

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С РАЗНЫМ ЧИСЛОМ ЗУБЦОВ СТАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ**

**В.И.Милых, докт.техн.наук, Н.В.Полякова**  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина,  
e-mail: [mvikpi@kpi.kharkov.ua](mailto:mvikpi@kpi.kharkov.ua)

*Представлен метод расчета переменного магнитного поля на поверхности ротора синхронных машин. Он основан на многопозиционных численно-полевых расчетах магнитного поля при вращении ротора и изменении токов в обмотке статора. При этом учитываются реальная геометрия электромагнитной системы и насыщение магнитопровода. Выполнены сравнительный расчет и гармонический анализ переменной составляющей магнитной индукции в режиме номинальной нагрузки для двух турбогенераторов с разным числом зубцов сердечника статора. Предложенный метод универсален для разных электрических машин и режимов их возбуждения. Библи. 10, табл. 3, рис. 5.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, поверхность ротора, переменная составляющая магнитной индукции, численно-полевой метод, сравнительный расчет, число зубцов статора, гармонический анализ, режим нагрузки.

**Введение.** В синхронных электрических машинах (СЭМ), в том числе и в турбогенераторах (ТГ), на поверхности вращающегося ротора на фоне основного магнитного поля, являющегося постоянным относительно него, возникают переменные магнитные поля [1, 2, 9]. Это приводит к дополнительным потерям мощности, которые локализуются в поверхностном слое массивного ротора.

В существующей практике проектирования ТГ [9] потери такого рода непосредственно в режиме нагрузки (РН) не рассматриваются ввиду непреодолимых сложностей, поэтому их искусственно подразделяют на следующие виды:

– потери при холостом ходе от зубчатости статора, соответствующие зубцовым гармоническим порядка  $\nu_{Q_s} = Q_s / p \pm 1$ , которые индуцируют в роторе токи частоты

$$f_{Q_s} = Q_s f_s / p, \quad (1)$$

где  $p$ ,  $Q_s$  – числа пар полюсов ТГ и зубцов его статора;  $f_s$  – частота токов обмотки статора;

– потери при коротком замыкании от высших гармонических магнитного поля обмотки статора, имеющих порядок  $\nu_s = 6 \cdot k \pm 1$ , ( $k = 1, 2, 3 \dots$ ) и индуцирующих в роторе токи частоты

$$f_{s\nu} = 6 \nu_s f_s, \quad (2)$$

и от зубчатости статора, для которых учитывают только первые зубцовые гармонические индуцируемых в роторе токов той же частоты  $f_{Q_s}$  (1).

В классической теории СЭМ [1, 9] расчеты переменной составляющей магнитной индукции (ПСМИ), положенной в основу расчетов поверхностных потерь ротора, базируются на простейших одномерных моделях магнитного поля в развернутом зазоре при весьма условном учете насыщения магнитопровода. При этом сердечник ротора считается гладким и по всей его поверхности характер временных изменений магнитного поля принимается одинаковым. И, как уже сказано, магнитные поля от обмоток ротора и статора рассматриваются отдельно. В условиях этих и прочих допущений надеяться на достоверные числовые значения ПСМИ в РН не приходится.

Отказаться от ряда серьезных допущений, влияющих на результаты расчета магнитных полей в электрических машинах любых типов, позволяют численные методы в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением. Это уже было показано в [4, 8] при проведении гармонического анализа магнитного потокоцепления (МПС) и ЭДС обмотки статора ТГ. Продолжением этих исследований, но уже применительно к ПСМИ на поверхности вращающегося ротора ТГ, является решаемая здесь задача.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является представление разработанного метода расчета и соответствующего гармонического анализа временных функций ПСМИ на поверхности

вращающегося ротора ТГ, а также практическая демонстрация его применения на примере сравнительных расчетов для двух крупных ТГ в режиме номинальной нагрузки (НН).

**Объекты исследования.** В качестве демонстрационных моделей для расчетного анализа избрана два ТГ серии ТГВ [2, 8], близкие по мощности и с одинаковой конструкцией ротора (рис. 1).

