

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

№ 2
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

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Волков І.В. Інститут електродинаміки, Національна академія наук України, Київ

Вороновський Г.К. ВАТ "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

Кушк 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 відновлювальної 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

Стогій 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>

ШОСТАК В.О., СОКОЛОВСЬКИЙ С.А., БРЖЕЗИЦЬКИЙ В.О., БЕЛЯЄВ В.К., ЯНІШЕВСЬКИЙ В.І. Характеристики грозових перенапруг в розподільчій лінії середньої напруги	64
ПЕНТЕГОВ І.В., ЛАРЧЕНКО Б.Б. Анализ процессов в гексагональных автотрансформаторных устройствах подавления высших гармоник тока	70

Інформація

Вісті з Вищої атестаційної комісії України	76
--------------------------------------------	----

Abstracts	80
-----------	----

CONTENTS

Theoretical electrical engineering and electrophysics

SHCHERBA A.A., PODOL'TSEV A.D., KUCHERJAVAJA I.N. The distribution of pulse-current density in the space between electrodes filled with metal granules	3
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

CHABAN V. A mathematical theory of Lorentz force	10
--------------------------------------------------	----

VOLOKHOV S.A. Magnetic state estimation of a ferromagnetic construction with the phase diagrams method	12
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Conversion of electric energy parameters

FEDIY V.S., NAMESTNIK S.G. Influence of Q(-factor) on harmonic composition of a network current of a three-phase monoharmonic active filter	18
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

YURCHENKO M.M., SHEVCHENKO P.M., GUTSALJUK V.Ya., TVERDOKHLIB Yu.O. Commutation processes in power modules of transistor converters of power supply systems of airborne production equipment	21
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

KOMAROV N.S., MONZHERAN Yu.P., VOZNY V.A. Normal and emergency modes of a multiphase pulse current controller which is loaded onto a powerful gas plasma generator	25
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

VELYKIY V.I., ANDRIJCHUK V.A. Frequency characteristics of an output stage of electronic start controllable units (ESCU) for luminescent lamps. Normal operating condition	33
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Electromechanical energy conversion

AFONIN A.A., VARDAKH M. Simulation of magnetic systems of electric motors with plane constant magnets in a cylindrical shape rotor	37
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

SHYMCHAK P. Magnetic systems of a mosaic structure of disk electric generators with constant magnets	44
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

SARATOV V.A. Determination of a turbo-generator TVF-120 parameters by estimated frequency responses	51
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Electric power systems and installations

VASYLIV K.M. A mathematical model of dynamic processes of an autonomous electric power system on the basis of a contactless asynchronized generator with a two-phase—three-phase cascade modulated exciter	54
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

RAMAZANOVA Z.U., REZTSOV V.F., SURZHIK T.V., KHADZHINOV A.L. Analysis of unsteady spatial inhomogeneous conditions in long lines at dependence of leakage current conductance on voltage and temperature	60
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

SHOSTAK V.O., SOKOLOVSKY S.A., BRZHEZITSKI V.O., BELYAEV V.K., YANISCHEWSKYJ W.I. Lightning overvoltage characteristics in a medium voltage distribution line	64
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

PENTEHOV I.V., LARCHENKO B.B. Analysis of processes in hexagonal autotrasformer devices of high current harmonics suppression	70
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Scientific information	
------------------------	--

News from the High certificate committee of Ukraine	76
-----------------------------------------------------	----

Abstracts	80
-----------	----

Науковий редактор К.О. ЛИПКІВСЬКИЙ

Редактор Т.І. МАЙБОРОДА

Художній редактор П.В. БЕККЕР

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту електродинаміки НАНУ, протокол №3 від 10.03.2005 р.

Підп. до друку 29.03.2005. Формат 60 × 84/8. Пап. друк. офс. Офсет. Ум.-друк. арк. 9,8. Тираж 300 прим.

Зам. 53. 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 с плоскими постоянными магнитами в роторе цилиндрической конфигурации

Представлены результаты исследования магнитных систем электрических двигателей с постоянными магнитами в роторе цилиндрической конфигурации. Предложены и проанализированы различные способы формирования комбинированных магнитных систем на основе плоских постоянных магнитов типа оксидно-бариевых ферритов и ферромагнитных концентраторов магнитных потоков. Приведены результаты моделирования магнитных систем с различной композицией составных элементов и показано, что в комбинированных магнитных системах можно повысить, наряду с магнитными, также электрические нагрузки, что является основанием для применения их при разработке высокоиспользуемых электрических машин.

Подано результати дослідження магнітних систем електричних двигунів з постійними магнітами в роторі циліндричної конфігурації. Запропоновано і проаналізовано різні способи формування комбінованих магнітних систем з магнітними шарами на основі сегментів постійних магнітів типу оксидно-барієвих феритів з ферромагнітними концентраторами магнітних потоків. 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, що є підставою для застосування їх при розробці високовикористовуваних електричних машин.

При разработке высокоиспользуемых электрических машин одной из основных задач является обеспечение высоких линейных электрических нагрузок магнитной индукции в рабочем зазоре [2—6]. Одновременное достижение требуемых показателей является весьма трудной и не всегда выполнимой задачей, и потому цель работы заключалась в представлении решения для выбранных частных случаев электрических машин с гладкими (беспазовыми) структурами статора.

В статье описаны принципы, которые могут быть положены в основу разработки и создания нового поколения электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с улучшенными по сравнению с известными аналогами и прототипами энергетическими и виброакустическими показателями. Представленные результаты относятся к электромеханическим преобразователям энергии цилиндрической конфигурации.

Как магнитная индукция в воздушном зазоре B_{δ} , так и линейная токовая нагрузка якоря A_a являются важнейшими электромагнитными параметрами ЭМПЭ, определяющими степень использования активных материалов и размеры машины заданной номинальной мощности; произведение $A_a \cdot B_{\delta}$ для рационально запроектированного высоко-

используемого ЭМПЭ должно быть как можно большим.

