

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ТА МОМЕНТУ ТОРЦЕВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ІНДУКТОРНОГО ТИПУ

В статті проведено аналіз різних підходів до визначення величини електрорушійної провідника та електромагнітного моменту, що діє на провідник, для торцевого двигуна постійного струму індукторного типу з врахуванням різної величини магнітної індукції в робочому повітряному проміжку по довжині провідника обмотки якоря при насиченій магнітній системі. Доведено, що розрахунок цих величин можна проводити за середніми значеннями магнітної індукції в робочому повітряному зазорі та швидкості руху провідника обмотки якоря.

Ключові слова: реакція якоря, машина постійного струму, магнітне поле, електрорушійна сила.

V.D. KOSENKOV, L.V. SKUBIY

Khmelnytsky National University

V.V. BULHAR, D.A. IVLEV

Odessa National Polytechnic University

## DEFINITION OF ELECTROMOTIVE FORCE AND THE MOMENT OF THE END DC MOTOR OF THE INDUCTOR TYPE

The article analyzes different approaches to the determination of the electromotive force of the conductor and the electromagnetic torque acting on the mechanical drive for DC motor inductor type, taking into account different sizes of magnetic induction in the working air gap to leader distance percent anchor with saturated magnetic system. It is shown that the calculation of these quantities can be done, we average the values of the magnetic induction in the air gap and the working speed of the wire armature winding.

Key words: reaction anchor, car DC magnetic field, electromotive force.

### Постановка проблеми

Останнім часом розроблені електричні машини постійного струму, в яких магнітна система створена з великим магнітним опором на шляху замикання поля поперечної реакції якоря, що дозволяє звести величину робочого повітряного проміжку  $\delta$  до технологічного і суттєво зменшити магніторушійну силу (МРС) обмотки збудження та збільшити перевантажувальну здатність машини постійного струму. Так для лінійного варіанту двигуна постійного струму запропонована конструкція магнітопроводу індуктора [1], що представлена на рис. 1.

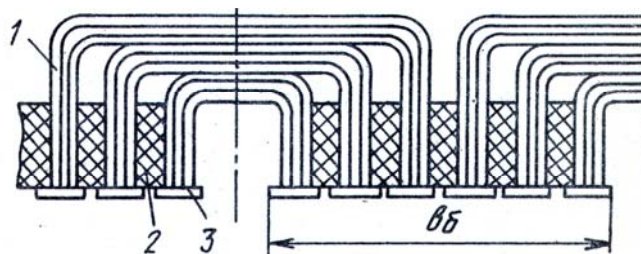


Рис. 1. Індуктор лінійної машини постійного струму [1]

На рис. 1 позначено: 1 – індуктор лінійної машини постійного струму, який набраний з окремих феромагнітних пластин; 2 – окремих феромагнітних пластин; 3 – неферомагнітні прокладки; 3 – суцільні феромагнітні накладки, що служать для більш рівномірного розподілу магнітного поля в робочому повітряному проміжку;  $b_s$  – величина полюсної дуги.

Для циліндричного варіанту лінійного двигуна постійного струму запропонований магнітопровід індуктора [2], виконаний з окремих П-подібних частин, якщо дивитись на нього в осьовому перетині. При цьому також П-подібні частини розділені немагнітними проміжками на шляху замикання поля поперечної реакції якоря.

Аналогічний спосіб послаблення поперечної реакції якоря шляхом виконання індуктора, що складається з окремих частин, розділених неферомагнітним проміжком,

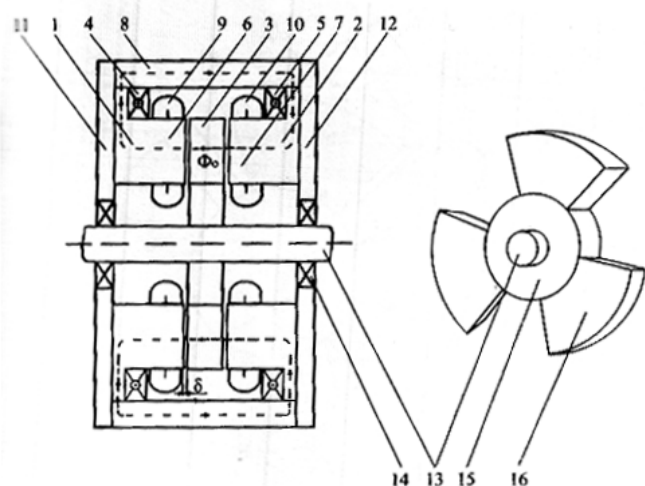


Рис. 2. Конструкція торцевого двигуна постійного струму індукторного типу [3]