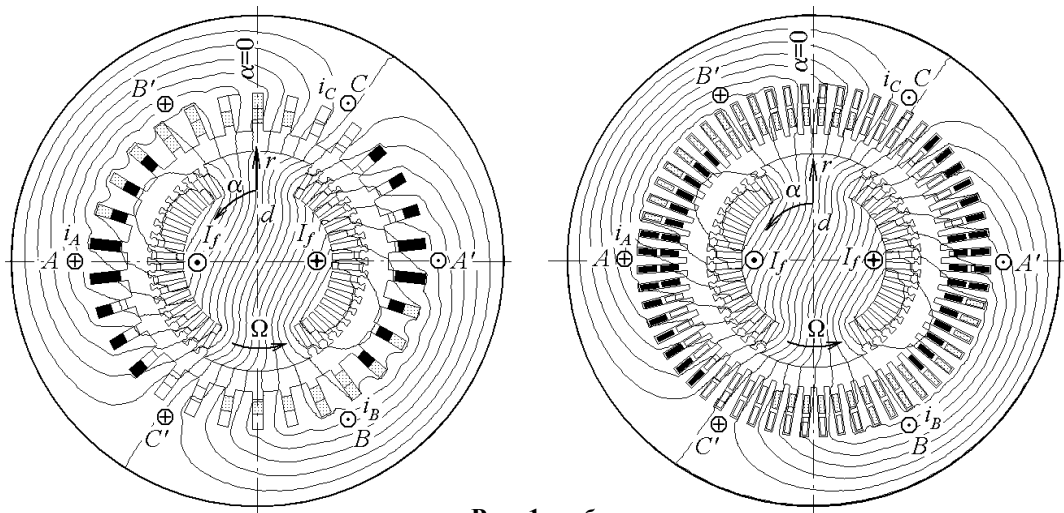


Рис. 1, а, б

Первый ТГ (ТГ-1) (рис. 1, а) имеет номинальные параметры: 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  $f_s=50$  Гц. Его числа фаз  $m_s=3$ , пар полюсов  $p=1$  и параллельных ветвей обмотки статора  $a_s=1$ ; активная длина – 5,286 м; немагнитный зазор – 0,1 м; диаметр ротора – 1,075 м; относительное укорочение обмотки статора – 0,8; числа последовательных витков фазной обмотки статора – 10, обмотки ротора – 180.

Второй ТГ (ТГ-2) (рис. 1, б) имеет мощность 225 МВт и отличается наличием в обмотке статора двух параллельных ветвей  $a_s=2$ ; расчетной длиной – 5,1 м и номинальным фазным током  $I_{sN}=9703$  А. Главное же отличие составляет число пазов статора: в ТГ-1  $Q_s=30$ , в ТГ-2  $Q_s=60$ .

В поперечных сечениях электромагнитной системы ТГ на рис. 1 обозначены фазные зоны обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$  (первая выделена затемнением);  $r, \alpha$  – принятая полярная система координат;  $d$  – продольная ось ротора. Показаны также обозначения и направления тока обмотки возбуждения  $I_f$  и мгновенных фазных токов обмотки статора  $i_A, i_B, i_C$ , соответствующие режиму НН.

Фазные токи в ветвях обмотки статора определялись в конкретные моменты времени  $t$ :

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

где  $I_{mas} = \sqrt{2}I_{sas}$  – их амплитуда;  $I_{sas} = I_s / a_s$  – действующее значение тока на параллельную ветвь;  $I_s$  – полный фазный ток обмотки статора;  $\omega=2\pi f_s$  – угловая частота;  $\beta$  – угловое направление действия МДС трехфазной обмотки статора по отношению к оси  $d$  ротора [7].

Для режима НН получены разработанным и представленным в [6] методом следующие значения: для ТГ-1  $I_f=1881,7$  А и  $\beta=-155,74^\circ$ , для ТГ-2  $I_f=1994,9$  А и  $\beta=-158,47^\circ$ .

**Метод расчета переменного магнитного поля**, связанного с вращающимся ротором ТГ, основывается на многопозиционных численных расчетах стационарного магнитного поля [4, 8]. При этом в данном случае основным допущением является пренебрежение реакцией вихревых токов в поверхностном слое бочки ротора на переменное магнитное поле.

В поперечном сечении ТГ стационарное двухмерное магнитное поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением [5, 10]

$$\text{rot} \left[ \frac{1}{\mu} \text{rot}(\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (4)$$

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

На границе области расчета – внешней поверхности сердечника статора принималось граничное условие Дирихле  $A_z=0$ . Численный расчет магнитного поля проводился методом конечных элементов по доступной программе FEMM [10] с учетом нелинейных кривых намагничивания сталей.

Выделение временных функций ПСМИ  $B_i(t)$  на поверхности ротора проводится в процессе его синхронного вращения с магнитным полем трехфазной обмотки статора с угловой скоростью  $\Omega$ .

