

СИСТЕМА НАПРАВЛЕНИЙ И ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

Подана система напрямів струмів в обмотках турбогенератора, яка дозволяє отримувати на основі чисельних розрахунків магнітних полів узгоджені фазові – часові і просторові співвідношення сукупності електромагнітних величин, що характеризують його роботу.

Представлена система направлений токов в обмотках турбогенератора, которая позволяет получать на основе численных расчетов магнитных полей согласованные фазовые – временные и пространственные соотношения совокупности электромагнитных величин, характеризующих его работу.

Введение. Главные процессы в электрических машинах осуществляются через магнитное поле, поэтому непосредственное использование его расчетов – наиболее перспективный путь развития системы изучения и проектирования этих машин. Уже длительное время при расчетах магнитных полей приоритет получили численные методы, такие как метод конечных разностей (МКР) [1] и метод конечных элементов (МКЭ) [2], обеспечивающие достаточно точное отображение конструкции электрических машин и насыщение их магнитопровода. Особенно распространение получил МКЭ – благодаря наличию пакетов прикладных программ, которые позволяют моделировать магнитные поля и в двухмерной, и в трехмерной постановке, хотя в большинстве случаев для получения практически приемлемых результатов достаточно первой из них как значительно менее трудоемкой. Указанные программы избавляют расчетчиков от построения теоретических полевых моделей и программирования, а формирование графических моделей и комплекта исходных данных сведено на весьма простой и общедоступный уровень.

Цель работы. Основной задачей расчетчиков остается формирование теоретической модели конкретно рассматриваемой электрической машины и адекватное ей извлечение и использование информации после расчета магнитного поля. Именно в этом аспекте построена данная работа, причем конкретным объектом здесь является турбогенератор (ТГ) – сложный и ответственный представитель семейства электрических машин, а ее целью является формирование взаимосвязанной системы направлений углового отсчета, токов в обмотках и фазовых соотношений электрических и магнитных величин.

Объект исследования. Для иллюстрации общего подхода к решению задачи используется модель электромагнитной системы ТГ, изображенная на рис. 1 в поперечном сечении в полярной системе координат (r, α) . Здесь показаны фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, которые выделены различной штриховкой проводников в пазах статора. ТГ имеет номинальные параметры: мощность $P_{aN} = 200$ МВт; фазное напряжение $U_{sN} = 9093$ В и ток $I_{sN} = 8625$ А; коэффициент мощности $\cos\varphi_{sN} = 0,85$; частота $f = 50$ Гц. Из параметров конструкции: числа фаз $m_s=3$ и пар полюсов $p = 1$; активная длина $l_a = 5,286$ м; немагнитный зазор $\delta = 0,1$ м; диаметр ротора $d_r = 1,075$ м; относительное укорочение обмотки статора – 4/5; числа витков фазной обмотки статора $N_s = 10$, обмотки ротора $N_f = 180$.

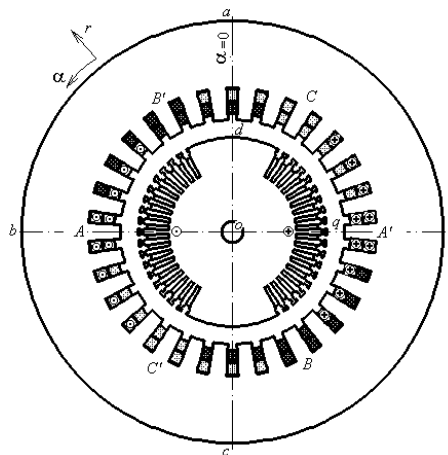


Рис. 1. Электромагнитная система турбогенератора

Принцип расчета магнитного поля. Стационарное магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается дифференциальным уравнением:

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; μ – абсолютная магнитная проницаемость (АМП); \vec{k} – орт.

