

РАСЧЕТНЫЙ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ

Подано принципи і результати чисельно-польового розрахунку і відповідного гармонійного аналізу магнітного поля в активній зоні крупного турбогенератора в режимі навантаження. Крім традиційної координатної функції магнітної індукції, в проміжку розглянуті її часові функції в нерухомих точках і в точках, пов'язаних з ротором, що обертається, а також функції магнітного потокозчеплення обмотки статора. Зроблений висновок, що ці функції магнітної індукції, які сильно відрізняються від синусоїд, не можуть бути основою визначення часових функцій магнітного потокозчеплення і ЕРС обмотки статора, які близькі до синусоїд.

Представлены принципы и результаты численно-полевого расчета и соответствующего гармонического анализа магнитного поля в активной зоне крупного турбогенератора в режиме нагрузки. Кроме традиционной координатной функции магнитной индукции, в зазоре рассмотрены ее временные функции в неподвижных точках и в точках, связанных с вращающимся ротором, а также функции магнитного потокозчепления обмотки статора. Выявлено, что эти функции магнитной индукции, которые сильно отличаются от синусоид, не могут быть основой определения временных функций магнитного потокозчепления и ЭДС обмотки статора, близких к синусоидам.

Введение. Принцип действия электрических машин (ЭМ) основан на существовании и взаимодействии магнитных полей [1]. Обоснование важнейших явлений – индуктирования ЭДС в обмотках и силовых действий базируется, как правило, на магнитных полях в зазоре между индуктором и якорем, роли которых делают статор и ротор. При этом одной из ключевых величин является магнитная индукция (МИ).

В классической теории ЭМ величина МИ в зазоре определяется методом магнитной цепи, а форма ее распределения принимается умозрительно с использованием имеющегося опыта экспериментальных исследований. Это распределение "сглаживается", а наличие зубцов сердечников учитывается в расчетах специальными коэффициентами.

В большинстве случаев расчеты магнитного поля в зазоре ограничиваются случаями действия одной из обмоток, например, индуктора – это общепринятый режим холостого хода. В режиме нагрузки, в котором и происходят основные процессы в ЭМ, при действии всех обмоток расчеты магнитных полей в зазоре методом магнитной цепи, как правило, не удаются ввиду чрезмерной сложности и невысокой точности из-за серьезных допущений.

Приближенное распределение МИ ложится в основу гармонического анализа электромагнитных величин в зазоре и в обмотках, что также является основой классической теории ЭМ. Такой упрощенный подход, как показано в [2] на примере турбогенератора (ТГ), не дает достоверных результатов, когда речь идет о конкретных числовых значениях этих величин.

Отказаться от ряда допущений, влияющих на результаты расчета магнитных полей в ЭМ, позволяют численные методы в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением [3, 4]. Однако на практике в большинстве случаев ограничиваются рассмотрением координатного распределения МИ в зазоре (по линии его развертки) ЭМ и последующего гармонического анализа этого распределения и связанных с ним других величин.

Численные методы позволяют рассмотреть и другие функции электромагнитных величин [3], кото-

рые являются более полезными и правомерными для последующего анализа различных процессов в ЭМ. В данной работе это представляется на примере ТГ – одного из важнейших представителей семейства ЭМ.

Постановка задачи. Целью данной работы является представление принципов и результатов численно-полевого расчета и соответствующего гармонического анализа координатных и временных функций магнитного поля в активной зоне крупного ТГ в режиме нагрузки (РН). В расширенный состав, кроме традиционного рассмотрения координатной (угловой) функции МИ в зазоре, входят еще временные функции МИ в неподвижных точках зазора, в точках, связанных с поверхностью вращающегося ротора, магнитного потокозчепления (МПС) обмотки статора.

Объект исследования – ТГ представлен на рис. 1 расчетной моделью его электромагнитной системы.

