

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОНДЕНСАТОРАМИ В КОЛІ ЗБУДЖЕННЯ

В.С.Маляр, докт.техн.наук, **А.В.Маляр**, докт.техн.наук, **І.А.Добушовська**,
Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.

Запропоновано алгоритм розрахунку статичних механічних характеристик явнополюсних синхронних двигунів, в яких для підвищення пускового моменту в обмотку збудження вмикають конденсатори. Задача розв'язується як крайова для системи диференціальних рівнянь, що описують асинхронний режим роботи з урахуванням насичення магнітопроводу. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: синхронний двигун, пускові характеристики, обмотка збудження, конденсатори, електромагнітний момент.

Вступ. Для приводу потужних механізмів, які використовуються в гірничій, деревообробній і деяких інших галузях промисловості, здебільшого застосовують синхронні двигуни (СД) явнополюсної конструкції, які мають високі експлуатаційні характеристики. Необхідні динамічні властивості СД забезпечуються можливістю регулювання струму збудження, однак їхні пускові характеристики нерідко не задовольняють вимогам, які до них ставляться [1]. У зв'язку з цим для забезпечення успішного запуску в електроприводах з важкими умовами пуску здебільшого використовують двигуни завищеної потужності, що не задовольняє сучасним вимогам щодо економічності. Для покращення пускових властивостей застосовують різного роду додаткові пристрої, однак проблема покращення пускових властивостей залишається актуальною.

Суть проблеми. Як відомо, основним способом пуску є асинхронний як найбільш простий і надійний. Під час асинхронного пуску СД електромагнітний момент створюється за рахунок пускової обмотки, а обмотка збудження, яка зазвичай на час пуску закорочується на активний опір, фактично не впливає на процес пуску. В технічній літературі відомі різні шляхи покращення пускових властивостей за рахунок використання обмотки збудження, одним із яких є вмикання в обмотку збудження конденсаторів [7], що дає змогу компенсувати її значний індуктивний опір. Основною проблемою при цьому є вибір необхідного значення її ємності [1], оскільки у разі невдалого вибору можна досягти ефекту зниження пускового моменту замість підвищення. Крім того, можуть виникати небажані резонансні явища, які небезпечні для роботи двигуна. Отже існує проблема аналізу пускових режимів СД з конденсаторами в обмотці збудження.

Метою статті є викладення алгоритму розрахунку статичних характеристик СД з конденсаторами в обмотці збудження, який дозволяє досліджувати вплив величини ємності на пускові властивості.

Аналіз останніх досліджень. Проблема асинхронного пуску СД з конденсаторами в обмотці збудження з використанням заступних схем достатньо повно розглянута в роботах [1,2,6,7], у тому числі й багатоконтурних – [1]. Проте використання заступних схем для аналізу пускових режимів СД з конденсаторами в обмотці збудження не може забезпечити високої достовірності отриманих результатів, тому необхідна експериментальна перевірка розрахункових даних. Зважаючи на високу вартість натурних досліджень, важливою задачею є розроблення методів і алгоритмів, які дають змогу аналізувати роботу електроприводу в пускових режимах методами математичного моделювання і на їхній основі вибирати оптимальне значення величини ємності конденсаторів, а в разі необхідності – і закон її регулювання в процесі пуску з метою забезпечення необхідного значення не тільки пускового, але й вхідного електромагнітного моменту [5].

Оскільки явнополюсна синхронна машина є складним нелінійним об'єктом, то дослідити її роботу в асинхронному режимі з високою адекватністю можна лише на основі повної системи диференціальних рівнянь (ДР) електричної рівноваги, в якій враховується зумовлена насиченням магнітопроводу нелінійність електромагнітних зв'язків контурів. Слід зазначити, що навіть за умови постійного ковзання цю систему неможливо шляхом перетворення координат звести до алгебричної. Таким чином, усталений асинхронний режим є динамічним, причому координати режиму змінюються за періодичним

