

УПРАВЛЕНИЕ НА ПОЗИЦИЯ НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ

Владимир Христов, Тодор Йонков

Резюме: Асинхронните двигатели са най-масово използваните двигатели поради редица предимства, които притежават. Навлизането на честотните инвертори, като масово използвани регулатори за управление на скоростта на асинхронните двигатели в тези системи позволява скоростта да бъде лесно управляема. В настоящата работа е представено управление на позицията на асинхронен двигател чрез векторно управление, което има възможност за реализация благодарение на вграден в инвертора plc контролер. Грешката, която се достигна е в рамките на 1%, което го прави изключително полезно като управление на позицията за редица производствени системи.

Ключови думи: асинхронен двигател, инвертор, позиция, векторно управление

POSITION CONTROL OF ASYNCHRONOUS MOTOR BY VECTOR CONTROL

Vladimir Hristov, Todor Ionkov

Summary: Asynchronous motors are the most widely-used motors due to a number of advantages they have. The introduction of frequency inverters, such as the widely used speed controllers for induction motors in these systems, allowed the speed to be easily controlled. In the present work is presented the control of the position of an induction motor by vector control, which has the possibility of realization thanks to the built-in plc controller in the inverter. The error that was reached is within 1%, which makes it extremely useful as position management for a number of production systems.

Keywords: asynchronous motor, inverter, position, vector control

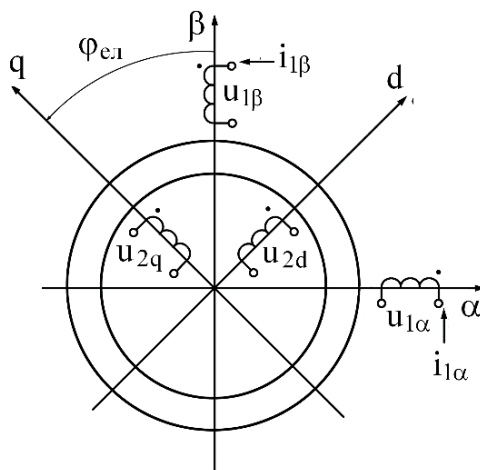
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Асинхронните двигатели са най-масово използваните двигатели в целия свят, като притежават проста конструкция и добри механични характеристики. Асинхронните двигатели са електрически машини, които работят с променливо електрическо напрежение и преобразуват електрическата енергия в механична и обратно – механичната в електрическа – посредством въртящо магнитно поле [4,5]. Основните елементи в асинхронната машина са статорът и роторът, като статорът е неподвижен и преобразува постъпващата електрическа енергия от зах-

ранващата мрежа във въртящо се магнитно поле, което се образува във въздушната междина между статора и ротора. Върху ротора, който се явява подвижната част на електрическият двигател, са разположени намотки, в които се индуцира електродвижещо напрежение, благодарение на което в роторната верига протичат токове и под влияние на тези токове и въртящото се магнитно поле се образува електромагнитен момент на вала на двигателя. Роторът се върти с честота (ω) различна от честотата на въртене на статорното поле (ω_0), от където произлиза и името на машината – асинхронна [5,6]. С развитието на честотните регулатори и масовото им навлизане в индустрията, регулирането на скоростта на асинхронния двигател стана доста евтино и достъпно. Основната регулируема величина при тях е скоростта на двигателя. Машините, работният орган на които за нормалното протичане на технологичният процес е необходимо или през отделни етапи на работата, или във всеки момент да заема в пространството строго фиксирано положение, се наричат позиционни машини [4]. Когато се налага да се използва регулиране на позицията, обикновено се използват друг тип двигатели (постояннотокови, стъпкови, безчеткови и други). В настоящата работа е предложено регулиране на позицията на асинхронен двигател посредством векторно управление, предназначено за автоматизирани производствени системи, при които се налага управление на позицията.

2. МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

Математическото описание на асинхронния двигател се представя със система от математически изрази описващи процесите в трите фази, като за да бъде по-ясно и нагледно представено описанието, се предпочита използването на двуфазния модел на описание на двигателя в $\alpha - \beta$ координатна система.



