

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭДС В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

*Подано найбільш детермінований метод гармонічного аналізу часових функцій ЕРС в електричних машинах. Він заснований на чисельних розрахунках обертових магнітних полів і використанні миттєвих значень магнітного потокозчеплення. Цим методом проведений порівняльний гармонічний аналіз ЕРС в трифазній обмотці для двох турбогенераторів, що відрізняються кількістю пазів статора, в режимах неробочого ходу і навантаження.*

*Представлен наиболее детерминированный метод гармонического анализа временных функций ЭДС в электрических машинах. Он основан на численных расчетах вращающихся магнитных полей и использовании мгновенных значений магнитного потокозцепления. Этим методом проведен сравнительный гармонический анализ ЭДС в трехфазной обмотке для двух турбогенераторов, отличающихся числом пазов статора, в режимах холостого хода и нагрузки.*

**Введение.** В классической теории синхронных машин и соответствующих их расчетах [1, 2] гармонический анализ ЭДС в трехфазной якорной обмотке выполняется на основе ряда упрощений. Основой такого анализа является использование условных ступенчатых координатных кривых магнитодвижущей силы (МДС) обмоток, а также соответствующего распределения магнитной индукции в зазоре. При этом магнитные поля ротора и статора рассматриваются отдельно, игнорируется зубчатость сердечников и их взаимное перемещение, в крайнем случае – делается умозрительная оценка влияния односторонней зубчатости. Учет реального неравномерного насыщения магнитопровода сводится к введению единого коэффициента насыщения. Делается неадекватный переход от координатных функций распределения магнитного поля к временным функциям. В итоге выявляется лишь принципиальная суть наличия гармонического состава ЭДС, но надеяться на достоверные числовые значения его составляющих не приходится ввиду отмеченных и прочих серьезных допущений.

Отказаться от практически всех допущений, сколько-нибудь влияющих на результаты гармонического анализа магнитного поля и ЭДС в обмотках электрических машин практически любых типов, позволяют численные методы расчета магнитных полей в сочетании с современным компьютерным программным обеспечением. Основы такого подхода заложены в [3-5], а в данном случае представляется его дальнейшее развитие и расчетное применение.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является представление принципа численно-полевого гармонического анализа временных функций ЭДС в обмотках электрических машин и практическая демонстрация соответствующего анализа на примере двух крупных турбогенераторов с разной зубчатой структурой статора. Суть принципа, обеспечивающая наиболее детерминированный и адекватный гармонический анализ, заключается в использовании временных функций магнитного потокозцепления (МПС), получаемых на основе численных расчетов синхронно вращающихся магнитных полей статора и ротора.

В качестве демонстрационных моделей расчетного анализа избраны два турбогенератора [6], близкие по мощности и конструкции (рис. 1, 2).

**Объекты исследования.** Первый турбогенератор (ТГ) (ТГ-1 на рис. 1) 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  $f=50$  Гц. Его 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 – 0,8; числа последовательных витков фазной обмотки статора  $N_s=10$ , обмотки ротора  $N_f=180$ .

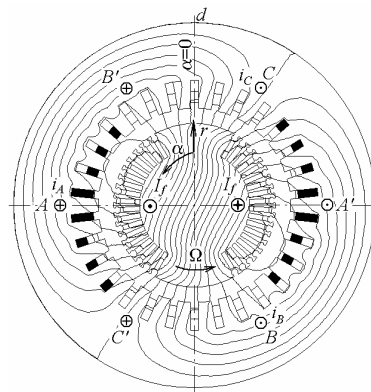


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора ТГ-1

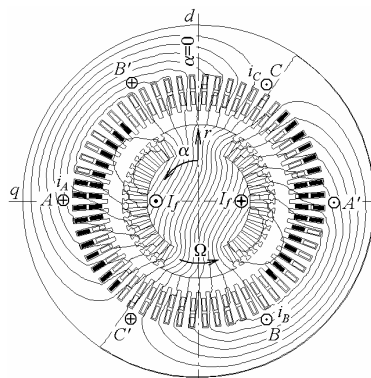


Рис. 2. Расчетная модель турбогенератора ТГ-2

Второй ТГ (ТГ-2 на рис. 2) имеет мощность 225 МВт и отличается наличием в обмотке статора двух параллельных ветвей  $a = 2$ ; расчетной длиной –  $l_a=5,1$  м и номинальным фазным током  $I_{sN}=9703$  А.

