

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ И ПОТЕРЬ В КРАЙНИХ ПАКЕТАХ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Ю.Н. Васьковский, докт. техн. наук, **А.И. Титко**, чл.-корр. НАН Украины
 Институт электродинамики НАН Украины,
 пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
 e-mail: yun157@voliacable.com

Достоверный расчет токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора необходим при разработке новых технических решений в модернизируемых турбогенераторах. В статье разработана полевая математическая модель вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора. Для задания источников поля в модели используются экспериментальные данные, что повышает достоверность расчетных результатов. Проанализировано влияние продольного разреза зубцов крайних пакетов на величины токов и потерь. Показано, что выполнение продольных разрезов в зубцах турбогенератора ТГВ-300 ведет к снижению токов в зубцах в 1,4 раза. Однако, учитывая большую механическую прочность сплошных зубцов, такое увеличение потерь можно компенсировать применением новых методов экранирования. При этом крайние пакеты со сплошными зубцами более перспективны для применения в модернизируемых ТГВ-300. Библиограф. 4, рис. 6.

Ключевые слова: крайние пакеты сердечника статора турбогенератора, полевая математическая модель, вихревые токи и потери.

Введение. Проблема расчета электромагнитного поля, вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора (ТГ) остается одной из наиболее актуальных и сложных научных проблем, которые требуют дальнейшего решения. Это обусловлено необходимостью усовершенствования конструкции торцевых зон ТГ для обеспечения необходимого уровня их надежности [1,2]. Особенно это актуально для разрабатываемых синхронно-асинхронных турбогенераторов [3,4], которые по сравнению с синхронными ТГ могут длительно работать в асинхронных режимах, в которых и наблюдается повышенный нагрев крайних пакетов сердечника статора.

Наиболее полно рассматриваемую проблему можно решить на основе трехмерных полевых моделей, однако, ввиду сложности конструкции концевых зон ТГ и огромной вычислительной трудоемкости трехмерных моделей, они оказались неэффективными и пока не нашли должного применения. Опыт исследований и разработок показывает, что необходимый результат можно получить на основе двухмерных и квазитрехмерных полевых моделей. При этом, для повышения достоверности расчетных результатов в эти модели целесообразно ввести информацию, полученную экспериментальным путем. В статье разработана квазитрехмерная полевая модель вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора ТГ, основанная на задании источников поля на основе экспериментальных данных. Источники поля можно задать и на основе расчетных данных, полученных по методикам, в которых границы концевой зоны ТГ идеализированы. Такой подход с точки зрения получения достоверных результатов моделирования продемонстрировал свою высокую эффективность.

Математическая модель. Общий вид листа стали сердечника статора показан на рис. 1, а. Геометрические данные листа соответствуют турбогенератору ТГВ-300-2. Поскольку каждый лист состоит из ряда изолированных друг от друга сегментов, то расчетная область соответствует одному сегменту (содержит 6 зубцов) (рис. 1, б), размещенному в окружающем его воздушном пространстве.

Уравнение электромагнитного поля в сегменте железа статора получим в результате следующих преобразований. Предполагая постоянство магнитной проницаемости μ железа сердечника статора, величина которой определяется насыщением железа статора основным магнитным потоком ТГ, и выполняя над первым уравнением Максвелла дифференциальную операцию rot , получим

$$rot\,rot\vec{H} = rot\vec{J}. \quad (1)$$

где \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, \vec{J} – вектор плотности токов. Поскольку $rot\,rot\vec{H} = grad\,div\vec{H} - \Delta\vec{H}$, а из третьего уравнения Максвелла при постоянстве μ имеем $div\vec{H} = 0$, то уравнение (1) упрощается