Развитие современного электропривода имеет тенденции к минимизации габаритов и повышению динамических показателей при одновременном повышении КПД преобразования энергии в системе электропривода. К ЭМПЭ все чаще предъявляются требования реализации высокого момента, независимого от частоты вращения. Такие ЭМПЭ должны быть легко управляемыми в широком диапазоне скорости при вариации момента нагрузки на валу.

Большие возможности открывают бесконтактные электродвигатели (ЭД) с постоянными магнитами, имеющие очень хорошие показатели, что позволяет использовать их в различного рода приводных системах. Достоинства бесконтактных ЭД следующие: большая перегрузочная способность по моменту, высокая надежность (прежде всего благодаря отсутствию механического коммутатора), а также высокий удельный показатель по массе, с которым тесно связаны сравнительно малые геометрические размеры. Применение средств силовой электроники позволяет осуществлять плавное регулирование скорости в широком диапазоне при сохранении постоянства момента на валу при

© Афонин А.А., Вардах М., 2005

разгоне и регулировании скорости. Бесконтактные ЭД нашли широкое применение в разных устройствах мехатроники, очень часто при малых собственных размерах (электропривод твердых дисков, многоскоростные приводы CD ROM и т.д.).

В системах электрических приводов наиболее распространены два типа бесконтактных (вентильных) электрических машин с постоянными магнитами:

— с трапецидальным распределением индукции магнитного поля в рабочем зазоре — тип *BLDC* (*Brushless Direct Current*);

— с синусоидальным распределением индукции магнитного поля в рабочем зазоре — тип *PMSM* (*Permanent Magnet Synchronous Motor*).

Основная цель работы заключалась в разработке и представлении способов повышения индукции магнитного поля в рабочем зазоре для магнитных систем различной конфигурации, достигаемых посредством реализации различных композиций с источниками МДС, в качестве которых выступают постоянные магниты, и концентраторов магнитного поля на базе ферромагнитных элементов магнитопроводов.

Математическое описание проблемы [5] подчинено следующим известным закономерностям. Электромагнитный момент на валу прямо пропорционален внутренней мощности ЭМПЭ

$$M_e = S_w / \omega. \quad (1)$$

Внутренняя мощность выражается зависимостью $S_w = m_1 E_1 I_1$, где m_1 — число фаз ЭД; I_1 — ток в обмотках статора, определяемый по зависимости для средней линейной токовой нагрузки на внутреннем диаметре расточки статора (токовая нагрузка A_a): $I_1 = A_a \pi D_{iS} / 2m_1 z_1$, z_1 — число витков обмоток управления одной фазы статора; $D_{iS} = D_a + 2\delta$ — диаметр расточки пакета статора; D_a — внешний диаметр ротора.

Выражение для электродвижущей силы (ЭДС) E_1 имеет вид

$$E_1 = 4\pi f z_1 \xi_1 \Phi_\delta / 2\sqrt{2}, \quad (2)$$

где f — частота питания; Φ_δ — магнитный поток в рабочем зазоре; ξ_1 — обмоточный коэффициент.

Магнитный поток, индуктирующий ЭДС E_1 в обмотках якоря, определяется согласно зависимости

$$\Phi_\delta = L_{ef} \tau_S \cdot \frac{1}{\tau_S} \int_0^{\tau_S} B_\delta(x) dx = L_{ef} \tau_S \cdot B_{\delta Rav}, \quad (3)$$

где L_{ef} — эффективная длина ЭД; τ_S — полюсное деление.

Соответствующее преобразование уравнения (1) с учетом зависимостей $f = pn/60$ и $\tau_S = \pi D_{iS} / 2p$

приводит к следующему выражению для электромагнитного момента:

$$M_e = \frac{\pi^2 \sqrt{2}}{480} \xi_1 A_a B_{\delta Rav} D_{iS}^2 L_{ef}. \quad (4)$$

Как следует из выражения (4), электромагнитный момент зависит от конструктивных постоянных: диаметра D_{iS} , длины ЭД L_{ef} и обмоточного коэффициента ξ_1 , а также от таких основных параметров как линейная токовая нагрузка A_a и средняя величина магнитной индукции в зазоре $B_{\delta Rav}$. Для повышения момента необходимо повысить хотя бы один, а еще лучше оба из упомянутых основных параметров. При этом нужно учесть, что повышение момента посредством увеличения длины или диаметра ЭД приводит к росту габаритов, а, следовательно, и массы ЭД. Повышение же линейной токовой нагрузки A_a ограничено термической стойкостью изоляции обмоток. К тому же при повышении A_a необходимо решать задачу реализации соответствующей высокоэффективной системы охлаждения, поскольку тепловые потери в обмотках якоря прямо пропорциональны квадрату протекающего по проводникам обмоток тока.

Перспективным решением представляется поэтому реализация таких композиций ротора с источниками МДС и концентраторами магнитных потоков, которые позволили бы синтезировать прогрессивные магнитные системы нового типа с улучшенными показателями. При этом важным для снижения стоимости ЭД является применение оксидно-барьерных ферритов плоской конфигурации. Такая постановка задачи ограничивает величину магнитной индукции в относительно больших рабочих зазорах, характерных для конструкций с гладкими структурами статора. В то же время, поскольку известны различные способы концентрации магнитных потоков и средства повышения интенсивности магнитных полей в зоне энергопреобразования [1, 4], попробуем воспользоваться ими для достижения поставленной цели: обеспечения удовлетворительных значений поля $B_{\delta R}$ и линейной токовой нагрузки A_a в относительно больших рабочих зазорах, свойственных ЭД с гладким статором.

