

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОНЦЕВОЙ ЗОНЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ

В.И.Милых, д.т.н., проф., О.Н.Дубинина
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра «Общей электротехники»
Тел. (0572) 40-04-27, факс (0572) 40-06-01, E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Подано методику і результати чисельного розрахунку магнітного поля в торцевій зоні турбогенератора в режимі навантаження. Це робиться як накладенням магнітних полів обмоток статора і ротора, так і безпосереднім розрахунком при сумісній дії обмоток з урахуванням насичення магнітопроводу. Для зсуву осей намагнічування обмоток дані готуються через розрахунки магнітного поля в поперечному перерізі турбогенератора.

Представлена методика и результаты численного расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки. Это делается как наложением магнитных полей обмоток статора и ротора, так и непосредственным расчетом при совместном действии обмоток с учетом насыщения магнитопровода. Для смещения осей намагничивания обмоток данные готовятся посредством расчетов магнитного поля в поперечном сечении турбогенератора.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная для турбогенераторов задача исследования электромагнитных процессов в их торцевых зонах [1-3] нами рассматривалась уже в работах [4-8]. В [4,8] сформированы математические модели численного расчета магнитного поля в этих зонах, в [5] проведен анализ факторов влияния на поле в крайних пакетах сердечника статора, в [6,7] сделан расчетный анализ этого поля. В этих работах [4-8] иллюстрации расчетных моделей и расчетный анализ соответствовали либо только полю обмотки ротора (режим холостого хода - ХХ), либо только полю обмотки статора (режим короткого замыкания - КЗ).

Продолжая развитие исследований магнитного поля в торцевых зонах турбогенератора (ТГ), в данной работе ставим **целью** рассмотрение *магнитного поля при совместном возбуждающем действии обмоток ротора и статора*. При этом сначала рассматривается наложение отдельно рассчитанных полей этих обмоток, а затем и непосредственный расчет поля в режиме нагрузки (РН) при их совместном действии да еще и в комбинации с различными вариантами учета насыщения магнитопровода ТГ.

В качестве основы, на которой строится решение поставленной задачи, будем использовать методику расчета магнитного поля в торцевой зоне ТГ, изложенную в [8], которая основана на методе плоско-ортогональных расчетных моделей [9]. Последний связывает результаты расчета магнитных полей в поперечном [10] и продольном [11] сечениях электрических машин. Расчеты всех этих полей являются численными и используют, как расчетный инструмент, широко известный метод конечных разностей (МКР) [12].

При использовании методики [8], как и в других работах [4-7], рассматривается продольное сечение ТГ, включающее в себя его торцевую зону, а также прилегающий к ней ограниченный участок его прямой части. При этом в продольном сечении в неявной форме учитывается структура поперечного сечения генератора - посредством использования так называемой функции приведения, образующаяся в

результате расчета магнитного поля в этом сечении.

Для достижения поставленной цели расчеты магнитного поля в поперечном сечении будут играть и другую, не менее важную, роль. Посредством таких расчетов необходимо определить взаимное смещение осей, по которым действуют магнитодвижущие силы (МДС) обмоток ротора и статора в РН. Поэтому движение к расчету магнитного поля в торцевой зоне в РН начнем от магнитного поля в поперечном сечении ТГ.

Для иллюстраций будем, как и в [8], использовать ТГ мощностью порядка 200 МВт. Основные его параметры: радиус ротора - 0,537 м; немагнитный зазор - 0,1 м; число витков на фазу обмотки статора $w_a=10$; расчетная длина - $l_a=5,29$ м; номинальные фазные напряжение $U_{\phi}=9093$ В и ток $I_a=8625$ А; частота $f=50$ Гц; $\cos\varphi=0,85$. На данном этапе в элементах торцевой зоны не учитываются вихревые токи. В дальнейшем они могут быть рассмотрены в сочетании с представляемой методикой расчета магнитного поля, как это сделано, например, в [4,5].

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Магнитное поле в поперечном сечении ТГ (рис.1) описывается в полярных координатах (r, φ) известным двумерным дифференциальным уравнением

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

где A_z , J_z - аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; ν - удельное магнитное сопротивление (УМС).

