

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Милых В.И., д.т.н., проф., Полякова Н.В.

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ “ХПИ”, кафедра “Общая электротехника”

тел. (0572) 40-04-27, факс (0572) 40-06-01, E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

На підставі чисельних розрахунків магнітних полів турбогенератора визначено фазові співвідношення магнітних потокозчеплень і ЕРС його трифазної обмотки. Магнітні поля розглядалися як роздільно від дії обмоток ротора і статора, так і при накладенні цих полів і ще при розрахунках магнітного поля в режимі навантаження.

На основе численных расчетов магнитных полей турбогенератора определены фазовые соотношения магнитных потокоцеплений и ЭДС его трехфазной обмотки. Эти поля рассматривались раздельно от действия обмоток ротора и статора, при наложении этих полей и при расчетах в режиме нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

В классической теории электрических машин переменного тока [1-3] анализ электромагнитных и энергетических процессов проводится на основе фазовых (временных) соотношений токов, напряжений, ЭДС, магнитодвижущих сил (МДС), магнитных потоков и др. Это касается и синхронных машин, где важную роль играет специфичный для них, так называемый, угол нагрузки, который наглядно вводится посредством векторных диаграмм.

Как известно, векторные диаграммы строятся на основе ряда условностей и упрощений в определении представляемых на них величин. К этим условностям относятся рассмотрение магнитных полей в зазоре, тогда как непосредственное преобразование энергии происходит в проводниках якорной обмотки (начиная, например, с возбуждения ЭДС). Кроме того, насыщение магнитопровода в режиме нагрузки если и учитывается, то лишь косвенно. Тем не менее, векторные диаграммы дают наглядно соотношения электрических и магнитных величин, в том числе и упомянутый угол нагрузки. Такие количественные и фазовые соотношения умозрительно переносятся и на магнитные поля в реальных электрических машинах.

Однако классические методы расчета электрических машин не дают возможности определения этих соотношений для магнитных полей непосредственно в конструкции машин. А все это становится возможным на основе численных методов расчета электромагнитных полей [4]. Но, к сожалению, вопросы эффективного использования этих методов для электрических машин еще недостаточно проработаны. Как правило, за редким исключением, расчет полей оказывается демонстрационным, т.е. без дальнейшего использования для анализа процессов и параметров электрических машин. Поэтому, в общем плане, актуально развитие системы методов эффективного исследования и разработки электрических машин именно на основе численных расчетов магнитных полей, которые дают возможности как уточнения решений традиционно рассматриваемых задач, так и получения ранее недостижимых решений.

Именно в таком аспекте формулируется **цель данной работы** - анализ фазовых соотношений электрических и магнитных величин в синхронных машинах на основе численных расчетов магнитных полей. А так как численные расчеты требуют конкретных объектов приложения, то в данном случае для иллюстрации представляемого подхода к обусловленному анализу используется турбогенератор (ТГ) мощностью порядка 200 МВт, уже рассматривавшийся в [5]. К основным данным ТГ, используемым здесь, относятся его электромагнитная система, представленная на рис.1, а также 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; коэффициент мощности $\cos\varphi=0,85$; схема обмотки статора - «звезда»; относительное укорочение шага этой обмотки $\beta=4/5$.

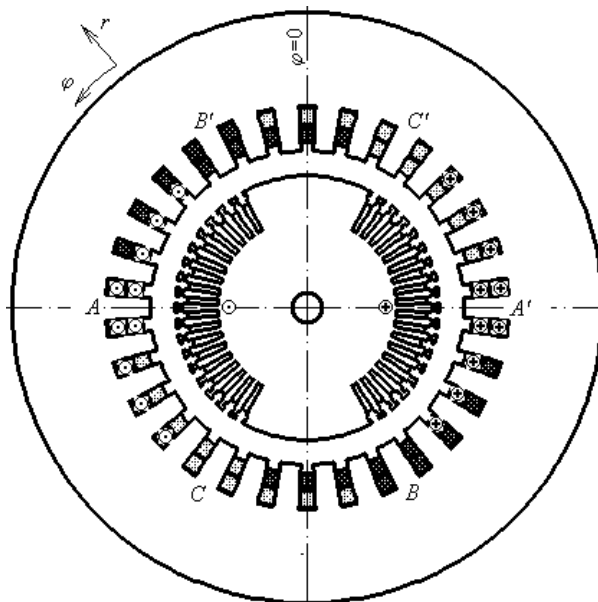


Рис.1. Расчетная модель турбогенератора: выделены фазы обмотки статора $A-A'$, $B-B'$, $C-C'$; даны принятые положительные направления тока и координат r, φ

