



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 63, книга 2, 2013

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2013, ФА
юбилей "50 ГОДИНИ ОБУЧЕНИЕ ПО АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОМИШЛЕНОСТТА"
14 - 16 юни 2013 г., Созопол, България



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 63, Issue 2, 2013

INTERNATIONAL CONFERENCE AUTOMATICS'2013, FA
Anniversary "50 YEARS EDUCATION IN INDUSTRIAL AUTOMATION"
June 14 - 16, 2013 , Sozopol, Bulgaria

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА

форум
„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол'2013

юбилей
“50 ГОДИНИ ОБУЧЕНИЕ ПО АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОМИШЛЕННОСТТА“

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ

АВТОМАТИКА'2013, ФА

Созопол 14.06. - 16.06.2013

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф. дтн, д.х.к. **Емил Николов**

зам. председател

проф. д-р **Тодор Йонков**

членове

чл. кор. проф.	дтн	Петко Петков
проф.	д-р	Снежана Йорданова
проф.	д-р	Валери Младенов
проф.	д-р	Емил Гарипов
проф.	д-р	Живко Георгиев
проф.	д-р	Михо Михов
проф.	д-р	Пламен Цветков
доц.	д-р	Васил Гълъбов
доц.	д-р	Снежана Терзиева

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

председател

доц. д-р **Александър Ищев**

зам. председател

гл. ас. д-р **Антония Панделова**

членове

доц.	д-р	Симона Филипова-Петракиева
доц.	д-р	Евтим Йончев
доц.	д-р	Цоньо Славов
гл. ас.	д-р	Станислав Енев

ТЕХНИЧЕСКИ КОМИТЕТ

координатор

гл. ас. д-р **Антония Панделова**

системен администратор

гл. ас. д-р **Георги Ценов**

организационен секретар

маг. инж. **Мария Духлева**

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA

FACULTY OF AUTOMATICS

Forum

„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol'2013

Anniversary

“50 YEARS EDUCATION IN INDUSTRIAL AUTOMATION“

INTERNATIONAL CONFERENCE

AUTOMATICS'2013, FA

June 14 - 16, 2013, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

chair of PC

Prof. DSc, Dh.C. **Emil Nikolov**

vice chair of PC

Prof. PhD **Todor Yonkov**

members of PC

Corresponding Member of BAS	Prof. DSc	Petko Petkov
	Prof. PhD	Snejana Yordanova
	Prof. PhD	Valeri Mladenov
	Prof. PhD	Emil Garipov
	Prof. PhD	Jivko Georgiev
	Prof. PhD	Mikho Mikhov
	Prof. PhD	Plamen Tzvetkov
	Assoc. Prof. PhD	Vassil Galabov
	Assoc. Prof. PhD	Snejana Terzieva

ORGANIZING COMMITTEE

chair of OC

Assoc. Prof. PhD **Alexandar Ichtev**

vice chair of OS

Assist. Prof. PhD **Antonia Pandelova**

members of OC

Assoc. Prof. PhD **Simona Filipova-Petrakieva**

Assoc. Prof. PhD **Evtim Jonchev**

Assoc. Prof. PhD **Tsonio Slavov**

Assist. Prof. PhD **Stanislav Enev**

TECHNICAL COMMITTEE

coordinator

Assist. Prof. PhD **Antonia Pandelova**

system administrator

Assist. Prof. PhD **Georgi Tsenov**

organizing secretary

Mag. Eng. **Maria Duhleva**

ВЪВЕЖДАНЕ НА ДОПЪЛНИТЕЛНА КООРДИНАТНА ОС ПРИ КЛАС МЕТАЛОРЕЖЕЩИ МАШИНИ С ЦИФРОВО-ПРОГРАМНО УПРАВЛЕНИЕ

Михо Михов, Марин Жилевски

Резюме: В статията са анализирани изискванията към електрозадвижването на допълнителна управляема координатна ос в един клас фрезови машини. Обсъдени са възможностите за подобряване на показателите чрез замяна на постояннотоково електрозадвижване с електрозадвижване с хибриден стъпков двигател. Управлението се осъществява в микростъпков режим. Проведените изследвания посредством моделиране и компютърно симулиране показват, че такова електрозадвижване може да подобри съответните показатели.