$$-\Delta\vec{H} = rot\vec{J}. \quad (2)$$

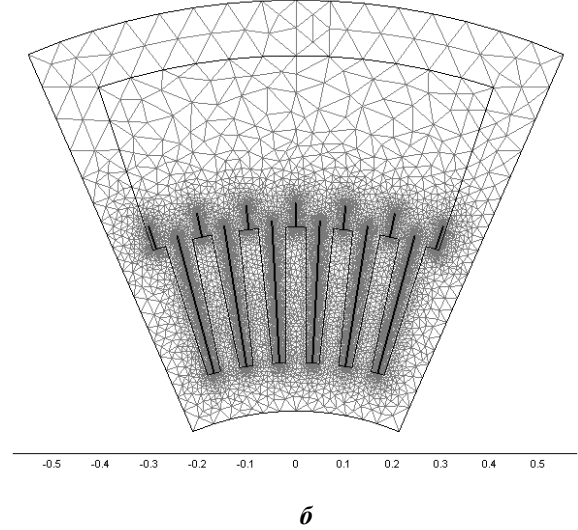
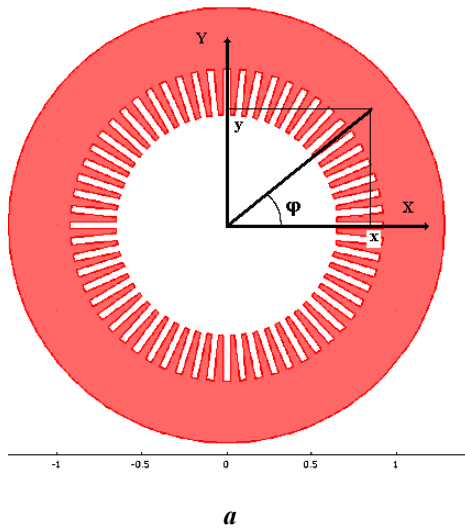


Рис. 1

С другой стороны, для неподвижных сред $\text{rot} \vec{J}$ можно выразить следующим образом:

$$\text{rot} \vec{J} = \gamma \text{rot} \vec{E} + \text{rot}(\vec{J}_{\text{стор}}) = -\mu\gamma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \text{rot}(\vec{J}_{\text{стор}}), \quad (3)$$

где γ – электропроводность железа статора, $\vec{J}_{\text{стор}}$ – плотность сторонних токов, характеризующая источники поля в крайнем пакете статора при воздействии магнитным потоком в торцевой зоне ТГ.

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), получим векторное дифференциальное уравнение поля в следующем виде:

$$\Delta \vec{H} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\text{rot}(\vec{J}_{\text{стор}}). \quad (4)$$

Известно [1,2], что вихревые токи и нагрев крайних пакетов статора обусловлены в основном действием аксиальной составляющей напряженности магнитного поля H_z (или магнитной индукции $B_z = H_z / \mu$), которая формирует магнитный поток, направленный вдоль оси Z системы координат перпендикулярно плоскости листа статора. Именно эта составляющая в соответствии с основными законами электромагнетизма индуцирует в листах крайних пакетов вихревые токи, которые растекаются в плоскости листов вдоль осей x и y

$$\vec{J}_B(x, y) = \vec{e}_x J_{Bx}(x, y) + \vec{e}_y J_{By}(x, y). \quad (5)$$

Учитывая такой характер поля, в качестве определяющей полевой функции удобно выбрать функцию $H_z(t, x, y, z)$. При этом будем предполагать, что в осевом направлении все векторы поля изменяются по экспоненциальному закону с глубиной проникновения $\Delta = \sqrt{2/\omega\mu\gamma}$, $\omega = 2\pi f$, f – частота напряжения питания. В результате вектор \vec{H} можно представить выражением

$$\vec{H} = \vec{e}_z H_z(t, x, y, z) = \vec{e}_z H_z(t, x, y) e^{-z/\Delta}. \quad (6)$$

Предполагая также, что во времени все векторы поля изменяются по гармоническому закону, в декартовых координатах для комплексных амплитуд уравнение (4) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial y^2} - \dot{H}_z \omega\mu\gamma(i-1/2) = -\text{rot}_z \dot{J}_{\text{стор}}(x, y). \quad (7)$$