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА

Чтобы подготовиться к анализу соотношений магнитных полей в режиме нагрузки ТГ, проведем предварительную подготовку необходимой информации, используя примерно тот же подход к ее определению на основе численных расчетов магнитных полей, который представлен в [6,7], хотя и на примере ТГ нетрадиционной конструкции.

Магнитное поле предполагалось плоскопараллельным, его расчеты проводились в поперечном сечении ТГ (рис.1), где это поле описывалось в полярных координатах (r, φ) известным 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 методом конечных разностей (МКР) [8] с использованием необходимых для практической его реализации усовершенствований [9,10]. Так как обмотка статора (рис.1) не имела осей симметрии, то для оперирования с нею во всех расчетных режимах минимальной областью расчета являлось полюсное деление, а соответствующие граничные условия для ВМП представлялись уже в [5-7]. В такой области расчета использовалась полярная сеточная модель с числом линий окружности $j_m=41$ и числом радиальных линий $i_m=139$.

Главной особенностью анализа электромагнитных взаимодействий в ТГ здесь является уход от традиционного рассмотрения магнитных полей в зазоре и условно выделяемых полей рассеяния. Анализ строится на непосредственном оперировании с магнитными потокоцеплениями (МПС) фазной обмотки статора, определяемыми по полному магнитному полю, соответствующему каждому конкретно рассматриваемому режиму возбуждения или работы ТГ.

Так как магнитное поле в ТГ получается в виде распределения ВМП, то исходное значение МПС определяется, как и в [5-7], по формуле

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

где интегрирование проводится по общей площади поперечного сечения S_A сторон секций фазной обмотки статора в пределах расчетной области. Исходное значение МПС $\Psi_{\text{ед}}$ по (2) является единичным, то есть будет приходиться на единицу аксиальной длины и один усредненный виток фазной обмотки.

В процессе проводимого анализа отсчет углов φ будем вести, как показано на рис.1. Угловое положение фазной зоны обмотки статора определяется положением ее оси, перпендикулярной усредненной плоскости конкретной фазной обмотки. Так на рис.1 фазная обмотка $A-A'$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси ротора, и значит здесь оси этой обмотки и ротора совпадают (положение $\varphi=0$).

Если после расчета магнитного поля в каком либо режиме найти МПС по формуле (2) для фазной обмотки статора, находящейся в позиции, соответствующей рис.1, то это будет только некоторое мгновенное значение МПС. Тогда как в процессе работы ТГ его ротор со своим полем и магнитное поле обмотки статора вращаются и в каком то из их положений у фазной обмотки МПС будет максимальным. Для того, чтобы найти это положение (что даст возможность определить физическую ось намагничивания ТГ в конкретном режиме), а также найти амплитуду МПС, применим следующий методический подход.

При фиксированной структуре рассчитанного магнитного поля будем располагать условно фазную обмотку статора (структуру ее секций) в разных угловых позициях относительно ротора, определяя каждый раз МПС по формуле (2). Так получится зависимость $\Psi_{\text{ед}}(\varphi)$ для фазной обмотки, которую можно разложить в гармонический ряд Фурье [11]

$$\Psi_{\text{ед}} = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \Psi_{m,k} \cos(k\varphi + \zeta_k). \quad (3)$$

Ориентируясь далее на основную - первую гармоническую составляющую этой функции, по ее начальной фазе ζ_1 можно установить непосредственно направление оси намагничивания ТГ.