В общем случае область расчета магнитного поля охватывает все поперечное сечение ТГ (рис.1). На внешних границах сердечника статора, либо, при желании, за его пределами на ограничивающей магнитное поле линии действует условие Дирихле:

$$(A_z)_{abcca} = 0. \quad (2)$$

Ограничение области возможно еще ввиду периодичности магнитного поля [3]. В наиболее общем режиме нагрузки поле можно рассчитать на полюсном делении (рис. 1) при граничных условиях на линиях, отстоящих друг от друга на полупериод поля:

$$(A_z)_{ao} = -(A_z)_{co}. \quad (3)$$

В данной работе будем считать, что магнитное поле в поперечном сечении успешно рассчитано как функция $A_z(r, \alpha)$ либо МКР [1] по собственной программе, либо МКЭ по общедоступной программе ФЕММ [2]. В обоих случаях результатом расчета является дискретное распределение ВМП в узлах сеточной или конечно-элементной структуры.

Общую картину распределения магнитного поля в области расчета будем представлять структурой силовых линий – линий равного ВМП $A_z = \text{const}$ при

его нормировке максимальным для конкретно представляемого режима абсолютным значением A_{max} .

Одной из ключевых величин при анализе электромагнитных параметров ТГ является магнитное потокоосцепление (МПС) [3]. По полученному распределению ВМП эта величина находится достаточно просто. Так, например, для любой из шести фазных зон (рис. 1), в которой находятся только по одной стороне каждого из N_s витков фазной обмотки статора, МПС определяется на основании формулы

$$\Psi = \frac{N_s I_a}{S_\phi} \int A_z dS \approx \frac{N_s I_a}{S_\phi} \sum_{j=1}^{K_\phi} A_{z,av,j} \Delta S_j, \quad (4)$$

сочетающей в себе исходное выражение и его численную аппроксимацию, где S_ϕ – площадь сечения по токнесущим элементам фазной зоны; K_ϕ – число элементов ее дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе.

Система условных положительных направлений. При симметричной нагрузке ТГ его фазные токи образуют симметричную трехфазную систему:

$$i_A = I_m \cos(\omega t + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta);$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (5)$$

где $I_m = \sqrt{2} I_s$ – амплитудное и I_s – действующее значения фазного тока; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; t – время; β – начальная фаза.

Система пространственной ориентации тока ротора I_f и фазных токов статора и отсчета координат α и r в ТГ представлена на рис. 2.

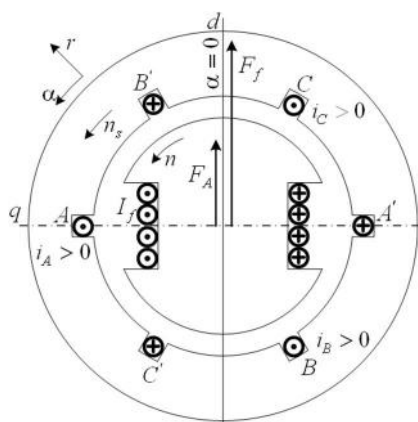


Рис. 2. Условные положительные направления токов, МДС, координат и направлений вращения

Фазные токи в обмотках направлены именно так в случае, если их значения положительны, соответственно для фазной обмотки $A-A'$ показано направление ее МДС F_A : обмотка расположена в плоскости, совпадающей с поперечной осью q , тогда ее МДС направлена перпендикулярно этой плоскости по оси d , также как и МДС обмотки ротора F_f . Чередование фазных обмоток статора принято таким, чтобы вращение магнитного поля обмотки статора и, соответственно, вращение ротора были направлены в положительном направлении отсчета угловой координаты α (n_s и n – частоты вращения поля и ротора).

