

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УКРОЧЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проведена оценка турбогенератора в случаях укороченной и диаметральной обмотки статора. Сравнимыми параметрами являются форма и гармонический состав ЭДС этой обмотки, переменная составляющая магнитного поля на поверхности ротора, пульсации электромагнитного момента.

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля, что обертається, проведена оцінка турбогенератора у випадках укороченої і діаметральної обмотки статора. Порівнюваними параметрами є форма і гармонійний склад ЕРС цієї обмотки, змінна складова магнітного поля на поверхні ротора, пульсації електромагнітного моменту.

**Введение.** В электрических машинах (ЭМ) переменного тока эффективным средством улучшения формы координатной функции МДС и временной функции ЭДС обмотки статора является ее распределение и укорочение [1]. Классически оценка качества разных схем обмоток проводится на основе гармонического анализа указанных функций, построенного на ряде серьезных допущений, в том числе, на использовании ступенчатой функции распределения МДС в зазоре. Однако, как показано в [2], традиционный способ гармонического анализа в ЭМ не дает адекватных числовых результатов – это проверено на основе численно-полевых расчетов вращающихся магнитных полей (МП). Последнее позволяет оценить и другие сопутствующие явления, которые влияют на качество работы ЭМ и изменяются с изменением схемы обмотки. Это особенно важно для таких ответственных ЭМ, как крупные турбогенераторы (ТГ), и становится актуальным в связи с попытками отказаться от укорочения трехфазной обмотки статора по соображениям технологии и электробезопасности.

**Цель работы.** Данная работа посвящена оценке эффективности укорочения обмотки статора мощного турбогенератора на основе численно-полевых расчетов вращающихся магнитных полей. Это проводится посредством временных функций ЭДС обмотки статора, переменной составляющей магнитного поля (ПСМП) на поверхности вращающегося ротора и пульсаций электромагнитного момента (ЭММ).

С развитием численных методов расчета МП [3, 4] проблема достаточно точного определения указанных величин становится в значительной мере решенной, т.к. при этом уже нет ограничений на учет реальных конструктивных форм машин в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода.

**Объект исследования.** Демонстрация расчетных результатов проводится на трехфазном ТГ [5], сравниваемые варианты электромагнитной системы которого даны на рис. 1. Он имеет номинальные: мощность  $P_N=340$  МВт; фазные напряжение  $U_{sN}=11547$  В и ток  $I_{sN}=11547$  А; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN}=0,85$ ; частоту  $f_s=50$  Гц. Его число пар полюсов  $p=1$ ; активная длина  $l_a=5,308$  м; немагнитный зазор – 77,5 мм; радиус ротора – 0,56 м; числа витков его фазной обмотки – 10, обмотки ротора – 126. Сравнимые расчетные модели отличаются обмоткой

статора: на рис. 1,а она имеет относительное укорочение  $\beta_s=0,8$  (вариант ТГ-1), на рис. 1,б – выполнена диаметральной, т.е.  $\beta_s=1$  (вариант ТГ-2).

