



ГАЙДЕНКО Ю.А.

УДК 621.314: 621.391

ГАЙДЕНКО Ю.А., канд. техн. наук,  
ВИШНЕВСКИЙ Т.С., инженер,

НТУ Украины "Киевский политехнический ин-т", Київ

## 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И НАГРЕВА В КРАЙНИХ ПАКЕТАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

*Разработана математическая модель для численного анализа распределения электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора ТВВ 1000-2УЗ, а также для определения электрических потерь в его крайних пакетах. Модель позволяет анализировать поле в трехмерной постановке в неоднородных средах, что значительно увеличивает точность результатов моделирования.*



ВИШНЕВСКИЙ Т.С.

Из практики эксплуатации гидро- и турбогенераторов известна проблема неравномерного нагрева крайних пакетов магнитопровода статора [1]. Причем данная неравномерность существенно зависит от режима работы генератора и проявляется в том, что разные зубцы крайних пакетов сердечника статора нагреваются по-разному. При этом, степень нагрева зубца зависит от того к каким фазным зонам принадлежат стержни обмотки статора, расположенные в соседних с ним пазах [2].

В работе [3] авторы детально рассматривают причины возникновения указанной неравномерности и приводят, рассчитанные на основе экспериментальных данных, величины превышений температуры зубцов крайних пакетов сердечника статора турбогенератора ТГВ 200. Эти данные показывают, что наибольшие величины нагрева наблюдаются в зубцах, в которых со стороны сбегающего (по ходу вращения ротора) края зубца в пазу находятся стержни одной фазы обмотки, а со стороны набегающего края – разных фаз [3].

Среди основных причин вызывающих описанное явление, авторы работы [3] выделяют следующие:

1) вытеснение на поверхность зубцов пульсирующего поля пазового рассеяния, которое увеличено в зоне крайних пакетов из-за проявления краевого эффекта;

2) влияния аксиальной составляющей магнитного поля, созданного токами лобовых частей обмоток статора и ротора. В частности, интерес представляет пространственные гармоники этого поля, вызванные конструктивными особенностями торцевых зон.

Общеизвестно, что распределение магнитного поля в торцевой зоне крупных генераторов имеет весьма сложный характер ввиду сложной

геометрии лобовых частей обмоток статора и ротора, а также ввиду наличия в торцевой зоне множества токопроводящих элементов, основными из которых являются: нажимная плита, медный экран и нажимные пальцы.

Очевидно, что самый точный и достоверный расчет распределения магнитного поля в торцевой зоне и, как следствие, распределение электрических потерь в крайних пакетах сердечника статора, может быть выполнен лишь при использовании математических моделей позволяющих рассчитывать поле в прямой постановке. То есть, моделирование трёхмерного (3D) распределения поля в неоднородных средах [3].

Долгое время решение подобных задач в рамках математического моделирования было практически не осуществимо из-за ограниченности вычислительных ресурсов компьютерной техники для численного решения задач таких высоких порядков и отсутствия соответствующего программного обеспечения. Поэтому, для решения данной задачи, в работе [3], авторы использовали две методологии:

- масштабное моделирование [4], предполагающее создание многоуровневых моделей нахождения электромагнитных характеристик крайнего пакета сердечника статора. Недостатком этой методологии, является неучёт электропроводящих деталей торцевой зоны, таких как нажимная плита, экран и нажимные пальцы;

- методика, изложенная в [1], для расчета вытесненного из паза поля рассеяния на поверхности зубца и распределения его характеристики по ширине зубца.

При этом, обе методологии используют модели в двухмерной (2D) постановке, которые априори неспособны строго учитывать всю сложность распределения магнитного поля в торцевой зоне, а также взаимное влияние элементов этой зоны. Кроме того, такой подход предусматривает разделение единого электромагнитного поля на от-



дельные составляющие, а итоговый результат представляется как суперпозиция влияния всех этих составляющих. Однако, давно известно, что метод суперпозиции для нелинейных сред не дает достаточно точных результатов.

В свою очередь, на сегодняшний день, уровень развития компьютерной техники и программного обеспечения уже позволяет создавать и численно решать модели в прямой, то есть в трехмерной (3D) постановке. Как уже отмечалось выше, это позволит обеспечить максимально возможную для математического моделирования точность результатов.

Таким образом, **целью** данной работы является разработка математической модели в 3D постановке для численного анализа распределения электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора и выявления тангенциальной неравномерности электрических потерь в крайних пакетах сердечника статора.