Уравнение (1) решалось численно МКР. И хотя уравнение (1) двумерное, при его решении учитываются неоднородные структура и длины сердечников [8,10]. При этом во всех режимах на внутренней точке сердечника ротора ($r=R_{p1}$) и наружном радиусе сердечника статора ($r=R_{c2}$) принимались условия, ограничивающие распространение магнитного поля:

$$A_z(R_{p1}, \varphi) = 0; \quad A_z(R_{c2}, \varphi) = 0. \quad (2)$$

В режиме XX область расчета - половина полюсного деления при общепринятых условиях [10,12] на ограничивающих радиальных линиях

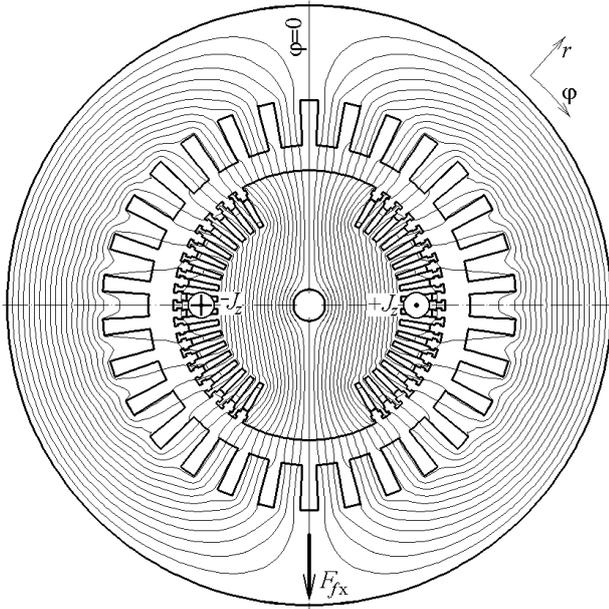


Рис.1. Поперечное сечение ТГ: показаны принятые направления плотности тока J_z и координат (r, φ) , направление МДС и картина магнитного поля обмотки ротора

$$A_z(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \left(r, \frac{\pi}{2} \right) = 0. \quad (3)$$

В этой области для МКР использовалась неравномерная полярная сетки из 70 радиальных и 44 дуговых линий, а в зубцовых слоях ротора и статора применялась эффективная аппроксимация, введенная в [13].

Расчет магнитного поля проведен при МДС обмотки ротора F_{fx} , составлявшей 63450 А на полюс, с учетом нелинейных магнитных свойств ферромагнитных сердечников [10,12]. Результатом являлись распределения ВМП $A_z(r, \varphi)$ и УМС $v(r, \varphi)$. Картина линий равного ВМП, которые проведены с шагом 0,05 относительных единиц, дана на рис.1 (нормировка максимальным значением ВМП $A_{max} = 0,4442$ Вб/м).

Расчет поля возбуждения ТГ создал условия, в виде распределения УМС $v(r, \varphi)$, для расчета магнитного поля обмотки статора. Положение сторон секций ее фазы $A-A'$ выделено на рис.2 кружками с направлениями токов. Структура фаз $B-B'$ и $C-C'$ аналогична, но с обычным их поворотом относительно фазы $A-A'$.

Для обмотки статора отсутствуют оси симметрии (из-за двухслойной структуры и укорочения) и минимальной областью расчета является полюсное деление при граничных условиях, учитывающих периодичную структуру поля по угловой координате, а именно:

$$A_z(r, 0) = -A_z(r, \pi). \quad (4)$$

Расчет магнитного поля обмотки статора проводился в так называемом косвенном расчетном режиме, введенном в [14]. Он отличается от известного режима КЗ тем, что поле рассчитывается на фоне рас-

пределения УМС, полученного из режима XX.

В фазе $A-A'$ обмотки статора задавалось мгновенное значение тока, равное амплитудному значению

$$i_A = I_{ma} = \sqrt{2} I_a = 12200 \text{ А}, \quad (5)$$

а в фазах $B-B'$ и $C-C'$ - соответствующие значения

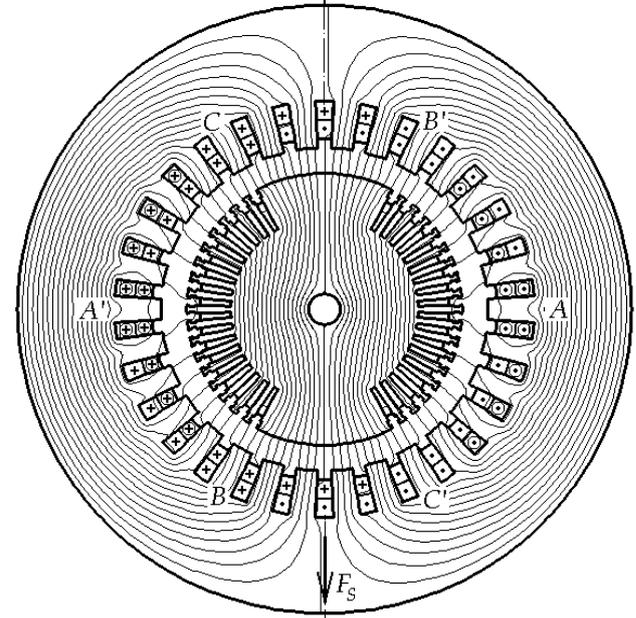


Рис.2. Картина магнитного поля обмотки статора: показаны направления тока и ее результирующей МДС

$$i_B = I_{ma} \cos\left(-\frac{2}{3}\pi\right) = -6100 \text{ А}; \quad (6)$$

$$i_C = I_{ma} \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) = -6100 \text{ А}. \quad (7)$$

