

ELABORAREA SISTEMULUI DE CONTROL VECTORIAL AL MOTORULUI ASINCRON PENTRU TRACȚIUNEA TROLEIBUZULUI

IURIE RÎMBU, VITALIE MIHALACHI, ILIE NUCA, ANDREI RÎNCĂU*

*Universitatea Tehnică a Moldovei, *ITȘ “Informbusiness”, SRL*

Abstract: *Lucrarea abordează modul de elaborare și realizarea al sistemului de control vectorial ale motorului asincron pentru tracțiunea troleibuzelor. Tratarea succesivă a modelului matematic permite stabilirea expresiilor matematice ale motorului asincron pentru controlul vectorial cu orientarea după fluxul rotor. Este adusă structura de control vectorial al motorului asincron formată din regulatoare observer al MA și controler FOC. Sistemul de control vectorial al motorului asincron de tracțiune al troleibuzului a fost implementată folosind controlere de 32 biți de uz general al firmei Fujitsu.*

Cuvinte cheie: *sistem de tracțiune, troleibuz, motor asincron, PWM, convertor static de frecvență, control vectorial, observer, controler FOC, microcontroler.*

1. Introducere

Ultimii zece ani sunt marcați de aplicarea tot mai largă a troleibuzelor cu sisteme de tracțiune în curent alternativ [2]. Această tendință este cauzată de necesitatea sporii fiabilității sistemelor și reducerii cheltuielilor de mentenanță. Întrădevăr, datorită lipsei colectorului motorul asincron este mai robust, mai simplu, mai eficient decât motorul de curent continuu. Plus la această metodele moderne de comandă ale motoarelor asincrone cu orientare după câmp permit de forma sisteme de tracțiune eficiente și robuste, cu caracteristici mecanice de reglare similare tracțiunii de curent continuu.

Principiul reglării mașinilor de curent alternativ cu orientare după câmp (Field Orientated Control - FOC) sau altă denumire – controlul vectorial (Vector Control) este bazat pe orientarea vectorului fluxului de control pe una din axele ale sistemului ortogonal de referință și prin alimentarea respectivă a statorului se menține poziția perpendiculară a curentului statoric activ față de fluxul de control [3-5]. Deoarece în acest caz componenta ortogonală a fluxului de referință este nulă, cuplul electromagnetic al motorului asincron tot timpul va avea valoarea maximă analogic motorului de curent continuu compensat. Suplimentar, controlul vectorial permite de a realiza separat o ramură de control pentru mărimi electromagnetice (fluxul magnetic) și alta pentru mărimi mecanice (cuplul și viteza), ambele în curent continuu.

Pentru realizarea sistemului de tracțiune al troleibuzului cu control vectorial se cere tratatrea sistemică a motorului asincron, convertorului electronic de putere și a echipamentului de comandă. Algoritmii de control vectorial presupune utilizarea modelului matematic al motorului asincron, transformări de axe și coordonate și necesită un microprocesor cu performanțe respective de realizare.

Scopul lucrării constă în elaborarea și implementarea algoritmului de control vectorial al echipamentului electronic necesar sistemului de propulsie al troleibuzului cu motor asincron. Elaborarea acestui echipament a fost inițiată la solicitarea mai multor producători de troleibuze din Rusia și Ucraina cu care firma „Informbusiness” SRL din Chișinău colaborează de mai mulți ani în domeniului sistemelor de tracțiune de curent continuu [1,2].

2. Modelul matematic al motorului asincron cu orientare după fluxul rotor

Sistemele de reglare cu orientare după câmp implicit conțin în structura lor și modelul matematic al motorului asincron. Din aceste considerente elaborarea și realizarea sistemului de control vectorial al motorului asincron de tracțiune a troleibuzului poate fi doar la examinarea succesive a modelului general al mașinii respective de unde în baza principiul de control respectiv se vor obține ecuațiile matematice ale mașinii cu orientare după câmp.