В качестве **объекта исследования** был выбран турбогенератор (ТГ) типа ТВВ-1000-2УЗ эксплуатирующийся на атомных электростанциях Украины и имеющий следующие номинальные данные: мощность  $P_{2N} = 1000$  МВт, фазное напряжение питания  $U_{1N} = 24$  кВ, число пар полюсов  $p = 1$ , частота вращения ротора  $n_{1N} = 3000$  об/мин. Выбор данного типа генератора обусловлен тем, что он является одним из наиболее ненадежных. Среди причин выхода из строя ТВВ-1000-2УЗ, значительная часть связана с перегревом крайних пакетов сердечника статора.

Для создания 3D-модели торцевой зоны ТГ и проведения соответствующих вычислений использовались сертифицированные программные пакеты SolidWorks 2013 и COMSOL Multiphysics 4.3b.

### Алгоритм создания математической модели в 3D постановке

1. С помощью программного пакета автоматизированного проектирования SolidWorks была создана пространственная конструкция объекта исследования. При этом, для уменьшения необходимых вычислительных ресурсов компьютера, расчетная область ТГ была уменьшена до размеров торцевой зоны из которой были удалены вспомогательные элементы такие как: крепежные детали, элементы системы охлаждения, внешний корпус и др. Впрочем, последнее практически не влияет на точность моделирования. Таким образом, конструкция торцевой зоны ТГ состоит из таких элементов: обмотка статора и ротора, нажимная плита, медный экран, нажимные пальцы, крайний пакет сердечника статора, сердечник ротора и вал.

2. Созданная пространственная конструкция импортируется в пакет моделирования физических полей COMSOL Multiphysics (Рис. 1.), где задаются начальные и граничные условия, свойства материалов (в том числе, нелинейные свойства ферромагнитных материалов сердечников статора и ротора), выбирается тип решаемой задачи и соответствующие уравнения.

Модель решалась для статического и квазистатического режима. Для расчета магнитного поля использовалось нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение относительно векторного магнитного потенциала ( $A$ ), которое для квазистатического режима имеет следующий вид:

$$j\omega\sigma \vec{A} + \nabla \frac{\vec{A}}{\mu_0 \mu_r} = \vec{J}_{стор}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\sigma$  – электропроводность;  $\Delta$  – дифференциальный набла-оператор;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\vec{J}_{стор}$  – вектор сторонней плотности тока.

3. Задаются источники поля – плотности токов в фазах обмотки статора и плотность тока возбуждения в обмотке ротора. Для квазистатического режима выражения для фазных значений плотностей тока в обмотке статора задавались согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} J_A &= J_m \cos(\omega t), \\ J_B &= J_m \left( \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right), \\ J_C &= J_m \left( \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) + j \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J_m$  – амплитуда плотности тока фазы обмотки статора.

В данной работе проводилось моделирование номинального режима работы ТГ. При этом, ротор был повернут так, чтобы ось его магнитного поля образовывала с осью поля якоря угол нагрузки равный  $\Theta = 30$  эл° (реакция якоря – продольно размагничивающая). При этом коэффициент мощности принимался равным  $\cos \varphi = 1$ .

4. Расчетная область разбивается на совокупность объемных конечных элементов, образующих сетку конечных элементов. На Рис. 2 представлена сетка объемных конечных элементов модели исследования, которая состоит из 2 млн. тетраэдральных элементов.

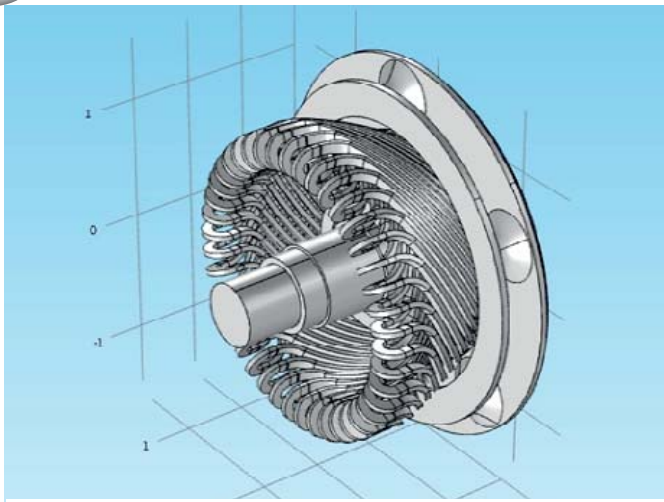


Рис. 1. Пространственная конструкция торцевой зоны ТВВ-1000-2УЗ в программном пакете COMSOL Multiphysics