Рассчитанная картина обмотки статора представлена на рис.2, где линии ВМП проведены с шагом 0,05 (нормировка значением $A_{max} = 0,7625$ Вб/м).

Целью расчета магнитного поля обмотки статора являлось определение синхронного индуктивного сопротивления. Для этого по распределению $A_z(r, \varphi)$ определялось магнитное потокоцепление фазы $A-A'$

$$\Psi_{SA} = \frac{2}{S_A} \int_{S_A} A_z dS, \quad (8)$$

где интегрирование проводится по площади поперечного сечения S_A сторон секций этой фазы в пределах полюсного деления на правой половине рис.2.

Значение Ψ_{SA} по (8) приходится на единицу аксиальной длины и один усредненный виток, удвоение учитывает наличие вторых сторон секций. И это будет магнитное потокоцепление фазы $A-A'$ от реакции якоря, то есть с учетом потокоцеплений от других фаз (в Ψ_{SA} входит и то, что обычно выделяется как поле рассеяния обмотки статора [15]). Принцип вычислений Ψ_{SA} с учетом сеточной аппроксимации по полученному распределению ВМП представлен в [16].

Индуктивность фазы обмотки статора

$$L_A = l_a w_a \frac{\Psi_{SA}}{I_{ma}}, \quad (9)$$

ее синхронное индуктивное сопротивление

$$X_d = 2\pi f L_A. \quad (10)$$

Тогда в РН действующие значения ЭДС от поля реакции якоря в фазе обмотки статора

$$E_S = X_d I_a \quad (11)$$

и в ней же (фазе) ЭДС от поля обмотки ротора

$$E_{\text{аном}} = \sqrt{(U_\phi \cos \varphi)^2 + (E_S + U_\phi \sin \varphi)^2}, \quad (12)$$

В рассматриваемом ТГ характеристика ХХ близка к прямолинейной. Тогда, в первом приближении, МДС обмотки ротора (на полюс) в номинальном режиме

$$F_{f \text{ ном}} = F_{f x} \frac{E_{\text{аном}}}{U_\phi}. \quad (13)$$

Амплитуда МДС обмотки статора в соответствии с [15] составила

$$F_S = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_a w_a k_{w1}, \quad (14)$$

где $k_{w1}=0,91$ - обмоточный коэффициент этой обмотки.

Вычисления по конкретным параметрам ТГ дали значения: $X_d=2$ Ом; $E_{\text{аном}}=23380$ В; $F_{f \text{ ном}}=163300$ А; $F_S=106000$ А. По этим данным на рис.3 построена по известным правилам [15] векторная диаграмма ТГ, иллюстрирующая соотношения напряжения, ЭДС и МДС, а также соответствующие фазовые сдвиги, которые имеют место в режиме номинальной нагрузки.

Угловые смещения определены по рис.3 так:

- * фазовый сдвиг $\varphi = \arccos(0,85) = 31,8^\circ$;
- * угол нагрузки $\theta = \arctg \frac{E_S + U_\phi \sin \varphi}{U_\phi \cos \varphi} - \varphi = 38,9^\circ$;
- * угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора $\beta = \varphi + \theta + 90 = 160,7^\circ$.

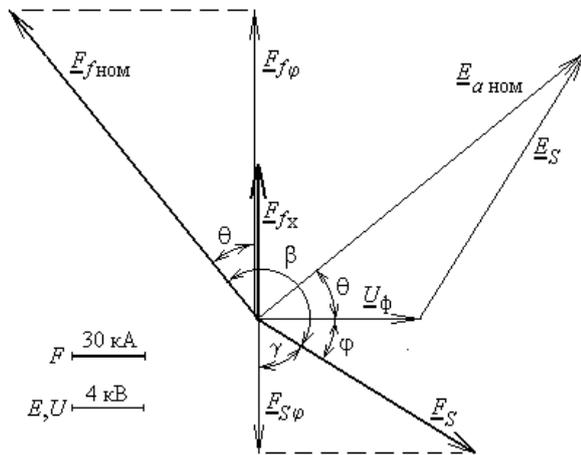


Рис.3. Векторная диаграмма ЭДС обмотки статора и МДС обмоток ротора и статора

Угол β дает основу для расчета магнитного поля в торцевой зоне ТГ в РН. Но перед этим еще продемонстрируем соответствующий взаимный сдвиг полей обмотки ротора и статора в поперечном сечении.

