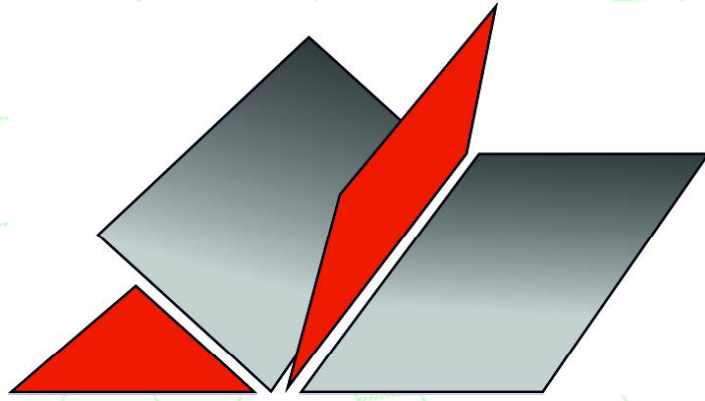


III INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE

**TECHNICS. TECHNOLOGIES.  
EDUCATION. SAFETY**

**28-29 MAY 2015, VELIKO TARNOVO. BULGARIA**

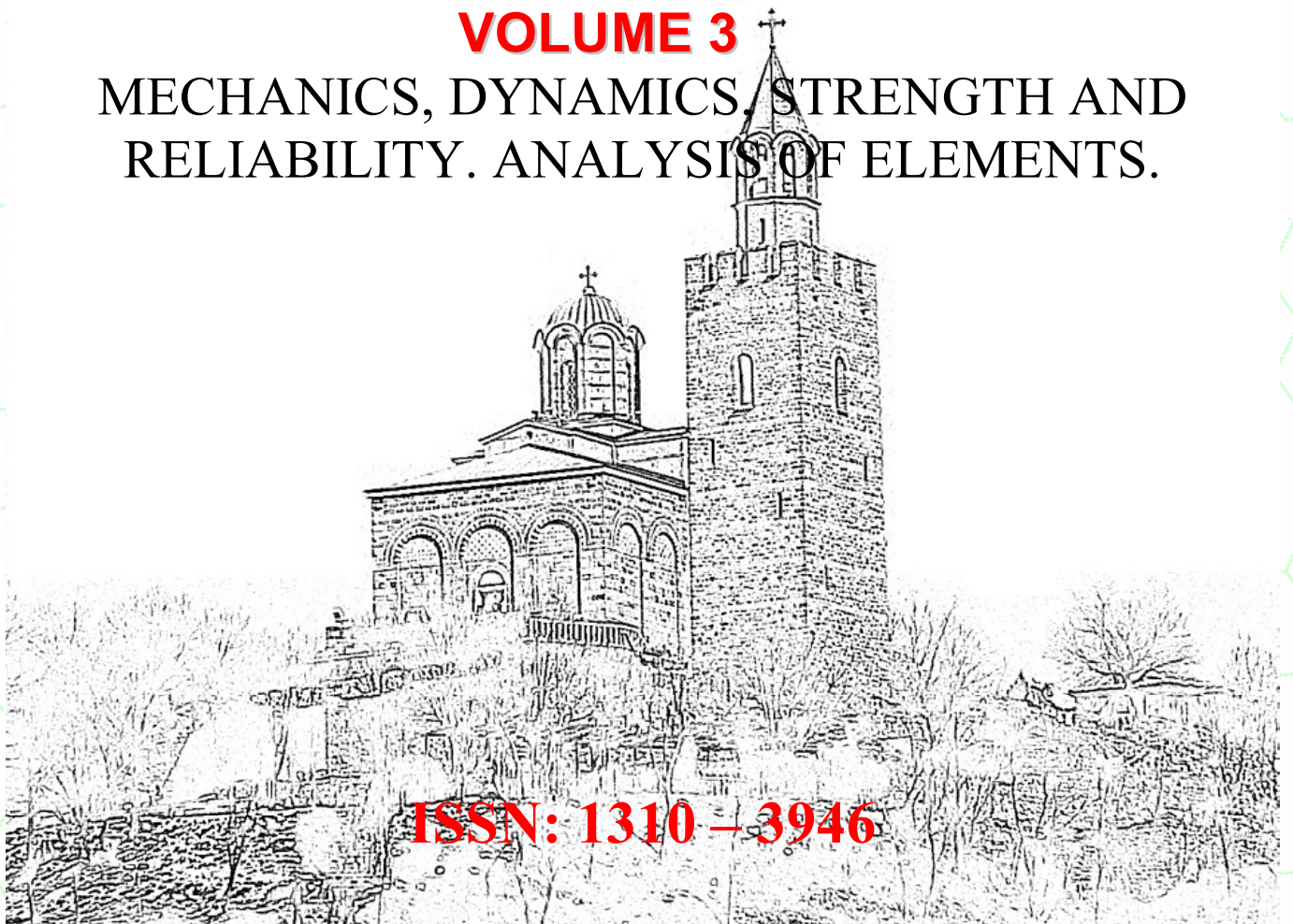
---



**PROCEEDINGS**

**VOLUME 3**

MECHANICS, DYNAMICS, STRENGTH AND  
RELIABILITY. ANALYSIS OF ELEMENTS.



**ISSN: 1310 – 3946**



# **The FEDERATION OF THE SCIENTIFIC ENGINEERING UNIONS (FSEU)**

**in Bulgaria is a professional, scientific - educational, non-governmental, non-political non-profit association of legal entities - professional organizations registered under the Law on non-profit legal entities, whose members are engineers, economists and other specialists in the field of science, technology, economy and agriculture.**

**FSEU** performed bilateral cooperation with similar organizations from many countries.

**FSEU** brings together 19 national associations - Scientific and Technical Unions / STU /, 34 territorial associations, which have more than 15 000 professionals across the country.

**FSEU** is a co-founder and member of the World Federation of Engineering Organizations (WFEO).

**FSEU** a member of the European Federation of National Engineering Associations (FEANI), and a member of the Standing Conference of engineering organizations from Southeast Europe / CO.PICEE /, Global Compact, European Young Engineers (EYE). The Federation has the exclusive right to give nominations for the European Engineer (EUR ING) title.

## **Contacts:**

**108 Rakovsky Str., Sofia 1000, Bulgaria**

**web: [www.fnts.bg](http://www.fnts.bg)**

**e-mail: [info@fnts.bg](mailto:info@fnts.bg)**



**НАУЧНИ  
ИЗВЕСТИЯ**

