УДК 629.7.064.5

Б.М. Харчишин

УЗАГАЛЬНЕНА СТАТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯРИЗОВАНОГО ДВИГУНА ГРЕБІНЦЕВОГО ТИПУ З ДИСИМЕТРИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

Установлено залежності, що описують статичну характеристику поляризованого електродвигуна з гребінцевою дисиметричною структурою і є базою методики вибору його головних розмірів.

Установлены зависимости, которые описывают статическую характеристику поляризованного электродвигателя с гребенчатой диссиметричной структурой и являются базой методики выбора его главных размеров.

ВСТУП

У сучасних гідросистемах керування літальними апаратами, металообробними верстатами, оптичними телескопами та антенами широке застосування знайшли поляризовані двигуни (ПД), які є магнітоелектричними перетворювачами вхідного електричного сигналу в обмежене пропорційне переміщення вихідного елемента [1]. Вдале поєднання їхніх позитивних якостей як виконавчих елементів (швидкодія, високий коефіцієнт віддачі), так і метрологічних перетворювачів (лінійність та симетрія характеристик, мала зона нечутливості) гарантують перспективність подальшого застосування поляризованих двигунів як звичайної кільцевої конструкції, так і конструкцій з гребінцевою структурою.

Узагальнена статична характеристика ПД кільцевої конструкції як функція величин $i_{m\delta}$, $i_{k\delta}$ (м.р.с. постійного магніту та обмотки керування, що припадають на повітряний проміжок), параметрів магнітного кола ζ_m, ζ_c і $f(\alpha)$ визначається [2]:

$$M_e=\lambda_0\cdot\frac{\left(1+\zeta^2\cdot f^2(\alpha)\right)\cdot i_{m\delta}\cdot i_{k\delta}-f(\alpha)\left(\zeta_c i_{m\delta}^2+\zeta_m i_{k\delta}^2\right)}{\left(1-\zeta^2\cdot f^2(\alpha)\right)^2}\cdot\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha},\quad(1)$$

де $\zeta_c=\frac{c^*}{c^*+1}$; $\zeta_m=\frac{m^*}{m^*+1}$; $\zeta=\sqrt{\zeta_m\cdot\zeta_c}$ – середньогеометрична величина між ζ_m та ζ_c; λ_0 – магнітна провідність між парою зубців у нейтральному положенні ротора; $f(\alpha)$ – функція, що описує зміну магнітних провідностей міжзубцевого проміжку від кута повороту α; c^*, m^* – відносні величини магнітних опорів кола керування та постійного магніту у частках базового магнітного опору повітряного проміжку в нейтральному положенні ротора.

Вираз (1) покладено в основу аналітичного дослідження залежності метрологічних показників ПД від інтенсивності джерел поляризації та керування (м.р.с. i_m та i_k відповідно), параметрів магнітного кола та конфігурації зубцевої активної зони, що описується функцією $f(\alpha)$ та її похідною за кутом $\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha}$.

Ця публікація має на меті встановлення аналогічної залежності для поляризованого двигуна з гребінцевою дисиметричною структурою [3, 4].

УЗАГАЛЬНЕНА СТАТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПД З ГРЕБІНЦЕВИМИ ЗОНАМИ

Рівняння для узагальненої статичної характеристики ПД з гребінцевими зонами можна отримати як

$$M(i_m,i_c,\alpha)=\frac{\partial W'}{\partial\alpha},\quad(2)$$

де

$$W'=\int_0^{i_m}\int_0^{i_c}\sum_{i=m}^{i=c}\psi_i(i_m,i_c,\alpha)di_i=\frac{1}{2}(\psi_m\cdot i_m+\psi_c\cdot i_c)\quad(3)$$

магнітна коенергія джерел намагнічувальних сил.