Пусть ротор и его поле имеют положение, представленное на рис.1. У статора сохраним расположение его фазных обмоток, как на рис.2. Для поворота

оси намагничивания обмотки статора на угол β зададим в ее фазах мгновенные значения токов

$$i_A = I_{ma} \cos(-\beta) = -11514 \text{ А}; \quad (15)$$

$$i_B = I_{ma} \cos(-\beta - \frac{2}{3}\pi) = 2265 \text{ А}; \quad (16)$$

$$i_C = I_{ma} \cos(\frac{2}{3}\pi - \beta) = 9249 \text{ А}. \quad (17)$$

Они во времени отстают по фазе на аналогичный угол β (здесь в радианах) от токов по формулам (5)-(7).

Расчеты дали $A_{max} = 0,7573$ Вб/м и картину поля, представленную на рис.4, где показано и соответствующее направление МДС обмотки статора.

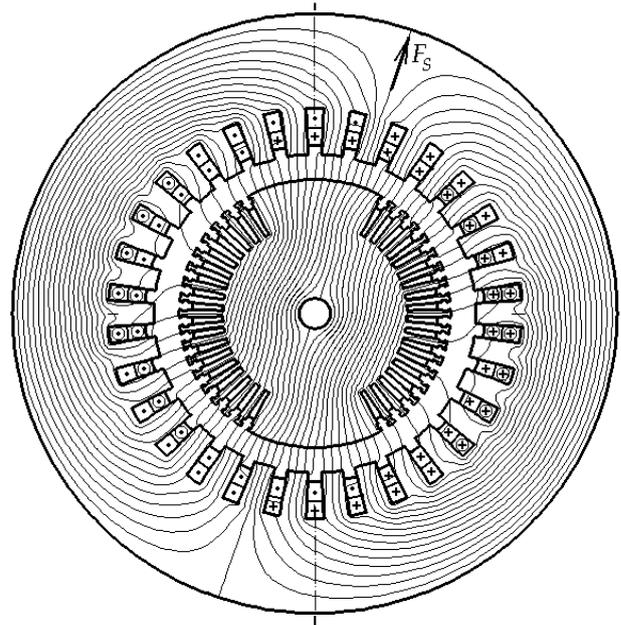


Рис.4. Картина магнитного поля обмотки статора при смещении МДС ее обмотки на угол β

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Расчеты, проведенные в поперечном сечении ТГ, позволяют перейти к расчету магнитного поля в его продольном сечении, которое представлено на рис.5 и уже рассматривалось в [8].

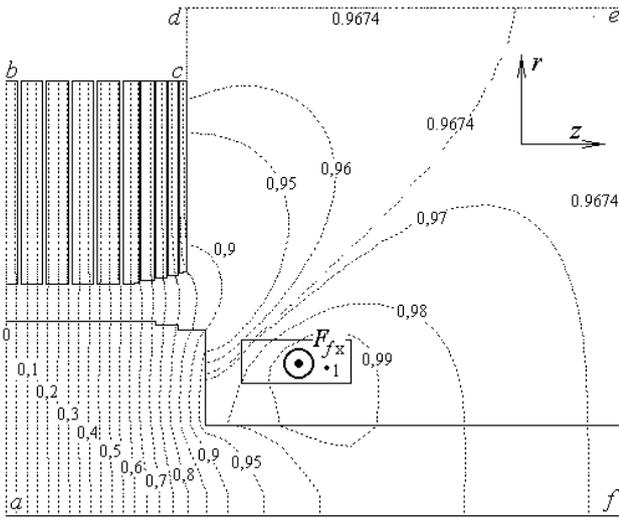


Рис.5. Структура концевой зоны в продольном сечении ТГ с картиной магнитного поля обмотки ротора

Расчетное продольное сечение для магнитного поля обмотки ротора совпадает с координатной плоскостью (r, z) , являющейся плоскостью симметрии ротора. На рис.1 это сечение ориентировано по направлению действия МДС F_{fx} его обмотки.