Решение полевых задач. Для моделирования комбинированных магнитных систем ротора ЭД использованы программы *MATLAB-FEMLAB*. Исследования выполнялись в плоскопараллельном приближении для моделей с внешним диаметром ротора (якоря) $D_a = 350$ мм.

Магнитная система состояла из набора плоских постоянных магнитов на базе оксидно-барьерных ферритов и ферромагнитных концентраторов магнитных потоков, абсолютная магнитная проницаемость которых составляла $\mu_{Fe} = \mu_{rFe} \mu_0 = 1000 \mu_0$ ($\mu_{rFe} = 1000$). Величины немагнитных

рабочих зазоров выбирались фиксированными, составлявшими в исследуемых моделях соответственно $\delta_1 = 5,0$ мм; $\delta_2 = 7,5$ мм; $\delta_3 = 10,0$ мм. Исследования выполнялись для вариантов моделей.

различающихся величинами пар полюсов ($p=4$, $p=5$), параметры которых показаны далее в табл.

На рис. 1-4 представлены результаты, полученные на моделях цилиндрической конфигурации с величиной рабочего зазора $\delta_1 = 5,0$ мм.

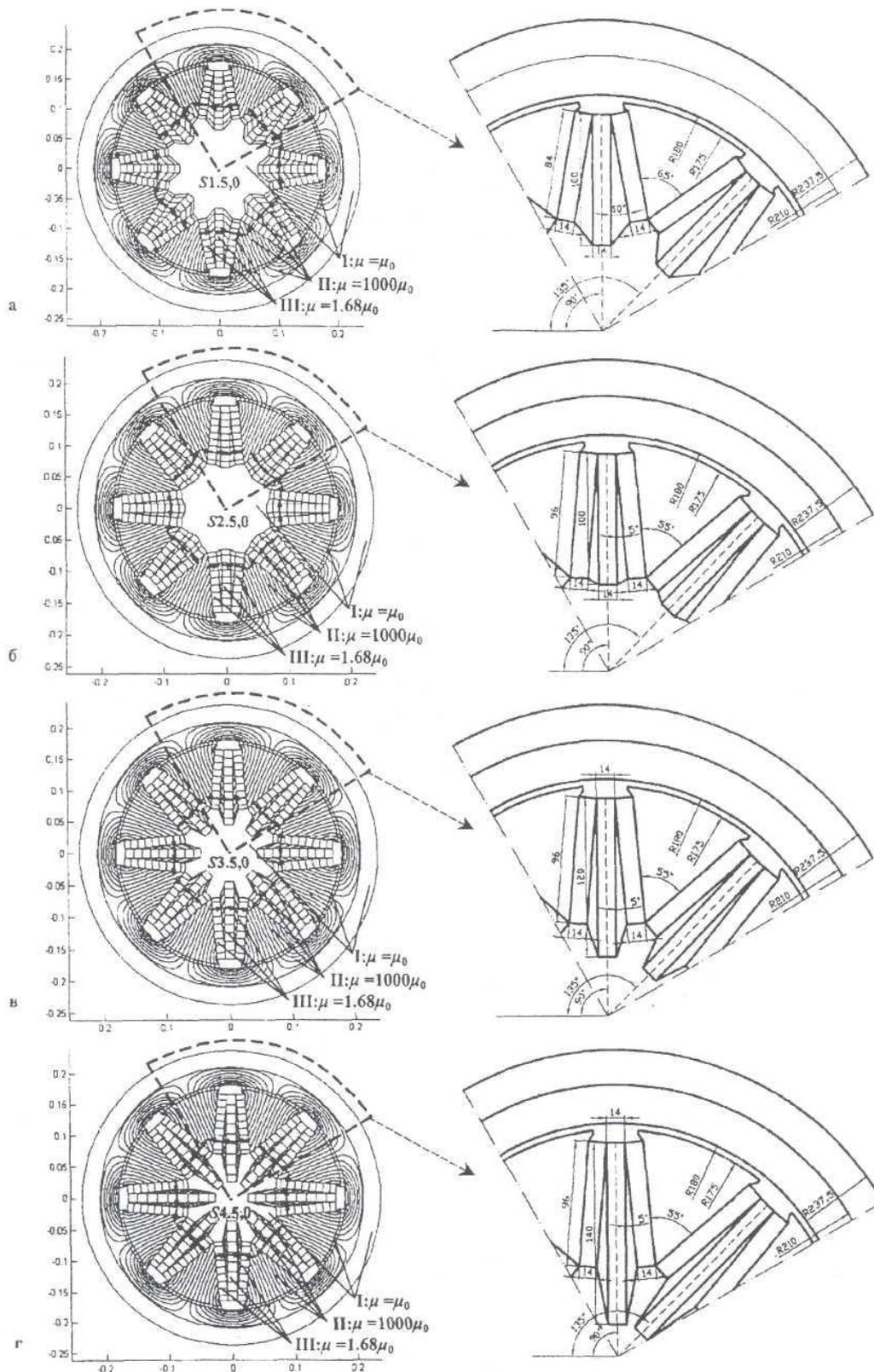


Рис. 1

Примеры представленных ниже моделей магнитных систем построены на основе постоянных магнитов в виде плоских пластин на основе оксидно-барьерных ферритов типа 28 БА190, характеризующихся следующими параметрами: остаточной магнитной индукцией $B_{rPM} = 0,39$ Тл; коэрцитивной силой по магнитной индукции $H_{CB} = 185$ кА/м; относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 1,68$ (абсолютная магнитная проницаемость постоянного магнита равна $\mu_{PM} = \mu_r \mu_0$, где $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума), остаточной магнитной энергией $W_m = B_d H_d / 2 = 14$ кДж/м.