Ключови думи: позиционно управление, електрозадвижване с хибриден стъпков двигател, многокоординатно задвижване, фрезова машина

INTRODUCTION OF ADDITIONAL COORDINATE AXIS IN A CLASS OF MACHINE TOOLS WITH DIGITAL PROGRAM CONTROL

Mikho Mikhov, Marin Zhilevski

Abstract: Requirements to the electric drive of an additional controlled coordinate axis in a class of milling machines are analyzed in this paper. Some options for performance improvement through replacement of DC motor electric drive with hybrid step motor drive are discussed. The control is realized in microstepping mode of operation. Research by means of modeling and computer simulation shows that such type of electric drive can improve the respective performance.

Keywords: position control, electric drive with hybrid stepping motor, multi-coordinate drive, milling machine

1. Въведение

За допълнително разширяване на възможностите на един клас металорежещи машини с цифрово-програмно управление е въведена допълнителна управляема координатна ос. По този начин тези машини стават петкоординатни със следните управляеми оси: координатна ос X (1), координатна ос Y (2), координатна ос Z (3), въртливо движение на масата (4), наклон на масата (5).

В [1], [4], [5] и [6] са изследвани различни видове електрозадвижвания, които отговарят на предявените изисквания за съответните четири координатни оси и

шпиндела, като са анализирани техните показатели, с оглед практическото им приложение.

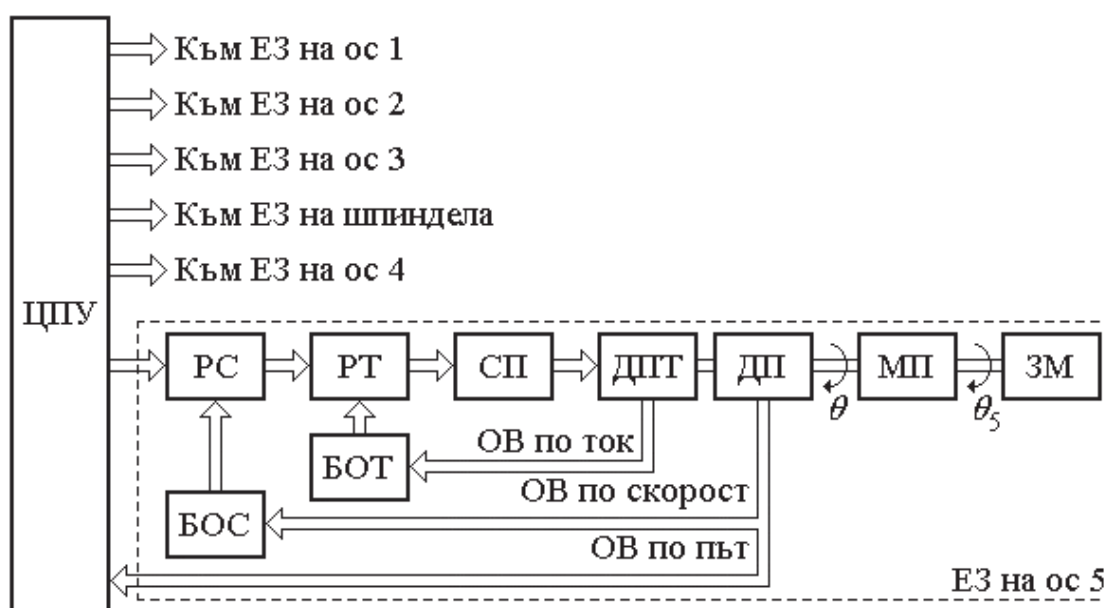
В тази статия са формулирани изискванията към електрозадвижването на въведената пета управляема координатна ос и е направен сравнителен анализ на два подходящи варианта: с двигатели за постоянен ток (ДПТ) и с хибридни стъпкови двигатели (ХСД). Показано е, че електрозадвижването с ХСД може да осигури необходимите динамични и статични показатели, отговарящи на изискванията на допълнителната ос. Същевременно, в сравнение с внедреното задвижване с ДПТ, може да се подобри надеждността, както и да се облекчи експлоатационната поддръжка, поради липсата на колекторно-четков апарат.