Методика расчета подробно изложена в [8]. В продольном сечении она учитывает электромагнитную геометрию поперечного сечения - посредством специальной функции приведения $\xi(r)$, получаемой по распределению магнитного поля в последнем (рис.1). Так в продольном сечении формируется эквивалентная плоская расчетная модель и магнитное поле описывается двумерным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[v_{\Omega}^{(z)} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{\Omega}^{(r)} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial z} \right] = -J_{\varphi}, \quad (18)$$

где A_{φ} , J_{φ} - составляющие плотности тока и ВМП, ортогональные плоскости (r, z) ; $v_{\Omega}^{(r)}$, $v_{\Omega}^{(z)}$ - значения УМС, приведенные к плоской модели с помощью $\xi(r)$ (их анизотропия вызвана шихтовкой сердечников) [9,11].

В описанной расчетной модели необходимая структура силовых линий магнитного поля формируется посредством комплекса граничных условий для ВМП. Они устанавливаются в соответствии с [8,9,11] на внешних границах области $abcdef$ (рис.5) и в данном случае имеют вид

$$(A_{\varphi})_{ab} = 0; \int_a^b \left(v_{\Omega}^{(r)} \frac{\partial A_{\varphi}}{\partial z} \right) dr = (U_m)_{ab}; \quad (19)$$

$$(A_{\varphi})_{cdef} = C_{var}; \left(\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} \right)_{bc} = 0; \left(\frac{\partial A_{\varphi}}{\partial r} \right)_{af} = 0, \quad (20)$$

где C_{var} - постоянная, определяемая в процессе расчета поля; U_m - падение магнитного напряжения вдоль границы ab , определенное по магнитному полю, рассчитанному в поперечном сечении ТГ (рис.1).

Уравнение (18) с учетом условий (19),(20) решалось МКР [9,11,12]. Область расчета (рис.5) аппрок-

симировалась прямоугольной расчетной сеткой из 61 горизонтальной и 116 вертикальных линий. Насыщение сердечников магнитопровода учитывалось посредством соответствующих кривых намагничивания, как в [4-8]. В результате расчета получается распределение ВМП $A_{\varphi}(r, z)$ и УМС $v(r, z)$.

Структура магнитного поля обмотки ротора в продольном сечении ТГ представлена на рис.5 и соответствует ее МДС $F_{fx}=63450$ А (на полюс), а нормирующая величина для ВМП $A_{max} = 0,4318$ Вб/м.

Величина U_m из (19), выраженная в долях от F_{fx} ,

$$U_m = k_{Um} F_{fx}, \quad (21)$$

имела значение $k_{Um}=0,972$.

В области расчета на рис.6, аналогичной области на рис.5, на основе того же уравнения (18), при тех же граничных условиях (19),(20) и при использовании той же функции приведения $\xi(r)$ рассчитывалось магнитное поле обмотки статора. Но теперь подразумевается, что продольное сечение (рис.6) проходит в поперечном сечении (рис.4) по линии действия МДС F_S . В области расчета на рис.6 в лобовой части обмотки статора эта МДС составляла $F_S=106000$ А и соответствовала выражению (14). По сечению лобовой части эта МДС распределялась в соответствии с [1], как это показано в [4]. Величина U_m из (19) в долях от F_S соответствовала k_{Um} из (21). Насыщение магнитопровода, то есть распределение УМС $v(r, z)$ в сердечниках принято таким, как получено при расчете магнитного поля обмотки ротора, и в процессе расчета оно не менялось, что важно для последующего наложения и сопоставления магнитных полей.

Полученная структура магнитного поля обмотки статора в продольном сечении ТГ дана на рис.6. Здесь нормирующее значение ВМП $A_{max} = 0,7411$ Вб/м.

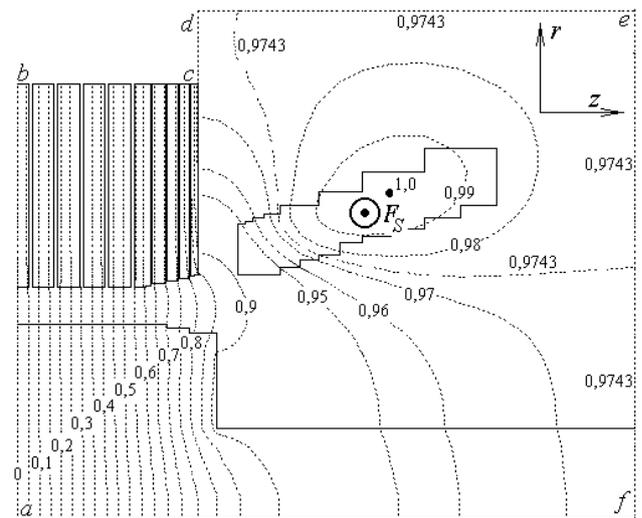


Рис.6. Картина магнитного поля обмотки статора в концевой зоне ТГ

Как наиболее простой вариант получения магнитного поля в торцевой зоне ТГ в РН используем метод наложения полей обмоток ротора и статора.. Расчетные плоскости этих полей (рис.5 и 6) совпадают с осями приложения амплитудных значений МДС

