

# MODELAREA SISTEMULUI DE TRACȚIUNE AL TROLEIBUZULUI CU MOTOR RELUCTANT

Ilie NUCĂ, Petru VÎRLAN, Vadim CAZAC, Victor DJAMALUTDINOV  
Universitatea Tehnica a Moldovei

**Rezumat:** *Lucrarea prezintă unele aspecte ale utilizării modelului Simulink ale sistemelor de tracțiune electrică cu motoare reluctante. Sunt examinate modelele motoarelor reluctante cu structurile tipice 6/7, 8/6 și 10/8 poli stator/rotor, cât și convertoarele corespunzătoare cu 3,4 și 5 faze. Pentru fiecare structură este descrisă modalitatea de ajustare a sistemului de comandă implicit. Rezultatele modelării reflectă adecvat procesele reale ale sistemului de tracțiune studiat.*

**Cuvinte-cheie:** : *tracțiune electrică, motor cu reluctanță variabilă, convertor static multifazat, sistem de comandă, modelare, MatLab-Simulink.*

## 1. Introducere

Fiabilitatea, eficiența energetică, protecția mediului ambiant, eficacitate economică sunt probleme vitale ale sistemele de tracțiune vitale. În acest sens utilizarea pentru acționarea electrovehiculelor (inclusiv și a celor urbane de pasageri) a motoarelor electrice reluctante (Switched Reluctance Motor – motor cu reluctanța comutabilă sau variabilă -MRV) ar fi oportună. Întrădevăr, datorită construcției statorului și rotorului cu poli aparenti (fig.1), cât și absenței oricărui sistem de excitație rotoric (înfășurare sau magneți permanenți), motorul reluctant este cu mult mai ieftin, simplu și robust, nu are pierderi electrice în rotor. Spre deosebire chiar și de cele asincrone, motoarele reluctante își mențin randamentul practic constant la varierea sarcinii și vitezei în limite largi, iar avantajelor lor sunt amplificată de caracteristica mecanică hiperbolică a motoarelor reluctante reprezintă un avantaj serios. În anii 2008-2009 în Moscova a fost încercat un troleibuz model Sadko acționat cu un motor de tracțiune reluctant de 180 kW (fig.2) și un convertor de frecvență de uz general. Troleibuzul a demonstrat caracteristici de tracțiune satisfăcătoare, dar din cauza lipsei unui convertor electronic cât și a algoritmilor de control corespunzători, producerea lui în serie nu a fost începută.



Fig.1. Vedere generală a motorului reluctant



Fig.2. Motorul MRV al troleibuzului SADCO

Spre deosebire de motoarele clasice cu câmp învârtitor, motoarele reluctante utilizează principiul electromagnetului, necesită un sistem de comandă și un convertor electronic de putere pentru alimentarea a fazelor statorice (fig.3). Sistemul de control urmărește permanent poziția rotorului și alimentează acea fază a axa care deviază la maximum față de poziția axei polului rotoric apropiat. Cu aceste particularități, sistemul de control al motorului MRV impune cunoașterea poziției curente  $\theta$  a rotorului, cât și caracteristicii de magnetizare corespunzătoare curentului statoric  $i$  și poziției  $\theta$ .

*Scopul lucrării* constă în elaborarea modelului matematic și simularea sistemului de tracțiune al troleibuzului cu motoare electrice reluctante cu considerarea numărului de faze și a numărului de poli statorici și rotorici.

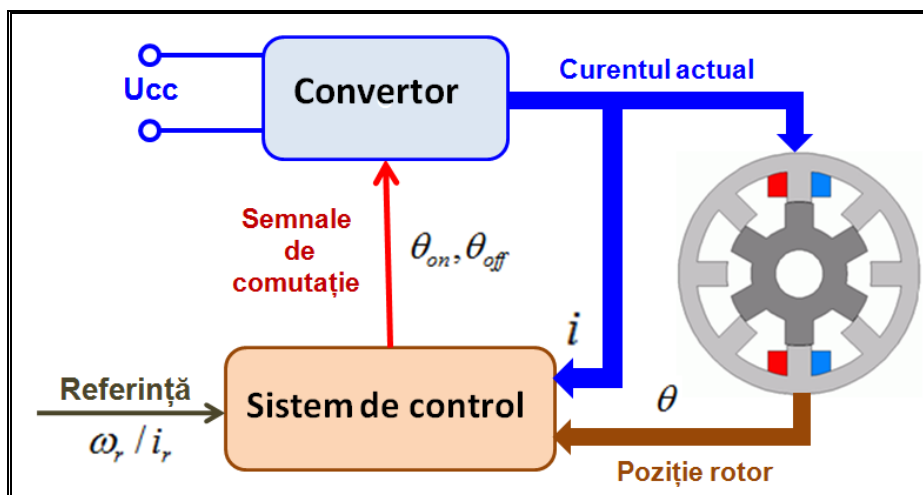


Fig.3. Sistemul de control al motorului MRV

## 2. Modelele Simulink ale sistemelor de acționare cu motoarele reluctante

La alimentarea separată a fazelor statorice și neglijarea fluxul mutual dintre faze conform legii lui Kirchhoff