В правой и левой частях уравнения (7) экспонента $e^{-z/\Delta}$ сокращена. Составляющие плотности вихревых токов в листе определяются по выражениям

$$\dot{J}_{Bx} = \partial \dot{H}_z / \partial y; \quad \dot{J}_{By} = -\partial \dot{H}_z / \partial x. \quad (8)$$

Входящая в правую часть уравнения (7) сторонняя плотность токов $\dot{J}_{\text{стор}}$ является «фиктивным источником» поля в листе, величина которого может быть найдена на основе экспериментально

найденных значений $\dot{B}_{\text{стоп}z}(x, y)$ на поверхности листа. Тогда, используя выражения (8) и учитывая условие непрерывности нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности раздела двух сред, получим

$$\dot{J}_{\text{стоп}x} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{B}_{\text{стоп}z}}{\partial y}; \quad \dot{J}_{\text{стоп}y} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \dot{B}_{\text{стоп}z}}{\partial x}. \quad (9)$$

При этом правая часть уравнения (7) определяется по выражению

$$\text{rot}_z \dot{J}_{\text{стоп}}(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}_z \text{rot} \dot{B}_{\text{стоп}z}(x, y). \quad (10)$$

Задание магнитной проницаемости μ_0 в (9) обусловлено тем, что $\dot{B}_{\text{стоп}z}(x, y)$ в эксперименте определяется в воздухе над листом. В декартовых координатах выражение (10) имеет вид

$$\text{rot}_z \dot{J}_{\text{стоп}}(x, y) = -\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стоп}z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{B}_{\text{стоп}z}}{\partial y^2} \right). \quad (11)$$

Граничными условиями на внешней границе расчетной области (рис. 1, б) являются однородные граничные условия первого рода

$$\dot{H}_z \Big|_G = 0. \quad (12)$$

Задание источников поля на основе экспериментальных данных. Рассмотрим способ численного задания источников поля в соответствии с выражением (11). В основе лежит экспериментально найденное распределение аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности листа статора. Далее приведены данные для номинального режима турбогенератора ТГВ-300-2.

Согласно результатам измерений распределение индукции на поверхности листа можно аппроксимировать следующими формулами:

– в ярме статора:

$$\dot{B}_{\text{стоп}z}(x, y) = 0,02 e^{j\pi x/\tau} \text{ (Тл)}, \quad (13)$$

то есть распределение индукции по высоте ярма является неизменным и равным 0,02 Тл, а по координате x – зависимым только от величины полюсного деления статора τ ;

– в зубцах статора :

$$\dot{B}_{\text{стоп}z}(x, y) = B_{\text{стоп}z}(y) \cdot \varphi(x) \cdot e^{j\pi x/\tau} \text{ (Тл)}, \quad (14)$$

где $B_{\text{стоп}z}(y)$ – заданное распределение аксиальной составляющей индукции вдоль высоты зубца (Тл); $\varphi(x)$ – функция, которая в о.е. характеризует неравномерность распределения индукции по ширине зубца. Учитывая симметрию распределения индукции, эта функция задается в пределах половины ширины зубца от края до его середины или до разреза, который выполняется по середине зубца.

На основе выражений (9) получим для составляющих сторонних токов:

– в ярме статора:

$$\dot{J}_{\text{стоп}x} = 0; \quad \dot{J}_{\text{стоп}y} = -j \frac{0,02\pi}{\mu_0 \tau} e^{j\pi x/\tau}; \quad (15)$$

– в зубцах статора :

$$\dot{J}_{\text{стоп}x} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB_{\text{стоп}z}(y)}{dy} \varphi(x) e^{j\pi x/\tau}; \quad \dot{J}_{\text{стоп}y} = -\frac{1}{\mu_0} B_{\text{стоп}z}(y) \left(\frac{d\varphi(x)}{dx} + j \frac{\pi}{\tau} \varphi(x) \right) e^{j\pi x/\tau}. \quad (16)$$

