

УДК 621.313

В.И. Милых, д-р техн. наук, профессор, Н.В. Полякова, ассистент
НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

ОСНОВЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

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.

Ключевые слова: турбогенератор, магнитное поле, численные расчеты, электромагнитные величины, фазовые соотношения.

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. При расчетах магнитных полей приоритет получили численные методы, обеспечивающие достаточно точное отображение конструкции электрических машин и насыщение их магнитопровода. Особенно распространился метод конечных элементов (МКЭ) [1] – благодаря наличию пакетов прикладных программ, которые при расчетах магнитных полей 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 основ построения взаимосвязанной системы направлений углового отсчета, токов в обмотках и фазовых соотношений

электрических и магнитных величин.

Объект исследования. Для иллюстраций используется модель электромагнитной системы ТГ, представленная на рис. 1 поперечным сечением в полярной системе координат (r, α) , где показаны фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$. Номинальные данные ТГ: мощность $P_{aN}=200$ МВт; фазные напряжение $U_{sN}=9093$ В и ток $I_{sN}=8625$ А; коэффициент мощности $\cos \varphi_{sN}=0,85$; частота $f=50$ Гц. Числа фаз $m_s=3$ и пар полюсов $p=1$; активная длина $l_a=5,286$ м; немагнитный зазор $\delta=0,1$ м; относительное укорочение обмотки статора – 4/5; числа витков фазной обмотки статора $N_s=10$, обмотки ротора $N_f=180$.

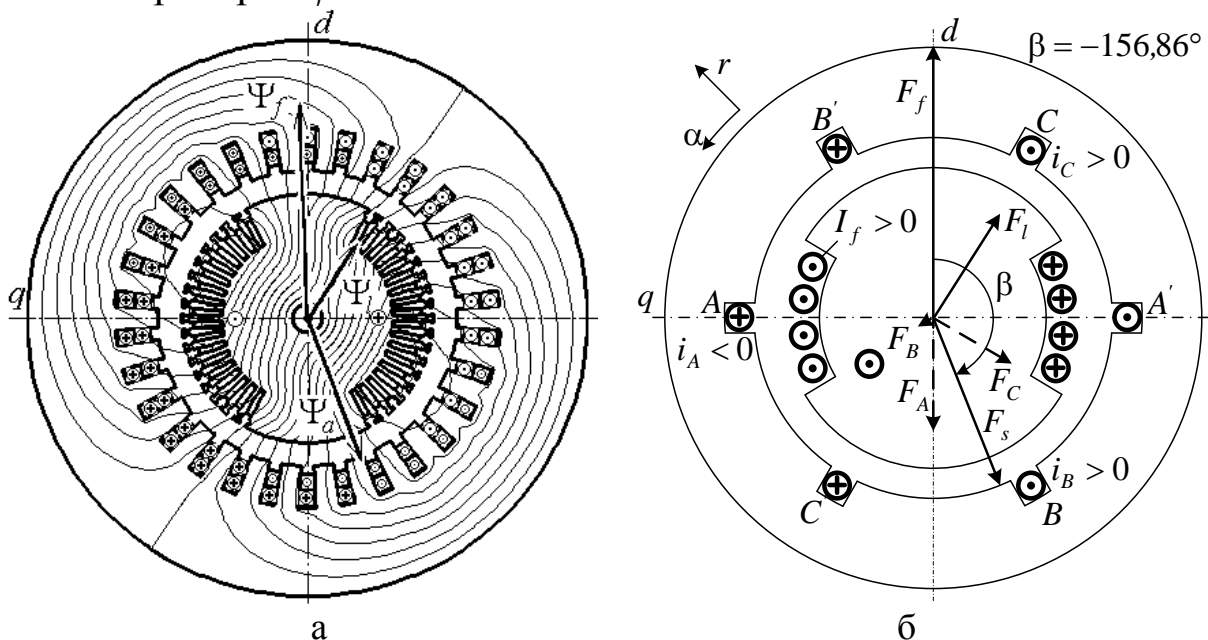


Рис. 1. Электромагнитная система ТГ и направления токов в обмотках, МДС и МПС обмотки статора при номинальной нагрузке ТГ

Система условных положительных направлений. Для расчета магнитного поля ТГ в конкретном режиме необходимо задать соответствующие значения токов в его обмотках.