$$\frac{d\psi(\theta, i)}{dt} = -iR + U, \quad (1)$$

unde  $U$  și  $R$  sun tensiunea de alimentare și rezistența unei faze. Datorită structurii simetrice a motorului, fluxul unei  $\Psi$  este periodic pe durata unghiului  $\theta$  cu perioada  $2\pi/Z_R$ , unde  $Z_R$  este numărul de poli rotorici. Din această cauza fluxul poate fi raportat la  $Z_R\theta$  este unghiul electric al mașinii și ecuația de tensiune a unei faze se modifică

$$\frac{d}{dt} \psi(Z_R\theta, i) = -iR + U \quad (2)$$

Fluxurile unui motor reluctatnt cu  $m$  faze poate fi exprimat în funcție de indicele fazei  $k=\{a,b,c,d,e,\dots\}$  și unghiul  $\theta_s=2\pi/qZ_R$

$$\frac{d}{dt} \psi(Z_R(\theta - (k-1)\theta_s), i) = -i_k R + U_k. \quad (3)$$

Modelul motorului reluctatnt se completează cu ecuația de mișcare

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = M(Z_R\theta, i_a, i_b, i_c, i_d, \dots) - M_s, \quad (4)$$

unde:  $J$  – este momentul de inerție al motorului,  $B$  – coeficientul de frecări vîscoase,  $M_s$  – cuplul de sarcină. Cuplul electromagnetic al motorului reluctant la alimentarea separată a fazelor

$$M(n_R\theta, i_a, i_b, i_c, i_d, \dots) = \sum_{k=a,b,c,\dots}^m M_k(Z_R\theta, i_k) \quad (5)$$

Ecuatiile (3-5) reprezintă modelul matematic al motorului cu reluctanța variabilă cu  $m$  faze în funcție de fluxul total  $\Psi(Z_R\theta, i)$ , care se consideră cunoscut și determinat separat (fie prin cercetări experimentale fie din calcule prin metoda elementului finit) (fig.4-5).

În funcție de structură (număr de poli statorici/rotorici și număr de faze) din biblioteca Simulink se selectează modelul motorului reluctant SRM 6/4, 8/6 și 10/8și cu fazele A1-A2, B1-B2, C1-C2, D1-D2, E1-E2 ... (fig.6).

Pentru alimentarea fazelor motorului reluctanț cu  $m$ -faze modelul trifazat standard Simulink trebuie completat cu un unul, două sau mai multe module a unei de tipul din fig.7 și se obține modelul convertoarelor respectiv și cu 4 și 5 faze alături de cele trifazate (fig.8).