Фиг. 1. Схема на двуфазен модел на асинхронен двигател

Най-компактна форма за написване на уравненията на механичната характеристика е комплексната форма [1,2,3,4,7].

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_1 = \bar{i}_1 R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_1 \\ \bar{u}_2 = \bar{i}_2 R_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_k - \omega_{el}) \bar{\Psi}_2 \\ M = p_n L_{12} I_m (\bar{i}_1 \bar{i}_2^*) \end{array} \right. \quad (1)$$

където:

$\bar{i}_2^*$ – величина, комплексно спрегната с величината $\bar{i}_2$.

Векторите на потокосцепления се изразяват чрез резултатните вектори на токовете на статора $\bar{i}_1$ и ротора $\bar{i}_2$:

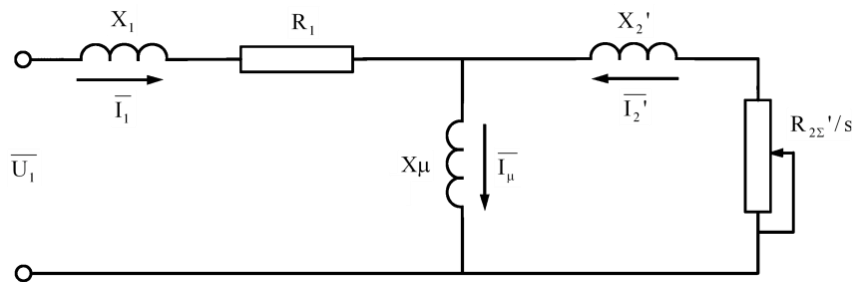
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_{12} \bar{i}_2; \\ \bar{\Psi}_2 = L_{12} \bar{i}_1 + L_2 \bar{i}_2. \end{array} \right. \quad (2)$$

Като се замести (2) в (1), се получават уравненията на механичната характеристика, изразени чрез векторите на резултатните токове на статора и ротора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + (p + j\omega_k)(L_1 \bar{i}_1 + L_{12} \bar{i}_2) \\ \bar{u}_2 = R_2 \bar{i}_2 + [p + j(\omega_k - \omega_{el})](L_{12} \bar{i}_1 + L_2 \bar{i}_2) \\ M = p_n L_{12} I_m (\bar{i}_1 \bar{i}_2^*) \end{array} \right. \quad (3)$$

където: $p = d/dt$ е оператор на Лаплас.

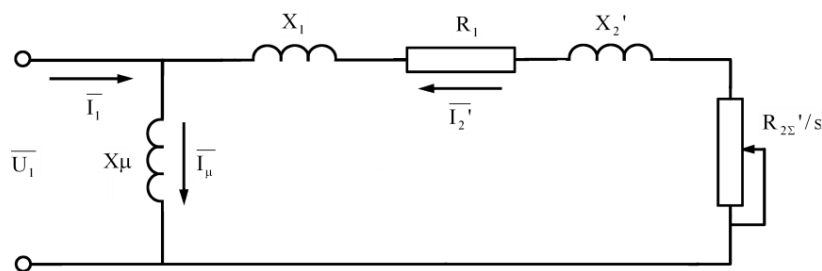
На фиг. 2 е показана заместваща Т-схема на фазата на асинхронен двигател [1,4,3,7].



Фиг. 2. Заместваща Т-схема на фазата на асинхронен двигател

При Т-заместващата схема, остава недостатък, че с промяна на натоварването на машината се променя намагнитващия ток, което не отговаря реално на протичащите процеси. Този недостатък е избегнат при Г-образната заместваща схема (фиг. 3). При нея намагнитващият контур се свързва към захранващото напрежение U_1 . Така токът през контура остава независим от натоварването, тъй като ще се определя от U_1 и пълното съпротивление на намагнитващия контур. Токът през намагнитващия контур се бележи с I_0 и се нарича ток на идеален празен ход. По големина той е равен на тока през намагнитващия контур на Т-образната заместваща схема, когато хлъзгането е нула ($s=0$) [1,2,3,4,7].