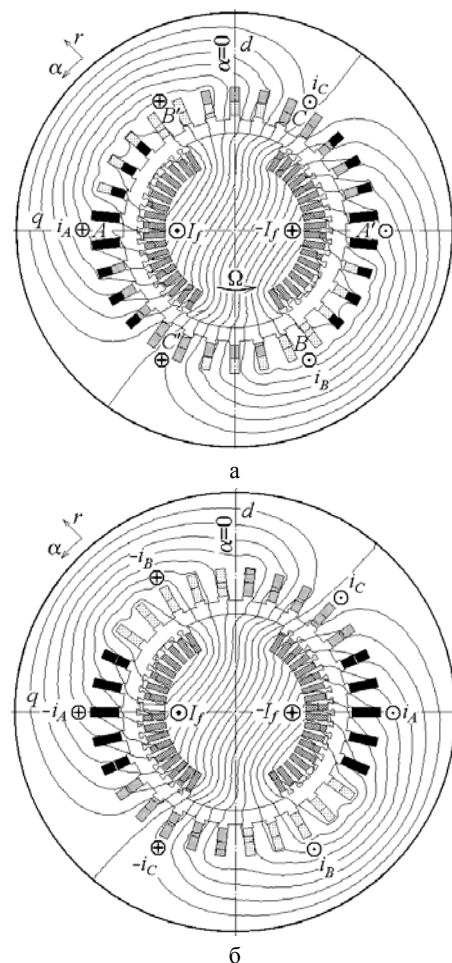


Рис. 1. Расчетные модели турбогенератора

На рис. 1 фазные зоны обмотки статора  $A-A'$ ,  $B-B'$  и  $C-C'$  выделены разным затемнением. Направления координат  $(r, \alpha)$  полярной системы, угловой скорости ротора и магнитных полей  $\Omega$ , токов в обмотках определяются по системе, введенной в [6]. Здесь направления токов соответствуют режиму нагрузки в начальный момент времени  $t$ , с которого рассматриваются искомые и представляемые далее временные функции.

**Теоретические основы расчета электромагнитных величин.** Значения заявленных величин ЭДС, ПСМП и ЭММ получаются на основе расчета МП ТГ, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами МП [2, 4, 7] для задаваемого с шагом  $\Delta t$  временного ряда

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); k=1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

с вращением ротора посредством его установки в угловые позиции

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

и с синхронным вращением МП поля статора вычислением симметричной системы фазных токов в стержнях его обмотки в моменты времени  $t_k$  (1):

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

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

где  $K$  – число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения;  $\Delta\alpha = \Omega \cdot \Delta t$  – угловой шаг вращения ротора;  $\omega = 2\pi f_s$  – угловая частота;  $\Omega = \omega/p$  – угловая скорость;  $I_m = \sqrt{2}I_s$  – амплитуда и  $I_s$  – действующее значение фазного тока;  $\beta$  – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора  $d$  [6].

Электромагнитные процессы в ТГ рассматриваются в режиме номинальной нагрузки (НН) при фазных токах статора  $I_{SN}$ . Ток возбуждения  $I_f = 3151,4$  А и угол  $\beta = -160,47^\circ$  получены методом из [8]. В базовом варианте ТГ (рис. 1,а) эти значения после расчета магнитного поля обеспечивают заданные номинальные напряжение и коэффициент мощности.

Для исследования электромагнитных процессов в активной части ТГ МП рассчитывалось в двумерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1). Поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением [3, 4] через векторный магнитный потенциал и рассчитывается численным методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по общедоступной программе FEMM [9]. Картины МП в режиме НН в исходный момент времени представлены на рис. 1 силовыми линиями.

Искомые временные функции разных величин на их периодах формировались в процессе вращения МП согласно (1) – (3), как это представлено в [2, 4, 7]. Все операции при работе программы FEMM выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [9].

В итоге временные функции электромагнитных величин представлялась дискретными числовыми массивами типа  $\Gamma(t_k); k=1,2,\dots,K$ , где пока использован некий абстрактный символ  $\Gamma$ .

**Магнитное потокоцепление и ЭДС фазной обмотки статора.** Как уже представлялось в [4], основой для ЭДС является временная функция магнитного потокоцепления (МПС) фазной обмотки статора. Для этого, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося МП (угол поворота ротора  $\Delta\alpha$  составлял  $1^\circ$ ), была сформирована дискретная временная функция МПС  $\Psi_s(t_k), k=1,2,\dots,K$ . Она имеет тот же период  $T$ , что и токи (3), и сформирована по числу точек

$K=360$ . Получение значений МПС после расчета МП не представляет труда и осуществляется посредством специальной опции, имеющейся в программе FEMM.