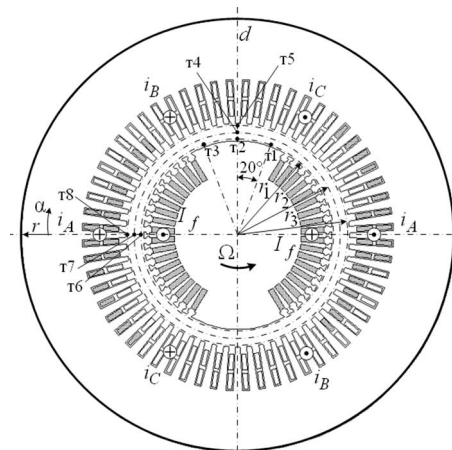


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора

Это типичный для серии ТГВ [5] трехфазный ($m_s=3$) двухполюсный ($2p=2$) ТГ. Номинальные параметры конкретной модели ТГ: мощность 225 МВт; фазное напряжение 9093 В и ток 9703 А; коэффициент мощности 0,85; частота $f_s=50$ Гц. У фазных обмоток статора число параллельных ветвей $a_s=2$, относительное укорочение 0,8, число последовательных вит-

ков $N_s=10$; число пазов статора $Q_s = 60$; активная длина ТГ $l_a=5,1$ м; немагнитный зазор 0,1 м; диаметр ротора 1,075 м; число витков обмотки ротора 180.

На рис.1 в поперечном сечении ТГ показаны фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$ (первая выделена затемнением стержней в пазах). Также обозначены: Ω – угловая скорость вращения ротора и магнитных полей; принята полярная (r, α) система координат; d – продольная ось ротора. Даны обозначения и направления тока обмотки возбуждения I_f и мгновенных фазных токов обмотки статора i_A, i_B, i_C , принятые в [6] и соответствующие режиму номинальной нагрузки (НН).

Общий принцип расчета магнитных полей.

В поперечном сечении ТГ (рис.1) квазистационарное магнитное поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением [3, 4]

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

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

На внешней поверхности сердечника статора принимается граничное условие Дирихле $A_z=0$. Численный расчет магнитного поля проводится методом конечных элементов по общедоступной программе FEMM [4]. При этом основным допущением является неучет возможной реакции вихревых токов.

При заданной геометрии и размерах электромагнитной системы, а также кривых намагничивания стали сердечников, режим возбуждения ТГ определяется конкретным сочетанием токов его обмоток [6].

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов, на стержни в пазу приходятся токи

$$i_{As} = I_m \cos(\omega t + \beta); \quad i_{Bs} = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta); \\ i_{Cs} = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (2)$$

где $I_m = \sqrt{2} I_{sas}$ – их амплитуда; $I_{sas} = I_s/a_s$; I_s – действующие значения тока стержня и фазного тока; $\omega=2\pi f_s$ – угловая частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d .

Номинальные параметры ТГ, указанные выше, обеспечиваются током возбуждения $I_{fN} = 1994,9$ А и углом $\beta = -158,47^\circ$, что определено методом из [7].

Для получения **координатных – угловых функций** МИ достаточно задать эти токи и провести однопозиционный расчет магнитного поля по программе FEMM. В режиме НН, в указанной на рис.1 позиции ротора для момента времени $t=0$, по (2) определены токи $i_{As} = -6382,6$ А; $i_{Bs} = 1010,6$ А; $i_{Cs} = 5372,0$ А. Картина магнитного поля для режима НН представлена на рис.2, где показаны направления и соотношения МДС обмотки возбуждения F_f , обмотки статора F_a и результирующей МДС F_r .

Для получения **временных функций** электромагнитных величин проводятся многопозиционные расчеты магнитных полей для задаваемого с шагом Δt временного ряда

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (3)$$

и соответствующего ряда угловых позиций ротора

$$\alpha_k = \Delta \alpha (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (4)$$

с шагом $\Delta \alpha = \Omega \cdot \Delta t$, где K_{\min} – минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения.

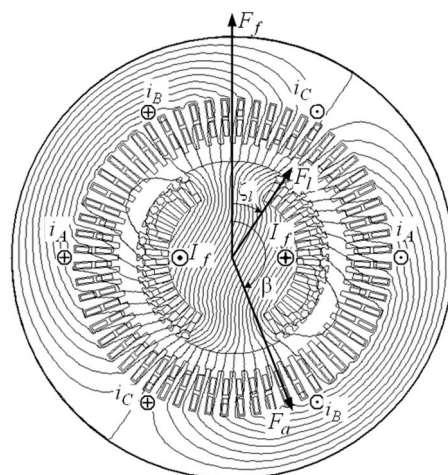


Рис. 2. Картина магнитного поля ТГ в режиме НН при исходном положении ротора (максимальное значение ВМП – 0,608 Вб/м)

Повороты ротора (4), вычисление токов статора (2) в моменты времени (3) и сбор необходимых результатов расчета проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM. При каждом очередном расчете магнитного поля генерировалась конечно-элементная структура примерно из 76 тыс. узлов и 152 тыс. треугольников.