Непрерывная временная функция  $B_i(t)$  заменяется дискретной

$$B_i(t_k), \quad k=1,2, \dots, K_{min}, \quad (5)$$

где  $K_{min}$  – минимум позиций ротора для формирования временных функций ПСМИ на их периоде.

Задав шаги по времени  $\Delta t$  и углу  $\Delta\alpha=\Omega\cdot\Delta t$ , получаем ряды времени и угловых позиций ротора

$$t_k=\Delta t (k-1); \quad \alpha_k=\Delta\alpha (k-1); \quad k=1,2, \dots, K_{min}. \quad (6)$$

Синхронные повороты магнитного поля статора обеспечиваются вычислением фазных токов обмотки статора (3) в те же моменты времени  $t_k$  (6). Это и сбор необходимой информации после расчета магнитного поля в каждой конкретной позиции при работе программы FEMM осуществляется автоматически управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [10].

Программа FEMM дает для любой интересующей расчетчика точки массив полных значений магнитной индукции  $B(t_k)$ ,  $k=1,2,\dots,K_{min}$ , содержащих в себе как постоянную, так и переменную составляющие. Из этих значений выделяется ПСМИ  $B_r(t_k)$ , а конкретный анализ проводится далее для нормальной к поверхности ротора составляющей магнитной индукции (в данном случае – рис. 1 – это радиальная компонента). Тогда получается в виде числового массива соответствующая дискретная временная функция ПСМИ для конкретной точки:

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

где среднее полное значение (постоянная составляющая) радиальной составляющей магнитной индукции

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

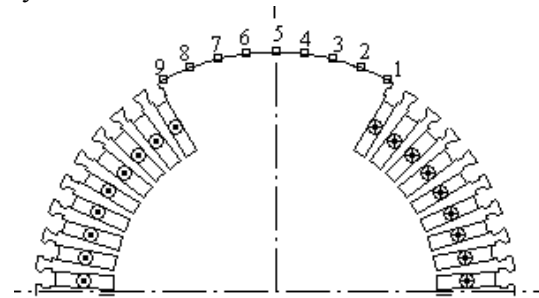


Рис. 2

Для анализа на расстоянии 2 мм от поверхности большого зуба ротора задан ряд точек, показанных и пронумерованных на рис. 2, где ротор, как и на рис. 1, имеет исходную позицию при  $t_k = 0$  и  $\alpha_k = 0$ .

Опыт показал, что для расчетов ПСМИ в программе FEMM надо генерировать весьма детализированную конечно-элементную структуру. Особенно густой была сетка в зоне выделенных точек наблюдения, где размер сторон треугольников не превышал 2 мм. Всего в

области расчета на рис. 1, а оказалось около 32150 узлов и 64900 треугольников, на рис. 1, б – 39500 узлов и 78670 треугольников.

При расчетах угол поворота ротора  $\Delta\alpha$  между фиксированными позициями выбран довольно малым и составлял  $0,5^\circ$ , чем обеспечивалась достаточная детализация временных функций ПСМИ.

Предварительный анализ показал, что в РН ПСМИ (7) имеет место период изменения

$$T_i = T/2m_s, \quad (9)$$

что соответствует периоду поворота ротора на  $\tau_i = \tau_p/m_s$ , где  $\tau_p$  – полюсное деление ТГ,  $T$  – период изменения токов (3) и других электромагнитных величин, связанных с обмоткой статора.

Физической основой колебания ПСМИ в точках на поверхности ротора с периодом  $T_i$  является неравномерное распределение по пазам статора максимальных значений полных токов, определяемых в процессе вращения, что показано на рис. 3 для обоих ТГ. В пазах, где лежат стержни одной фазной обмотки (из набора А, В, С), уровень токов достигает  $2 I_{mas}$ , в остальных –  $\sqrt{3} I_{mas}$ , период повторения максимумов полных пазовых токов составляет треть  $\tau_p$ , в угловой мере –  $60^\circ$  (электрических градусов), а во времени –  $T_i$ .

Период зубцовых пульсаций ПСМИ  $T_{Q_s}$  определяется частотой  $f_{Q_s}$  (1) и он кратен основному периоду  $T_i$  (9).

