

Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, №487 – Електроенергетичні та електромеханічні системи. Львів: НУ “ЛП”, 2003.-С.10-17.

УДК 621.313

Милых В.И., Полякова Н.В.

Харьков, Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ЭДС, ВЫЗЫВАЕМЫХ РЕАКЦИЕЙ ЯКОРЯ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

Подано принцип визначення величини і характеру ЕРС самоіндукції в трифазній обмотці статора машин змінного струму. Задача розв’язується через використання миттєвих значень магнітного потокозчеплення, що отримуються чисельним розрахунком магнітного поля. Цей підхід пропонується як альтернатива непродуктивному і недетермінованому визначенню ЕРС реакції якоря, що прийнятий в класичній теорії електричних машин.

Principle of determination of self-induction electromotive force magnitude and behavior in an AC machine three-phase stator is described. The problem is solved with instantaneous magnetic linkage values obtained by means of numerical computation of the stator magnetic field. This approach is recommended as an alternative to nonproductive and nondeterministic armature-reaction electromotive force evaluation adopted in the classical theory of electric machine.

В сложившейся теории электрических машин [1,2] достаточно сложная методика определения ЭДС, наведенной в трехфазной обмотке переменного тока ее собственным магнитным полем, заключается в следующем.

Графически или умозрительно строится ступенчатая кривая распределения намагничивающей силы (другое название - магнитодвижущей силы - МДС) обмотки вдоль окружности зазора. Эта функция по пространственной координате раскладывается в гармонический ряд и преобразуется в соответствующий ряд функции магнитной индукции в зазоре. Вводятся гармонические составляющие магнитного потока, порождающие соответствующие составляющие ЭДС в обмотке. Эти ЭДС в дальнейшем учитываются посредством индуктивных сопротивлений самоиндукции фазной обмотки (с учетом взаимоиндукции других фаз). Причем сопротивления, вызванные высшими (кроме первой) гармониками поля в зазоре, сводятся в индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния. Оно, в свою очередь, учитывается умножением индуктивного сопротивления от основной гармоники потока на коэффициент дифференциального рассеяния. Вводится еще проводимость магнитного потока дифференциального рассеяния, которая представляет определенную часть магнитного поля зазора и фигурирует наряду с проводимостями пазового и лобового рассеяния.

Вся эта методика определения ЭДС самоиндукции в обмотке строится на целом ряде упрощений, начиная с исключения зубцовых структур сердечников ротора и статора и заканчивая введением нескольких условных коэффициентов [1,2]. А в результате

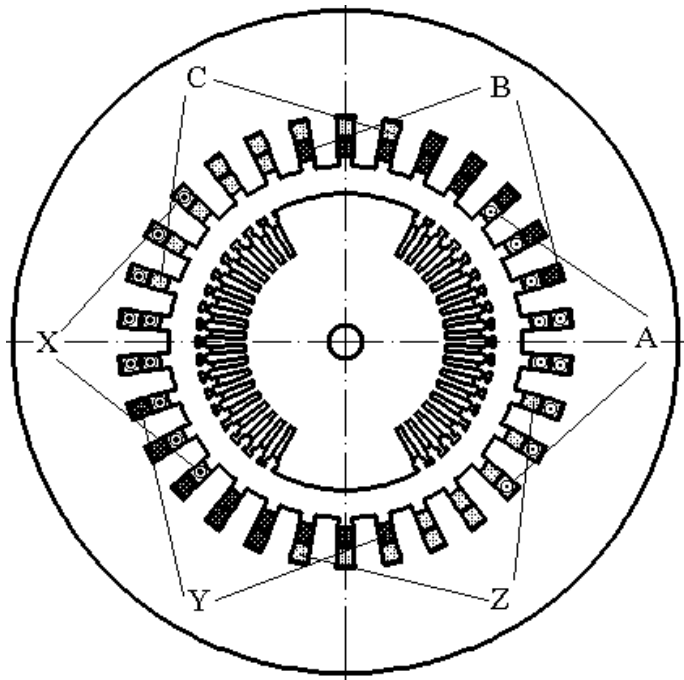


Рис. 1. Электромагнитная система турбогенератора

констатируется, что вращающиеся пространственные гармоники магнитного поля индуцируют в обмотке ЭДС самоиндукции одинаковой частоты, равной частоте тока в данной обмотке. Поэтому временная функция ЭДС, индуцируемой магнитным полем реакции якоря при синусоидальных токах в его обмотке, в действительности практически синусоидальна, что подтверждает и опыт. И полученные уточнения в определении ЭДС посредством учета дифференциального рассеяния находятся на уровне более низком, чем возможные погрешности от неизбежных упрощений, сопутствующих описанной методике.