SCIENTIFIC TECHNICAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

YEAR XXIII

ISSUE 6 (169)

MAY 2015.

INTERNATIONAL SCIENTIFIC TECHNICAL CONFERENCE

**TECHNICS. TECHNOLOGIES.  
EDUCATION. SAFETY '15**

**PROCEEDINGS**

**VOLUME 1**

MECHANICS, DYNAMICS, STRENGTH AND  
RELIABILITY. ANALYSIS OF ELEMENTS.

**28-29 MAY, 2015  
VELIKO TARNOVO**

**Publisher:** Scientific technical union of mechanical engineering

**ISSN: 1310 – 3946**

# ПОДАВАТЕЛНО ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ШПИНДЕЛА НА ФРЕЗОВИ МАШИНИ

## FEED ELECTRIC DRIVE FOR SPINDLE OF MILLING MACHINES

### ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ ДЛЯ ШПИНДЕЛЯ ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

Маг. инж. Жилевски М., Проф. д-р инж. Михов М.  
Технически университет – София, България  
E-mail: mzhilevski@tu-sofia.bg, mikhov@tu-sofia.bg

**Abstract:** This paper examines the features of feed electric drives for spindle of a class of milling machines with digital program control. The requirements that should be met with these electric drives are formulated. Methods for compensation of the coordinate axis are presented and analyzed. Optimization of the control loops and adjustment of the respective controllers have been implemented and discussed. The research carried out and the results obtained can be used in the development of such electric drives for the studied class of machine tools.

