

УДК 621.313

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
И СИЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

В.И.Милых, профессор, д-р техн. наук, Н.В.Полякова, ассистент
(НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,
e-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, тел. +380577076514)

Рассмотрены теоретические основы определения электромагнитных и силовых действий в электрических машинах и выявления их динамики. На примере турбогенератора в режиме нагрузки проведен расчетный анализ временных функций силовых процессов в его активной зоне. Анализ основан на численно-полевых многопозиционных расчетах магнитного поля. Электрические машины, турбогенератор, элементы активной части, силовые действия, динамика, численно-полевой метод, расчетный анализ.

DYNAMIC POWER AND ELECTROMAGNETIC PROCESSES
IN TURBOGENERATOR

V.I. Milykh, Dr. of Sci., Prof., N.V. Polyakova, Assistant
NTU «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, Ukraine,
E-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, tel. +380577076514)

The theoretical principles of determining the electromagnetic and power actions in electrical machines and identifying their dynamics are considered. Calculation analysis of timing functions of power processes in a turbogenerator core is conducted on the example of a turbogenerator in the load mode. The analysis is based on the multiposition numeral-field calculation of the magnetic field. Electric machines, turbogenerator, elements of active part, power actions, dynamics, numeral-field method, calculation analysis.

Введение. В электрических машинах (ЭМ) основной процесс электромеханического преобразования энергии сопровождается силовыми яв-

лениями, которые имеют динамический характер. Классическая теория ЭМ [1, 2], основанная на теории электрических и магнитных цепей, не позволяет получать для силовых действий исчерпывающие расчетные результаты, тем более – динамику их изменения, т. к. это проблема достаточно точного расчета магнитных полей (МП) с учетом всех влияющих факторов.

С развитием численных методов расчета МП [3–5] проблема расчета сил в ЭМ становится в значительной мере решенной. Уже нет ограничений на учет реальных конструктивных форм машин в целом и их элементов, на детальный учет насыщения магнитопровода.

К ЭМ, наиболее напряженным по внутренним силовым действиям, относятся крупные турбогенераторы (ТГ) [2, 6]. Анализ стационарных силовых действий в разных режимах работы был проведен в [7] на примере ТГ мощностью 235 МВт. Там были рассмотрены статические силы в конкретный момент времени в фиксированном положении ротора и токов обмоток. Однако разрушительные процессы в механических системах вызываются не только и не столько статическими силами, а в большей степени – многократными циклическими их изменениями – для ТГ это проявляется, главным образом, в режиме нагрузки.

Цель работы. С учетом отмеченного, и продолжая курс [4] на адаптацию численных расчетов МП к анализу все большего набора параметров и характеристик ЭМ, здесь ставится цель – провести анализ динамики силовых действий в номинальном режиме работы крупного ТГ.

К анализу принимаются силовые циклические действия в активной части ТГ: переменная составляющая электромагнитного момента (ЭММ); силы, действующие на сердечник статора в целом, а также на его зубец и стержни обмотки в пазах.

Объект исследования. Демонстрация расчетных результатов проводится на трехфазном ТГ [6], электромагнитная система которого дана 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; относительное укорочение обмотки статора – 0,8; числа витков его фазной обмотки – 10, обмотки ротора – 126.