При расчетах угол поворота ротора $\Delta \alpha$ между фиксированными позициями взят достаточно малым – $0,5^\circ$, а временной шаг Δt оказался равным 27,7(7) мкс. Так обеспечивалась необходимая детализация временных функций электромагнитных величин.

Результаты расчета магнитных полей. Для расчетного анализа в зазоре ТГ выделены три окружности с радиусами r_1, r_2 и r_3 , а также конкретные точки t_1, t_2, \dots, t_8 , которые показаны на рис.1. Радиус r_2 соответствует средней линии зазора, r_1 больше радиуса поверхности бочки ротора на 5 мм, r_3 меньше радиуса расточки сердечника статора тоже на 5 мм.

При представлении результатов расчетов ограничили рассмотрением радиальной составляющей МИ B_r , которая обеспечивает полезный магнитный поток.

Координатная функция МИ $B_r(\alpha)$ получена расчетом магнитного поля в одной позиции (рис.2). Она представлена на рис. 3 для трех уровней расположения окружности в зазоре (масштаб на координатной линии дан в относительных единицах α/τ_p , где τ_p – полюсное деление, в угловой мере равное 180°).

На окружности у поверхности ротора (r_1) сильно проявляются зубцовые пульсации его сердечника, у расточки сердечника статора (r_3) – его зубцовые пульсации. На окружности посередине зазора (r_2) эти пульсации дистанционно сглажены. На всех уровнях

явно прорисовывается влияние большого зуба ротора и "перекос" графиков на его ширине, что объясняется сгущением силовых линий под одним из краев этого зуба, в направлении которого действует результирующая МДС F_l в РН (рис. 2).

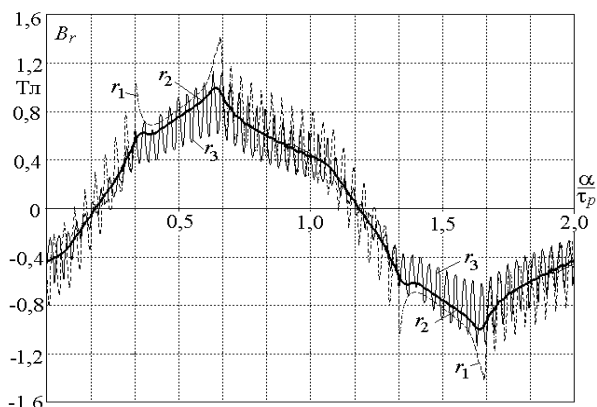


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей МИ в зазоре ТГ на трех окружностях разного радиуса

Временная функция МИ $B_r(t)$ получена многопозиционными расчетами магнитных полей в дискретной форме

$$B_r(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (5)$$

где K – число точек в пределах полного поворота ротора, которое составило 721. Реально же эта функции с учетом периодичности сформирована по расчетам в 120 точках при повороте ротора от 0 до 60° и соответствующим интервале времени.

Графики временных функций (5) для трех зафиксированных в зазоре точек t_6 , t_7 и t_8 на соответствующих радиусах представлены на рис. 4, где время дано в относительных единицах, а за базу взят период T , соответствующий повороту ротора на $2\tau_p$.

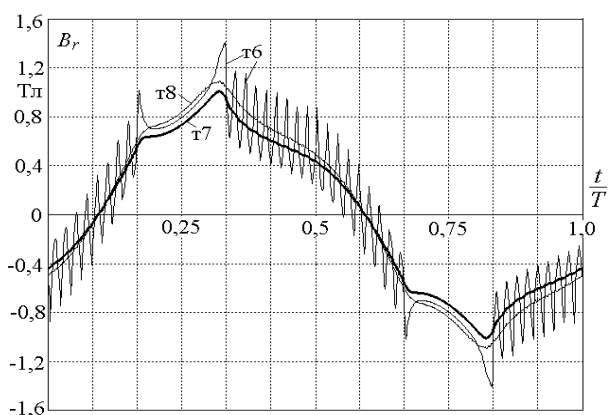


Рис. 4. Временные функции радиальной составляющей МИ в зазоре ТГ в неподвижных точках на разных радиусах

