



УДК 621.735.2.043

ТРЕТЬЯК А.В., зав. сектором, ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков,

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА СТЕРЖНЕЙ ОБМОТКИ ГИДРО- И 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.

Введение. Анализ направления развития генераторостроения средней, большой и предельной мощности, особенно в части совершенствования системы охлаждения машин, показал, что в основном определяющей возможностью роста мощности является улучшение системы охлаждения. Наиболее эффективная система охлаждения воздушных машин — многопоточная, данная система позволяет выполнить машины уже мощностью до 500 МВА. Для машин малой и средней мощности более приемлемы однопоточные системы — для малых мощностей однонаправленные, а для средних — со встречным направлением потоков охлаждающего воздуха, но возможно и применение многопоточной системы из-за существенно больших вентиляционных потерь не всегда приемлема.

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 температуры.

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 статора.

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. При определении температурного поля стержней используется программный продукт SolidWorks Simulation, позволяющий определять трехмерное распределение параметров в элементах конструкции. В программном продук-



те 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:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_n, \quad (1)$$

где $e = c T$ – 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 вызванная циркуляционными токами, как видно наиболее нагруженными являются крайние проводники [2]

Плотность тока в стержне равна 3 А/мм², 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. 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 ко-

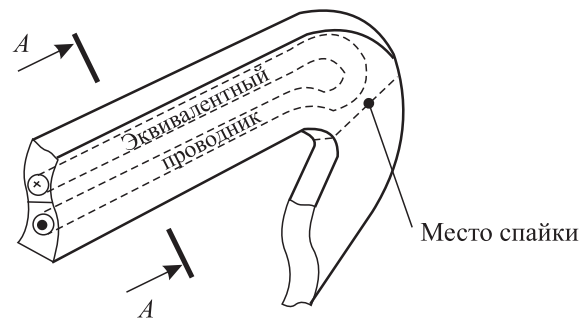


Рис. 1. Схема распределения циркуляционных токов в стержне

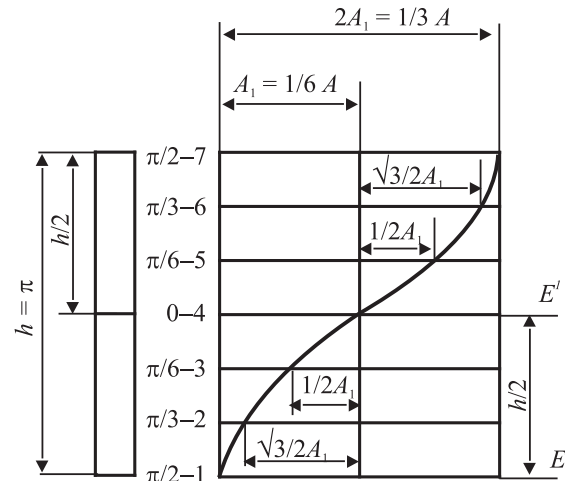


Рис. 2. Схема распределения ЭДС вызванных циркуляционными токами в лобовой части стержня для сечения А-А(см. Рис. 1).

эффициента теплоотдачи имеет вид:

$$Nu = 0,0432 Re^{0,78}. \quad (2)$$

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

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

Значения теплопроводности воздуха λ и кинематической вязкости ν берутся при средней температуре воздуха [2]; в качестве характерного размера l берется длина стенки стержня ($l = 100$ мм). Коэффициент теплоотдачи равен 0,12 Вт-град/см². 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 в [4] предложена модель определения

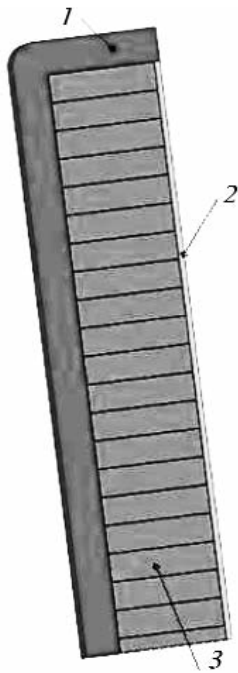


Рис. 3. Конструктивные элементы стержня: 1 – изоляция, 2 – миканитовая прокладка, 3 – токопроводящие элементы.

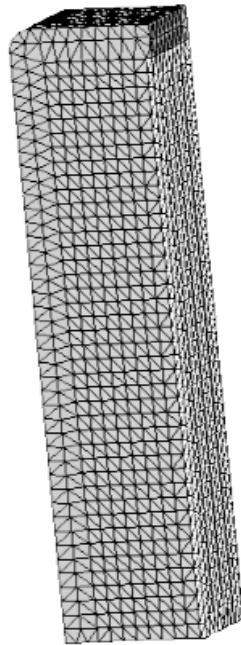


Рис. 4. Расчетная сетка конечных элементов.