При вращении ротора угловое положение фазной обмотки относительно него

$$\varphi = \omega t, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота. Поэтому координатная функция (3) преобразуется во временную функцию $\Psi_{\text{ед}}(t)$. Если рассматривается магнитное поле только обмотки ротора, то это соответствует истине. Если же в создании магнитного поля участвует и обмотка статора, то это будет основано на допущении, что в турбогенераторе вращается именно такая структура магнитного поля, которая рассчитана при фиксированных токах в обмотке статора и положении ротора.

Основываясь на изложенном, по амплитуде МПС $\Psi_{m,1}$ первой гармоники находится соответствующее действующее значение фазной ЭДС

$$E_1 = 4,44 f w_a l_a \Psi_{m,1} \quad (5)$$

для любого режима возбуждения ТГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Исходным явился расчет магнитного поля, создаваемого обмоткой ротора.

В результате серии расчетов при изменении МДС обмотки ротора F_f последовательными приближениями была найдена ее значение $F_{fX}=127$ кА (на два полюса), при котором по формуле (5) получается в режиме холостого хода (ХХ) ЭДС, равная номинальному фазному напряжению U_{ϕ} .

Картина магнитного поля в этом режиме проиллюстрирована линиями равного ВМП на рис.2,а, причем максимальное значение ВМП составило

$$A_{max} = 0,4564 \text{ Вб/м}.$$

По распределению ВМП посредством вычислений на основе формулы (2) была сформирована функция (3) и для первой гармонической составляющей получена амплитуда МПС $\Psi_{m,1} = 0,779 \text{ Вб/м}$. Амплитуды высших гармонических по отношению к $\Psi_{m,1}$ имеют порядок 10^{-4} , за исключением третьей гармоники, хотя и у неё относительное значение также невелико: 0,0066. Так что функцию (3) в режиме ХХ можно считать практически синусоидальной.

Несмотря на то, что в режиме ХХ магнитное поле симметрично относительно оси ротора, для первой гармоники МПС фазной обмотки в (3) начальная фаза $\zeta_1 = 0,9^\circ$ (в градусах), что объясняется геометрической несимметрией двухслойной укороченной обмотки статора. Следовательно, ее ось намагничивания (на рис.2,а обозначена стрелкой F_f) имеет такой же сдвиг относительно оси ротора. Аналогичный фазовый сдвиг относительно положения оси вращающегося ротора имеет и временная функция МПС.

По амплитуде МПС определяется амплитудное значение удельной взаимной магнитной проводимости обмотки ротора и фазы обмотки статора

$$\Lambda_{mfA} = \frac{\Psi_{m,1}}{F_{fX}} = 6,097 \text{ Гн/м}. \quad (6)$$

В режиме номинальной нагрузки в ТГ фазная ЭДС должна практически соответствовать номинальному напряжению. Поэтому и МПС от результирующего магнитного поля по величине аналогично тому, что было при ХХ. Следовательно, и насыщение магнитопровода в этих режимах будет примерно одинаковым, хотя и при смещении осей намагничивания.

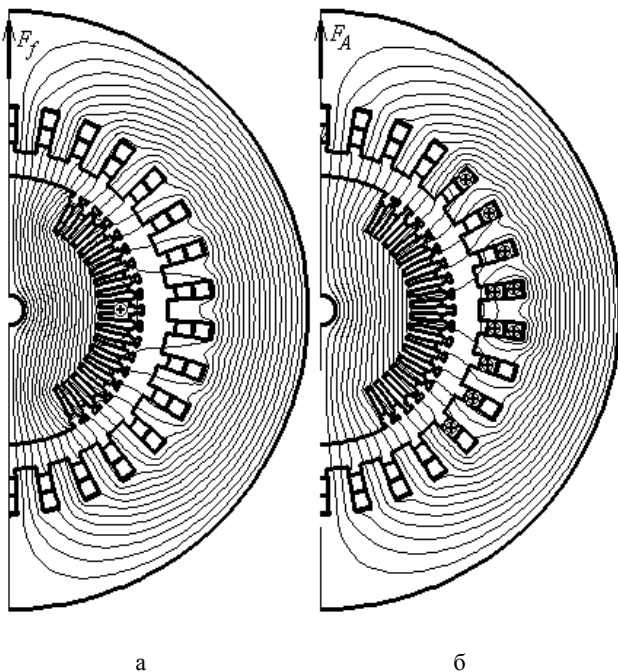


Рис.2. Магнитные поля ТГ:
а - поле обмотки ротора; б - поле фазы А-А' обмотки статора

Последнее дало основание зафиксировать в области расчета распределение УМС, как и при номинальном напряжении в режиме ХХ, и на этом фоне провести расчеты магнитных полей обмотки статора, предполагая, что они будут соответствовать тем долям результирующего магнитного поля, какую они обеспечат и в режиме номинальной нагрузки.