В целом графики временных функций (рис. 4) похожи на графики координатных функций (рис. 3), но теперь проявляют себя только зубцовые пульсации у поверхности ротора (t_6). В точках t_7 и t_8 эти пульсации дистанционно сглажены, а вот зубцовые пульсации от статора никак не проявляются: для временных функций безразлична зубчатая структура сердечника статора – для точек, неподвижных относительно него.

Для точек, связанных с вращающимся ротором, период изменения временных функций МИ $B_r(t)$, как показано в [8], составляет

$$T_t = \frac{T}{2m_s}. \quad (6)$$

Графики этих функций для точек t_1 , t_2 и t_3 даны на рис. 5 и они получены многопозиционными расчетами при повороте ротора в пределах 60°, также в дискретной форме, как и в (5), но теперь на периоде $K=121$.

В этих временных функциях, как очевидно, присутствуют как постоянная, так и переменная составляющие.

Из полных значений B_r выделяется переменная составляющая магнитной индукции (ПСМИ) и получается в виде числового массива соответствующая дискретная временная функция:

$$B_{ri}(t_k) = B_r(t_k) - B_{rav}, k=1,2,\dots,K, \quad (7)$$

где среднее полное значение МИ (постоянная составляющая) для конкретно рассматриваемой точки

$$B_{rav} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{rk}. \quad (8)$$

Интерес к ПСМИ на поверхности ротора ТГ связан с тем, что именно она приводит к дополнительным потерям мощности в поверхностном слое бочки ротора и дополнительному его подогреву [9].

Графики временной функции ПСМИ даны на рис. 6 – для наглядности периодичной структуры на трех периодах их изменения. Три выбранные точки на поверхности ротора (рис.1) разнесены на 20°, что составляет треть периода T_t в угловой мере. Соответственно на рис. 6 сдвинуты по фазе друг относительно друга временные функций ПСМИ.

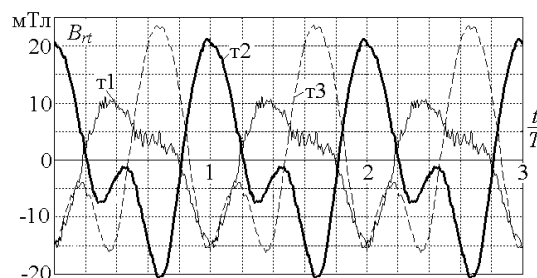


Рис. 6. Временные функции ПСМИ на их трех периодах в трех точках на поверхности вращающегося ротора

Графики ПСМИ (рис.6) имеют довольно сложный характер, они существенно отличаются для разных точек, тогда как классическая теория [1, 9] предполагает неизменность этих функций по окружности поверхности ротора. Основной причиной отличия является насыщение большого зуба ротора. Его правая часть (t_1) насыщена сильнее – здесь имеются большие значения МИ (рис. 5). Поэтому развитие ко-

лебаний ПСМИ в правой части затруднено, т.к. здесь магнитные свойства стали характеризуются насыщенной частью кривой намагничивания, в отличие от слабо насыщенной левой части (т3).

В соответствии с теорией ТГ [9], ПСМИ на поверхности ротора вызвана наличием гармонического спектра в координатной функции МДС обмотки статора и зубчатой структурой его сердечника.

Первая причина – абстрактный математический прием разложения условной ступенчатой функции МДС обмотки статора на спектры гармоник, вращающиеся в противоположные стороны. А реальной физической причиной является периодическая структура распределения максимумов полных токов по пазам статора (рис. 7). В тех пазах, где присутствуют стержни одной фазы, максимум составляет $2I_{mas}$, в остальных – $\sqrt{3}I_{mas}$. Координатный период на рис. 7 $\tau_i = \tau_p / m_s$ и выливается во временной период T_i (6).