**KEYWORDS:** MILLING MACHINES, FEED ELECTRIC DRIVE, METHODIES FOR COMPENSATION

## 1. Въведение

Подавателните електрозадвижвания се използват за позициониране на режещия инструмент и обработвания детайл на желаното място и участват в процеса на машинна обработка. По тази причина, тяхната позиционна точност и скорост влияят съществено върху качеството и производителността на металорежещите машини [1]. Към тези задвижвания се предявяват високи изисквания, които може се формулират по следния начин [2], [3]:

- широк диапазон на регулиране на скоростта;
- добри динамични показатели;
- плавно регулиране на скоростта в двете посоки;
- точност при зададени траекториите на движение;
- осигуряване на необходимият въртящ момент и други.
- бързодействие;
- сигурност;
- икономичност.

При модернизацията на един клас фрезови машини са въведени две допълнителни управляеми координатни оси [4]. В резултат на това се осигурява по-висока производителност и възможност за обработване на детайли със сложна геометрична форма, при високи изисквания за точност, успоредност и перпендикулярност. С добавянето на двете оси, машините от разглеждания клас са оборудвани с многокоординатни системи за електрозадвижване, които обслужват пет подавателни координатни оси и шпиндел.

При избора на подходяща многокоординатна система за електрозадвижване се вземат под внимание особеностите на процеса фрезование, вида на обработвания материал, параметрите на използваните инструменти и типа на механичните предавки.

Анализирани са различни варианти с двигатели за постоянен и променлив ток, като са оценени техните предимства и недостатъци. Резултати от проведените теоретични и експериментални изследванията на електрозадвижвания за съответните координатни оси и за шпиндела са представени в [5], [6], [7], [8], [9].

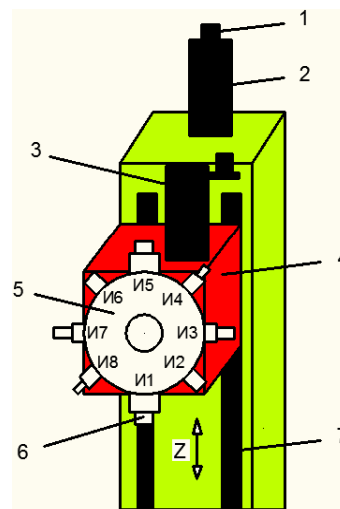
В тази статия се разглеждат особеностите на подавателното електрозадвижване за шпиндела, анализирани са различни начини за компенсиране на тази координатна ос, оптимизирани са съответните регулиращи контури и са представени резултати от проведените експериментални изследвания.

## 2. Особенности на електрозадвижването

Изследваното подавателно електрозадвижване за разглеждания клас фрезови машини се отнася за координатната ос  $z$ , която е представена на фиг. 1, заедно със свързаните с нея еле-

менти. Използваните означения са следните: 1 – датчик на път; 2 – двигател за подавателното електрозадвижване; 3 – двигател за електрозадвижването на главното движение; 4 – тяло, на което са закрепени използвания инструментален магазин и двигателя на главното електрозадвижване; 5 – инструментален магазин; 6 – шпиндел, който осъществява процеса на механична обработка; 7 – направляващи на движението по вертикалната координатна ос  $z$ .

Избраният вариант на инструментален магазин осигурява бърза смяна на инструментите и сравнително по-проста реализация на системата за главното електрозадвижване, както и липса на необходимост от допълнително ориентиране на координатна  $z$ . Този вариант за разглеждания клас фрезови машини е особено подходящ за механична обработка при кратки операции, с честа смяна на инструментите.



Фиг. 1. Координатната ос  $z$  и свързаните с нея елементи.

Представената координатна ос осъществява линейно преместване на инструмента и участва в процеса на фрезова обработка. Тя е разположена вертикално за разглеждания клас металорежещи машини и това налага допълнително компенсиране на оста и използване на фиксиращо устройство, осигуряващо стабилно състояние при липса на захранване.

