

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

*Викладений принцип визначення електродинамічних зусиль, що діють на провідники обмоток, і електромагнітного моменту електричних машин за наслідками чисельного розрахунку магнітного поля в їхньому поперечному перерізі. На цій основі проведений чисельний аналіз силових взаємодій в потужному турбогенераторі.*

*Изложен принцип определения электродинамических усилий, действующие на проводники обмоток, и электромагнитного момента электрических машин по результатам численного расчета магнитного поля в их поперечном сечении. На этой основе проведен численный анализ силовых взаимодействий в мощном турбогенераторе.*

### ВВЕДЕНИЕ

В электрических машинах (ЭМ) обычно соседствуют два основных явления: индуктирование ЭДС и силовые действия [1]. Классическая теория электрических машин, основанная на теории электрических и магнитных цепей, достаточно подробно рассматривает целый ряд ЭДС, начиная от основных и кончая разного рода ЭДС рассеяния. Для силовых взаимодействий аналогичная основа не приводит к столь же исчерпывающим результатам. Поэтому приходится оперировать с простейшими моделями силовых взаимодействий и воздействий, например с усредненными значениями электромагнитного момента либо с другими силовыми проявлениями. Естественно, что получаются весьма приближенные результаты, да и то в ограниченном наборе вариантов конструкций.

Силовое взаимодействие различных частей электрических машин осуществляется через посредство магнитного поля. Поэтому проблема расчета сил – это по сути проблема достаточно точного расчета магнитных полей с учетом всех влияющих факторов.

С развитием численных методов расчета магнитных полей [2, 3] проблема расчета сил, действующих на элементы конструкции электрических машин, была в значительной мере разрешена. Уже не было ограничений на учет конструктивных форм машин в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода, как это было представлено, например в [4, 5]. Но на первых порах это касалось только силовых воздействий на проводники различных обмоток и других токонесущих элементов.

Однако в ЭМ с обмотками, расположенными в пазах, реально силы действуют не только и не столько на проводники, а преимущественно на ферромагнитные сердечники, например, на зубцы или полюса. Чтобы свести всякие условности к минимуму или чтобы вообще получить возможность рассчитать такие силы или электромагнитный момент, необходимо иметь распределение поля в ЭМ. Но это еще не все решение задачи: от магнитного поля надо перейти к силовым взаимодействиям. Разработанные для этого способы представлены в [6], а именно, определение электромагнитных сил возможно: 1) по изменению энергии или коэнергии магнитного поля при достаточно малом перемещении выделенного объема; 2) по натяжению силовых линий магнитного поля; 3) по их объемной и поверхностной

плотностям в магнитном поле.

В совокупности с численными расчетами магнитных полей в настоящее время все большей популярностью пользуется второй из них [7, 8], который вместе с возможностью расчета целого комплекса электромагнитных параметров ЭМ [9] может составить основу совершенствования системы их проектирования.

Учитывая, что созданы условия достаточно детального анализа силовых взаимодействий, и продолжая курс [9] на адаптацию численных расчетов магнитных полей к анализу все большего набора параметров и характеристик ЭМ, в данной работе ставится цель – анализ силовых взаимодействий в одном из самых ответственных типов ЭМ – мощном турбогенераторе (ТГ).

Демонстрацию конкретных расчетных результатов будем проводить на ТГ со следующими номинальными параметрами: активная мощность  $P_N=200$  МВт; фазные напряжения и ток  $U_{sN}=9093$  В;  $I_{sN}=8625$  А; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN}=0,85$ ; частота  $f=50$  Гц. Из параметров конструкции отметим: число фаз  $m_s=3$ , число пар полюсов  $p = 1$ , основной немагнитный зазор  $\delta=0,1$  м; активная длина  $l_a=5,286$  м; диаметр ротора  $d_r=1,075$  м; относительное укорочение обмотки статора – 4/5. Электромагнитная система данного ТГ представлена на рис. 1.

### ОСНОВЫ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Так как силовые взаимодействия и воздействия в ЭМ осуществляется через посредство магнитного поля, то оно и является первоосновой их расчета.

Численные расчеты магнитных полей в ЭМ могут эффективно проводиться методами конечных разностей (МКР) [3] и конечных элементов (МКЭ) [2].

Уже существуют программы, которые позволяют это сделать как в двухмерной [10], так и в трехмерной [11] постановке. Однако для реальных конструкций основных типов ЭМ практическое решение трехмерной полевой задачи требует чрезмерно больших затрат, которые адекватны поучаемому уточнению результатов расчетов только в специальных случаях. В большинстве же случаев для получения практически приемлемых результатов достаточно двухмерной постановки полевых задач.