На рис. 2, а в логарифмическом масштабе показаны: 1 – экспериментально найденная зависимость распределения аксиальной составляющей индукции $B_{\text{стоп}z}(y)$ вдоль высоты зубца; 2 и 3 – соответственно, первая $dB_{\text{стоп}z}/dy$ и вторая $d^2B_{\text{стоп}z}/dy^2$ производные индукции, найденные чис-

ленным интегрированием таблично заданной функции $B_{стопz}(y)$. Максимальное значение аксиальной индукции возникает на угловых участках коронки зубца крайнего пакета и равно 1,05 Тл. У основания зубца индукция уменьшается до 0,151 Тл. При расчетах проводилась интерполяция экспериментальных значений аксиальной составляющей индукции с равномерным шагом в 0,01 м.

На рис. 2, б в логарифмическом масштабе показаны: 1 – экспериментально найденная функция $\varphi(x)$, характеризующая неравномерность распределения аксиальной индукции по ширине зубца; 2, 3 – соответственно, ее первая $d\varphi(x)/dx$ и вторая $d^2\varphi(x)/dx^2$ производные. Если в центре ширины зубца $\varphi(x)=1$, то на его обращенной к пазу границе $\varphi(x)=4,62$, т.е. по ширине зубца наблюдается существенная неравномерность распределения индукции, причем основной ее перепад происходит в пределах узкой полосы толщиной $\sim 0,002$ м вдоль краев зубцов. Вторые производные $d^2B_{стопz}/dy^2$ и $d^2\varphi(x)/dx^2$ используются при численной реализации выражения (11).

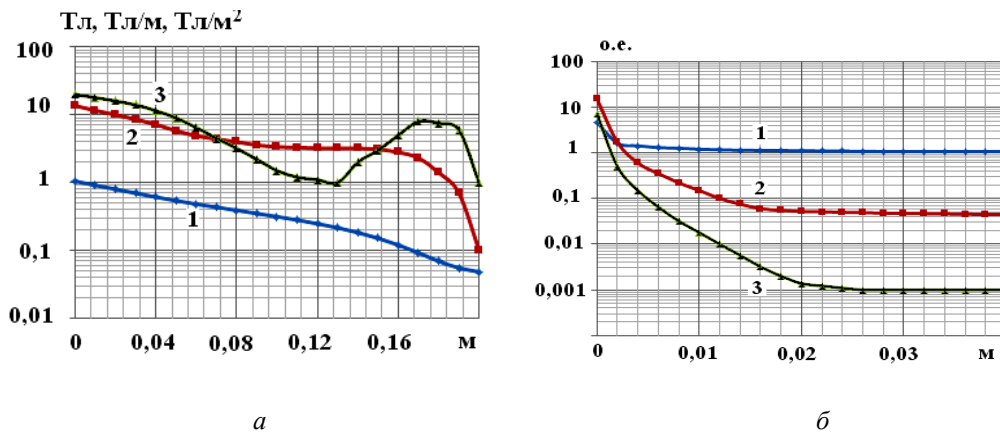


Рис. 2

Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о существенной неравномерности распределения аксиальной составляющей индукции на поверхности крайнего пакета статора, которая формирует соответствующее неравномерное распределение вихревых токов.

На рис. 3 показана эпюра, которая отображает распределение аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности листа статора.