Într-un sistem de axe unic (referențial) modelul matematic (MM) al mașinii asincrone trifazate (MA) reprezintă o mașină bifazată echivalentă idealizată cu câte două înfășurări ortogonale pe stator și rotor

reciproc nemișcate [6]. În referențialul general $d\lambda$ - $q\lambda$ (fig.1) care învârteste cu viteza unghiulară $\omega_\lambda = d\lambda/dt$ modelul matematic este format din ecuațiile fazoriale ale tensiunilor statorice și rotorice (1), ecuațiile fazoriale ale fluxurilor (2) și ecuația fundamentală de mișcare (3):

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{s\lambda} &= R_s \underline{i}_{s\lambda} + \frac{d\Psi_{s\lambda}}{dt} + j\omega_\lambda \Psi_{s\lambda} \\ 0 &= R_r \underline{i}_{r\lambda} + \frac{d\Psi_{r\lambda}}{dt} + j(\omega_\lambda - \omega) \Psi_{r\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s\lambda} &= L_s \underline{i}_{s\lambda} + L_m \underline{i}_{r\lambda} \\ \Psi_{r\lambda} &= L_m \underline{i}_{s\lambda} + L_r \underline{i}_{r\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_s \quad (3)$$

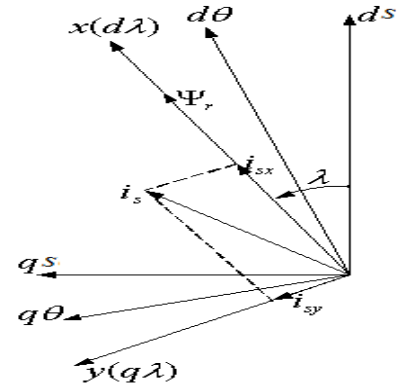


Fig.1. Sisteme de axe ortogonale

În ecuația (3) cuplul electromagnetic poate fi exprimat prin diferite mărimi

$$m_e = \frac{3}{2} p \Psi_{r\lambda} \times i_{r\lambda} = \frac{3}{2} p L_m \underline{i}_{s\lambda} \times i_{r\lambda} = \frac{3}{2} p \Psi_{s\lambda} \times i_{s\lambda} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\lambda} \times i_{s\lambda} \quad (4)$$

Alegerea fluxului rotoric $\underline{\Psi}_r$ ca flux al câmpului de orientare este benefică atât pentru implementare cât și pentru indicii de reglare mai avansați. Fazorul fluxului rotoric $\underline{\Psi}_r$ se învârteste cu viteza de referință ω_λ , iar poziția lui este determinată de unghiul λ față de sistemul de axe fixat de stator (ds - qs). În sistemul de axe proprii ds - qs fazorul curentului statoric \underline{i}_s are componentele ortogonale i_{sd} și i_{sq} , iar în sistemul de axe ale fluxului rotoric - i_{sx} și i_{sy} .

Cu considerarea $\underline{\Psi}_r = \Psi_r = |\Psi_r|$ și $\Psi_{ry} = 0$ ecuațiile motorului MA în sistemul de axe x - y vor fi:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_s &= R_s \underline{i}_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_\lambda \Psi_s \\ 0 &= R_r \underline{i}_r + \frac{d|\Psi_r|}{dt} + j(\omega_\lambda - \omega) |\Psi_r| \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_s &= L_s \underline{i}_s + L_m \underline{i}_r \\ \Psi_r &= |\Psi_r| = \Psi_r = L_m \underline{i}_s + L_r \underline{i}_r \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

iar ecuația cuplului electromagnetic exprimată prin flux rotoric și curent statoric obține forma:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{rx} i_{sy} - \Psi_{ry} i_{sx}) = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_{rx} i_{sy} \quad (7)$$

Din ecuația (6, b) se determină curentul rotoric

$$\underline{i}_r = \frac{\Psi_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} \underline{i}_s \quad (8)$$

care se substituie în ecuația fazorială a tensiunii rotorice (5, b)