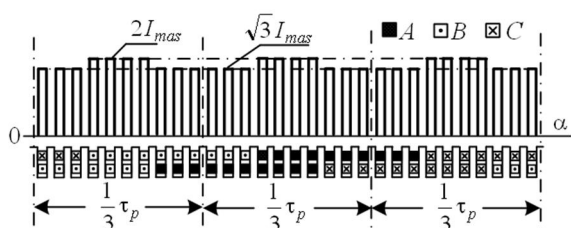


Рис. 7. Распределение максимальных значений полных токов по пазам статора в пределах полюсного деления

В рассматриваемом ТГ вторая причина – зубцовые пульсации практически незаметны, они проявляются в ТГ с меньшим числом зубцов статора, что выявлено в [8], где их было вдвое меньше.

Графики функции $B_{rt}(t)$ на рис.6 для точек т2 и т3 достаточно "гладкие", а для точки т1 проявились микропульсации, вызванные погрешностью из-за дискретной конечно-элементной структуры, которая автоматически перестраивается и меняется при переходе вращающегося ротора из одной позиции в другую.

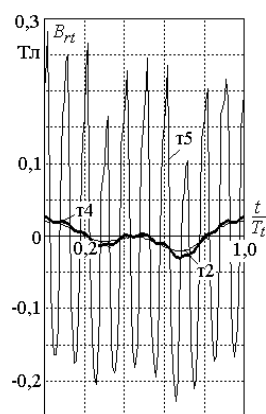


Рис. 8. Временные функции ПСМИ на их периоде в точках, вращающихся вместе с ротором на разных радиусах

Уровни ПСМИ в точках, вращающихся вместе с ротором, на разных позициях зазора представлены на рис. 8 – для точек т2, т4 и т5. Для точки т2 повторяется в другом масштабе график с рис. 6, где зубцовые пульсации незаметны. По мере приближения к расточке статора такие пульсации усиливаются, они становятся заметными для точки т4 и оказываются доминирующими в функции ПСМИ вблизи этой расточки.

Средние значения МИ B_{rav} (8) и максимумы ПСМИ $B_{rt max}$ даны в табл.1 для указанных точек. Они подтверждают приведенные выше рассуждения.

Если опять вернуться к рис.3 и рис.4, то можно предположить, что переход от функций радиальной

составляющей МИ к ЭДС в обмотке статора будет более обоснованным для второй из них. Ведь как неподвижны заданные точки в зазоре, так неподвижны и проводники обмотки статора, а графики того же типа могут дать временную функцию ЭДС проводника

$$e(t) = r \cdot \Omega \cdot l_a \cdot B_r(t). \quad (9)$$

Таблица 1. Средние значения МИ и максимальные значения ПСМИ в указанных точках зазора, вращающихся с ротором

№ точки	т1	т2	т3	т4	т5
B_{rav} , Тл	1,082	0,799	0,709	0,733	0,672
$B_{rt max}$, мТл	11,7	21,3	23,7	26,6	282

Однако это приемлемо только для проводников, лежащих в зазоре при гладкой поверхности статора. Ведь ТГ с формой ЭДС обмотки статора, повторяющей форму кривых $B_r(t)$ на рис. 4, неприемлемы, тем более результат зависел бы от того, на каком радиусе r взять кривую, а ведь форма функции $e(t)$ в конкретном ТГ едина – есть такую, какую есть.

Решение этого противоречия в том, что не следует пользоваться функцией $B_r(t)$ из зазора, а следует пользоваться временной функцией МПС $\Psi(t)$ фазной обмотки статора, как это показано в [2]. Такая функция МПС формируется посредством рассмотренных многопозиционных расчетов магнитного поля ТГ.

Конкретно, МПС фазной обмотки $A-A'$ [3]

$$\Psi_A = N_s I_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (10)$$

где $S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем стержням фазных зон A и A' (на рис. 1 затемнены); $K_A, K_{A'}$ – числа конечных элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j .

Заметим, что в программе FEMM есть процедура автоматического извлечения этого МПС (10).

Как и для МИ (5), многопозиционными расчетами формируется дискретная временная функция МПС

$$\Psi(t_k), k=1,2,\dots,K, \quad (11)$$

где K – то же число точек, что и в (5).

Графики функций $\Psi(t)$ для фазных обмоток статора показаны на рис.9 на периоде их изменения T .

