

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

# ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

№5  
2005

Київ

Національна академія наук України  
Відділення фізико-технічних проблем енергетики  
Інститут електродинаміки

Науково-прикладний журнал  
**ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА**

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**

Шидловський А.К. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

**ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА**

Кириленко О.В. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

Липківський К.О. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Волков І.В.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Вороновський Г.К.	БАТ "Харківська ТЕЦ-5", Харків
Гриневич Ф.Б.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Денисов О.І.	Державний технологічний університет, Чернігів
Жуйков В.Я.	Національний технічний університет України "КПІ", Київ
Кулик М.М.	Інститут загальної енергетики, Національна академія наук, України, Київ
Кузнецов В.Г.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Мислович М.В.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Півняк Г.Г.	Національний гірничий університет, Дніпропетровськ
Резцов В.Ф.	Інститут відновлюваної енергетики, Національна академія наук України, Київ
Розов В.Ю.	Відділення магнетизму Інституту електродинаміки, Національна академія наук України, Харків
Сокол Є.І.	Національний технічний університет "ХПІ", Харків
Стогній Б.С.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Счастливий Г.Г.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Таранов С.Г.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Тітко О.І.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Федоренко Г.М.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Шидловська Н.А.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ
Щерба А.А.	Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

**ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР**

Городжа Л.В. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

Адреса редакції:

03680, м. Київ-57, проспект Перемоги, 56  
Інститут електродинаміки НАН України  
телефон (044) 456 88 69, 454 26 57  
<http://rql.kiev.ua/ted>

## ЗМІСТ

**Теоретична електротехніка та електрофізика**

SCHERBA A.A., PODOLTSEV A.D., KUCHERYAVAYA I.N., PEREKOS A.E. Spark-eroded particles: size analysis, cooling rate, microstructure . . . . .	3
ВИШТАК Т.В., КОНДРАТЕНКО И.П., РАЩЕПКИН А.П. Электромагнитное поле и силы в однофазных индукторах поперечного магнитного поля для нагрева лент . . . . .	9
ГАНЕФЕЛЬД Р.В., ПРИМАК А.В., ЯКОВЛЕВ В.С. О природе нелинейности металлоксидных варисторов . . . . .	14

**Перетворення параметрів електричної енергії**

ФЕДІЙ В.С., НАМЕСТИК С.Г. Регулировочные характеристики трехфазного вентильно-конденсаторного источника реактивной мощности (ИРМ) в индуктивном режиме . . . . .	18
OLE SCHUK V., STANKOVICH A., ERMURATSKI Vas., SIZOV A., YAROSHENKO E. Algorithms of synchronized modulation for neutral-point-clamped converters with common-mode voltage elimination . . . . .	22
ЛИПКІВСЬКИЙ К.О. Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму . . . . .	28
ПЕРЕСАДА С.М., СЕРЕДА А.Н. Новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка . . . . .	32
ЛУКАШ Н.П., СУХОВЕЙ Д.Н. Применение нечеткой логики для построения автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов . . . . .	41

**Електромеханічне перетворення енергії**

АФОНИН А.А., ВАРДАХ М. Моделирование магнитных систем электродвигателей цилиндрической конфигурации с внешним ротором . . . . .	48
ЧАБАН А. Алгоритм розрахунку ударних струмів та моментів синхронного турбогенератора в режимі короткого замикання на виводах якоря . . . . .	54
КУЧИНСКИЙ К.А., САРАТОВ В.А. Исследование потерь и нагревов в асинхронных режимах турбогенератора ТГВ-325 с различной конструкцией ротора . . . . .	58

**Електроенергетичні системи та установки**

ВОЛКОВ А.В., МИРОШНИЧЕНКО О.Г. Расчет потерь в энергосистеме, вызванных реактивной мощностью отдельного потребителя . . . . .	62
ІВАНКОВ В.Ф. Расчет системы обмоток трансформаторов на действие осевых сил короткого замыкания . . . . .	69

## Електротехнологічні комплекси та системи

ВОРОНОВСКИЙ Г.К., ЦЕЛЮБА С.В., КОСТИВ И.Ю., ПЛУГАТАРЬ А.П., АКИННІН К.П.,  
ІСАКОВ Г.В., КРАСНОШАПКА Н.Д. Система автоматического регулирования технологических  
параметров с плавным управлением исполнительным механизмом . . . . . 75

Abstracts . . . . . 79

## CONTENTS

### Theoretical electrical engineering and electrophysics

SCHERBA A.A., PODOLTSEV A.D., KUCHERYAVAYA I.N., PEREKOS A.E. Spark-eroded particles: size analysis, cooling rate, microstructure . . . . .	3
VISHTAK T.V., KONDRATENKO I.P., RASHEPKIN A.P. Electromagnetic field and forces in single-phase inductors of a transverse magnetic field for bands heating . . . . .	9
GANEFELD R.V., PRIMAK A.V., YAKOVLEV V.S. (Kiev) About non-linearity nature of metal-oxide varistors . . . . .	14