законом. Це означає, що кожному значенню ковзання відповідає сукупність періодичних залежностей координат режиму. Отже задача розрахунку статичних асинхронних характеристик полягає у розрахунку сукупності періодичних режимів (для кожного значення ковзання). Періодичні залежності координат можна отримати як результат розв'язування задачі Коші, для чого необхідно здійснити чисельне інтегрування системи ДР за деяких початкових умов аж до усталення процесу. Очевидно, що розраховувати періодичний режим на основі розв'язування еволюційної задачі неефективно, і, крім того, метод усталення практично непридатний для вирішення задач оптимізації. Розрахувати періодичні залежності координат режиму на періоді, не вдаючися до розрахунку перехідного процесу, тобто в позачасовій області, можна шляхом розв'язування двоточкової крайової задачі для системи ДР першого порядку, яка описує асинхронний режим, з періодичними крайовими умовами [3,4].

Методи розв'язування крайових задач відрізняються способом алгебризації ДР. В основу запропонованого в статті алгоритму розв'язування задачі покладено розроблений на основі апроксимації періодичних кривих сплайнами третього порядку метод чисельного аналізу періодичних режимів роботи електротехнічних пристроїв, який дає змогу не тільки розрахувати періодичні залежності координат режиму шляхом розв'язування крайової задачі, а й дослідити вплив на періодичний режим будь-якої координати або параметра [3].

Алгоритм розв'язування задачі. З метою скорочення викладу матеріалу суть алгоритму розглянемо на прикладі явнополюсного СД, пускова обмотка якого еквівалентована двома ортогональними контурами. Система ДР електричної рівноваги контурів явнополюсного СД з конденсаторами ємністю C у колі обмотки збудження, що описує асинхронний режим в осях d, q , має вигляд

$$\begin{aligned} d\psi_d/dt &= \omega_0(1-s)\psi_q - r_i i_d + u_d; & d\psi_q/dt &= -\omega_0(1-s)\psi_d - r_i i_q + u_q; \\ d\psi_D/dt &= -r_D i_D; & d\psi_Q/dt &= -r_Q i_Q; & d\psi_f/dt &= -r_f i_f + u_f, \end{aligned} \quad (1)$$

де індексами d, q, D, Q, f позначено величини, що належать до контурів статора, еквівалентних контурів пускової обмотки та збудження; $u_d = U_m \sin \theta$, $u_q = U_m \cos \theta$, де U_m – амплітудне значення фазної напруги статора, а θ – кут вибігу ротора; u_f – напруга обмотки збудження; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$; ω_0, ω – частота напруги живлення обмотки статора та кутова частота обертання ротора, рад/сек.

Якщо обмотка збудження замкнена на конденсатори ємністю C , то напруга на ній $u_f = u_c$. Отже систему ДР (1) необхідно доповнити рівнянням

$$du_c/dt = i_f / C. \quad (2)$$

Кут вибігу ротора в асинхронному режимі є неперервно змінною величиною

$$\theta = \gamma - \omega_0 t = \int \omega dt - \omega_0 t = -\omega_0 \int s dt + \gamma_0, \quad (3)$$

де γ – кут повороту ротора, а γ_0 – початкове його значення, яке можна прийняти рівним нулю.

З урахуванням (3) прикладені до контурів обмотки статора напруги визначаються за формулами $u_d = U_m \cos(\gamma - \tau)$; $u_q = U_m \sin(\gamma - \tau)$, де $\tau = \omega_0 t$.

У загальному випадку ковзання ротора непостійне, воно коливається відносно деякого серед-

нього значення $s_0 = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} s dt$, однак для більшості задач (наприклад, при великих махових масах на

валу СД) його можна вважати постійним і рівним середньому значенню.

Розглянемо задачу розрахунку періодичного процесу в асинхронному режимі роботи СД при заданому постійному ковзанні s ротора. При цьому змінні стану змінюються за періодичним законом з періодом $T_a = 2\pi / (s\omega_0)$. З метою скорочення викладення алгоритму знаходження періодичних залежностей координат режиму на періоді T_a запишемо систему, яка складається з рівнянь (1), (2), у векторній формі

$$d\bar{y}/dx = \bar{z}(\bar{y}, \bar{x}, \bar{u}), \quad (4)$$

де відповідні вектори мають такий зміст: $\bar{y} = (\bar{\psi}, u_c)^T$; $\bar{x} = (\bar{i}, u_c)^T$; $\bar{u} = (u_d, u_q, 0, 0, 0)^T$;

$\bar{\psi} = (\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q, \psi_f)^T$; $\bar{i} = (i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f)^T$; $\bar{z} = (z_1, \dots, z_m)^T$ – вектор, компонентами якого є праві частини системи (4); (верхній індекс “Т” означає транспонування).