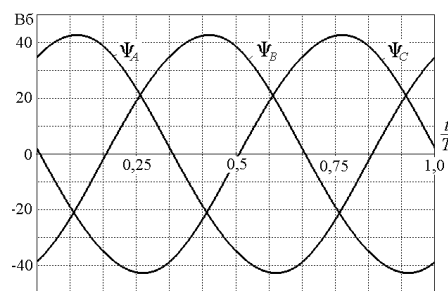


Рис. 9. Временные функции МПС фазных обмоток статора

Эти графики близки к "чистым" синусоидам, а иного в ТГ и не предполагается, и не похожи на угловые (рис. 3) и временные (рис. 4) функции МИ в зазоре, даже с учетом подавления ряда гармоник посредством обмоточного коэффициента [1].

Все рассмотренные функции МИ и МПС являются периодическими и могут быть детально проанализированы посредством гармонического анализа, апробация принципов которого проведена в [2].

Гармонический анализ числовых дискретных функций электромагнитных величин B_r , B_{r1} и Ψ выполнен на основе их разложения в ряды Фурье [10].

Для угловой функции имеем косинусный ряд

$$\Gamma = \sum_{v=1}^{N_g} \Gamma_{m,v} \cos(v\alpha + \eta_v), \quad (12)$$

где амплитуды и аргументы гармоник

$$\Gamma_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \eta_v = -\arctg(s_v/c_v) \quad (13)$$

определяются через коэффициенты синусного и косинусного рядов:

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sin(v\alpha_k); \quad c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cos(v\alpha_k). \quad (14)$$

Для временных функций имеем аналогичный ряд

$$\Gamma = \sum_{v=1}^{N_g} \Gamma_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v), \quad (15)$$

и сопутствующие обеспечивающие величины

$$\Gamma_{m,v} = \sqrt{s_v^2 + c_v^2}; \quad \zeta_v = -\arctg(s_v/c_v); \quad (16)$$

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \sin(v\omega t_k); \quad c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Gamma_k \cos(v\omega t_k). \quad (17)$$

В приведенных выражениях под обозначением Γ подразумевается любая из величин B_r , B_{r1} и Ψ , определенное количество точечных значений K для которых берется в пределах их полного периода. Для функций B_r и Ψ , имеющих полупериодичную асимметрию типа $\Gamma(t+T/2) = -\Gamma(t)$, в рядах (12) и (15) присутствуют лишь нечетные гармоники $v=1,3,5,\dots$, для функции B_{r1} , не имеющей симметрии на периоде, присутствуют четные и нечетные гармоники $v=1,2,3,\dots$

Допустимый номер гармоник N_g не должен превышать половины выбранного для (14), (17) числа значений K . При повороте ротора и магнитного поля на $\tau_p/3$ с шагом $0,5^\circ$ за период T , число K составляло 120, а $N_g = 60$, при использовании полного периода $T K = 720$, а $N_g = 360$, хотя в случае полупериодичной асимметрии можно обойтись и числом $K = 360$ на полупериоде.

Номера гармоник v в (12) и (15) соответствуют периодичности конкретно рассматриваемой функции. Так периоду T в режиме нагрузки соответствует первая глобальная гармоника $v=1$. Если же рассматривается функция с периодом T_r , то полученная в (15) локальная первая гармоника $v=1$ в глобальном исчислении будет иметь номер $v_s = 2 m_s v = 6$. Вообще локальные гармоники с номером v в глобальном исчислении имеют номер

$$v_s = 2 m_s v = 6 v. \quad (18)$$

Зубцовая гармоника от сердечника статора в локальном исчислении имеют номер $v=10$, а в глобальном исчислении ее период T_{Q_s} составляет T/Q_s и ее номер $v_{Q_s} = Q_s = 60$.

Результаты гармонического анализа функций электромагнитных величин.

Гармонический состав координатных функций (рис. 3) и временных функций (рис. 4) МИ представлен в табл. 2. Здесь и далее амплитуды гармоник даны в относительных единицах (о.е.)

$$B_{m,v,*} = B_{m,v}/B_{m,1}, \quad (20)$$

где за базу принимается амплитуда первой гармоники $B_{m,1}$ для конкретной функции, а сама она дается в абсолютном значении.