На рис. 3 показана ситуация, приближенная к реалистичному (далее просчитанному) режиму номинальной нагрузки, которому соответствует $\beta = -156,86^\circ$

и фазные токи $i_A = -0,9219I_m$; $i_B = 0,1255I_m$; $i_C = 0,7964I_m$, ток возбуждения $I_f = 1832$ А, которым соответствуют изображенные масштабированные значения МДС. Здесь же дана суммарная МДС всей обмотки статора

$$\underline{F}_s = \underline{F}_A + \underline{F}_B + \underline{F}_C, \quad (6)$$

а также результирующая МДС для магнитного поля ТГ в режиме нагрузки

$$\underline{F}_l = \underline{F}_f + \underline{F}_s. \quad (7)$$

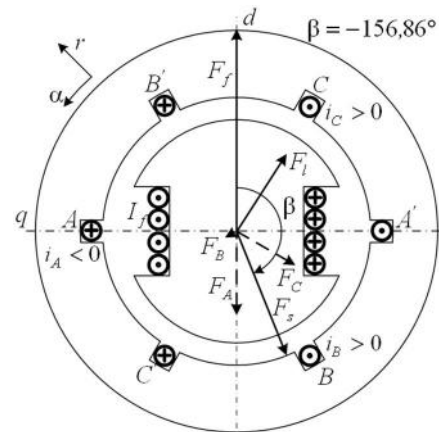


Рис. 3. Направления токов в обмотках и их МДС при номинальной нагрузке турбогенератора

От пространственного согласования векторов (рис. 3) можно перейти к временным соотношениям – фазовым сдвигам соответствующих величин, что иллюстрирует векторная диаграмма, представленная на рис. 4. В данном случае это упрощенный вариант, в котором пренебрегается активным сопротивлением обмотки статора и индуктивным сопротивлением ее лобового рассеяния. Практически диаграмма учитывает электромагнитные величины, соответствующие магнитному полю на активной длине ТГ.

Основой диаграммы являются МПС фазной обмотки статора Ψ_f, Ψ_a, Ψ_l , которые обусловлены, соответственно, магнитными полями обмотки ротора и трехфазной обмотки статора, а также результирующее МПС. Эти МПС ориентированы так же, как и соответствующие МДС на рис. 3 – благодаря выбранной системе направлений токов, углов и фазовых соотношений. Кроме того, на диаграмме обозначены векторы: I_s – фазный ток располагается в соответствии с упомянутой начальной фазой β относительно начала отсчета – оси d , причем Ψ_a совпадает по фазе с I_s ; фазное напряжение U_s сдвинуто относительно I_s на угол φ_s , заданный характером нагрузки ТГ; E_a – ЭДС реакции якоря, вызванная МПС Ψ_a ; E_{fl} – ЭДС в режиме нагрузки, вызванная МПС Ψ_f от обмотки возбуждения, причем эти ЭДС, согласно теории, отстают по фазе от своих МПС на 90° . Ввиду принятого упрощения результирующая ЭДС E_l от МПС Ψ_l непосредственно обеспечивает фазное напряжение U_s . Еще на рис. 4 обозначен ряд фазовых сдвигов между векторами названных величин, причем их направлению против движения часовой стрелки соответствуют положительные значения, по движению – отрицательные.

Определение фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей. Теперь можно приступить к основной части задачи – пред-

ставление принципов анализа фазовых соотношений электрических и магнитных величин в ТГ на основе численных расчетов магнитных полей.

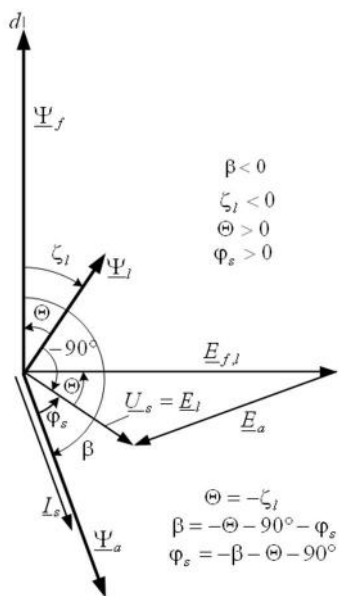


Рис. 4. Векторная диаграмма при номинальной нагрузке ТГ, соответствующая рис.3 при симметричной обмотке статора

Для численного расчета магнитного поля надо задать необходимые ток в обмотке возбуждения и фазные токи (5). Возьмем их соответствующими номинальной нагрузке ТГ – они уже упоминались в связи с рис. 3. Вопрос определения токов для обеспечения конкретного расчетного режима ТГ с заданными значениями U_s , I_s и φ_s , обсуждался подробно в [4].