Главное же отличие ТГ составляют числа пазов статора  $Q_s$ ; в ТГ-1 – 30, в ТГ-2 – 60.

В поперечных сечениях электромагнитной системы ТГ на рис. 1 и рис. 2 обозначены фазные зоны обмотки статора А-А', В-В' и С-С' (первая выделена затемнением);  $\Omega$  – угловая скорость вращения ротора

и магнитных полей;  $r, \alpha$  – принятая полярная система координат;  $d, q$  – продольная и поперечная оси ротора.

**Расчетные режимы и магнитные поля в ТГ.** В поперечном сечении ТГ (рис. 1, 2) квазистационарное магнитное поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением для аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала  $A_z$  (ВМП) [7]. Численный расчет этого поля проводится с использованием общедоступной программы FEMM [8] на основе метода конечных элементов. Результатом расчета является дискретное координатное распределение  $A_z(r, \alpha)$ , на основе чего можно определить целый ряд электромагнитных параметров ТГ [7], в том числе и распределение составляющих магнитной индукции.

Гармонический анализ и, соответственно, расчеты магнитных полей проводились в двух режимах – холостого хода (ХХ) и номинальной нагрузки (НН). Организация расчетов осуществлялась в соответствии с установленным в [9, 10] порядком. Оба режима согласованы так, чтобы в них магнитное поле имело одинаковый уровень и магнитная система была примерно одинаково насыщена.

Так, в ТГ-1 для режима ХХ ток возбуждения  $I_f$  составлял 826,8 А, для режима НН 1881,7 А, в ТГ-2 – 770,4 и 1994,9 А, соответственно.

Фазные токи обмотки статора определялись в определенные моменты времени  $t$ :

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

где  $I_m = \sqrt{2}I_s$  – их амплитуда;  $I_s$  – действующее значение;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\beta$  – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к оси  $d$  ротора.

Значения  $\beta$  получены методом из [10], а именно, при НН  $\beta = -155,74^\circ$  для ТГ-1 и  $\beta = -158,47^\circ$  – ТГ-2.

В тех положениях роторов, которые представлены на рис. 1-2, принимались начала отсчета времени  $t=0$  и их углового положения  $\alpha=0$ . На этих рисунках показаны соответствующие картины магнитных полей для режима НН.

На рис. 3 показаны координатные распределения радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r$  по круговой средней линии зазора для двух ТГ в режимах ХХ и НН ( $\tau_p$  – полюсное деление). Здесь и далее обозначение  $f$  соответствует магнитному полю ротора,  $l$  – совместному полю обмоток в режиме нагрузки.

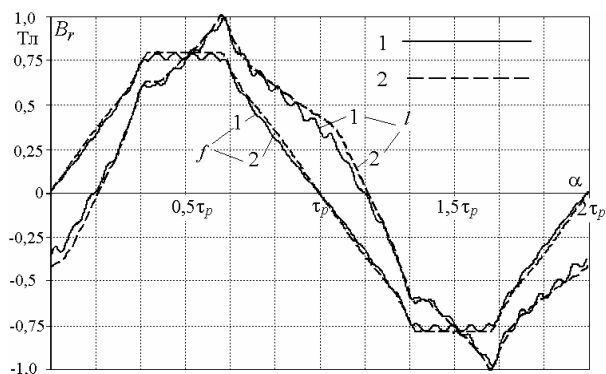


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии зазора в двух режимах при  $t=0$  в исходной позиции ротора: 1 – ТГ-1; 2 – ТГ-2