Таблица 2. Основные гармоники функций МИ на трех радиусах в зорре: $B_r(\alpha)$ – угловая функция на окружностях; $B_r(t)$ – временная функция в неподвижных точках

Функция	$B_r(\alpha)$			$B_r(t)$		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
$B_{m,1}$, Гл	0,945	0,849	0,776	0,942	0,852	0,968
$B_{m,3}$, Гл	0,105	0,100	0,097	0,103	0,096	0,090
$B_{m,5}$, Гл	0,082	0,065	0,060	0,081	0,065	0,057
$B_{m,7}$, Гл	0,070	0,038	0,019	0,082	0,054	0,043
$B_{m,9}$, Гл	0,044	0,025	0,019	0,045	0,024	0,017
$B_{m,11}$, Гл	0,019	0,014	0,025	0,016	0,007	0,003
$B_{m,13}$, Гл	0,042	0,020	0,019	0,039	0,015	0,007
$B_{m,15}$, Гл	0,035	0,011	0,005	0,036	0,011	0,005
d_{dist}	0,959	0,991	0,964	0,958	0,991	0,993

Роль высших гармоник оценивается коэффициентом искажения кривых

$$d_{dist} = B_{m,1} / \sqrt{\sum_{v=1}^{N_g} B_{m,v}^2}. \quad (21)$$

Для функций, содержащих явно выраженные зубцовые пульсации, значения d_{dist} заметно отличаются от единицы, присущей "чистой" синусоиде.

В табл. 3 дается гармонический состав временных функций ПСМИ (рис. 6) в указанных трех точках на поверхности вращающегося ротора. Здесь присутствуют нечетные и четные гармоники с локальными номерами, которые пересчитываются в глобальные номера по (18), зубцовая гармоника в табл. 3 имеет локальный номер $v=10$ – она слабо выражена.

Коэффициент искажения для точек t_1 , t_2 и t_3 составил 0,910, 0,824 и 0,842, соответственно, т.е. роль высших гармоник весьма существенна.

Таблица 3. Основные гармоники ПСМИ по точкам на поверхности ротора, вращающихся вместе с ним

Точка	t_1	t_2	t_3	Точка	t_1	t_2	t_3
$B_{m,1}$, мГл	10,15	14,51	16,03	$B_{m,7}$, мГл	0,023	0,010	0,006
$B_{m,2}$, мГл	0,434	0,670	0,621	$B_{m,8}$, мГл	0,012	0,010	0,005
$B_{m,3}$, мГл	0,053	0,143	0,147	$B_{m,9}$, мГл	0,018	0,009	0,002
$B_{m,4}$, мГл	0,008	0,021	0,020	$B_{m,10}$, мГл	0,016	0,004	0,003
$B_{m,5}$, мГл	0,011	0,017	0,019	$B_{m,11}$, мГл	0,023	0,002	0,004
$B_{m,6}$, мГл	0,024	0,007	0,003	$B_{m,12}$, мГл	0,011	0,004	0,005

В табл. 4 дан гармонический состав для временной функции МПС фазной обмотки статора. В нем присутствуют только нечетные гармоники. Они даны в относительных единицах аналогично (20) и имеют глобальные номера v . Амплитуда первой гармоники $\Psi_{m,1}$ составляет 42,49 Вб, тогда как максимальное значение на рис. 9 – 42,72 Вб.

Таблица 4. Относительные значения амплитуд гармоник МПС фазной обмотки статора

v	3	5	7	9	11	13	15
$\Psi_{m,v}^*$	0,0136	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000

Для временной функции МПС коэффициент искажения, аналогичный (21), оказался на уровне 1 (0,9999), т.е. здесь действительно имеет место практически чистая синусоида, т.к. высшие гармоники весьма малы.

Выводы.

1. Координатные функции МИ в зазоре имеют сильные зубцовые пульсации: от сердечника ротора у его поверхности и от сердечника статора у его поверхности. Форма этих функций имеет явно выраженный прекоз из-за несимметричного действия результирующей МДС в режиме нагрузки относительно большого зуба ротора.

2. Временные функции МИ в неподвижных точках зазора в целом аналогичны ее координатным функциям, но зубцовые пульсации от неподвижного статора в них не проявляются.

3. Временные функции ПСМИ в точках на поверхности вращающегося ротора имеют сложную форму и их период составляет шестую часть основного периода электромагнитных величин ТГ. Эти функции в разных точках поверхности весьма существенно отличаются друг от друга.