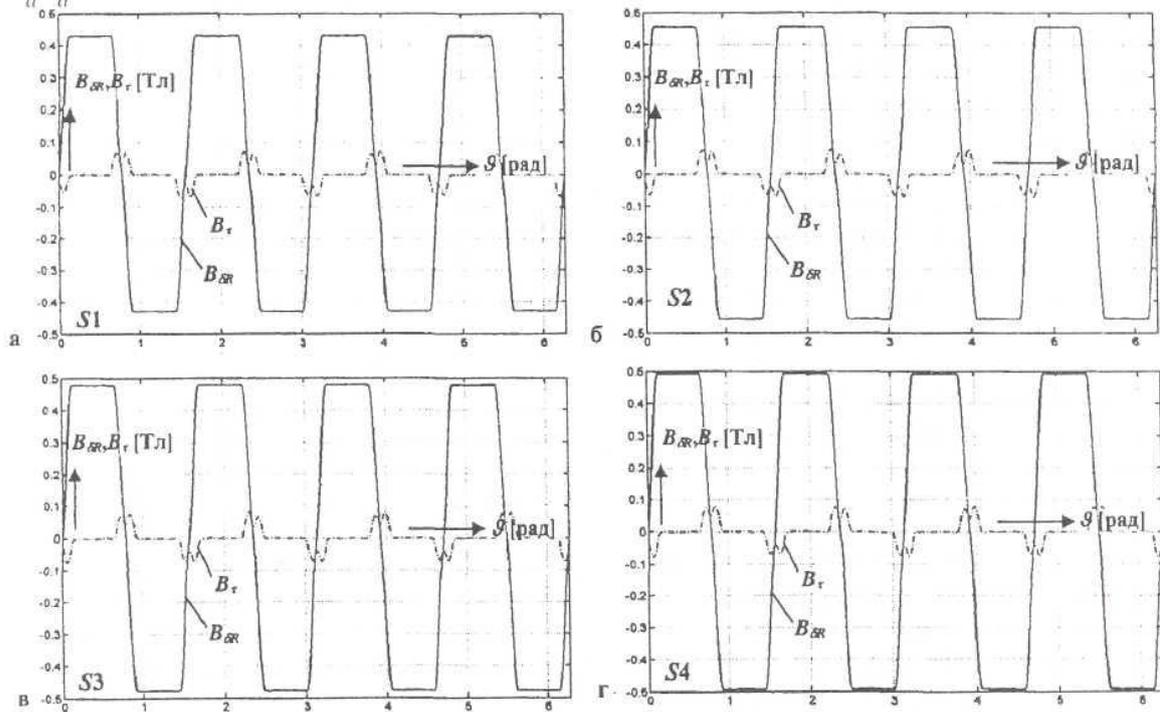


Рис. 2

На рис. 1, а—г показаны конфигурации 4 моделей (S1.5,0, S2.5,0, S3.5,0, S4.5,0) с 8-полюсным внутренним ротором ($p=4$) цилиндрической формы, различающихся геометрическими размерами и углами α между постоянными магнитами в форме параллелепипедов одинаковой толщины $b_{PM} = 14$ мм с длинами центральных l_{cPM} и боковых l_{bPM} сторон, а также ферромагнитных сегментов-концентраторов магнитных потоков:

S1.5,0: $\alpha = 10^0$, $l_{cPM} = 100$ мм, $l_{bPM} = 84$ мм,
 S2.5,0: $\alpha = 5^0$, $l_{cPM} = 100$ мм, $l_{bPM} = 96$ мм,
 S3.5,0: $\alpha = 5^0$, $l_{cPM} = 120$ мм, $l_{bPM} = 96$ мм,
 S4.5,0: $\alpha = 5^0$, $l_{cPM} = 140$ мм, $l_{bPM} = 96$ мм, (α — угол между средними и боковыми постоянными магнитами).

Кривые распределения радиальной $B_{\delta R}$ и тангенциальной $B_{\delta T}$ компонент магнитной индукции

посредине рабочего зазора для моделей S1.5,0–S4.5,0 с 4 парами полюсов ($2p=8$) показаны соответственно на рис. 2, а–г.

На рис. 3 показано распределение магнитного поля (рис. 3, а), геометрия магнитной системы (рис. 3, б) и кривые распределения (рис. 3, в) радиальной $B_{\delta R}$ и тангенциальной $B_{\delta T}$ компонент магнитной индукции вдоль линии посредине зазора для модели S5.5,0 с 10 полюсами ($p=5$): $\alpha = 10^0$, $l_{cPM} = 100$ мм, $l_{bPM} = 68$ мм, $b = 14$ мм.

Из рассмотрения рис. 4, на котором показаны результаты исследования рассматриваемых структур, можно заключить, что в зазоре можно получить наибольшую величину максимума индукции,

которая может быть выше остаточной магнитной индукции постоянных магнитов. Можно также получить средние значения магнитной индукции в зазоре большие по величине по сравнению с остаточной индукцией постоянных магнитов ($B_{\delta Rav}^{S4.5,0} = 0,4181$ Тл $>$ $B_{rPM} = 0,39$ Тл).