З врахуванням величин потокозчеплень контурів поляризації ψ_m та керування ψ_c , визначених з системи рівнянь, що описують стан магнітного кола [3], отримаємо

$$\begin{aligned}W'=&\frac{1}{2\left(1-\zeta_m\zeta_c k f^2(\alpha)\right)}\cdot\left(1-\zeta_c k f^2(\alpha)\right)\cdot\frac{i_m^2}{m+r_m}+\\&+\left(1-\zeta_m k f^2(\alpha)\right)\cdot\frac{i_c^2}{c+r_c}-2r_{mc}\cdot\frac{i_m}{m+r_m}\cdot\frac{i_c}{c+r_c}\cdot f(\alpha),\end{aligned}\quad(4)$$

де $k=\frac{1}{\sigma}\cdot\left(\frac{q^2}{s+q}-\frac{t^2}{n+t}\right)$ коефіцієнт глибини модуляції сумарної провідності кола магнітного потоку поляризації; $\sigma=n+t+q+s$; s, n, t і q - параметри, що характеризують структуру гребінцевих зон (t і q – еквівалентні кількості активних зон гребінцевої структури, а s і n - еквівалентні кількості зубців пасивних зон); c, m − магнітні опори кола керування та постійного магніту.

Зважаючи на те, що при довільних m та c, а також довільних параметрах зубцевої структури s, n, t і q завжди $\zeta_m\le 1$; $\zeta_c\le 1$ і $k\le 1$, в області малих значень відносної величини α, коли $f^2(\alpha)$<<1 при нехтуванні малими величинами четвертого порядку з достатньою для інженерних розрахунків точністю можемо записати

$$\begin{aligned}\frac{1-\zeta_c k f^2(\alpha)}{1-\zeta_m\zeta_c k f^2(\alpha)}&\approx 1-\zeta_c\cdot(1-\zeta_m)\cdot k f^2(\alpha)=\\&=1-\zeta_c\cdot\xi_m\cdot k f^2(\alpha);\end{aligned}\quad(5)$$

$$\begin{aligned}\frac{1-\zeta_m k f^2(\alpha)}{1-\zeta_m\zeta_c k f^2(\alpha)}&\approx 1-\zeta_m\cdot(1-\zeta_c)\cdot k f^2(\alpha)=\\&=1-\zeta_m\cdot\xi_c\cdot k f^2(\alpha),\end{aligned}\quad(6)$$

де $$\xi_m = 1 - \zeta_m = \frac{r_m^* - \Delta m^*}{m^* + r_m^*} = \frac{r_m - \Delta m}{m + r_m};$$

$$\xi_c = 1 - \zeta_c = \frac{r_c^* - \Delta c^*}{c^* + r_c^*} = \frac{r_c - \Delta c}{c + r_c},$$

$\Delta m^* = r_m^* \dfrac{k_m}{k}$; $\Delta c^* = r_c^* \dfrac{k_c}{k}$ − деякі фіктивні магнітні опори, внесені у коло постійного магніту та коло керування відповідно, внаслідок дисиметрії структур гребінцевих зон; k_m, k_c − коефіцієнти, що залежать від параметрів структури гребінцевих зон,

$$k_m + k_c = \left(\frac{t-q}{s+q+n+t}\right)^2.$$

З урахуванням (5) і (6) вираз для коенергії (4) запишемо як

$$W' = \frac{1}{2}\left(1 - \zeta_m \xi_c k f^2(\alpha)\right) \cdot \frac{i_m^2}{m + r_m} + \frac{1}{2}\left(1 - \zeta_m \xi_c k f^2(\alpha)\right) \cdot$$
$$\cdot \frac{i_c^2}{c + r_c} - \frac{r_{mc}}{1 - \zeta_m \xi_c k f^2(\alpha)} \cdot \frac{i_m}{m + r_m} \cdot \frac{i_c}{c + r_c} \cdot f(\alpha). \qquad (7)$$

Відкинувши у (7) складові коенергії, які не залежать від кута повороту α, отримаємо

$$W' = \frac{1}{2}\left(\zeta_c \xi_m \cdot \frac{i_m^2}{m + r_m} + \zeta_m \xi_c \cdot \frac{i_c^2}{c + r_c}\right) \cdot k f^2(\alpha) -$$
$$- \frac{r_{mc}}{1 - \zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)} \cdot \frac{i_m}{m + r_m} \cdot \frac{i_c}{c + r_c} \cdot f(\alpha). \qquad (8)$$