Сначала было рассчитано магнитное поле одной фазной обмотки статора при амплитуде ее номинального тока $I_{ma} = \sqrt{2}I_a$. Соответствующая картина магнитного поля проиллюстрирована на рис.2,б, причем в этом случае $A_{max} = 0,5525 \text{ Вб/м}$.

Теперь формула (2) дала единичное собственное МПС фазной обмотки Ψ_A , исходя из чего получена собственная удельная магнитная проводимость фазы обмотки статора

$$\Lambda_A = \frac{\Psi_A}{F_{\phi,m}} = 7,736 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \quad (7)$$

где $F_{\phi,m} = I_{ma} w_a$ - амплитуда фазной МДС.

Рассчитано было также магнитное поле сразу трех фаз обмотки статора при задании в них токов для момента времени $t=0$ по формулам

$$\begin{aligned} i_A &= I_{ma} \cos(\omega t); \quad i_B = I_{ma} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi); \\ i_C &= I_{ma} \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi), \end{aligned} \quad (8)$$

так что в фазе А-А' мгновенное значение тока задавалась равным амплитуде тока, в других фазах - ее половине. Соответствующая картина магнитного поля дана на рис.3,а и в этом случае $A_{max} = 0,7612 \text{ Вб/м}$.

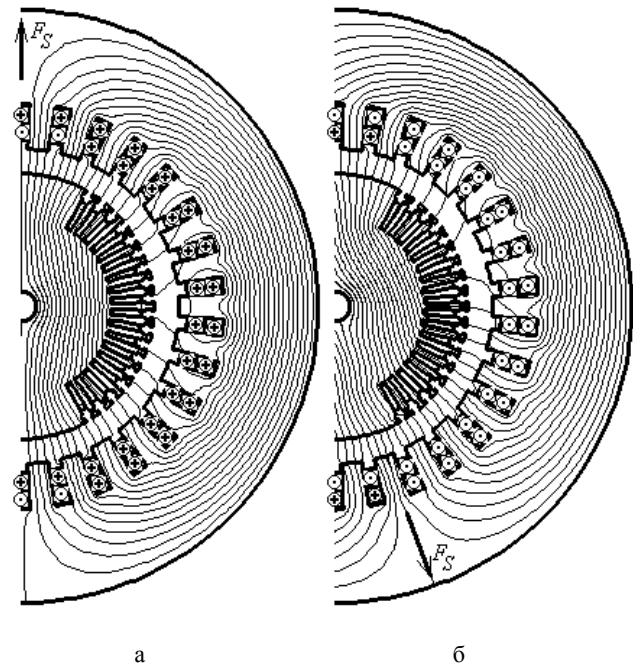


Рис.3. Магнитные поля обмотки статора ТГ в разные моменты времени: а - $t=0$; б - $t = 159,7 \frac{T}{360}$ с

Теперь по формуле (2) определяется единичное МПС, куда входят и взаимные МПС фазных обмоток. Используя, как и ранее, разложение МПС в гармони-

ческий ряд (3), нашли амплитуду основной гармоники $\Psi_{m,1}$, а затем и результирующую удельную магнитную проводимость фазы обмотки статора

$$\Lambda_S = \frac{\Psi_{m,1}}{F_{\phi,m}} = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}. \quad (9)$$

Полученное значение Λ_S отличалось от Λ_A в 1,448 раза, тогда как по теории электрических машин [1-3] при использовании полей только в воздушном зазоре должно быть 1,5.

Поэтому, учитывая, что в режиме нагрузки действуют все три фазные обмотки, далее использовали именно Λ_S и получили синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора

$$X_d = 2\pi f l_a \Lambda_S w_a^2, \quad (10)$$

которое составило 1,861 Ом.

