

## ТИХОХІДНИЙ МАЛОПОТУЖНИЙ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН ДИСКОВОГО ТИПУ

Білий П.М., к.т.н., доц.; Опришко В.В.,

Кременчуцький державний політехнічний університет

Україна, 39614, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20, КДПУ, кафедра "Електромеханіки",

тел. (0536) 74-32-45, e-mail: ke@polytech.poltava.ua; vickrem@inbox.ru

*Розглянуто дисковий магнітоелектричний мікродвигун. Представлено конструктивну схему магнітної системи. Здійснено оцінку магнітного поля та електромагнітного моменту цього двигуна.*

*Рассмотрен дисковый магнитоэлектрический микродвигатель. Представлена конструктивная схема магнитной системы. Осуществлена оценка магнитного поля и электромагнитного момента этого двигателя.*

### ВСТУП

В теперішній час у всьому світі різко підвищився попит на надійні та недорогі електродвигуни малої потужності (мікродвигуни). Так, в Німеччині на одну родину в середньому припадає 30÷40 мікродвигунів (МД), причому від 10÷20 МД застосовують у допоміжних механізмах та агрегатах автомобіля. В одній Японії випуском МД займається більше 50 фірм. Крім свого побутового призначення МД знаходять широке використання в робототехніці, обчислювальній техніці, звуко- та відеотехніці. Широко застосовують такі двигуни в авіації та космічній техніці. Крім того їх використовують в мікроприводах антен, фотозатворів, телескопів, сонячних батарей. В Україні на сьогоднішній день відчувається суттєвий дефіцит таких МД. Сюди слід віднести МД, які можуть бути вмонтовані, тобто інтегровані, в мікропривод.

### МЕТА СТАТТІ

Мета даної статті – показати, як використовуючи висококоерцитивні постійні магніти (ПМ) системи Nd-Fe-B (в даному випадку один ПМ у формі кільця) можна створити достатньо простий технологічно МД, виробництво якого можна було б засвоїти практично на будь-якому електромашинобудівному підприємстві. Передбачається визначити індукцію  $B_\delta$  в повітряному зазорі  $\delta$  та здійснити оцінку електромагнітного моменту. Привести конструктивні схеми МС мікродвигунів дискового типу, які призначені для використання в мікроприводі побутового призначення, сервісному електроприводі автомобіля, а також можуть бути інтегровані в будь-який автоматизований робототехнічний комплекс.

### МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Загальна широко відома конструктивна схема магнітної системи МД показана на рис. 1а, б. Ця конструктивна схема магнітної системи (МС) достатньо широко висвітлена в технічній літературі за останні 10÷15 років [1÷5].

Подальша інтенсифікація робіт в напрямку розробки конструктивних схем стимулювала розробку багат шарових МД [6÷9]. Приклад конструкції МС такого двигуна показано на рис. 2.

Статор такого двигуна має витий магнітопровід  $I_1, I_2$ , струмові шари  $2_1, 2_2, 2_3$ , ротор виконаний у вигляді набору дисків  $3_1, 3_2$  з ПМ зі зміннополюсним намагнічуванням.

Приведені вище конструктивні схеми МС двигунів як правило мають число пар полюсів  $p = 3 \div 6$ ; число обертів ротора за хвилину в таких МД складає в середньому  $n = 3000 \div 8000$ . При цьому, якщо взяти ці конструктивні схеми (рис. 1, 2), то побудувати тихохідний багатополосний МД практично неможливо з

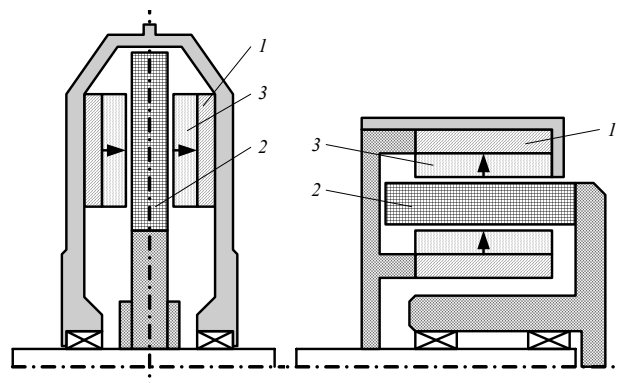


Рис. 1. Конструктивні схеми МС дискового типу: а) магнітне поле має аксіальну складову; б) магнітне поле має радіальну складову. 1 – замикаюче феромагнітне кільце, 2 – струмовий шар, 3 – ПМ