Відповідно до (2) і (8) узагальнена статична характеристика (функційна залежність електромагнітного моменту ПД від i_m, i_c та α) визначається формулою

$$M = \left(r_{mc} \cdot \frac{i_m}{m + r_m} \cdot \frac{i_c}{c + r_c} \cdot \frac{1 + \zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)}{\left(1 - \zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)\right)^2} - \right.$$
$$\left. - \left(\zeta_c \xi_m \cdot \frac{i_m^2}{m + r_m} + \zeta_m \xi_c \cdot \frac{i_c^2}{c + r_c}\right) \cdot k f(\alpha) \right) \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha}. \qquad (9)$$

Для зручності в (9) порівняно з (8) знак струму керування i_c змінено на протилежний.

Для інженерних розрахунків вираз (9) спрощено, нехтуючи малими величинами третього порядку, прийнявши

$$\frac{1 + \zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)}{\left(1 - \zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)\right)^2} \approx 1 + 3\zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha),$$

тоді

$$M = \left(r_{mc} \cdot \left(1 + 3\zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)\right) \frac{i_m}{m + r_m} \cdot \frac{i_c}{c + r_c} - \right.$$
$$\left. - \left(\zeta_c \xi_m \cdot \frac{i_m^2}{m + r_m} + \zeta_m \xi_c \cdot \frac{i_c^2}{c + r_c}\right) \cdot k f \alpha \right) \times \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha}. \qquad (10)$$

Вираз (10) записано у термінах еквівалентних намагнічувальних сил i_m та i_c, хоча в інженерній практиці їх доцільніше мати у термінах відповідних магнітних потоків у повітряних проміжках, як величин більш наперед детермінованих. Зважаючи, що

$$\varphi_m = \frac{i_m}{m + r_m} \quad \text{і} \quad \varphi_c = \frac{i_c}{c + r_c}, \qquad (11)$$

де φ_m та φ_c − магнітні потоки у повітряних проміжках активної зони кіл поляризації та керування при нейтральному положенні ротора ПД, можна записати

$$M = \left(\left(r_{mc} \left(1 + 3\zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)\right) \cdot \varphi_m \varphi_c \right) - \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \times \right.$$
$$\left. \times \left(\zeta_c \cdot (r_m - \Delta m) \cdot \varphi_m^2 + \zeta_m (r_c - \Delta c) \cdot \varphi_c^2 \right) \cdot k f(\alpha) \right). \qquad (12)$$

При аналізі окремих характеристик ПД, зокрема тягової, інколи доцільно описувати коло поляризації у термінах магнітного потоку φ_m, а коло керування - у термінах струму керування i_c, тоді вираз для електромагнітного моменту ПД матиме вигляд

$$M = \left(\frac{r_{mc}}{c + r_c} \cdot \left(1 + 3\zeta_m \zeta_c k f^2(\alpha)\right) \cdot \varphi_m \cdot i_c - \right.$$
$$\left. - \left(\zeta_c \cdot (r_m - \Delta m) \cdot \varphi_m^2 + \zeta_m \cdot \xi_c \cdot i_c^2 \right) \cdot k f(\alpha) \right) \times \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha}. \qquad (13)$$

АНАЛІЗ УЗАГАЛЬНЕНОЇ СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

Як і можна було передбачити, вираз $M(i_m, i_c, \alpha)$ є симетричним відносно індексів m і c, тобто він не змінюється при їхній перестановці, що пояснюється мостовою заступною схемою магнітного кола.