2. Изисквания към задвижването на допълнителната координатна ос

Разглежданите металообработващи машини се отнасят към машините с многокоординатни системи за електрозадвижване, като допълнителното движение на масата е пета регулируема координатна ос [3].

Управляваната маса може да извършва реверсивно въртливо движение (координатна ос 4) и наклон в двете посоки (координатна ос 5).

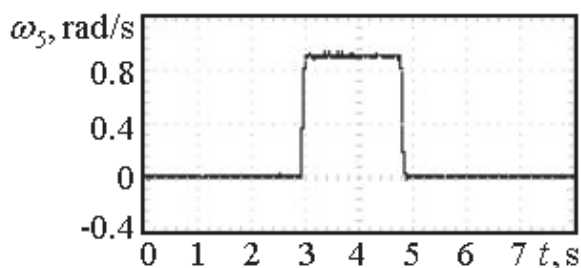
Блоковата схема на разработеното електрозадвижване с ДПТ за допълнителната координатна ос е представена на фиг. 3, където използваните означения са следните: ЦПУ – система за цифрово-програмно управление; РС – регулатор на скорост; РТ – регулатор на ток; СП – силов преобразувател; ДП – инкрементален датчик на път; МП – механична предавка; ЗМ – задвижван механизъм; θ – ъгъл на завъртане на вала на двигателя; θ_5 – ъгъл на завъртане на масата. Коефициентът на механичната предавка МП има стойност $K_{mn} = 3^0/\text{об.} = 0.0083$, с което се осигурява достатъчно висока точност на позициониране.



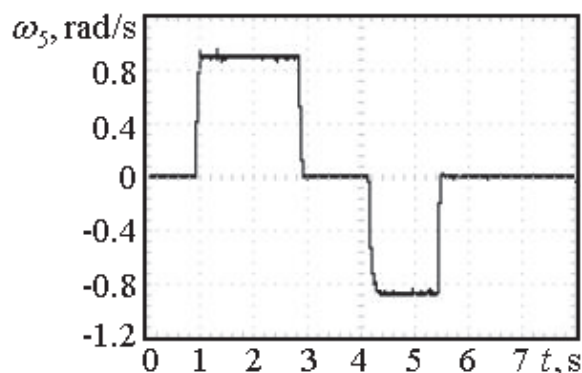
Фиг.1. Блокова схема на електрозадвижването на координатната ос 5 ДПТ.

Проведени са подробни експериментални изследвания на внедреното постоянно-токово електрозадвижване, на базата на които са анализирани възможностите

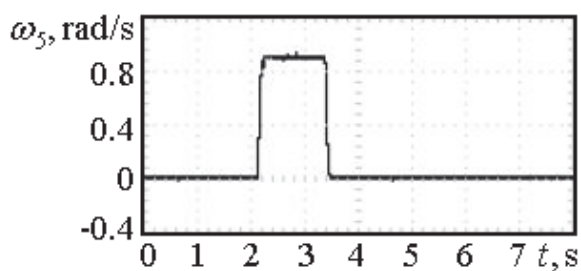
за допълнително подобряване на някои от показателите. Част от експериментално снетите траектории на движение са показани на фиг.2.



а)



в)



б)

Фиг.2. Експериментално получени осцилограми на скоростта при различни зададени наклони на масата в двете посоки:

а) $+90^{\circ}$; б) $+60^{\circ}$; в) $+90^{\circ}$ и -60° .