використано і в обертовій машині постійного струму, описаній в [3] і показаній на рис. 2. В машині цієї конструкції обмотка збудження та обмотка якоря, тобто обмотка, в якій наводиться електрорушійна сила (ЕРС), розташовані на нерухомій частині машини, а обертаються феромагнітні зубці, що створюють однойменно полюсну систему.

На рис. 2 позначено: 1 та 2 – модулі якоря; 3 – ротор; 4 та 5 – обмотки збудження; 6 та 7 – феромагнітні зубці - стержні з'єднані між собою поперечними феромагнітними стержнями 8; 9 та 10 – обмотка якоря; 11 та 12 – торцеві немагнітні щити, що центрують вал 13 за допомогою підшипників 14; 15 – немагнітний диск ротора; 16 – феромагнітні полюси ротора. Замкнуте магнітне коло двигуна створюють феромагнітні зубці-стержні 6 та 7, поперечні феромагнітні стержні 8 та полюси 16, відокремлені від зубців-стержнів робочим повітряним проміжком  $\delta$ . На полюсне ділення  $\tau$  приходиться декілька П-подібних феромагнітних зубців-стержнів 6 та 7, розділених повітряним проміжком, в які вкладає обмотка якоря.

В представленій на рис. 2 конструкції суттєво послаблене поле поперечної реакції якоря, але її особливістю є те, що магнітна індукція в робочому повітряному проміжку  $\delta$  зменшується по активній довжині  $l_\delta$  провідника обмотки якоря у напрямку до осі машини. Цей фактор обов'язково потрібно враховувати при визначенні електрорушійної сили (ЕРС) та електромагнітного моменту ( $M_{EM}$ ) машини з урахуванням різної лінійної швидкості переміщення полюсів ротора і, як наслідок, магнітного потоку, відносно різних частин провідників обмотки якоря по їх довжині  $l_\delta$ .

Задачею дослідження є встановлення особливостей розрахунку ЕРС та  $M_{EM}$  обертової машини постійного струму торцевого типу, у якій обмотка збудження і обмотка якоря розташовані на нерухомій частині машини, а магнітопровід нерухомої частини виконаний з окремих феромагнітних П-подібних пластин, розділених повітряними проміжками.

### Основні результати

В роботі [4] розглянута задача розподілу магнітної індукції в робочому повітряному проміжку  $\delta$  для однойменно полюсного лінійного двигуна постійного струму з урахуванням насичення магнітопроводів, що характерно для конструкцій [5–7]. Результати роботи [4] можуть бути використані і для конструкції [3] з окремими П-подібними магнітопроводами. Візьмемо кінцеві результати дослідження з роботи [4]. Так, крива намагнічування сталі для ярма над зубцями апроксимована виразом:

$$H = k_1 e^{k_2 B}, \tag{1}$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля,  $A/M$ ;  $B$  – магнітна індукція, Тл;  $k_1, k_2$  – коефіцієнти, що забезпечують задовільну апроксимацію кривої намагнічування сталі.

Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку вздовж активної довжини провідника обмотки якоря  $l_\delta$  описується виразом у неявному вигляді:

$$B_x = \sqrt{\frac{k_3}{k_4} (e^{k_4 \Phi_c} + C_1)}, \tag{2}$$

У виразі (2)  $C_1$  – постійна, величину якої потрібно визначити, наприклад, з виразу (5);  $\Phi_c$  – потік ярма індуктора на ділянці  $0 \leq x \leq l_\delta$ , а коефіцієнти  $k_3, k_4$  вираховуються за формулами (3) та (4):

$$k_3 = \frac{2k_1}{\frac{\delta}{\mu_0} + \frac{t_z h_z}{\mu_z b_z} + \frac{h_B}{\mu_B}}, \tag{3}$$

$$k_4 = \frac{k_2}{h_{я1}}; \tag{4}$$

де  $t_z$  – зубцевий крок;  $h_B$  – висота виступів, що утворюють полюси;  $h_{я1}$  – розрахункова висота ярма індуктора;  $h_z$  – висота зубця;  $b_z$  – ширина зубця;  $\mu_0$  – магнітна проникливість пустоти;  $\mu_B$  – магнітна проникливість сталі виступів;  $\mu_z$  – магнітна проникливість зубця.