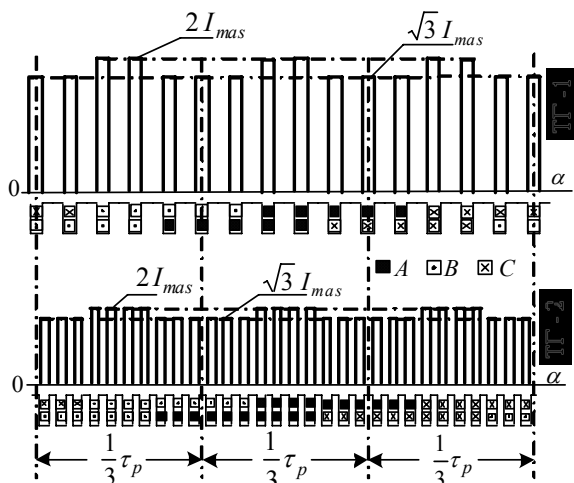


Рис. 3

**Результаты расчета ПСМИ.** Для подтверждения периодичности ПСМИ и выявления устойчивости результатов расчетов они сначала были проведены при повороте ротора в пределах  $120^\circ$ , что соответствовало удвоенному периоду  $T_t$ . Число расчетных точек–позиций составило 241, а временной шаг  $\Delta t$  оказался равным  $1/720$  периода  $T$ .

Картинки магнитных полей ТГ в режиме НН (линии  $A_z = \text{const}$ ), рассчитанных для исходной позиции ротора, показаны на рис. 1 – для момента времени  $t_k = 0$ . Максимальное значение ВМП для ТГ-1 и ТГ-2 составило 0,606 и 0,580 Вб/м, т.е. общий уровень магнитных полей примерно одинаков.

Графики функции  $B_{rt}(t_k)$  (7) даны на рис. 4 в интервале времени поворота ротора на упомянутые уже  $120^\circ$ . Эти графики соответствуют трем точкам в средней части большого зуба с указанными на рис. 2 номерами. В целом представленные временные функции ПСМИ достаточно стабильны с очевидной периодической структурой – в данном случае они повторяются на двух периодах  $T_t$ , хотя есть и некоторая относительно небольшая локальная неустойчивость, что можно связать с дискретностью конечно-элементной структуры. Она перестраивается программой ФЕММ при переходе от одной позиции в следующую автоматически. Причем для ТГ-2 (рис. 4, б) графики оказываются более гладкими, чем для ТГ-1 (рис. 4, а), так как для последнего в более сильной степени проявляется влияние зубчатой структуры статора, которая аппроксимируется достаточно большими треугольниками.

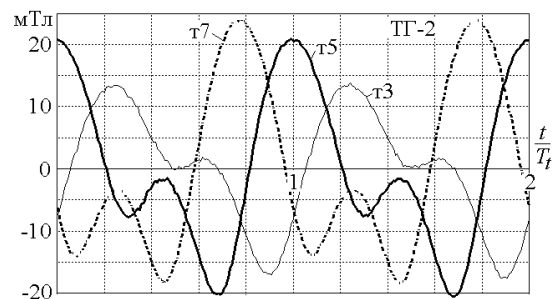
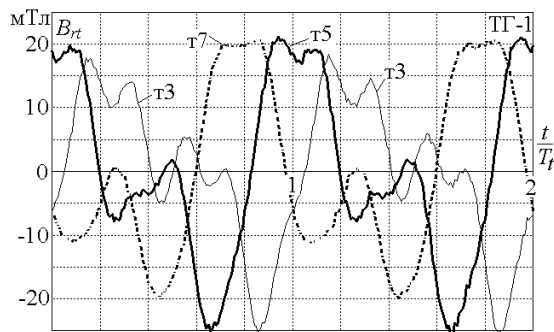


Рис. 4, а, б

Что касается зубцовых пульсаций ПСМИ, то на рис. 4 видно, что в ТГ-1 они проявились в значительно большей мере, чем для ТГ-2, имеющего вдвое большее число зубцов и пазы меньшей ширины. Также обращает внимание то, что в разных точках большого зуба форма кривых и значения ПСМИ существенно отличаются, например, в симметричных относительно оси  $d$  точках т3 и т7 максимумы ПСМИ довольно разные. Это объясняется тем, что правая часть большого зуба (т3) сильнее насыщена (на рис. 1 видно, что силовые линии магнитного поля сосредоточены именно здесь) и здесь развитие колебаний ПСМИ затруднено, в отличие от слабо насыщенной левой части (т7), где магнитные свойства стали зуба характеризуются ненасыщенной частью кривой намагничивания.

На краях большого зуба (точки 1 и 9) временные функции ПСМИ были менее стабильны, так как в зонах вблизи дискретной пазовой структуры ротора перестройка конечно-элементной структуры при поворотах ротора заметно влияет на результаты расчета.