На фиг.2.а е представена осцилограма на скоростта $\omega_5(t)$, получена при обработване на зададено преместване от $+90^{\circ}$, за което траекторията на скоростта е триучастъкова, със зададена установена стойност. На фиг.2.б е показана осцилограма на скоростта, получена при зададено преместване от $+60^{\circ}$. На фиг.2.в е дадена траектория на движение, получена при следните зададени премествания: $+90^{\circ}$ в едната посока и -60° за наклон в обратната посока.

На базата на извършените експериментални изследвания изискванията към електрозадвижването на тази координатна ос може да се формулират по следния начин:

- позициониране със зададена точност;
- максимален пусков момент за осигуряване на високо бързодействие и добри динамични показатели;
- реверсивно управление по скорост.

В средата на MATLAB/SIMULINK са разработени модели на системи за позиционно електрозадвижване с ХСД. Те дават много добра възможност за подробни изследвания на съответните преходни и установени режими и сравнителен анализ на показателите

3. Изследване на позиционно електрозадвижване с ХСД

Хибридните стъпкови двигатели съчетават добрите качества и на реактивните двигатели и на двигателите с постоянни магнити. Разглежданията се правят за двуфазен хибриден стъпков двигател ($m=2$), управляван в микростъпков режим. При този метод на управление пълната стъпка по електронен път се дели на малки дискретни стойности:

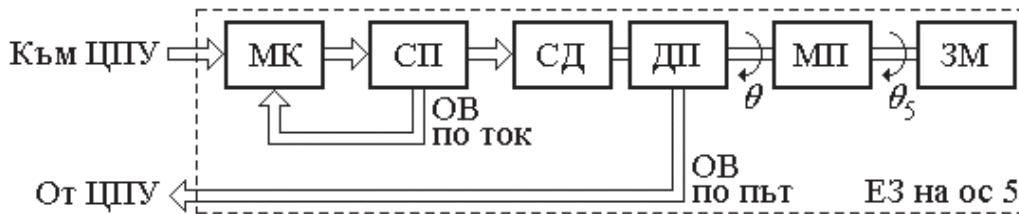
$$\alpha_{\mu} = \alpha_m / k, \quad (1)$$

където k е коефициентът на делене;

Механичната стъпка на двигателя се определя по следното уравнение:

$$\alpha_m = 2\pi / m_1 p, \quad (2)$$

където: m_1 е броят на тактовете на комутацията; p – броят на двойките полюси. Блоквата схема на изследваното стъпково електрозадвижване е представена на фиг.3, където използваните означения са следните: ЦПУ – система за цифрово-програмно управление; МК – микроконтролер; СП – силов преобразувател; СД – хибриден стъпков двигател; ДП – датчик на път; МП – механична предавка; ЗМ – задвижван механизъм.



Фиг.3. Блокова схема на изследваното електрозадвижване с ХСД.

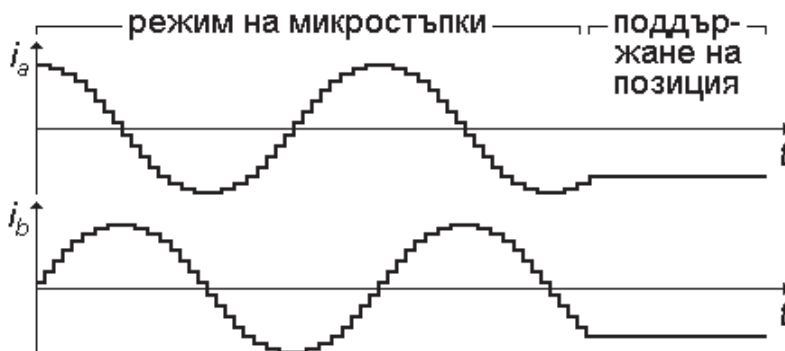
Уравненията, по които се определят нивата на токовете за съответните стъпки, са следните:

$$i_a(N_j) = I_{\text{ном}} \cos(ja_{\mu}); \quad (3)$$

$$i_b(N_j) = I_{\text{ном}} \sin(ja_{\mu}), \quad (4)$$

където: N_j е номер на микростъпката; $j = 0, 1, 2, \dots, k - 1$.