Окремими характеристиками ПД, що використовуються в експериментальній практиці є:

− механічна або зовнішня характеристика $M(\alpha)$ при $i_c = 0$

$$M(\alpha, i_c = 0) = -\frac{1}{2} \zeta_c \cdot (r_m - \Delta m) \cdot \varphi_m^2 \cdot k \frac{\partial f^2(\alpha)}{\partial \alpha}; \qquad (14)$$

− моментна або тягова характеристика $M(i_c)$ при $\alpha = 0$

$$M(i_c, \alpha = 0) = \frac{r_{mc}}{c + r_c} \cdot \varphi_m \cdot i_c \cdot \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha}, \qquad (15)$$

а також параметри цих характеристик;

− коефіцієнт крутизни механічної характеристики (жорсткість "магнітної пружини" ПД)

$$K_m = \left.\frac{\partial M}{\partial \alpha}\right|_{i_c = 0} = -\frac{1}{2} \zeta_c \cdot (r_m - \Delta m) \cdot \varphi_m^2 \cdot k \frac{\partial^2 f^2(\alpha)}{\partial \alpha^2}; \qquad (16)$$

− коефіцієнт крутизни моментної характеристики

$$K_i = \left.\frac{\partial M}{\partial i_c}\right|_{\alpha = 0} = \left.\frac{r_{mc} \cdot \varphi_m}{c + r_c} \cdot \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} - \zeta_m \cdot \xi_c \cdot i_c \cdot k \frac{\partial f^2(\alpha)}{\partial \alpha}\right|_{\alpha = 0}. \qquad (17)$$

Стосовно ж оцінки енергетичних та нормативних метрологічних характеристик ПД указані коефіцієнти здебільшого визначають при $\alpha = 0$ та $i_c = 0$, тому, відповідно

$$K_{m(0)} = -\frac{1}{2} \zeta_c \cdot (r_m - \Delta m) \cdot \varphi_m^2 \cdot k \frac{\partial^2 f^2(\alpha)}{\partial \alpha^2}; \qquad (18)$$

$$K_{i(0)} = \frac{r_{mc}}{c + r_c} \cdot \varphi_m \cdot \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha}. \qquad (19)$$

З (18) і (19) витікає, що параметрична лінійність коефіцієнтів $K_m(0)$ і $K_i(0)$ може бути забезпечена лише при незалежності магнітного опору *с* від величини потоку φ_c, тобто - при ненасиченому стані феромагнітних ділянок кола керування. А оскільки введення у це коло додаткових лінійних магнітних опорів практично неможливе з огляду на особливості конструкції ПД з гребінцевими зонами (та й недоцільне з енергетичної точки зору), то вимушено забезпечується умова $c \to 0$. При цьому

$$\zeta_c = \frac{c+\Delta c}{c+r_c} \to \frac{\Delta c}{r_c} = \frac{k_c}{k}\,; \qquad (20)$$

$$\xi_c = \frac{r_c - \Delta c}{c+r_c} \quad \to \quad 1 - \frac{\Delta c}{r_c} = 1 - \frac{k_c}{k} = 1 - \zeta_c\,. \qquad (21)$$

Відповідно до [3] (20) і (21) запишемо

$$\zeta_c = \frac{k_c}{k} = \frac{1}{k}\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2; \quad \xi_c = 1 - \frac{1}{k}\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2. \qquad (22)$$

Оскільки при цьому варіанті внаслідок k_m=0 Δm=0, то

$$\zeta_m = \xi_m = \frac{r_m}{m + r_m} = \frac{1}{1+m^*}\,. \qquad (23)$$

Перепишемо вираз (12) для дисиметричних гребінцевих зон стосовно цього варіанту з врахуванням

$$\zeta_m \cdot \zeta_c \cdot k = \frac{1}{1+m^*}\cdot\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2;$$

$$r_{mc} = \frac{2}{\lambda_0\sigma}\cdot\frac{1}{2}\left(\frac{q}{s+q} + \frac{t}{n+t}\right);$$

$$\zeta_c(r_m - \Delta m)\cdot k = \frac{2}{\lambda_0\sigma}\cdot\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2;$$

$$\zeta_m(r_c - \Delta c)\cdot k = \frac{2}{\lambda_0\sigma}\cdot\frac{1}{1+m^*}\cdot\frac{\sigma^2}{4\cdot(s+q)(n+t)}\cdot\left(k - \left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2\right) =$$

$$= \frac{2}{\lambda_0\sigma}\cdot\frac{1}{1+m^*}\cdot\frac{\left(q\frac{n+t}{s+q} + t\frac{s+q}{n+t}\right)^2}{4\cdot(s+q)(n+t)},$$