Очевидно, что если ориентироваться на эти координатные функции  $B_r(\alpha)$ , то ожидать приемлемых гармонического состава и формы кривой ЭДС в обоих ТГ не приходится. Хотя можно отметить, что при большем числе пазов статора в ТГ-2 кривые  $B_r(\alpha)$  более гладкие, в отличие от ТГ-1, где явно проявляются зубцовые пульсации. Особенно это впечатление усиливается, если взять распределение  $B_r(\alpha)$  вблизи поверхности одного из сердечников. Как пример, на рис. 4 показано распределение  $B_r(\alpha)$  на линии окружности, отстоящей от расточки статора на 10 мм.

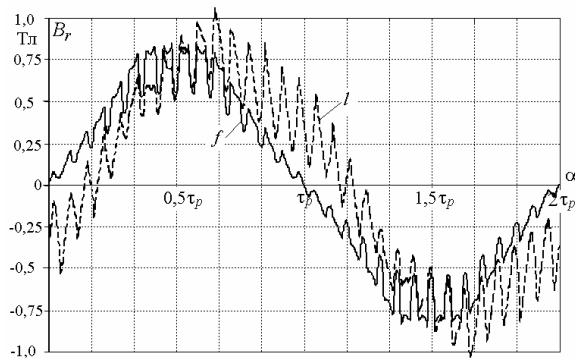


Рис. 4. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции в ТГ-1 на линии окружности вблизи расточки статора в двух режимах при  $t=0$  в исходной позиции ротора

Становится понятным, что координатное распределение магнитной индукции в зазоре нецелесообразно брать за основу гармонического анализа ЭДС в ТГ.

**Принцип численно-полевого гармонического анализа.** При наиболее детерминированном гармоническом анализе ЭДС в ТГ базовой величиной является магнитное потокоцепление (МПС) фазной обмотки статора [3-5]. В частности, МПС фазной обмотки  $A-A'$  (рис. 1, 2)

$$\Psi_A = N_s I_a \left( \frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (2)$$

$S_A, S_{A'}$  – площади сечения по всем токонесящим элементам фазных зон  $A$  и  $A'$  (на рисунках затемнены);  $K_A, K_{A'}$  – числа конечных элементов их дискретизации;  $A_{z,av,j}$  – среднее значение ВМП в  $j$ -том элементе площадью  $\Delta S_j$ . Заметим, что в программе FEMM предусмотрена процедура автоматического извлечения МПС для зон, выделяемых расчетчиком.

Эффект вращения магнитных полей достигается их многопозиционными расчетами с временным шагом  $\Delta t$  в моменты времени

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

где  $K_{\min}$  – минимальное число шагов, которое позволяет сформировать функции МПС и ЭДС на их полном периоде изменения  $T$ .

Синхронное вращение ротора и магнитного поля обмотки статора обеспечивалось заданием фазных токов (1) в определенные моменты времени (3) и поворотами ротора в соответствующие угловые позиции

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

где угловой шаг поворотов ротора

$$\Delta \alpha = \Omega \Delta t. \quad (5)$$

После расчета магнитного поля во все заданные моменты времени (3) и получения МПС (2) образуются

валась временная функция МПС фазной обмотки статора в дискретно-численной форме

$$\Psi_{s,k}(t_k); t_k = \Delta t (k-1); k=1,2,\dots,K, \quad (6)$$

где  $K$  – число значений, необходимых для гармонического разложения этой функции.

Повороты ротора (4), изменение токов статора (1), а также сбор информации (6) проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM. Про каждом очередном расчете магнитного поля генерировалась конечно-элементная структура примерно из 30 тыс. узлов и 60 тыс. треугольников.