Магнитное поле в поперечном сечении ЭМ описывается дифференциальным уравнением

$$\text{rot}[(v \text{ rot}(\vec{k} A_z))] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где  $A_z$ ,  $J_z$  - аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;  $v$  - удельное магнитное сопротивление (УМС);  $\vec{k}$  - орт.

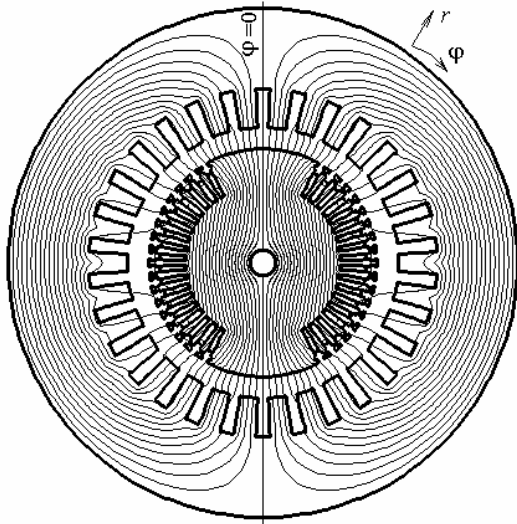


Рис. 1. Магнитное поле ТГ в режиме XX ( $A_{\max}=0,4558$  Вб/м)

Например, в полярной системе координат ( $r, \varphi$ ) это уравнение преобразуется к виду:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ v r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ v \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \right] = -J_z. \quad (2)$$

Однако идеализированная плоскопараллельная структура магнитного поля в поперечном сечении ЭМ может быть принята только тогда, когда сердечники магнитопровода по аксиальной координате ЭМ однородны, имеют одинаковую аксиальную длину и торцевое рассеяние магнитного поля незначительно. Для значительного ряда ЭМ это допущение оказывается неприемлемым, что показано в работах [12, 14]. Поэтому двумерная постановка полевых задач в поперечном сечении ЭМ должна быть адаптирована к конкретной аксиальной структуре магнитопровода на основе усовершенствований, которые предложены и апробированы в [12] и затем многократно подтвердили свою эффективность, например, в [13].

Одной из базовых величин магнитного поля, которые принято анализировать, является магнитная индукция, вычисляемая по распределению ВМП на основе общего выражения

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (3)$$

Исходя из этого, например, в полярных координатах составляющие и модуль магнитной индукции:

$$B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial \varphi}; \quad B_\varphi = -\frac{\partial A_z}{\partial r}; \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_\varphi^2}. \quad (4)$$

Электродинамические усилия, действующие в магнитном поле на токонесущие элементы с плотностью тока  $\vec{J}$ , определяются базовой формулой:

$$\vec{F} = l_a \int_S [\vec{J} \times \vec{B}] dS. \quad (5)$$

В случае полярной системе координат формула (5) трансформируется в формулы сосредоточенных

касательной и радиальной составляющих сил:

$$F_\varphi = l_a \int_S [B_\varphi \sin(\varphi - \varphi_c) - B_r \cos(\varphi - \varphi_c)] J_z dS; \quad (6)$$

$$F_r = l_a \int_S [B_\varphi \cos(\varphi - \varphi_c) + B_r \sin(\varphi - \varphi_c)] J_z dS, \quad (7)$$

где  $S$  - площадь сечения стороны катушки;  $\varphi_c$  - угловая координата, к которой приводятся силы.

Электромагнитный момент вращения, действующий на токонесущие элементы обмоток:

$$M_{em} = l_a \int_S B_r J_z r dS. \quad (8)$$

Силы и момент по (6)-(8) дают достаточно полную информацию о силовых проявлениях в случае отсутствия ферромагнитных сердечников, как, например, в работе [14], либо при расположении обмоток на цилиндрической гладкой поверхности сердечников [4].