Здійснивши сплайн-апроксимацію координат на сітці $N+1$ вузлів періоду з кроком $h = 2\pi / sN$ у відповідності з викладеним в [3], отримаємо алгебричний аналог системи (4) $m=6$ -го порядку у вигляді нелінійного алгебричного рівняння Nm -го порядку

$$S\vec{Y} - \vec{Z} = \vec{0}, \quad (5)$$

в якій: S – матриця переходу від неперервної зміни координат до їх вузлових значень шляхом апроксимації змінних кубічними сплайнами; $\vec{Y} = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N)^T$, $\vec{Z} = (\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_N)^T$ – вектори, компонентами яких є N векторів розмірності m вузлових значень відповідних змінних.

Матриця S -блочно-діагональна і складається з N однакових блоків розміром $m \times m$, елементи яких визначаються лише відстанями між вузлами [3]. Отримана в результаті апроксимації система алгебричних рівнянь (5) є дискретним аналогом нелінійної системи ДР (3). Її розв'язком є значення вектора $\vec{X} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N)^T$, який складається з векторів вузлових значень струмів контурів та напруги на конденсаторах обмотки збудження.

Для розв'язування системи (5) застосовується ітераційний метод Ньютона, який є локально збіжним, тому існує проблема отримання початкового наближення вектора невідомих. Отримати його можна методом продовження по параметру [9], суть якого полягає в дискретному нарощуванні вузлових значень прикладених напруг від нуля до заданих значень.

Матриця Якобі системи (5) має вигляд

$$J = \left(S - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{Y}} \right) \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{X}},$$

в якій відповідні похідні – це блочно-діагональні матриці вигляду

$$\frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} = \begin{matrix} \begin{matrix} x_{dd} & x_{dq} & x_{dD} & x_{dQ} & x_{df} & 0 \\ x_{qd} & x_{qq} & x_{qD} & x_{qQ} & x_{qf} & 0 \\ x_{Dd} & x_{Dq} & x_{DD} & x_{DQ} & x_{Df} & 0 \\ x_{Qd} & x_{Qq} & x_{QD} & x_{QQ} & x_{Qf} & 0 \\ x_{fd} & x_{fq} & x_{fD} & x_{fQ} & x_{ff} & 0 \\ & & & & & 1 \end{matrix} ; & \begin{matrix} -r & & & & & \\ & -r & & & & \\ & & -r_D & & & \\ & & & -r_Q & & \\ & & & & -r_f & -1 \\ & & & & & 1/C \end{matrix} ; \\ \\ \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} = \begin{matrix} & & \omega_0(1-s) & & & \\ -\omega_0(1-s) & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & \end{matrix} . \end{matrix}$$

Задача розрахунку статичних асинхронних характеристик СД при зміні ковзання від $s = s_0$ до $s = s_3$ розв'язується диференціальним методом. Для цього систему алгебричних рівнянь (5) диференціюємо по ковзання s . В результаті отримаємо систему ДР

$$J d\vec{X} / ds = \partial \vec{Z} / \partial s. \quad (6)$$

Розрахунок статичних пускових характеристик СД з конденсаторами в обмотці збудження виконується в такій послідовності. Спочатку визначаємо значення координат при заданому значенні ковзання $s = s_0 = 1,0$ шляхом розв'язування нелінійної системи алгебричних рівнянь (5). Задача розв'язується методом продовження по параметру [9] з ітераційним уточненням методом Ньютона. Значення вектора \vec{X} при $s = 1,0$ є початковими умовами для інтегрування системи ДР (6). Вважаючи вектор прикладених напруг незмінним, інтегруємо одним із чисельних методів векторне рівняння (6) по s в межах від $s = 1,0$ до $s = s_3$ за визначених з попереднього етапу початкових умов при $s = 1,0$. Значення вектора \vec{X} на кожному крокові інтегрування уточнюється за ітераційною схемою методу Ньютона згідно з формулами

$$\bar{X}^{(k+1)} = \bar{X}^{(k)} - \Delta\bar{X}^{(k)}; \quad J\Delta\bar{X}^{(k)} = \bar{Q}^{(k)}, \quad (7)$$

де $\bar{Q}^{(k)}$ – вектор нев’язок системи (5) при значенні вектора $\bar{X} = \bar{X}^{(k)}$.