Расчет магнитного поля дал его картину, которая представлена на рис.5. Главное направление намагничивания ТГ здесь помечено ориентацией вектора МПС Ψ_l , и оно в целом соответствует рис. 4 и ориентации результирующей МДС F_l на рис. 3. Однако умозрительно верное направление МПС Ψ_l , которое по картине поля может быть определено лишь качественно, должно теперь представиться в конкретном числовом выражении, что возможно на основе предложенного в [5] подхода. Более совершенное и детальное развитие этого подхода раскрываем далее именно здесь.

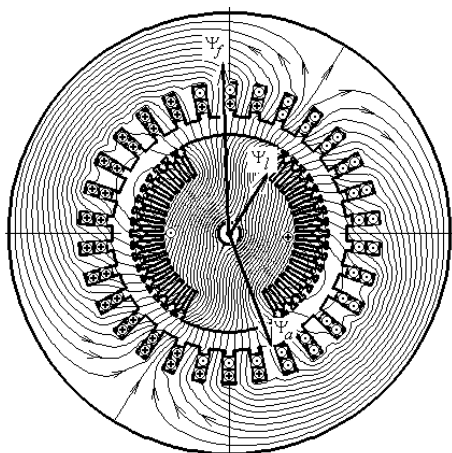


Рис. 5. Направления токов в обмотках и их МПС при номинальной нагрузке ТГ при реальной укороченной двухслойной обмотке статора ($A_{max} = 0,5758$ Вб/м)

Основой выявления фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ является разложение угловой функции МПС $\Psi(\alpha)$ в ряд Фурье. С этой целью после расчета магнитного поля его структура (рис. 5) фиксируется, а, значит, является фиксированным распределение ВМП. Тогда остается "собрать" МПС фазной обмотки $A-A'$ по формуле (4) в ее разных позициях, отличающихся угловым положением. Покажем процесс подготовки и разложения угловой функции МПС в гармонический ряд по результатам расчета магнитного поля в режиме нагрузки, картина которого была проиллюстрирована на рис. 5 и повторяется на рис. 6.