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \Psi_r - \frac{L_m}{L_r} \dot{i}_s + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_\lambda - \omega)\Psi_r \quad (9)$$

din care după separarea componentelor reale ($axa x$) și imaginare ($axa y$) și unele transformări se obțin expresiile curentului statoric reactiv și viteza unghiulară de rotație a sistemului de referință:

$$\left. \begin{aligned} i_{sx} &= \frac{\Psi_r}{L_m} (s \cdot T_r + 1) \\ \omega_\lambda &= \omega + \frac{L_m \dot{i}_{sy}}{T_r \Psi_r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

unde $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ - constanta electromagnetică de timp a rotorului.

Din examinarea relațiilor (6, a) și (8) rezultă expresia fluxului statoric

$$\underline{\Psi}_s = L_s \sigma \dot{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r \quad (11)$$

care la substituirea în (5,a) permite de a obține ecuația fazorială a tensiunii statorice în funcție de curentul statoric și fluxul rotorice de comandă

$$\underline{U}_s = R_s \dot{i}_s + \sigma L_s \frac{d\dot{i}_s}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} + j\omega_\lambda (\sigma L_s \dot{i}_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r) \quad (12)$$

La proiectarea (12) pe axele x și y conduc la determinarea ecuațiilor ale tensiunilor statorice care cu unele modificări pot fi utilizate ca mărimi de comandă pentru asigurarea controlului vectorial:

$$\left\{ \begin{aligned} u_{sx} &= R_s \dot{i}_{sx} + \sigma L_s \frac{d\dot{i}_{sx}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} - \omega_\lambda \sigma L_s \dot{i}_{sy} \\ u_{sy} &= R_s \dot{i}_{sy} + \sigma L_s \frac{d\dot{i}_{sy}}{dt} + \omega_\lambda \sigma L_s \dot{i}_{sx} + \omega_\lambda \frac{L_m}{L_r} \Psi_r \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Cu considerarea expresiilor fluxului principal și al curentului de magnetizare

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_m &= \dot{i}_s + \dot{i}_r \\ \underline{\Psi}_m &= L_m \dot{i}_m \\ L_r &= L_m + L_{\sigma r} \end{aligned} \right\}$$

fluxurile statorice și rotorice pot scrie în dependență de fluxul principal și inductivități de scăpări:

$$\underline{\Psi}_r = \frac{L_r}{L_m} \underline{\Psi}_m - L_{\sigma r} \dot{i}_s \quad (14)$$

$$\underline{\Psi}_s = \underline{\Psi}_m + L_{\sigma s} \dot{i}_s \quad (15)$$

Din ultimele două ecuații se obțin componentele fluxului rotorice în funcție de fluxurile și curenții statorici:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{rd} &= \frac{L_r}{L_m} \Psi_{sd} - \sigma'_{rs} \dot{i}_{sd} \\ \Psi_{rq} &= \frac{L_r}{L_m} \Psi_{sq} - \sigma'_{rs} \dot{i}_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

în care coeficientul de scăpări al fluxului $\sigma'_{rs} = (L_{\sigma r} + \frac{L_r L_{\sigma s}}{L_m})$.

3. Structura generală a sistemului de control vectorial al motorului asincron de tracțiune al troleibuzului

Sistemul de tracțiune al troleibuzului cu motor asincron și control vectorial (fig.2) este format din convertorul DC/AC (generator semnale PWM și Inverter), motorul asincron AM și sistemul de control vectorial, traductoare de tensiuni și curenți statorici, traductor de viteză. Sistemul de control vectorial funcțional este constituit din 2 regulatoare, observatorul de stare (modelul matematic) al MA, controlerul FOC. La elaborarea sistemului de control al motorului asincron este necesar de ținut cont de tipul sarcinii de antrenare. În cazul troleibuzului caracteristica mecanică a sarcinii este o funcție complexă tip hiperbolă dependentă de mai mulți factori de trafic.