В нашому випадку розмір  $h_B$  – це половина товщини ротора з урахуванням симетрії магнітної системи, а розмір  $h_z$  – це довжина ділянки магнітопроводу від ярма до повітряного проміжку, а не тільки тієї частини, де розташована обмотка якоря. Позначення геометричних розмірів магнітного кола, що аналізується, показано на рис. 3.

Друга складова у знаменнику (3) враховує зміну площі при переході магнітного потоку від ярма індуктора до зубця в лінійному двигуні з обмотками якоря і індуктора на одному елементі, а в нашому випадку  $t_z = b_z$  і дорівнює товщині П-подібного магнітопроводу. Для магнітних проникностей  $\mu_B$  та  $\mu_z$  можна також

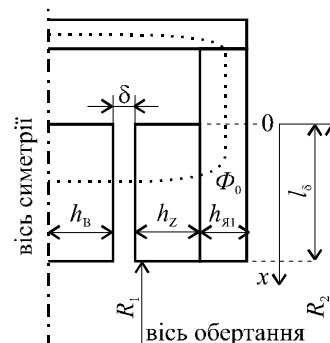


Рис. 3. Позначення геометричних розмірів магнітної системи для розрахунку [3]

скористатись рекомендаціями роботи [4], де для цих ділянок крива намагнічування апроксимована відрізками прямих (рис. 4).

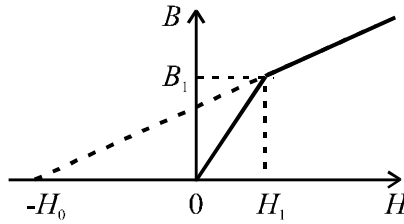


Рис. 4. Апроксимація кривої намагнічування для розрахунку

Тоді згідно з [3]

$$\mu_B = \frac{B_1}{H_1}; \quad \mu_z = \frac{B_1}{H_1 + H_0}.$$

Постійна  $C_1$  може бути визначена за формулою з роботи [4]:

$$l_\delta = \frac{1}{\sqrt{2C_1 k_3 k_4}} \ln \frac{\left(\sqrt{e^{k_4 \Phi_0} + C_1} - \sqrt{C_1}\right)^2}{e^{k_4 \Phi_0} \left(\sqrt{1 + C_1} - \sqrt{C_1}\right)^2} \quad (5)$$

шляхом підстановки декількох значень та обрання величини  $C_1$ , що задовольняє цьому виразу. В нашому випадку  $\Phi_0$  – це магнітний потік ярма одного П-подібного магнітопроводу.

В роботі [4] аналіз проводився на одиницю ширини машини, а в нашому випадку потрібно брати ширину П-подібного магнітопроводу, тобто  $b_z$ , але при діленні  $k_3$  на  $k_4$  розмір  $b_z$  скорочується і можна скористатись наведеними формулами.

Для подальшого використання цих результатів пропонується наступний підхід. Визначасмо максимальну індукцію в повітряному проміжку  $B_{\max}$ , для чого у вираз для  $B_x$  підставляємо замість змінного потоку  $\Phi_c$  величину повного потоку П-подібного магнітопроводу  $\Phi_0$ . Для визначення мінімального значення індукції підставляємо  $\Phi_c = 0$ . Далі можливі три підходи до використання цих результатів.