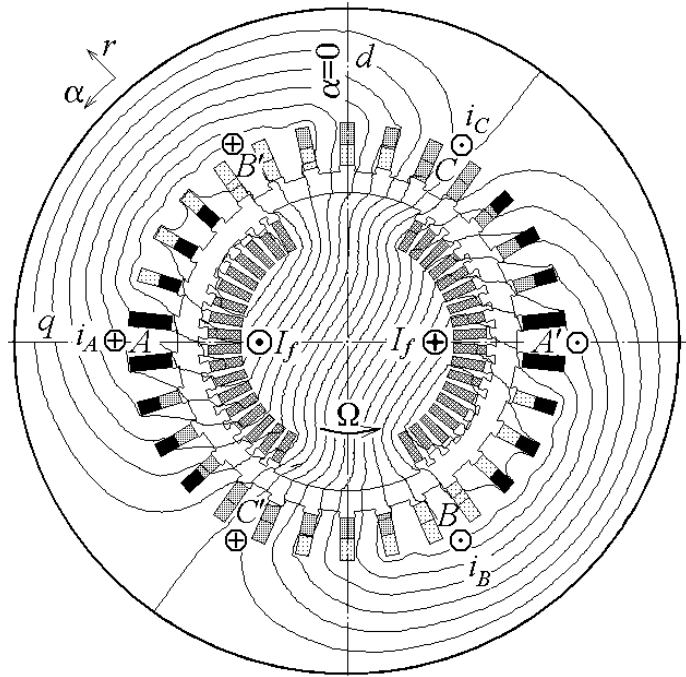


Рис. 1. Расчетная модель турбогенератора

На рис.1 фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$ выделены разным затемнением. Направления координат (r, α) полярной системы, угловой скорости ротора и магнитных полей Ω , токов в обмотках соответствуют системе, введенной в [8]. Здесь направления токов соответствуют режиму нагрузки в начальный момент времени t , с которого рассматриваются силовая динамика.

Теоретические основы расчета силовых действий и их динамики.

Динамика силовых действий проявляется временными функциями ЭММ и сил, приложенных к элементам конструкции ТГ. Силовые действия получаются в самом первородном их виде на основе расчета МП ТГ, а их временные функции – многопозиционными расчетами МП [4, 10] для задаваемого с шагом Δt временного ряда

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

с вращением ротора посредством его установки в угловые позиции

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

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_{min} – минимальное число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения; угловой шаг вращения ротора $\Delta\alpha = \Omega \cdot \Delta t$; угловая скорость $\Omega = \omega/p$; $I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплитуда и I_s – действующее значение 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 [8 – 10].

Силовые процессы в ТГ рассматриваются в режиме номинальной нагрузки (НН) при соответствующих фазных токах статора I_{sN} . Ток возбуждения $I_f = 2206$ А и угол $\beta = -160,47^\circ$ получены методом из [10]. Эти значения после расчета магнитного поля обеспечивают в ТГ заданные номинальные напряжение и коэффициент мощности.

Для исследования силовых действий в активной части ТГ МП рассматривалось в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис.1). Оно описывается общеизвестным дифференциальным уравнением [3 – 5] через векторный магнитный потенциал и рассчитывается численным методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по общедоступной программе FEMM [3]. Картина поля в режиме НН в исходный момент времени представлена на рис.1 силовыми линиями.

Базовыми величинами МП, которые используются при расчете силовых воздействий, является вектор магнитной индукции и его радиальная и угловая координатные составляющие $\vec{B}$, B_r , B_α .

При поворотах ротора и МП соответственно (1) – (3) картина МП в целом сохраняется, но с некоторыми локальными изменениями. Для получения временных функций силовых величин на полных периодах их изменения достаточно поворота ротора на 60° , что соответствует во времени шестой части полного периода T токов статора (3). Угол поворота ротора $\Delta\alpha$ составлял 1° , и поэтому число расчетных позиций равнялось 60.

Искомые временные функции конкретных величин на их полных периодах затем формировались с учетом их повторения с определенным фазовым сдвигом в разных фазных зонах. Все операции при работе программы FEMM выполнялись автоматически управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua. Картина магнитного поля после поворота ротора и МП на 60° показана на рис.2.

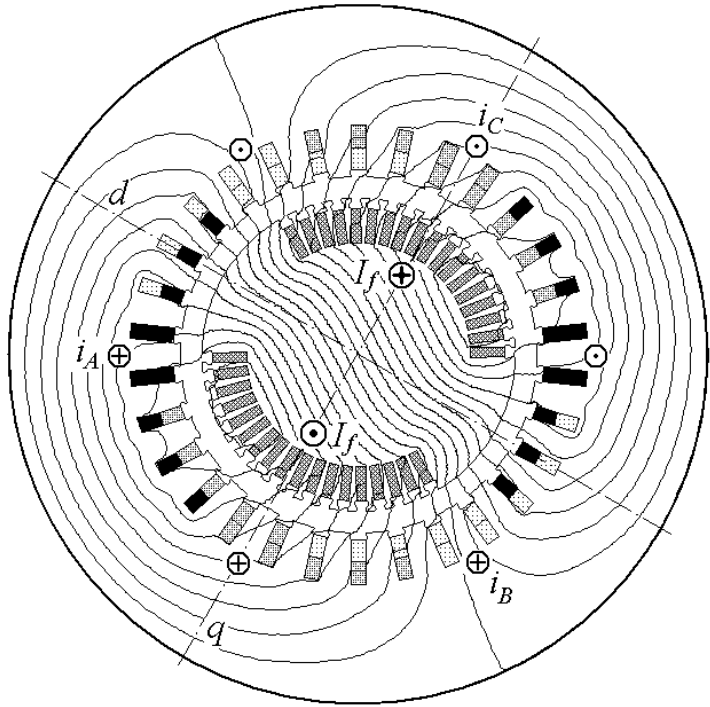


Рис.2. Повернутые ротор и картина МП

В итоге временные функции электромагнитных и силовых величин представлялась дискретными числовыми рядами типа $\Gamma(t_k)$, $k=1,2,..., K_{min}$, где пока использован некий абстрактный символ Γ .

Анализ силовых действий в турбогенераторе.

Электродинамические усилия, действующие в пазу статора непосредственно на стержни обмотки с током, имеющие площадь сечения S , определяются на основе закона Ампера [4, 11]. В полярной системе координат угловая и радиальная составляющие и модуль силы на весь паз:

$$F_{A\alpha} = l_a \int_S [B_\alpha \sin(\alpha - \alpha_n) - B_r \cos(\alpha - \alpha_n)] J_z dS; \quad (4)$$

$$F_{Ar} = l_a \int_S [B_\alpha \cos(\alpha - \alpha_n) + B_r \sin(\alpha - \alpha_n)] J_z dS; \quad (5)$$

$$F_A = \sqrt{F_{A\alpha}^2 + F_{Ar}^2}, \quad (6)$$

где α_n – угол оси конкретного паза, к которой приводятся эти силы.

В качестве объектов избраны стержни обмотки в трех пазах, которые

на рис.1 расположены в левой части сечения ТГ прямо над поперечной осью q . Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (1), дали дискретные временные функции сил $F_{A\alpha}(t_k)$; $F_{Ar}(t_k)$; $F_A(t_k)$, $k=1,2,..., K_{min}$, где для этих функций $K_{min}=180$ на их периоде T_2 , который оказался равным $T/2$, т. е. их несущая частота f_{s2} в два раза больше, чем частота токов f_s .

Было выявлено, что в пазах угловая составляющая силы, по сравнению с радиальной, пренебрежительно мала. Поэтому на рис.3 представлены только графики функций $F_A(t)$ (6), которые практически совпадают с функциями $F_{Ar}(t)$. Рассматриваемые

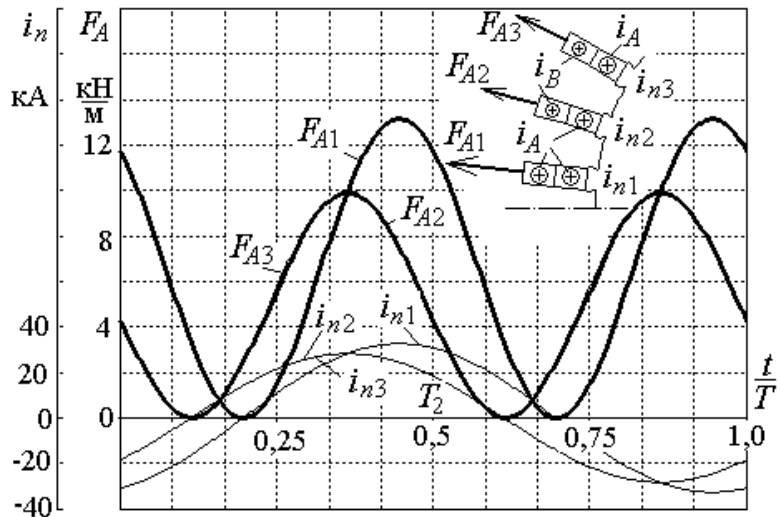


Рис. 3. Силы и суммарные токи, приходящиеся на указанные пазы статора

пазы фрагментарно показаны на рис.3 и для них дано преимущественные направления силы F_A . В пазу 1 сила достигает наибольших значений, так как здесь располагаются стержни одной фазной обмотки с суммарной амплитудой пазового тока $2 \cdot I_m$; в пазах, где сходятся стержни разных фаз, – только $\sqrt{3} \cdot I_m$, и здесь силы заметно меньше, причем функции $F_{A2}(t)$ и $F_{A3}(t)$ практически совпали. Графики временных функций токов $i_n(t)$, приходящихся на отдельные пазы (1-й, 2-й и 3-ий), также есть на рис.3.

На рис.3 силы даны из расчета на единицу аксиальной длины ТГ, а время – в о.е. от периода токов T , указан и период функций сил – T_2 .

Силовые действия на ферромагнитный сердечник ТГ, в т. ч. и ЭММ, после расчета МП определяются через тензор магнитного натяжения (ТМН) Максвелла [11]. В нашем случае ТМН рассматривается как давле-

ние на единицу цилиндрической поверхности S в зазоре, как это уже представлено в [7]. На этой поверхности определяются нормальная (радиальная) и касательная (угловая) к ней составляющие ТМН, Н/м²:

$$f_{Tr} = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_\alpha^2); \quad f_{T\alpha} = \frac{1}{\mu_0} (B_r \cdot B_\alpha), \quad (7)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Силовые действия на зубцы сердечника статора характеризуются угловой силой $F_{T\alpha}$, которая определялась на основе ТМН в пределах зубцового деления на дуге с радиусом r_δ вблизи расточки сердечника статора. Конкретно рассматривался один зубец на левой части рис.1 на оси q (фрагментарно этот зубец показан и на рис.4). Для него искомая сила

$$F_{T\alpha} = r_\delta \cdot l_a \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [f_{T\alpha} \cos(\alpha - \alpha_z) + f_{Tr} \sin(\alpha - \alpha_z)] d\alpha, \quad (8)$$

где α_1, α_2 – начальная и конечная угловые координаты указанной дуги; α_z – угловая координата центральной оси зубца, к которой приводится эта сила.

Расчеты, проведенные по (7), (8) в заданные моменты времени (1), дали дискретную временную функцию силы $F_{T\alpha}(t_k)$, $k=1,2,..., K_{min}$. Число K_{min} для этой функции, как и для (4)-(6), составило 180 на ее периоде, который тоже оказался равным T_2 , ее несущая частота – f_{s2} .

Динамика изменения силы $F_{T\alpha}$ представлена на рис.4, где также показано преимущественное направление данной силы. Она является знакопеременной со зна-

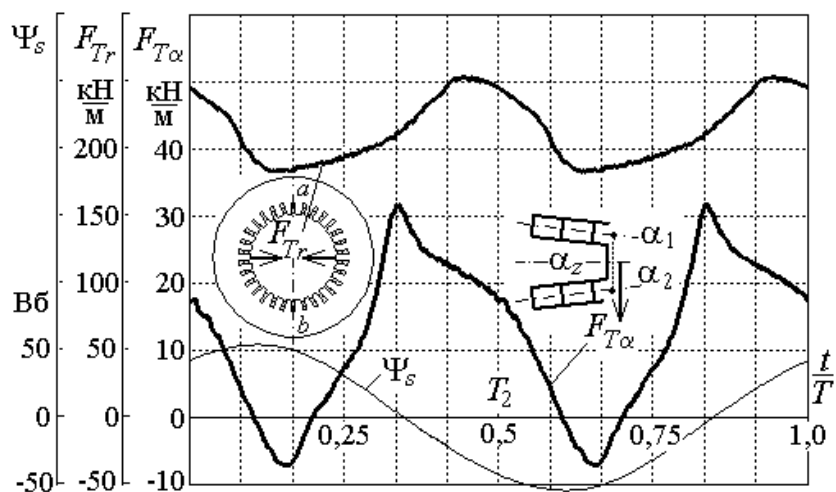


Рис.4. Силы, действующие на части сердечника статора, и МПС фазной обмотки

чительной долей постоянной составляющей (12,2 кН/м) и достигает весьма существенных значений (они даны на единицу аксиальной длины ТГ).

Силы, действующие на сердечник статора в целом, также определялись в его поперечном сечении на основе составляющих ТМН (7). Конкретно рассматривалась радиальная сила

$$F_{Tr} = r_{\delta} \cdot l_a \cdot \int_0^{\pi} [f_{Tr} \cos(\alpha - \alpha_q) - f_{T\alpha} \sin(\alpha - \alpha_q)] \cdot d\alpha, \quad (9)$$

приходящаяся на половину сечения сердечника. Она определялась на дуге окружности в пределах полюсного деления ТГ, проведенной вблизи точки сердечника статора на радиусе r_{δ} . Эта сила приведена к горизонтальной оси, расположенной под углом $\alpha_q = 90^\circ$.

Расчеты для заданных моментов времени (1) дали дискретную временную функцию силы $F_{Tr}(t_k)$, $k=1,2,\dots, K_{min}$, где число K_{min} для нее, период повторения T_2 и несущая частота f_{s2} такие же, как и для функций (6), (8).

Динамика изменения силы F_{Tr} представлена на рис.4, где показан сердечник статора, а также даны направления сил, действующих на его половинки. Эти силы являются пульсирующими с главенством постоянной составляющей (42,9 кН/м). Они приложены к аксиальному сечению сердечника по линии ab . Для любого другого аксиального сечения временные функции силы повторяются, только с соответствующим временным сдвигом. Как и ранее, сила дана на единицу аксиальной длины ТГ.

Для определения электромагнитного момента в программе FEMM [3] предусмотрена процедура, которая в кольцевом слое зазора формирует совокупность контуров, и ЭММ определяется через угловую составляющую ТМН, как поверхностный интеграл по площади S_{δ} поперечного сечения такого слоя, распространяющегося на аксиальную длину ТГ:

$$M_{em} = \frac{l_a}{(r_s - r_r) S_{\delta}} \int r \cdot f_{T\alpha} \cdot dS = \frac{l_a}{\mu_0 (r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} r \cdot B_r \cdot B_{\alpha} \cdot r \cdot dr \cdot d\alpha, \quad (10)$$

где r_r и r_s – радиусы цилиндрических поверхностей, ограничивающие площадь S_δ сечения зазора со сторон ротора и статора.

Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (1), дали дискретную временную функцию ЭММ $M_{em}(t_k)$, $k=1,2,..., K_{min}$. В ТГ эта функция достаточно стабильна с определяющей ролью среднего значения $M_{em av}$, – оно равно 1086 кН·м. Это значение проверено через электромагнитную мощность $P_{em} = M_{em} \Omega$, которая составила 341 МВт, что весьма близко к номинальной мощности рассматриваемого ТГ.

Из функции ЭММ $M_{em}(t_k)$ выделили переменную составляющую

$$dM_{em}(t_k) = M_{em}(t_k) - M_{em av}, \quad k=1,2,..., K_{min}, \quad (11)$$

которая имеет период повторения T_6 , равным шестой части от глобального периода – периода токов статора T .

Число K_{min} для функции (11) на ее периоде повторения T_6 составило 60, ее несущая частота $f_{s6} = 6 \cdot f_s$. Такая периодичность объясняется периодичностью распределения по пазам максимумов пазовых токов статора, которые составляют, как указано выше, $2 \cdot I_m$ в пазах, где сходятся стержни одной фазной обмотки (рис.1), и $\sqrt{3} \cdot I_m$ – разных фазных обмоток.

График функции (11) дан на рис.5 на протяжении шести периодов T_6 , что соответствует глобальному периоду T или двум периодам T_2 уже рассмотренных функций (6), (8) и (9).

Конечно, значения переменной составляющей ЭММ dM_{em} более чем на два порядка меньше его среднего значения $M_{em av}$. Но пульсации ЭММ, наряду с

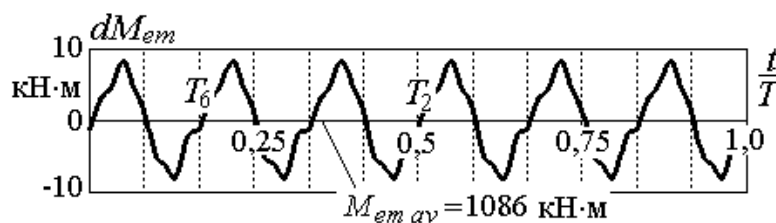


Рис. 5. Переменная составляющая ЭММ

другими – рассмотренными выше циклическими силовыми действиями в ТГ, могут

приводить к шуму и вибрации его активной части.

Магнитное потокоцепление фазной обмотки.

Формы функций сил и ЭММ могут вызвать сомнение относительно гармонического состава основной функциональной величины ТГ – ЭДС в обмотке статора. Для проверки этого рассмотрели временную функцию магнитного потокоцепления (МПС) фазной обмотки статора, порождающую функцию фазной ЭДС.

Для этого, как уже представлялось в [4, 9], в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося магнитного поля, была сформирована дискретная временная функция МПС $\Psi_s(t_k)$, $k=1,2,\dots,K_{min}$, которая имеет глобальный период T и сформирована по числу точек $K_{min} = 360$.

График функции МПС $\Psi_s(t_k)$ фазной обмотки статора дан на рис.4 – он близок к синусоиде, что подтвердил ее гармонический состав, выявленный аналогично [9].

Выводы.

1. Численный расчет МП является эффективной основой для определения и анализа широкого спектра силовых действий в ЭМ. При этом вычисление разных сил и вращающих моментов практически лишено каких-либо серьезных условностей и дает качественно и количественно достоверную информацию с учетом практически любой формы конструкции и насыщения магнитопровода, а динамика изменения силовых действий выявляется на основе многопозиционных расчетов вращающегося МП.

2. Численно-полевой анализ силовых действий в ТГ проявил их физическую основу и показал их величину и динамику для элементов его конструкции. При этом выявлено, что силы, действующие на проводники обмотки статора, на зубцы его сердечника и внутри сердечника в целом, достигают весьма существенных значений, которые должны учитываться при расчете механической устойчивости активной части ТГ. Особенно с учетом того, что эти силовые действия имеют удвоенную несущую частоту

и высшие гармонические составляющие.

3. Принцип расчетного анализа динамики силовых действий, продемонстрированный на примере ТГ, может быть распространен и на другие типы ЭМ с иной конструкцией элементов их активной части.

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Титов В.В. Турбогенераторы / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная, Г.П. Вартаньян, Д.И. Заславский, И.А. Смотров. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
3. 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.
4. 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.
5. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.
6. Зозулін Ю.В. 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.
7. Милых В.И., Полякова Н.В. Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных стационарных режимах работы // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С.47-54.
8. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнит-

ных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С.33-38.

9. Милых В.И., Полякова Н.В. Принцип численно-полевого анализа гармонического состава ЭДС в турбогенераторе // Электрика. – 2012. – №5. – С.2-5.

10. 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.

11. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. - М: Высш. школа, 1989. – 312 с.