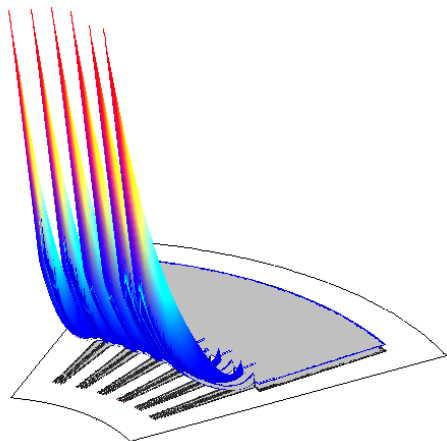


Рис. 3

Для практического использования таблично заданных функций $B_{стопz}(y)$, $\varphi(x)$ и их производных целесообразно провести их аппроксимацию с помощью полиномиальных функций. Численные исследования показали, что такая аппроксимация заданных функций может быть выполнена кубическими полиномами третьей степени с точностью не менее 5% на всем диапазоне изменения аргумента. Распределение аксиальной индукции и ее первой производной вдоль высоты зубцов на их поверхности могут быть аппроксимированы следующими полиномами:

$$B_{стопz}(y) = -69y^3 + 45y^2 - 11y + 1,041, \quad (17)$$

$$\frac{dB_{стопz}}{dy}(y) = -5215y^3 + 1907y^2 - 242,3y + 13,9. \quad (18)$$

С учетом реального вида функций $\varphi(x)$ и $d\varphi(x)/dx$ они могут быть аппроксимированы по ширине зубцов следующими функциями:

$$\varphi(x) = 1 / (0,216 + x^{1/9}), \quad (19)$$

$$d\varphi(x)/dx = 1 / (0,0667 + x^{1/20}). \quad (20)$$

Система уравнений и условий (7)–(20) формирует математическую модель вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора ТГ.

Результаты численных исследований электромагнитного поля, вихревых токов и потерь. Далее приведены отдельные результаты моделирования на примере конструкции серийного ТГ типа ТГВ-300. Для численного решения уравнений использован метод конечных элементов в вычислительной среде COMSOL. Сетка конечных элементов изображена на рис. 1, б. Сторонние источники тока в зубцах в соответствии с формулами (16) задаются с учетом выражений аппроксимирующих полиномов (17) – (20) следующим образом:

$$\dot{J}_{стопx} = [(-5215y^3 + 1907y^2 - 242,3y + 13,9) / (0,216 + x^{1/9})] e^{(jX\pi / 2,042)} / \mu_0, \quad (21)$$

$$\dot{J}_{стопy} = (69y^3 - 45y^2 + 11y - 1,041) [1 / (0,0667 + x^{1/20}) + j\pi(1 / (0,216 + x^{1/9}) / 2,042)] e^{(jX\pi / 2,042)} / \mu_0. \quad (22)$$

Для каждого зубца координаты “x” и “y” в выражениях (21), (22) измеряются в локальной системе координат, связанной с зубцом, причем начало координат расположено в левом углу зубца на его коронке. Выражения (21), (22) используются для половины ширины зубца, а на второй его половине ввиду предполагаемой симметрии картины поля значения плотностей тока принимаются симметричными. Такая симметрия поля предполагается также и в конструкции зубца крайнего пакета статора, в которой для уменьшения потерь в зубцах по середине его ширины выполняют продольный разрез, существенно влияющий на распределение вихревых токов. В конструкции ТГВ-300 с целью снижения потерь выполняется также дополнительный разрез у дна паза статора (рис. 1, б).

Координата “X” в выражениях (21), (22) в функции $e^{(jX\pi / 2,042)}$ измеряется в глобальной системе координат всего листа.

Важный практический результат, получаемый в результате реализации предложенной модели, состоит в следующем. В существующих серийных турбогенераторах ТГВ-300 с целью уменьшения вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора по середине ширины зубцов выполняются продольные разрезы. Выполнение этих разрезов хотя и решает задачу по снижению нагрева крайних пакетов, но приводит к уменьшению механической прочности зубцов. Опыт эксплуатации ТГ показывает, что из-за повышенной осевой вибрации крайних пакетов разрезы зубцов негативно влияют на надежность зубцово-пазовой зоны статора, сокращают гарантийные сроки работы ТГ. Поэтому в последнее время изучается возможность отказа от разреза зубцов крайних пакетов в процессе модернизации ТГ. Для оценки такой возможности проведен сравнительный анализ величин вихревых токов и потерь в ТГ при наличии продольных разрезов зубцов статора и при их отсутствии.