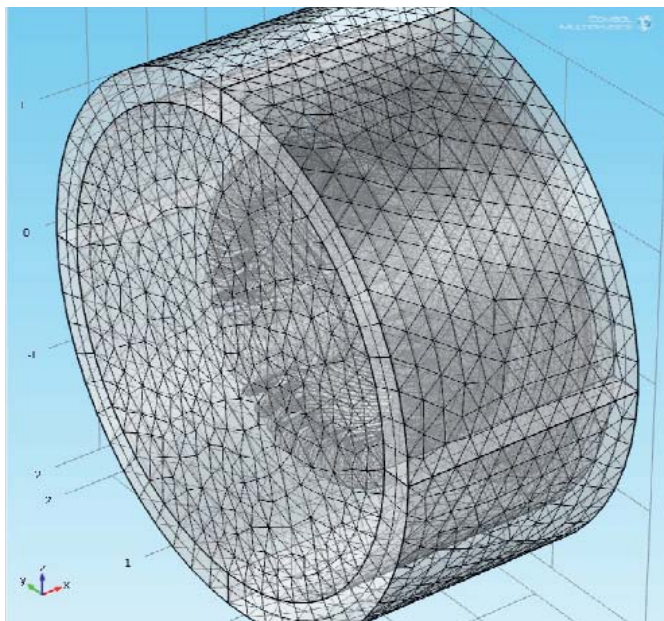


Рис. 2. Расчетная область торцевой зоны в виде сетки тетраэдральных конечных элементов

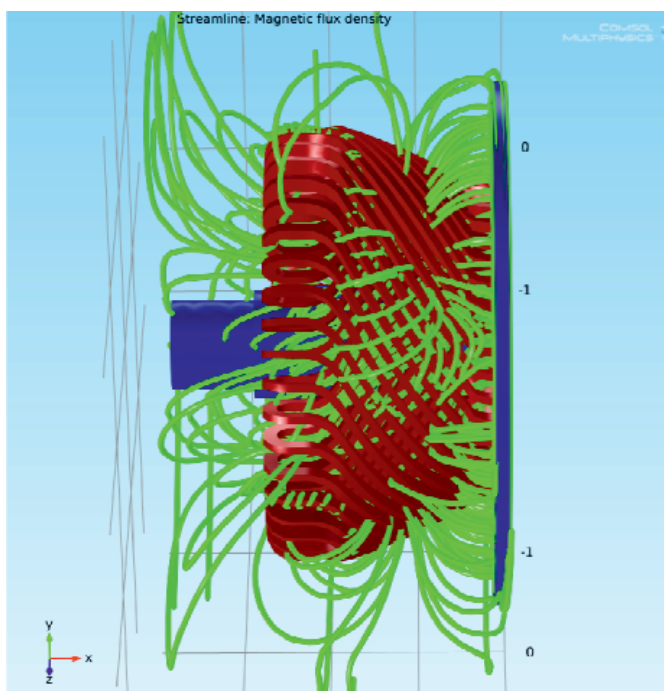


Рис. 3. Распределение магнитной индукции (изолинии) в торцевой части ТГ (вид сбоку)

### Результаты моделирования.

На Рис. 3 показана торцевая часть ТГ (вид сбоку), где для статического режима, с помощью изолиний представлено распределение индукции магнитного поля. Среди прочего, на картине распределения магнитного поля отчетливо видно, что поле создаваемое теми участками лобовых частей обмотки статора, которые находятся ближе к крайнему пакету, ответвляется в крайний пакет, то есть в зону с меньшим магнитным сопротивлением.

На Рис. 4 показано распределение результирующего магнитного поля в крайнем пакете сердечника статора в номинальном режиме работы ТГ (с учетом угла нагрузки  $\Theta = 30^\circ$ ). Магнитное поле в указанной области является суммой воздействий основного магнитного поля, а также полей рассеивания лобовых частей.

Как видно, распределение индукции имеет весьма неоднородный характер, а ее максимальное значение наблюдается в коронках зубцов и составляет на отдельных участках 2,5 Тл.