Функция  $\Psi_s(t_k)$  раскладывается аналогично [2, 4] по известным правилам в гармонический ряд из нечетных гармоник вплоть до номера  $N_g$ :

$$\Psi_s = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} \Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \gamma_v), \quad (4)$$

что позволяет, на основании закона электромагнитной индукции, перейти к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v\omega \Psi_{m,v} \sin(v\omega t + \gamma_v), \quad (5)$$

откуда получаются амплитуды гармоник  $E_{m,v} = v\omega \Psi_{m,v}$ .

На рис. 2 представлены найденные временные функции ЭДС (5) для двух вариантов ТГ, изображенных на рис. 1.

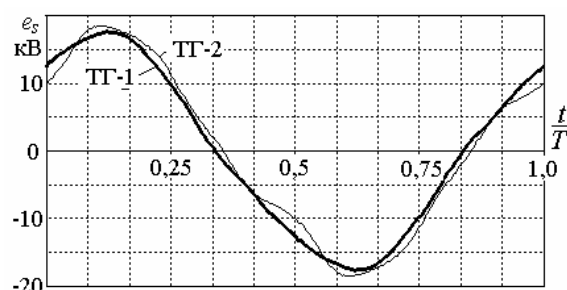


Рис. 2. Временные функции фазной ЭДС

Очевидно, что график ЭДС для варианта ТГ-1, благодаря укорочению обмотки, имеет более близкую к синусоиде форму. Это же подтверждает гармонический состав функции ЭДС (5), представленный в табл.1 для вариантов ТГ-1 и ТГ-2. Здесь максимум ЭДС  $E_{s,max}$  и амплитуда первой гармоники  $E_{m,1}$  даны в абсолютном измерении, а амплитуды высших гармоник – в относительной форме  $E_{m,v,*} = E_{m,v} / E_{m,1}$ .

Таблица 1

Гармонический состав ЭДС обмотки статора				
	$E_{s,max}$ , кВ	$E_{m,1}$ , кВ	$E_{m,3,*}$	$E_{m,5,*}$
ТГ-1	17,07	16,87	0,065	0,005
ТГ-2	17,48	17,03	0,105	0,036
ТГ-3	17,30	16,86	0,101	0,040
	$E_{m,7,*}$	$E_{m,9,*}$	$E_{m,11,*}$	$d_{dist}$
ТГ-1	0,008	0,007	0,003	0,998
ТГ-2	0,033	0,007	0,005	0,993
ТГ-3	0,030	0,006	0,004	0,994

Для ТГ-2 без укорочения обмотки статора форма кривой ЭДС и гармонический состав существенно хуже, так как повышается удельный вес высших гармоник (начиная с третьей и далее). Соответственно уменьшается и коэффициент искажения

$$d_{dist} = \frac{E_{m,1}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{N_g} E_{m,v}^2}}, \quad (6)$$

который для "чистой" синусоиды равен единице.

Т.е. при диаметральной обмотке основная функция ТГ – генерирование электроэнергии, ухудшается.

Известно [1], что в ТГ при соединении обмотки по схеме звезда в линейных напряжениях исчезают гармоники ЭДС, кратные трем. Насколько при этом изменится форма временных функций ЭДС, иллюстрирует рис. 3. Визуально можно заметить, что форма кривых ЭДС по сравнению с рис. 2 несколько улучшилась для обоих вариантов ТГ. Причем для базового варианта с укорочением обмотки статора график ЭДС достаточно близок к синусоиде, а вот для варианта без укорочения график явно отличается от синусоиды.