Заметим, что для чистоты вычислительного эксперимента используем магнитные поля и параметры ТГ в прямолинейной части. При необходимости можно учесть и лобовое рассеяние, например, на основе расчетов магнитного поля в торцевой зоне ТГ [5].

Интересно, что при симметричной системе токов (8) и расположении фазных обмоток на рис.3,а, как и на рис.1, ось собственного намагничивания (помечена стрелкой F_S) трехфазной обмотки из-за упомянутой ее несимметрии оказалась смещена относительно оси ротора на угол $0,9^\circ$.

Проведенные расчеты позволяют определить действующие значения ЭДС в фазной обмотке статора от поля обмотки ротора в режиме нагрузки

$$E_{fN} = \sqrt{(U_\phi \cos \varphi)^2 + (E_S + U_\phi \sin \varphi)^2}, \quad (11)$$

где ЭДС от поля реакции якоря в фазной обмотке

$$E_S = X_d I_a; \quad (12)$$

фазовый сдвиг между фазными напряжением и током $\varphi = \arccos(0,85) = 31,8^\circ$.

ЭДС E_S можно было бы определить сразу по формуле (5), используя соответствующее значение $\Psi_{m,1}$ и не прибегая к посредству сопротивления X_d .

На основе формул, подобных (5) и (6), по величине E_{fN} получается необходимая МДС обмотки ротора в режиме нагрузки

$$F_{fN} = \frac{E_{fN}}{4,44 f w_a l_a \Lambda_{mfA}}. \quad (13)$$

Вычисления по конкретным параметрам ТГ дали значения: $E_S = 16050$ В; $E_{fN} = 22230$ В; $F_{fN} = 310$ кА.

На базе этих данных на рис.4 построена по известным правилам [2,3] векторная диаграмма ТГ, иллюстрирующая соотношения напряжения, ЭДС и МПС фазной обмотки, а также соответствующие фазовые сдвиги, которые предположительно должны иметь место в режиме номинальной нагрузки. На диаграмме обозначены МПС фазной обмотки Ψ_f и Ψ_S , которые обусловлены соответственно магнитными полями обмотки ротора и трехфазной обмотки стато-

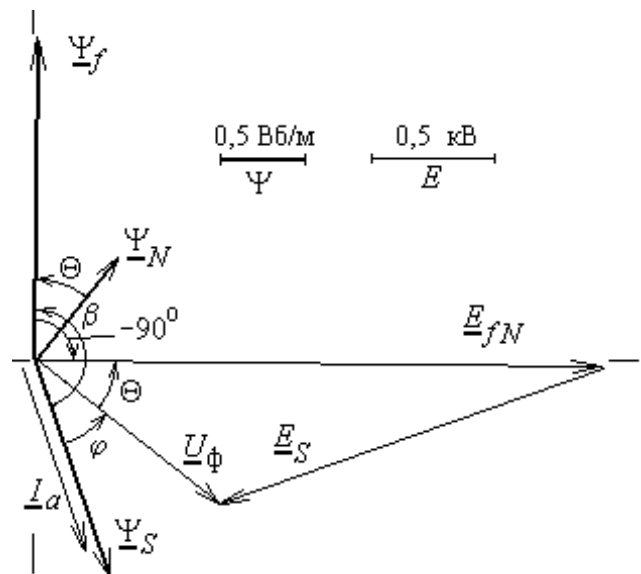


Рис.4. Векторная диаграмма МПС и ЭДС

ра, а также результирующее МПС Ψ_N . Падение напряжения на активном сопротивлении пренебрежительно мало.

Из диаграммы определяются угол нагрузки

$$\theta = \arctg \frac{E_S + U_\phi \sin \varphi}{U_\phi \cos \varphi} - \varphi = 37,9^\circ \quad (14)$$

и угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора

$$\beta = \varphi + \theta + 90 = 159,7^\circ. \quad (15)$$

Чтобы получить необходимый поворот магнитного поля обмотки статора на такой угол β , в формулах (8) было задано соответствующее время

$$t = \frac{\beta}{360} T, \quad (16)$$

где T - период изменения всех величин в ТГ.