Однако, как уже сказано выше, нагрев крайних пакетов сердечника статора в основном обусловлен аксиальной составляющей магнитной индукции ( $B_x$ ), значение которой постепенно снижается от наибольшего значения на поверхности крайнего листа со стороны лобовой части вглубь активной зоны, где она полностью угасает.

На Рис. 5, а представлено распределение аксиальной составляющей магнитной индукции (статический режим) на поверхности крайнего пакета сердечника статора со стороны лобовой части. При этом, максимальное значение индукции наблюдается в области коронок зубцов и достигает  $B_x = 0,8$  Тл. На Рис. 5, б показан график распределения  $B_x$  по высоте зубца. Как видно, значения индукции экспоненциально снижаются от коронки зубцов ближе к ядру.

Полученные данные коррелируются с результатами экспериментальными исследованиями полученными в работе [3] для генератора меньшей мощности типа ТГВ-200.

Расчет распределения вихревых токов в элементах торцевой зоны проводился в квазистатическом режиме имитирующем вращающееся магнитное поле.

На Рис. 6 представлено распределение плотности тока в первом, со стороны торца, листе крайнего пакета сердечника статора. Как и ожидалось, наибольшие (светлый цвет) значения плотности тока сосредоточены в тех частях зубцов и ярем сердечника статора, которые расположены ближе к пазам.

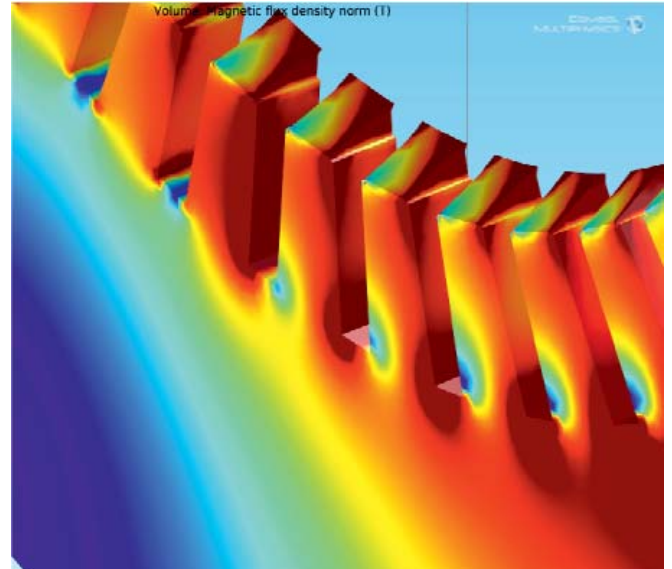
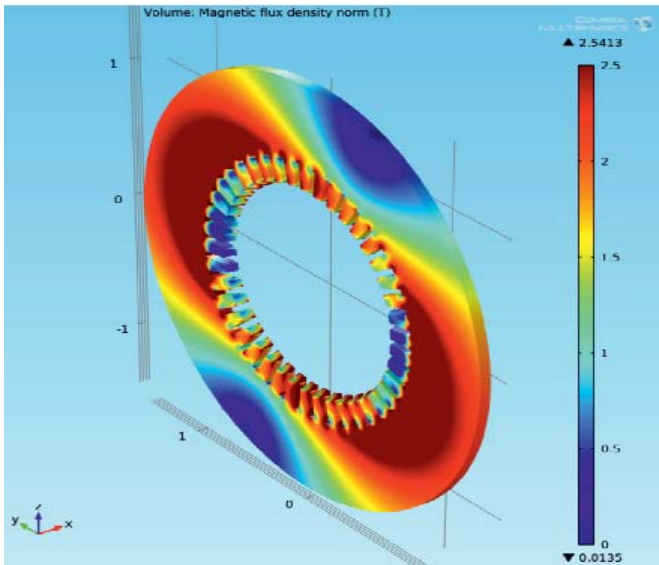
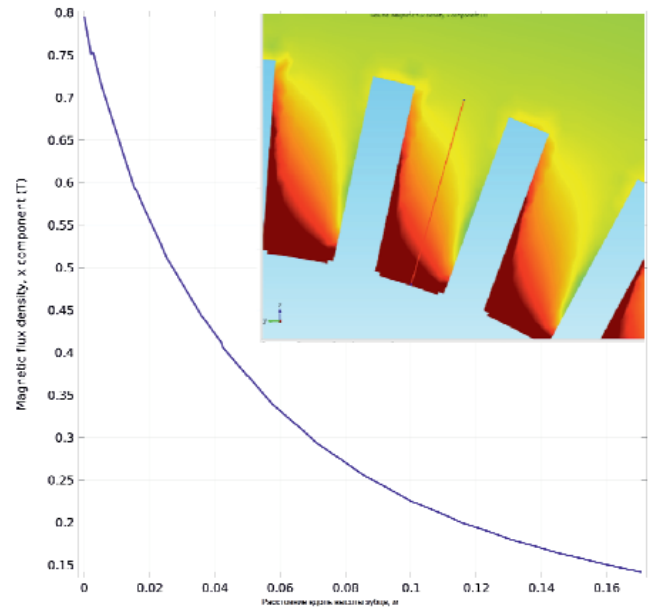
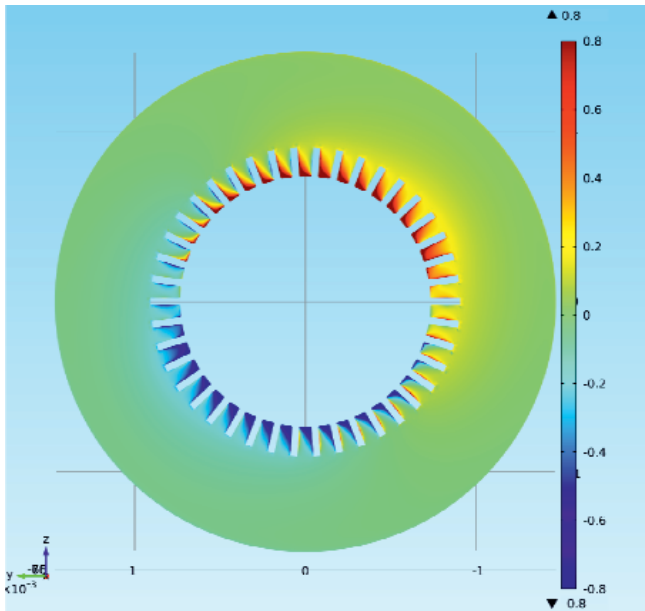