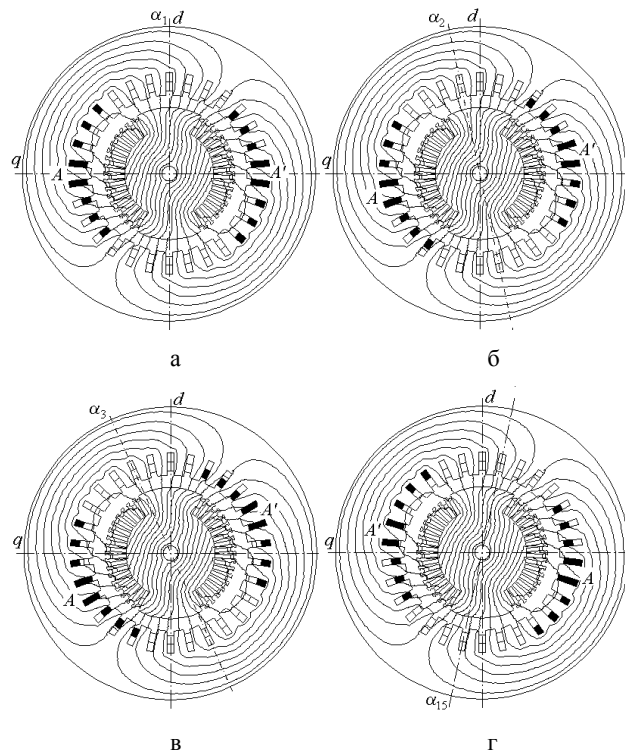


Рис. 6. Перемещение фазной зоны обмотки статора для сбора значений МПС

Вычисления МПС Ψ проводятся как минимум в 15 позициях фазных зон обмотки, часть из которых представлена на рис. 6. Исходная позиция фазной обмотки $A-A'$, имеющая угловое положение $\alpha_1 = 0$, дана на рис. 6,а, которое соответствует ее положению в процессе расчета магнитного поля (рис. 5) и принятому расположению фазных обмоток на рис. 1.

Следующие позиции отличаются поворотами фазных зон на зубцовое деление статора, что при его числе зубцов Q_s соответствует угловому смещению

$$\Delta\alpha = 2\pi/Q_s . \quad (8)$$

На рис. 6,б, в даны еще две очередные позиции – 2-ая, 3-ья, а на рис. 6,г – последняя 15-ая. Эти 15 позиций в рассматриваемом ТГ отстоят друг от друга на $\Delta\alpha = 12^\circ$ в диапазоне α от 0 до 168° . Следующая 16-я позиция при $\alpha_{16} = 180^\circ$ была бы избыточной, так как повторяет позицию 1 с обратным знаком, ведь по условию периодичности магнитного поля (3) должно быть $\Psi_{16} = -\Psi_1$ ввиду

$$\Psi(\alpha + \tau_p) = -\Psi(\alpha) , \quad (9)$$

где τ_p – полюсное деление.

В каждой позиции по формуле (4) производится определение МПС в фазных зонах A и A' , соответст-

венно Ψ_A и $\Psi_{A'}$. Результирующее значение МПС фазной обмотки

$$\Psi_S = \Psi_A - \Psi_{A'}, \quad (10)$$

где знаки перед Ψ_A и $\Psi_{A'}$ предопределены изначальным выбором положительного направления тока в фазной обмотке А-А' на рис. 2.

Таким способом получается в численной форме угловая функция МПС на ее половине периода

$$\Psi_k(\alpha_k); \quad \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; \quad k = 1, 2, 3, \dots, K, \quad (11)$$

где k – номера угловых позиций фазной зоны обмотки статора; K – число интервалов $\Delta\alpha$ на полупериоде, то есть в пределах полусного деления τ_p в случае рассматриваемой конструкции ТГ $K = 15$.

Числовой ряд МПС (11) проиллюстрирован на рис. 7 совокупностью выделенных точек в диапазоне α от 0 до 168° (l – режим нагрузки).

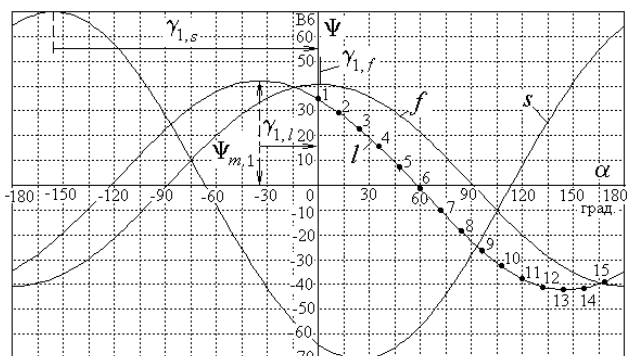


Рис. 7. Угловые зависимости МПС фазной обмотки ТГ

Полученную численную угловую функцию (11) можно разложить в гармонический ряд [6]. В условиях ТГ угловая функция МПС является симметричной периодической, поэтому постоянная составляющая отсутствует, а также отсутствуют четные гармоники, а, кроме того, при разложении численной функции максимальный номер гармоники g должен быть меньше числа K . Поэтому в общем виде искомый гармонический ряд будет иметь вид