При симметричной нагрузке ТГ его фазные токи образуют симметричную трехфазную систему:

$$i_A = I_m \cos(\omega t + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \beta); \quad i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \beta), \quad (1)$$

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

На рис.1,б показана система направлений тока ротора I_f и фазных токов статора для режима номинальной нагрузки. Ему соответствует $\beta=-156,86^\circ$ и при $t=0$ фазные токи $i_A=-0,9219I_m$; $i_B=0,1255I_m$; $i_C=0,7964I_m$, ток возбуждения $I_f=1832$ А. Токам соответствуют изображенные векторы магнитодвижущих сил (МДС) обмоток ротора \underline{F}_f и статора $\underline{F}_A, \underline{F}_B, \underline{F}_C$, а также суммарная МДС обмотки статора и результирующая МДС для магнитного поля ТГ

$$\underline{F}_s = \underline{F}_A + \underline{F}_B + \underline{F}_C; \quad \underline{F}_l = \underline{F}_f + \underline{F}_s. \quad (2)$$

Заданных токов достаточно, чтобы провести численный расчет магнитного поля, например, по программе FEMM [1], в результате которого получается распределение векторного магнитного потенциала (ВМП) [2,3] – ему соответствует картина магнитного поля на рис.1,а. Далее **ключевой задачей** является численное выражение пространственной ориентации магнитного поля. Определяющей величиной при этом является магнитное потокосцепление (МПС) [2]. Например, для любой из шести фазных зон обмотки статора (рис.1), две из которых явно выделены на рис.2,а, МПС определяется по полученному распределению ВМП по формуле

$$\Psi = \frac{N_s I_a}{S_\varphi} \int_{S_\varphi} A_z dS \approx \frac{N_s I_a}{S_\varphi} \sum_{j=1}^{K_\varphi} A_{z,av,j} \Delta S_j, \quad (3)$$

где $S_\varphi, \Delta S_j$ – площадь сечения проводников фазной зоны и ее элементы дискретизации; K_φ – число элементов; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе.

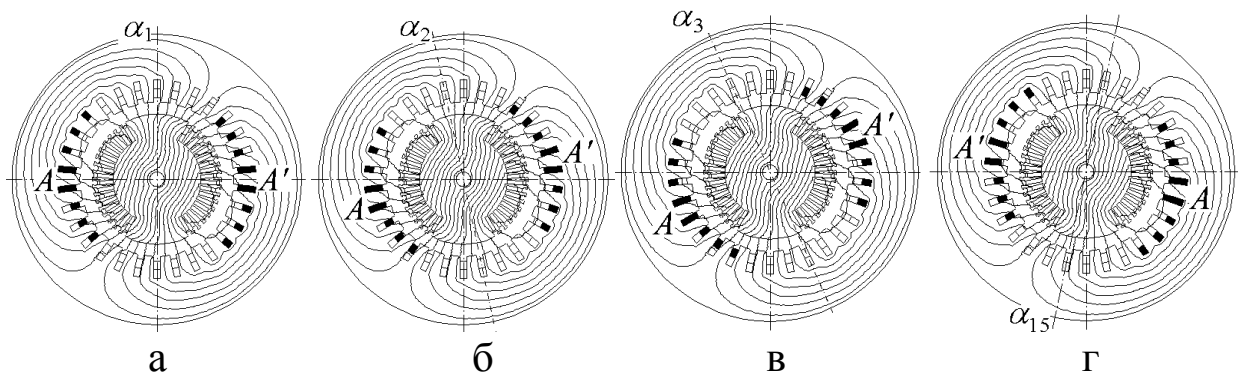


Рис.2. Перемещение фазных зон обмотки статора

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 струк-

тура (рис.1,а) фиксируется, а, значит, является фиксированным распределение ВМП. Тогда остается «собрать» МПС фазной обмотки А–А' по формуле (3) в ее 15 разных позициях, отличающихся угловым положением – часть из них дана на рис.2. Исходная позиция при угловом положении $\alpha_1=0$ показана на рис.2,а (она соответствует ее положению при расчете магнитного поля на рис.1). Следующие позиции отличаются поворотами фазных зон на зубцовое деление статора $\Delta\alpha$. На рис.2,б,в даны две очередные позиции при $\alpha_2=\Delta\alpha$ и $\alpha_3=2\cdot\Delta\alpha$, а на рис.2,г – последняя 15-ая при $\alpha_{15}=14\cdot\Delta\alpha$.