До елементів матриці Якобі входять диференціальні індуктивності явнополюсного СД в осях d, q , які визначаються з урахуванням насичення магнітопроводу на основі викладених у [8] теоретичних положень. Для цього магнітопровід СД представляється розгалуженою заступною схемою, що дає змогу розрахувати криву магнітного поля в повітряному проміжку $B_\eta = B_\eta(\alpha)$ і на її основі потокозчеплення контурів та електромагнітні параметри.

У розробленому алгоритмі результатом розрахунку кожної точки статичної характеристики, яка відповідає конкретному значенню ковзання s , є сукупність кривих компонент вектора $\bar{x}_j = (i_{dj}, i_{dj}, i_{Dj}, i_{Dj}, i_{ff}, u_{cj})^T$ ($j=1, \dots, N$) на періоді T_a , які дають змогу знайти періодичні криві потокозчеплень контурів та електромагнітного моменту і обчислити їхні середні значення.

Зауважимо, що у викладеному алгоритмі система ДР електричної рівноваги з метою компактності записана для випадку еквівалентування пускової обмотки двома контурами. Врахування реальних, утворених виготовленими з різного матеріалу стержнями пускової обмотки контурів, не потребує зміни алгоритму, а лише призводить до зростання порядку системи рівнянь електричної рівноваги. Врахування витіснення струму в стержнях пускової обмотки можна здійснити за аналогією з викладеним у [4].

Запропонований підхід до розв’язування задачі аналізу пускових режимів СД з конденсаторами в обмотці збудження дає змогу дослідити поведінку двигуна (координат, що характеризують його роботу) як при зміні ковзання і незмінному значенні ємності, так і при зміні значення ємності конденсаторів і незмінному ковзанні. Розроблений алгоритм розрахунку дає змогу використовувати математичні моделі СД різної складності.

Результати розрахунку. У відповідності до викладеного алгоритму розроблено програму, за допомогою якої виконано математичні експерименти щодо розрахунку статичних пускових характеристик СД при різних значеннях ємності конденсаторів в обмотці збудження. В програмі пускова обмотка приймалась реальною, а не еквівалентною.

Для прикладу нижче наведено виражені у відносних одиницях (по відношенню до номінальних значень) залежності середнього значення електромагнітного моменту (1) та діючого значення струму обмотки статора (2) під час пуску синхронного двигуна СДНЗ-2-19-49-24 ($P=1600$ кВт, $U=6$ кВ, $I=180$ А, $I_f=230$ А, $2p=24$) при трьох різних значеннях ємності конденсаторів: $C=2,5 \mu kF$ (рис. 1); $C=41 \mu kF$ (рис. 2); $C=75 \mu kF$ (рис. 3), розраховані у відповідності з викладеним алгоритмом. Як видно з наведених кривих, величина ємності конденсаторів у пусковій обмотці мало впливає на вхідний момент, однак пусковий електромагнітний момент при її збільшенні спочатку зростає, а потім зменшується. При цьому виникають значні коливання моменту, що свідчить про появу резонансних явищ. При подальшому нарощуванні ємності конденсаторів в околі ковзання, близького до $s = 0,75$, електромагнітний момент набуває від’ємного значення.

При подальшому нарощуванні ємності конденсаторів в околі ковзання, близького до $s = 0,75$, електромагнітний момент набуває від’ємного значення.

Висновки. Запропонований алгоритм розрахунку статичних характеристик явнополюсних синхронних двигунів з конденсаторами в обмотці збудження дає змогу досліджувати вплив величини ємності на пускові властивості. В його основу покладено проекційний метод розв’язування крайової задачі на підставі апроксимації змінних стану кубічними сплайнами, що дозволяє отримати результат, не вдаючися до розрахунку перехідного процесу, тобто в позачасовій області.