При определенных токах в фазах обмотки статора и опять на фоне насыщения из режима XX был проведен расчет магнитного поля трехфазной обмотки статора. Картина такого поля представлена на рис.3,б и в этом случае $A_{max} = 0,7556$ Вб/м.

Уже описанным приемом с использованием МПС (2) и разложения зависимости $\Psi_{ед}(\varphi)$ в ряд вида (3) для первой гармоники определилась начальная фаза $\zeta_1 = 160,6^\circ$. Соответствующее положение оси намагничивания на рис.3,б помечено стрелкой F_S . Если учесть, что при $t=0$ положение оси намагничивания соответствовало $\zeta_1 = 0,9^\circ$ (рис.3,а), то действительно произошел необходимый поворот этой оси на заданный по (15) угол β .

С учетом неизменного состояния магнитопровода ТГ было проведено наложение магнитных полей

$$A_{zN} = A_{zX} \frac{F_{fN}}{F_{fX}} + A_{zS}, \quad (17)$$

где A_{zX} , A_{zS} - распределения ВМП в режиме XX и от повернутого на угол β поля обмотки статора. Полу-

ченна картина магнитного поля представлена на рис.5 и в этом случае $A_{max} = 0,5565$ Вб/м.

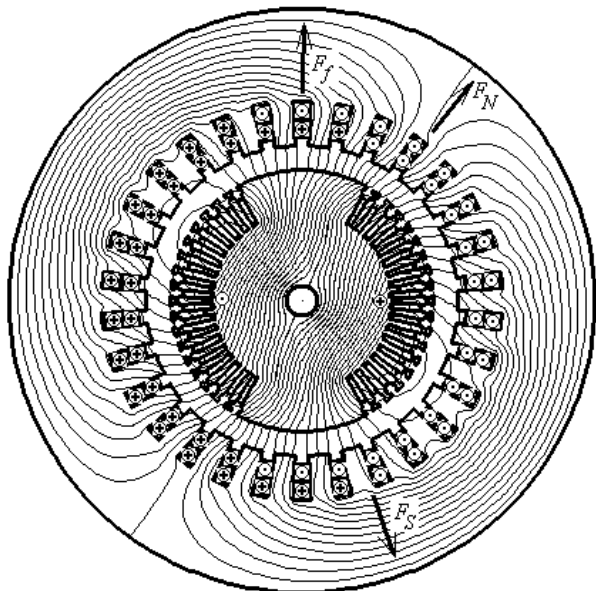


Рис.5. Картина магнитного поля, полученная суммированием полей обмоток ротора и статора

По результирующему распределению ВМП A_{zN} была найдена угловая зависимость МПС $\Psi_{ед}(\varphi)$ и найдено посредством разложения (3) положение оси намагничивания результирующего магнитного поля, обозначенной на рис.5 стрелкой F_N , здесь же показаны направления осей намагничивания F_f и F_S от составляющих магнитных полей.

Рассчитанное по распределению магнитных полей смещение осей намагничивания соответствует исходным фазовым сдвигам величин на векторной диаграмме (рис.4). По амплитуде первой гармоники МПС фазной обмотки от результирующего поля определена соответственно ее результирующая ЭДС. Действующее значение этой ЭДС практически совпадало с тем значением, которое было определено и в режиме ХХ.

Полученные результаты засвидетельствовали правильность построений расчетов и соответствие фазовых соотношений электромагнитных величин, рассчитанных по векторной диаграмме и определенных по магнитным полям. И все это дало основание для непосредственного расчета магнитного поля в режиме нагрузки при найденной ранее МДС обмотки ротора F_{fN} , номинальном токе обмотки статора, при задании по (8) мгновенных значений фазных токов с определенным по (16) значением времени t , а также с нахождением в процессе расчета поля насыщения магнитопровода, соответствующего режиму нагрузки.

Как и в предыдущих случаях, было определено положение оси намагничивания в условиях результирующего поля, а также действующее значение результирующей фазной ЭДС, которое составило 8450 В.