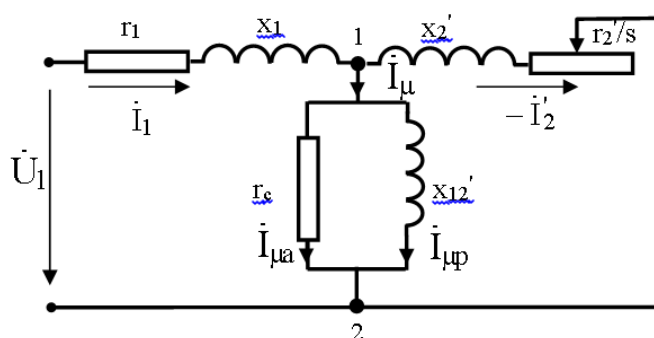
На фиг. 3 е показана заместваща Г-схема на фазата на асинхронен двигател.



Фиг. 3. Заместваща Г-схема на фазата на асинхронен двигател

Обикновено в заместващата схема загубите в стоманата на ротора не се отчитат, понеже се работи най-често с малки честоти на тока в ротора. В тези случаи се вземат предвид само загубите в стоманата на статора. Това става, като в заместващата схема паралелно на приведеното индуктивно съпротивление на взаимна индукция X_{12}' се включи активно съпротивление r_c (фиг. 4), по същия начин както това се прави при трансформаторите. При известни загуби в стоманата на статора P_{c1} , отчитащото ги в заместващата схема съпротивление r_c се определя от [1,2,3,4,7]:

$$r_c = \frac{m_1 E_1^2}{P_{c1}} \quad (4)$$



Фиг. 4. Заместваща Т-схема на асинхронна машина с отчитане на загубите в стоманата

На фиг. 5 е показана векторна диаграма на асинхронен двигател. Математичният апарат на обобщената машина позволява да се получат достатъчно просто като частен случай традиционните уравнения на електричното равновесие, заместващата схема и векторната диаграма за статичните режими на работа.

Без голяма грешка намагнитващият клон от схемата на фиг. 2 може да се изнесе на изводите на мрежовото напрежение, съответстващата на това допускане заместваща схема за една фаза на двигателя е показана на фиг. 3. Направената грешка е малка, тъй като в схемата на фиг. 3 не се отчита само влиянието на напреженовия пад в статорната намотка от намагнитващия ток I_μ върху определяния по схемата роторен ток [1,2,3,4,7].

Векторната диаграма отразява едно моментно разположение и големина на обобщените вектори на основните електромагнитни величини, движещи се в общия случай (по време на преходните процеси) с различна скорост. В този смисъл посочената диаграма се различава от векторната диаграма на АД за установен режим, отразяваща установено взаиморазположение на векторите, движещи се с една и съща скорост. На фигурата с пунктир са показани и условно първите оси на статора и ротора. Всички ъгли и скорости на въртене са отчетени спрямо неподвижната ос на статора [1,2,7].

Основните недостатъци на АД като обект на управление са: нелинейност на математическото описание; взаимосвързаност на фазните канали; векторен характер на израза за електромагнитния момент; фазните променливи са променливотокови по характер и съдържат неразличими намагнитващи и активни съставлящи [1,2,7].

За опростяване на математическото описание важен момент е подходящия избор на вида координатна система и на променливите, подлежащи на интегриране.

Уравненията (1) могат да бъдат записани само чрез две от използваните шест векторни променливи ($\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_\mu, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2, \bar{\Psi}_\mu$) или чрез техните фазни проекции [1]. Сред най-често използваните структурите (под структура се разбира математическото описание на електрическата машина в дадена координатна система, посредством определени променливи на състоянието във вид на уравнения, функционални или структурни схеми. В общия случай структурите се означават по следния начин: $\langle (\text{променливи на състоянието}) (\text{координатна система}) \rangle$ са $\langle (\bar{i}_1, \bar{i}_2)(\alpha - \beta) \rangle$ и $\langle (\bar{\Psi}_2, \bar{i}_1)(\alpha - \beta) \rangle$. Структурата $\langle (\bar{i}_1, \bar{i}_2)(\alpha - \beta) \rangle$ се получава след изключване на $\bar{i}_\mu, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2, \bar{\Psi}_\mu$ и представяне в $\alpha - \beta$ координатна система [1,2,7]:

$$\left| \begin{array}{l} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_2}{dt} \\ \bar{u}_2 = R_1 \bar{i}_2 + L_2 \frac{d\bar{i}_2}{dt} + L_{12} \frac{d\bar{i}_1}{dt} - j p_n \omega_p (L_{12} \bar{i}_1 + L_2 \bar{i}_2) \\ M_e = \frac{3}{2} p_n L_{12} I_m [\bar{i}_1 \bar{i}_2^*] \\ M_e - M_c = J \frac{d\omega_p}{dt} \end{array} \right. \quad (5)$$

Системата уравнения описващи процесите е удобна за директно получаване на токовете на двигателя, но създава неудобства при представянето ѝ в канонична форма. Поради тази причина е по-удачно да се използва структурата $\langle (\bar{\Psi}_2, \bar{i}_1)(\alpha - \beta) \rangle$, поради това при захранване само на статора ($u_2 = 0$), то системата уравнения след преобразуване ще придобият следния вид:

$$\begin{cases}
\bar{u}_1 = R_e(T_e \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \bar{i}_1) - \frac{L_{12}R_2}{L_2^2} \bar{\Psi}_2 + j \frac{L_{12}}{L_2} p_n \omega_p \bar{\Psi}_2 \\
\bar{i}_1 = \frac{1}{L_{12}} (T_2 \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + \bar{\Psi}_2) - j \frac{T_2}{L_{12}} p_n \omega_p \bar{\Psi}_2 \\
M_e = k_m I_m [\bar{\Psi}_2^* \bar{i}_1] \\
M_e - M_c = J \frac{d\omega_p}{dt}
\end{cases} \quad (6)$$

където: $R_e = R_1 + R_2 \frac{L_{12}^2}{L_2^2}$, $L_e = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2}$, $T_e = \frac{L_e}{R_e}$, $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$, $k_m = \frac{3}{2} p_n \frac{L_{12}}{L_2}$.

По-удобна е разгънатата форма на представяне на уравненията, защото по-нагледно разкрива свойствата на АД [1,2,7]:

$$\begin{cases}
u_{1\alpha} = R_e(T_e p + 1)i_{1\alpha} - \frac{L_{12}R_2}{L_2^2} \Psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} p_n \omega_p \Psi_{2\beta} \\
u_{1\beta} = R_e(T_e p + 1)i_{1\beta} - \frac{L_{12}R_2}{L_2^2} \Psi_{2\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} p_n \omega_p \Psi_{2\alpha} \\
i_{1\alpha} = \frac{1}{L_{12}} (T_2 p + 1)\Psi_{2\alpha} + \frac{T_2}{L_{12}} p_n \omega_p \Psi_{2\beta} \\
i_{1\beta} = \frac{1}{L_{12}} (T_2 p + 1)\Psi_{2\beta} - \frac{T_2}{L_{12}} p_n \omega_p \Psi_{2\alpha} \\
M_e = k_m (\Psi_{2\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} i_{1\alpha}) \\
M_e - M_c = J p \omega_p
\end{cases} \quad (7)$$

От математическото описание на асинхронния двигател и представянето му в пространствено векторната диаграма се достига до извода, че може да се осъществи управление на позицията с векторно управление при условие, че има информация за обратна връзка по позиция. Ако оста на статора от фиг. 6 бъде позиционирана, то и оста на ротора ще бъде позиционирана, т.е. ако съществува подходящо намагнитване на статора, то може да се осъществи позициониране на ротора. При този случай трябва да се има предвид, че ще има нагряване на намотките на статора и трябва да се внимава от прегряване на двигателя, тъй като при позициониране собствения вентилатор на асинхронния двигател спира да охлажда.