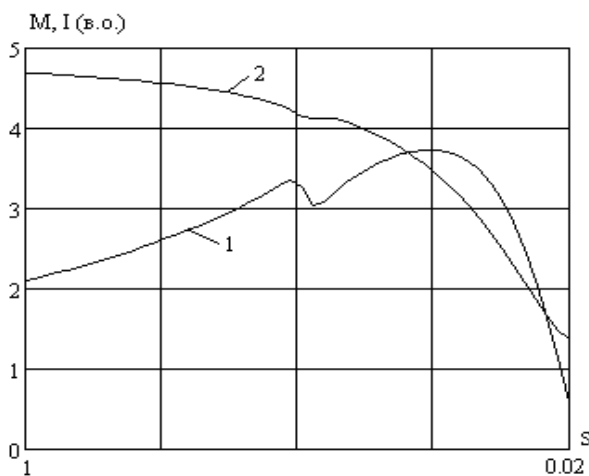


Рис. 1

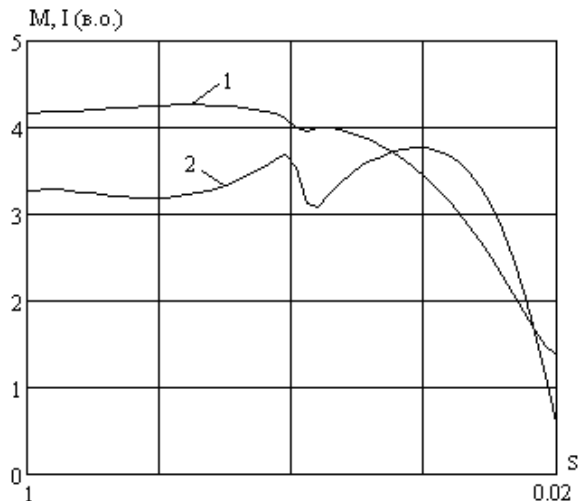


Рис. 2

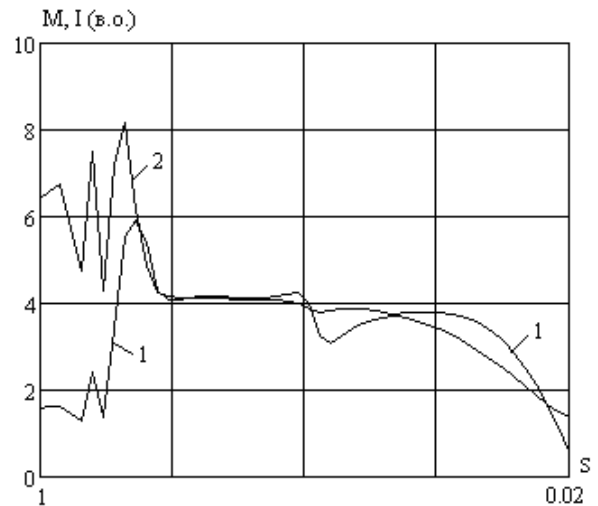


Рис. 3

1. *Бородай В.А.* Рациональні параметри і пускові властивості синхронних двигунів з важкими умовами пуску (привод гірничих машин) / автореф. дис... канд.техн.наук: спец. 05.09.01 “Електричні машини і апарати”. – Львів, 2009. – 19 с.
2. *Кириченко В.И., Бородай В.А., Яланский А.А.* Улучшение пусковых свойств крупных синхронных машин // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2003. – № 6(64). – С. 38–40.
3. *Маляр В.С., Маляр А.В.* Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств // Электронное моделирование. – 2005. – Т.27. – №3. – С. 39–53.
4. *Маляр А.В.* Динаміка електроприводу штангової нафтовидобувної установки // Техн. електродинаміка. – 2007. – № 2. – С. 50–54.
5. *Осипова С.В., Каяшев А.И.* Асинхронный пуск синхронного двигателя с максимальным входным и пусковым моментом // Известия вузов. Энергетика. – 1974. – № 8. – С. 119–121.
6. *Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А.* О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // Техн. електродинаміка. Тем. выпуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2002. – Ч. 2. – С. 62–65.
7. *Кириченко В.И., Гомілко В.С., Бородай В.А., Островський Е.П.* Про новий спосіб покращення пускових властивостей синхронних двигунів приводів млинів // Матеріали науково-технічної конференції “Проблеми автоматизованного електропривода. Теорія і практика”. – 1997. – С. 288–290.
8. *Фильц Р.В., Лябук Н.Н.* Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин. – Львов: Світ, 1991. – 176 с.
9. *Яковлев М.Н.* К решению систем нелинейных уравнений методом дифференцирования по параметру // ЖВМ и МФ. – 1964. – Т.4. – № 1. – С. 146–149.