В каждой позиции по формуле (3) производится определение МПС в условно перемещающихся фазных зонах А и А', т.е. Ψ_A и $\Psi_{A'}$. Результирующее значение МПС фазной обмотки $\Psi = \Psi_A - \Psi_{A'}$.

Таким способом получается в численной форме угловая функция МПС фазной зоны обмотки статора на половине периода

$$\Psi_k(\alpha_k); \quad \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; \quad k = 1, 2, 3, \dots K, \quad (4)$$

где k – номера угловых позиций; K – их число (в случае рассматриваемой конструкции ТГ $K=15$). Числовой ряд МПС (4) проиллюстрирован на рис.3 совокупностью выделенных точек в диапазоне α от 0 до 168° (l – режим нагрузки).

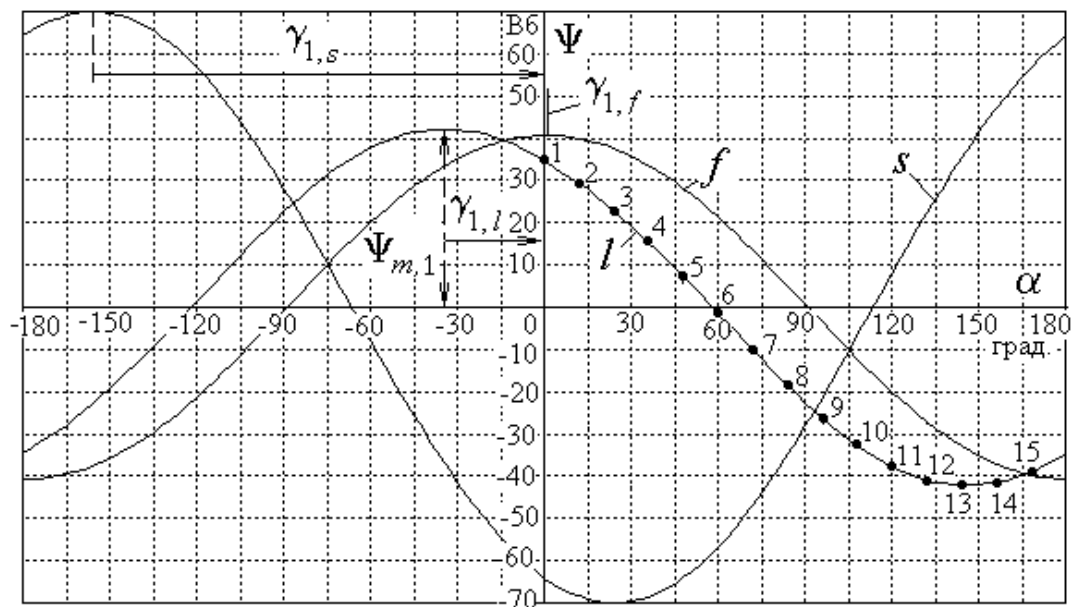


Рис.3. Угловые зависимости МПС фазной обмотки ТГ

Полученную численную угловую функцию (4) необходимо разложить в гармонический ряд [2]:

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

где нас интересуют амплитуда и аргумент (начальная фаза) первой гармоники, которые составили $\Psi_{m,1}=41,89$ Вб, $\gamma_{1,l}=33,20^\circ$.

На основании гармонического разложения (5) на рис.3 построена в виде непрерывной линии угловая функции МПС в диапазоне от -180° до 180° (полный период для кривой l). Заметим, что график первой гармоники фактически слился с основным графиком полной функции (5), так как высшие гармоники весьма малы.