Для других фазных обмоток временные функции МПС получались на основе сформированной по (6) функции  $\Psi_{A,k}(t_k)$  для фазной обмотки  $A$ , а именно:

$$\Psi_{B,k}(t_k) = \Psi_{A,k}(t_k - \frac{2}{3}T); \Psi_{C,k}(t_k) = \Psi_{A,k}(t_k + \frac{2}{3}T). \quad (7)$$

Сформированные так временные функции МПС трех фазных обмоток в двух режимах ТГ-1 показаны на рис. 5 в пределах полного периода  $T$ . Для ТГ-2 на рис. 6, где ограничились только режимом НН.

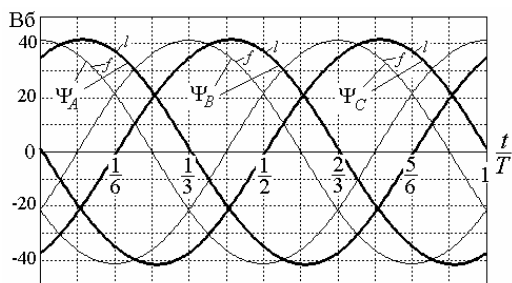


Рис. 5. Временные функции фазных МПС для ТГ-1

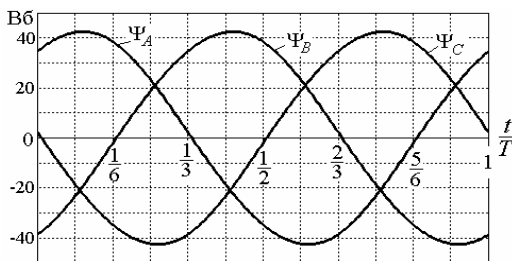


Рис. 6. Временные функции фазных МПС для ТГ-2

Первое, что обращает внимание на рис. 5-6, это близость временных функций МПС к синусоидальному характеру (насколько близко – проясняется далее в результате гармонического анализа). И главное здесь то, что этот благоприятный для ТГ характер весьма далек от характера координатных функций магнитной индукции в зазоре (рис. 3, 4).

Минимизация количества расчетов поля  $K_{\min}$  (3) для получения необходимого числа данных  $K$  (6) оказалась возможна на основе следующих соображений.

Во-первых, в ТГ имеет место условие полупериодичности поля по координате  $\alpha$ :

$$A_z(r, \alpha + \pi) = -A_z(r, \alpha), \quad (8)$$

что позволяет обойтись формированием функции (6) в пределах полупериода  $T/2$ , т.е. при повороте ротора в пределах полюсного деления  $\tau_p$  или угла  $\pi$ .

Во-вторых, сформировать функцию  $\Psi_{s,k}(t_k)$  в пределах  $T/2$  можно, используя расчеты поля в пределах

$T/6$ , т.е. поворачивая ротор в пределах  $\tau_p/3$  или на  $60^\circ$  (электрических градусов). С этой целью по (2) информация собирается для каждой фазной обмотки и получаются в числовой форме три функции:

$$\Psi_{A,k}(t_k); \Psi_{B,k}(t_k); \Psi_{C,k}(t_k); t_k = \Delta t (k-1); k=1,2,\dots,K_{\min}. \quad (9)$$

После этого для фазной обмотки  $A$  с учетом (7) формируется временная функция на полупериоде с учетом взаимного соответствия функций МПС фазных обмоток на рис. 5-6:

$$\Psi_{A,k}(t_k + T/6) = -\Psi_{B,k}(t_k); \Psi_{A,k}(t_k + T/3) = \Psi_{C,k}(t_k) \quad (10)$$

при  $k=1,2,\dots,K_{\min}$ , и с учетом (8) на полном периоде

$$\Psi_{A,k}(t_k + T/2) = -\Psi_{A,k}(t_k) \text{ при } k=1,2,\dots,3 \cdot K_{\min}. \quad (11)$$

В данной работе принят достаточно малый угол поворота  $\Delta\alpha=1^\circ$  и на полюсном делении (аналогично – в пределах временного полупериода) получалось  $K=180$  позиций, а реально для формирования дискретных функций (7) достаточно было провести расчеты в  $K_{\min}=60$  позициях (4). Исходной позиции соответствовал угол  $\alpha_1=0$ , конечной –  $\alpha_{60}=59^\circ$ . Эти 60 автоматизированных расчетов поля по программе FEMM на компьютере среднего уровня (2,8 ГГц) длились 43 минуты. Примеры картин магнитного поля для режимов ХХ и НН в исходном и конечном положениях даны для ТГ-1 на рис. 7. Повороты и взаимное соответствие магнитных полей очевидны.