УДК: 621.313.32

Статические характеристики синхронного двигателя с конденсаторами в цепи возбуждения

В.С.Маляр, докт.техн.наук, **А.В.Маляр**, докт.техн.наук, **И.А.Добушовская**,
Национальный университет “Львовская политехника”,
 ул. С.Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.

Предложен алгоритм расчета статических механических характеристик явнополюсных синхронных двигателей, в которых для повышения пускового момента в обмотку возбуждения включают конденсаторы. Задача решается как краевая для системы дифференциальных уравнений, которые описывают асинхронный режим работы с учетом насыщения магнитопровода. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: синхронный двигатель, пусковые характеристики, обмотка возбуждения, конденсаторы, электромагнитный момент.

Static Characteristics of Synchronous Motor with Capacitors in Excitation Circuit

V.S.Maliar, A.V.Maliar, I.A.Dobushovska,
Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera str., Lviv, 79013, Ukraine.

An efficient algorithm of computing static mechanical characteristics of salient-pole synchronous motors in which, in order to increase starting torque, capacitors are switched into excitation winding is proposed. The problem is solved as a boundary-value one for a system of differential equations describing asynchronous mode of operation, taking into account magnetic path saturation. References 9, figures 3.

Key words: synchronous motor, starting characteristics, excitation winding, capacitors, electromagnetic torque.

1. *Borodai V.A.* The substantiation of parameters and the definition for starting properties of synchronous engines for mining machines with a heavy start-up: Ph. D. thesis (Technical science). Specialty 05.09.01 "Electrical machines and devices". – National university "Lvivska politechnika", Lviv, 2009. – 19 p. (Ukr)
2. *Kirichenko V.I., Borodai V.A., Yalanskii A.A.* Improved properties of starting modes of large synchronous machines // *Visnyk Schidnoukrajinskogo natsionalnogo universytetu im. V.Dalia.* – 2003. – № 6(64). – P. 38–40. (Rus)
3. *Maliar V.S, Maliar A.V.* Mathematical simulation of periodic modes of electrotechnical appliances // *Elektronnoe modelirovanie.* – 2005. – Vol.27. – № 3. – P. 39–53. (Rus)
4. *Maliar A.V.* Dynamics of electric drive of rod oil pumping unit // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2007. – Vol. 2. – P. 50–54. (Ukr)
5. *Osipova S.V., Kaiashev A.I.* Asynchronous start a synchronous motor with maximum input and starting torque // *Izvestia vuzov. Energetika.* – 1974. – № 8. – P. 119–121. (Rus)
6. *Pivniak G.G, Kirichenko V.I., Borodai V.A.* About new direction in improvement large synchronous electric motors // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniky".* – 2002. – Vol. 2. – P. 62–65. (Rus)
7. *Kyrychenko V.I., Gomilko V.S., Borodai V.A., Ostrovskiy E.P.* The new way to improve the starting characteristics of synchronous motor drives mills // *Materialy naukovy-tekhnichnoi konferentsii "Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika".* – 1997. – P. 288–290. (Ukr)
8. *Filts R.V, Liabuk N.N.* Mathematical simulation of salient-pole synchronous motor. – Lviv: Svit, 1991. – 176 p. (Rus)
9. *Yakovlev M.N.* To the issue of solving systems of non-linear equations by means of differentiating by parameter // *Zhurnal Vychislitelnoi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki.* – 1964. – Vol.4. – № 1. – P. 146–149. (Rus)

Надійшла 12.07.2011
Received 12.07.2011