соответствующих обмоток (рис.1 и 4). Поэтому полученные распределения ВМП в продольном сечении для обмотки ротора $A_{\phi X}(r,z)$ и обмотки статора $A_{\phi S}(r,z)$ будем рассматривать как амплитудные и изменяющиеся по гармоническому закону по угловой координате φ с периодом в два полюсных деления. Тогда суммирование полей обмоток ротора и статора можно проводить, как для гармонических функций, с учетом смещения плоскостей их амплитудных значений на угол β .

Рассмотрим два варианта наложения полей.

В первом варианте в каждой точке области расчета сложим ВМП и тогда распределение ВМП для РН

$$A_{\phi N} = \sqrt{A_{\phi X \text{ ном}}^2 + 2A_{\phi X \text{ ном}}A_{\phi S} \cos\beta + A_{\phi S}^2}, \quad (22)$$

где распределение ВМП обмотки ротора при номинальной ее МДС $F_{f \text{ ном}}$ (13) получаем через распределение $A_{\phi X}$, рассчитанное при $F_{f X}$, таким образом:

$$A_{\phi X \text{ ном}} = A_{\phi X} \frac{F_{f \text{ ном}}}{F_{f X}}. \quad (23)$$

По полученному распределению ВМП $A_{\phi N}$ уже нетрудно определить аксиальную B_z , и радиальную B_r , составляющие и модуль B магнитной индукции, что подробно представлено в [8].

Во втором варианте наложения суммировать будем непосредственно составляющие магнитной индукции B_z и B_r , которые предварительно вычисляются отдельно по распределениям ВМП $A_{\phi X \text{ ном}}$ и $A_{\phi S}$. Тогда для РН аксиальная и радиальная составляющие магнитной индукции

$$B_{zN} = \sqrt{B_{zX \text{ ном}}^2 + 2B_{zX \text{ ном}}B_{zS} \cos\beta + B_{zS}^2}; \quad (24)$$

$$B_{rN} = \sqrt{B_{rX \text{ ном}}^2 + 2B_{rX \text{ ном}}B_{rS} \cos\beta + B_{rS}^2}. \quad (25)$$

Сравнение представленных двух вариантов наложения полей сделаем по значениям магнитной индукции в табл.1, где обозначение ΣA_{ϕ} соответствует (22), $\Sigma B_{z,r}$ - (24),(25). Для сопоставления взяты значения магнитной индукции в стальных листах зубцов в пакетах сердечника статора: $B_{c s}$ - среднее значение модуля индукции; $B_{z c s}$, $B_{z c \text{ max}}$ - среднее и максимальное значения ее аксиальной составляющей. Именно две последние величины обычно представляют интерес, так как составляющая B_z приводит к дополнительным магнитным потерям [1-3] и влияет на надежность ТГ.

Таблица 1. Магнитная индукция в стали зубцов сердечника статора для двух вариантов наложения полей, Тл (распределение по пакетам, считая справа по рис.5 и 6)

Вариант наложения	Пакет статора	$B_{c s}$	$B_{z c s}$	$B_{z c \text{ max}}$
ΣA_{ϕ}	1	1.596	0.132	1.023
	2	1.320	0.055	0.745
	3	1.136	0.014	0.599
	5	1.465	0.011	0.619
	7	1.314	0.009	0.336
	9	1.311	0.008	0.323

$\Sigma B_{z,r}$	1	1.661	0.149	1.056
	2	1.332	0.058	0.751
	3	1.136	0.014	0.600
	5	1.465	0.011	0.619
	7	1.314	0.009	0.336
	9	1.311	0.008	0.323

В целом результаты двух вариантов наложения полей обмоток соответствуют друг другу, хотя есть и очевидные отличия - прежде всего в крайнем пакете сердечника статора. Основным будем считать вариант наложения по (24),(25) - в соответствии с принятым в [15] наложением значений индукции в торцевой зоне ТГ, полученных экспериментально в режимах XX и КЗ, а вариант (22) - считать допустимым, но связанным с большей погрешностью. Причем такая погрешность будет зависеть от выбора констант в граничных условиях (19),(20) на линиях ab и $cdef$.