Средние величины магнитной индукции (Тл) в моделях S1.5,0–S5.5,0 составили:

$$B_{\delta Rav}^{S1.5,0} = \frac{1}{\tau_S} \int_{\Theta_1=90^0}^{\Theta_2=135^0} B_{\delta R}^{S1.5,0}(\Theta, R_\delta=0,1775) d\Theta = 0,3626,$$

$$B_{\delta Rav}^{S2.5,0} = \frac{1}{\tau_S} \int_{\Theta_1=90^0}^{\Theta_2=135^0} B_{\delta R}^{S2.5,0}(\Theta, R_\delta=0,1775) d\Theta = 0,386,$$

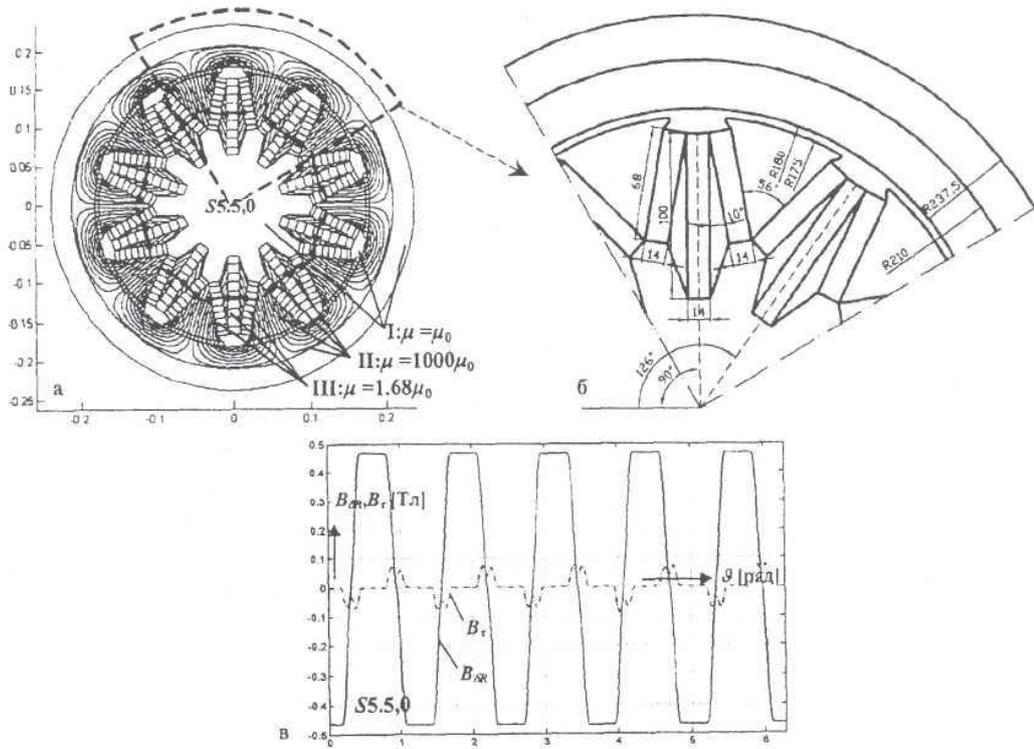


Рис. 3

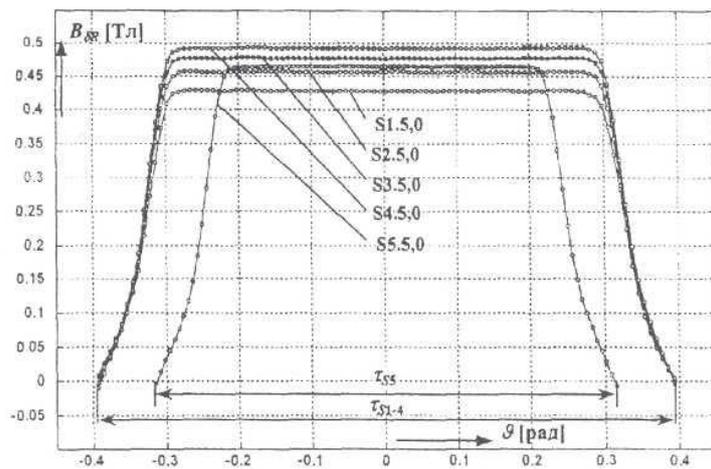


Рис. 4

$$B_{\delta R_{av}}^{S3.5,0} = \frac{1}{\tau_S} \int_{\Theta_1=90^0}^{\Theta_2=135^0} B_{\delta R}^{S3.5,0}(\Theta, R_\delta=0,1775) d\Theta = 0,4045,$$

$$B_{\delta R_{av}}^{S4.5,0} = \frac{1}{\tau_S} \int_{\Theta_1=90^0}^{\Theta_2=135^0} B_{\delta R}^{S4.5,0}(\Theta, R_\delta=0,1775) d\Theta = 0,4181,$$

$$B_{\delta R_{av}}^{S5.5,0} = \frac{1}{\tau_S} \int_{\Theta_1=90^0}^{\Theta_2=126^0} B_{\delta R}^{S5.5,0}(\Theta, R_\delta=0,1775) d\Theta = 0,3791.$$

Сравнение структур. Для сравнения исследуе-

мых структур с внутренним ротором введен коэффициент использования активной части объема ЭД [3], выражаемый формулой $C_m = M_e \eta / m$, где M_e — момент ЭД [Н·м] — уравнение (4), η — КПД, m — масса активной части ЭД (кг). Масса активной части статора представляет собой сумму масс меди m_{Cu} и ферромагнитных сердечников статора m_{Fe} .

Масса меди m_{Cu} для отдельных структур рассчитана по формуле

$$m_{Cu} = \pi (R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2) L_{ef} \gamma_{Cu} k_u, \quad (5)$$

где R_{eCu} и R_{iCu} — наружный и внутренний радиусы пространства с медью; γ_{Cu} — удельная плотность

меди; k_u — коэффициент заполнения медью пространства обмоток.

Масса ферромагнитного сердечника рассчитывается согласно формуле

$$m_{Fe} = \pi \left(R_{eFe}^2 - R_{iFe}^2 \right) L_{ef} \gamma_{Fe}, \quad (6)$$

где R_{eFe} , R_{iFe} — наружный и внутренний радиусы пространства, занятого ферромагнитным сердечником; γ_{Fe} — удельная плотность ферромагнитного материала, при этом $R_{eCu} = R_{iFe}$.