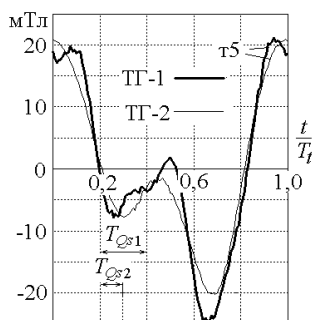


Рис. 5

На рис. 5 совмещены графики ПСМИ для одной – центральной точки большого зуба (т5) – уже в пределах одного периода  $T_t$ . В целом графики для двух ТГ по форме кривой и значениям ПСМИ на рис. 5 (как и на рис. 4) отличаются не так уж и сильно, и в них есть некоторая «несущая» основа, которая задается изменениями во вращающейся «волне» токов, распределенных по пазам статора (рис. 3). Влияют также, видимо, те «перекосы» главного магнитного поля в зазоре ТГ, которые имеются в РН, что было показано в [4].

В тоже время видно, что временная функция ПСМИ для ТГ-1 подвержена большим зубцовым пульсациям и большему «шуму» из-за дискретности конечно-элементной структуры. Для ТГ-2 это проявляется значительно меньше. На рис. 5 показаны периоды  $T_{Qs1}$  и  $T_{Qs2}$  главных зубцовых гармоник в ТГ-1 и ТГ-2, соответственно.

Постоянная составляющая магнитной индукции  $B_{avr}$  (8) и максимальное значение ПСМИ  $B_{rtmax}$  из набора (7) даны в табл. 1 для точек со стабильными временными функциями ПСМИ. По значениям

$B_{avr}$  для двух ТГ имеется примерный паритет, а вот по ПСМИ в одной части большого зуба значения  $B_{rt\ max}$  большие для ТГ-1, в другой – для ТГ-2.

Сложный характер представленных на рис. 4 и рис. 5 периодических временных функций ПСМИ свидетельствует о наличии некоторого гармонического спектра, что можно, как это принято, проявить гармоническим анализом этих функций.

**Основной гармонического анализа ПСМИ** явилось разложение дискретно-числовой временной функции  $B_{rt}(t_k)$  (7), как это уже представлялось в [4, 8], в косинусный ряд Фурье [3]

№ точки	ТГ-1		ТГ-2	
	$B_{avr}$ , Тл	$B_{rt\ max}$ , МТл	$B_{avr}$ , Тл	$B_{rt\ max}$ , МТл
2	1,069	11,94	1,116	11,26
3	0,947	18,32	0,972	13,87
4	0,850	20,68	0,878	17,60
5	0,786	21,19	0,804	20,89
6	0,722	20,98	0,748	23,57
7	0,694	20,73	0,714	24,28
8	0,692	20,19	0,716	23,80

$$B_{rt} = \sum_{v=1,2,3,\dots}^{N_g} B_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v), \quad (10)$$

где амплитуды  $B_{m,v}$  и аргументы  $\zeta_v$  гармоник с текущим номером  $v$  определяются по данным (7).

Ввиду отсутствия симметрии типа  $B_{rt}(t + T_t/2) = -B_{rt}(t)$  функции ПСМИ в пределах периода  $T_t$  ряд (10) содержит и четные, и нечетные гармоники. Предельный номер гармоники  $N_g$  не должен превышать половины выбранного числа значений

$K_{min}$  из (7). Так, при повороте ротора и магнитного поля за время  $T_t$  с шагом  $0,5^\circ$  число  $K_{min}$  составляло 120, а число  $N_g=60$ .

Номер гармоник  $v$  в (10) соответствует периодичности функций ПСМИ  $B_{rt}(t_k)$  в конкретном расчетном режиме. Так, периоду  $T_t$  для ПСМИ в РН соответствует первая гармоника  $v=1$ . Если же за базовую принять несущую гармонику с номером  $v_s=1$  (2) главного магнитного поля ТГ, изменяющегося с периодом  $T$ , то в этом исчислении каждая гармоника  $v$  ПСМИ имеет номер  $v_s=2 m_s v$ .

Период  $T_{Qs}$  для зубцовых гармоник ПСМИ составляет  $T/Q_s$ , и тогда такие гармоники ПСМИ  $v$  из (10) в глобальном исчислении имеют номер  $v_{Qs} = v Q_s$ .

**Расчетный анализ гармонического состава ПСМИ** проведен для двух ТГ в заявленном режиме НН. Результаты разложения функций ПСМИ в гармонический ряд (10) представлены в табл. 2.