Изискванията към електрозадвижването на координатната ос  $z$  може да се формулират по следния начин:

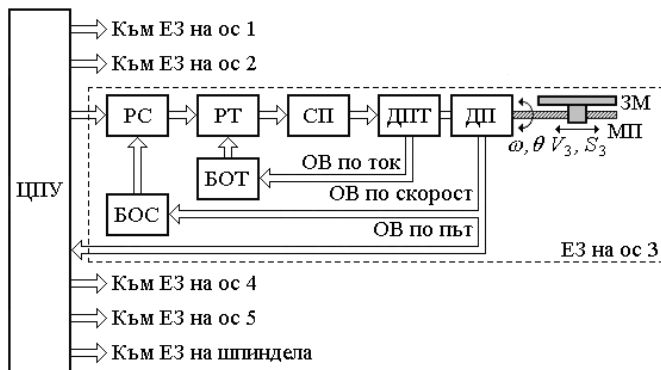
- максимален пусков момент, осигуряващ добро бързодействие;
- реверсивно управление по скорост;
- позиционна точност;
- компенсиране на координатната ос;



- необходимост от фиксиращо устройство при липса на захранване.

Блоквата схема на един от вариантите за електрозадвигване на координатна ос  $z$ , отговарящо на формулираните изисквания, е представена на фиг. 2.

Използваните означения са следните: ЦПУ – система за цифрово-програмно управление; РС – регулатор на скорост; РТ – регулатор на ток; СП – силов преобразувател; ДПТ – двигател за постоянен ток; ДП – инкрементален датчик на път; МП – механична предавка от типа сачмено-винтова двойка; ЗМ – задвижван механизъм;  $\theta$  – ъгъл на завъртане на вала на двигателя;  $S_3$  – линейно преместване по координатната ос  $z$ .



Фиг. 2. Блокова схема на електрозадвигване за ос  $z$ .

Разработването на подходящо електрозадвигване се осъществява в следната последователност:

1. Създаване на методика за избор на базата на поставените изисквания към задвижването, като се отчитат особеностите на процеса фрезване, вида на обработвания материал, параметрите на използваните инструменти и типа на механичните предавки [10, 11].
2. Провеждане на съответните изчислителни процедури по методиката.
3. Извършване на технико-икономически анализ на възможните варианти, за електрозадвигване с отчитане на каталожните данни от фирми производители [12, 13, 14].
4. Съставяне на модел на електрозадвигването за компютърно симулиране.
5. Разработване на стенд за експериментални изследвания.
6. Експериментално уточняване на параметрите, необходими за моделирането.
7. Оптимизация и настройка на регулиращите контури.
7. Провеждане на изследвания посредством компютърно симулиране при различни настройки, задаващи и смущаващи въздействия.
8. Подробни експериментални изследвания в съответните динамични и статични режими на работа за оценка на действителните показатели.

### 3. Компенсиране на координатната ос

Вертикалното разположение на координатната ос  $z$ , налага допълнителни изисквания към съответното електрозадвигване за компенсация и фиксиращо устройство, в сравнение с другите линейни подавателни оси  $x$  и  $y$ .

В табл. 1 е представен сравнителен анализ на различните варианти за компенсация, като са посочени съответните предимства и недостатъци.

Всеки от анализираните варианти за компенсация има своите особености, които трябва да бъдат отчетени при избора. Може да се направи извода, че вариантът с най-малка необходимост за поддръжка от предложените решения е чрез механична компенсация, но по този начин не може да бъде извършено прецизно и напълно компенсиране на вертикалната коор-

динатна ос. Причината за това е, че броят и оттам теглото на използваните инструменти от инструменталния магазин не е постоянна величина.

Табл. 1. Варианти за компенсация на координатна ос  $z$ .

Компенсация	Предимства	Недостатъци
механична	- липса на необходимост от по-мощна система за задвижване на координатната ос; - липса на течове; - липса на допълнителна хидравлика; - липса на конденз; - липса на компресор; - не се влияят от температурата;	- обемисти са; - необходимост от допълнителна тежест; - наличие на вериги и ролки; - износване; - невъзможност за пълна компенсация;
хидравлична	- липса на необходимост от по-мощна система за задвижване на координатната ос; - липса на конденз; - липса на компресор; - липса на механична част – ролки, верига;	- необходимост от допълнителна или по-мощна хидравлична система; - течове; - загряване на маслото и износване; - влияние от температурата;
електрическа	- липса на допълнителна хидравлика и оттам течове; - липса на конденз; - липса на компресор; - липса на механична част – ролки, верига и т.н.;	- необходимост от значително по-мощен двигател; - по мощна силова част;
пневматична	- липса на необходимост по-мощна система за задвижване на координатната ос; - липса на допълнителна хидравлика и оттам течове; - липса на механична част – ролки, верига и т.н.;	- необходимост от допълнителен мощен компресор; - наличие на конденз; - наличие на течове.