внаслідок чого отримаємо

$$M = \frac{\varphi_m^2}{\lambda_0\sigma}\cdot\left(\left(\frac{q}{s+q} + \frac{t}{n+t}\right)\cdot\left(1 + \frac{3}{1+m^*}\cdot\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2\cdot f^2(\alpha)\right)\times\right.$$

$$\times\varphi_c^*\cdot\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha} - \frac{\partial f^2(\alpha)}{\partial\alpha}\times$$

$$\left.\times\left(\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2 + \frac{1}{1+m^*}\cdot\frac{\left(q\frac{n+t}{s+q} + t\frac{s+q}{n+t}\right)^2}{4\cdot(s+q)(n+t)}\cdot\varphi_c^{*2}\right)\right), \qquad (24)$$

де $\varphi_c^* = \dfrac{\varphi_c}{\varphi_m}$ − відносна величина потоку керування, виражена у частках потоку поляризації при нейтральному положенні ротора.

Відповідно до (24) коефіцієнти жорсткості "магнітної пружини" та крутизна моментної характеристики набувають вигляд

$$K_m = -\left(\frac{t-q}{\sigma}\right)^2\cdot\frac{\varphi_m^2}{\lambda_0\sigma}\cdot\frac{\partial^2 f^2(\alpha)}{\partial\alpha^2}; \qquad (25)$$

$$K_i = \left(\frac{q}{s+q} + \frac{t}{n+t}\right)\cdot\frac{\varphi_m{}^2}{\lambda_0\sigma}\cdot\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha}\,. \qquad (26)$$

Аналіз (25) і (26) дозволяє зробити висновки про вплив структури гребінцевих зон на параметри статичної характеристики ненасиченого ПД ($c \to 0$):

− нелінійність нормованого коефіцієнта жорсткості "магнітної пружини" визначається лише властивостями другої похідної від квадрату функції $f(\alpha)$;

− нелінійність нормованого коефіцієнта крутизни моментної характеристики визначається лише властивостями першої похідної від функції $f(\alpha)$;

− при рівних інших умовах коефіцієнт жорсткості "магнітної пружини" пропорційний квадрату відношення $\dfrac{t-q}{s+n+t+q}$;

− при рівних інших умовах коефіцієнт крутизни моментної характеристики пропорційний величині $\left(\dfrac{q}{s+q} + \dfrac{t}{n+t}\right)$.

Два останніх висновки свідчать - наявність у гребінцевих структурах зон із пасивними зубцями, магнітна провідність яких не залежить від координати α, призводить до зменшення обох коефіцієнтів, а значить - їхнє виконання з практичної точки зору не доцільне. Ефективність використання активного об'єму повітряних проміжків буде найкращою при n=0 і s=0. При цьому узагальнена статична характеристика й вираз для її коефіцієнтів мають вигляд

$$M = \frac{2\varphi_m^2}{\lambda_0(t+q)}\cdot\left(\left(1 + \frac{3}{1+m^*}\cdot\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2\cdot f^2(\alpha)\right)\cdot\varphi_c^* - \right.$$

$$\left. - \left(\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2 + \frac{1}{1+m^*}\cdot\frac{(t+q)^2}{4qt}\cdot\varphi_c^*\right)\cdot\varphi_c^{*2}\cdot f(\alpha)\right)\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha}; \qquad (27)$$

$$K_m = -\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2\cdot\frac{\varphi_{\mathrm{m}}^2}{\lambda_0(t+q)}\cdot\frac{\partial^2 f^2(\alpha)}{\partial\alpha^2}; \qquad (28)$$

$$K_i = \frac{2\varphi_{\mathrm{m}}{}^2}{\lambda_0(t+q)}\cdot\frac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha}\,. \qquad (29)$$