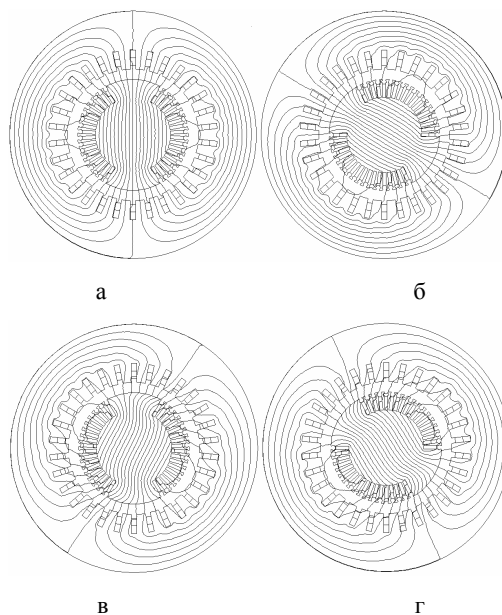


Рис. 7. Магнитные поля ТГ-1: а, б – режим ХХ, в, г – режим НН, причем а, в – при  $t=0$  в исходной позиции ротора; б, г – в момент времени после поворота ротора на  $59^\circ$

В дополнение к этому и к рис. 3 на рис. 8 добавлен график  $B_z(\alpha)$  для НН ТГ-1 при повороте ротора на  $59^\circ$ .

Учитывая уже принятые функции токов (1), временная дискретная функция МПС (6)  $\Psi_{s,k}(t_k)$  раскладывалась в единый косинусный ряд [11]

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^N \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \zeta_v). \quad (12)$$

Амплитуды и аргументы гармоник

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

определяются по данным (6) через коэффициенты индивидуальных синусного и косинусного рядов для гармонической составляющей с текущим номером  $v$ :

$$s_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{s,k} \sin v \omega t_k; c_v = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_{s,k} \cos v \omega t_k. \quad (14)$$

Теперь на основании закона электромагнитной индукции можно через (12) определить гармонический ряд фазной ЭДС

$$e_s = -\frac{d\Psi}{dt} = \sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} v \omega \Psi_{m,v} \cos(v \omega t + \zeta_v - \pi/2) \quad (15)$$

и непосредственно амплитуды и действующие значения ее гармоник

$$E_{m,v} = v \omega \Psi_{m,v}; E_v = \frac{1}{\sqrt{2}} v \omega \Psi_{m,v}. \quad (16)$$

Ряды (12) и (15) содержит только нечетные гармоники – ввиду условий (8) и (11). Допустимый номер гармоники  $N_g$  не должно превышать выбранного для (6) числа значений  $K$  (это число интервалов  $\Delta t$  на полупериоде, т.е. на  $T/2$ ).

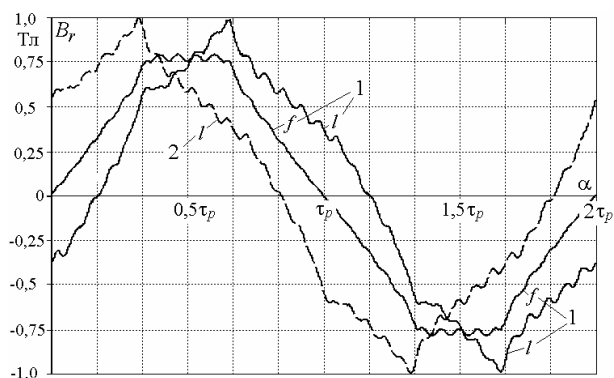


Рис. 8. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по средней линии зазора в ТГ-1 в режимах ХХ – f и НН – l: 1 – при  $t=0$  в исходной позиции ротора; 2 – в момент времени после его поворота на  $59^\circ$

**Расчетный анализ** гармонического состава МПС и ЭДС фазных обмоток статора проведен для упомянутых уже режимов ХХ и НН.

