: турбогенератор, обмотка, термонапряженное состояние, повреждение от высокой температуры, стержень, лобовая часть.

Введение

При эксплуатации турбогенераторов 15-20% отказов приходится на стержни статорных обмоток в результате повреждения изоляции из-за нагрева токопроводящих элементов обмотки статора, так называемых стержней. Ресурс изоляции в основном зависит от превышения температуры стержня некоторого номинального значения, характерного для данного класса изоляции. При этом, наиболее серьезные повреждения изоляции наблюдается в лобовых частях стержней в режиме короткого замыкания, так как они характеризуются высокой плотностью тока и, как следствие, высокой температурой.

Тепловое состояние стержней зависит от интенсивности тепловыделения, которое определяется электрическими потерями, теплопередачей между стержнями и охлаждающим воздухом. Кроме того, при анализе теплового состояния лобовых частей статора необходимо учитывать тот факт, что отвод тепла от лобовых частей обмотки статора, также как и от обмотки и стали ротора, затруднен, так как поверхности этих узлов не имеют непосредственного теплового контакта с охлаждаемыми поверхностями станины турбогенератора.

Поведение других токопроводящих элементов обмотки, также не имеющих непосредственного охлаждения (соединительные шины, головки лобовых частей и др.), при кратковременных перегрузках, характерных для режима короткого замыкания, несмотря на повышенную температуру в стационарных условиях обычно не вызывает опасений, так как

они, как правило, имеют пониженную плотность тока по сравнению с лобовыми частями и поэтому меньшую скорость нарастания температуры при кратковременных перегрузках.

В настоящее время большинство тепловых расчетов электрических машин выполняется на основе эквивалентных схем замещения.

В методе эквивалентных схем используется известные принципы наложения (суперпозиции) и обратимости. В соответствии с принципом наложения сумма температуры, в результате воздействия одного источника тепла, и температуры, в результате воздействия другого источника тепла, представляет собой температуру, которое бы имело тело при одновременном действии обоих источников тепла.

В соответствии с принципом обратимости повышение температуры в одном теле системы, создаваемое источником тепла, расположенном в другом теле, равно повышению температуры во втором теле, создаваемому источником тепла, расположенным в первом теле, при условии, что мощность обоих источников одинакова. Однако как показывает опыт, метод суперпозиции имеет достаточно высокую погрешность, кроме того, данный метод не учитывает геометрию стержней, пространственное распределение параметров по поверхности лобовой части стержней.

Таким образом, в статье решается задача определения теплового состояния стержней статора с учетом пространственного распределения интенсивности теплопередачи, сложной пространственной геометрии стержней.

Определение температурного поля лобовых частей обмотки турбогенератора

При определении температурного поля стержней используется программный продукт SolidWorks Simulation, позволяющий определять трехмерное распределение параметров в элементах конструкции. В программном продукте решается система уравнений сохранения энергии для элементов конструкции, дополненная граничными и начальными условиями, теплофизическими свойствами теплоносителя и материала конструкции. Уравнение энергии для элементов конструкции записывается в виде:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_n,$$

где $e = cT$ – удельная внутренняя энергия, Дж/кг; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); Q_n – удельное (в

единице объема) тепловыделение источника тепла, Вт/м³.

Используем SolidWorks Simulation для расчета температурного поля в стержне. Схема стержня со всеми наиболее важными элементами представлена на рис. 3. Материал стержня – медь. В качестве изоляции использована слюдинитовая лента толщиной 0,16 мм и теплопроводностью 0,20 Вт/(м·К).

При расчете температурного поля стержня будем рассматривать только верхнюю часть стержня, т. к. в верхней части «паразитный ток» вызванный самоиндукцией течет в одном направлении, а в нижнем в другом. Эквивалентные проводники верхней и нижней половины соединены последовательно и образуют эквивалентный контур для циркуляционных токов. На рис. 1 изображена схема движения циркуляционных токов в зоне лобовых частей обмотки. На рис. 2 изображена схема распределения ЭДС вызванное циркуляционными токами, как видно наиболее нагруженными являются крайние проводники [2].