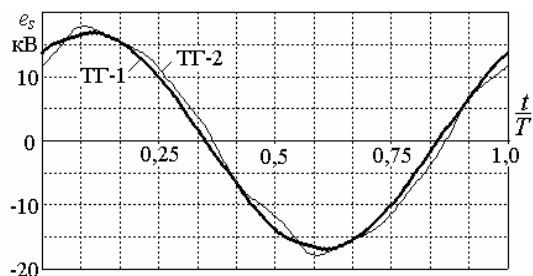


Рис. 3. Временные функции фазной ЭДС без гармоник, кратных трем

**Переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора.** Эта величина интересует проектировщиков ТГ в связи с тем, что она приводит к вихревым токам, дополнительным потерям мощности и нагреву поверхностного слоя ротора [11]. ПСМИ зависит от структуры обмотки статора, поэтому она здесь и принята к анализу.

Конкретно, для точек, связанных с вращающимся ротором, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося МП, была сформирована дискретная временная функция радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r(t_k)$ ,  $k=1,2,\dots,K$ . В таких функциях присутствуют как постоянная, так и переменная составляющие.

Из полных значений  $B_r$  выделяется ПСМИ и получается в виде числового массива соответствующая ее дискретная временная функция:

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

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

$$B_{rav} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_{r,k}$$

Графики функции ПСМИ для точки, находящейся посередине большого зуба ротора на расстоянии 4мм от его поверхности, даны для двух вариантов обмотки статора ТГ на рис. 4. Здесь также дан фрагмент рис. 1 в зоне большого зуба ротора – названная точка имеет обозначение т2. Период изменения временных функций ПСМИ, как показано в [10], составляет  $T_f=0,5 \cdot T/m_s$ , где  $m_s$  – число фаз обмотки статора.

Очевидно, что при отсутствии укорочения обмотки статора ПСМИ достигает существенно больших значений. Сопоставление значений ПСМИ дано также в табл. 2 для трех точек у поверхности большого зуба ротора, которые обозначены на рис. 4.

Для указанных точек даны средние значения магнитной индукции  $B_{rav}$  и максимумы ПСМИ  $B_{rt \max}$ . Ясно, что  $B_{rt \max}$  в ТГ без укорочения обмотки в 2,4 – 4,8 раза больше, чем при нормально укороченной обмотке,

а потери мощности от соответствующих вихревых токов, как известно [1, 11], пропорциональны квадрату магнитной индукции, т.е. вывод очевиден.

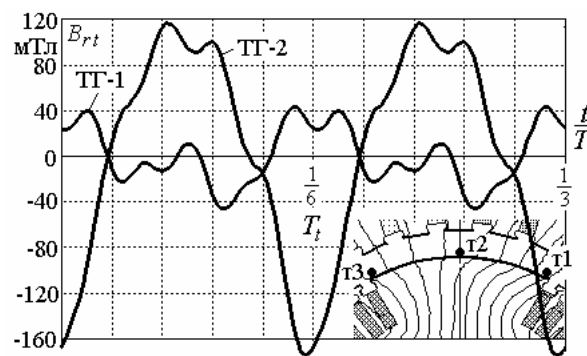


Рис. 4. Временные функции ПСМИ на их двух периодах  $T_f$  в точке т2 на поверхности вращающегося ротора

Таблица 2

Магнитная индукция в точках на поверхности вращающегося ротора

Магнитная индукция	$B_{rav}$ , Тл			$B_{rt \max}$ , мТл			
	Точки	т1	т2	т3	т1	т2	т3
ТГ-1		1,57	0,93	1,05	30,6	46,1	40,1
ТГ-2		1,54	0,86	0,97	74,4	174,3	191,5
ТГ-3		1,54	0,88	1,02	76,8	174,1	185,4

**Электромагнитный момент, действующий на ротор, и его пульсации.** От структуры обмотки статора зависят пульсации ЭММ, которые могут вызывать шум и вибрации ТГ в процессе его работы.