Современные численные методы расчета магнитных полей поз-

воляют отказаться от такого непродуктивного и недостаточно детерминированного подхода к определению ЭДС самоиндукции в обмотках машин переменного тока.

Целью данной работы является представление принципа прямого определения ЭДС реакции якоря в трехфазных обмотках машин переменного тока на основе численных расчетов их магнитного поля. При этом получаются как величина, так и характер ЭДС, и вообще исключается необходимость условного выделения и вычисления пазового и дифференциального рассеяния обмотки, введения коэффициентов обмоточного, насыщения, неравномерности зазора и прочих усложнений, присущих сложившейся теории машин переменного тока.

В качестве демонстрационной модели используем конструкцию и параметры турбогенератора мощностью порядка 200 МВт, которые уже использовались в [3]. Поперечное сечение его электромагнитной системы представлено на рис.1, где показаны фазные зоны A-X, B-Y и C-Z обмотки статора, а основные параметры составляют: радиус ротора - 0,537 м; немагнитный зазор - 0,1 м; число витков на фазу обмотки статора $w_a=10$; расчетная длина - $l_a=5,29$ м; номинальные фазные напряжение $U_\phi=9093$ В и ток $I_a=8625$ А; частота $f=50$ Гц; относительное укорочение шага обмотки статора $\beta=4/5$.

Расчетная модель турбогенератора представлена на рис.2 и отличается от исходной модели (рис.1) тем, что в ней зубцовая структура ротора представлена эквивалентной однородной в угловом направлении средой. Вообще расчеты магнитного поля с учетом реальной зубцовой зоны ротора не представляют проблемы [3]. А здесь это вызвано необходимостью исключения влияния неоднородной структуры ротора на форму ЭДС реакции якоря в обмотке статора для чистоты вычислительного эксперимента.

Магнитное поле в поперечном сечении ТГ (рис.1) описывается в полярных координатах (r, φ) известным двумерным дифференциальным уравнением [4]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\nu r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\nu \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} \right] = -J_z, \quad (1)$$

где A_z, J_z - аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; ν - удельное магнитное сопротивление (УМС).

Для обмотки статора и создаваемого ею магнитного поля отсутствуют оси симметрии (из-за двухслойной структуры и укорочения), поэтому минимальной областью расчета является полюсное деление машины. В этой области уравнение (1) решалось численно методом конечных разностей (МКР) [4]. И хотя это уравнение описывает плоскопараллельное магнитное поле, при его решении учитываются неоднородные аксиальные длины и структура сердечников, торцевое рассеяние поля [5].

В области расчета использовалась полярная сеточная модель со специальной аппроксимацией зубцовой зоны статора [6]. Сетка содержала 41 линию окружности и 139 радиальных линий.

На внутренней расточке сердечника ротора ($r=R_{p1}$) и наружном радиусе сердечника статора ($r=R_{c2}$) принимались условия, ограничивающие распространение магнитного поля:

$$A_z(R_{p1}, \varphi) = 0; \quad A_z(R_{c2}, \varphi) = 0, \quad (2)$$

а на ограничивающих радиальных линиях учитывалось условие периодичности магнитного поля по угловой координате:

$$A_z(r, 0) = -A_z(r, \pi). \quad (3)$$

Расчет магнитного поля обмотки статора проводился при заданном распределении УМС, соответствующем насыщению ферромагнетиков, как в номинальном режиме, но при этом величина УМС задавалась равномерной по угловой координате (по той же причине, которая упомянута применительно к ротору).

Для получения временных функций магнитного поля и ЭДС обмотки статора в ее фазах задавались мгновенные значения токов в соответствии с их функциями

$$i_A = I_{ma} \cos(\omega t); \quad i_B = I_{ma} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi); \quad i_C = I_{ma} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi). \quad (4)$$

где амплитуда токов $I_{ma} = \sqrt{2} I_a = 12200 \text{ A}$; $\omega = 2\pi f$ - их угловая частота.