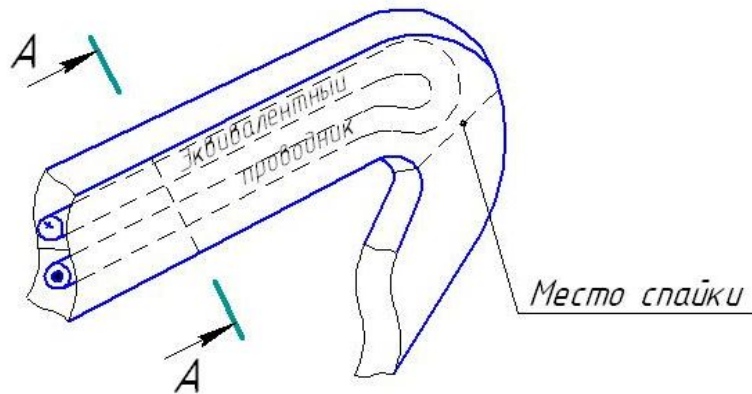


Рис. 1. Схема распределения циркуляционных токов в стержне

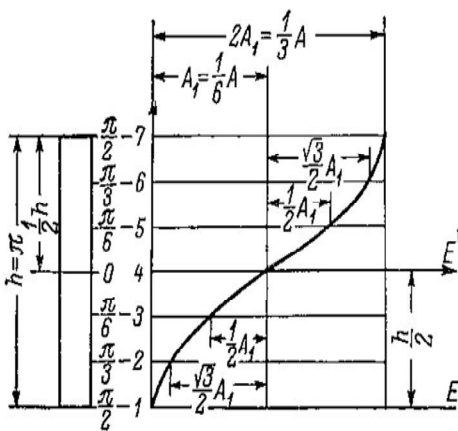


Рис. 2. Схема распределения ЭДС вызванных циркуляционными токами в лобовой части стержня для сечения А-А(см. рис. 1).

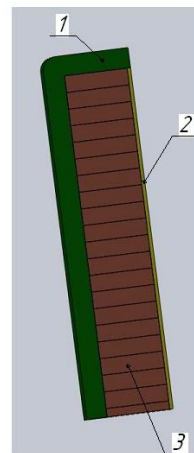


Рис. 3. Конструктивные элементы стержня: 1 – изоляция; 2 – миканитовая прокладка; 3 – токопроводящие элементы

Плотность тока в стержне равна 3 А/мм^2 , что характерно для режима короткого замыкания. Для вычисления температурного поля в стержне задаются граничные условия 3-го рода.

При расчете учитывается, что это тело состоит из нескольких слоев с контактными тепловыми сопротивлениями между ними.

Для определения коэффициентов теплоотдачи необходимо определить скорости течения воздуха в зоне лобовых частей. Для расчета скоростей потока используется метод «схем замещения» [2]. При определении скоростей и расходов воздуха в системе вентиляции была построена принципиальная схема цепи и определены скорости для основных сечений системы охлаждения турбогенератора. В результате проведенных расчетов было определено, что скорость воздуха в зоне лобовых частей равна 16 м/с . При данной скорости реализуется турбулентный режим течения. При турбулентном режиме критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$\text{Nu} = 0,0432 \text{Re}^{0,78}. \quad (1)$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи между поверхностью стенки и воздухом будет определяться по формуле (2):

$$B_x = i_2 \cdot \left[\frac{y_{1,2} \cdot z}{(x^2 + z^2) \cdot \sqrt{(y_{1,2}^2 + x^2 + z^2)}} - \frac{z_{1,2} \cdot y}{(x^2 + y^2) \cdot \sqrt{(z_{1,2}^2 + x^2 + y^2)}} \right] \cdot 10^{-7}; \quad (3)$$

$$B_y = i_2 \cdot \left[\frac{z_{1,2} \cdot x}{(x^2 + y^2) \cdot \sqrt{(z_{1,2}^2 + x^2 + y^2)}} - \frac{x_{1,2} \cdot z}{(x^2 + z^2) \cdot \sqrt{(x_{1,2}^2 + y^2 + z^2)}} \right] \cdot 10^{-7}; \quad (4)$$

$$B_z = i_2 \cdot \left[\frac{x_{1,2} \cdot y}{(y^2 + z^2) \cdot \sqrt{(x_{1,2}^2 + y^2 + z^2)}} - \frac{y_{1,2} \cdot x}{(x^2 + z^2) \cdot \sqrt{(y_{1,2}^2 + x^2 + z^2)}} \right] \cdot 10^{-7}, \quad (5)$$

где x, y, z – координаты средней линии стержня; $x_{1,2}, y_{1,2}, z_{1,2}$ – координаты расположения вектора проводника относительно средней линии.

Согласно теореме о циркуляции магнитного поля (Био – Савара – Лапласа), уравнение для определения вектора магнитной индукции в дифференциальной форме имеет вид:

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}. \quad (6)$$

В результате решения данного дифференциального уравнения относительно плотности тока, с учетом соотношений (3) – (5), определяется плотность тока i , в конечном итоге, тепловыделение в результате электрических потерь [1].

$$Q = 2,4 \cdot j^2 \cdot G, \quad (7)$$

где j – плотность тока, А/мм^2 ; G – вес проводника, кг.