Перший підхід: Вважаємо, що магнітна індукція від  $B_{\max}$  до  $B_{\min}$  спадає за лінійним законом:

$$B_x = B_{\max} - \frac{B_{\max} - B_{\min}}{l_\delta} x. \quad (6)$$

Аналогічно і лінійна швидкість ділянок провідника по довжині  $l_\delta$  (рис. 4) змінюється від  $v_{\max}$  при  $x = 0$  до  $v_{\min}$  при  $x = l_\delta$ . Тоді:

$$v_x = v_{\max} - \frac{v_{\max} - v_{\min}}{l_\delta} x = \omega(R_2 - x). \quad (7)$$

Величина ЕРС одного провідника визначається інтегралом [8]:

$$e_{\text{ПР}} = \int_0^{l_\delta} B_x v_x dx, \quad (8)$$

який після підстановки (6) та (7) приводить до результату:

$$\begin{aligned} e_{\text{ПР1}} &= l_\delta \cdot \left( \frac{B_{\max} \cdot v_{\max}}{3} + \frac{B_{\min} \cdot v_{\min}}{3} + \frac{B_{\max} \cdot v_{\min}}{6} + \frac{B_{\min} \cdot v_{\max}}{6} \right) = \\ &= \omega l_\delta \cdot \left( \frac{B_{\max} \cdot R_2}{3} + \frac{B_{\min} \cdot R_1}{3} + \frac{B_{\max} \cdot R_1}{6} + \frac{B_{\min} \cdot R_2}{6} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Електромагнітний момент  $M_{EM}$ , що діє на провідник, визначимо з урахуванням зміни плеча у функції координати  $x$  за формулою:

$$R_x = R_2 - \frac{R_2 - R_1}{l_\delta} x = R_2 - x. \quad (10)$$

Тоді:

$$M_{\text{ПР1}} = I_{\text{ПР}} \int_0^{l_\delta} B_x R_x dx = I_{\text{ПР}} l_\delta \left( \frac{B_{\max} \cdot R_2}{3} + \frac{B_{\min} \cdot R_1}{3} + \frac{B_{\max} \cdot R_1}{6} + \frac{B_{\min} \cdot R_2}{6} \right). \quad (11)$$

Другий підхід: Якщо розрахунок ЕРС  $e_{\text{ПР}}$  провести за формулою:

$$e_{IP2} = B_{CP} v_{CP} l_{\delta}, \quad (12)$$

де  $B_{CP} = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{2}$ ,  $v_{CP} = \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2} = \omega \left( R_1 + \frac{l_{\delta}}{2} \right)$ , то помилка порівняно з ЕРС, вирахованою за виразом (9), складе:

$$\Delta e = \frac{l_{\delta}}{12} (B_{\max} - B_{\min}) (v_{\max} - v_{\min}) = \frac{l_{\delta}}{12} (B_{\max} - B_{\min}) \omega l_{\delta}, \quad (13)$$

Зрозуміло, що коли магнітна проникливість сталі  $\mu_{CT} = \infty$ , то  $B_{\max} = B_{\min}$  і  $\Delta e = 0$ . Помилка буде зростати зі збільшенням  $l_{\delta}$  при насиченій магнітній системі, що одночасно обумовлено і різницею між  $B_{\max}$  та  $B_{\min}$ .

Електромагнітний момент  $M_{EM}$ , що діє на провідник, також можна визначити за середнім значенням індукції:

$$M_{IP2} = B_{CP} I_{IP} l_{\delta} \left( R_1 + \frac{l_{\delta}}{2} \right). \quad (14)$$

Третій підхід: В роботі [4] наведений графік зміни магнітної індукції  $B_x$  в повітряному проміжку, який більш наближений до експоненти. В такому випадку можна використати формулу:

$$B_x = B_{\max} e^{-kx}, \quad (15)$$

в якій коефіцієнт  $k$  визначається з рівності:

$$B_{\min} = B_{\max} e^{-kl_{\delta}}. \quad (16)$$

Підстановка  $B_x$  за формулою (15) в інтегральні вирази для ЕРС та  $M_{EM}$  (8 та 11 відповідно) дає наступні результати:

$$e_{IP3} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{k^2} \omega (kR_2 - 1) + \frac{B_{\min} \cdot \omega l_{\delta}}{k}, \quad (17)$$

$$M_{IP3} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{k^2} I_{IP} (kR_2 - 1) + \frac{B_{\min} \cdot I_{IP} l_{\delta}}{k}. \quad (18)$$

Для порівняння результатів трьох підходів були проведені розрахунки ЕРС для насиченої магнітної системи з результатами розрахунку індукції в роботі [4], де при індукції в ярмі  $B_{C(x=0)} = 1,8$  Тл на довжині  $l_{\delta} = 0,12$  м отримані  $B_{\max} = 0,75$  Тл та  $B_{\min} = 0,45$  Тл. В табл. 1 наведені результати розрахунків для тихохідної машини з  $\omega = 10 c^{-1}$ , незмінними значеннями  $B_{\max}$  до  $B_{\min}$ , але різними значеннями  $l_{\delta}$ ,  $R_1$  та  $R_2$ . Відхилення у відсотках визначається порівняно з ЕРС  $e_3$ , для якої використовується розподіл  $B_x$ , більш наближений до розподілу в роботі [4].