Результаты разложения функций фазных ЭДС по выражениям (12), (13) и (16), представлены в табл. 1 и табл.2. В табл.1 даются относительные значения амплитуд наиболее весомых гармоник – начал рядов МПС и ЭДС

$$\Psi_{m,v}^* = \Psi_{m,v} / \Psi_{m,1}, E_{m,v}^* = E_{m,v} / E_{m,1}, \quad (17)$$

где за базу приняты амплитуды  $\Psi_{m,1}$  и  $E_{m,1}$  первых гармоник.

Таблица 1

Относительные значения амплитуд гармоник								
Тип ТГ	Режим	v	3	5	7	9	11	13
ТГ-1	ХХ	$\Psi_{m,v}^*$	0,0138	0,0002	0,0004	0,0003	0,0001	0,0000
		$E_{m,v}^*$	0,0415	0,0008	0,0031	0,0026	0,0009	0,0002
	НН	$\Psi_{m,v}^*$	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	ХХ	$\Psi_{m,v}^*$	0,0071	0,0001	0,0003	0,0004	0,0000	0,0000
		$E_{m,v}^*$	0,0212	0,0003	0,0021	0,0032	0,0002	0,0002
	НН	$\Psi_{m,v}^*$	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

Дополнительно отметим, что для ТГ-1 еще наиболее заметные амплитуды ЭДС в режиме ХХ состав-

ляли  $E_{m,v}^*=0,0011..0,0061$  для гармоник с номерами  $v=29, 49, 53, 55, 59, 65, 67, 71, 73, 79, 85, 89, 91, 95, 101, 109, 113, 115, 119, 121, 125, 127, 131, 133, 137, 139, 143, 145, 149, 155, 157, 161, 163, 165, 167, 169, 173, 175$ ; для режима НН  $E_{m,v}^*=0,0011..0,0047$  для гармоник  $v=17, 19, 35, 41, 43, 49, 55, 71, 73, 77, 79, 83, 85, 89, 91, 95, 97, 101, 103, 107, 109, 111, 113, 115, 119, 121, 125, 133, 137, 139, 141, 143, 145, 149, 151, 153, 155, 157, 161, 163, 167, 169, 173, 175, 179$ .

Для ТГ-2 спектр заметных гармоник оказался менее представительным, а именно – наиболее заметные амплитуды ЭДС в режиме ХХ составляли  $E_{m,v}^*=0,0011..0,0027$  для гармоник с номерами  $v=59, 125, 127, 143, 145, 161, 163, 167, 169, 179$ ; для режима НН  $E_{m,v}^*=0,0012..0,0064$  для гармоник  $v=23, 25, 29, 31, 41, 43, 59, 61, 67, 73, 77, 91, 101, 113, 119, 131, 133, 137, 139, 161, 163, 167, 173, 175, 179$ .

В табл. 2 выделены максимальное значение МПС  $\Psi_{max}$ , а также данные первых гармоник: амплитуда МПС и действующее значение ЭДС, начальные фазы из (12), (15).

Таблица 2

Расчетные параметры для первой гармоники							
Тип ТГ	Режим	$\Psi_{max}$ Вб	$\Psi_{m,1}$ Вб	$E_1$ , В	$k_{dist,\Psi}$	$k_{dist,E}$	$\zeta_1$ , градус
ТГ-1	ХХ	41,28	41,85	9297	0,9999	0,9990	0,10
	НН	41,61	41,72	9268	1,0000	0,9994	-32,26
ТГ-2	ХХ	42,19	42,50	9441	1,0000	0,9997	0,01
	НН	42,60	42,36	9411	0,9999	0,9990	-33,74