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^g (s_v \sin v\alpha + c_v \cos v\alpha). \quad (12)$$

С учетом полученной численной функции (11) коэффициенты синусного и косинусного рядов для гармонической составляющей с текущим номером v :

$$s_v = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \Psi(\alpha) \sin v\alpha \, d\alpha \approx \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_k \sin v\alpha_k; \quad (13)$$

$$c_v = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \Psi(\alpha) \cos v\alpha \, d\alpha \approx \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_k \cos v\alpha_k, \quad (14)$$

а практически вычисление их значений проводится по вторым частям формул.

Однако вместо (12) оперировать удобнее с единым либо косинусным, либо синусным рядом. В нашем случае больше подходит первый, учитывая уже принятую функцию для токов (5), что позволит выявлять фазовые соотношения токов и МПС.

Косинусный ряд МПС имеет вид

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^g \Psi_{m,v} \cos(v\alpha + \gamma_v), \quad (15)$$

где через (13) и (14) определяются амплитуды и аргументы (начальные фазы) косинусных гармоник [6]

$$\Psi_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \gamma_v = -\arctg \frac{s_v}{c_v}. \quad (16)$$

Надо иметь в виду, что, в зависимости от соотношения знаков значений c_v и s_v , при вычислении \arctg в (16) могут получаться различные результаты, т.е. если оба значения положительны или оба отрицательны, то результат s_v/c_v одинаков, а $\arctg(s_v/c_v)$ – нет. А при разных знаках c_v и s_v значение s_v/c_v сохраняется независимо от того, какой именно коэффициент из c_v и s_v положительный, а какой – отрицательный, но значение $\arctg(s_v/c_v)$ от этого зависит.

В итоге в соответствии с формулами (13), (14) и (16) получен косинусный ряд (15) с максимальным номером нечетной гармоники $g=13$. Этот ряд проиллюстрирован в табл.1, где $\Psi_{m,1}$ и γ_1 – амплитуда и начальная фаза первой гармоники, $\Psi_v^* = \Psi_{m,v} / \Psi_{m,1}$ – относительные значения амплитуд высших гармоник (режим номинальной нагрузки – НН).

Таблица 1. Гармонический состав угловой функции МПС

Ре- жим	$\Psi_{m,1}$ Вб	γ_1 градус	Ψ_3^*	Ψ_5^*	Ψ_7^*	Ψ_9^*	Ψ_{11}^*	Ψ_{13}^*
XX	40,96	-0,90	0,0065	0,0001	0,0002	0,0003	0,0000	0,0000
ОС	70,15	156,34	0,0038	0,0005	0,0011	0,0002	0,0011	0,0005
НН	41,89	33,20	0,0134	0,0007	0,0011	0,0004	0,0019	0,0008

На основании гармонического разложения (15) на рис. 7 построена в виде непрерывной линии угловая функция МПС в диапазоне от -180° до 180° (полный период для кривой l). Очевидна правильность гармонического разложения, так как расчетные точки МПС точно вписались в построенный график угловой функции МПС. Заметим, что график первой гармоники фактически слился с основным графиком представленной полной функции. По данным табл. 1 видно, что высшие гармоники весьма малы и несущественно искажают общую функцию МПС (15).

На рис. 7 отмечены амплитуда $\Psi_{m,1}$ и начальная фаза $\gamma_{1,l}$ первой гармоники МПС в режиме нагрузки, где направление $\gamma_{1,l}$ соответствует полученному его положительному значению $33,20^\circ$ (табл. 1).