Амплитуды гармоник ПСМИ (кроме первой) даются в относительных значениях

$$B_{m,v}^* = B_{m,v} / B_{m,1}, \quad (11)$$

ТГ	точка	$B_{m,1}$ , МТл	$B_{m,2}^*$	$B_{m,3}^*$	$B_{m,4}^*$	$B_{m,5}^*$	$B_{m,10}^*$	$d_{dist}$
ТГ-1	2	10,03	0,475	0,095	0,050	0,359	0,007	0,855
	3	12,54	0,685	0,174	0,082	0,345	0,007	0,784
	4	14,46	0,718	0,210	0,072	0,268	0,006	0,782
	5	15,20	0,738	0,230	0,065	0,188	0,003	0,781
	6	14,89	0,773	0,237	0,058	0,154	0,003	0,771
	7	14,87	0,729	0,236	0,049	0,106	0,005	0,790
	8	14,55	0,640	0,216	0,046	0,078	0,002	0,826
ТГ-2	2	10,39	0,406	0,050	0,009	0,009	0,004	0,924
	3	11,20	0,553	0,098	0,022	0,011	0,006	0,871
	4	13,08	0,613	0,144	0,031	0,017	0,000	0,846
	5	14,62	0,653	0,141	0,027	0,019	0,001	0,831
	6	15,54	0,677	0,139	0,019	0,018	0,007	0,822
	7	15,95	0,663	0,147	0,022	0,018	0,002	0,827
	8	16,03	0,619	0,143	0,018	0,020	0,002	0,844

где за базу принята амплитуда первой гармоники  $B_{m,1}$ , представленная в табл. 2 для каждой точки.

В табл. 2 гармонический состав дан для точек со 2-ой по 8-ую (в крайних точках т1 и т9 были слишком велики упомянутые уже искажающие пульсации) по 120 интервалам поворота ротора в пределах трети полюсного деления, т.е. в пределах временного периода  $T_t$ . Из 60-ти рассмотренных гармоник ограничили представлением наиболее существенных первых 5-ти, а также 10-ой – зубцовой. Гармоники с 6-ой по 9-ую не превышают 0,009 о.е., а более высокие оказались еще меньше.

Ясно, что данные для разных точек в табл. 2 заметно отличаются, как и данные для двух ТГ, хотя уровень амплитуд первой гармоники для двух ТГ примерно одинаковый.

Очевидно, что наряду с первой гармоникой ( $B_{m,1}^* = 1$ ) весьма заметна роль второй гармоники ( $B_{m,2}^*$ ). Для ТГ-1 зубцовая гармоника ( $B_{m,5}^*$ ) также заметна, хотя и в меньшей степени, а для ТГ-2 зубцовая гармоника ( $B_{m,10}^*$ ) оказалась пренебрежительно малой.

Влияние высших гармоник оценивается коэффициентом искажения кривых ПСМИ

$$d_{dist} = B_{m,1} \left( \sum_{v=1,2,3 \dots}^{N_g} B_{m,v}^2 \right)^{-0,5}, \quad (12)$$

значения которого в табл. 2 заметно отличаются от единицы, т.е. роль совокупности высших гармоник сравнительно с первой является весьма существенной, причем в ТГ-1 эта роль оказывается более значительной, т.к. в нем проявляется влияние явно выраженных зубцовых пульсаций.

Проявление 2-ой гармоники во временных функциях ПСМИ можно объяснить взаимодействием ряда факторов. Во-первых, в режиме нагрузки имеется общий «перекос» главного магнитного поля в зазоре относительно оси ротора  $d$ : как видно на рис. 1, на одном краю большого зуба ротора имеется сгущение силовых линий магнитного поля, на другом – разрежение. Во-вторых, происходит искажающее взаимодействие периодической структуры максимумов токов статора (рис. 3) и не вписывающейся в нее зубчатой структуры ротора и, особенно, большого зуба. В-третьих, важную роль играет угол  $\beta(3)$ , задающий смещение оси действия МДС обмотки статора по отношению к продольной оси ротора. В-четвертых, имеет место несимметрия насыщения большого зуба ротора (из-за первого фактора), что, в принципе, эквивалентно так называемой технологической несимметрии ротора. Все эти факторы в совокупности приводят к тому, что временные функции ПСМИ (рис. 4 и 5) лишены периодической симметрии уже упомянутого выше типа  $B_{rt}(t + T_t / 2) = -B_{rt}(t)$ . А это, как известно, и приводит к появлению четных гармоник, кратных аналогичным гармоникам  $f_{sv}(2)$ .