Як випливає з (27) − (29), оптимальною функцією $f(\alpha)$ з точки зору забезпечення лінійності статичної характеристики та її коефіцієнтів є лінійна функція, для якої $\dfrac{\partial f(\alpha)}{\partial\alpha} = \mathrm{const}$ і $\dfrac{\partial f^2(\alpha)}{\partial\alpha} \equiv \alpha$. Для прийнятої конфігурації зубцевих зон у широкому діапазоні зміни геометричного параметра $\rho = \dfrac{R}{\delta}\beta$ з достатньою для інженерних розрахунків точністю функція $f(\alpha)$ може бути апроксимована виразом $f(\alpha)=\frac{\chi}{\beta}\alpha$, де R - радіус розточки ПД; δ – величина повітряного проміжку; $\chi=f(\rho)$ - коефіцієнт глибини модуляції магнітної провідності зубця (χ <1), а β - чверть зубцевої поділки у кутових одиницях.

Підставивши значення похідних у (27), отримаємо

$$M=\frac{2\varphi_m^2}{\lambda_0(t+q)}\cdot\frac{\chi}{\beta}\left(\left(1+\frac{3}{1+m^*}\cdot\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2\cdot\alpha^{*2}\right)\cdot\varphi_c^*-\right.$$
$$\left.-\left(\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2+\frac{1}{1+m^*}\cdot\frac{(t+q)^2}{4qt}\cdot\varphi_c^{*2}\right)\cdot\alpha^*\right), \quad (29)$$

де $\alpha^*=\frac{\chi}{\beta}\alpha$ - безрозмірний кут повороту $\left(\left|\alpha^*\right|<1\right)$.

Вираз (29) дає можливість оцінити необхідну величину потоку керування $\varphi_{c\max}^*$, який би забезпечував максимальну величину кута повороту $\alpha_{\max}^*$ при M=0 як

$$\varphi_{c\max}^*\le\left(\frac{t-q}{t+q}\right)^2\cdot\alpha_{\max}^*. \quad (30)$$

ВИСНОВКИ

Досліджено можливість суттєвого впливу на статичну характеристику і її параметри та уникнення нульової жорсткості "магнітної пружини" ПД з гребінцевими зонами не за допомогою введення у коло керування додаткового магнітного опору, а за рахунок внесення дисиметрії взаємної зміни магнітних провідностей гребінцевих зон. Це здійснено шляхом організації на полюсах постійного магніту зон, провідність яких не залежить від кута повороту в межах його робочих переміщень, при збереженні загального характеру залежностей магнітних провідностей гребінцевих зон.

Розроблена математична модель магнітного кола ПД з гребінцевими зонами дозволяє врахувати кількісно вплив такої дисиметрії і з достатньою точністю розраховувати їхні статичні характеристики на етапі проектних робіт.

Установлено залежності, які є основою методики вибору головних розмірів ПД з гребінцевими зонами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Харчишин Б.М. Синтез генетично модифікованих конструкцій магнітоелектричних перетворювачів // Електротехніка і електромеханіка. – 2003, № 4. – С. 83-86.
2. Харчишин Б.М. Розроблення та дослідження нових конструкцій електромеханічних перетворювачів для пневмо-гідропідсилювачів: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.01 / Богдан Михайлович Харчишин; НУ "Львівська політехніка" − Львів, 2003 − 19 с.
3. Завгородній В.Д., Харчишин Б.М. Математична модель гребінцевих зон магнітоелектричних перетворювачів та їх параметрів. Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Національного університету "Львівська політехніка" - Вип. 400. -2000. - С.43 - 48.
4. Харчишин Б.М., Черніков В.І. Вплив дисиметризації структури гребінцевих зон на енергетичні показники магнітоелектричних перетворювачів гідропідсилювачів. // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник НУ "Львівська політехніка". Вип. 563. 2006. – С. 140-144.

Надійшла 01.04.2009

Харчишин Богдан Михайлович, к.т.н., п.н.с.
Національний університет "Львівська політехніка"
Україна, 79000, Львів, вул. Ак. Колесси, 2, СКБ ЕМС
тел./факс (032)258-24-41, тел. (032)258-24-31,
e-mail: snt68@polynet.lviv.ua