Объективный анализ формы ЭДС возможен только исходя из временных функций магнитных потокосцеплений фазных обмоток статора. Поэтому именно эти функции необходимо определить на основе расчета магнитных полей. Их расчеты проводи-

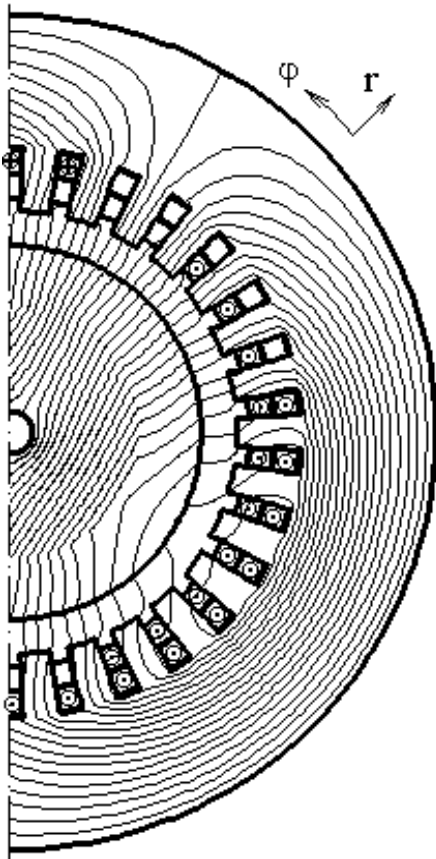


Рис.2. Картина магнитного поля обмотки статора

лись для фиксированных моментов времени t с временным шагом $\Delta t = T / 360$, где T - период изменения токов.

Магнитное потокосцепление фазной обмотки статора

$$\Psi_{\phi} = \frac{2}{S_{\phi}} \int_{S_{\phi}} A_z dS, \quad (5)$$

определялось по получаемому каждый раз распределению ВМП $A_z(r, \varphi)$, а интегрирование проводилось по площади поперечного сечения S_{ϕ} сторон секций конкретной фазы в пределах полюсного деления машины, представленного на рис.2.

Получаемое по (5) значение Ψ_{ϕ} приходится на единицу аксиальной длины и один усредненный виток обмотки, удвоение учитывает наличие вторых сторон секций. Фактически это будет единичное магнитное потокосцепление одной фазы обмотки от реакции якоря с учетом потокосцеплений от других фаз, причем в Ψ_{ϕ} входит и то, что обычно выделяется как поля пазового и дифференциального рассеяния обмотки статора. Принцип вычислений Ψ_{ϕ} по распределению ВМП с учетом сеточной аппроксимации описан в [7].

Пример рассчитанной картины поля обмотки статора, соответствующей моменту времени $t=T/12$, представлен на рис.2, где линии ВМП проведены с шагом 0,05 о.е. (нормировка максимальным значением ВМП $A_{\max} = 0,7341$ Вб/м). Для этого же момента времени на рис.3 дано распределение радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре на указанных дугах окружности.

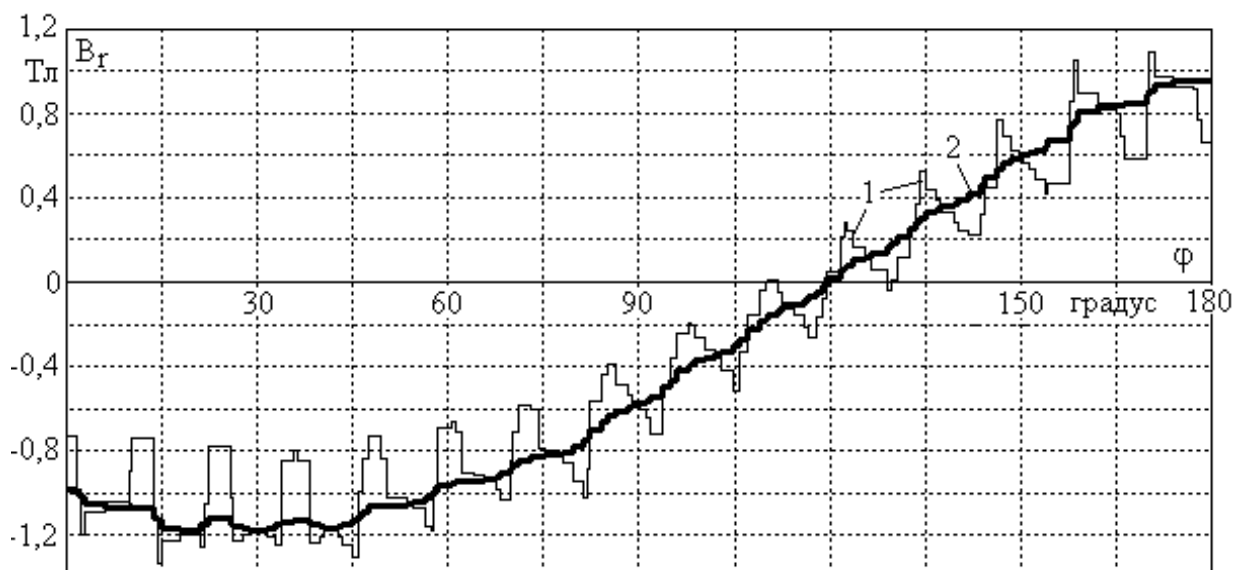


Рис.3. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции по дуге окружности в зазоре: 1 - на расточке сердечника статора; 2 - на средней линии зазора

Временная функция $\Psi_{\phi}(t)$ для каждой фазной обмотки за период T имеет повторяемость согласно условию $\Psi_{\phi}(t+T/2)=-\Psi_{\phi}(t)$. Поэтому для выявления этой функции и разложения в гармонический ряд необходимо ее иметь минимум на временном отрезке в полпериода - $T/2$. Однако можно уменьшить объем расчетов с учетом взаимосвязи пото-

косцеплений трех фаз, а именно ввиду их повторяемости с временным сдвигом по фазе на $T/3$. Поэтому расчеты магнитных полей с указанным временным шагом Δt были проведены на временном интервале в $T/6$ и по формуле (5) получились временные зависимости потокосцеплений $\Psi_A(t)$, $\Psi_B(t)$ и $\Psi_C(t)$ для трех фазных обмоток в численной форме

$$\Psi_{\phi,k}(t_k); \quad t_k = k \cdot \Delta t; \quad k=0,1,2,\dots \quad (6)$$

Продолжение функции $\Psi_A(t)$ на интервал $(T/6 \dots T/3)$ получается из $\Psi_A(t) = -\Psi_B(t - T/6)$, а на $(T/3 \dots T/2)$ - как $\Psi_A(t) = \Psi_C(t - T/3)$.

Графики функций $\Psi_{SA}(t)$, $\Psi_{SB}(t)$ и $\Psi_{SC}(t)$ на временном отрезке в период даны на рис.4, а их численное представление (6) позволило разложить любую из них в соответствии с известными правилами [8] в гармонический ряд

$$\Psi_{\phi} = \sum_{k=1,3,5,\dots} \Psi_{m,k} \cos(k\omega t + \gamma_k). \quad (7)$$