На рис. 4 показан фрагмент листа статора, на котором изображены сплошные и разрезанные зубцы, условно размещенные на одном листе. Буквами обозначены отдельные сечения, в которых анализировалось распределение вихревых токов.

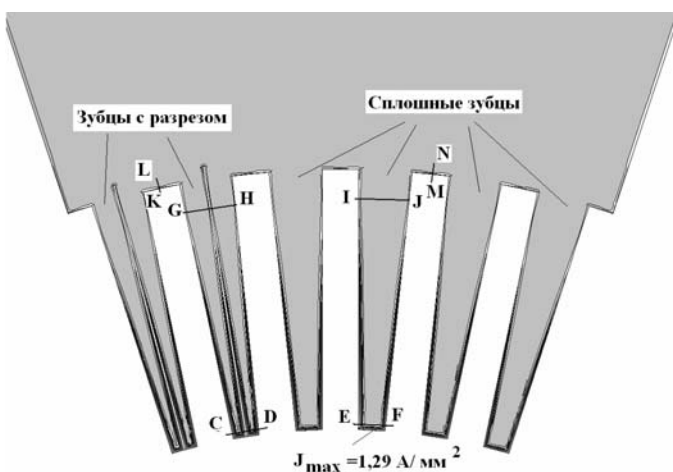


Рис. 4

На рис. 5 показаны эпюры распределения плотности тока в коронках зубцов: на рис. 5, а – в сечении С-Д разрезанного зубца, а на рис. 5, б – в сечении Е-Ф сплошного зубца. Плотность тока в сечении Е-Ф составляет 1,05 А/мм², а в сечении С-Д разрезанного зубца равна 0,75 А/мм², то есть *при прочих равных условиях* плотность тока в коронке сплошного зубца в 1,05/0,75 = 1,4 раза больше, чем в коронке разрезанного зубца. При этом максимальные значения в разрезанных зубцах возникают не только на внешних краях зубцов, граничащих с пазами статора, но и на внутренних краях, которые граничат с разрезами зубцов. Удельные потери в коронках сплошных зубцов больше в 1,96 раз.