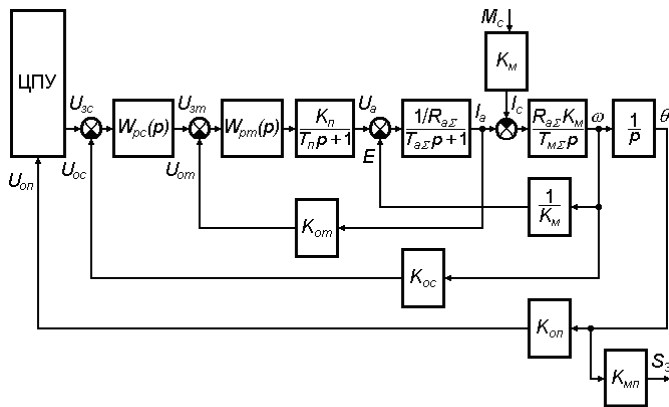
След направения преглед за наклонените координатни оси, може да се отбележи и друга характерна особеност – при липса на захранване е необходимо да бъде използвано някакво фиксиращо устройство. В повечето случаи за тази цел се използва електромагнитна спиралка, внедрена към използвания двигател, което осъществява допълнително съответното електрозадвигване, в сравнение с останалите линейни подавателни координатни оси.

### 4. Оптимизация и настройка на контурите

Структурната схема на електрозадвигването за координатната ос  $z$  е представена на фиг. 3, където използваните означения са следните:  $W_{pc}(p)$  – предавателна функция на регулатора на скорост;  $W_{pm}(p)$  – предавателна функция на регулатора на ток;  $K_n$  – коефициент на усилване на силовия преобразувател;  $T_n$  – времеконстанта на преобразувателя;  $R_{a\Sigma}$  – сумарно активно съпротивление на котвената верига;  $T_{a\Sigma}$  – сумарна електромагнитна времеконстанта на котвената верига;  $K_M$  –

предавателен коефициент на двигателя;  $T_{M\Sigma}$  – сумарна електро-механична времеконстанта;  $K_{om}$  – коефициент на обратната връзка по ток;  $K_{oc}$  – коефициент на обратната връзка по скорост;  $K_{on}$  – коефициент на обратната връзка по път;  $K_{mn}$  – коефициент на механичната предавка;  $I_a$  – ток в котвата;  $E$  – противо е.д.н.;  $I_c$  – ток, съответстващ на съпротивителния момент на товара  $M_c$ ;  $U_{om}$  – сигнал за обратна връзка по ток;  $U_{oc}$  – сигнал за обратна връзка по скорост;  $U_{on}$  – сигнал за обратна връзка по път;  $\omega$  – ъглова скорост.

Структурата на това електрозадвижение е триконтурна с подчинено регулиране на координатите. Контурите по ток и скорост са аналогови, а външният контур по път е цифров и се осъществява посредством системата за ЦПУ. Обектът на управлението по разглежданата координатна ос включва силовия преобразувател СП, двигателя за постоянен ток ДПТ, механичната предавка МП и задвижвания механизъм ЗМ (фиг. 2).



Фиг. 3. Структурна схема на електрозадвижването за ос z.

Оптимизацията по съответните критерии и настройката на регулиращите контури се осъществява последователно, като се започва с най-вътрешния контур – по котвения ток на двигателя. Компенсира се големите времеконстанти на обекта на управлението  $T_{a\Sigma}$  и  $T_{M\Sigma}$  [15].

Предавателната функция на регулатора на ток е получена в следния вид:

$$(1) \quad W_{pm}(p) = \frac{R_{a\Sigma}(T_{a\Sigma}p + 1)}{2K_n K_{om} T_{\mu m} p}$$

където:  $T_{\mu m}$  е малката времеконстанта на токовия контур, неподлежаща на компенсация.