В ЭМ с обмотками, расположенными в пазах, реально силы действуют, как уже отмечено, не только и не столько на проводники, а преимущественно на зубцы сердечников. При отсутствии токов в пазах на противоположные боковые стороны зубцов действуют в среднем одинаковые силы, поэтому в целом электромагнитный момент между ротором и статором отсутствует. При наличии токов в проводниках картина магнитного поля, как это будет показано далее, искажается, и баланс сил с разных сторон зубцов нарушается. Аналогично, в воздушном зазоре между сердечниками ротора и статора силовые линии поля искажаются, и возникает преобладающее одностороннее магнитное притяжение. В итоге и возникает электромагнитный вращающий момент ЭМ, расчет которого может быть проведен по формуле [7, 8]:

$$M_{em} = \frac{l_a r_\delta^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_r B_\varphi d\varphi, \quad (9)$$

где интегрирование проводится по окружности с радиусом  $r_\delta$ , проходящей в зазоре,  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Этот момент (9) складывается из элементарных моментов, возникающих из-за натяжений силовых линий магнитного поля на указанной окружности, приходящихся в каждом конкретном месте на ее элемент  $r_\delta d\varphi$ :

$$dM_{em} = \frac{l_a r_\delta^2}{\mu_0} B_r B_\varphi d\varphi. \quad (10)$$

Для того, чтобы нивелировать локальные погрешности в определении момента, возникающие в отдельных местах зазора из-за дискретизации области расчета сеточной структурой и неточной аппроксимацией зубцовых структур, интегрирование проводится не по линии окружности, а по кольцевой области в том же зазоре в соответствии с методом "eggshell" [8] по формуле:

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0 (r_S - r_R)} \int_{S_\delta} r B_r B_\varphi dS, \quad (11)$$

где  $r_S$ ,  $r_R$  - радиусы, ограничивающие кольцевую зону зазора площадью  $S_\delta$  со сторон статора и ротора.

Эффективность вычисления электромагнитного

момента по формуле (11) была проверена в [10] посредством сравнительного расчетного тестирования.

### РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Конкретные расчеты магнитного поля в ТГ были проведены МКР по собственной программе. Это позволяет, в отличие от использования программных продуктов иных авторов [10], организовать программным путем более удобную и разностороннюю информацию.

Расчеты были проведены в режиме холостого хода и номинальной нагрузки, постановка которых осуществлялась в соответствии с изложенным в [9, 15]. В частности, в обмотке ротора задавалась трехфазная система токов:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(-\alpha); & i_B &= I_m \cos(-\alpha - 2/3 \cdot \pi); \\ i_C &= I_m \cos(-\alpha + 2/3 \cdot \pi), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $I_m$  – амплитуда фазного тока;  $\alpha$  – угол, задающий угловое положение этой структуры токов и, соответственно, положение главной оси действующей магнитодвижущей силы обмотки статора относительно продольной оси ротора. В режиме номинальной нагрузки угол  $\alpha$  составлял  $156,76^\circ$ , а мгновенные значения фазных токов  $i_A = -11208$  А;  $i_B = -9772$  А;  $i_C = -1436$  А. Отметим, что фазная обмотка А-А' на рис. 2 выделена затемнением проводников в соответствующих слоях в пазах статора.

МДС обмотки ротора в режиме холостого хода составила 130 кА при номинальном напряжении, а в режиме нагрузки была повышена в 2,441 раза для сохранения того же напряжения.

Картины магнитных полей представлены на рис. 1 и рис.2 в полных областях расчета, а также на рис. 3 и рис.4. на фрагментах этих областей в зоне зазора с захватом края большого зуба ротора. Картины даны силовыми линиями, которые являются линиями равного ВМП, т.е.  $A_z^* = \text{const}$  при его нормировке максимальным для конкретно представляемого режима абсолютным значением  $A_{\text{max}}$  по формуле:

$$A_z^* = \frac{A_z}{A_{\text{max}}} \quad (13)$$

Если сравнить рис. 1 и рис. 2, то видно, как при переходе от холостого хода к нагрузке исказилась общая картина магнитного поля. Если сначала и были локальные натяжения силовых линий в зазоре (отклонения от радиальных линий), то они в целом имеют симметричный характер и результирующее действие в касательном направлении равно нулю – электромагнитный момент между ротором и статором отсутствует. В режиме нагрузки картина натяжений в целом имеет односторонний характер и это приводит к соответствующему электромагнитному моменту (11).

Особенно изменения магнитного поля заметны при сравнении рис. 3 и рис. 4. Искажения магнитного поля произошли из-за действия токов обмотки статора, что, естественно, и привело к натяжению силовых линий и возникновению электромагнитного момента.