Как уже выяснено в [5], результаты расчета магнитного поля в крайних пакетах статора существенно зависят от насыщения магнитопровода. При отдельных расчетах магнитных полей двух обмоток объективный учет насыщения весьма проблематичен. Поэтому все-таки необходим расчет магнитного поля в торцевой зоне ТГ непосредственно в РН при совместном действии обеих обмоток с сопутствующим учетом насыщения посредством пересчета УМС стальных сердечников по кривым намагничивания.

При одновременном учете в уравнении (18) плотностей токов двух обмоток необходимо определиться с заданием их МДС. С этой целью на векторной диаграмме (рис.3) спроецируем МДС обмотки ротора $F_{f \text{ ном}}$ и обмотки статора F_S на ось, по которой направлена МДС обмотки ротора $F_{f X}$ в режиме XX (предполагаем, что результирующая МДС в РН примерно совпадет с $F_{f X}$, ибо должна обеспечить такие же результирующие магнитный поток и ЭДС, как и при XX).

Проекции МДС обмоток ротора и статора

$$F_{f\phi} = F_{f \text{ ном}} \cos\Theta; \quad F_{S\phi} = F_S \cos\gamma \quad (26)$$

составили 127000 А и 55860 А, соответственно, и должны задаваться при расчете магнитного поля с противоположными знаками.

Необходимая в граничных условиях (19) величина падения магнитного напряжения на границе ab области расчета задавалась по аналогии с (21) так:

$$U_m = k_{Um} (F_{f\phi} - F_{S\phi}) \quad (27)$$

и составила 69200 А.

При одновременном действии двух обмоток с указанными МДС (26) и U_m (27) расчеты проведены на основе уравнения (18), граничных условий (19),(20) и функции приведения $\xi(r)$ в двух вариантах: 1) распределение УМС в сердечниках принято из расчета магнитного поля обмотки ротора - обозначение $\Sigma F_{\phi-L}$; 2) с пересчетом УМС в процессе расчета - обозначение $\Sigma F_{\phi-V}$. Картина магнитного поля второго варианта представлена на рис.7 и к ней достаточно близка кар-

тина первого варианта (в первом $A_{max} = 0,4724$ Вб/м; во втором $A_{max} = 0,4682$ Вб/м).

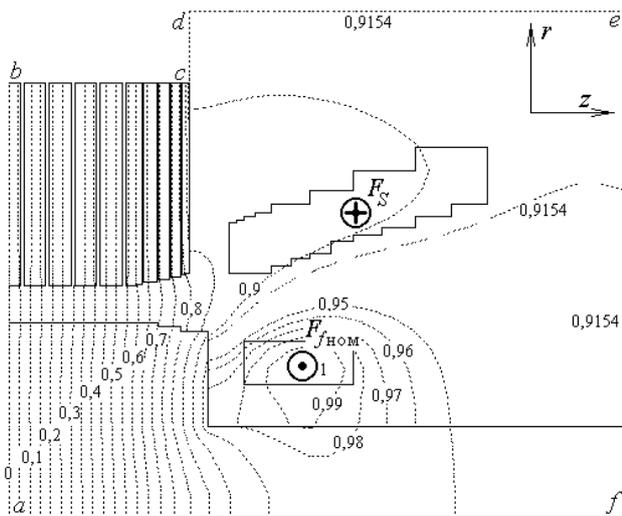


Рис.7. Картина магнитного поля в концевой зоне ТГ в режиме нагрузки

Сравнение двух вариантов расчета $\Sigma F_{\phi-L}$ и $\Sigma F_{\phi-V}$ по тем же величинам индукции, что и табл.1, дано в табл.2. Различие данных подчеркивает необходимость непосредственного учета насыщения магнитопровода, причем достаточная близость результатов связана только с тем, что насыщение магнитопровода в режиме ХХ и при номинальной нагрузке примерно одинаковы, так же, как и магнитные потоки при ХХ и при номинальной нагрузке. Если же принять магнитопровод малонасыщенным, то различия магнитной индукции в концевых пакетах с вариантом $\Sigma F_{\phi-V}$ были бы весьма существенны, как это показано в [5].