Bucula de reglare a mărimilor mecanice conține regulatorul cuplului electromagnetic Rm_e care în funcție de cuplului electromagnetic prescris m_e^* generează valoarea curentului statoric activ i_{sy}^* în sistemul de axe al fluxului rotoric. Bucula de reglare a mărimilor electromagnetice este constituită din regulatorul de flux $R\Psi_r$, care în funcție de curentul de magnetizare prescris I_{mr}^* generează curentul reactiv statoric i_{sx}^* .

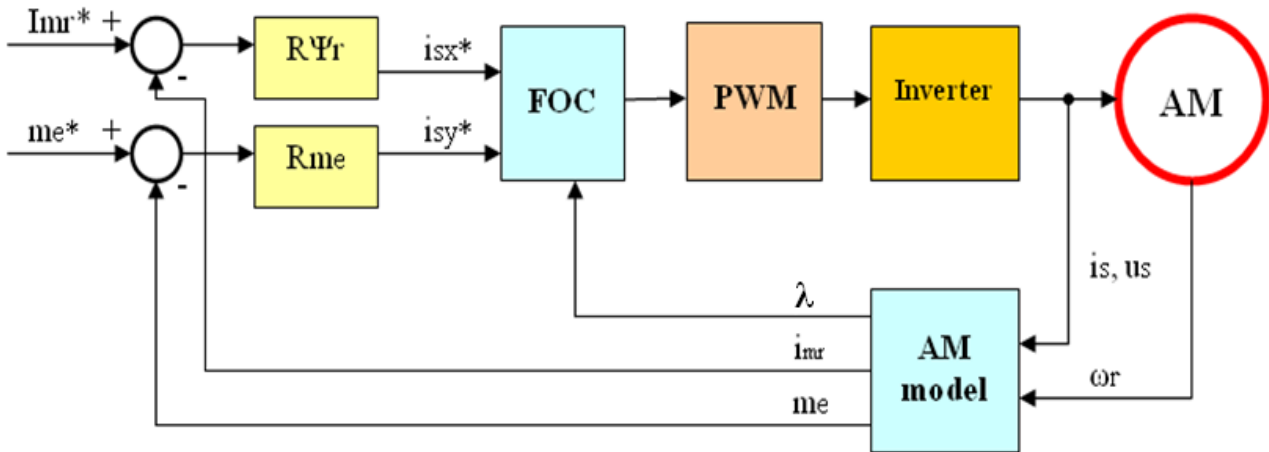


Fig.2. Schema de principiu a acționării motorului asincron cu control vectorial

Observatorul MA (AM model) este destinat estimării stării curente a fluxului rotoric de comandă (modulul Ψ_r și unghiul λ), a cuplului electromagnetic m_e și curentului de magnetizare i_{mr} în baza măsurărilor tensiunilor u_{SA}, u_{SB}, u_{SC} și curenților i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} de fază statorici, a vitezei unghiulare rotorice ω_r . Observerul utilizează procedurile de transformare de sistem ABC2dq (transformarea mărimilor trifazate în bifazate) și determinarea componentelor ortogonale tensiunilor u_{sd}, u_{sq} și curenților i_{sd}, i_{sq} în sistemul de axe statoric $ds-qs$. Aceste mărimi servesc pentru calcularea fluxurilor statorice ortogonale în același sistem:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = \int (\Psi_{sd} - R_s \cdot i_{sd}) dt \\ \Psi_{sq} = \int (\Psi_{sq} - R_s \cdot i_{sq}) dt \end{cases} \quad (17)$$

care permit conform (16) de a calcula componentele fluxului rotoric. Analizatorul de flux utilizează expresiile

$$\left. \begin{aligned} \Psi_r &= \sqrt{\Psi_{rd}^2 + \Psi_{rq}^2} \\ \sin \lambda &= \frac{\Psi_{rq}}{\Psi_r} \\ \cos \lambda &= \frac{\Psi_{rd}}{\Psi_r} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

pentru calcularea modului și determinarea poziției fluxului rotoric care permit realizarea principiului de control cu orientare după câmp.