Таблиця 1

**Результати розрахунків для тихохідної машини за різними варіантами**

ЕРС	$R_1=0,1$ м,	$l_{\delta}=0,12$ м	$R_1=0,15$ м,	$l_{\delta}=0,2$ м	$R_1=0,2$ м,	$l_{\delta}=0,3$ м
	ЕРС, В	відхилення, %	ЕРС, В	відхилення, %	ЕРС, В	відхилення, %
$e_1$	0,1188	2,1	0,3100	2,2	0,6525	2,2
$e_2$	0,1125	1,0	0,3000	1,1	0,6300	1,3
$e_3$	0,1163		0,3033		0,6384	

Дані табл. 1 показують, що відхилення ЕРС  $e_1$  та  $e_2$  досить невеликі і ці відхилення не перевищують помилку апроксимації кривої індукції  $B_x$ , при цьому менше відхилення дає застосування середніх значень  $B_{CP}$ ,  $v_{CP}$ . Таким чином, користуючись формулами з роботи [4], можна визначити індукції  $B_{\max}$  та  $B_{\min}$  і перейти до розрахунку ЕРС  $e_{IP}$  та електромагнітного моменту  $M_{IP}$  за середніми значеннями  $B_{CP}$  та  $v_{CP}$ .

Визначення повної ЕРС обмотки якоря та електромагнітного моменту машини після визначення  $e_{IP}$  та  $M_{IP}$  проводиться за звичайними формулами машин постійного струму [8] з урахуванням кількості провідників  $N$  та виконання двигуна – однойменно полюсного або різнойменно полюсного.

**Висновки**

В даній роботі проведено аналіз різних підходів до визначення величини ЕРС провідника  $e_{IP}$  та електромагнітного моменту  $M_{IP}$ , що діє на провідник, для торцевого двигуна постійного струму індукторного

типу з врахуванням різної величини магнітної індукції в робочому повітряному проміжку по дожині провідника обмотки якоря  $l_\delta$  при насиченій магнітній системі та різної швидкості обертання силових ліній магнітного потоку відносно різних частин провідника обмотки по довжині  $l_\delta$ . Доведено, що розрахунок величин  $e_{np}$  та  $M_{np}$  можна проводити за середніми значеннями магнітної індукції  $B_{CP}$  та швидкості обертання  $v_{CP}$ .

### Література

1. А.с. 1578791 СССР, МКИ Н 02 К 1/14. Магнитопровод индуктора машины постоянного тока / В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. – № 4239677/24-07; Заявлено 25.03.87; Опубл. 15.07.90, Бюл. № 26 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 26. – С. 242.
2. Пат. № 35916 Україна, МПК Н 02 К 41/02. Индуктор цилиндричного лінійного двигуна постійного струму / Косенков В. Д., Скубий Л. В.; заявник та патентовласник ХНУ. – № u200805514; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
3. Булгар В.В. Применение двигателей постоянного тока в низкоскоростных безредукторных электроприводах / В.В. Булгар, Д.А. Ивлев. Одесса: – Труды ОНПУ. Научный и производственно – практический сборник, 2010. – Вып. 1(33) – 2(34). – С. 99-104.
4. В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. Расчет намагничивающей силы обмотки возбуждения лгнейного двигателя постоянного тока. В сб: Электромашиностроение и электрооборудование. К.: Техника, 1979, вып. 28. С. 85...89.
5. А.с. 714586 СССР, МКИ Н 02 К 1/14. Линейный электрический двигатель / А.И. Зуборовский, В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. – № 2608455/24-07; Заявлено 21.04.78; Опубл. 05.02.80, Бюл. № 5 // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 5.
6. А.с. 792516 СССР, МКИ Н 02 К 1/14. Линейный двигатель постоянного тока / А.И. Зуборовский, В.Д. Косенков, Л.В. Скубий. – № 2595239/24-07; Заявлено 29.03.78; Опубл. 30.12.80, Бюл. № 48 // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 48.
7. А.с. 951587 СССР, МКИ Н 02 К 1/14. Линейный электрический двигатель / В.Д. Косенков, Л.В. Скубий, В.Т. Беликов, А.Д. Ивлев. – № 3005031/24-07; Заявлено 17.11.80; Опубл. 18.08.82, Бюл. № 30 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 30.
8. Костенко М.П. Электрические машины: В 2-х ч. Ч.1. – Машины постоянного тока. Трансформатор. Изд. 3 – е перераб.: [Учебник для студ. высш. техн. учебн. заведений] / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с., ил.