В итоге получен важный результат: на рис. 7 видно, что положительная амплитуда функции $\Psi(\alpha)$ сдвинута относительно начала отсчета $\alpha = 0$ на угол $\zeta_{1,l} = -\gamma_{1,l}$, т.е. в отрицательном направлении отсчета. Аналогично на рис. 5, с учетом принятых на рис. 2 направлений отсчета, сориентирована структура магнитного поля. Но теперь качественная ориентация поля подтверждена количественно точным пространственным направлением вектора МПС $\underline{\Psi}_l$ в режиме нагрузки. Этому же соответствует направление вектора $\underline{\Psi}_l$ на векторной диаграмме под углом $\zeta_{1,l} = -33,20^\circ$ (рис. 4).

Расчеты магнитного поля и гармоническое разложение угловой функции МПС проведены также в режиме холостого хода (XX), когда действует только обмотка ротора, и специальном режиме, когда действует трехфазная обмотка статора (ОС), но насыщение магнитопровода (распределение АМП μ) взято после расчета поля в режиме XX и остается фиксированным. Для режима XX был принят такой ток возбуждения, при котором получалась фазная ЭДС, равная номинальному напряжению. При расчете поля обмот-

ки статора для (5) было взято то же значение β , что и для режима номинальной нагрузки, а также номинальный фазный ток. Картины магнитных полей представлены на рис. 8 и рис. 9.

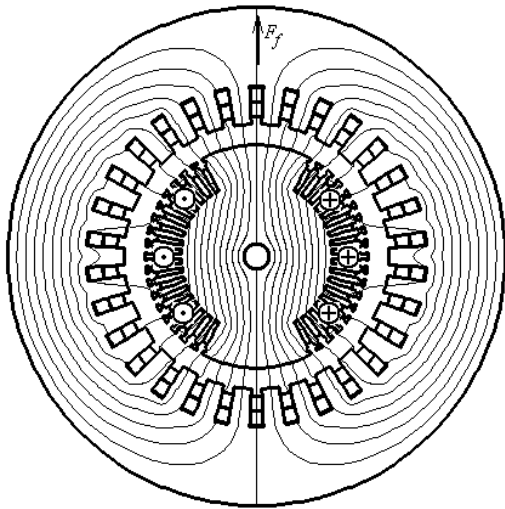


Рис. 8. Магнитное поле ТГ в режиме XX ($A_{max} = 0,4558$ Вб/м)

На рис. 7 теперь показаны еще угловые функции МПС и для режимов XX (f) и по полю обмотки статора – ОС (s). Они получены по тем же правилам, как это было для режима нагрузки. В табл. 1 представлены параметры гармонического разложения угловой функции МПС. На рис. 7 обозначены начальные фазы первой гармоники МПС, которые соответствуют данным табл. 1. Положение положительных амплитуд функций соответствуют углам $\zeta_{1,f} = -\gamma_{1,f}$, $\zeta_{1,s} = -\gamma_{1,s}$, под которыми и сориентированы структуры магнитных полей на рис. 8 и рис. 9 в соответствии с принятой системой их отсчета на рис. 2. Заметим, что, несмотря на то, что в режиме XX магнитное поле симметрично относительно оси ротора, для первой гармоники МПС фазной обмотки в (15) имеет место начальная фаза $\gamma_{1,f} = (-0,9^\circ)$, что объясняется геометрической несимметрией двухслойной укороченной обмотки статора. Следовательно, ее ось намагничивания (на рис. 8 обозначена стрелкой F_f) имеет такой же сдвиг относительно оси ротора на угол $\zeta_{1,l} = 0,90^\circ$.