Времедиаграмите на фазните токове са представени на фиг.4.



Фиг.4. Времедиаграми на фазните токове при управление в микростъпков режим.

Резултантният статорен ток се получава от векторната сума на съответните фазни токове:

$$I = \sqrt{[I_{\text{nom}} \cos(ja_{\mu})]^2 + [I_{\text{nom}} \sin(ja_{\mu})]^2} = I_{\text{nom}}. \quad (5)$$

От уравнение (5) следва, че при управление в режим на микростъпки резултантният ток остава постоянен, равен на номиналната стойност, което осигурява равномерно движение с добро качество.

Представеният метод за изчисляване на необходимите нива на токовете е илюстриран за управление с 32 такта за един период, когато една пълна електрическа стъпка е разделена на 8 дробни стъпки. Съответните стойности на токовете в относителни единици i_a^* и i_b^* са приведени в табл. 1.

Табл. 1. Нива на токовете при управление в режим на микростъпки.

№ на такта	Фазни токове		№ на такта	Фазни токове	
	i_a^*	i_b^*		i_a^*	i_b^*
0.	1.00000	0.00000	16.	-1.00000	0.00000
1.	0.98079	0.19509	17.	-0.98079	-0.19509
2.	0.92388	0.38268	18.	-0.92388	-0.38268
3.	0.83147	0.55557	19.	-0.83147	-0.55557
4.	0.70711	0.70711	20.	-0.70711	-0.70711
5.	0.55557	0.83147	21.	-0.55557	-0.83147
6.	0.38268	0.92388	22.	-0.38268	-0.92388
7.	0.19509	0.98079	23.	-0.19509	-0.98079
8.	0.00000	1.00000	24.	0.00000	-1.00000
9.	-0.19509	0.98079	25.	0.19509	-0.98079
10.	-0.38268	0.92388	26.	0.38268	-0.92388
11.	-0.55557	0.83147	27.	0.55557	-0.83147
12.	-0.70711	0.70711	28.	0.70711	-0.70711
13.	-0.83147	0.55557	29.	0.83147	-0.55557
14.	-0.92388	0.38268	30.	0.92388	-0.38268
15.	-0.98079	0.19509	31.	0.98079	-0.19509

На фиг.5 е показана векторната диаграма за микростъпков режим, когато една пълна стъпка е разделена на 8 дробни стъпки.

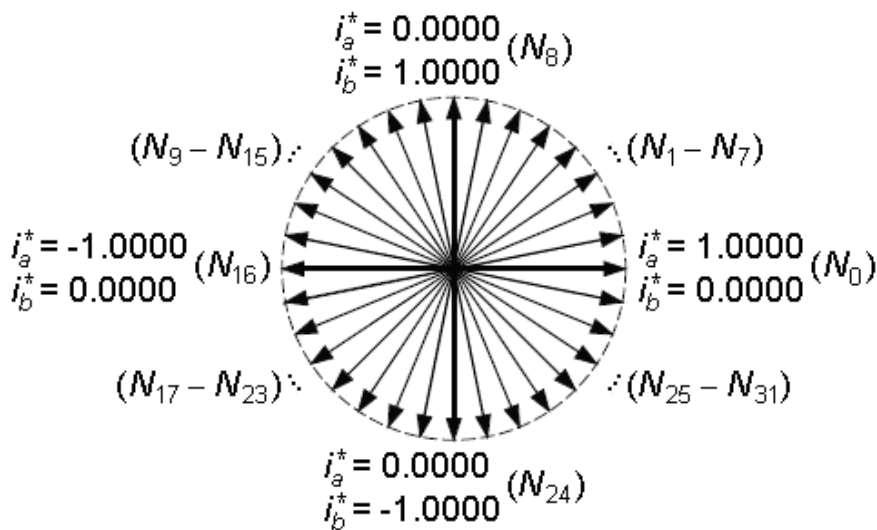
При избрана механична предавка с коефициент 120 и използван двигател с 200 пълни стъпки (по 1.8^0) на оборот, точността на позициониране в приведенния пример е следната:

$$\Delta\theta_5 = 360^0 / 120 \times 200 \times 8 = 0.001875^0 = 0.0000327 \text{ rad}. \quad (6)$$