### References

1. A.s. 1578791 SSSR, MKY N 02 K 1/14. Mahnytoprovod ynduktora mashyny' postoyannoho toka / V.D. Kosenkov, L.V. Skubyy. – # 4239677/24-07; Zayavleno 25.03.87; Opubl. 15.07.90, Byul. # 26 // Otkrytyya. Yzobre-tenyya. – 1990. – # 26. – S. 242.
2. Pat. № 35916 Ukrayina, MPK N 02 K 41/02. Induktor tsylindrychnoho liniynoho dvyhuna postiynoho strumu / Kosenkov V. D., Skubiy L. V.; zayavnyk ta patentovlasnyk KhNU. – № u200805514; zayavl. 29.04.2008; opubl. 10.10.2008, Byul. № 19.
3. Bulhar V.V. Prymenenye dvyhateley postoyannoho toka v nyzkoskorostnykh bezreduktornykh elektro-privodakh / V.V. Bulhar, D.A. Yvlev. Odessa: – Trudy ONPU. Nauchnyy y proyzvodstvenno – praktycheskyy sbor-nyk, 2010. – Vyp. 1(33) – 2(34). – S. 99-104.
4. Kosenkov V.D., L.V. Skubyy. Rasschet namahnychyvayushchey syly obmotky vzbuzhdenyya lyhneynoho dvyhatelya postoyannoho toka. V sb: E'lektromashynostroenye y e'lektrooborudovanye. K.: Tekhnyka, 1979, vyp. 28. S. 85...89.
5. A.s. 714586 SSSR, MKY N 02 K 1/14. Lyneynyy e'lektrycheskyy dvyhatel' / A.Y. Zuborovskyy, V.D. Kosenkov, L.V. Skubyy. – № 2608455/24-07; Zayavleno 21.04.78; Opubl. 05.02.80, Byul. № 5 // Otkrytyya. Yzobre-tenyya. – 1980. – № 5.
6. A.s. 792516 SSSR, MKY N 02 K 1/14. Lyneynyy dvyhatel' postoyannoho toka / A.Y. Zuborovskyy, V.D. Kosenkov, L.V. Skubyy. – № 2595239/24-07; Zayavleno 29.03.78; Opubl. 30.12.80, Byul. № 48 // Otkrytyya. Yzobre-tenyya. – 1980. – № 48.
7. A.s. 951587 SSSR, MKY N 02 K 1/14. Lyneynyy e'lektrycheskyy dvyhatel' / V.D. Kosenkov, L.V. Skubyy, V.T. Belykov, A.D. Yvlev. – № 3005031/24-07; Zayavleno 17.11.80; Opubl. 18.08.82, Byul. № 30 // Otkrytyya. Yzobretenyya. – 1982. – № 30.
8. Kostenko M.P. E'lektrycheskye mashyny: V 2-kh ch. Ch.I. – Mashyny postoyannoho toka. Transformatory. Yzd. 3 – e pererab.: [Uchebnyk dlya stud. vyssh. tekhn. uchebn. zavedenyy] / M.P. Kostenko, L.M. Pyotrovskyy. – L.: Enerhyya, 1972. – 544 s., yl.

Рецензія/Peer review : 10.7.2013 р. Надрукована/Printed :23.11.2013 р.  
Рецензент: Параска Г.Б., д.т.н., проф.