Рис. 4. Распределение индукции в крайнем пакете статора



а

б

Рис. 5. Распределение аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности крайнего пакета (а) и по высоте зубца (б)

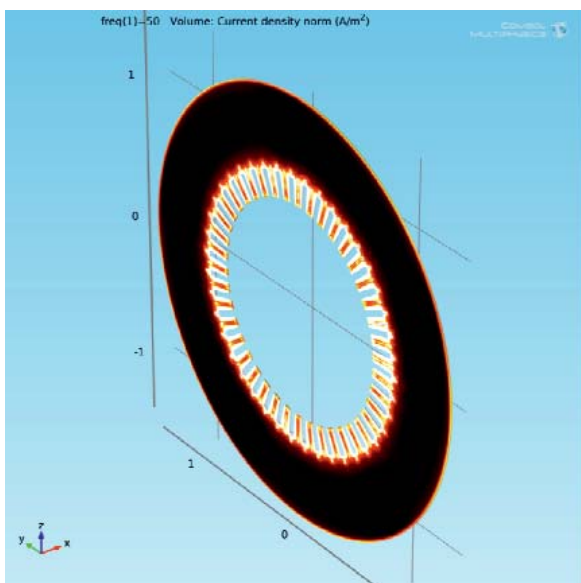


Рис. 6. Распределение плотности тока в листе крайнего пакета сердечника статора

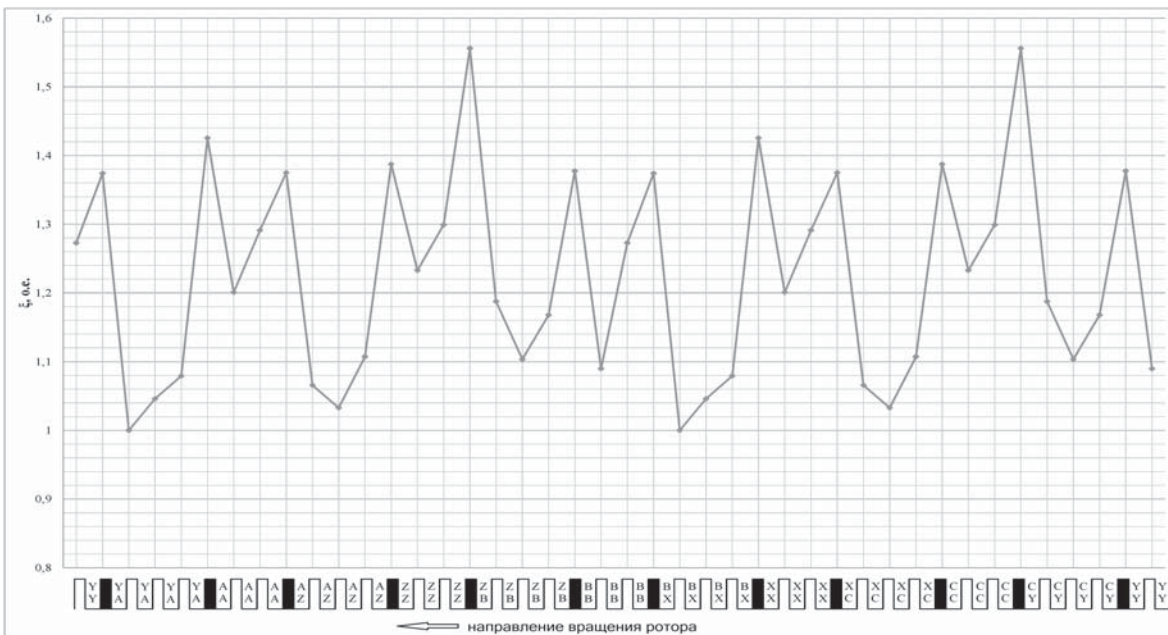


Рис. 7. Распределение относительных электрических потерь в отдельных зубцах листа крайнего пакета статора

Для выявления тангенциальной неравномерности электрических потерь и нагрева в крайнем пакете объекта исследования, вначале было найдено распределение Джоулевых потерь, которое по виду соответствует распределению плотностей токов (Рис. 6). Затем, путем интегрирования по объему, были определены потери в каждом отдельно-взятом зубце листа крайнего пакета. Анализ показал, что потери в различных зубцах действительно имеют неоднородный характер. На Рис. 7 представлен график зависимости относительных потерь ( $\xi$ ) в различных зубцах. Относительное значение потерь  $\xi$  рассчитывалось как отношение потерь в текущем зубце  $Pz_i$  к потерям в зубце с наименьшими потерями  $Pz_{\min}$ .

$$\xi = Pz_i / Pz_{\min} \quad (3)$$

На графике видно, что, действительно, в зубцах, в которых со стороны сбегającego (по ходу вращения ротора) края в пазу находятся стержни одной фазы обмотки, а со стороны набегающего края – разных фаз, наблюдается увеличение потерь мощности. Причем, это увеличение не одинаковое для стыков разных фазных зон и варьируется от 37 % до 56 %. Это можно объяснить текущим режимом работы – номинальный режим с углом нагрузки  $\Theta = 30^\circ$ .