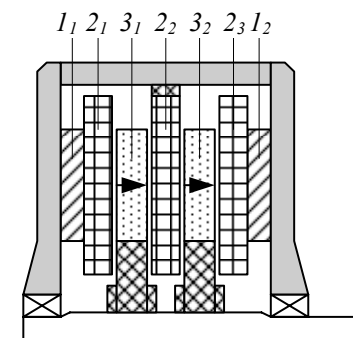


Рис. 2. МС багат шарового магнітоелектричного двигуна

точки зору технологічної реалізації, а саме виникає питання закріплення ПМ (магнітних шарів). Крім цього значно зростають потоки розсіювання, незважаючи який би МД не будували чи то з зубцевим чи то з гладеньким якорем. Фрагмент областей енергоперетворення МС двигунів з радіальним напрямком магнітного поля показано на рис. 3а, б.

В статті запропонована частково відома конструктивна схема МД, в якій застосовано традиційну, з класу синхронних двигунів, конструкцію ротору з кігтеподібними полюсами та з кільцевим ПМ. Магніто-твердий

матеріал ПМ виконано у формі кільця, який намагнічено в осьовому напрямку та розташовано між торцями двох магнітопроводів з магнітом'якого матеріалу, що мають кігтеподібні полюси (рис. 4).

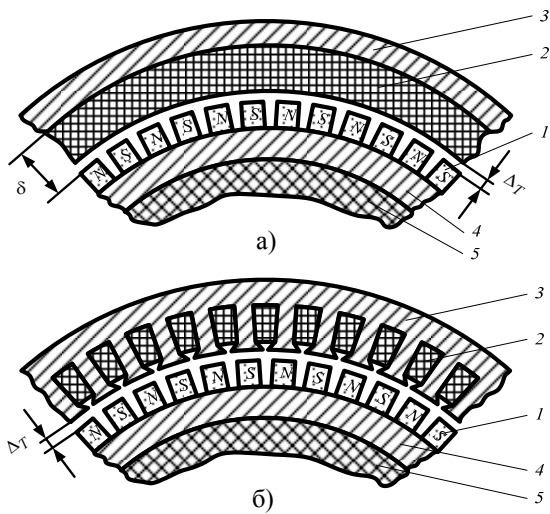


Рис. 3. Магнітна система двигунів з гладким якорем (а); та з зубцевим якорем (б): 1 – ПМ, 2 – обмотка якоря, 3 – ярмо якоря (магнітопровід), 4 – замикаюче ярмо ротора, 5 – немагнітна опора

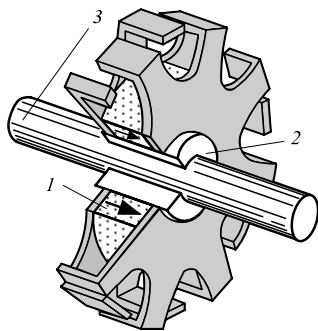


Рис. 4. Конструкція ротору з кігтеподібними полюсами: 1 – кільце з ПМ, 2 – немагнітна втулка, 3 - вал

На рис. 5 показано поперечний переріз МС такого мікродвигуна. Така МС є більш технологічною у виконанні. Слід також відмітити, що синхронні МД з зубцевим якорем в системах автоматики особливо поширені, але щодо МД постійного струму з ротором, який має кігтеподібні полюси, то цей клас електричних машин недостатньо описано в технічній літературі.

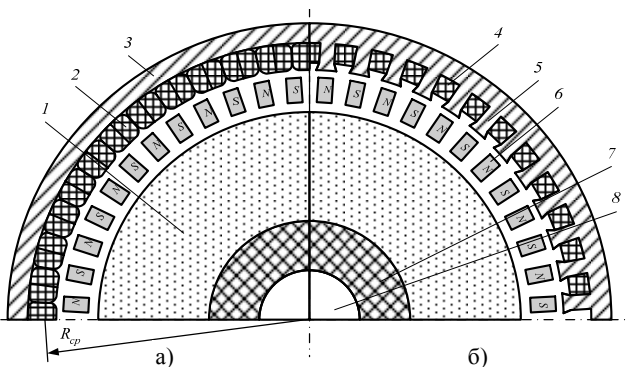


Рис. 5. Поперечний переріз МС мікродвигуна з конструкцією багатополосного ротору з кігтеподібними полюсами: а) з гладким якорем; б) з зубцевим якорем. 1 – ПМ у формі кільця, 2 – струмовий шар, 3 – магнітопровід (ярмо), 4 – обмотка якоря (обмотка керування), 5 – зубець якоря, 6 – полюсний накінецьник ротора, 7 – немагнітна втулка, 8 – вал