Выражение для общей массы активной части ЭД можно представить в виде

$$m = m_{Cu} + m_{Fe} = \pi L_{ef} \left[\left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) \gamma_{Cu} k_u + \left(R_{eFe}^2 - R_{iFe}^2 \right) \gamma_{Fe} \right]. \quad (7)$$

С учетом зависимостей (4) и (7), выражение для коэффициента использования активной части объема ЭД принимает вид

$$C_m = \frac{\pi^2 2^{0.5}}{480} \xi_1 k_A B_{\delta Rav} D_{iS}^2 L_{ef} \eta \times \left\{ \pi L_{ef} \left[\left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) \gamma_{Cu} k_u + \left(R_{eFe}^2 - R_{iFe}^2 \right) \gamma_{Fe} \right] \right\}^{-1}. \quad (8)$$

Величина линейной токовой нагрузки A_a в ЭД с гладким статором, построенной согласно предложенным магнитным системам ротора, будет выше по сравнению с традиционными структурами, при сохранении условия обеспечения достаточного пространства для размещения обмоток управления при наличии технологического зазора и постоянства плотности тока в обмотках управления.

Линейная токовая нагрузка в рассматриваемых случаях пропорциональна площади поперечного сечения меди

$$A_a = k_A \pi \left(R_{eCu}^2 - R_{iFe}^2 \right), \quad (9)$$

где $K_A = A_b / S_b$ — отношение базовой величины линейной токовой нагрузки к площади поперечного сечения меди.

Уравнение (8) принимает вид

$$C_m = \frac{\pi^2 2^{0.5}}{480} \xi_1 k_A \pi \left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) B_{\delta Rav} D_{iS}^2 L_{ef} \eta \times \left\{ \pi L_{ef} \left[\left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) \gamma_{Cu} k_u + \left(R_{eFe}^2 - R_{iFe}^2 \right) \gamma_{Fe} \right] \right\}^{-1}. \quad (10)$$

Принимая, что ЭД имеют одинаковые КПД и

коэффициенты полюсной дуги и учитывая, что внутренний радиус статора равен $R_{iS} = 176$ мм (радиус ротора увеличен на величину зазора), т.е. $D_{iS} = 352$ мм, выражение (10) принимает вид

$$C_m = a \cdot C'_m, \quad (11)$$

где $a = \frac{\pi 2^{0.5}}{480} \xi_1 k_A \pi D_{iS}^2 \eta$;

$$C'_m = \frac{\left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) B_{\delta Rav}}{\left(R_{eCu}^2 - R_{iCu}^2 \right) \gamma_{Cu} k_u + \left(R_{eFe}^2 - R_{iFe}^2 \right) \gamma_{Fe}}.$$

Поскольку величина a во всех моделях ЭД идентична, сравнение моделей следует вести по коэффициенту C'_m , величина которого свидетельствует о степени использования активной поверхности моделей ЭД. При этом следует заметить, что чем больше величина коэффициента C'_m , тем больший электромагнитный момент можно получить с единицы объема.

Помимо требования достижения высокой индукции в рабочем зазоре, не менее важным показателем является реализация возможно больших величин рабочего зазора, исходя из необходимости обеспечения достаточно большого рабочего пространства для размещения в нем большого количества меди с целью достижения высоких значений линейной токовой нагрузки без увеличения удельной плотности тока, которая приводит к росту омических потерь и, вследствие этого, к снижению КПД электромеханического преобразования энергии.

Распределение магнитного поля в моделях S2.7,5 и S4.10,0 с увеличенными рабочими зазорами показаны соответственно на рис. 5, а — с величиной зазора $\delta_1 = 7,5$ мм (S2.7,5) и 5, б — с величиной зазора $\delta_2 = 10,0$ мм (S4.10,0).

На рис. 5, в показано сопоставление кривых распределения продольных (радиальных) и поперечных (тангенциальных) компонент магнитной индукции в исследуемых моделях вдоль образующей, выбранной посередине рабочего зазора.

Результаты расчета и сопоставления параметров подвергавшихся исследованию моделей приведены в таблице (отметим, что для всех моделей $R_{iCu} = 176,0$ мм). В этой же таблице приведен также относительный коэффициент c'_m , в котором за базовую величину выбран коэффициент C'_m восьми-полюсной модели S1.5,0, имеющей величину рабочего зазора $\delta = 5$ мм.

Как видно из таблицы, наибольший коэффициент использования достигнут в модели S4.10,0, имеющей величину рабочего зазора $\delta = 10$ мм.

Выводы. Специальное размещение постоянных магнитов позволяет синтезировать магнитные системы возбуждения, обеспечивающие близ-