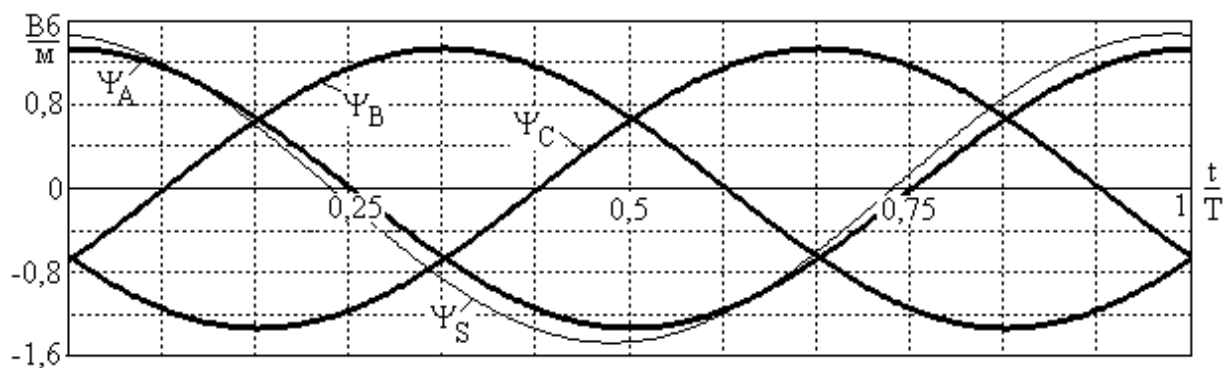


Рис.4. Временные функции магнитных потокосцеплений

Результат разложения подтвердил ожидания: функция $\Psi_{\phi}(t)$ не содержит гармоник, кроме первой, повторяя характер функций (4). Ну, а если бы начать раскладывать функцию типа $B_r(\varphi)$ (рис.3) в координатный ряд и далее действовать в соответствии с упомянутой в начале статьи классической методикой, то масса неопределенностей (на каком радиусе и для какого момента времени брать эту функцию и др.) и кропотливой работы ни к чему бы не вела. Возвращаясь к нашей функции $\Psi_{\phi}(t)$, добавим, что из-за несимметрии двухслойной укороченной обмотки между функциями токов и магнитных потокосцеплений имеется фазовый сдвиг, составляющий в угловой мере примерно 1 градус. Амплитуда единичного потокосцепления, соответствующего выражению (5), составила для первой (основной и единственной) гармоники $\Psi_m = 1,366$ Вб/м.

Функции типа (6) и (7) были получены и для отдельной секции обмотки статора, в предположении, что она имеет диаметральный шаг. Функция магнитного потокосцепления такой секции $\Psi_S(t)$ также изображена на рис.4: она тоже синусоидальна и имеет амплитуду $\Psi_{S,m} = 1,475$ Вб/м. Отношение $\Psi_m / \Psi_{S,m}$ - это то, что соответствует известному обмоточному коэффициенту. В нашем случае оно составило 0,906, а по известным формулам из [1,2] этот коэффициент для обмотки статора данного турбогенератора составил 0,910.

Подготовленные данные - временные функции магнитных потокосцеплений фазы обмотки статора, позволяют перейти к ЭДС в этой обмотке. Для фазой обмотки ЭДС определяется на основании закона электромагнитной индукции, и в данном случае

$$e_{\phi} = -w_a I_a \frac{d\Psi_{\phi}}{dt} \approx -w_a I_a \frac{\Delta\Psi_{\phi}}{\Delta t}, \quad (8)$$

где $\Delta\Psi_{\phi}$ - изменение потокосцепления на временном шаге Δt .

Проведя численное дифференцирование функций магнитного потокосцепления фазных обмоток статора, получили их ЭДС. Их графики представлены в пределах $T/2$ на рис.5, и так как функции потокосцеплений - чистые синусоиды, то такой же характер имеют и ЭДС фазных обмоток. Аналогична и функция ЭДС $e_s(t)$ отдельной секции.

Все, что получено здесь для ЭДС обмотки статора турбогенератора традиционной конструкции, вызванных реакцией якоря, полностью соответствует выводам в работе [9], где рассматривается обмотка нетрадиционной конструкции.

Так как ЭДС самоиндукции фазных обмоток синусоидальны, то в дальнейшем можно ограничиваться одноразовым расчетом магнитного поля обмотки статора при расположении ее фаз, как на рис.1, приняв для их токов мгновенные значения по (4) при $t=0$. Тогда по (5) сразу получится амплитудное значение магнитного потокосцепления фазной обмотки Ψ_m (упомянутым фазовым сдвигом в один градус пренебрежем). Исходя из этого, можно определить индуктивность фазы обмотки статора

$$L_{\phi} = w_a I_a \frac{\Psi_m}{I_{ма}} \quad (9)$$

и ее синхронное индуктивное сопротивление

$$X_d = \omega L_{\phi}. \quad (10)$$

Таким образом можно оперировать с действующим значением ЭДС от поля реакции якоря в фазе обмотки статора в форме, близкой к общепринятому [1,2]:

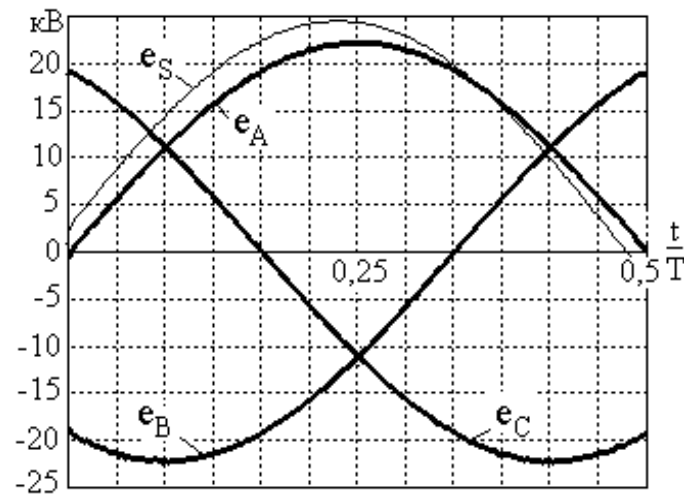
$$E_S = X_d I_a, \quad (11)$$

которое, впрочем, может быть получено и по другой известной формуле

$$E_S = 4,44 f w_a I_a \Psi_m. \quad (12)$$

Рис.5. Временные функции ЭДС фазных обмоток

Так как для определения Ψ_m по (5) используется полное магнитное поле обмотки статора, то в величины по формулам (9)-(12) входят и всевозможные рассеяния магнитного поля, кроме лобового рассеяния. Эта составляющая магнитного поля может быть рассчитана, как магнитное поле обмотки статора в торцевой зоне, по методике, изложенной в [3]. Рассматривая это поле как часть единого магнитного поля, по результатам расчета его можно ввести коэффициент лобового рассеяния $k_{л рас}$. Тогда достаточно ввести во все формулы от (5) до (12)



этот коэффициент и получить по этим формулам соответствующие величины от полного магнитного поля обмотки статора. Конкретно, для рассматриваемого турбогенератора на основании расчетов магнитного поля в [3] проведенная оценка дала $k_{\text{рас}} \approx 1,01..1,02$.

Если возникнет необходимость оперирования с основным магнитным полем, проходящим через ротор, и с отдельными составляющими полного поля в виде различных компонент рассеяния, то такое подразделение также можно сделать, используя картину магнитного поля на рис.2 или какое-либо аналогичное его изображение в любой конкретный момент времени.

ВЫВОДЫ

1. Представленный подход к определению ЭДС реакции якоря трехфазной обмотки статора электрической машины переменного тока является наиболее детерминированным и практически лишенным целого ряда условностей и допущений, принятых к классической теории этих машин.

2. Так как характер временных функций магнитных потокосцеплений фазных обмоток статора повторяет характер функций токов этих обмоток, и, значит, при синусоидальных токах ЭДС реакции якоря тоже синусоидальны, то для определения этих ЭДС достаточно провести одноразовый расчет магнитного поля численным методом. На основе полученного амплитудного значения магнитного потокосцепления фазной обмотки статора непосредственно получаются как ЭДС реакции якоря, так и связанные с ней другие величины. Традиционный подход определения ЭДС реакции якоря, основанный на разложении координатных функций магнитных величин, на этом фоне выглядит как неоправданный и практически малоэффективный.

1. Вольдек А.И. *Электрические машины*. Л.: Энергия, 1978.- 832 с. 2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. *Электрические машины*. В 2-х ч. Ч.2- *Машины переменного тока*. Л.: Энергия, 1973.-648 с. 3. Милых В.И., Дубинина О.Н. Численный расчет магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки // *Электротехника і електромеханіка*.-2003.-№1.-С.64-69. 4. Erdelyi E.A., Ahamed S.V., Burnes R.D. Flux distribution in saturated dc machines at no load. - "IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. ", 1965, PAS 84, №5, pp.375-381. 5. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // *Электротехника*.-1982.-№12. -С.46-49. 6. Милых В.И. Принцип компенсации геометрических искажений при конечно-разностных полевых расчетах // *Техническая электродинамика*.-1989.-№6.-С.20-26. 7. Милых В.И., Данько В.Г., Полякова Н.В. Методология поверочного электромагнитного расчета полностью сверхпроводникового криотурбогенератора на основе решения полевых задач // *Электротехника і електромеханіка*.-2002.-№1.-С.43-48. 8. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1973.- 832 с. 9. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ магнитного поля и электродвижущих сил в полностью сверхпроводниковом криотурбогенераторе (и объективный взгляд на реакцию якоря) // *Электротехника і електромеханіка*.-2002.-№2.-С.47-52.