Таблица 2. Магнитная индукция в стали зубцов сердечника статора в режиме нагрузки, Тл (распределение по пакетам, считая справа по рис.7)

Вариант расчета	Пакет статора	B_{cs}	B_{zcs}	B_{zcmax}
$\Sigma F_{\phi-L}$	1	1.640	0.139	1.047
	2	1.327	0.056	0.747
	3	1.119	0.014	0.592
	5	1.437	0.011	0.607
	7	1.288	0.009	0.329
	9	1.286	0.008	0.316
$\Sigma F_{\phi-V}$	1	1.725	0.129	1.029
	2	1.256	0.043	0.730
	3	1.103	0.013	0.603
	5	1.416	0.012	0.634
	7	1.277	0.010	0.338
	9	1.275	0.009	0.323

Сравнение варианта данных $\Sigma F_{\phi-L}$ из табл.2 и базового варианта $\Sigma B_{z,r}$ из табл.1, полученных при сходных условиях, свидетельствует о правомерности разложения МДС по (26). Но вариант разложения МДС и совместного их использования при расчете

магнитного поля позволил пойти значительно дальше посредством непосредственного учета насыщения магнитопровода в режиме нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимное смещение по угловой координате раздельно рассчитанных магнитных полей обмотки ротора и обмотки статора в продольных плоскостях торцевой зоны ТГ, а также совмещение МДС этих обмоток в единой области расчета возможно на основе расчета соответствующих магнитных полей в поперечном сечении ТГ.

Наложение магнитных полей обмоток в торцевой зоне ТГ, рассчитанных в различных продольных сечениях, возможно как суммированием распределений ВМП, так и суммированием составляющих магнитной индукции. Предпочтительным является второй вариант, так как первый может нести характерную именно для него значительную погрешность.

Рассмотренный принцип объединения в общей расчетной плоскости МДС обмоток ротора и статора, ориентированных по разным плоскостям, существенно эффективнее метода наложения, так как позволяет рассчитывать магнитное поле в торцевой зоне ТГ в режиме нагрузки с учетом насыщения магнитопровода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. И.М.Постников, Л.Я.Станиславский, Г.Г.Счастливый и др.// Наукова думка.- Киев, 1971.- 360 с.
- [2] Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин / А.И.Вольдек, Я.Б.Данилевич, В.И.Косачевский и др. -Л.: Энергоатомиздат.-1983.-216 с.
- [3] Титко А.И., Счастливый Г.Г. Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока. К.: Наукова думка, 1976. -200 с.
- [4] Мильх В.И., Дубинина О.Н. Формирование расчетной модели магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора на основе анализа факторов влияния // Вісник Східноукр. нац. ун-ту.-2001.-№ 3(37).-С.48-55.
- [5] Мильх В.И., Дубинина О.Н., Поляков И.В. Анализ факторов влияния на магнитное поле в торцевой зоне турбогенератора // Вестник НТУ «ХПИ».-Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. №17.-С.105-109.
- [6] Мильх В.И., Черемисов И.Я., Дубинина О.Н. Анализ магнитного поля возбуждения турбогенератора в его торцевой зоне // Вестник НТУ «ХПИ».- Харків: НТУ «ХПИ», 2001. №5.-С.100-105.
- [7] Данько В.Г., Мильх В.И., Дубинина О.Н. Сравнительный анализ магнитного поля турбогенератора в зоне крайних пакетов статора при варьировании их структурой. // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту.- 2002.- № 1(47).- С.69-78.
- [8] Мильх В.И., Дубинина О.Н. Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчете магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчетных моделей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 5 // Київ: ІЕД НАНУ. 2002.-С.10-15.

- [9] Милых В.И. Синтез магнитного поля электрических машин на основе плоско-ортогональных расчетных моделей // Электричество.- 1986.- №5.- С.27-32.
- [10] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.-1982.-№12. -С.46-49.
- [11] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в продольном сечении электрической машины // Электротехника.-1984.-№12.-С.41-46.
- [12] Erdelyi E.A., Ahamed S.V., Burnes R.D. Flux distribution in saturated dc machines at no load. - "IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. ", 1965, PAS 84, №5, pp.375-381.
- [13] Милых В.И. Принцип компенсации геометрических искажений при конечно-разностных полевых расчетах // Техническая электродинамика.-1989.-№6.-С.20-26.
- [14] Данько В.Г., Милых В.И. Электродинамические усилия в электродвигателе с обмоткой якоря, вынесенной в зазор, и компенсационной обмоткой // Ученые труды ВУЗов.-1982.-N 1.-№.36-40.
- [15] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
- [16] 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.

V.I. Milykh, O.N. Dubinina

Numerical Calculation of Magnetic Field in Turbogenerator End Region in Load Mode

The paper presents a technique and results of numerical calculations of magnetic field in a turbogenerator end region in load mode. The field calculations are performed both via superposition of separate stator and rotor windings magnetic fields and directly for the windings co-action taking into account the turbogenerator magnetic core saturation. For the windings magnetization axes displacement, data are obtained via calculations of magnetic field in the turbogenerator cross-section.

Key words - turbogenerator, end region, magnetic field, longitudinal section, cross-section, load mode