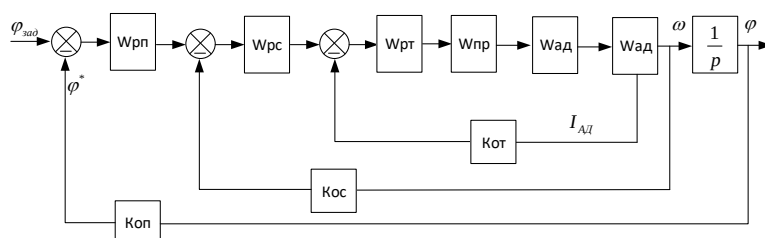
4. УПРАВЛЕНИЕ НА ПОЗИЦИЯТА НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

В редица производствени системи се налага позициониране в даден момент, поради което е удачно да има възможност за определен момент от време

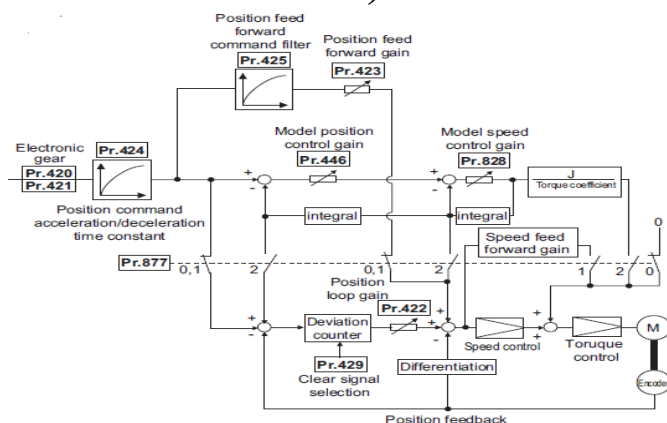
асинхронния двигател да има възможност за управление на позицията и след това да продължи да работи. На фиг. 8 е представена структурната схема на управление на позицията чрез векторно управление [8]. За управление на позицията съществува обратна връзка от енкодер, като трябва да се отбележи, че този тип управление е удачен за използване при краткотрайно време за управление. На фиг. 7 е представен инверторът Mitsubishi A800, който има вградено PLC и позволява реализиране на голям набор от управления на асинхронен двигател [8]. Използваният двигател е трифазен асинхронен двигател MOTIVE –TYPE 56B-4 с мощност $P_{nom} = 0.09 \text{ kW}$, като инверторът е за мощност $P_{nom} = 0.40 \text{ kW}$, което от своя страна допринася за по-дълго време за настройване на параметрите, тъй като при такава мощност на двигателя част от параметрите на двигателя са с пренебрежимо малки стойности [9]. Разделителната способност на енкодера използван за обратната връзка по позиция е 4096 импулса за един оборот.



Фиг. 7. Инвертор с вградено PLC управление Mitsubishi A800



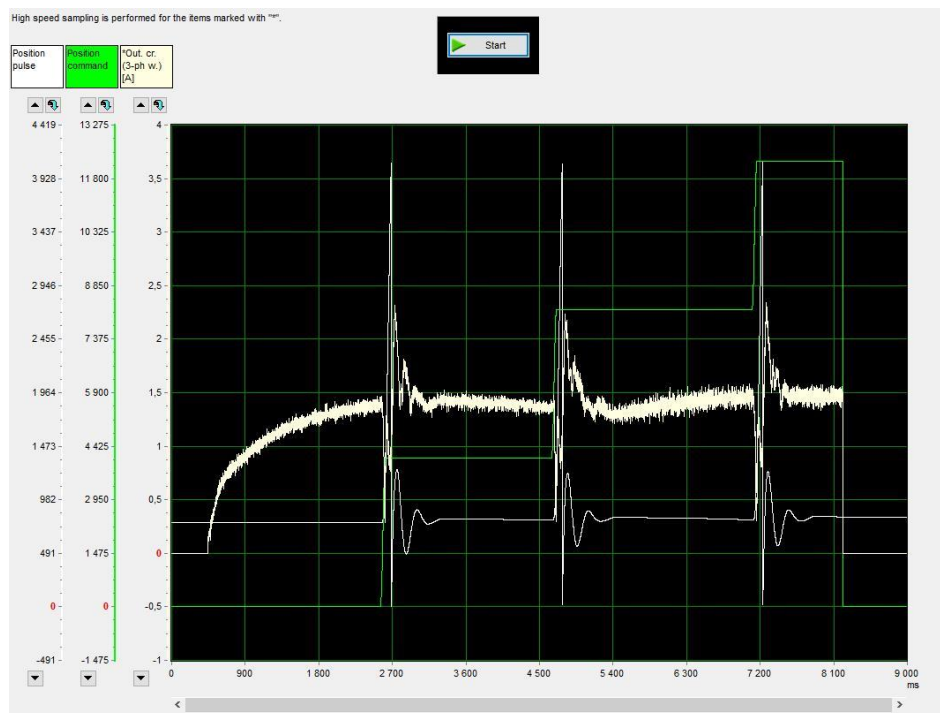
а)