Изменения фазной ЭДС, по сравнению с вариантом наложения полей, произошло из-за изменения насыщения магнитопровода. Заметно изменились, по

сравнению с рис.4 и рис.5, и фазовые соотношения электромагнитных величин. Поэтому, чтобы обеспечить в режиме номинальной нагрузки соответствующее значение номинального напряжения, была найдена расчетами по методу последовательных приближений необходимая величина МДС обмотки ротора F_{fN} , которая составила 330 кА.

Рассчитанная картина магнитного поля в режиме номинальной нагрузки представлена на рис.6. Для этого поля получилось $A_{max} = 0,5575$ Вб/м.

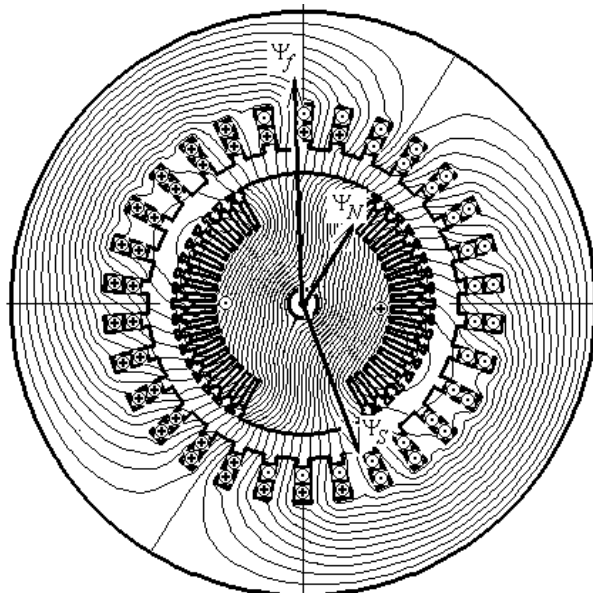


Рис.6. Картина поля ТГ в режиме нагрузки

Проведенные расчеты МПС подтвердили получение необходимой результирующей фазной ЭДС, а также дали расположение результирующего угла намагничивания $\zeta_{1,N} = 32,2^\circ$. А чтобы проявить роль обмоток ротора и статора, были рассчитаны раздельно магнитные поля этих обмоток при определенном в режиме нагрузки насыщении магнитопровода ТГ (распределении УМС).

Так было установлено, что в сложившихся условиях ось намагничивания (применительно к проводниковой структуре фазной обмотки) полем ротора расположилась под углом $\zeta_{1,f} = -2^\circ$, ЭДС от этого поля составила $E_{fN} = 22270$ В. Аналогичные величины от поля обмотки статора составили $\zeta_{1,S} = 158,9^\circ$, ЭДС $E_S = 15620$ В. Векторы МПС названных расчетных режимов представлены также на рис.6, а на рис.7 - соответствующие картины магнитных полей (для поля обмотки ротора $A_{max} = 1,1065$ Вб/м, обмотки статора - $A_{max} = 0,7329$ Вб/м).

Используя обозначения величин и их фазовые соотношения по рис.4, определим угол нагрузки ТГ, как фазовый сдвиг между осями намагничивания фазной обмотки, соответствующими МПС Ψ_N и Ψ_f .

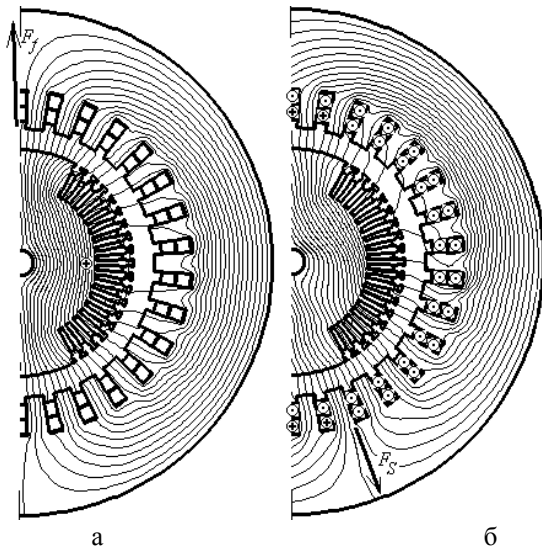


Рис. 7. Картины магнитных полей обмотки ротора - а и обмотки статора - б, рассчитанные на фоне насыщения магнитопровода из режима нагрузки. Тогда этот угол

$$\Theta = \zeta_{1,N} - \zeta_{1,f} = 34,2^\circ, \quad (18)$$

в то время как ранее, при расчетах магнитных полей на фоне состояния магнитопровода из режима ХХ, было $\Theta = 37,9^\circ$. Учитывая что в выражениях энергетических параметров ТГ используется $\sin \Theta$ [2,3], по этой составляющей расчетное изменение составляет 8,5%.