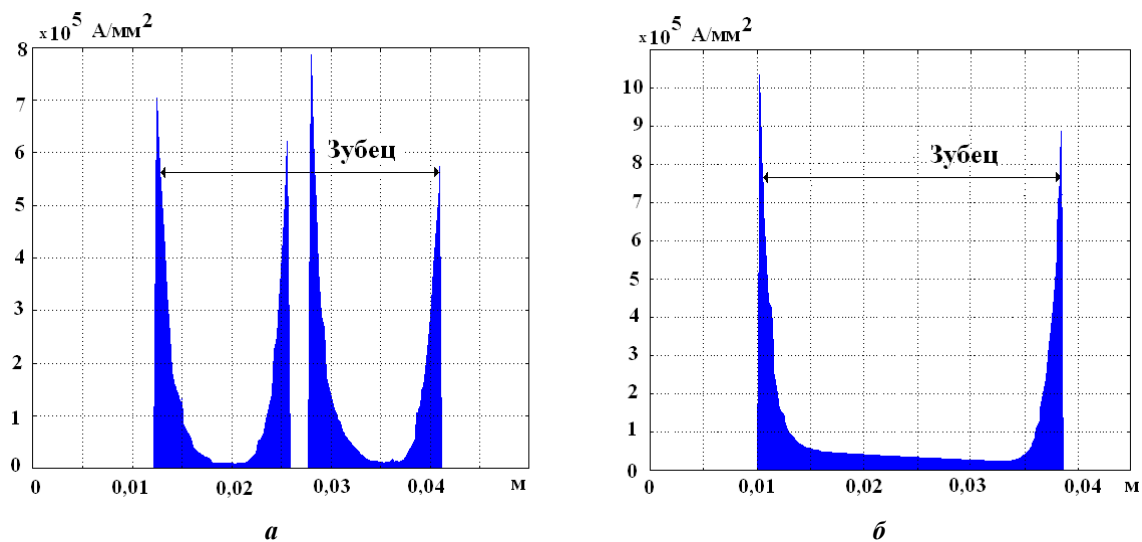


Рис. 5

Плотность тока в сечении I-J возле ножки сплошного зубца равна $0,1 \text{ А/мм}^2$, а в сечении G-H разрезанного зубца составляет $0,0625 \text{ А/мм}^2$ (т.е. в 1,6 раз меньше). Удельные потери в ножке сплошного зубца превышают в 2,5 раза потери в разрезанном зубце. Плотность тока на дне паза в сечениях K-L и M-N приблизительно одинакова в обоих вариантах и по величине ($0,06 \dots 0,07 \text{ А/мм}^2$) приближается к плотности тока в ярме статора.

В обоих вариантах по высоте зубца наблюдается существенная неравномерность плотности тока: в ножках зубцов по сравнению с коронками зубцов плотность тока снижается в 7 ... 10 раз. Таким образом, вихревые токи, которые индуцируются в зубцах статора аксиальным магнитным потоком, замыкаются, в основном, в пределах зубцов, не выходя в ярмо. Причем большая часть токов замыкаются в тонком слое около коронки зубца, как показано на рис. 6. Это не подтверждает существующие представления о том, что разрезание зубцов статора ведет к существенному (в 2 раза) увеличению длины пути для протекания тока и, как результат, к двукратному снижению величины вихревых токов в зубце. В действительности, выявленное в результате сравнительного анализа снижение плотности вихревых токов в разрезанных зубцах по сравнению с токами в сплошных зубцах меньше и, как указывалось выше, например, в наиболее нагруженных коронках зубцов такое снижение составляет примерно 1,4 раза. Необходимо отметить, что уровни расчетных значений плотностей тока в листах с разрезами хорошо согласуются с экспериментальными данными.

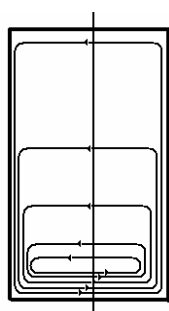


Рис. 6

Таким образом, отсутствие продольного разреза зубцов приводит к указанному росту локальных максимальных вихревых токов и потерь в коронках зубцов крайних пакетов статора, который создает определенную опасность для электрической изоляции обмотки статора. Однако при обеспечении соответствующего охлаждения зубцово-пазовой зоны статора, а также учитывая большую механическую прочность сплошных зубцов, которая уменьшает вероятность их усталостного разрушения и дальнейшего механического повреждения изоляции обмотки, варианты зубцов крайних пакетов сердечника статора без продольных разрезов являются перспективными для дальнейшей разработки и внедрения в модернизируемых конструкциях ТГ.

Выводы. Разработана полевая математическая модель для анализа вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора, обусловленных аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности крайних пакетов. В модели задание источников поля осуществляется либо на основе экспериментальных данных, полученных при измерении аксиальной составляющей магнитной индукции, либо на основе расчетных данных, полученных по другим методикам.

Распределение вихревых токов в зубцах характеризуется существенной неравномерностью: наибольшие токи возникают в коронках зубцов, уменьшаясь вдоль высоты зубцов по направлению к их ножкам в 7 ... 10 раз.

Выполненный при одинаковых расчетных условиях сравнительный анализ вихревых токов и потерь в сплошных и разрезанных зубцах крайних пакетов статора показал, что выполнение продольных разрезов в зубцах турбогенератора ТГВ-300 ведет по сравнению со сплошными зубцами к

снижению токов в коронках в 1,4 раза. С учетом большей механической прочности сплошных зубцов такое увеличение потерь можно компенсировать применением новых методов экранирования, при этом вариант конструкции крайних пакетов со сплошными зубцами будет более перспективным для применения в модернизируемых конструкциях ТГВ-300.