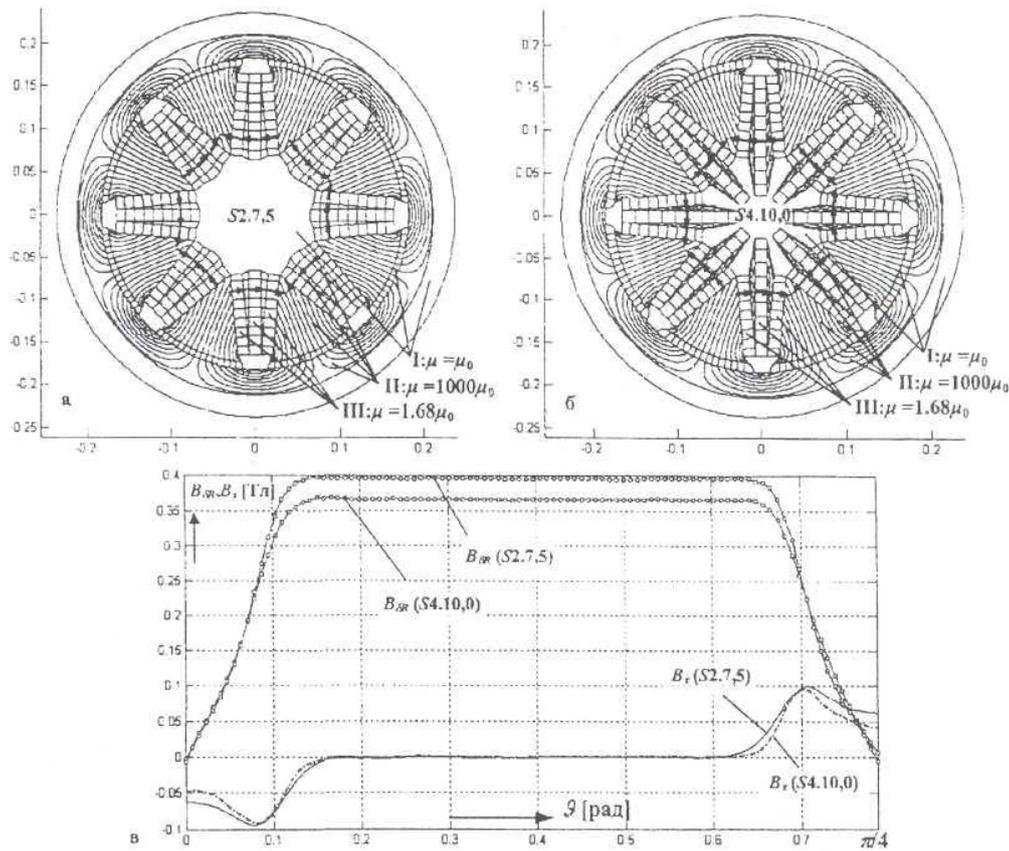


Рис. 5

кие к требуемым параметрам: закономерность распределения составляющей $B_{\delta R}$ вдоль линии выбранной посредине рабочего зазора $B_{\delta R} = \int_1 (r = r_{\delta 0}, \varphi)$, средние $B_{\delta R_{av}}$ и максимальные $B_{\delta R_{max}}$ величины радиальной компоненты магнитной индукции.

Мо- дель	Величины, единицы измерения						
	δ , мм	$B_{\delta R_{av}}$, Тл	$B_{\delta R_{max}}$, Тл	$R_{eCu} =$ R_{eFe} , мм	R_{eFe} , мм	$C'_m \cdot$ Тл·см ³ кг	c'_m , о.е.
S1.5.0	5.0	0.3626	0.4281	180.0	210.0	5.27	1.00
S1.7.5	7.5	0.3142	0.3669	182.5	212.5	7.02	1.33
S1.10	10.0	0.2765	0.3175	185.0	215.0	8.10	1.54
S2.5.0	5.0	0.3860	0.4561	180.0	210.0	5.62	1.06
S2.7.5	7.5	0.3322	0.3887	182.5	212.5	7.42	1.41
S2.10	10.0	0.2900	0.3361	185.0	215.0	8.49	1.61
S3.5.0	5.0	0.4045	0.4769	180.0	210.0	5.88	1.12
S3.7.5	7.5	0.3464	0.4051	182.5	212.5	7.73	1.47
S3.10	10.0	0.3021	0.3486	185.0	215.0	8.85	1.68
S4.5.0	5.0	0.4181	0.4916	180.0	210.0	6.08	1.15
S4.7.5	7.5	0.3570	0.4168	182.5	212.5	7.97	1.51
S4.10	10.0	0.3102	0.3581	185.0	215.0	9.09	1.72
S5.5.0	5.0	0.3791	0.4668	180.0	210.0	5.51	1.05
S5.7.5	7.5	0.3244	0.3952	182.5	212.5	7.24	1.37
S5.10	10.0	0.2810	0.3407	185.0	215.0	8.23	1.56

Исследования показали, что путем концентрации магнитных полей с повышением интенсивности магнитной энергии в заданной области (введение концентраторов магнитного потока) можно достигать величин поля в зазоре больших по сравнению с величиной остаточной магнитной индукции используемых постоянных магнитов.

Поскольку коэффициент использования объема ЭД и величина удельного электромагнитного момента (момента с единицы объема) зависят от линейной токовой нагрузки, то уже на стадии предварительного проектирования следует искать оптимум между величинами рабочего зазора, радиальной компоненты магнитной индукции в зазоре и линейной токовой нагрузки (числом ампервитков).

1. Афонин А.А. Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техн. электродинамика. — 2004. — № 1. — С. 47–55.

2. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. — Л.: Энергия, Ленинградское отд., 1968. — 732 с.

3. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacja elektroniczna. — Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, 2000. — 242 s.

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

ABSTRACTS

Theoretical electrical engineering and electrophysics
SHCHERBA A.A., PODOL'TSEV A.D., KUCHERJAVAJA I.N. (Kiev) **The distribution of pulse-current density in the space between electrodes filled with metal granules**

A three-dimensional numerical model is developed to characterize the electric field and current density in an active region of spark erosion apparatus, filled with metal granules and containing vertical or horizontal current-carrying electrodes. The current density distributions are studied for several apparatus arrangements with different electrode configurations and dielectric barrier between the electrodes. A number of construction designs are examined with a view to localize erosion processes in the central zone of granulated medium and thereby to reduce destructing the surface layer of electrodes due to their erosion.

CHABAN V. (Lviv) **A mathematical theory of Lorentz force**

It is shown that the known expression of Lorentz force can directly be achieved from the levels in vectors or potentials of an electromagnetic field written for a motionless medium if condition of their time dependence will be superposed into space coordinates as it is in a motion medium.

VOLOKHOV S.A. (Kharkov) **Magnetic state estimation of a ferromagnetic construction with the phase diagrams method**

Possibilities of phase diagrams for a magnetic state estimation of a ferromagnetic construction and prediction of its changes at magnetic fields and elastic mechanical loads influence on the construction are considered with application of a phenomenological model of ferromagnetism and probabilistic statistical account of a magnetic structure.

Conversion of electric energy parameters

FEDIY V.S., NAMESTNIK S.G. (Kiev) **Influence of Q(-factor) on harmonic composition of a network current of a three-phase monoharmonic active filter**

Circuits of active filters and electromagnetic processes in them are investigated at losses account in power elements of the filters.

YURCHENKO M.M., SHEVCHENKO P.M., GUTSALJUK V.Ya., TVERDOKHLIB Yu.O. (Kiev) **Commutation processes in power modules of transistor converters of power supply systems of airborne production equipment**

Results of investigation of commutation processes in pulse controllers at quantity transistor modules for power supply systems of airborne production equipment are given. Prospect of modules application is shown on the basis of sectionalized structures at a module construction in the form of a comb design.

KOMAROV N.S., MONZHERAN Yu.P., VOZNY V.A. (Kiev) **Normal and emergency modes of a multiphase pulse current controller which is loaded onto a powerful gas plasma generator**

Voltages and currents distribution in a multiphase transistor current controller with high-frequency pulse modulation, which is intended for power supply of powerful gas plasma generator, is considered. Processes, which arise at a power transistor failor, are analysed.

VELYKIY V.I., ANDRIJCHUK V.A. (Ternopil) **Frequency characteristics of an output stage of electronic start controllable units (ESCU) for luminescent lamps. Normal operating condition**

Frequency characteristics of an output stage (OS) of ESCU for luminescent lamps in a normal operating condition are considered. It is shown that a lamp current is prescribed with inductance of a ballast throttle and supply voltage frequency which has to be equal to a resonance frequency of an output stage oscillatory circuit.

Electromechanical energy conversion

AFONIN A.A., VARDAKH M. (Szczecin, Poland) **Simulation of magnetic systems of electric motors with plane constant magnets in a cylindrical shape rotor**

Results of investigations of magnetic systems of electric motors with plane constant magnets in a cylindrical shape rotor are presented. Different methods of combined magnetic systems forming on the basis of plane constant magnets of oxide-barium type ferrites and ferromagnetic concentrators of magnetic fluxes are proposed and analysed. Results of magnetic systems simulation with different composition of components are given. It is shown that electric loads can also be increased together with magnetic ones in

combined magnetic systems that is the basis for their application at elaboration of electric motors of high application.

SHYMCHAK P. (Szczecin, Poland) **Magnetic systems of a mosaic structure of disk electric generators with constant magnets with constant magnets**

Results of investigations of magnetic systems of disk electric motors with constant magnets are given. Different methods of magnetic systems forming of a mosaic structure on the basis of plane constant magnets of different space orientation and ferromagnetic concentrators of magnetic fluxes are proposed and analysed. Results of systems simulation with different composition of components are given. It is shown that increased values of an electromagnet load can be obtained in magnetic systems of a mosaic structure that is the basis of electric generators designing of high application.

SARATOV V.A. (Kiev) **Determination of a turbo-generator TVF-120 parameters by estimated frequency responses**

Frequency responses and a turbo-generator TVF-120 parameters with different rotor structures — a series rotor and a rotor with damper systems are computed. It is shown that installation of damper systems on a rotor leads to inductive impedances change of a turbo-generator in transient modes: decrease of a transient impedance 13–29% and a supertransient impedance 4%.

Electric power systems and installations

VASYLIV K.M. (Lviv) **A mathematical model of dynamic processes of an autonomous electric power system on the basis of a contactless asynchronous generator with a two-phase—three-phase cascade modulated exciter**

A mathematical model of an autonomous electric power system on the basis of an asynchronous generator with a contactless two-phase—three-phase electric motor cascade modulated exciter is proposed. The model permits to investigated static and dynamic processes caused by instability of a rotor rate speed. Possibility of the system behaviour observation is provided at its operation in modes typical for practice including the system functioning of automatic stabilization of a generator voltage and current both in normal and extreme conditions.

RAMAZANOVA Z.U. (Simferopol), REZISOV V.F., SURZHUK T.V. (Kiev), KHADZHINOV A.L. (Zaporozhje) **Analysis of unsteady spatial inhomogeneous conditions in long lines at dependence of leakage current conductance on voltage and temperature**

Long lines with distributed parameters, which take into account leakage current dependence on voltage and temperature, are considered from the point of view of synergetic approach to investigation of spatial inhomogeneous structures forming at instabilities growth. The main factors, which determine instabilities stating and a character of their development in time, are analysed.

SHOSTAK V.O., SOKOLOVSKY S.A., BRZHEZITSKI V.O., BELYAEV V.K. (Kiev), YANISCHEWSKYJ W.I. (Toronto, Canada) **Lightning overvoltage characteristics in a medium voltage distribution line**

An approach is developed for estimation on lightning overvoltage characteristics for surges from the medium voltage distribution line. The analysis is performed for lightning striking directly to the line and to the ground in its vicinity. The attenuation of surges due to effects of corona and finite value of ground conductivity is taken into account. Calculations are performed using one-wire approach for a typical 10 kV line in Ukraine. Results are presented in terms of overvoltage amplitudes, their front steepness and period of appearance at a certain point of the line (end, middle).

PENTEGOV I.V. (Kiev), LARCHENKO B.B. (Chernigov) **Analysis of processes in hexagonal autotransformer devices of high current harmonics suppression**

Analysis of processes in hexagonal suppression devices of high current harmonics of an autotransformer type with small mass and relatively low level of high current harmonics in a network is made.

A new method of computation of this class devices is proposed and formulae, which permit to determine all the parameters of these devices, are obtained. The investigations being conducted permit to create a classification of different types hexagonal transformers and autotransformers with a virtual neutral.