Побудована таким чином конструкція дискового МД з ротором, що має кігтеподібні полюси може мати різні конструктивні форми. Так, вона дозволяє застосовувати модульний підхід, а саме: МД може складатися з декількох модулів (М). Як приклади, на рис. 6 показані деякі з них.

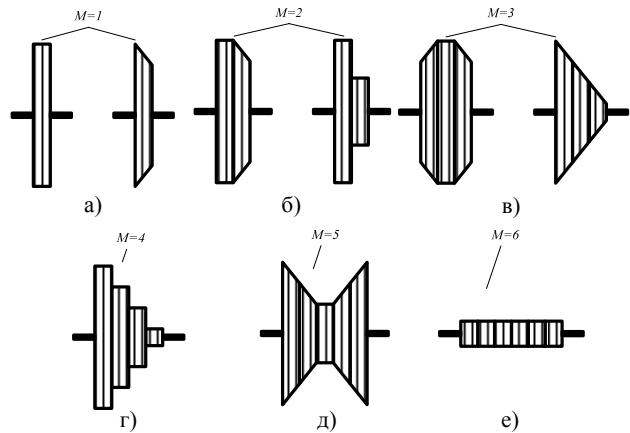


Рис. 6. Форми виконання МД

### РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ $B_\delta$

Для визначення магнітної провідності ПМ будемо використовувати відомі класичні вирази [10, 11].

Магнітна провідність ПМ, виготовленого на основі системи Nd-Fe-B, який має лінійну криву розмагнічування:

$$\lambda_M = \frac{\mu_0 \cdot \mu_M \cdot S_M}{h_M},$$

де  $S_M$  – площа поперечного перерізу ПМ;  $h_M$  – товщина ПМ;  $\mu_0$  – магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $\mu_M$  – відносна магнітна проникність ПМ.

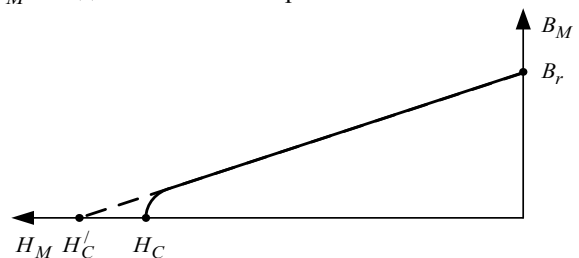


Рис. 7. Лінеаризація кривої розмагнічування

Для спрощення розрахунку ПМ крива розмагнічування апроксимується прямою, внаслідок чого з'являється фіктивна коерцитивна сила (рис. 7):

$$H_C' = \frac{B_R}{\mu_0 \cdot \mu_M},$$

де  $B_R$  – залишкова індукція.

Похибка такої апроксимації буде незначною, оскільки робоча точка ПМ лежить на лінійній ділянці кривої розмагнічування, тобто приймаємо  $H_C' \approx H_C$ , тоді:

$$\lambda_M = \frac{B_R \cdot S_M}{H_C \cdot h_M}. \quad (1)$$

Магнітна провідність розсіювання ПМ може бути визначена як сума двох складових (рис. 8):

$$\lambda_{\sigma PM} = \lambda_{\sigma_1} + \lambda_{\sigma_2}. \quad (2)$$

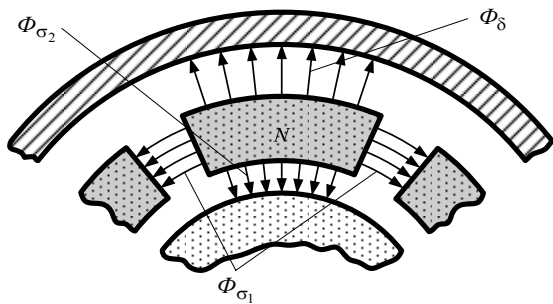


Рис. 8. Фрагмент області енергоперетворення МС

Покажемо геометричні розміри МС, які будуть застосовані в подальших розрахунках (рис. 9).