Для определения ЭММ в программе FEMM [9] предусмотрена процедура, которая в кольцевом слое зазора формирует совокупность контуров, и ЭММ определяется через угловую составляющую тензора магнитного натяжения [12]  $f_{T\alpha} = \mu_0^{-1} \cdot (B_r \cdot B_\alpha)$ , Н/м<sup>2</sup>, как поверхностный интеграл по площади  $S_\delta$  поперечного сечения такого слоя, распространяющегося на аксиальную длину ТГ:

$$M_{em} = \frac{l_a}{(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r \cdot f_{T\alpha} \cdot dS = \frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} r \cdot B_r \cdot B_\alpha \cdot r \cdot dr \cdot d\alpha \quad (8)$$

где  $r_r$  и  $r_s$  – радиусы цилиндрических поверхностей, ограничивающие площадь  $S_\delta$  сечения зазора со сторон ротора и статора;  $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $B_r$ ,  $B_\alpha$  – радиальная и угловая координатные составляющие магнитной индукции.

Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (1), дали дискретную временную функцию ЭММ  $M_{em}(t_k)$ ,  $k=1,2,\dots,K$ . В ТГ эта функция достаточно стабильна с определяющей ролью среднего значения

$$M_{em \text{ av}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K M_{em,k}$$

вариантов ТГ-1 и ТГ-2 дано в табл. 3.

Это значение проверено через электромагнитную мощность  $P_{em} = M_{em \text{ av}} \cdot \Omega$ . Она составила 341 МВт для ТГ-1, что весьма близко к номинальной мощности рассматриваемого ТГ, и 364 МВт для ТГ-2. Повыше-

ние ЭММ и мощности на 6,7 % может быть положительным явлением, но оно отягощено пульсациями ЭММ – его переменной составляющей.

Таблица 3

Значения ЭММ, кН·м			
Модель ТГ	ТГ-1	ТГ-2	ТГ-3
$M_{emav}$	1085	1158	1088
$dM_{em max}$	8,2	31,4	31,4
$dM_{em min}$	-8,0	-28,4	-27,9
$\Delta M_{em}$	16,2	59,8	58,3

Временную функцию переменной составляющей ЭММ выделили из функции  $M_{em}(t_k)$ :

$$dM_{em}(t_k) = M_{em}(t_k) - M_{emav}, \quad k=1,2,\dots,K, \quad (9)$$

которая имеет период повторения  $T_6$ , составляющий шестую часть от глобального периода  $T$ .

Число  $K$  для функции (9) на ее период  $T_6$  составило 60, ее несущая частота  $f_{s6} = 6 \cdot f_s$ .

График функции (9) дан на рис. 5 на протяжении шести периодов  $T_6$ .

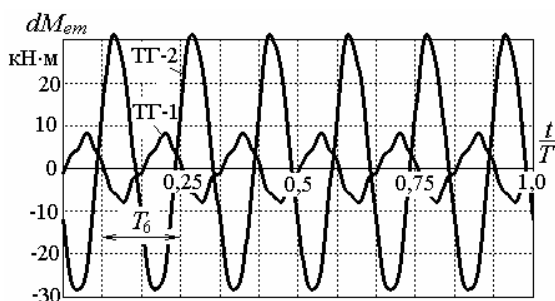


Рис. 5. Переменная составляющая ЭММ

В табл. 3 для переменной составляющей ЭММ (9) представлены максимум  $dM_{em max}$  и минимум  $dM_{em min}$ , а также размах колебаний  $\Delta M_{em} = dM_{em max} - dM_{em min}$ .

Значения  $\Delta M_{em}$  составляют 1,5 % от  $M_{emav}$  для варианта ТГ-1, а вот для ТГ-2 увеличиваются в 3,5 раза, достигая 5,2 %, что уже может создавать угрозу долговременной работе ТГ из-за его вибрации.