б)

Фиг. 8. а) Конвенционална структурна схема за управление на позицията;
б) Структурна схема за управление на позицията на асинхронен двигател в режим на векторно управление на инвертор Mitsubishi A800

На фиг. 9 и фиг. 10 са показани експериментални резултати от направените изследвания, като с бяло е показан токът на двигателя, със зелено е показано заданието за позиция, а с последния бежов цвят е показан сигналът за отработената позиция (заданието за позиция – реалната позиция). Заданията, които се изпълняват, са за 1 оборот, т.е. 4096 импулса.



Фиг. 9. Експериментални резултати на задание за позиция, ток на статора и грешката от зададената и отработената позиция



Фиг. 10. Експериментални резултати на заданието за позиция и грешката от зададената и отработената позиция

5. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

От извършените експериментални изследвания за позициониране на асинхронен двигател с векторно управление с инвертор на Mitsubishi A800, може да се стигне до извода, че независимо от разликата в мощностите на инвертора и асинхронния двигател, като статичната грешка при позициониране е по-малка от 1%. Поради малката мощност на двигателя някои стойности на параметрите са с много малка стойност, откъдето идват закръгленията на някои параметри, а от там и по-големите нелинейности, за което е необходимо по-дълго време за фина настройване на параметрите на регулаторите. Продължителността на преходния процес (времето за установяване на позицията от времето на подаване на заданието) е 480 ms. Трябва да се съобрази, че при по-чести спирания и позиционирания чрез този метод има вероятност от прегряване на двигателя, поради което се препоръчва допълнително охлаждане.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Маринов Е., Теория на задвижването – II част, Варна, 2015
- [2] Михов М., Системи за управление на електрозадвижванията, ТУ-София, 2007
- [3] Михов М., Управление на електромеханичните системи, ТУ-София, 2000
- [4] Ключев В. И. Теория електропривода, Москва, Энергоатомиздат, 2001.
- [5] Райнов Р., Електромеханични устройства, учебник, ТУ-София, 2016
- [6] Христов Вл., Енергоефективни асинхронни електрозадвижвания, монография, ТУ-София, 2019
- [7] Ильинский Н. Ф.. Основы электропривода, Москва, Издательство МЭИ, 2003.
- [8] <https://www.vfds.com/manuals/mitsubishi/mitsubishi-a800-manual.pdf>
- [9] <https://www.switchcraft.org/learning/2016/12/16/vector-control-for-dummies>

Автори: *Владимир Христов*, доц. д-р инж.; Технически Университет-София;
Факултет Автоматика; катедра: Автоматизация на електрозадвижванията,
e-mail: vdhristov@tu-sofia.bg

Тодор Йонков, проф. д-р инж.; Технически Университет-София; Факултет Автоматика;
катедра Автоматизация на електрозадвижванията,
e-mail: tsj@tu-sofia.bg

Authors: *Assoc. prof. Dr. Vladimir Hristov*, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,
department Electrical Motion Automation Systems,
e-mail: vdhristov@tu-sofia.bg

Prof. Dr. Todor Ionkov, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,
department Electrical Motion Automation Systems,
e-mail: tsj@tu-sofia.bg