**Выводы**

1. На сегодняшний день уровень развития вычислительной техники уже позволяет переходить на моделирование физических полей в трёхмерной постановке.
2. Переход на 3D-моделирование открывает новые возможности и позволяет значительно уве-

личить точность математического моделирования процессов в таких сложных объектах как торцевые зоны турбогенераторов.

3. Представленная полевая 3D-модель торцевой зоны ТГ типа ТВВ-1000-2УЗ позволила получить достаточно достоверные данные о тангенциальной неравномерности потерь и нагрева в крайних пакетах сердечника статора. Полученные результаты можно использовать как для усовершенствования конструкции данного типа ТГ, так и при разработке новых типов ТГ.

4. Разработанная модель позволяет рассчитывать тангенциальную неравномерность нагрева крайних пакетов и в других режимах работы: режим ХХ, режим пере- или недо возбуждения и др. Кроме того, с помощью данной модели можно исследовать и другие физические явления в торцевой зоне турбогенератора, например, рассчитывать величины вибровозмущающих сил, действующих на элементы торцевой зоны.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Титко А.И.* Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – К.: Наук. думка, 1994. – 139 с.
2. *Костяев Б.В., Пташкин А.В.* О нагреве крайних пакетов сердечника статора крупных турбогенераторов при недо возбуждении // Электрические станции. – 1979. – №5. – С. 40–44.
3. *Титко А.И., Федоренко Г.М., Лившиц А.Л., Кобзарь К.А.* Тангенциальная неравномерность электромагнитных и тепловых характеристик в крайних пакетах турбогенератора при изменении нагрузки // Гидроэнергетика Украины. – 2012. – №3. – С. 48–53.
4. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 2011. – 255 с.