**Сравнение вариантов ТГ при одинаковых номинальных параметрах.** Рассмотренный вариант ТГ-2 без укорочения обмотки статора дал увеличение первой гармоники ЭДС на 0,95 % (табл. 3), а также названное уже повышение ЭММ (табл. 3) и электромагнитной мощности, по сравнению с базовым вариантом ТГ-1. Однако в реальных условиях – при работе на сеть бесконечной мощности – должно быть обеспечено на зажимах ТГ номинальное напряжение и прочие номинальные параметры. Поэтому был рассмотрен еще вариант ТГ-3 опять без укорочения обмотки статора, но с выходом на заданные номинальные величины  $U_{sN}$ ,  $I_{sN}$  и  $\cos \varphi_{sN}$ , а значит и на  $P_N$ .

Методом, представленным в [8], для ТГ-3 были определены ток возбуждения  $I_f = 3205$  А и угол сдвига  $\beta = -162,14^\circ$ . Как ни странно, ток  $I_f$  даже чуть повысился, несмотря на некоторое понижение ЭДС и напряжения по сравнению с вариантом ТГ-2. Но это объясняется тем, что с увеличением угла  $\beta$  (в варианте ТГ-2 было  $-160,47^\circ$ ) увеличилась продольная размагничивающая составляющая МП реакции якоря, поэтому  $I_f$  и увеличился для ее компенсации.

Для варианта ТГ-3 результаты расчетов даны в тех же табл. 1–3 и они свидетельствуют, что, в целом, отрицательные явления – ухудшенный гармонический состав ЭДС, увеличенные значения ПСМИ на большом зубе ротора и пульсации ЭММ сохранились примерно такими же, как и для варианта ТГ-2.

Для подтверждения этого на рис. 6 даны графики временных функций ЭДС для варианта ТГ-3. Здесь кроме графиков для полного гармонического состава (кривая 1) и такого же состава, но без гармоник, кратных трем (кривая 2), дан график для первой гармоники (кривая 3). Здесь очевидно отличие первых двух графиков от "чистой" синусоиды.

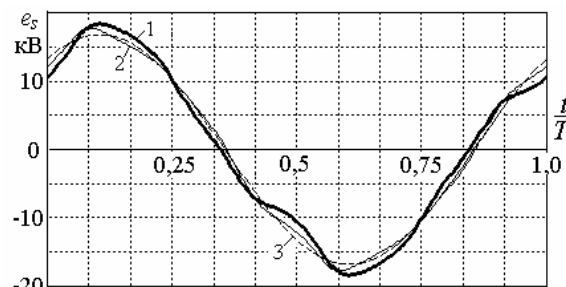


Рис. 6. Временные функции фазной ЭДС для модели ТГ-3: 1 – полная функция; 2 – без гармоник, кратных трем; 3 – первая гармоника

На рис. 7 даны графики ПСМИ для варианта ТГ-3 – уже для трех точек на поверхности ротора, указанных на рис. 4. Очевидно, что графики для точки t2 для ТГ-2 (рис. 4) и ТГ-3 (рис. 7) практически совпадают.

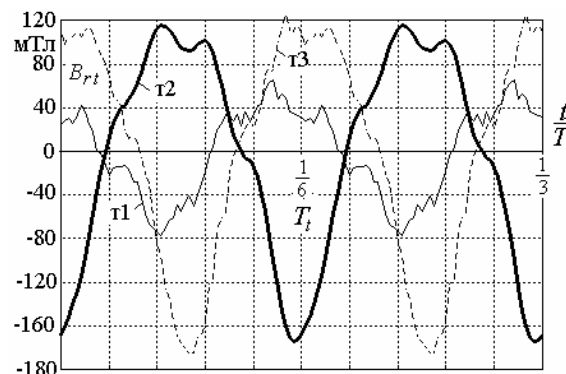


Рис. 7. Временные функции ПСМИ для модели ТГ-3 для трех точек на поверхности большого зуба ротора

То, что касается переменной составляющей ЭММ, то для ТГ-3 график практически такой же, как и на рис. 5 для ТГ-2, что подтверждают конкретные значения ЭММ в табл. 3, но вот значение  $M_{emav}$  в варианте ТГ-3 вернулось, как и задавалось, на номинальный уровень, который был характерен для варианта ТГ-1.