При определении компонентов вектора маг-

$$\alpha = 0,0432 \lambda l^{-0,22} \left(\frac{\nu}{v} \right)^{0,78} \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{град}}{\text{см}^2} \right]. \quad (2)$$

Значения теплопроводности воздуха (λ) и кинематической вязкости (ν) берутся при средней температуре воздуха [2]; в качестве характерного размера (l) берется длина стенки стержня ($l=100 \text{ мм}$).

При параметрах воздуха, характерных для турбогенераторов, коэффициент теплоотдачи равен $0,12 \text{ Вт} \cdot \text{град/см}^2$. Теплопередача происходит вдоль наружной поверхности изоляции.

При определении основных и дополнительных электрических потерь, приводящих к тепловыделению в стержнях, наименее изученными являются потери, вызванные циркуляционными токами. Циркуляционные токи существенно перегружают отдельные проводники стержня и могут явиться причиной повреждения изоляции обмотки. Известные формулы определения электрических потерь в лобовой части стержня, дают лишь приближенное и усредненное значение этих величин. Ввиду достаточно сложной геометрии стержней турбогенератора в [4] предложена модель определения проекции вектора магнитной индукции для лобовых частей в таком виде:

нитной индукции необходимо знать координаты средней линии основного сечения стержня. Для их вычисления используется программа «Расчет эвольвенты 2009» [5], которая позволяет в зависимости от исходных требований к геометрии обмотки, определить 3-х мерную кривую, согласно которой производится построение геометрии обмотки лобовых частей стержня турбогенераторов.

Таким образом, определено тепловыделение в стержне, граничные условия.

Материал стержня – медь (82 проводника). Используется слюдинитовая изоляция в виде ленты толщиной $0,16 \text{ мм}$, количество слоев 14, класс изоляции F. Номинальная рабочая температура $100 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. 3 изображена схема расположения конструктивных элементов стержня.

В основе расчета программного комплекса SolidWorks Simulation лежит метод конечных эле-

ментов (МКЭ). Метод основан на дискретизации объекта с целью решения уравнений механики и теплопроводности сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области и называются конечными элементами. В пределах конечного элемента назначаются свойства некоторого участка объекта и описываются поля интересующих нас величин. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы.

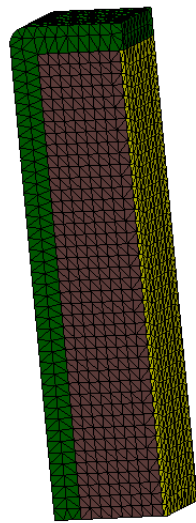


Рис. 4. Расчетная сетка конечных элементов

В качестве конечных элементов использовался объемный тетраэдральный элемент. На рис. 4 изображена расчетная сетка конечных элементов. Всего 31474 элемента, 45631 узлов, 45631 уравнения.

На рис. 5 изображено температурное поле в лобовой части обмотки статора турбогенератора. Как следует из полученных результатов, температурное поле в стержне примерно равномерное, разность температур проводников в стержне и изоляции равна примерно 30 град. С – 50 град. С. Максимальная температура равна 150 ° С.

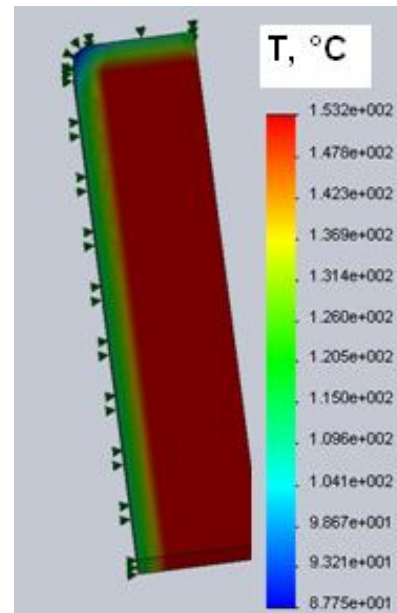


Рис. 5. Результаты расчета теплового состояния стержня

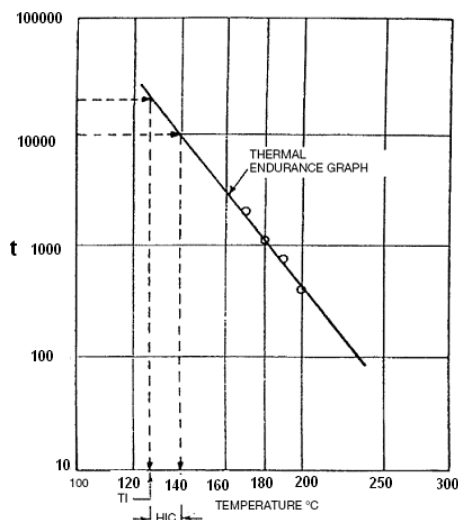


Рис. 6. Определение остаточного ресурса изоляции

При расчете остаточного ресурса изоляции применим методику IEEE – 1 [3], основанную на статистических исследованиях повреждения изоляции в зависимости от превышений температуры. Полученное