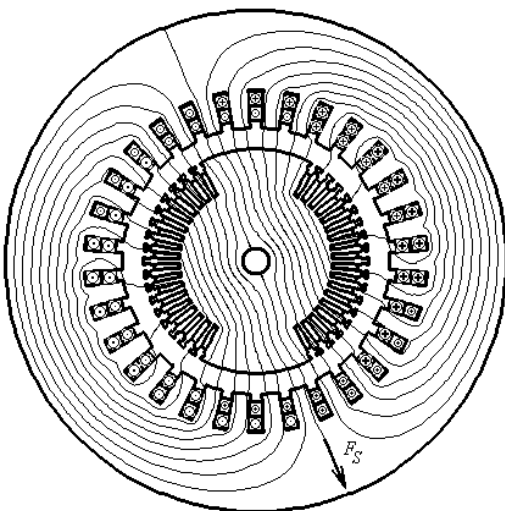


Рис. 9. Магнитное поле обмотки статора при $\beta = -156,86^\circ$ ($A_{max} = 0,7287$ Вб/м)

Уточненная векторная диаграмма в режиме нагрузки. От пространственного представления векторов МПС можно перейти к их временной трактовке с учетом того, что при вращении магнитного поля

$$\alpha = \omega \cdot t. \quad (17)$$

В итоге вместо угловой функции МПС (15) получается временная функция

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^g \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v), \quad (18)$$

где временные начальные фазы ζ_v заняли место угловых начальных фаз γ_v , причем, как было обосновано на рис. 7, $\zeta_v = -\gamma_v$ – при их измерении в одной мере. Если ζ_v измеряются в электрических радианах (или градусах), а γ_v в обычной угловой мере, то $\zeta_v = -p\gamma_v$. Так на рис. 7 от косинусоиды s отстают косинусоиды l и f , а на рис. 5 наоборот, вектор Ψ_a , соответствующий косинусоиде s , становится отстающим от векторов Ψ_f и Ψ_l , соответствующих косинусоидам l и f .

Теперь на основании закона электромагнитной индукции можно через (18) определить гармонический ряд фазной ЭДС

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^g v\omega \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v - \pi/2) \quad (19)$$

и непосредственно действующее значение первой гармоники фазной ЭДС

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Psi_{m,1} \approx 4,44 f \Psi_{m,1}. \quad (20)$$

Для режимов f , s и l , рассмотренных рис. 7, значения этой ЭДС составили 9094, 15574 и 9299 В.

После определения фазовых соотношений величин на основе численных полевых расчетов можно построить уточненную векторную диаграмму, дополнительным развитием которой станет учет падения напряжения $\underline{U}_R = R_s \underline{I}_s$ на активном сопротивлении R_s и ЭДС $\underline{E}_v = -jX_v \underline{I}_s$ от потока лобового рассеяния фазной обмотки, где X_v – соответствующее индуктивное сопротивление.

Полнофакторная векторная диаграмма представлена на рис. 10, где наряду с ее общим изображением даны и ее увеличенные фрагменты. Отсчет начальных фаз ведется от вертикальной оси, соответствующей продольной оси ротора d , положительное направление отсчета всех углов – против движения часовой стрелки. Под углом β построен вектор фазного тока \underline{I}_s , под углом $\zeta_{1,l}$ – вектор МПС Ψ_l , определенного через расчет магнитного поля на активной длине ТГ. Вектор фазной ЭДС E_l , порожденной МПС Ψ_l , отстает от него на 90° . Вектор ЭДС E_v от потока лобового рассеяния перпендикулярен вектору тока \underline{I}_s в сторону отставания, а вектор соответствующего МПС Ψ_v параллелен вектору тока. Полное МПС фазной обмотки – это сумма $\underline{\Psi}_s = \underline{\Psi}_l + \underline{\Psi}_v$, ему соответствует полная фазная ЭДС $\underline{E}_s = \underline{E}_l + \underline{E}_v$. Активное падение напряжения \underline{U}_R параллельно вектору \underline{I}_s . В итоге фазное напряжение

$$\underline{U}_s = \underline{E}_s - \underline{U}_R = \underline{E}_l + \underline{E}_v - \underline{U}_R. \quad (21)$$

Конечно, известно, что в ТГ величина U_R пренебрежимо мала по сравнению с E_l и другими ЭДС и напряжением U_s , но здесь фигурирует для демонстрации полнофакторного подхода.