Математическият модел в пространството на състоянието може да се представи в следния вид, подходящ за изследване посредством компютърно симулиране [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & \frac{K_M}{J} \sin(p\theta) & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{K_M}{J} \cos(p\theta) & 0 \\ -\frac{K_M}{J} \sin(p\theta) & \frac{K_M}{J} \cos(p\theta) & -\frac{C}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

където: u_a и u_b са фазните напрежения; i_a и i_b - фазните токове; R - активното съпротивление на фаза; L - индуктивността на фаза; J_Σ - приведенният сумарен инерционен момент; C - коефициентът на вискозно триене.



Фиг.5. Векторна диаграма за приложения режим на микростъпки.

При анализа на процесите в разглежданото стъпково електрозадвижване се приемат следните допускания:

а) Пренебрегва се магнитната връзка между фазите, която е незначителна при хибрирдните стъпкови двигатели.

б) Не се отчита промяната на индуктивността като функция от роторната позиция, която е несъществена при стъпковите двигатели с постоянни магнити.

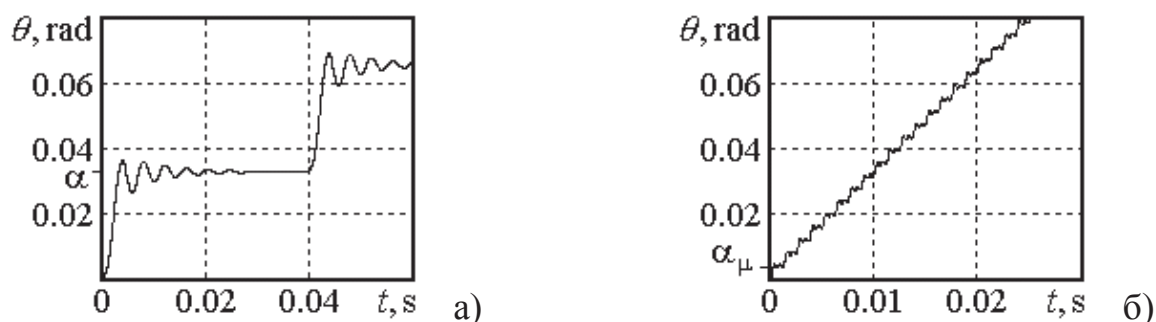
в) Пренебрегва се влиянието на зъбите върху момента, което намалява с увеличаване на честотата на управляващите импулси.

г) Не се отчита насищането при големите стойности на тока. Ефектът от насищането намалява с повишаване на скоростта, понеже токовете се ограничават поради нарастващото противоелектродвижещо напрежение.

Направените опростявания са напълно допустими за нуждите на управлението и не оказват съществено влияние върху точността на моделирането на системата. Въпреки тях обаче, моделът на разглежданото стъпково електрозадвижване е нелинеен, което се дължи на функциите синус и косинус и тяхното умножение с променливите на състоянието в (4).

Посредством моделиране и компютърно симулиране са проведени подробни изследвания на съответните режими и алгоритми на управление, на базата на които са оценени показателите на системата.

На фиг.6 са показани времедиаграми, получени съответно при движение с пълна стъпка (а) и в режим на микростъпки с делене на 8 (б).



Фиг.6. Времедиаграми при пълна стъпка (а) и при делене на 8 микростъпки (б).

Анализът на резултатите от проведените изследвания показва, че представеното електрозадвижване на допълнителната пета управляема координатна ос може да осигури необходимите статични и динамични показатели.