Сравнительный анализ ПСМИ в двух ТГ, проведенный в этой работе, дополним данными гармонического состава МПС  $\Psi$  и ЭДС  $E$  фазных обмоток статора, который получен в [8]. Непосредственно для режима НН относительные значения амплитуд  $\Psi_{m,v}^* = \Psi_{m,v} / \Psi_{m,1}$  и  $E_{m,v}^* = E_{m,v} / E_{m,1}$  наиболее заметных гармоник для этих величин приведены в табл. 3 (в данном случае имеют место только нечетные гармоники). Номера гармоник  $v$  в табл. 3 являются глобальными, т.е. первая гармоника ( $v=1$ ) здесь соответствует упоминаемому глобальному периоду  $T$  и  $v_s=1$ .

Тип ТГ	$v$	3	5	7	9	11	13
ТГ-1	$\Psi_{m,v}^*$	0,0095	0,0002	0,0007	0,0006	0,0004	0,0002
	$E_{m,v}^*$	0,0286	0,0009	0,0052	0,0050	0,0046	0,0030
ТГ-2	$\Psi_{m,v}^*$	0,0136	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	0,0001
	$E_{m,v}^*$	0,0408	0,0048	0,0044	0,0048	0,0021	0,0019

Временные функции МПС и ЭДС обмотки статора, в отличие от функций ПСМИ на поверхности ротора, очень близки к «чистым» синусоидам. Это подтверждается значением коэффициентов искажения для МПС и ЭДС, аналогичных (12), которые оказались выше 0,9999.

Из табл. 3 видно, что гармонический состав ЭДС обмотки статора для двух ТГ примерно равноценный, даже ТГ-1 имеет преимущество по гармоникам с 3-ей по 9-ую, несмотря на меньшее число зубцов сердечника статора. Для ПСМИ по ее гармоническому составу роли ТГ меняются.

Можно отметить, что гармонические составы ПСМИ (табл. 2) и МПС (табл. 3) плохо коррелируют, что противоречит существующей теории [9], в которой гармонический ряд ПСМИ (10) следует гармонический ряд с частотами  $f_{sv}(2)$  основного магнитного поля ТГ.

### Выводы.

1. Представленный метод анализа ПСМИ в точках на поверхности вращающегося ротора оказывается наиболее детерминированным, так как основан на многопозиционных численно-полевых расчетах магнитного поля, которые являются адекватными для конкретно рассматриваемого режима возбуждения синхронной машины, в том числе и ТГ, и учитывают реальную геометрию их электромагнитной системы и насыщение магнитопровода.

2. Физическими основами колебания ПСМИ на поверхности ротора являются неравномерное распределение по пазам статора максимальных значений полных токов, а также зубчатость сердечника статора. В режиме нагрузки ТГ период изменения временных функций ПСМИ устанавливает первая причина, вторая приводит к наложению на эти функции зубцовых пульсаций. По общей форме кривой и значениям временные функции ПСМИ для двух ТГ с разным числом зубцов сердечника статора в целом подобны, хотя эти функции при меньшем числе зубцов подвержены значительно большим локальным зубцовым пульсациям.

3. Проведенные расчеты показали, что в разных точках на поверхности большого зуба ротора значения и гармонический состав ПСМИ существенно отличаются. Поэтому принятое в классиче-

ской теории СЭМ допущение, что переменная составляющая магнитного поля одинакова по всей поверхности ротора, является весьма грубым и, значит, препятствует получению достоверных числовых результатов расчета.

4. В гармонический состав временных функций ПСМИ входят и четные, и нечетные гармоники, а весомым является ряд гармоник от первой до пятой. Из них, наряду с первой гармоникой, весьма заметна роль второй гармоники. Уровень амплитуд первой гармоники для ТГ с разным числом зубцов статора примерно одинаков. Зубцовая гармоника явно выражена только в ТГ с меньшим числом пазов, при их удвоенном числе такая гармоника оказывается пренебрежительно малой.

5. Предложенный метод расчета и гармонического анализа ПСМИ не связан только с демонстрационным типом электрической машины – турбогенератором, он является универсальным для любых электрических машин, режимов их возбуждения и геометрических форм конструкции.

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. – Харків: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Милых В.И., Полякова Н.В. Сравнительный численно-полевой анализ гармонического состава ЭДС в турбогенераторах // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 45–49.
9. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П., Заславский Д.И., Смотров И.А. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
10. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (11 apr 2012) [Электронный ресурс] : Режим доступа : <http://www.femm.info/wiki/Download>. – 2013.