Кроме того, даны коэффициенты искажения кривых МПС и ЭДС

$$k_{dist,\Psi} = \frac{\Psi_{m,1}}{\sqrt{2} \Psi_{eff}}; k_{dist,E} = \frac{E_1}{E_{eff}}, \quad (18)$$

где действующие значения их полных функций

$$E_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} E_{m,v}^2}; \Psi_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{v=1,3,5\dots}^{N_g} \Psi_{m,v}^2}$$

Очевидно, что эти коэффициенты достаточно близки к единице, и это в целом свидетельствует о достаточно хорошей форме кривых МПС и ЭДС.

На рис. 9 построены временные функции МПС  $\Psi_A$  и ЭДС  $e_A$  по результатам разложения (12) и (15) для фазной обмотки А. Кроме того, для ЭДС более тонкой линией построены синусоиды первой гармоники  $e_{A,1}$  для двух режимов.

Отклонения полных функций (15), с учетом всех гармоник до высшего номера  $N_g=179$ , от первой гармоники очевидны, хотя и незначительны. Причем для ТГ-1, по сравнению с ТГ-2, в режиме ХХ отклонения побольше, в режиме НН – наоборот, что подтверждают и данные табл.1 и табл.2. Характерно, что для режима НН отличия результирующая кривая несколько "заваливается" вправо по отношению к кривой 1-ой гармоники, что косвенно подтверждает "перекос" кривых  $B_r(\alpha)$  на рис. 3 в этом режиме, в отличие от более симметрированных кривых для режима ХХ.

В кривых  $e_A$ , и особенно в режиме НН, на рис. 9 заметны некоторые "расчетные шероховатости" – пульсации из-за высших гармоник. Но они не носят чрезмерно губительного характера – это подтверждено значениями коэффициентов искажения (табл.2).

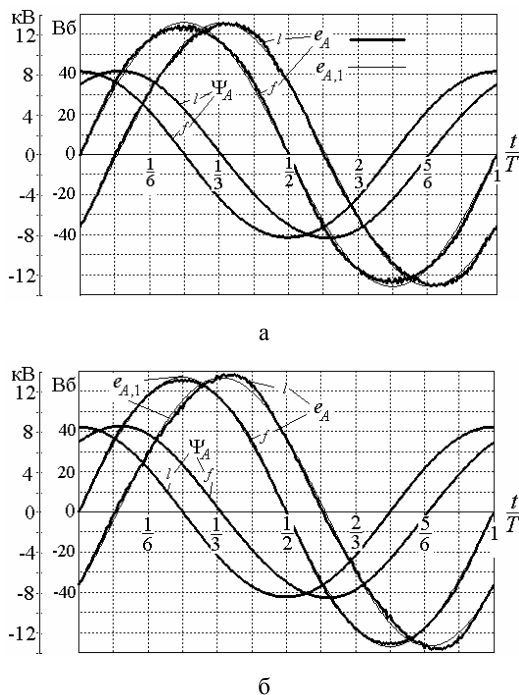


Рис. 9. Временные функции МПС и ЭДС фазной обмотки в режимах ХХ ( $f$ ) и НН ( $l$ ): а) ТГ-1; б) ТГ-2

**Выводы.** 1. Представленный метод гармонического анализа ЭДС в обмотке статора ТГ является наиболее детерминированным, так как основан на использовании временных функций магнитных потоков сцеплений, формируемых посредством численных расчетов магнитного поля в процессе его вращения. Существенным является уход от традиционного рассмотрения магнитных полей в зазоре и условно выделяемых полей рассеяния. Этот метод лишен целого ряда условностей, принятых в классической теории ЭМ, которая объясняет существование спектра гармоник, но не дает для них реалистичных значений.

2. В рассмотренных ТГ в функциях фазных ЭДС присутствует весьма широкий спектр гармоник с относительными значениями на уровне 0,001...0,04 от амплитуды первой гармоники, причем выделяется третья гармоника. Но в целом характер изменения ЭДС близок к синусоидальному, при незначительных искажениях, что и естественно для рассмотренных реалистичных конструкций ТГ.