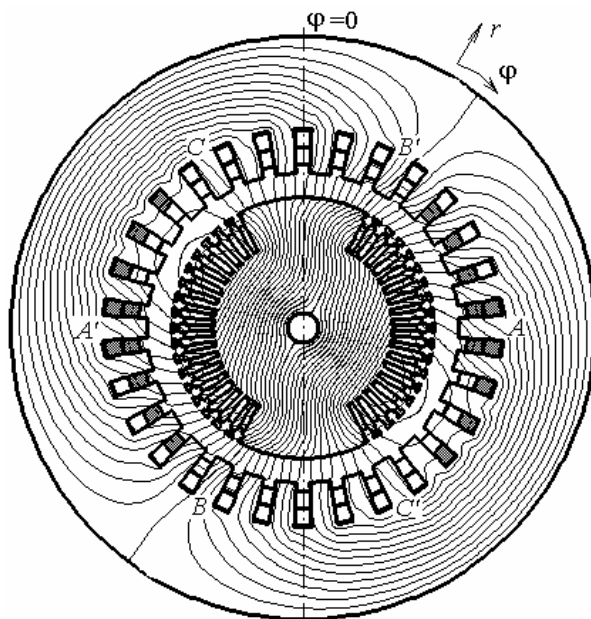


Рис. 2. Магнитное поле ТГ в режиме номинальной нагрузки ( $A_{\text{max}}=0,5535$  Вб/м)

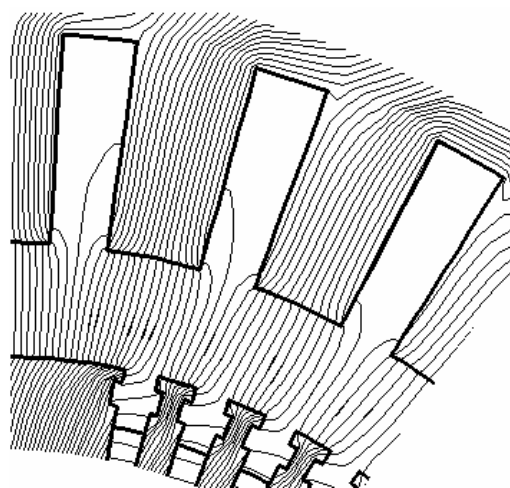


Рис. 3. Фрагмент области расчета с картиной магнитного поля в режиме XX

Силы, которые действуют непосредственно на проводники обмоток, определены по (5)-(7) и показаны в векторной форме на рис. 5 и рис. 6. Здесь каждый вектор соответствует силе, приходящейся на паз и единицу длины ТГ, причем для векторов на каждом рисунке дан конкретный масштаб. Для режима холостого хода ограничились только ротором, так как в обмотке статора отсутствуют токи и, значит, силы. Общий характер действия сил очевиден: они направлены в глубь массива своего сердечника. Очевидно также изменение сил, действующих на проводники обмотки ротора при переходе к режиму нагрузки. Наибольшая сила, приходящаяся на паз ротора, составляет 1,5 кН·м в режиме холостого хода и 3,8 кН·м в режиме нагрузки, на паз статора – 6,26 кН·м.

Неравномерность распределения сил по обмотке статора объясняется тем, что в разных фазных обмотках статора проходят различные мгновенные значения токов, которые определяются в соответствии с (12).

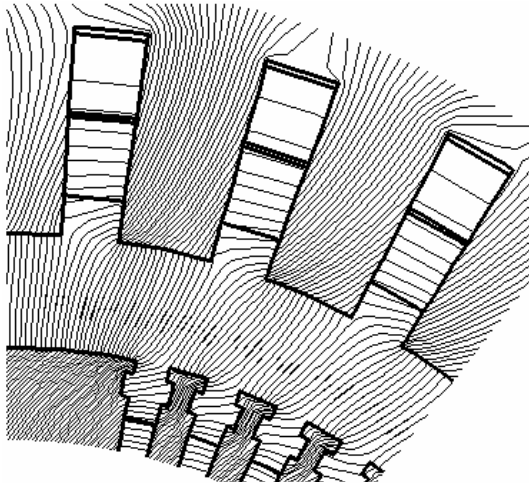


Рис. 4. Фрагмент области расчета с картиной магнитного поля в режиме номинальной нагрузки

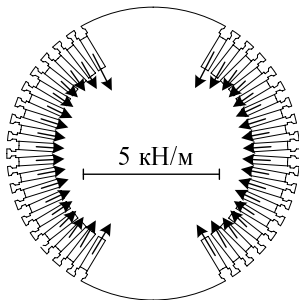


Рис. 5. Распределение электродинамических усилий по пазам ротора в режиме холостого хода