1. *Постников И.М., Станиславский Л.Я., Счастливы Г.Г.* Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. – К.: Наукова думка, 1971. – 360 с.
2. *Счастливы Г.Г., Титко А.И., Федоренко Г.М., Коваленко В.П.* Надежность современных и перспективных турбогенераторов. – К.: Наукова думка, 1978. – 224 с.
3. *Титко А.И., Васьковський Ю.Н.* Синхронно-асинхронные турбогенераторы. – К.: Наукова думка, 2010. – 248 с.
4. *Титко О.І., Васьковський Ю.М.* Синхронно-асинхронні турбогенератори в структурі генеруючих потужностей енергосистем. Наукові основи створення та їхня експлуатація // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С. 87–88.

УДК 621.313.333

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОВИХ СТРУМІВ І ВТРАТ В КРАЙНІХ ПАКЕТАХ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Ю.М.Васьковський, докт.техн.наук, **О.І.Титко**, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: yun157@voliacable.com

Достовірний розрахунок струмів і втрат у крайніх пакетах осердя статора необхідний при розробленні нових технічних рішень у модернізованих турбогенераторах. У статті розроблену польову математичну модель вихрових струмів і втрат у крайніх пакетах осердя статора турбогенератора. Для задання джерел поля в моделі використовуються експериментальні дані, що підвищує достовірність розрахункових результатів. Проаналізовано вплив поздовжнього розрізу зубців крайніх пакетів на величини струмів і втрат. Показано, що виконання поздовжніх розрізів в зубцях турбогенератора ТГВ-300 призводить до зниження струмів у зубцях в 1,4 рази. Однак, враховуючи велику механічну міцність суцільних зубців, таке збільшення втрат можна компенсувати застосуванням нових методів екранування. При цьому крайні пакети з суцільними зубцями більш перспективні для застосування в модернізованих ТГВ-300. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: крайні пакети осердя статора турбогенератора, польова математична модель, вихрові струми і втрати.

MATHEMATICAL MODELING OF EDDY CURRENTS AND LOSSES IN END PACKETS TURBO GENERATOR STATOR CORE

Ju.M.Vaskovskiy, O.I.Tytko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: yun157@voliacable.com

The reliable calculation of currents and losses in the end packages of stator core is needed at development of new technical decisions in the modernized turbo generators. The field mathematical model for the analysis of currents and losses in the end packets of stator core of turbo generator is worked in the article. For determination of the field sources in the model experimental data are used, that increase authenticity of calculation results. Influence of longitudinal cuts of teeth of end packets on the value of currents and losses is analyzed. It is shown that the implementation of longitudinal cuts in the teeth of the turbo generator TGV- 300 reduces the currents in the teeth of 1.4 times. However, taking into account large mechanical durability of complete teeth, such increase of losses maybe to compensate application of new methods of screening. Thus end packets with complete teeth are more perspective for application in modernized TGV-300. References 4, figures 6.

Keywords: end packets of the stator core of turbo generator, field mathematical model, currents and losses.

1. *Postnikov I.M., Stanislavskii L.Ya., Shchastlivyi G.G.* The electromagnetic and thermal processes in end-capping parts of powerful turbo generators. – Kyiv: Naukova dumka, 1971. – 360 p. (Rus)

2. *Shchastlivyi G.G., Titko A.I., Fedorenko G.M., Kovalenko V.P.* Reliability of modern and perspective turbo generators. – Kyiv: Naukova dumka, 1978. – 224 p. (Rus)

3. *Titko A.I., Vaskovskii Ju.N.* Synchronous-asynchronous turbo generators. – Kyiv: Naukova dumka, 2010. – 248 p. (Rus)

4. *Tytko O.I., Vaskovskiy Ju.M.* Synchronous-asynchronous turbo generators in the structure of power generation capacity. Scientific basis of creation and their operation // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – № 2. – Pp. 87–88. (Ukr)

Надійшла 15.10.2012

Received 15.10.2012