3. Удвоение числа зубцов статора ТГ не привело к заметному изменению формы кривых ЭДС: в режиме ХХ – чуть улучшило, в режиме НН – наоборот.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Титов В.В., Хугорский Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
3. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ магнитного поля и электродвижущих сил в полностью сверхпроводниковом криотурбогенераторе (и объективный взгляд на реакцию якоря) // *Электротехника и электромеханика*. – 2002. – №2. – С. 47-52.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ характера ЭДС, вызываемых реакцией якоря в турбогенераторе // *Вісник НУ "Львівська політехніка"*, №487, *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Львів: НУ "ЛП", 2003. – С. 10-17.
5. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращаю-

щихся магнитных полей в различных режимах // *Электротехника и электромеханика*. – 2004. – № 4. – С. 46-51.

6. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Ю.В.Зозулін, О.С.Антонов, В.М.Бичік та ін. – Харків: ПФ "Колегіум", 2011. – 228 с.

7. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // *Электротехника и электромеханика*. – 2006. – № 2. – С. 40-46.

8. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.

9. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – № 5. – С. 33-38.

10. Милых, В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // *Электротехника и электромеханика*. – 2012. – № 1. – С. 36-41.

11. 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. Titov V.V., Hutoreckij G.M. i dr. Turbogeneratoriy. -L.: `Energiya, 1967. - 895 s. 3. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz magnitnogo polya i `elektrodvizhushchih sil v polnost'yu sverhprovodnikovom krioturboгенераторе (i ob`ektivnyj vzglyad na reakciyu yakorya) // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2002. - №2. -S. 47-52. 4. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz haraktera `EDS, vzyvayemyh reakciy yakorya v turbogeneratorе // *Visnik NU "L'viv's'ka politehnika"*, №487, *Elektroenergetichni ta elektromehanični sistemi*. L'viv: NU "LP", 2003. - S. 10-17. 5. Milyh V.I., Polyakova N.V. Garmonicheskij analiz `EDS v turbogeneratorе na osnove chislennyh raschetov vraschayushchihysya magnitnyh polej v razlichnyh rezhimah // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2004. - № 4. - S. 46-51. 6. Stvorenyya novih tipiv ta modernizaciya diyuchih turbogeneratoriv dlya teplovyh elektrichnih stancij // Yu.V.Zozulin, O.S.Antonov, V.M.Bichik ta in. - Harkiv: PF "Kolegium", 2011. - 228 s. 7. Milyh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie `elektromagnitnyh parametrov `elektricheskikh mashin na osnove chislennyh raschetov magnitnyh polej // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2006. - № 2. - S. 40-46. 8. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <<http://femm.berlios.de>>. 9. Milyh, V.I., Polyakova N.V. Sistema napravlenij i fazovyh sootnoshenij `elektromagnitnyh velichin pri chislennyh raschetah magnitnyh polej v turbogeneratorе // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2011. - № 5. - S. 33-38. 10. Milyh, V.I., Polyakova N.V. Organizaciya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannyh ego vyhodnyh parametrov // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2012. - № 1. - S. 36-41. 11. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov*. M.: Nauka, 1973. - 832 s.

Поступила 12.02.2012

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,  
Полякова Наталья Владимировна  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
кафедра "Электрические машины"  
тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua.

Milykh V.I., Polyakova N.V.

#### Comparative numerical field analysis of EMF harmonic composition in turbogenerators.

The paper presents the most deterministic method of EMF temporal function harmonic analysis in electric machines. It is based on numerical calculations of rotary magnetic fields and utilization of instantaneous values of magnetic linkage. The method is applied to comparative harmonic analysis of the EMF in three-phase windings of two turbogenerators with different number of the stator slots in the idle mode and under load.

**Key words** – turbogenerator, magnetic field, numerical calculations, magnetic linkage, EMF, harmonic analysis.