Поскольку для определения электромагнитного момента по формулам (9)-(11) исходными являются распределения составляющих магнитной индукции (4), то с них и начнем. Так на рис. 7 показано распределение составляющих магнитной индукции вдоль линии средней окружности в зазоре. На следующем полюсном делении распределение соответствует условию периодичности:

$$B_{\varphi}(\varphi + \tau_p) = -B_{\varphi}(\varphi); \quad B_r(\varphi + \tau_p) = -B_r(\varphi). \quad (14)$$

Распределение удельного электромагнитного момента (9) по той же линии зазора показано на рис. 8 – опять для режимов холостого хода и нагрузки. Здесь развертка линии окружности дана на двух полюсных делениях, причем на полюсных делениях все повторяется, но в отличие от (14), без изменения знака:

$$dM_{em}(\varphi + \tau_p) = dM_{em}(\varphi). \quad (15)$$

Очевидно по рис. 8, что локальные силовые напряжения, т.е. натяжения силовых линий магнитного поля возникают и в режиме холостого хода. Но они, в отличие от режима нагрузки, в целом по двум полюсным делениям взаимно компенсируются и не создают результирующего электромагнитного момента.

В режиме номинальной нагрузки результирующий электромагнитный момент ТГ  $M_{em}$  по (11) составил 644,4 кН·м. Чтобы оценить, насколько это соответствует общим данным ТГ, была определена его электромагнитная мощность:

$$P_{em} = M_{em} \Omega, \quad (16)$$

где  $\Omega = \frac{\omega}{p}$  – угловая скорость ротора;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота.

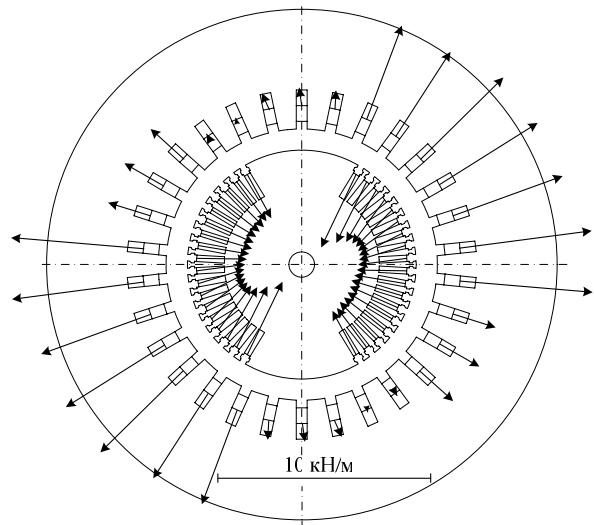


Рис. 6. Распределение электродинамических усилий по пазам ротора и статора в режиме номинальной нагрузки

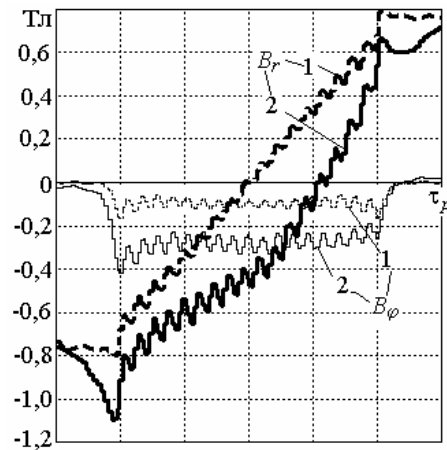


Рис. 7. Распределение составляющих магнитной индукции в зазоре ТГ: 1 – холостой ход; 2 – номинальная нагрузка

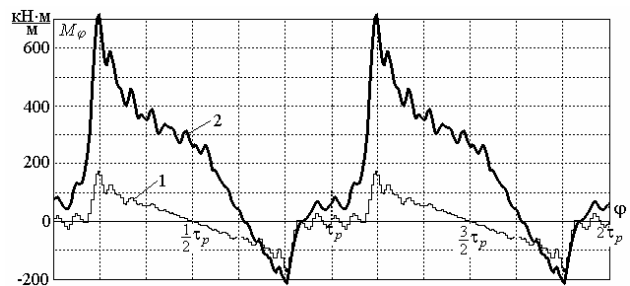


Рис. 8. Распределение электромагнитного момента по зазору ТГ: 1 – холостой ход; 2 – номинальная нагрузка

Определенная так электромагнитная мощность составила 200,43 МВт, что весьма близко к заданной номинальной электрической мощности ТГ

$$P_N = m_s U_{sN} I_{sN} \cos \varphi_{sN}, \quad (17)$$

составляющей 200 МВт. Различия могут объясняться тем, что момент определяется по реальному распределению магнитной индукции в зазоре (рис.7), а напряжение – через ЭДС, которая в данном случае, как и в