От (1) следва, че в случая е необходим пропорционално-интегрален (ПИ) регулатор, с коефициент и времеконстантата на интегриране, които се определят по уравненията:

$$(2) \quad K_{pm} = \frac{R_{a\Sigma} T_{a\Sigma}}{K_n K_{om} a_m T_{\mu m}};$$

$$(3) \quad T_{ipm} = \frac{K_n K_{om} a_m T_{\mu m}}{R_{a\Sigma}}.$$

За предавателната функция на регулатора на скорост е получен следния израз:

$$(4) \quad W_{pc} = \frac{4T_{M\Sigma}T_{\mu c}p^2 + T_{M\Sigma}p}{8R_{a\Sigma}K_MK_{oc}T_{\mu c}p^2},$$

където:  $T_{\mu c}$  е малката времеконстанта на скоростния контур, неподлежаща на компенсация.

Уравнение (4) показва, че е необходим ПИ-регулатор с коефициент, който се изчислява по уравнението:

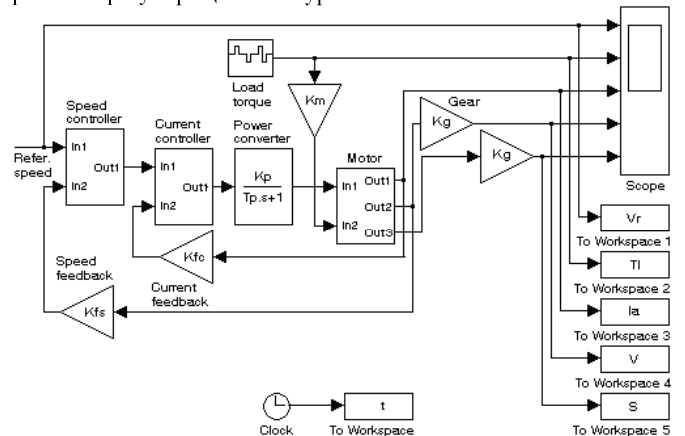
$$(5) \quad K_{pc} = \frac{T_{M\Sigma}}{2R_{a\Sigma}K_MK_{oc}T_{\mu c}K_{om}}$$

и времеконстанта на интегриране, която се изчислява в съответствие със следния израз:

$$(6) \quad T_{ipc} = \frac{8R_{a\Sigma}K_MK_{oc}T_{\mu c}^2}{K_{om}T_{M\Sigma}}.$$

В средата на MATLAB/SIMULINK са разработени модели на системи за позиционно електрозадвижение с различни двигатели за постоянен и променлив ток. Те дават много добра възможност за подробни изследвания на съответните преходни и установени режими, както и за сравнителен анализ на разглежданите варианти.

На фиг. 4 е представена схемата на един от разработените модели за компютърно симулиране на подавателни електрозадвижвания, с които са изследвани различни варианти за настройка на регулиращите контури.



Фиг. 4. Модел на подавателно електрозадвижение с ДПТ.

При този модел на входа за управляващото въздействие постъпва заданието за позицията от системата за ЦПУ (“Refer. speed”), а на входа за смущаващото въздействие се прилага натоварването на електрозадвижването (“Load torque”). За наблюдение са изведени съответните променливи, означени по следния начин: зададената линейна скорост Vr, момента на товара Tl, котвения ток Ia, линейната скорост на движение V и линейния път S.

## 5. Експериментални изследвания

За провеждане на експерименталните изследвания е разработен стенд за натоварване и изследване на електрозадвижвания, оборудван с необходимите уреди за измерване и визуализация [16].

В изследваното електрозадвижение е използван ДПТ със следните номинални данни:  $M_{nom} = 7 \text{ Nm}$ ;  $U_{nom} = 155 \text{ V}$ ;  $I_{anom} = 12.5 \text{ A}$ ;  $\omega_{nom} = 209.34 \text{ rad/s}$ .