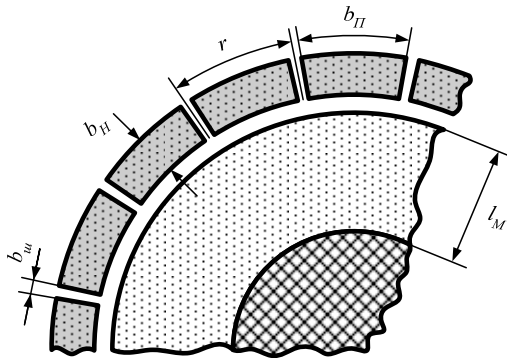


Рис. 9. Магнітна система ротора

Магнітна провідність розсіювання між ПМ і полюсними наконечниками:

$$\lambda_{\sigma_2} = 2p \cdot \mu_0 \cdot \frac{\left(\frac{l}{2} + \frac{2l_M}{\pi}\right) \cdot \left(b_{\Pi} + \frac{2l_M}{\pi}\right)}{l_M}, \quad (3)$$

$l$  – активна частина (довжина) полюсного наконечника (не показано);  $p$  – число пар полюсів.

Магнітна провідність розсіювання між полюсними наконечниками:

$$\lambda_{\sigma_1} = 2p \cdot \mu_0 \cdot \frac{\left(l + \frac{2l_{uu}}{\pi}\right) \cdot \left(b_H + \frac{l_{uu}}{\pi}\right)}{b_{uu}}, \quad (4)$$

Магнітна провідність повітряного зазору  $\delta$ :

$$\lambda_{\delta} = p \cdot \mu_0 \cdot \frac{l \cdot b_{\Pi}}{2 \cdot \delta}. \quad (5)$$

Перейдемо до магнітних опорів через магнітні провідності. Магнітні опори відповідно:

$$R_M = \frac{1}{\lambda_M}; \quad R_{\sigma} = \frac{1}{\lambda_{\sigma}}; \quad R_{\delta} = \frac{1}{\lambda_{\delta}}.$$

Припустимо, що магнітна проникність матеріалу магнітопровода (заліза) статора близька до нескінченності, тоді схема заміщення буде мати наступний вигляд [12]:

На рис. 10 показано:  $\Phi_M$  – магнітний потік, створений ПМ;  $\Phi_{\sigma}$  – розсіювання;  $\Phi_{\delta}$  – повітряного зазору;  $F_M = h_M \cdot H_C$  – магніторухійна сила.

Магнітний потік ПМ

$$\Phi_M = \frac{h_M \cdot H_C}{R_M + \frac{1}{\lambda_{\sigma} + \lambda_{\delta}}}. \quad (6)$$

Магнітний потік в робочому зазорі  $\delta$ :

$$\Phi_{\delta} = \frac{F_{ab}}{R_{\delta}} = F_{ab} \lambda_{\delta}, \quad (7)$$

де  $F_{ab} = F_M - \Phi_M \cdot R_M$  – різниця магнітних потенціалів між точками  $a$  і  $b$ .

Індукція в зазорі  $\delta$ :

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{l \cdot b_{\Pi} \cdot p}. \quad (8)$$

Складаючи систему рівнянь за 2-м законом Кірхгофа для схеми заміщення (рис. 10), отримуємо:

$$\begin{cases} \Phi_{\sigma} \cdot R_{\sigma} = \Phi_{\delta} \cdot R_{\delta} \\ \Phi_M = \Phi_{\sigma} + \Phi_{\delta} \end{cases}. \quad (9)$$

Звідси:

$$\Phi_{\sigma} = \frac{\Phi_M}{1 + \frac{R_{\delta}}{R_{\sigma}}} = \frac{\Phi_M}{1 + \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\delta}}}. \quad (10)$$

Як приклад визначимо електромагнітний момент дискового МД (рис. 6, а) з багатополісним ротором з кігтеподібними полюсами і ПМ з магнітотвердого матеріалу Nd-Fe-B.