[9, 15], определялась только по первой гармонической составляющей магнитного потокоцепления фазной обмотки статора. А также тем, что существуют потери мощности, которые в данном случае детально не анализировались. В целом же близость значений  $P_N$  и  $P_{em}$  свидетельствуют в пользу использованного метода определения электромагнитного момента по формулам (9)-(11), что весьма важно, так как достаточной апробации в условиях ЭМ эти формулы еще не прошли, в отличие от классических подходов к их проектированию.

Отметим, что при определении электромагнитного момента по формуле (11) возможна и чисто методическая погрешность, характерная для численных методов расчета магнитных полей ввиду конечного уровня сеточной (рис. 9) или конечно-элементной дискретизации области расчета. Так, например, если в качестве кольцевой зоны с площадью  $S_\delta$  бралась зона от поверхности ротора  $r_r$  до внутренней расточки статора  $r_s$ , то получалось  $M_{em} = 640,8$  кН·м, если узкая кольцевая полоска посередине зазора  $r_\delta$ , то упомянутое уже значение  $M_{em} = 644,4$  кН·м. Последнее следует считать более предпочтительным, так как погрешности дискретизации области вблизи зубцовых структур ротора и статора возрастают.

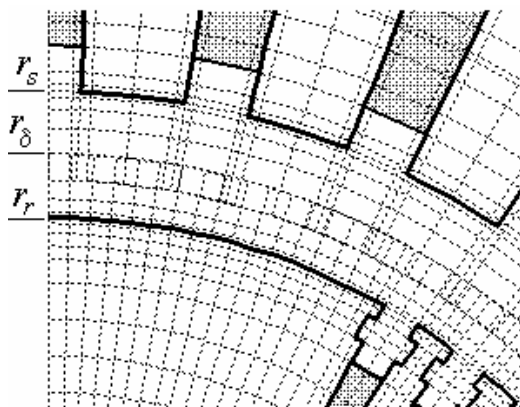


Рис. 9. Фрагмент полярной сеточной модели ТГ

## ВЫВОДЫ

1. Численный расчет магнитного поля является эффективной основой для определения и анализа силовых взаимодействий в электрических машинах.

2. Проведенный численно-полевой анализ силовых взаимодействия в турбогенераторе проявил не только их физическую основу, но и показал величину и характер распределения электродинамических усилий по проводникам обмоток, а также электромагнитного момента, определяемого через натяжение силовых линий магнитного поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
2. Chari M.V.K., Silvester P. Element analysis of magnetically Saturated DC machines // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1971. PAS-90, N2, p. 2362-2372.
3. Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II:

Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p.1546-1564.

4. Данько В.Г., Милых В.И. Электродинамические усилия в электродвигателе с обмоткой якоря, вынесенной в зазор, и компенсационной обмоткой // Электротехника.-1982.-N 1.-С.36-40.

5. Гринченко Н.Г., Милых В.И., Третьевич Р.И. Анализ усилий в обмотке якоря, вынесенной в зазор // Электротехника.-1986.-N5.-С. 11-15.

6. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. - М.: Высш. школа, 1989. - 312 с.

7. McFee S., Webb J.P., Lowther D.A. A tunable volume integration formulation for force calculation in finite element based computational magnetostatics // IEEE Transactions on Magnetics. - 1998. Vol. 24, № 1. P. 439-442.

8. Henrotte F., Deliege A., Hameyer K. The eggshell method for the computation of electromagnetic forces on rigid bodies in 2D and 3D // The Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation Perugia, Italy, June 16-19, 2002.

9. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка.-2006.-№2.-С. 40-46.

10. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.

11. <http://www.ansys.com>.

12. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.-1982.-№12.-С. 46-49.

13. Милых В.И., Поляков И.В., Полякова Н.В., Штангеев Е.И. Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин // Электротехніка і електромеханіка.-2004.-№3.-С. 38-43.

14. Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета полностью сверхпроводникового криотурбогенератора на основе решения полевых задач // Электротехніка і електромеханіка.-2002.-№1.-С. 43-48.

15. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей. // Электротехніка і електромеханіка.-2003.-№4.-С. 59-64.

Поступила 04.02.2009

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,

Бадковский Владимир Александрович

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",

кафедра "Электрические машины"

тел. (057) 707-65-14, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua