

В.И. МИЛЫХ, д-р техн. наук, зав. каф. НТУ «ХПИ»;
Н.В. ПОЛЯКОВА, асс. НТУ «ХПИ»

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Показаны принципы и приведены примеры определения электромагнитных параметров турбогенераторов на основе численных расчетов магнитных полей. Расчетный анализ параметров проводится как в статической постановке, так и в динамике в процессе вращения магнитных полей. Среди параметров рассматриваются магнитные индукция, поток, потокоцепление и проводимость, падение магнитного напряжения, ЭДС, собственная и взаимная индуктивности, силы, действующие на проводники и ферромагнитные сердечники, электромагнитный момент.

Ключевые слова: турбогенератор, магнитные поля, численные расчеты, электромагнитные параметры, статическая постановка, динамика.

Введение

С развитием компьютерной техники и численных методов расчета магнитных полей в систему исследования и проектирования электрических машин (ЭМ) все больше внедряются расчеты их электромагнитных параметров именно на такой основе [1–3]. При этом обширная теория ЭМ с множеством расчетных выражений, созданных для целого ряда параметров их отдельных типов, сводятся во многих случаях к нескольким базовым выражениям. На их основе остается только «вытянуть» электромагнитные параметры машин из результатов численного расчета магнитного поля. И задача расчетчика в таких условиях ограничивается квалифицированным заданием исходных данных и геометрии ЭМ и осознанным использованием полученных числовых результатов расчета.

Для решения задач магнитостатики разработан и используется ряд программных комплексов, основанных на методе конечных элементов (МКЭ). Из них популярными являются прикладные программные пакеты INFOLITICA (<http://www.infolytica.com>), COMSOL Multiphysics (<http://www.comsol.com>), ELCUT (<http://elcut.ru>), ANSYS MAXWELL (<http://www.ansys.com>), FEMLAB (http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/3_2_1.php), Flux (<http://magsoft-flux.com/products/motor-cad>), которые позволяют рассчитывать как двумерные, так и трехмерные магнитные и другие физические поля.

При расчете магнитных полей ЭМ классической конструкции (асинхронных, синхронных, постоянного тока), как показал опыт [4], трехмерные расчеты оказываются чрезмерно трудоемкими и продолжительными и не оправдывают затрат по сравнению с двумерными расчетами, тем более, что не дают адекватного уточнения результатов. Так в активной зоне турбогенератора трехмерные расчеты дают даже большую погрешность ввиду вынужденного применения более «грубой» конечно-элементной структуры. Поэтому трехмерные магнитные поля рассчитывают в условиях специфических конструкций ЭМ либо при решении специальных задач, например, при исследовании

процессов в торцевых зонах ЭМ.

В связи с отмеченным, при расчете двумерных магнитных полей самое широкое распространение получил программный пакет FEMM [5], привлекающей особенностью которого является относительная простота и общедоступность ввиду бесплатного пользования. Однако для этого пакета, как показал опыт расчетов, при относительно коротких и разнородных аксиальных длинах ферромагнитных сердечников возможны очень значительные погрешности. Их можно устранить на основе усовершенствования, показанного в [6] – тогда пакет FEMM становится еще более привлекательным и обеспечивающим необходимую точность расчета двумерных магнитных полей и электромагнитных параметров на активной длине разнообразных ЭМ. Еще одной привлекающей стороной пакета FEMM является возможность программной автоматизации построения расчетных моделей ЭМ, организации расчетов и выдачи расчетной информации на основе использования встроенного в эту программу скрипта Lua [5], что было показано в [7] на примере турбогенератора. А еще интересно, что пакет FEMM можно использовать не только для расчета магнитных полей, но и для других применений, например для расчета вихревых токов на основе математической аналогии [8].

Для более широкого и эффективного применения численно-полевых расчетов ЭМ необходимо накопление опыта адаптации численных расчетов магнитных полей к анализу все большего набора параметров и характеристик конкретных типов ЭМ. В их семействе к наиболее мощным и крупногабаритным, а потому и весьма ответственным объектам относятся турбогенераторы (ТГ) – ключевые элементы электроэнергетических систем. Поэтому повышение точности их расчетов на основе использования численно-полевых методов можно считать одной из первоочередных задач системы проектирования ЭМ.

Анализ основных достижений

До настоящего времени нами уже проведена и опубликована серия работ, касающаяся численно-полевых расчетов ТГ как специфической [9, 10], так традиционной конструкции [11–39]. Причем сначала использовались программы собственной разработки на основе метода конечных разностей, а затем перешли к использованию появившейся программы FEMM.

Среди указанных публикаций можно выделить ключевые работы, устанавливающие общие теоретические и практические аспекты численно-полевого анализа магнитных полей в ТГ [11–16].

Так в [11, 12] вводится метод определения фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ на основе численных расчетов магнитных полей и задается система направлений и этих соотношений для таких величин. В [13] анализируются режимы возбуждения и разные виды реакции якоря в ТГ. В [14, 15] вводятся принципы полнофакторного численно-полевого анализа режима нагрузки ТГ и проводится анализ эффективности его векторных диаграмм. В [16] предложена организация численного расчета магнитного поля ТГ в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров: мощности, напряжения, коэффициента мощности.

В [17] проводится расчетный и гармонический анализ координатных и временных функций магнитных полей в активной зоне ТГ. В [18 – 20] исследуется гармонический состав ЭДС в обмотке статора на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах возбуждения ТГ, проводится сравнительный численно-полевой анализ этого состава в ТГ с разной структурой активной зоны, сопоставляются результаты такого анализа на основе классических и численно-полевых методов.

В [21 – 25] рассматриваются для ТГ силовые действия разного характера. Так в [21] проводится расчетное исследование электромагнитного момента и угловой характеристики идеализированного ТГ, а в [22] – анализ реактивного момента, развиваемого неявнополюсным ротором. В [23, 24] исследуются силовые действия на обмотки и элементы сердечников ТГ в различных стационарных режимах работы, а в [25] – еще и динамика силовых действий при разных зубцово-пазовых структурах.

Ряд работ [26 – 28] посвящен анализу переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора ТГ и анализу его гармонического состава в различных режимах возбуждения и при разном числе зубцов статора.

Численно-полевому анализу разных индуктивных сопротивлений ТГ посвящены работы [29, 30], а в [31] проведена численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора ТГ.

Еще весьма значительная серия работ, из которых здесь представлены лишь основные [8, 32 – 39], проведена с целью исследования магнитных полей, вихревых токов и потерь мощности в торцевой зоне ТГ и элементах их конструкции. Однако работы такого рода, учитывая их специфику, в данной статье анализировать не будем.

А основное внимание уделим магнитным полям, электромагнитным параметрам и процессам в активной зоне ТГ – на их активной длине.

Цель исследований

Целью данной работы является представление основных положений, из которых складывается исследование целого ряда электромагнитных параметров ТГ на основе численных расчетов его магнитных полей. При этом задача заключается в том, чтобы показать необходимый минимум расчетных выражений (формул), приводящих к определению этих параметров и, тем самым, чтобы подтвердить высокую эффективность численно-полевых расчетов.

Материал исследований

Расчетная модель электромагнитной системы ТГ, соответствующая поставленной задаче, представлена на рис.1. Здесь показаны фазные зоны обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, а явно структура стержней в пазах затемнением для первой из этих фазных обмоток. Направления координат (r, α) полярной системы, токов в обмотках и угловой скорости вращения ротора и магнитных полей Ω соответствуют системе, введенной в [12]. Здесь даны направления токов для режима нагрузки в начальный момент времени t , с которого обычно начинается рассмотрение статики и динамики разных процессов в ТГ.

Магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается известным дифференциальным уравнением

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

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

Область расчета магнитного поля при использовании метода конечных элементов является ограниченной, что устанавливается принятием на внешней поверхности сердечника статора ТГ граничного условия Дирихле $A_z=0$.

Нелинейные магнитные свойства ферромагнитных сердечников учитываются посредством пересчета μ в соответствии с заданными кривыми намагничивания их материалов.

В сформированной в соответствии с правилами программы FEMM расчетной модели ТГ для расчета магнитного поля достаточно задать определенную совокупность токов обмотки ротора I_f и фазных токов в обмотке статора i_A, i_B, i_C . Эта совокупность и взаимное соответствие токов определяется расчетным режимом: холостой ход, короткое замыкание, нагрузка и т.д. [12, 13].

При расчетах магнитных полей и соответствующих электромагнитных параметров ТГ используются две постановки: *статическая* и *динамическая*.

При более сложной – динамической постановке (она использована, например, в [17 – 20, 25 – 28] и других работах) рассчитывается совокупность магнитных полей для ряда заданных с шагом Δt моментов времени:

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

и соответствующего ряда угловых позиций ротора:

$$\alpha_k = \Delta \alpha (k-1); \quad k=1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (3)$$

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

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов, которые вычисляются в те же самые заданные моменты времени t_k :

$$i_A = I_m \cos(\omega \cdot t_k + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega \cdot t_k - \frac{2}{3} \pi + \beta); \quad i_C = I_m \cos(\omega \cdot t_k + \frac{2}{3} \pi + \beta), \quad (4)$$

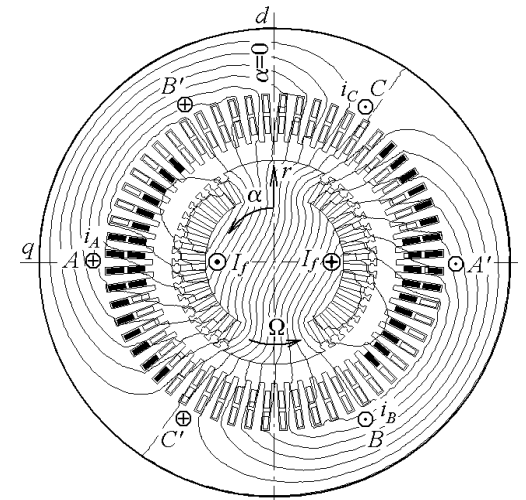


Рис. 1 – Расчетная модель электромагнитной системы ТГ в его поперечном сечении

где I_m – амплитуда токов; $\omega=2\cdot\pi\cdot f_s$ – угловая частота; f_s – частота; β – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d [11, 12].

При статической постановке (она использована, например, в [13 – 16, 23, 24, 29, 30] и других работах) рассматривается одно фиксированное положение ротора и фиксированные значения токов, как правило, при $t_k=0$, что соответствует рис.1. То есть это частный случай динамической постановки расчетов.

Повороты ротора (3), вычисление токов статора (4) в моменты времени (2), сама работа программы FEMM, а также сбор необходимых результатов расчета проводятся автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в FEMM (пример есть в [7]). После одноразового расчета, а также после каждого из множества многопозиционных расчетов магнитного поля программа FEMM позволяет «извлечь» целый ряд интересующих расчетчика электромагнитных параметров.

Базовой первичной величиной, являющейся результатом расчета магнитного поля, является координатное распределение ВМП A_z в заданной области расчета. На основе этого вычисляется все остальное.

Приведем базовые теоретические выражения для электромагнитных параметров, важных для расчета и проектирования ТГ. Для этих выражений в программе FEMM предусмотрены соответствующие опции и программные функции, обращение к которым и получение числовых результатов возможно как в «ручном», так и в упомянутом автоматическом программном режиме.

Результаты исследований

Одной из базовых величин магнитного поля, которые принято анализировать, является магнитная индукция, вычисляемая по распределению ВМП на основе общего выражения $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$. Исходя из этого, например, в полярных координатах составляющие и модуль магнитной индукции:

$$B_r = \frac{\partial A_z}{r \partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}; \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_\alpha^2}. \quad (5)$$

Для стальных листов в случае шихтованных и пакетированных сердечников магнитная индукция после (5) требует дополнительного пересчета, как показано, например, в [6].

Для оценки насыщения магнитопровода может быть полезным среднее значение модуля магнитной индукции на его участках:

$$B_{k,s} = \frac{1}{S_k} \int_{S_k} B \, dS, \quad (6)$$

где S_k – площадь конкретного участка в поперечном сечении ТГ.

Расчетом магнитного поля в одной позиции получают координатные функции магнитной индукции $B_r(r, \alpha)$, $B_\alpha(r, \alpha)$.

Многопозиционными расчетами магнитных полей для заданных временного ряда (2), позиций ротора (3) и токов статора (4) получают временные функции магнитной индукции в дискретной форме для любой неподвижной

координатной точки (r, α) :

$$B_r(t_k), B_\alpha(t_k), \quad k=1,2,\dots,K_{\min}. \quad (7)$$

Для точек, связанных с вращающимся ротором, например, на его поверхности, изменяемая угловая координата $\alpha_t = \alpha_0 + \Delta\alpha \cdot t_k$, где α_0 – начальная координата конкретной точки. Тогда на поверхности ротора на конкретном радиусе r в любой точке из функций (7) можно получить постоянные составляющие (средние значения)

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

а также дискретные временные функции переменной составляющей координатных составляющих магнитной индукции:

$$B_{rt}(t_k) = B_r(t_k) - B_{rav}; \quad B_{\alpha t}(t_k) = B_\alpha(t_k) - B_{\alpha av}; \quad k=1,2,\dots,K_{\min}. \quad (9)$$

Примеры анализа координатных и временных функций магнитной индукции в ТГ, в том числе, переменной составляющей магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора можно найти в [17, 26 – 28].

Через магнитную индукцию (5) могут быть определены составляющие и модуль напряженности магнитного поля:

$$H_r = B_r / \mu; \quad H_\alpha = B_\alpha / \mu; \quad H = B / \mu, \quad (10)$$

а затем и падение магнитного напряжения на любом участке магнитопровода на отрезке любой заданной в области расчета линии l_k :

$$U_m = \int_{l_k} \vec{H} \, d\vec{l}, \quad (11)$$

где вектор напряженности магнитного поля \vec{H} формируется по его составляющим (7) $\vec{H} = \dot{1}_r H_r + \dot{1}_\alpha H_\alpha$, $\dot{1}_r, \dot{1}_\alpha$ – единичные орты по координатам r и α .

Магнитный поток через некоторую заданную поверхность, ограниченную контуром l , в общем случае имеет выражение:

$$\Phi = \int_l \vec{A} \, d\vec{l}, \quad (12)$$

а при двумерной структуре поля (рис. 1) магнитный поток:

$$\Phi = (A_{z1} - A_{z2}) \cdot l_a, \quad (13)$$

где A_{z1}, A_{z2} - значения ВМП в точках 1 и 2 в плоскости расчета, через которые проходят боковые стороны упомянутого контура l ; l_a – активная длина ТГ.

Для анализа электромагнитных параметров и процессов в ТГ, и, прежде всего, временных функций ЭДС в обмотке статора [18 – 21], важнейшую роль играет магнитное потокосцепление (МПС).

МПС катушки или обмотки, имеющей N витков:

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k, \quad (14)$$

где Φ_k – потоки, сцепленные с отдельными витками.

Однако выделение отдельных витков чаще всего неприемлемо, так как в области расчета обмотки ТГ представляются совокупностью сечений их сторон с равномерно распределенной плотностью тока (рис. 1).

Фазная обмотка статора ТГ состоит из двух сторон в соответствующих фазных зонах A и A' (рис. 1), которые имеют площади поперечного сечения S_1 и S_2 и разные направления фазного тока (это площади всех стержней во всех пазах с одним направлением тока в пределах фазной зоны). Тогда МПС фазной обмотки, в которой предполагается один условный распределенный виток, приходящееся на единицу аксиальной длины ТГ (единичное МПС), составляет

$$\Psi_e = \left(\frac{1}{S_1} \int A_z dS - \frac{1}{S_2} \int A_z dS \right). \quad (15)$$

Тогда для всей обмотки с учетом всех ее витков и активной длины, МПС:

$$\Psi = N \cdot \Psi_e \cdot l_a. \quad (16)$$

Если магнитное поле создавалось только рассматриваемой фазной обмоткой, то МПС является собственным, если какой то другой обмоткой – то взаимным МПС, если совокупностью обмоток – то полным МПС.

По единичному МПС определяется удельная магнитная проводимость для конкретной обмотки, если магнитное поле создано только ею:

$$\Lambda = \frac{\Psi_e}{F}, \quad (17)$$

где $F = N \cdot I$ – магнитодвижущая сила (МДС) обмотки, создавшей поле; I – ее ток, заданный при расчете магнитного поля.

Проводя расчеты при ряде значений тока обмотки I , можно получить магнитную характеристику ТГ – зависимость $\Psi(I)$. И если она линейная, то имеет смысл собственная индуктивность данной обмотки, как коэффициент пропорциональности между ее током I и МПС Ψ , то есть:

$$L = \Psi / I. \quad (18)$$

Тогда, на этой основе, индуктивное сопротивление при частоте f или угловой частоте $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L. \quad (19)$$

В случае оперирования со всеми сторонами секций какой-либо обмотки ТГ, в (16) – (19) будет уже учтено распределение и укорочение этой обмотки.

Величины L , X_L , как и Ψ , будут собственными или взаимными в зависимости от того, что было источником поля, представленного в (15) ВМП A_z .

Индуктивные параметры обмоток можно выразить непосредственно и через ВМП, компонуя (15), (16) и (18):

$$M_{m,n} = \frac{N_m l_a}{I_n} \left(\frac{1}{S_{m1}} \int A_{z,n} dS - \frac{1}{S_{m2}} \int A_{z,n} dS \right), \quad (20)$$

где $A_{z,n}$ – ВМП поля, возбужденного током I_n обмотки n ; S_{m1} , S_{m2} – площади поперечного сечения двух сторон обмотки m ; N_m – ее число витков.

Если n и m различны, то по (20) получаем коэффициент взаимной индуктивности двух катушек, если одно и то же – то собственную индуктивность данной катушки, как и по (18).

В зависимости от постановки полевой задачи, по результатам расчета магнитного поля и по (18), (20) могут быть определены различные виды индуктивных параметров ТГ: главные, рассеяния, специальные, что представлено, например, в работах [9, 11, 29, 30].

Работа ТГ непосредственно связана и порождает в нем силовые действия и взаимодействия, что является важной частью анализа процессов в нем и его параметров, что делалось, например, в [21 – 25].

Электродинамические усилия, действующие в магнитном поле непосредственно на токонесящие элементы в пределах площади их поперечного сечения S с плотностью тока \vec{J} (условно распределенной по пазам или стержням обмоток, либо непосредственно конструктивной в проводниках), определяются базовой формулой:

$$\vec{F} = l_a \cdot \int_S [\vec{J} \times \vec{B}] dS. \quad (21)$$

В случае полярной системы координат (рис. 1) формула (21) трансформируется в формулы сосредоточенных касательной и радиальной составляющих электродинамических усилий:

$$F_\alpha = l_a \int_S [B_\alpha \sin(\alpha - \alpha_c) - B_r \cos(\alpha - \alpha_c)] \cdot J_z dS; \quad (22)$$

$$F_r = l_a \int_S [B_\alpha \cos(\alpha - \alpha_c) + B_r \sin(\alpha - \alpha_c)] \cdot J_z dS, \quad (23)$$

где S – площадь сечения стержня или всей обмотки; α_c – угловая координата радиальной линии или оси, к которой приводятся силы.

Момент вращения, действующий на токонесящие элементы обмоток:

$$M_J = l_a \cdot \int_S B_r \cdot J_z \cdot r \cdot dS. \quad (24)$$

Момент по (24), если он вычислен для ротора ТГ в случае отсутствия в нем ферромагнитных сердечников, как, например, в [9], либо при расположении обмотки на поверхности гладкого (беззубцового) ротора, является непосредственно электромагнитным моментом ТГ.

Но в ТГ с обмотками, расположенными в пазах, реально силы действуют не только и не столько на проводники, а преимущественно на зубцы сердечников [24]. Тут работают электромагнитные силы, характерные для ферромагнитных сердечников, находящихся в магнитном поле.

Силы в магнитном поле с учетом участия ферромагнитных сердечников любой формы и присутствующих токонесящих проводников определяются посредством тензора натяжения Максвелла [24, 25], который описывает давление на единицу условной поверхности в немагнитной части области расчета.

Для определения тензора необходимо брать в области расчета поверхности с образующими, параллельными аксиальной оси z . Эти поверхности должны быть расположены именно в немагнитном пространстве (не попадают внутрь ферромагнетиков и на их границы). Тогда можно определять координатные составляющие тензора магнитного натяжения (Н/м²):

$$f_{Tr} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} (B_r^2 - B_\alpha^2); \quad f_{T\alpha} = \frac{1}{\mu_0} (B_r \cdot B_\alpha). \quad (25)$$

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

Для получения результирующей силы, действующей в пределах какой-либо линии l (это направляющая указанной выше поверхности), проведенной в немагнитной части области расчета (рис. 1), из полярной системы координат (r, α) переходим в прямоугольную систему координат (x, y), и тогда проекции этой силы на оси x и y и ее модуль:

$$F_{Tx} = -l_a \cdot \int_l (f_{T\alpha} \cdot \cos\alpha + f_{Tr} \cdot \sin\alpha) \cdot dl; \quad F_{Ty} = l_a \cdot \int_l (f_{Tr} \cdot \cos\alpha - f_{T\alpha} \cdot \sin\alpha) \cdot dl; \quad (26)$$

$$F_T = \sqrt{F_{Tx}^2 + F_{Ty}^2}. \quad (27)$$

Так, например, для получения координатных составляющих результирующей силы, действующей на ротор (которая возникает, например, в случае эксцентриситета), необходимо интегрирование по окружности радиуса r_δ , проходящей в зазоре ТГ между статором и ротором (модуль силы по (27)):

$$F_{Tx} = -r_\delta \cdot l_a \cdot \int_0^{2\pi} (f_{T\alpha} \cdot \cos\alpha + f_{Tr} \cdot \sin\alpha) \cdot d\alpha; \quad (28)$$

$$F_{Ty} = r_\delta \cdot l_a \cdot \int_0^{2\pi} (f_{Tr} \cdot \cos\alpha - f_{T\alpha} \cdot \sin\alpha) \cdot d\alpha. \quad (29)$$

На этой же основе, интегрированием по упомянуто линии окружности в зазоре, получается и электромагнитный момент, действующий на ротор ТГ:

$$M_{em} = l_a \cdot \int_{l_\delta} r \cdot f_{T\alpha} \cdot dl = \frac{l_a \cdot r_\delta^2}{\mu_0} \cdot \int_0^{2\pi} B_r \cdot B_\alpha \cdot d\alpha. \quad (30)$$

В программе FEMM предусмотрена процедура вычисления электромагнитного момента (30) на основе тензора натяжения по задаваемому круговому контуру. Однако есть и более надежная процедура, когда выделяются все элементы ротора (сердечник и обмотка в пазах), а программа FEMM сама формирует в зазоре кольцевой слой между радиусами окружностей r_r и r_s , ограничивающие поперечную площадь зазора S_δ со стороны ротора и статора. И электромагнитный момент через тензор магнитного натяжения определяется как поверхностный интеграл по этой площади S_δ кольцевого сечения зазора:

$$M_{em} = \frac{l_a}{(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r \cdot f_{T\alpha} \cdot dS = \frac{l_a}{\mu_0 \cdot (r_s - r_r)} \int_0^{2\pi} \int_{r_r}^{r_s} r \cdot B_r \cdot B_\alpha \cdot r \cdot dr \cdot d\alpha. \quad (31)$$

Примеры расчетного исследования статических сил в ТГ в конкретный момент времени в фиксированном положении ротора и токов обмоток есть в [23, 24], в них же, а также в [21, 22] исследуются вращающие моменты.

Однако, как известно, разрушительные процессы в механических системах вызываются не только и не столько статическими силами, а в большей степени – многократными циклическими их изменениями, и в наибольшей степени для ТГ это проявляется в режиме нагрузки. Поэтому в [25] для ТГ в этом режиме нагрузки проведен соответствующий расчетный анализ динамики – временных функций сил, приходящихся на проводники в пазах статора, а конкретно – сил, действующих на зубец сердечника статора и внутри этого сердечника в целом, электромагнитного момента и его переменной составляющей. Основой анализа является численно-полевой многопозиционный расчет магнитного поля в соответствии с условиями (2) – (4).

В ТГ главную функциональную роль играют электродвижущие силы (ЭДС). Для фазной обмотки, проводники которой находятся в пазах, основой для ЭДС является выражение закона электромагнитной индукции в форме:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (32)$$

Если характер изменения МПС во времени гармонический или близок к нему, то по методике из [11, 12] по (16) можно найти амплитуду МПС Ψ_m , проводя в (15) интегрирование по сечениям сторон всех секций фазной обмотки статора. Тогда действующее значение ЭДС этой обмотки:

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Psi_m. \quad (33)$$

Однако, для объективного анализа реального характера ЭДС на основе (32), как показано в [18–20], нужна временная функция МПС фазной обмотки:

$$\Psi_k(t_k); \quad t_k = k \cdot \Delta t; \quad k = 0, 1, 2, \dots, K_{min}. \quad (34)$$

Для этого мгновенные значения потокосцепления Ψ_k определяются, как и в [18 – 20], на основе расчета магнитных полей для фиксированных моментов времени t_k (2) по получаемому каждый раз распределению ВМП.

Функция $\Psi_k(t_k)$ по (34) является дискретной и может быть использована для получения временных функций ЭДС и выявления их гармонического состава двумя способами.

В первом случае функция $\Psi_k(t_k)$ непосредственно раскладывается, в соответствии с известными правилами, в гармонический ряд, как в [18 – 20]:

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5\dots} \Psi_{m,v} \cdot \cos(v \cdot \omega \cdot t + \gamma_v). \quad (35)$$

Это позволяет на основании (32) перейти к фазной ЭДС обмотки:

$$e = \sum_{v=1,3,5\dots} v \cdot \omega \cdot \Psi_{m,v} \cdot \sin(v \cdot \omega \cdot t + \gamma_v). \quad (36)$$

Во втором случае функция $\Psi_k(t_k)$ по (34) непосредственно преобразуется в дискретную функцию ЭДС $e_k(t_k)$, а именно:

$$e_k = -\frac{d\Psi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = \frac{\Psi_k - \Psi_{k+1}}{\Delta t}. \quad (37)$$

Полученная так дискретная функция ЭДС

$$e_k(t_k); \quad t_k = k \cdot \Delta t; \quad k = 0, 1, 2, \dots, K_{min} \quad (38)$$

при необходимости также может быть разложена в гармонический ряд Фурье:

$$e = \sum_{v=1,3,5,\dots} E_{m,v} \sin(v \cdot \omega \cdot t + \gamma_v), \quad (39)$$

который в целом подобен ряду (36), хотя, в принципе, может иметь несколько иные значения амплитуд гармоник ЭДС $E_{m,v}$ и их начальных фаз γ_v , как это показано в [18].

Временные функции и гармонический анализ фазных ЭДС турбогенераторов различных модификаций представлены в [18 – 20, 31].

Наряду с непосредственным определением приведенного комплекса электромагнитных параметров ТГ, полученные результаты могут послужить основой расчета и исследования более сложных процессов, таких как добавочные потери мощности в проводниках обмоток ТГ (по примеру [40, 41]), магнитных потерь в сердечниках сложной структуры (аналогия в [42]). Расчет магнитного поля в поперечном сечении ТГ дает основу для решения полевых задач в торцевых зонах ТГ [33, 35, 36, 39], которые являются составляющей частью исследовательского комплекса ТГ на основе численного решения полевых задач. Эта дает новые возможности, например, для исследования вихревых токов и добавочных магнитных потерь мощности в листах крайних пакетов сердечника статора и конструктивных элементах торцевой зоны ТГ [8, 34, 37, 38], а также нагрева ТГ с учетом этих потерь мощности [43]).

Выводы

В заключение отметим, что приведенный комплекс математических выражений является универсальным практически для любых ТГ, а также иных типов ЭМ. Возможные отличия могут проявляться в постановке полевой задачи, то есть в определении размеров областей расчета магнитного поля, задании соответствующих граничных условий, установлении сочетаний возбуждающих факторов – токов в обмотках.

Таким образом, можно еще раз заметить, что данная работа направлена на достижение главной цели – обеспечить эффективные научно-технические условия создания ТГ. Очередным заданием должно стать объединение изложенных принципов расчета электромагнитных параметров ТГ с классической системой их проектирования, чтобы в итоге обеспечить определение размерно-конструктивных параметров, отвечающих их заданным технико-эксплуатационным параметрам и характеристикам без длительной опытно-эксплуатационной доводки.

Список литературы: 1. *Bianchi Nicola*. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) / *Nicola Bianchi* // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 р. 2. *Мильх В. И.* Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Электро-

техніка і електромеханіка. – 2006. – №2. – С.40-46. 3. *Васьковский Ю. М.* Польовий аналіз електричних машин / *Ю. М. Васьковский*. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с. 4. *Мильх В. И.* Расчет трехмерного распределения магнитного поля мощного турбогенератора в режиме холостого хода / *В. И. Мильх, А. И. Высочин* // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С.30-32. 5. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>. – Дата обращения 10 марта 2014. 6. *Мильх В. И.* Расчетно-экспериментальное тестирование программы FEMM и преодоление проблем её использования для расчета магнитного поля электрических машин / *В. И. Мильх, И. В. Поляков, Н. В. Полякова, Е. И. Штангеев* // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №3. – С.38-43. 7. *Мильх В. И.* Программный комплекс численно-полевых расчётов турбогенератора в режимах холостого хода и нагрузки / *В. И. Мильх, В. А. Бадовский* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип.4/2009(57). Частина 2. – С.8-11. 8. *Мильх В. И.* Використання програми FEMM для розрахунку вихрових струмів на основі електромагнітної аналогії / *В. И. Мильх, О. І. Высочин* // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип.3/2010(62). Частина 1. – С.71-74. 9. *Мильх В. И.* Методология поверочного електромагнітного расчета полностью сверхпроводникового криотурбогенератора на основе решения полевой задач / *В. И. Мильх, В. Г. Данько, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – №1. – С.43-48. 10. *Мильх В. И.* Анализ магнитного поля и электродвижущих сил в полностью сверхпроводниковом криотурбогенераторе (и объективный взгляд на реакцию якоря) / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – №2. – С.47-52. 11. *Мильх В. И.* Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С.59-64. 12. *Мильх В. И.* Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С.33-38. 13. *Мильх В. И.* Численно-полевой анализ режимов возбуждения и разных видов реакции якоря в мощном турбогенераторе / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електроенергетика. – 2013. – №1. – С.61-69. 14. *Мильх В. И.* Принципы полнофакторного численно-полевого анализа режима нагрузки турбогенератора / *В. И. Мильх, В. А. Бадовский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4. – С.33-37. 15. *Мильх В. И.* Численно-полевой анализ эффективности векторных диаграмм турбогенератора / *В. И. Мильх, В. А. Бадовский* // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – №25. – С.85-90. 16. *Мильх В. И.* Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С.36-41. 17. *Мильх В. И.* Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С.40-45. 18. *Мильх В. И.* Гармонический анализ ЭДС в турбогенераторе на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей в различных режимах / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №4. – С.46-51. 19. *Мильх В. И.* Сравнительный численно-полевой анализ гармонического состава ЭДС в турбогенераторах / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С.45-49. 20. *Мильх В. И.* Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова* // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С.40-49. 21. *Мильх В. И.* Численно-полевой расчет электромагнитного момента и угловой характеристики идеализированного турбогенератора / *В. И. Мильх, В. Г. Данько, Н. В. Полякова* // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту. – Луганськ: СНУ. – 2006. – № 1(95). – С.144-152. 22. *Мильх В. И.* Численно-полевой анализ реактивного момента в турбогенераторе с неавтономным ротором / *В. И. Мильх, Н. В. Полякова, И. В. Поляков* // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – №36. – С.80-85. 23. *Мильх В. И.* Численно-полевой анализ силовых взаимодействий в турбогенераторе / *В. И. Мильх, В. А. Бадовский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С.32-36. 24. *Мильх В. И.* Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных

стационарных режимах работы / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С.47-54. **25.** Милых В. И. Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2014. – №3. – С.56-63. **26.** Милых В. И. Анализ переменной составляющей магнитного поля на поверхности вращающегося ротора турбогенератора / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехніка і електромеханіка. – 2013. – №5. – С.39-44. **27.** Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехніка і електроенергетика. – 2013. – №2. – С.5-13. **28.** Милых В. И. Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С.29-36. **29.** Полякова Н. В. Анализ индуктивных сопротивлений турбогенератора на основе численных расчетов магнитных полей / Н. В. Полякова // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. – №1(10). – С.81-86. **30.** Милых В. И. Численно-полевой анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – №36. – С.39-46. **31.** Милых В. И. Численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора турбогенератора / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – №4. – С.20-24. **32.** Милых В. И. Формирование расчетной модели магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора на основе анализа факторов влияния / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту. – Луганськ: СХУ. – 2001. – № 3(37). – С.48-55. **33.** Милых В. И. Анализ факторов влияния на магнитное поле в торцевой зоне турбогенератора / В. И. Милых, О. Н. Дубинина, И. В. Поляков // Вестник НТУ «ХПИ»: Серия «Новые решения в современных технологиях». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – №17. – С.105-109. **34.** Милых В. И. Сравнительный анализ вихревых токов и потерь мощности в зубцах крайнего пакета статора в турбогенераторе / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів: НУ «ЛП». – 2003. – № 485. – С.93-99. **35.** Милых В. И. Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчете магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчетных моделей / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 5. Київ: ІЕД НАНУ. – 2002. – С.10-15. **36.** Милых В. И. Численный расчет магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Электротехніка і електромеханіка. – 2003. – №1. – С.64-69. **37.** Милых В. И. Расчет вихревых токов и потерь мощности в сегментах крайнего пакета статора турбогенератора / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Электротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – С.44-48. **38.** Милых В. И. Численный анализ потерь мощности в сегменте крайнего пакета статора турбогенератора с учетом вращения магнитного поля / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Електромашинобудування та електрообладнання». – Київ: «Техніка». – 2004. – Вип.62. – С.125-128. **39.** Милых В. И. Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы / В. И. Милых, А. И. Высочин // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С.17-22. **40.** Милых В. И. Цепнополевой метод решения задачи вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока / Милых В. И. // Электротехніка. – 1993. – №1. – С.15-23. **41.** Милых В. И. Расчет вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока в режиме холостого хода / Милых В. И. // Электротехнічество. – 1993. – №4. – С.30-39. **42.** Милых В. И. Сравнительный анализ электромагнитных и тепловых параметров сердечника якоря тягового электродвигателя с различными аксиальными вентиляционными каналами / Милых В. И., Ю. А. Кшмов, Е. И. Штангеев // Электротехніка. – 1990. – №5. – С.36-42. **43.** Данько В. Г. Деякі проблеми турбогенераторів з повітряним охолодженням / В. Г. Данько, В. І. Мліх, І. В. Поляков, О. Л. Лівшиц, І. Я. Черемісов // Вестник Харьк. политехн. ун-та. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – № 84. – С.73-76.

Bibliography (transliterated): 1. Bianchi, Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. Print. **2.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Opredelenie elektromagnitnykh parametrov elektricheskikh

mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 2 (2006): 40-46. Print. **3.** Vas'kovskyy, Yu. M. *Pol'ovyy analiz elektrichnykh mashyn*. Kyiv: NTUU "KPI", 2007. Print. **4.** Milykh, V. I., and A. I. Vysochyn. "Raschet trehmernogo raspredeleniya magnitnogo polya moschnogo turbogeneratora v rezhime holostogo hoda." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 3 (2011): 30-32. Print. **5.** Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics: OldVersions." *Finite Element Method Magnetics: HomePage*. DavidMeeker, 11 October 2010. [Web. 10 March 2014](http://www.femm.info/wiki/OldVersions) <<http://www.femm.info/wiki/OldVersions>>. **6.** Milykh, V. I., et al. "Raschetno-eksperimentalnoe testirovanie programmy FEMM i preodolenie problem eyo ispolzovaniya dlya rascheta magnitnogo polya elektricheskikh mashin." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 3 (2004): 38-43. Print. **7.** Milykh, V. I., and V. A. Badovskiy. "Programmnyy kompleks chislennno-polevykh raschyotov turbogeneratora v rezhimakh holostogo hoda i nagruzki." *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu: Naukovi pratsi KDPU*. Vol. 2.4 (57). Kremenchuk: KDPU, 2009. 8-11. Print. **8.** Milykh, V. I., and O. I. Vysochyn. "Vykorystannya prohramy FEMM dlya rozrakhunku vykhrovykh strumiv na osnovi elektromagnitnoyi analohiyi." *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnogo universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho*. Vol. 1.3 (62)– Kremenchuk: KDU, 2010. 71-74. Print. **9.** Milykh, V. I., V. G. Danko and N. V. Polyakova. "Metodologiya poverokhova elektromagnitnogo rascheta polnostyu sverhprovodnikovogo krioturboeneratora na osnove resheniya polevykh zadach." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 1 (2002): 43-48. Print. **10.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Analiz magnitnogo polya i elektrodvizhushchih sil v polnostyu sverhprovodnikovom krioturboeneratore (i ob'ektivniy vzglyad na reaktivnyy yakorya)." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 2 (2002): 47-52. Print. **11.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Analiz fazovykh sootnosheniy elektromagnitnykh velichin v turbogeneratore na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 4 (2003): 59-64. Print. **12.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Sistema napravleniy i fazovykh sootnosheniy elektromagnitnykh velichin pri chislennykh raschetakh magnitnykh poley v turbogeneratore." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 5 (2011): 33-38. Print. **13.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Chislennno-polevoy analiz rezhimov vzbuzhdeniya i raznykh vidov reaktsii yakorya v moschnom turbogeneratore." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 1 (2013): 61-69. Print. **14.** Milykh, V. I., and V. A. Badovskiy. "Printsipy polnofaktornogo chislennno-polevogo analiza rezhima nagruzki turbogeneratora." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 4 (2009): 33-37. Print. **15.** Milykh, V. I., and V. A. Badovskiy. "Chislennno-polevoy analiz effektivnosti vektornykh diagramm turbogeneratora." *Vestnik NTU "HPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskyy vyipusk. Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov*. No. 25. Kharkov: NTU "HPI", 2008. 85-90. Print. **16.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Organizatsiya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniem zadannykh ego vyihodnykh parametrov." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 1 (2012): 36-41. Print. **17.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Raschetnyy i garmonicheskyy analiz magnitnykh poley v aktivnoy zone turbogeneratora v rezhime nagruzki." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 6 (2013): 40-45. Print. **18.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Garmonicheskyy analiz EDS v turbogeneratore na osnove chislennykh raschetov vraschayushchisya magnitnykh poley v razlichnykh rezhimakh." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 4 (2004): 46-51. Print. **19.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Sravnitelnyy chislennno-polevoy analiz garmonicheskogo sostava EDS v turbogeneratorakh." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 2 (2012): 45-49. Print. **20.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Garmonicheskyy analiz elektromagnitnykh velichin trekhfaznoy obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislennno-polevykh metodov." *Tekhnichna elektrodynamika* 3 (2013): 40-49. Print. **21.** Milykh, V. I., V. G. Danko and N. V. Polyakova. "Chislennno-polevoy raschet elektromagnitnogo momenta i uglovykh harakteristiki idealizirovannogo turbogeneratora." *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho un-tu*. No. 1(95). Luhansk: SNU, 2006. 144-152. Print. **22.** Milykh, V. I., N. V. Polyakova and I. V. Polyakov. "Chislennno-polevoy analiz reaktivnogo momenta v turbogeneratore s neyavnopolysnyim rotorom." *Vestnik NTU "HPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskyy vyipusk. Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov*. No.36. Kharkov: NTU "HPI", 2006. 80-85. Print. **23.** Milykh, V. I., and V. A. Badovskiy. "Chislennno-polevoy analiz silovykh vzaimodeystviy v turbogeneratore." *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 3 (2009): 32-36. Print. **24.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Silovyye vzaimodeystviya v turbogeneratore v razlichnykh statsionarnykh rezhimakh raboty." *Tekhnichna elektrodynamika* 5 (2013): 47-54. Print. **25.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Dinamika silovykh deystviy v turbogeneratorakh s raznyimi zubtsovo-pazovymi strukturami v nominalnom rezhime raboty." *Tekhnichna elektrodynamika* 3 (2014): 56-63. Print. **26.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Analiz

peremennoy sostavlyayushey magnitnogo polya na poverhnosti vraschayuschegosya rotora turbogeneratora." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 5 (2013): 39-44. Print. **27.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Analiz garmonicheskogo sostava peremennogo magnitnogo polya, svyazannogo s vraschayuschimsya rotorom turbogeneratora, v rezhimakh holostogo hoda i korotkogo замыkaniya." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 2 (2013): 5-13. Print. **28.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Sravnitelnyy analiz peremennogo magnitnogo polya na poverhnosti rotora turbogeneratorov s raznyim chislom zubtsov statora v rezhime nagruzki." *Tekhnichna elektrodynamika* 2 (2014): 29-36. Print. **29.** Polyakova, N. V. "Analiz induktivnykh soprotivleniy turbogeneratora na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley." *Pratsi Luhans'koho viddilennya Mizhnarodnoyi Akademiyi informatsiyi* 1(10) (2005): 81-86. Print. **30.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Chislennno-polevoy analiz induktivnykh soprotivleniy rasseyaniya turbogeneratora." *Vestnik NTU "HPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskyy vyipusk. Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.* No. 36. Kharkov: NTU "HPI", 2005. 39-46. Print. **31.** Milykh, V. I., and N. V. Polyakova. "Chislennno-polevaya otsenka effektivnosti ukorochniya obmotki statora turbogeneratora." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 4 (2014): 20-24. Print. **32.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Formirovaniye raschetnoy modeli magnitnogo polya v tortsevoy zone turbogeneratora na osnove analiza faktorov vliyaniya." *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho un-tu.* No. 3(37). Luhansk: SNU, 2001. 48-55. Print. **33.** Milykh, V. I., O. N. Dubinina and I. V. Polyakov. "Analiz faktorov vliyaniya na magnitnoye pole v tortsevoy zone turbogeneratora." *Vestnik NTU "HPI": Seriya "Novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyah".* No. 17. Kharkov: NTU "HPI", 2001. 105-109. Print. **34.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Sravnitelnyy analiz vihrevykh tokov i poter moschnosti v zubsah kraynego paketa statora v turbogeneratore." *Visnyk Natsional'noho universytetu "Lviv's'ka politehnika". Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy.* No. 485. Lviv: NU "LP", 2003. 93-99. Print. **35.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Sravnitelnyy analiz variantov granichnykh usloviy pri chislennom raschete magnitnogo polya v kontsevoy zone turbogeneratora metodom plosko-ortogonalnykh raschetnykh modeley." *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyy vyipusk. Problemy suchasnoyi elektrotehniki.* Vol. 5. Kyiv: IED NANU, 2002. 10-15. Print. **36.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Chislennyiy raschet magnitnogo polya v kontsevoy zone turbogeneratora v rezhime nagruzki." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 1 (2003): 64-69. Print. **37.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Raschet vihrevykh tokov i poter moschnosti v segmentakh kraynego paketa statora turbogeneratora." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 1 (2004): 44-48. Print. **38.** Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Chislennyiy analiz poter moschnosti v segmente kraynego paketa statora turbogeneratora s uchetom vrascheniya magnitnogo polya." *Mizhvidomchyy naukovy-tekhnichnyy zbirnyk "Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya".* No. 62. Kyiv: "Tekhnika", 2004. 125-128. Print. **39.** Milykh, V. I., and A. I. Vysochyn. "Printsipyi rascheta magnitnogo polya v tortsevoy zone turbogeneratora v razlichnykh rezhimakh ego raboty." *Elektrotehnika i elektromekhanika* 3 (2010): 17-22. Print. **40.** Milykh, V. I. "Tsepnopolovoy metod resheniya zadachi vihrevykh tokov v obmotke yakorya mashinyi postoyannogo toka." *Elektrotehnika* 1 (1993): 15-23. Print. **41.** Milykh, V. I. "Raschet vihrevykh tokov v obmotke yakorya mashinyi postoyannogo toka v rezhime holostogo hoda." *Elektrichestvo* 4 (1993): 30-39. Print. **42.** Milykh, V. I., Yu. A. Klimov and E. I. Shtangeev. "Sravnitelnyy analiz elektromagnitnykh i teplovykh parametrov serdechnika yakorya tyagovogo elektrodvigatelya s razlichnyimi aksialnyimi ventilyatsionnyimi kanalami." *Elektrotehnika* 5 (1990): 36-42. Print. **43.** Danko, V. G., et al. "Deyaki problemi turbogeneratoriv z povltryanim oholodzhennyam." *Vestnik Hark. politehn. un-ta.* No. 84. Kharkov: HGPU, 2000. 73-76. Print.

Надійшла (received) 29.08.2014

Числено-польові розрахунки електромагнітних параметрів турбогенераторів / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № ... – С..... – Бібліогр.: 43 назв. – ISSN.....

Показані принципи і наведені приклади визначення електромагнітних параметрів турбогенераторів на основі чисельних розрахунків магнітних полів. Розрахунковий аналіз параметрів проводиться як в статичній постановці, так і в динаміці в процесі обертання магнітних полів. Серед параметрів розглядаються магнітні індукція, потік, потокозчеплення і провідність, падіння

магнітної напруги, ЕРС, власна і взаємна індуктивності, сили, що діють на провідники і феромагнітні осердя, електромагнітний момент тощо.

Ключові слова: турбогенератор, магнітні поля, численні розрахунки, електромагнітні параметри, статична постановка, динаміка.

УДК 621.313

Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № ... – С..... – Бібліогр.: 43 назв. – ISSN.....

Показаны принципы и приведены примеры определения электромагнитных параметров турбогенераторов на основе численных расчетов магнитных полей. Расчетный анализ параметров проводится как в статической постановке, так и в динамике в процессе вращения магнитных полей. Среди параметров рассматриваются магнитные индукция, поток, потокозчепление и проводимость, падение магнитного напряжения, ЭДС, собственная и взаимная индуктивности, силы, действующие на проводники и ферромагнитные сердечники, электромагнитный момент и др.

Ключевые слова: турбогенератор, магнитные поля, численные расчеты, электромагнитные параметры, статическая постановка, динамика.

УДК 621.313.2

Numerically-field calculations of the electromagnetic parameters of turbogenerators / V.I. Milykh, N.V. Polyakova // Bulletin of NTU "KhPI". Thematic edition "Electric machines and electromechanical energy conversion". Kharkiv : NTU "KhPI". 2014. – № – P..... – Bibliogr. 43. – ISSN.....

With the development of computer technology, numerical calculation methods of magnetic fields are used to calculate the electromagnetic parameters of electrical machines. In this case, two-dimensional calculations are applied for machines with a classical design using the software package FEMM.

A series of works of this kind has already been done and published for an important representative of electrical machines - the turbogenerator (TG). The article provides a list of the main of these works and the article points out their essence briefly.

The purpose of this paper is to present the main provisions from which the study of a number of electromagnetic parameters of TG is formed on the basis of numerical calculations of its magnetic field.

A computational model of the electromagnetic system of TG is given and the main aspects of the calculation of the magnetic field are highlighted, as well as two productions for calculating electromagnetic parameters are presented: static and dynamic.

Expressions and principles for determining of a number of electromagnetic parameters of TG, which are calculated after numerical calculation of the magnetic field, are represented. These include: magnetic induction, magnetic field intensity, magnetic flux, magnetic flux linkage, magnetic conductivity, magnetic voltage drop, EMF, self and mutual inductance, inductive reactance, the forces acting on the conductors and ferromagnetic cores, electromagnetic torque and others. It is stated that the static electromagnetic parameters can be obtained by a one-time calculation of the magnetic field, and the dynamic parameters (time functions) can be obtained by reusable multipositional calculations. Possible directions for expansion of calculations of the electromagnetic parameters and processes in the TG are indicated on the basis of these values.

It is noted that the above set of mathematical expressions for the electromagnetic parameters is universal for almost any TG, as well as other types of electrical machines. As a result, it is asserted that this work aims to achieve the main objective, namely to provide effective scientific and technical conditions for the creation of new TG.

Keywords: turbogenerator, magnetic fields, numerical calculations, the electromagnetic parameters, static setting, the dynamics.



Мильх Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин НТУ «ХПИ». Закончил Харьковский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты» в 1972 г. В этом же институте защитил кандидатскую и докторскую диссертации по такой же специальности в 1978 и 1996 гг. Научные интересы связаны с исследованием и усовершенствованием различных электрических машин, с расчетом и анализом в них электромагнитных полей и процессов. E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua



Полякова Наталия Владимировна, ассистент кафедры общей электротехники, НТУ «ХПИ». Научные интересы связаны с математическим моделированием электромагнитных процессов в электрических машинах.