МС має наступні розміри:

$l = 10$  мм – довжина кігтеподібних полюсів;

$D = 25$  мм – зовнішній діаметр ротору;

$D_M = 20$  мм – зовнішній діаметр ПМ;

$h_M = 3$  мм – товщина ПМ;

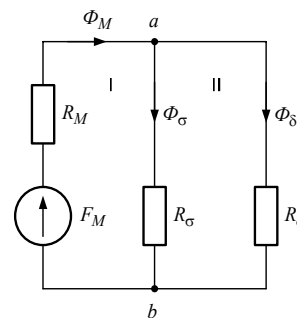


Рис. 10. Схема заміщення магнітного кола

$b_{\Pi} = 2$  мм – ширина полюсного наконечника;

$b_H = 1,5$  мм – товщина полюсного наконечника;

$\delta = 5$  мм – повітряний зазор;

$p = 18$  – число пар полюсів.

Магнітні параметри ПМ:  $B_r = 1,25$  Тл;

$H_C = 850$  кА/м.

Попередньо розрахуємо індукцію  $B_{\delta}$  в робочому зазорі  $\delta$ .

Загальна провідність розсіювання визначається як сума двох складових (2).

Визначаємо  $\lambda_{\sigma_1}$ :

$$\begin{aligned} \lambda_{\sigma_1} &= 2p \cdot \mu_0 \cdot \frac{\left(l + \frac{b_{uu}}{\pi}\right) \cdot \left(b_H + \frac{b_{uu}}{\pi}\right)}{b_{uu}} = \\ &= \frac{2 \cdot 18}{0,6} \cdot 10^{-3} \cdot \mu_0 \left(10 + \frac{0,6}{\pi}\right) \left(1,5 + \frac{0,6}{\pi}\right) = 1,033 \mu_0. \end{aligned}$$

Визначимо  $\lambda_{\sigma_2}$ :

$$\lambda_{\sigma_2} = 2p\mu_0 \cdot \frac{\left(\frac{l}{2} + \frac{2l_M}{\pi}\right) \left(b_{II} + \frac{2l_M}{\pi}\right)}{l_M} =$$

$$= \frac{2 \cdot 18}{5} \cdot 10^{-3} \cdot \mu_0 \left(5 + \frac{2 \cdot 3}{\pi}\right) \cdot \left(2 + \frac{2 \cdot 3}{\pi}\right) = 0,193 \cdot \mu_0.$$

Загальна провідність  $\lambda_{\sigma}$ :

$$\lambda_{\sigma_{II}} = \lambda_{\sigma_1} + \lambda_{\sigma_2} = \mu_0 \cdot (0,193 + 1,033) = 1,226 \cdot \mu_0.$$

Магнітний опір, згідно з (1):

$$R_M = \frac{1}{\lambda_M} = \frac{H_C \cdot h_M}{B_R \cdot S_M} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 850 \cdot 10^3}{1,25 \cdot \frac{3,14(D_M^{(1)} - D_M^{(2)})^2}{4}} =$$

$$= 0,147 \cdot 10^8 \text{ Гн}^{-1}.$$

Магнітна провідність потоку через повітряний зазор  $\delta$ , згідно з (5):

$$\lambda_{\delta} = p \cdot \mu_0 \frac{l \cdot b_{II}}{2 \cdot \delta} = 18 \cdot \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot 10}{2 \cdot 5} \cdot 10^{-3} = 0,036 \cdot \mu_0 \text{ Гн}.$$

Опір, відповідно:

$$R_{\delta} = \frac{1}{\lambda_{\delta}} = \frac{1}{0,036\mu_0} = 2,2 \cdot 10^7 \text{ Гн}^{-1}.$$

Магнітна провідність ділянки кола між точками  $a$  і  $b$  (рис. 10):

$$\lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma} = (0,036 + 1,226)\mu_0 = 1,262 \cdot \mu_0 = 1,585 \cdot 10^{-6} \text{ Гн},$$

а магнітний опір цієї ділянки:

$$R_{ab} = \frac{1}{\lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} = \frac{1}{1,585 \cdot 10^{-6}} = 0,631 \cdot 10^6 \text{ Гн}^{-1}.$$

Магнітний потік  $\Phi_M$ , згідно з (6):

$$\Phi_M = \frac{h_M \cdot H_C}{R_M + \frac{1}{\lambda_{\sigma} + \lambda_{\delta}}} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 850 \cdot 10^3}{0,147 \cdot 10^8 + 0,631 \cdot 10^6} =$$

$$= 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Магнітний потік через повітряний зазор, згідно з (10):

$$\Phi_{\delta} = \frac{\Phi_M}{1 + \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\delta}}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-4}}{1 + \frac{1,226}{0,036}} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}.$$