**Выводы.** 1. Численный расчет вращающегося МП является эффективной основой для определения и анализа широкого спектра электромагнитных явлений в ЭМ, в том числе, для исследуемого ТГ – временных функций электромагнитных величин, на которые влияет укорочение обмотки статора.

2. При переходе от нормально укороченной обмотки статора к диаметральной обмотке существенно ухудшается форма и гармонический состав ЭДС обмотки статора, значительно увеличивается перемен-

ная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора, а также сильно повышаются пульсации электромагнитного момента, посредством которого взаимодействуют ротор и статор. Да еще в случае сохранения номинальных выходных данных ТГ ток возбуждения не только не снизился, а даже чуть возрос.

3. Отмеченные в предыдущем пункте явления имеют однозначно негативный характер и должны учитываться при выборе схемы обмотки статора – в противовес возможным другим положительным факторам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Мильх 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. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.
4. Мильх В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 40-46.
5. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., 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.
6. Мильх 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.
7. Мильх В.И., Полякова Н.В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Электротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С. 40-45.
8. Мильх В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 36-41.
9. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (10 Oct 2010) [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/Download>.
10. Мильх В.И., Полякова Н.В. Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 29-36.
11. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П., Заславский Д.И., Смотров И.А. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
12. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.

**REFERENCES:** 1. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p. 2. 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 – Technical electrodyamics*, 2013, no.3, pp. 40-49. 3. Bianchi Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. 276 p. 4. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of the electromagnetic parameters of electrical machines on the basis of the numeral calculations of the magnetic fields. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.2, pp. 40-46. 5. Yu.V. Zozulin, O.Ye. Antonov, V.M. Bychik, A.M. Borychevskyy, K.O. Kobzar, O.L. Livshyts', V.H. Rakohon, I.Kh. Rohovyy, L.L. Khaymovych, Cherednyk V.I. *Stvorennja novykh typiv ta modernizacija dijuchyh turbogeneratoriv dlja teplovyh elektrichnyh stancij* [Creation of new types and modernization of the existing turbogenerators for the thermal electric stations]. Kharkiv, PF "Kolehium" Publ., 2011. 228 p. 6. Milykh V.I., Polyakova N.V. System of directions and phase relations of electromagnetic values at the numeral calculations of the magnetic fields in turbogenerator. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.5, pp. 33-38. 7. Milykh V.I., Polyakova N.V. Calculated and harmonic analysis of the magnetic fields in the active zone of the turbogenerator in the load mode. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 40-45. 8. 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 – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.1, pp. 36-41. 9. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable*. Available at: <http://www.femm.info/wiki/Download> (accessed 10 October 2004). 10. Milykh V.I., Polyakova N.V. 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. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodyamics*, 2014, no.2, pp. 29-36. 11. Titov V.V., Hutorckij G.M., Zagorodnaja G.A., Vartan'jan G.P., Zaslavskij D.I., Smotrov I.A. *Turbogeneratory* [Turbogenerators]. Leningrad, Energiia Publ., 1967. 895 p. 12. Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1989. 312 p.

Поступила (received) 26.03.2014

Мильх Владимир Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Полякова Наталья Владимировна<sup>1</sup>, ассистент,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076514, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

V.I. Milykh<sup>1</sup>, N.V. Polyakova<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

#### **Numerical field estimation of turbogenerator stator winding shortening efficiency.**

On the basis of numerical calculations of rotating magnetic field, a turbogenerator is evaluated for cases of a shortened stator winding and a diametric one. The parameters compared are the shape and harmonic composition of the winding EMF, the alternating component of the magnetic field on the rotor surface, and the electromagnetic torque ripple.

**Key words – numerical-field method, turbogenerator, stator winding, shortening, time functions, electromotive force, alternating magnetic field on the rotor surface, electromagnetic torque ripple.**