### Conversion of electric energy parameters

FEDYI V.S., NAMESTNIK S.G. Control performances of a three-phase valve-capacitor source of reactive power in an inductive mode . . . . .	18
OLE SCHUK V., STANKOVICH A., ERMURATSKY Vas., SIZOV A., YAROSHENKO E. Algorithms of synchronized modulation for neutral-point-clamped converters with common-mode voltage elimination . . . . .	22
LYPKIVSKY K.O. Comparative estimate of the main variants of estimated performances structure of executive structures of discrete regulators of an alternating current voltage . . . . .	28
PERESADA S.M., SEREDA A.N. A new algorithm of electrical parameters identification of an asynchronous motor on the basis of an adaptive observer of complete order . . . . .	32
LUKASH N.P., SUKHOVEY D.N. Application of indistinct logic for construction of automatic controllers of synchronous generators excitation . . . . .	41

### Electromechanical energy conversion

AFONIN A.A., VARDAKH M. Simulation of magnetic systems of electric motors of a cylindrical shape with an external rotor . . . . .	48
CHABAN A. Computation algorithm of stroke currents and moments of a synchronous turbogenerator in a short-circuit mode at an anchor terminals . . . . .	54
KUCHINSKY K.A., SARATOV V.A. Investigation of losses and heatings in asynchronous modes of TGV-325 turbogenerator with different constructions of a rotor . . . . .	58

### Electric power systems and installations

VOLKOV A.V., MIROSHNICHENKO O.G. Computation of a power system losses caused by reactive power of a single user . . . . .	62
IVANKOV V.F. Computation of a switchboard windings system at short circuit axial thrusts action . . . . .	69

### Electrotechnological complexes and systems

VORONOVSKY G.K., TSELJUBA S.V., KOSTIV I.Yu., PLUGATAR A.P., AKININ K.P., ISAKOV G.V., KRASNOSHAPKA N.D. An automatic control system of technological parameters with smooth control of an actuator . . . . .	75
Abstracts . . . . .	79

Науковий редактор К.О. ЛІПКІВСЬКИЙ

Редактор Т.І. МАЙБОРОДА

Художній редактор П.В. БЕККЕР

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту електродинаміки НАНУ, протокол №5 від 23.06.2005р.

Підл. до друку 21.09.2005. Формат 60 × 84/8. Пап. друк. офс. Офсет. Ум.-друк. арк. 9,8. Тираж 300 прим.

Зам. 135. Зареєстровано 20.01.94, свідоцтво: серія КВ, № 388. Ціна договірна.

Поліграфічна дільниця Інституту електродинаміки НАН України, 03680, м. Київ-57, проспект Перемоги, 56

УДК 621.313.17

А.А.Афонин, докт.техн.наук, М.Вардах, инж. (Щецинский.политехн. ин-т, Щецин, Польша)

## Моделирование магнитных систем электродвигателей цилиндрической конфигурации с внешним ротором

Представлены результаты исследования магнитных систем электрических двигателей с внешним ротором цилиндрической конфигурации. Предложены и проанализированы различные способы формирования магнитных систем с высокоенергетическими постоянными магнитами с вариацией векторов намагниченности, обеспечивающей синусоидальный либо трапециoidalный характер распределения магнитной индукции в зазоре. Приведены результаты моделирования магнитных систем с различной композицией составных элементов и показано, что в предложенных магнитных системах можно повысить как магнитные, так и электрические нагрузки электрических машин.

Подано результати дослідження магнітних систем електрических двигунів циліндричної конфігурації з постійними магнітами в зовнішньому роторі. Запропоновано і проаналізовано різні способи формування комбінованих магнітних систем з високоенергетичними постійними магнітами з варіацією векторів намагніченості, що забезпечує синусоїdalний чи трапеціoidalний характер магнітної індукції в зазорі. Наведено результати моделювання магнітних систем з різною композицією складових елементів і показано, що в комбінованих магнітних системах можна підвищити разом з магнітними також електричні навантаження електрических машин.

Степень использования активных материалов и размеры электрической машины заданной номинальной мощности характеризуют два электромагнитных параметра — линейная электрическая нагрузка  $A$  и магнитная индукция в рабочем зазоре  $B_\delta$  [1–5], произведение которых  $A \cdot B_\delta$  для рационально запроектированного электродвигателя (ЭД) должно быть как можно большим. Обеспечение этого требования является весьма трудной задачей, и потому цель работы заключалась в представлении решения для частного случая электрических машин цилиндрической конфигурации с внешним ротором и гладкой (беспазовой) структурой статора.

В статье описаны принципы, которые могут быть положены в основу разработки и создания нового поколения электромеханических преобразователей энергии с улучшенными по сравнению с известными аналогами и прототипами энергетическими и вибраакустическими показателями.

В системах электрических приводов наиболее распространены два типа бесконтактных (вентильных) электродвигателей с постоянными магнитами: с трапециoidalным — типа *BLDC* (*Brushless Direct Current*) и синусоидальным распределением индукции магнитного поля в рабочем зазоре — тип *PMSM* (*Permanent Magnet Synchronous Motor*).

В устройствах точного позиционирования

применяют ЭД типа *PMSM*, поскольку интегрирование или дифференцирование синусоидального сигнала дает в результате также синусоидальную функцию, соответственно сдвинутую по фазе, что упрощает управление и регулирование приводом с полным набором обратных связей по положению, угловой скорости и ускорению вала ЭД.

Если же требуется получить наибольшую величину средней индукции в зазоре (и в результате наибольший электромагнитный момент), то оптимальным решением будет ЭД типа *BLDC*, в котором постоянные магниты имеют лучшее по сравнению с ЭД типа *PMSM* использование по массе магнитотвердых материалов.

**Определение оптимальной структуры электродвигателя.** Электромагнитный момент ЭД типа *PMSM* или *BLDC* можно представить в следующем виде [4]:

$$M_e = \frac{\pi^2 \sqrt{2}}{480} \zeta_1 A_a B_{\delta RAV} D_1^2 l_{ef}, \quad (1)$$

где  $\zeta_1$  — обмоточный коэффициент;  $B_{\delta RAV}$  — средняя величина магнитной индукции в зазоре;  $D_1 = 2(r_{iPM} - \delta_t)$  — диаметр статора;  $\delta_t$  — величина технологического рабочего зазора;  $l_{ef}$  — эффективная длина ЭД.

Линейная токовая нагрузка  $A_a$  при условиях,

© Афонин А.А., Вардах М., 2005

что обмотки управления выполнены идентичными проводниками, а ток в обмотках фаз пропорционален площади поперечного сечения занимаемого медью пространства, определяется выражением

$$A_a = \frac{m_1 2z_1 I_1}{\pi D_1} = 2m_1 \frac{k_z \pi (r_{eCu}^2 - r_{iCu}^2)}{\pi D_1 S_d} I_1, \quad (2)$$

где  $m_1$  — число фаз;  $k_z$  — коэффициент заполнения обмоточного пространства медью;  $S_d$  — площадь поперечного сечения обмоточного провода.

На основе исследований ряда вариантов выбирается своя величина магнитной индукции  $B_{\delta R_{av}}(\delta)$  для каждой из моделей и уравнение (1) преобразуется к виду

$$M_e = \frac{\pi^2 \sqrt{2}}{480} \xi_1 2m_1 \frac{k_z \pi (r_{eCu}^2 - r_{iCu}^2)}{\pi D_1 S_d} B_{\delta R_{av}}(\delta) D_1^2 l_{ef}. \quad (3)$$

С целью сравнения моделей необходимо вычислить для каждой из них коэффициент использования объема ЭД [2]

$$C_w = M_e \eta / W, \quad (4)$$

где  $\eta$  — КПД;  $W$  — масса ЭД.

Масса электродвигателя  $W$  является составляющей четырех основных частей

$$W = W_{Fez} + W_{PM} + W_{Cu} + W_{Few}, \quad (5)$$

где  $W_{Fez}$  — масса внешней ферромагнитной части ротора, являющейся конструктивным элементом ротора, образующим также пути для прохождения и замыкания магнитных потоков сегментов постоянных магнитов;  $W_{PM}$  — масса слоя постоянных магнитов;  $W_{Cu}$  — масса обмоток управления на статоре;  $W_{Few}$  — масса ферромагнитной части статора. Все упомянутые величины можно выразить с помощью формул

$$W_{Fez} = \pi (r_{eFez}^2 - r_{ePM}^2) l_{ef} \gamma_{Fe}; \quad (6)$$

$$W_{PM} = \pi (r_{ePM}^2 - r_{iPM}^2) l_{ef} \gamma_{PM}; \quad (7)$$

$$W_{Cu} = 1,1 \pi [(r_{iPM}^2 - \delta_t^2)^2 - r_{iCu}^2] l_{ef} \gamma_{Cu}; \quad (8)$$

$$W_{Few} = \pi (r_{iCu}^2 - r_{iFew}^2) l_{ef} \gamma_{Fe}, \quad (9)$$

где  $\gamma_{Fe}$ ,  $\gamma_{PM}$ ,  $\gamma_{Cu}$  — удельные плотности ферромагнитных материалов, постоянных магнитов и меди, соответственно;  $r_{ePM}$ ,  $r_{iPM}$  — соответственно внешний и внутренний радиусы цилиндра с постоянными магнитами на роторе;  $r_{eCu}$ ,  $r_{iCu}$  — соответственно внешний и внутренний радиусы обмоточно-

го пространства статора (для размещения меди обмоток управления);  $r_{eFez}$  — внешний радиус ферромагнитного ярма ротора;  $r_{iFew}$  — внутренний радиус ферромагнитного ярма статора;  $r_{iFez} = r_{ePM}$  ( $r_{iFez}$  — внутренний радиус ферромагнитного ярма ротора);  $r_{iCu} = r_{eFew}$  ( $r_{eFew}$  — внешний радиус ферромагнитного ярма статора). Величина технологического рабочего зазора принята равной  $\delta_t = 0,5$  мм.

В уравнении (8) величина коэффициента увеличения массы меди принята равной 1,1 исходя из предложения, что в целях сопоставления вариантов моделей масса лобовых частей составляет 10% от общей массы меди обмоток управления.

После подстановки в уравнение (4) уравнений (3), (5)–(9) получаем

$$C_w = a \cdot Z_w, \quad (10)$$

где

$$a = \frac{\sqrt{2}}{480} \xi_1 m_1^2 \frac{k_z \pi}{S_d} I_1 D_1 \eta, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Z_w = & \left[ (r_{eCu}^2 - r_{iCu}^2) B_{\delta R_{av}}(\delta) \right] \cdot \left[ (r_{eFez}^2 - r_{ePM}^2) \gamma_{Fe} + \right. \\ & \left. + (r_{ePM}^2 - r_{iPM}^2) \gamma_{PM} + 1,1 (r_{eCu}^2 - r_{iCu}^2) \gamma_{Cu} + \right. \\ & \left. + (r_{iCu}^2 - r_{iFew}^2) \gamma_{Fe} \right]^{-1}, \quad \left( \frac{\text{мм}^3 \cdot \text{Тл}}{\text{г}} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Принимая условие, что во всех анализируемых моделях электродвигателей величины обмоточного коэффициента, числа фаз, коэффициента заполнения медью обмоточного пространства, поперечного сечения проводников, удельной плотности протекающего в обмотках тока, диаметров расточки статора и КПД имеют одинаковые соответствующие упомянутым параметрам величины, можно полагать величину  $a$  неизменной и сравнительный анализ исследуемых структур вести по коэффициенту  $Z_w$ , который является по сути коэффициентом использования активных материалов машины.

Попытка получения максимальных величин электромагнитного момента путем увеличения площади поперечного сечения обмоточного пространства ведет в связи с ростом зазора к снижению магнитной индукции в нем и увеличению общей массы машины, что уменьшает коэффициент использования активных материалов машины. Поэтому необходимо ориентироваться на выбор такой оптимизированной величины зазора, при которой будет достигаться максимальная величина произведения  $A_a \cdot B_\delta$  при минимальной массе ЭД.

**Определение оптимальной структуры электродвигателя цилиндрической конфигурации типа BLDC с внешним ротором.** Поскольку электродвигатели типа BLDC характеризуются трапециoidalным характером распределения продольной

компоненты магнитной индукции в зазоре, то для реализации упомянутого закона распределения магнитного поля в области электромеханического преобразования энергии необходимо разработать соответствующую процедуру намагничивания и расположения сегментов постоянных магнитов. Рассмотрено 5 моделей ( $S_1-S_5$ ), которые отличаются величиной рабочего зазора:  $\delta_1 = 2,5$  мм (рис. 1, а —  $S_1$ ),  $\delta_2 = 5$  мм (рис. 1, б —  $S_2$ ),  $\delta_3 = 7,5$  мм (рис.

1, в —  $S_3$ ),  $\delta_4 = 10$  мм (рис. 1, г —  $S_4$ ) и  $\delta_5 = 15$  мм (рис. 1, д —  $S_5$ ). При этом векторы намагниченности магнитных сегментов ротора выбирались коллинеарными показанными на рис. 1, е векторам МДС, образующим соответствующую систему, которая располагается в плоскости  $OXY$  с изменяющимися по определенному закону угловыми дискретами вращения.

На рис. 2 показано распределение составляющих магнитной индукции посередине рабочего за-

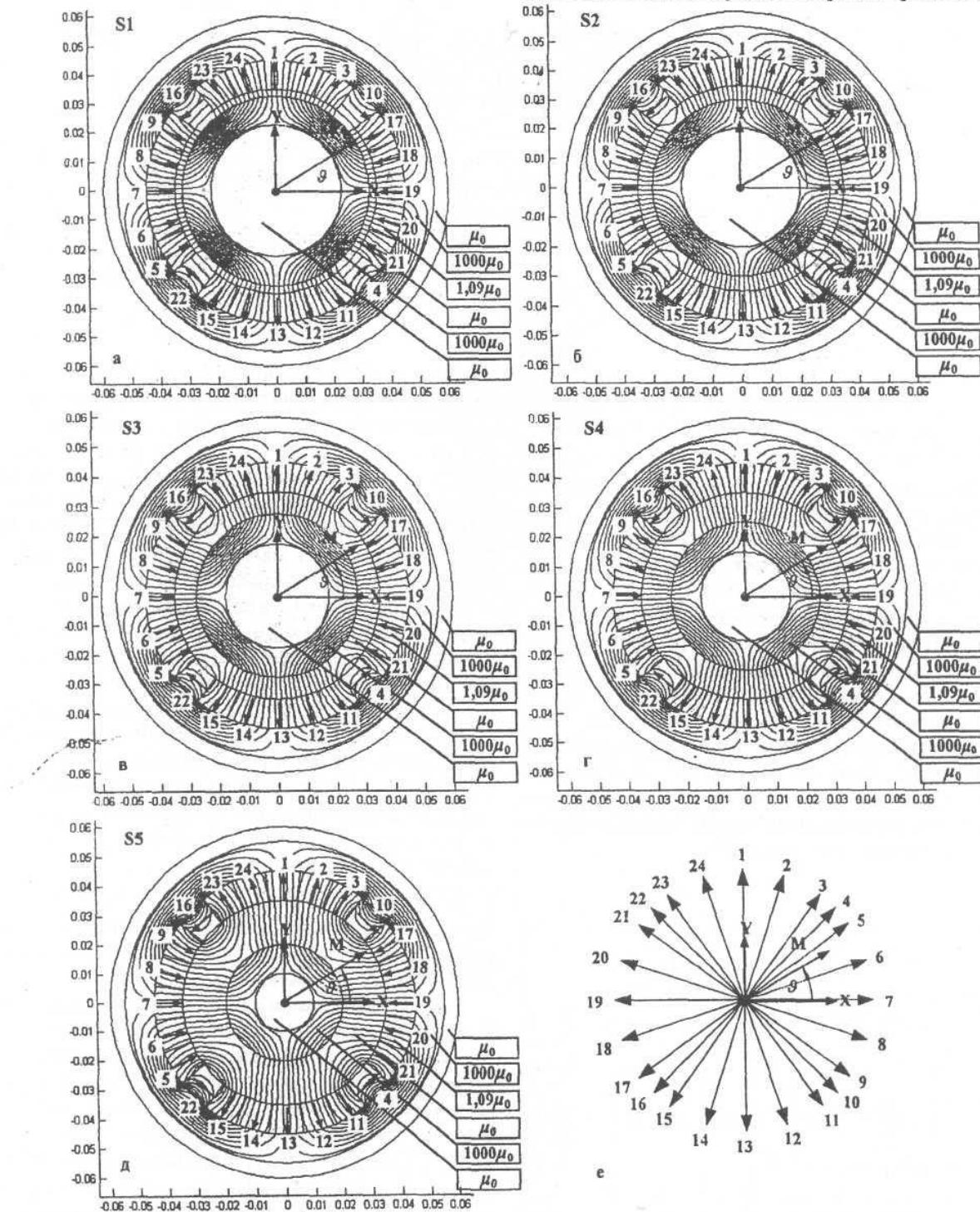


Рис. 1

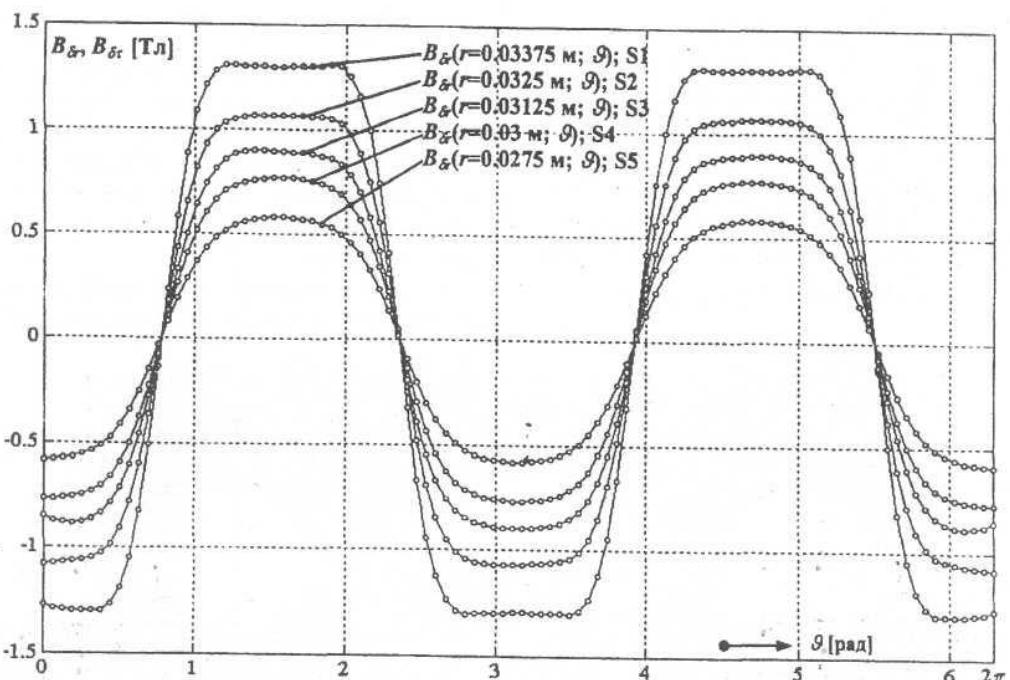


Рис. 2

зора в моделях  $S1-S5$ , полученное в результате компьютерного моделирования в среде *MATLAB-FEMLAB*. Анализ показывает, что в зазоре свыше  $\delta_r = 10$  мм в большей степени начинает проявляться деформация кривых распределения (искажение трапециoidalного закона распределения компонент магнитной индукции), что отрицательно сказывается на выходных характеристиках двигателя ввиду наличия высших гармонических в кривых ЭДС и связанных с ними дополнительных потерь.

Результаты моделирования и расчета сведены в табл. 1, из рассмотрения которой следует, что в моделях  $S3, S4$  достигаются наилучшие с точки зрения использования объема электрической машины показатели. Хотя модель  $S4$  характеризуется наибольшей величиной коэффициента использования активных материалов машины  $Z_w$ , сама разница по сравнению со структурой  $S3$  сравнительно невелика и составляет только 5%.

Таблица 1

Стр.	$\delta$	$B_{av}$	$B_{max}$	$r_{iFe}$	$r_{iCu}$	$r_{eCu}$	$r_{iPM}$	$r_{ePM}$	$r_{eFez}$	$Z_w$
		мм	Тл	Тл	мм	мм	мм	мм	мм	
$S1$	2,5	1,139	1,359	22,5	32,5					8,02
$S2$	5	0,900	1,159	20	30					13,29
$S3$	7,5	0,750	0,959	17,5	27,5	34,5	35	45	55	16,12
$S4$	10	0,621	0,924	15	25					16,99
$S5$	15	0,433	0,841	10	20					16,02

Из анализа показанных на рис. 2 кривых распределения продольной компоненты магнитной индукции и приведенных в табл. 1 данных можно сделать вывод о том, что одним из наилучших решений с точки зрения функциональной зависимости является выбор модели магнитной системы ЭД, базирующейся на использовании структуры  $S3$ . Действительно, в магнитной системе  $S3$  функция распределения продольной составляющей магнитной индукции в зазоре вдоль полюсного деления более близка к трапециoidalному закону по сравнению с распределением компоненты магнитной индукции в магнитной системе  $S4$ .

Электродвигатели типа *PMSM* характеризуются синусоидальным распределением продольной компоненты магнитной индукции в зазоре вдоль полюсного деления, один из способов получения которого иллюстрируется показанным на рис. 3 набором моделей  $S6-S10$  с вариацией величины рабочего зазора от  $\delta_1 = 2,5$  мм (модель  $S6$ ) до  $\delta_2 = 15,0$  мм (модель  $S10$ ). Система векторов намагниченности магнитных сегментов внешнего ротора в моделях  $S6-S10$  выбрана согласно показанной на рис. 3, e схеме.

На рис. 4 показаны кривые распределения продольной компоненты магнитной индукции посередине рабочего зазора вдоль полюсного деления в моделях  $S6-S10$ , также полученных в результате моделирования в программах *MATLAB-FEMLAB*. Каждая сравнивалась с функцией синусоиды  $[f_1(x) = A_m \sin(\pi px/\tau_S + \varphi)]$  определенной амплитуды  $A_m$  и с соответствующим сдвигом по фазе  $\varphi = -\pi/2$ . При этом оказалось, что все кривые, полученные в результате моделирования, практи-

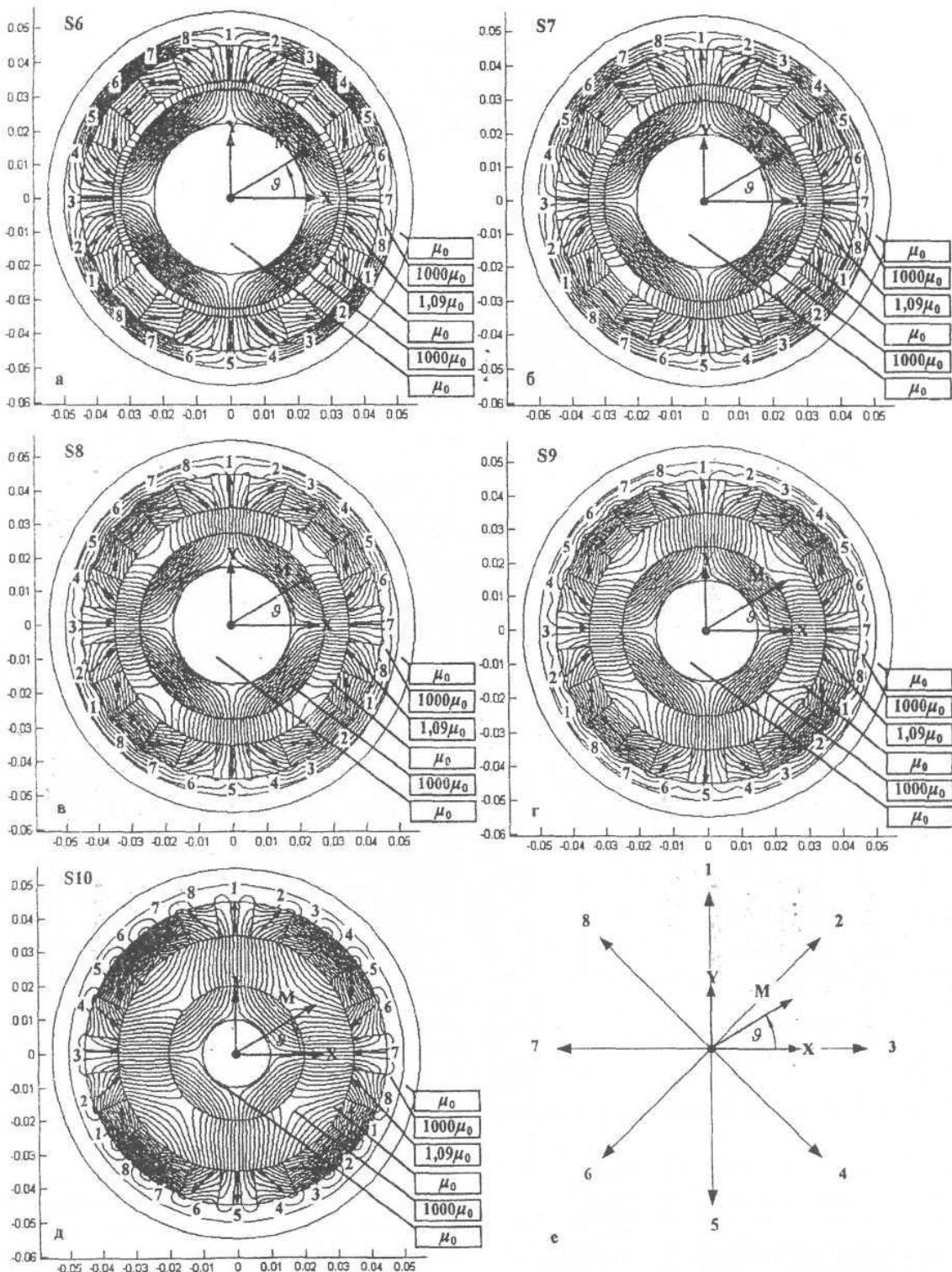


Рис. 3

чески полностью совпадают с математическим описанием синусоидальных функций.

Из анализа данных моделирования, приведенных в табл. 2, следует, что с точки зрения использования активной части двигателя наилучшей является модель *S9*, характеризующаяся наибольшей величиной коэффициента использования активных материалов  $Z_w$ .

На рис. 5 схематически показана в упрощенном виде конструктивная схема электродвигателя типа *BLDC* с внешним ротором и трапециoidalным законом распределения продольной компоненты магнитной индукции в зазоре, построенная для примера согласно одной из исследованных моделей *S3*.

На рис. 5: 1 — ферромагнитное ярмо ротора, к

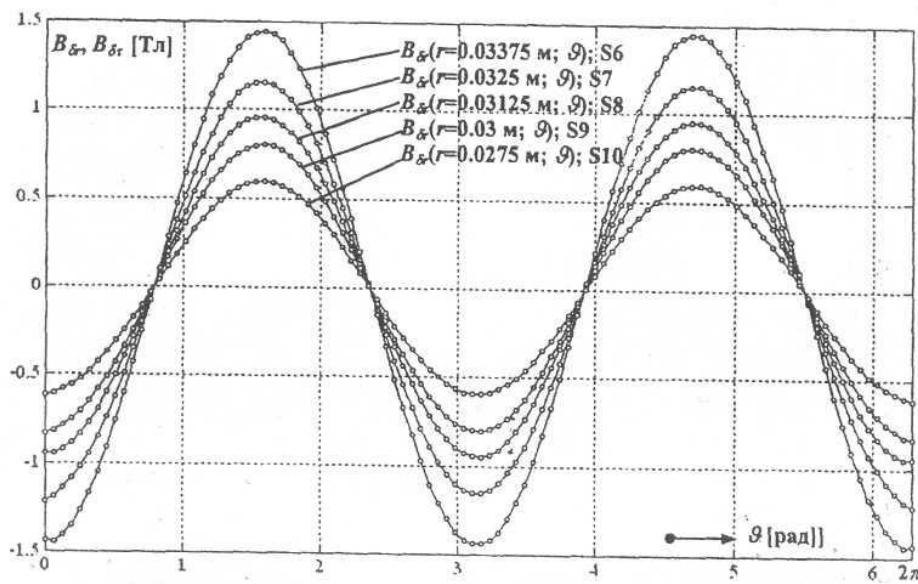


Рис. 4

которому с внутренней стороны прикреплены сегменты постоянных магнитов; 2, 3 — технологический зазор 0,5 мм; 4 — обмотки управления фаз ЭД; 5 — ферромагнитная часть статора; 6 — лобовые части обмоток управления.

Таблица 2

Стр.	$\delta$	$B_{av}$	$B_{max}$	$r_{iFe}$	$r_{iCu}$	$r_{eCu}$	$r_{iPM}$	$r_{ePM}$	$r_{eFez}$	$Z_w$
		мм	Тл	мм	мм	мм	мм	мм	мм	
S6	2,5	0,937	1,453	22,5	32,5					8,42
S7	5	0,752	1,156	20	30					14,05
S8	7,5	0,623	0,956	17,5	27,5	34,5	35	45	50	16,81
S9	10	0,523	0,804	15	25					17,89
S10	15	0,379	0,596	10	20					17,38

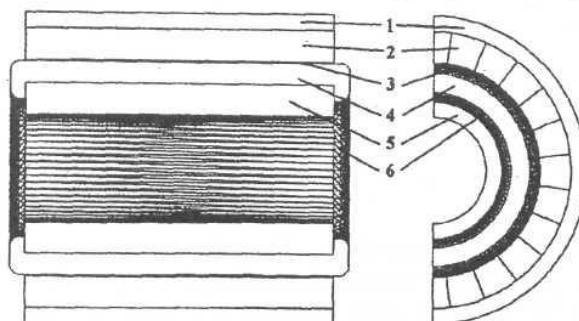


Рис. 5

**Выводы.** Результаты исследования показывают, что посредством соответствующего намагни-

чивания сегментов постоянных магнитов можно формировать заданный характер распределения продольных составляющих магнитной индукции в зазоре ЭД. В структурах с синусоидальным распределением продольной компоненты магнитной индукции в зазоре закон распределения представляет практически идеальную синусоидальную функцию, но при этом получаются несколько заниженные средние величины на полюсном делении по сравнению со структурами с трапециoidalным законом распределения.

Выполненные с целью проверки насыщения элементов исследования величины магнитных потоков в ферромагнитных элементах ротора показывают, что в структурах с синусоидальным распределением магнитной индукции в рабочем зазоре толщина ферромагнитного ярма внешнего ротора может быть уменьшена. Это объясняется тем, что часть магнитного потока проходит непосредственно по сегментам постоянных магнитов, которые, помимо того, что являются источниками возбуждения магнитных потоков, сами же и проводят часть этих потоков. Даже при двукратном уменьшении в исследуемых моделях толщины ярма магнитная индукция в наружном роторе достигала величины 2,0 Тл, не выходя за пределы магнитной индукции насыщения ферромагнетика, составлявшей  $B_s = 2,15$  Тл. Для структур с трапециoidalным либо синусоидальным законом распределения продольной составляющей магнитной индукции в зазоре можно указать в качестве предварительных исходных данных близкие к оптимальным величины зазоров  $\delta_{rt} = 10$  мм и  $\delta_{r \sin} = 7,5$  мм, соответственно, для моделирования и проектирования ЭД заданного типа (BLDC или PMSM).

1. Афонин А.А. Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов

намагніченності постійних магнітів // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 1. — С. 47—55.

2. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. — Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecinskiej. 2000. — 242 s.

3. Afonin A. Permanent Magnet Brushless Motors with innovative excitation Systems // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on

Electromechanical and Electrical Systems UEES'04. — Ukraine, 2004. — Vol. 1. — P. 27—38.

4. Dabrowski M. Projektowanie maszyn elektrycznych pradu przemiennego. — Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1988. — 479 s.

5. Geras J.F., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. — New York; Basel: Marcel Dekker, 2002. — 590 p.

Надійшла 07.04.2005

УДК 51.001.57.. 621.313.32

А.Чабан, канд.техн.наук (Нац. ун-т "Львівська політехніка")

## Алгоритм розрахунку ударних струмів та моментів синхронного турбогенератора в режимі короткого замикання на виводах якоря

Запропоновано метод розрахунку переходних процесів синхронного турбогенератора під час його збудження, навантаження та короткого замикання на виводах якоря. Диференціальні рівняння системи записуються в нормальній формі Коші. Результати комп'ютерної симуляції використовуються для аналізу струмів та моментів турбогенератора. Подаються результати досліджень на основі колової моделі статора та польової моделі ротора турбогенератора, а також рівнянь механічного руху.

Предложен метод расчета переходных процессов синхронного турбогенератора во время его возбуждения, нагрузки и короткого замыкания на выводах якоря. Дифференциальные уравнения системы записываются в нормальной форме Коши. Результаты расчета на ЭВМ применяются для анализа токов и момента турбогенератора. Результаты исследования представлены цепной моделью статора и полевой моделью ротора турбогенератора, а также уравнениями механического движения.

**Вступ.** Турбогенератор є одним з основних джерел електроенергії. Побудова математичної моделі цього електромеханічного пристроя є досить складною задачею. У даній роботі пропонується алгоритм розрахунку ударних струмів та електромагнітних моментів на основі моделі синхронного турбогенератора, представленої у фазних координатах. Загальну картину режимів генератора можна отримати лише поєднанням рівнянь електромагнітного стану машини та рівнянь механічного стану, записаних на основі рівнянь Лагранжа другого роду. Модель машини представлена нелінійною системою дискретизованих диференціальних рівнянь електромагнітного поля масиву ротора та нелінійною системою диференціальних рівнянь електромагнітного стану якоря. Ротор генератора представлений абсолютно жорстким тілом та нехтується дисипацією теплової енергії поковки тіла ротора. Очевидно, що в переходних процесах (особливо в режимі короткого замикання) електромагнітний момент зазнає значних змін. Розрахунок ударних струмів та моментів турбогенератора є невід'ємною частиною аналізу переходних електромеханічних процесів.

Така математична модель дає змогу повністю відтворити процеси, що відбуваються в машині під час основних режимів роботи турбогенератора. Досконалішу математичну модель генератора можна побудувати лише на підставі рівняння теорії електромагнітного поля індуктора та якоря. Але такі моделі є надто складні в алгоритмічній реалізації. Крім того, зубцева зона статора машини є ламінованою, що значно зменшує вплив вихрових струмів в тілі статора на роботу генератора.

**Математична модель генератора.** Диференціальні рівняння турбогенератора для симетричного навантаження та без урахування зміщення нейтралей виглядають так [2]:

$$d\Psi_{SA}/dt = u_{SA} - R_{SA}i_{SA}; \quad d\Psi_{SB}/dt = u_{SB} - R_{SB}i_{SB}; \quad (1)$$

$$\Psi_{SA} + \Psi_{SB} + \Psi_{SC} = 0; \quad i_{SA} + i_{SB} + i_{SC} = 0; \quad (2)$$

$$d\Psi_f/dt = u_f - R_f i_f, \quad (3)$$

де  $\Psi_S$  — повне потокозчеплення кожної з фаз статора.

© Чабан А., 2005