Фазовый сдвиг между осями намагничивания, соответствующими МПС Ψ_S и Ψ_f (рис.4 и рис.6),

$$\beta = \zeta_{1,S} - \zeta_{1,f} = 160,9^\circ, \quad (19)$$

Исходя из (15), на долю фазового сдвига ϕ между фазными напряжением и током обмотки статора остается $36,7^\circ$ вместо исходных $31,8^\circ$. По параметру $\cos \phi$, определяющему энергетические данные ТГ, изменение между вариантами расчетов с условным (по режиму ХХ) и реалистичным (по режиму нагрузки) насыщением магнитопровода составило 5,9%.

Очевидно, чтобы удовлетворить исходным данным ТГ (U_ϕ , I_a , $\cos \phi$) в режиме нагрузки, можно в принципе подобрать соответствующие значения МДС обмотки ротора F_{fN} и времени t для задания мгновенных значений токов (8) в обмотке статора. Однако это выходит за рамки данной статьи. Ясно только, что на основе классических методов расчета электрических машин сразу выбрать эти значения и обеспечить необходимые фазовые соотношения всех электромагнитных величин без существенной погрешности не удастся.

ВЫВОДЫ

1. Угловые положения осей намагничивания ТГ в различных режимах можно определить посредством использования магнитных потокоцеплений фазной обмотки статора, осуществляя поиск взаимного положения ротора и условно перемещаемой фазной зоны обмотки статора, при котором первая гармоническая составляющая этого потокоцепления максимальна. Найденное так

положение осей намагничивания наиболее близко к расположению разделительной силовой линии магнитного поля в обмоточном слое статора.

2. Если во всех расчетных режимах (возбуждение обмоткой ротора, возбуждение обмоткой статора, а также их совместным действием) принять неизменным магнитное состояние магнитопровода, то получаемые фазовые соотношения электромагнитных величин практически совпадают с определенными на базе классических методик расчета. При реальном насыщении магнитопровода в режиме нагрузки фазовые соотношения претерпевают изменения, которые для энергетических параметров турбогенератора приводят к погрешностям порядка (6..9)%.

3. Очевидна целесообразность дальнейшего совершенствования методов проектирования электрических машин на основе использования численных расчетов магнитных полей. Задача, которую при этом следует решить, заключается в необходимости разработки методик, позволяющих результаты численных расчетов магнитных полей эффективно трансформировать в конкретные параметры разрабатываемых электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рихтер Р. Электрические машины. Т.2. Синхронные машины и одноякорные преобразователи. Л.-М.: ОНТИ, 1936.-688 с.
- [2] Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
- [3] Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2- Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973.-648 с.
- [4] Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей.- М.: Высш.школа, 1986.-240 с.
- [5] Милых В.И., Дубинина О.Н. Численный расчет магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Электротехника і електромеханіка.-2003.-№1.-С.64-69.
- [6] Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета полностью сверхпроводникового криотурбогенератора на основе решения полевых задач // Электротехника і електромеханіка.-2002.-№1.-С.43-48.
- [7] Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ магнитного поля и электродвижущих сил в полностью сверхпроводниковом криотурбогенераторе (и объективный взгляд на реакцию якоря) // Электротехника і електромеханіка.-2002.-№2.-С.47-52.
- [8] 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, `7, p.1546-1564.
- [9] Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.-1982.-№12.-С.46-49.
- [10] Милых В.И. Принцип компенсации геометрических искажений при конечно-разностных полевых расчетах // Техническая электродинамика.-1989.-№6.-С.20-26.
- [11] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.- 832 с.

Поступила 29.08.2003