4. Временные функции МПС обмотки статора практически синусоидальны и не наследуют характер координатных и временных функций МИ в зазоре.

5. Гармонический состав координатных и временных функций МИ в зазоре является разным и еще существенно зависит от положения рассматриваемых мест их определения в зазоре.

6. В разных точках на поверхности вращающегося ротора временная функция ПСМИ имеет различный гармонический состав, а существенную роль играют первая и вторая гармоники, эквивалентные шестой и двенадцатой в глобальном исчислении, зубцовые гармоники от статора оказались несущественными.

7. Во временных функциях МПС, а значит и ЭДС обмотки статора, все гармоники, выше первой, оказываются несущественными и несоизмеримо меньшими, чем аналогичные гармоники МИ в зазоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 3. – С. 40-49.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 2. – С. 40-46.
4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
5. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Ю.В. Зозулін, О.Є. Антонов, В.М. Бичік, А.М. Боричевський, К.О. Кобзар, О.Л. Лівшиць, В.Г. Ракогон, І.Х. Роговий, Л.Л. Хаймович, В.І. Чередник.– Харків: ПФ "Колегіум", 2011. – 228 с.
6. Милых В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 5. – С. 33-38.
7. Милых В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 1. – С. 36-41.

8. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора турбогенератора // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №5. – С. 39-44.

9. Титов В.В., Хугорецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.

10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 832 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vol'dek A.I. `Elektricheskie mashiny. L.: `Energiya, 1978. - 832 s. 2. Milyh V.I., Polyakova N.V. Garmonicheskij analiz `elektromagnitnyh velichin trehfaznoj obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislenno-polevyh metodov // *Tehnichna elektrodinamika*. - 2013. - № 3. - S. 40-49. 3. Milyh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie `elektromagnitnyh parametrov `elektricheskix mashin na osnove chislennyh raschetov magnitnyh polej // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2006. - № 2. - S. 40-46. 4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // femm.berlios.de. 5. Stvorenniya novih tipiv ta modernizaciya diyuchih turbogeneratoriv dlya teplovyh elektrichnih stancij // Yu.V. Zozulin, O.E. Antonov, V.M. Bichik, A.M. Borichevskij, K.O. Kobzar, O.L. Livshic', V.G. Rakogon, I.H. Rogovij, L.L. Hajmovich, V.I. Cherednik.- Harkiv: PF "Kolegium", 2011. - 228 s. 6. Milyh V.I., Polyakova N.V. Sistema napravlenij i fazovyh sootnoshenij `elektromagnitnyh velichin pri chislennyh raschetah magnitnyh polej v turbogeneratore // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2011. - № 5. - S. 33-38. 7. Milyh V.I., Polyakova N.V. Organizaciya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannyh ego vyhodnyh parametrov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2012. - № 1. - S. 36-41. 8. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz peremennoj sostavlyayushej magnitnogo polya na poverhnosti vraschayushegosya rotora turbogeneratora // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2013. - №5. - S. 39-44. 9. Titov V.V., Hutoreckij G.M. i dr. Turbogeneratory. -L.: `Energiya, 1967. - 895 s. 10. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. M.: Nauka, 1973. - 832 s.

Поступила (received) 12.08.2013

*Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Полякова Наталья Владимировна, ассистент
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
кафедра "Электрические машины",
61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone: +38 057 7076514, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua*

*Milykh V.I., Polyakova N.V.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

Theoretical and harmonic analysis of magnetic fields in the active zone of a turbogenerator under load conditions.

The paper presents some principles and results of numerical field calculation and the corresponding harmonic analysis of magnetic field in the active zone of a large turbogenerator under load conditions. In addition to the traditional coordinate function of the magnetic induction, its time functions are considered at fixed points and at rotating rotor linked points in the gap. The stator magnetic flux linkage functions are also examined. It is revealed that these magnetic induction functions, which are different from sine curves, fail to provide the basis for determining time functions of magnetic flux linkage and the stator winding EMF that are close to sine waves.

Key words – turbogenerator, magnetic field, numerical field calculation, load mode, magnetic induction, magnetic flux linkage, coordinate function, time function, harmonic analysis.