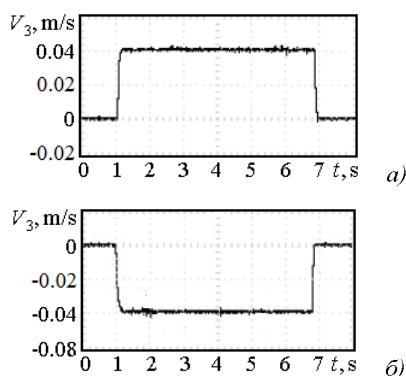
Избраната механична предавка е сачмено-винтова двойка с коефициент:  $K_{mn} = 10 \text{ mm/rev} \approx 1.6 \times 10^{-3} \text{ m/rad}$ .

Част от експериментално получените осцилограми са показани на фиг. 5.

На фиг. 5a е представена траектория на движение  $V_3(t)$  в



права посока при линейно преместване 0.24 m по координатната ос  $z$  със зададена линейна скорост  $V_{3зад} = 0.04$  m/s .



Фиг. 5. Осцилограми при движение по координатната ос  $z$ .

Времедиagramата, дадена на фиг. 5б съответства на движение по същата ос в обратната посока със зададена скорост  $V_{3зад} = -0.04$  m/s .

## 6. Заключение

Формулирани са изискванията към подавателното електрозадвижване за шпиндела на един вид фрезови машини с цифрово-програмно управление.

Анализирани са методите за компенсиране на координатната ос.

Извършена е оптимизация на регулиращите контури и настройка на съответните регулатори на използваното електрозадвижване

Осъществени са експериментални изследвания, показващи, че внедреното електрозадвижване удовлетворява поставените изисквания.

Проведените изследвания и получените резултати от тях може да се използват при разработването на електрозадвижвания за разглеждания клас металообработващи машини.

## Литература

[1] Altintas, Y., A. Verl, C. Brecher, L. Uriarte, G. Pritschow, Machine Tool Feed Drives, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, No. 2, pp. 779 -796, 2011, ISSN: 0007-8506.  
 [2] Kiel, E., *Drive Solutions*, Springer, 2008, ISBN 978-3-540-76704-6.

[3] Михов, М., *Системи за електрозадвижване*, Технически университет – София, София, 2011, ISBN 978-954-438-922-2.

[4] Михов М., М. Жилевски, Въвеждане на допълнителна координатна ос при клас металорежещи машини с цифрово-програмно управление, *Годишник на ТУ - София*, т. 63, № 2, 41-48, София, 2013, ISSN 1311-0829.

[5] M. Mikhov and M. Zhilevski, Computer simulation and analysis of two-coordinate position electric drive system, *Proceedings of the International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies*, pp. 251-254, V. Tarnovo, Bulgaria, 2012, ISBN 978-619-167-002-4.

[6] 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.

[7] M. Mikhov and 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.

[8] M. Mikhov, M. Zhilevski and 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, 2012, ISSN 2067-9238.

[9] M. Mikhov and M. Zhilevski, Performance improvement of a type of milling machines, *Proceedings of the International Conference "Research and Development in Mechanical Industry"*, Vol. 1, pp. 218-227, Kopaonik, Serbia, 2013, ISBN 978-86-6075-042-8.

[10] Sandvik Coromant, *Metalcutting Technical Guide: Turning, Milling, Drilling, Boring, Toolholding*, Sandvik, 2005.

[11] Sandvik Coromant, *Tool Selection Guide, Selected Assortment in Turning-Milling-Drilling*, Sandvik, 1997.

[12] AMKASYN, Servo Drives KE/KW, *AMK Catalogue*, 2014.

[13] DYNASYN, Servo Motors DT and DP, *AMK Catalogue*, 2014.

[14] SERVOMOTORS, *GAMA MOTORS Catalogue*, 2014.

[15] Михов М., *Системи за управление на електрозадвижванията*, Технически университет - София, София, 2007, ISBN 978-954-438-628-3.

[16] Жилевски М, М. Михов, Методика за избор на подавателни задвижвания за фрезови машини, *Годишник на Технически университет - София*, т. 64, № 1, 33-42, София, 2014, ISSN 1311-0829.