Індукція в повітряному зазорі, згідно з (8):

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{l \cdot b_{II} \cdot p} = \frac{4,7}{10 \cdot 2 \cdot 18} = 13,05 \text{ мТл}.$$

## ОЦІНКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ

Електромагнітний момент:

$$M_{em} = \frac{2p}{a} \cdot B_{\delta} \cdot I_a \cdot W_{\tau} \cdot l_{np} \cdot R_{cp},$$

де  $a$  – число паралельних віток статорної обмотки, які приходяться на одну пару полюсів;  $I_a$  – струм в обмотках статора;  $W_{\tau}$  – число витків в обмотці на полюсному поділі  $\tau$ ;  $R_{cp}$  – радіус кола, що проходить по центру робочого зазору  $\delta$  (рис. 5, а).

Для оцінки електромагнітного моменту візьмемо наступні дані:  $I_a = 0,05 \text{ А}$ ;  $R_{cp} = 14 \text{ мм}$ ;  $W_{\tau} = 30$ ;  $a = 1$ ;  $l_{np} \approx l = 10 \text{ мм}$ .

Тоді:

$$M_{em} = \frac{2p}{a} \cdot B_{\delta} \cdot I_a \cdot W_{\tau} \cdot l_{np} \cdot R_{cp} = \frac{2 \cdot 18}{1} \cdot 13,05 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times 0,05 \cdot 30 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 14 \cdot 10^{-3} = 0,98 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

## ВИСНОВКИ

1. Представлена нова конструктивна схема МС мікродвигуна дискового типу, який може працювати в кроковому режимі, а також в режимі автокомутації фаз.

2. Розроблена методика розрахунку дозволяє на стадії проектної моделі МД здійснювати оцінку величини магнітної індукції та електромагнітного моменту.

3. Особливо слід відмітити високу технологічність конструктивної схеми МД, яка може мати різні форми виконання. Такий МД може бути умонтований в будь-який складний вузол автоматизованого робототехнічного комплексу, сервісного електроприводу автомобіля.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Адволоткин Н.П., Овчинников И.Е. Состояние и перспективы развития вентиляльных электродвигателей для станкостроения и робототехники// Бесколлекторные регулируемые электрические машины: Сб. науч. тр. – Ленинград: ВНИИ Электромаш, 1988. - С. 5–19.
- [2] Адволоткин Н.П., Вдовиков А.Г., Выплавин Ю.И. и др. Унифицированная серия вентиляльных двигателей с постоянными магнитами ДВУ для станкостроения и робототехники// Электротехника. -1988. -№2. - С. 37-40.
- [3] Белый П.Н. Уравнения для проектирования встраиваемых магнитоэлектрических двигателей дискового типа// Техн. Электродинамика: - 2005. -№6. - С. 53-56.
- [4] Белый П.Н. Коллекторные магнитоэлектрические двигатели постоянного тока дискового типа для сервопривода// Электротехника. -1997. -№6. - С. 17-20.
- [5] Афонин А.А., Гребенников В.В., Цежневски П. Дисковые двигатели с постоянными магнитами// Техн. Электродинамика. -1997. -№4. - С. 36-44.
- [6] Белый П.Н. Принципы построения дисковых магнитоэлектрических двигателей малой мощности// Электромеханика. -1997. -№6. - С. 18-20.
- [7] Сромин А.Ф. Расчет дисковых вентиляльных электродвигателей для привода станков и роботов// Электротехника. -1998. -№2. - С. 45-48.
- [8] Білий П.М. Деякі питання проектування умонтованих багатополісних дискових магнітоелектричних двигунів// Вісник ВПІ-2003. -№4. - С. 49-53.
- [9] Белый П.Н. Конструктивное развитие дисковых высокомоментных технологических электродвигателей с высококоэрцитивными постоянными магнитами// Электротехника. -2001. -№7. - С. 20-23.
- [10] Хрущев В.В. Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики. Л.: Энергия, 1969.
- [11] Штёлтинг Г., Байссе А. Электрические микромашины. Пер. с нем.: - М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [12] Овчинников И.Е. Теория вентиляльных электрических двигателей. -Л.: Наука, 1985.

Надійшла 24.03.2006