УДК 621.313

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНІ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ З РІЗНОЮ КІЛЬКІСТЮ ЗУБЦІВ СТАТОРА В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕННЯ

**В.І. Мілих**, докт.техн.наук, **Н.В. Полякова**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна.

e-mail: [mvikpi@kpi.kharkov.ua](mailto:mvikpi@kpi.kharkov.ua)

*Представлено метод розрахунку змінного магнітного поля на поверхні ротора синхронних машин. Він заснований на багатопозиційних чисельно-польових розрахунках магнітного поля при обертанні ротора і зміні струмів в обмотці статора. При цьому враховуються реальна геометрія електромагнітної системи і насичення магнітопроводу. Виконано порівняльний розрахунок і гармонійний аналіз змінної складової магнітної індукції в режимі номінального навантаження для двох турбогенераторів з різною кількістю зубців осердя статора. Запропонований метод є універсальним для різних електричних машин і режимів їхнього збудження. Бібл. 10, табл. 3, рис. 5.*

**Ключові слова:** турбогенератор, поверхня ротора, змінна складова магнітної індукції, чисельно-польовий метод, порівняльний розрахунок, кількість зубців статора, гармонійний аналіз, режим навантаження.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE VARIABLE MAGNETIC FIELD ON THE SURFACE OF THE ROTOR OF TURBOGENERATORS WITH DIFFERENT NUMBERS OF STATOR TEETH IN THE LOAD CONDITION

**V.I. Milykh, N.V. Polyakova**  
National Technical University «Kharkov polytechnic institute»,  
Frunze, 21, 61002, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: [mvikpi@kpi.kharkov.ua](mailto:mvikpi@kpi.kharkov.ua)

*The method of calculating of the variable magnetic field is presented on the rotor surface of the synchronous machines. It is based on the multi-position numerical field calculations of the magnetic field in rotating of the rotor and the changing currents in the stator winding. This takes into account the real geometry of the electromagnetic system and the saturation of the magnetic core. A comparative calculation and harmonic analysis of the variable component of the magnetic induction are performed in the mode of the rated load for the two turbogenerators with a different amounts of teeth of the stator core. The proposed method is universal for different electric machines and modes of their excitation. References 10, tables 3, figures 5.*

**Key words:** turbogenerator, surface of the rotor, the variable component of the magnetic induction, numerical field calculation, a comparative calculation, the amounts of stator teeth, harmonic analysis, the load condition mode.

1. Voldek A.I. Electric machines. – Leningrad: Energiia, 1978. – 832 p. (Rus)
2. Zozulin Yu.V., Antonov O.Ye., Bychik V.M., Borychevskiy A.M., Kobzar K.O., Livshyts O.L., Rakohon V.H., Rohovyi I.Kh., Khaimovych L.L., Cherednyk V.I. Creation of new types and modernization of the existing turbogenerators for the thermal electric stations. – Kharkiv: PF «Kolehium», 2011. – 228 p. (Ukr)
3. Korn G., Korn T. Reference book on mathematics for research workers and engineers. – Moskva: Nauka, 1973.– 832 p. (Rus)
4. Milykh V.I., Polyakova N.V. Harmonious analysis of electromagnetic sizes three-phase winding of stators of turbogenerator on basis classic and numeral field methods // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2013. – №3. – Pp. 40–49. (Rus)
5. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines on the basis of numeral calculations of the magnetic fields // *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. – 2006. – №2. – Pp. 40–46. (Rus)
6. Milykh V.I., Polyakova N.V. Organization of the numerical calculation of the magnetic field of turbogenerator in load mode with providing of prescribed its output parameters // *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. – №1. – Pp. 36–41. (Rus)
7. Milykh V.I., Polyakova N.V. System of directions and correlations of phases of electromagnetic sizes at the numeral calculations of the magnetic fields in a turbogenerator // *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. – 2011. – №5. – Pp. 33–38. (Rus)
8. Milykh V.I., Polyakova N.V. Comparative the numeral-field analysis of harmonic composition EMF in turbogenerators // *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. – 2012. – №2. – Pp. 45–49. (Rus)
9. Titov V.V., Khutoretskii G.M., Zagorodnaia G.A., Vartanian G.P., Zaslavskii D.I., Smotrov I.A. Turbogenerators. – Leningrad: Energiia, 1967. – 895 p. (Rus)
10. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (11 apr 2012) [elektronnyj resurs] : rezhim dostupa : <http://www.femm.info/wiki/Download>. – 2013.

Надійшла 23.07.2013  
Остаточний варіант 05.11.2013