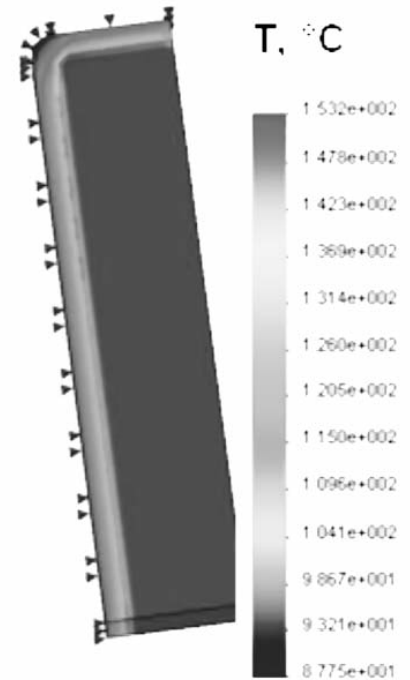


Рис. 5. Результаты расчета теплового состояния стержня.

проекции вектора магнитной индукции для лобовых частей в виде:

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

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

$$B_z = i_2 \left[\frac{x_{1,2} y}{(y^2 + z^2) \sqrt{(x_{1,2}^2 + y^2 + z^2)}} - \frac{y_{1,2} x}{(x^2 + z^2) \sqrt{(y_{1,2}^2 + x^2 + z^2)}} \right] \cdot 10^{-7}, \quad (6)$$

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:

$$\text{rot } \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}. \quad (7)$$

В результате решения данного дифференциального уравнения относительно плотности тока, с учетом соотношений (4)–(6), определяется плотность тока i , в конечном итоге, тепловыделение в результате электрических потерь [1].

$$Q = 2,4 \cdot j^2 G \quad (8)$$

где j – плотность тока, А/м², G – вес проводника, кг.

При определении компонентов вектора магнитной индукции необходимо знать координаты

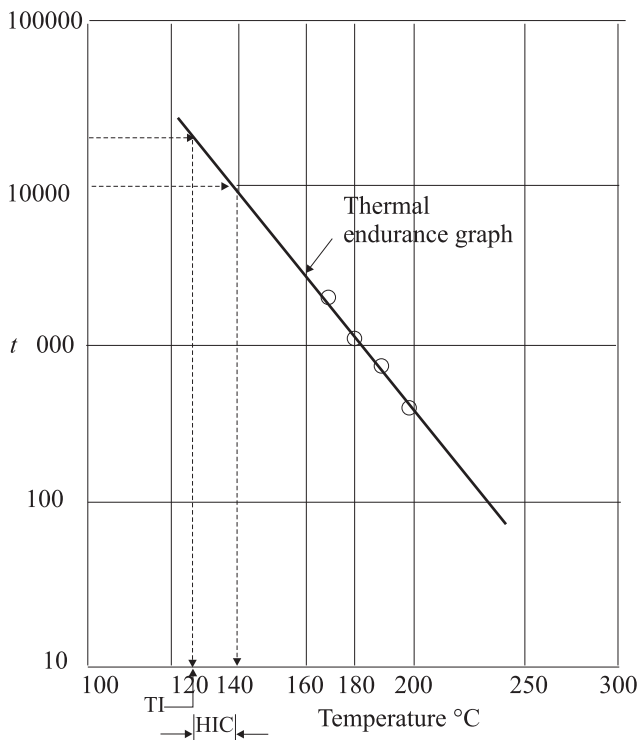


Рис. 6. Определение остаточного ресурса изоляции.



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.

Таким образом, определено тепловыделение в стержне, граничные условия.

Материал стержня – медь (82 проводника). Используется слюдинитовая изоляция в виде ленты толщиной 0,16 мм, количество слоев 14, класс изоляции F. Номинальная рабочая температура 100 °С. На Рис. 3 изображена схема расположения конструктивных элементов стержня.

В основе расчета программного комплекса SolidWorks Simulation лежит метод конечных элементов (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 сводиться к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы.

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 генератора. Как следует из полученных результатов, температурное поле в стержне примерно равномерное, разность температур проводников в стержне и изоляции равна примерно 30 °С – 50 °С. Максимальная температура равна 150 °С.

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 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.

Проведенная работа позволила получить следующие результаты:

1. Усовершенствована модель лобовых частей стержней в части более точного задания тепловыделений обусловленных циркуляционными токами.
2. С использованием математической модели обоснован ресурс стержней после различных режимов работы.
3. Обоснована возможность увеличения мощности турбо- и гидрогенераторов в полтора раза, без существенных изменений в конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилеви Я.Б. Добавочные потери в турбо и гидрогенераторах / –Л. : Наука, 1973. – 200 с.
2. Казовский Е.Я. Аномальные режимы работы крупных синхронных машин/ Е.Я. Казовский., Я.Б. Данилевич, Э.Г. Кашарский, Г.В. Рубисов. – Л. : Наука, 1968. – 363 с.
3. G.C. Stone. Electrical Insulation for Rotating Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair/ Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani. – В.: Power Engineering, 2003. – 584 p.
4. Чистяков, А.А. Электрические усилия в обмотках статоров мощных турбо- и гидрогенераторов: 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