În cazul alimentării MA de la inverterul PWM comandat în tensiune controlerul FOC (fig.3) are ca funcție principală calcularea tensiunilor statorice u_{SA}^* , u_{SB}^* și u_{SC}^* necesare pentru realizarea principiului de orientare a motorului după fluxul rotoric Ψ_r . Ca mărimi de intrare se utilizează curenții i_{sx}^* și i_{sy}^* de la ieșirea reglatoarelor de flux $R\Psi_r$ și cuplu Rm_e , cu ajutorul Compensatorului de tensiune (realizat în baza expresiilor (13)) calculează mărimile de comandă u_{sx}^* , u_{sy}^* ale tensiunilor statorice în sistemul de axe $x-y$ solidar cu fluxul rotoric, care mai apoi prin schimbul de axe $xy2dq$ se transformă în tensiunile u_{sd}^* , u_{sq}^* raportate la sistemul de axe $ds-qs$ statoric. În final cu transformarea de sistem dq^2ABC se obține tensiunile trifazate u_{SA}^* , u_{SB}^* , u_{SC}^* pe care trebuie să le genereze inverterul pentru alimentarea înfășurării statorice, în așa fel ca permanent să se mențină un unghiul de 90° între fluxul de comandă și curentul statoric activ.

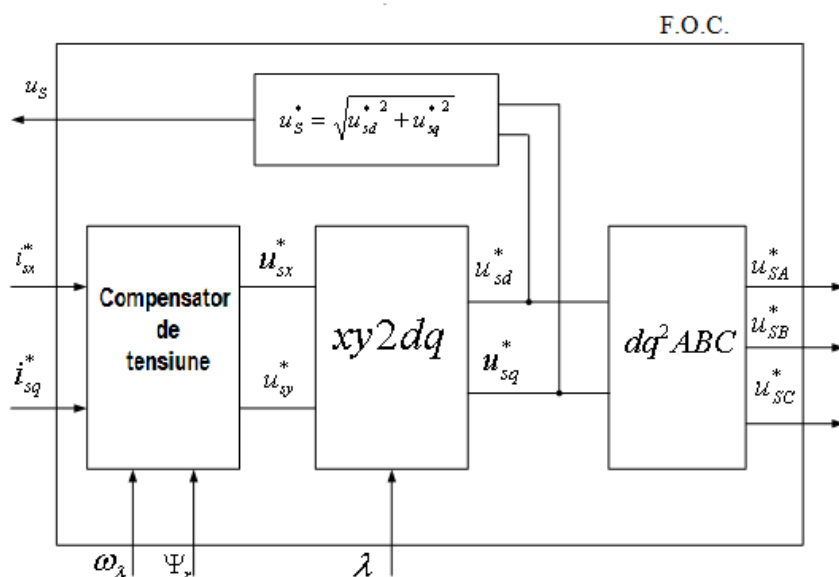


Fig.3. Controlerul FOC al sistemului de reglare cu orientare după câmp

4. Implementarea algoritmului de control vectorial

Algoritmului de control vectorial al motorului asincron de tracțiune al troleibuzului a fost implementat folosind un microcontroler de 32 biți CPU2 MB91F267 (fig.4) al firmei Fujitsu, cu care concernul Infombusiness are contract de conlucrare. Programul de control al motorului este salvat în memoria **FLASH**, iar variabilele formate pe parcursul derulării lui - în memoria **RAM** internă. Unitatea aritmetico-logică **ALU** indeplinește instrucțiunile programului din memoria **FLASH**.

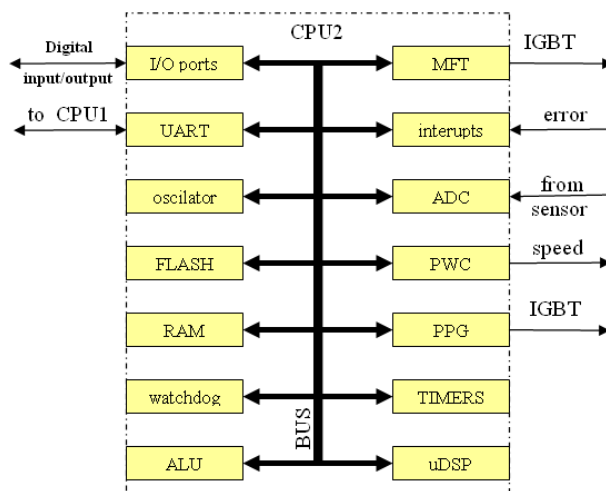


Fig. 4. Structura internă a procesorului MB91F267

Modulul **UART** este utilizat pentru programarea procesorului și comunicarea cu procesorul **CPU1**, care asigură controlul general al sistemului de tracțiune. Modulul **ADC** convertește semnalele analogice în semnale digitale. **Interrupts** se utilizează pentru depistarea rapidă a schimbărilor pinilor din exterior. **Timers** se utilizează pentru sincronizarea operațiilor și proceselor algoritmului. **PPG** se utilizează ca un generator **PWM**. **MFT** este un timer multifuncțional specific controlerelor de comandă a motoarelor de curent alternativ pentru formarea rapidă a 6 semnale **PWM**. **PWC** servește pentru determinarea exactă a vitezei motorului. Funcțiile controlerului FOC și al observerului MA sunt realizate de modulele **ADC** și **ALU**, care funcționează în conformitate cu programul algoritmului de control. Algoritmii de execuție ale regulatorilor de flux $R\psi_r$ și cuplu Rm_e este pus în seamă procesorului digital intern de semnal mDSP.

Modificarea structurii de control vectorial realizat în baza microcontrolerelor se reduce doar la modificarea programului de comandă fără a interveni în partea hard al echipamentului electronic.

În baza acestor elaborări a fost realizat o mostră experimentală a sistemului de control vectorial al motorului asincron de tracțiune cu puterea de până la 200 kW, care au demonstrat funcționalitatea structurilor propuse. S-a constatat că microcontrolerul de uz general MB91F267 al firmei Fujitsu cu succes face față cerințelor impuse, eliminând necesitatea utilizării unor procesoare digitale de semnal specializate cu ar fi DSP-urile.

CONCLUZII

În lucrare a fost examinat în detalii modelul matematic al motorului asincron cu control vectorial, în baza căruia s-a elaborat structura sistemului de control cu orientare după fluxul rotoric pentru tracțiunea troleibuzului. Ca bază de implementare a sistemului de control s-a utilizat un microcontroler de 32 biți de uz general. Aceasta demonstrează că la etapa actuală sistemelor de control vectorial pot fi realizate nu numai pe procesoare DSP.

Bibliografie

1. I.Rîmbu, V. Eșanu, I.Nuca. *Probleme actuale ale unităților de transport electric urban din Republica Moldova*. București: Buletinul AGIR nr4/2009, pp.136-139.
2. I.Rîmbu, V.Mihalache, A.Rîncău, A.Motroi, V. Eșanu, I.Nuca. *Development of vector control system for trolleybus asynchronous motor (TAM)*. Proceedings of the 7th International Conference of Electromechanical and Power Systems. SIELMEN'2009. October 8-9, 2009. România, Iași, Proceedings, V.2, pp.109-112
3. Peter Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998. -729 p.
4. *Accionări electrice reglabile cu mașini asincrone*/ IulianȚopa, Adrian Dănilă, Laurențiu Diaconu – București: Matrix Rom, 2007. -143 p.
5. Sergiu Ivanov. *Reglarea vectorială a sistemelor de acționare electrică*, Reprografia Universității din Craiova, 2000. -112 p.
6. Ilie Nuca, *Sistem de control vectorial al motorului asincron de tracțiune al troleibuzului*, <http://facultate.regielive.ro/cursuri/>
7. <http://edevise.fujitsu.com/fj/DATASHEET/>