значение превышения температуры приводит к незначительному снижению ресурса изоляции см. рис 6. Таким образом, проведенные вычисления с учетом всех факторов, влияющих на температурное поле стержней обмотки (трехмерное распределение циркуляционных токов, коэффициентов теплоотдачи, материала стержня и изоляции) позволили обосновать незначительное уменьшение ресурса изоляции.

Выводы

Определено поле температур в режиме установившегося тока короткого замыкания с учетом электрических потерь вдоль сечения стержня турбогенератора, вычисленных согласно закона Био – Савара – Лапласа. Определено тепловыделение, вызванное циркуляционными токами. При анализе учитывались условия теплообмена с охлаждающим воздухом. Найдены коэффициенты теплоотдачи. Согласно IEEE – 1 определена возможность дальнейшего применения стержней в эксплуатацию после входа машины в режим короткого замыкания.

Литература

1. Данилевич, Я.Б. Добавочные потери в турбо и гидрогенераторах [Текст] / Я.Б. Данилевич. – Л.: Наука, 1973. – 200 с.

2. Аномальные режимы работы крупных синхронных машин [Текст] / Е.Я. Казовский, Я.Б. Данилевич, Э.Г. Кашиарский, Г.В. Рубисов. – Л.: Наука, 1968. – 363 с.

3. *Electrical Insulation for Rotating Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair* / Greg C.

Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhiri. – В.: Power Engineering, 2003. – 584 p.

4. Чистяков, А.А. Электрические усилия в обмотках статоров мощных турбо- и гидрогенераторов [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук / Чистяков А. А.; С.-Петербург. гос. ун-т. – ВНИИэлектромаш., 1972. – 28 с.

5. А.с. №29454. Украина. Компьютерная программа «Расчет эвольвенты 2009» / Грубой А.П., Задоров Ю.М., Третьяк А.В. – Дата регистрации 14.07.09.

Поступила в редакцию 25.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры аэрокосмической теплотехники Г.А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЛОБОВОЇ ЧАСТИНИ СТРИЖНІВ ОБМОТКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ВЕЛИКОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

О.П. Грубой, П.Г. Гакал, О.В. Третьяк

Виявлено необхідність проведення уточненого розрахунку теплового стану лобової частини обмотки з урахуванням тривимірної розподілу електричних втрат, коефіцієнтів тепловіддачі. Проведено розрахунок поля швидкостей для основних вузлів турбогенератора і визначені коефіцієнти тепловіддачі в лобових частинах статора. Побудовано 3-х мірна модель лобових частин обмотки статора. Проведено аналіз температурного стану стрижнів обмотки турбогенератора в режимі короткого замикання. Визначено залишковий ресурс обмотки ізоляції стержня в режимі короткого замикання.

Ключові слова: турбогенератор, обмотка, термонапружений стан, стрижень, лобова частина.

DETERMINING OF THERMAL CONDITION OF THE OVERHANG STATOR WINDING BARS OF TURBOGENERATORS OF HIGH AND AVERAGE POWER

A.P. Gruboi, P.G. Gakal, A.V. Tretjak

Identified the need for an improved calculation of the thermal state of the frontal part winding, taking into account the three-dimensional distribution of electrical losses, heat transfer coefficients. The calculation of the velocity field for the main turbine generator units, and the coefficients of heat transfer in the frontal parts of the stator. We construct a 3-dimensional model of the coil ends of the stator winding. The analysis of the thermal state of rods winding turbo mode short circuit. Determine the residual life of the rod winding insulation under short-circuit.

Key words: turbogenerator, stator winding, thermal overhang, bars, overhang stator winding.

Грубой Александр Петрович – Главный конструктор, ГП завод «Электротяжмаш», Украина, Харьков.

Гакал Павел Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@gmail.com.

Третьяк Алексей Владимирович – аспирант кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Ведущий – инженер конструктор ГП завод «Электротяжмаш», Харьков, Украина.