При практическото реализиране на представения режим на микростъпки е необходимо да се въведе отрицателна обратна връзка по ток, за да се осигурят точните стойности на фазните токове в статорните намотки [7].

Настройката на системата за управление при зададена точност на позициониране $\Delta\theta_5$ се осъществява в следната последователност:

1. Изчислява се стойността на микростъпката α_μ на базата на желаната точност на позициониране $\alpha_\mu = \Delta\theta_5 \times K_{mn}$.
2. В съответствие с уравнение (1), за получената α_μ се определя броят на микростъпките k .
3. Изчисляват се стойностите на фазните токове i_a и i_b по уравнения (3) и (4)
4. Съставя се съответната таблица, която се реализира при управлението на двигателя.

5. Заключение

При модернизацията на един клас металообработващи машини с цифрово-програмно управление е въведена допълнителна пета управляема координатна ос, с което се разширяват възможностите за прецизна обработка на по-сложни детайли и се повишава производителността.

На базата на подробни експериментални изследвания на внедрената постоянно-токова система са формулирани изискванията към задвижването на тази координатна ос. Анализирани са възможностите за подобряване на показателите чрез промяна на типа на електрозадвижването, преди всичко по отношение на надеждността и експлоатационната поддръжка.

Посредством компютърно симулиране на основните режими на работа и съответните алгоритми на управление е показано, че задвижване с хибридни стъпкови двигатели може да осигури необходимите показатели, отговарящи на поставените изисквания. Предложена е методика за практическа настройка на сис-

темата за управление, осигуряваща зададената точност на наклона на управляваната маса.

Проведените теоретични и експериментални изследвания, както и получените резултати от тях може да се използват при разработването и настройката на подобни позиционни електрозадвижвания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ – София-2013 г. по Проект № 132ПД0038-08.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михов, М., М. Жилевски, Възможности за подобряване на показателите на позиционно електрозадвижване за фрезови машини, *Годишник на Технически университет - София*, т. 62, №. 2, 269-278, София, 2012, ISSN 1311-0829.
- [2] Михов, М., *Системи за електрозадвижване*, Технически университет – София, София, 2011, ISBN 978-954-438-922-2.
- [3] Попов, Г., *Металорежещи машини, част 1: Приложимост, устройство и управление*, Технически университет – София, София, 2002, ISBN 954-438-317-4.
- [4]. Mikhov, M., M. Zhilevski, Computer Simulation and Analysis of Two-coordinate Position Electric Drive Systems, *Proceedings of the International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies*, pp. 251-254, V. Tarnovo, 2012, ISBN 978-619-167-002-4.
- [5]. Mikhov, M., M. Zhilevski, A. Spiridonov, Modeling and Performance Analysis of a Spindle Electric Drive with Adaptive Speed Control, *Journal Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 153-158, Bucharest, Romania, 2012, ISSN 2067-9238.
- [6]. Mikhov, M., M. Zhilevski, Analysis of a Multi-Coordinate Drive System Aiming at Performance Improvement, *Proceedings of the International Conference "Research and Development in Mechanical Industry"*, Vol. 2, pp. 1102-1107, Vrnjacka Banja, Serbia, 2012, ISBN 978-86-6075-037-4.
- [7] Mikhov, M., P. Nakov, Stepping Motor Drive for Precise Positioning Applications, *Proceedings of the International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies*, Vol. 1, pp. 227-230, Nish, Serbia, 2008, ISBN 978-86-85195-59-4.

Автори: Михо Рачев Михов, проф. д-р инж. - катедра „Автоматизация на електрозадвижванията”, Факултет Автоматика, Технически университет - София, E-mail address: mikhov@tu-sofia.bg; Марин Милков Жилевски, маг. инж. - катедра „Автоматизация на електрозадвижванията”, Факултет Автоматика, Технически университет - София, E-mail address: electric_zhilevski@abv.bg

Постъпила на 07.05.2013 г.

Рецензент: проф. д-р Т. Йонков