На рис.3 начальная фаза $\gamma_{1,l}$ первой гармоники МПС в режиме нагрузки соответствует полученному ее положительному значению $33,20^\circ$. Но при этом очевидно, что положительная амплитуда $\Psi_{m,1}$ функции $\Psi(\alpha)$ сдвинута относительно начала отсчета $\alpha=0$ на угол $\zeta_{1,l}=-\gamma_{1,l}$, т.е. в отрицательном направлении. Это является важным результатом, так как дает числовое выражение направления магнитного поля в рассматриваемом режиме: теперь качественная ориентация магнитного поля на рис.1,а подтверждена количественно точным пространственным направлением вектора МПС $\underline{\Psi}_l$ в режиме нагрузки.

Расчеты магнитного поля и гармоническое разложение (5) проведены также в режиме холостого хода (ХХ), когда действует только обмотка ротора, и в специальном режиме, когда действует лишь трехфазная обмотка статора (ОС), но насыщение магнитопровода взято после расчета поля в режиме ХХ. Для режима ХХ был принят такой ток возбуждения, при котором получалась фазная ЭДС, равная номинальному напряжению. При расчете поля ОС для (1) было взято то же значение β , что и для режима номинальной нагрузки, а также номинальный фазный ток. Конкретно получено для ХХ $\Psi_{m,1}=40,96$ Вб, $\gamma_{1,f}=-0,90^\circ$, для ОС $\Psi_{m,1}=70,15$ Вб, $\gamma_{1,s}=156,34^\circ$.

На рис.3 теперь показаны еще угловые функции МПС и для режимов ХХ (f) и по полю ОС (s). Положения положительных амплитуд функций соответствуют углам $\zeta_{1,f}=-\gamma_{1,f}$, $\zeta_{1,s}=-\gamma_{1,s}$, под которыми на рис.1,а проведены векторы МПС обмотки статора от обмотки возбуждения – $\underline{\Psi}_f$ и от ее собственного поля – $\underline{\Psi}_a$. Заметим, что, несмотря на то, что в режиме ХХ магнитное поле симметрично относительно оси ротора, но ось намагничивания ОС имеет сдвиг относительно оси ротора на угол $\zeta_{1,f}=0,90^\circ$, что объясняется геометриче-

ской несимметрией двухслойной укороченной обмотки статора.

Ориентации векторов $\underline{\Psi}_l$, $\underline{\Psi}_f$ и $\underline{\Psi}_a$ на рис.1,а соответствуют направления векторов МДС \underline{F}_l , \underline{F}_f и \underline{F}_s на рис.1,б. Все это создает основу для выявления пространственных и временных фазовых соотношений полного комплекта электромагнитных величин, характеризующих состояние ТГ в различных режимах работы, а также основу для построения и анализа различных векторных диаграмм, что в более полной мере представлено в [2].

В частности, становится физически и количественно обоснованной важная величина – угол нагрузки ТГ

$$\Theta = \zeta_{1,f} - \zeta_{1,l}, \quad (6)$$

как изменение направления вектора МПС от положения в режиме ХХ – $\underline{\Psi}_f$ в положение, соответствующее режиму нагрузки – $\underline{\Psi}_l$.

Вывод. Представленная система направлений и фазовых соотношений токов, МДС и МПС ТГ однозначно устанавливает взаимное соответствие их пространственной и временной ориентации, т.е. можно получать не только качественные картины магнитных полей, но и численное выражение их взаимной ориентации.

Список литературы

1. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
2. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Электротехніка і електромеханіка.-2011.-№5.-С.33-38.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка.-2006.-№2.-С.40-46.

V. I. Milykh, Dr. of Sci., Prof., N. V. Polyakova, Assistant
NTU "Kharkov Polytechnical Institute" (Ukraine)

Bases of numerical analysis of phase correlations of electromagnetic sizes are in a turbogenerator

The system of directions of currents in the windings of turbogenerator is presented for the numeral calculations of the magnetic fields. It allows to get the coordinated phase – temporal and spatial correlations of aggregate of electromagnetic sizes characterizing the work of turbogenerator.

Keywords: *turbogenerator, correlations of phases, magnetic field, numerical calculation.*