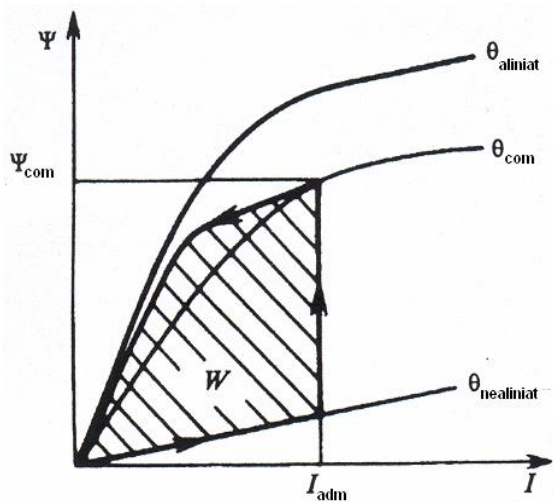


Fig.4. Caracteristica de magnetizare  $\Psi=f(I, \theta)$

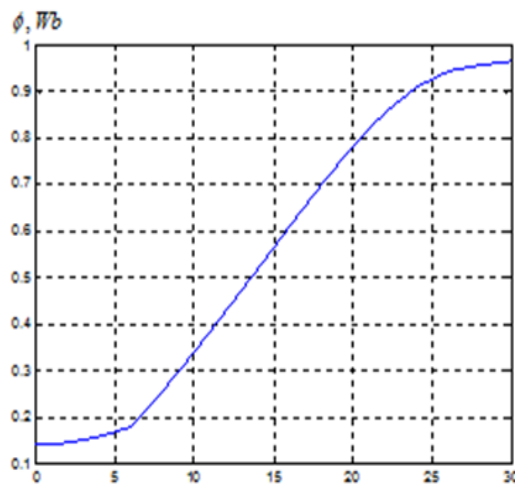


Fig.5. Dependența fluxului de

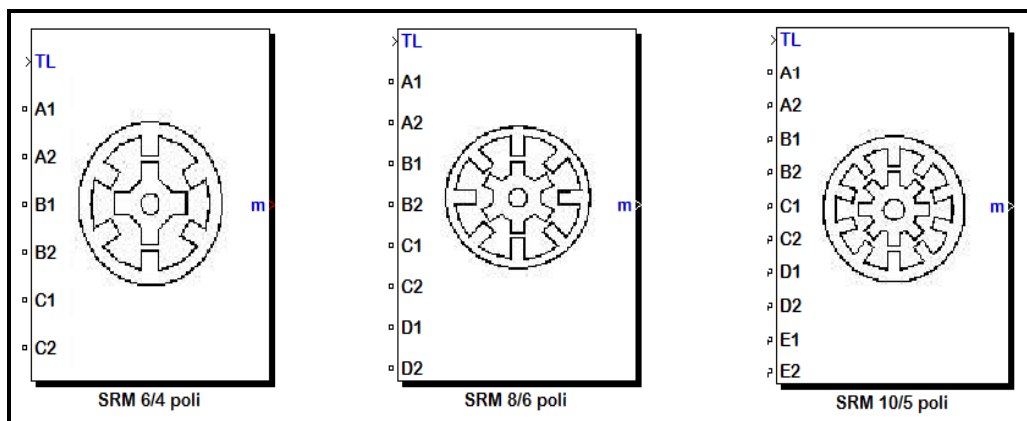


Fig.6. Modelul Simulink al MRV cu diferiți număr de poli

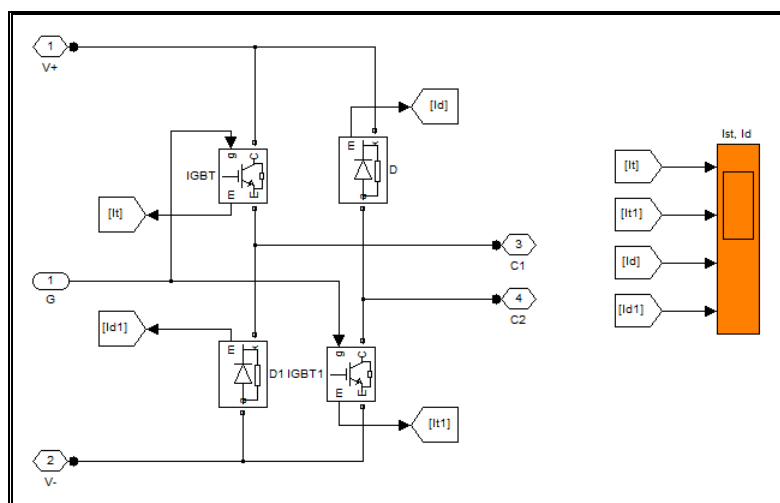


Fig.7. Modelul Simulink al unei punte a convertorului de putere

Pentru studiul acționării electrice cu motoare reluctante a fost elaborat modelul Simulink format din motorul SRM (cu una din structurile din fig.6), convertor static (cu una din structurile din fig.8) și sistem de comandă. Fig.9 reprezintă sistemul de acționare cu un motor reluctanț cu 4 faze, iar partea de

comandă utilizează ca mărimi de intrare valorile curente ale vitezei și curentului înfășurărilor statorice, valorile prescrise ale mărimii de control (viteza sau curent), valoarea inițială TetaOn și valoarea finală TetaOff a poziției rotorului pentru care se începe și se finalizează alimentarea înfășurărilor.

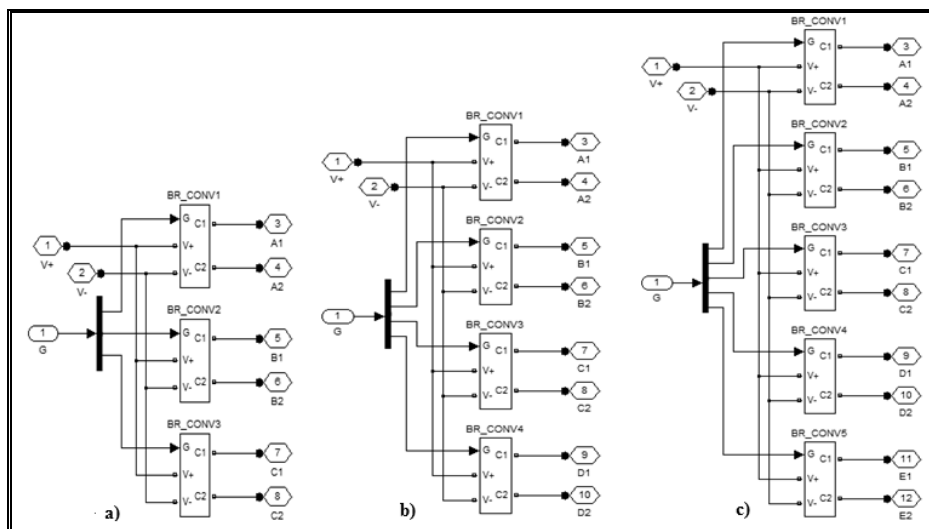


Fig.8. Modelul Simulink al convertoarelor pentru MRV cu 3, 4 și 5 număr de faze (respectiv: a , b,c)

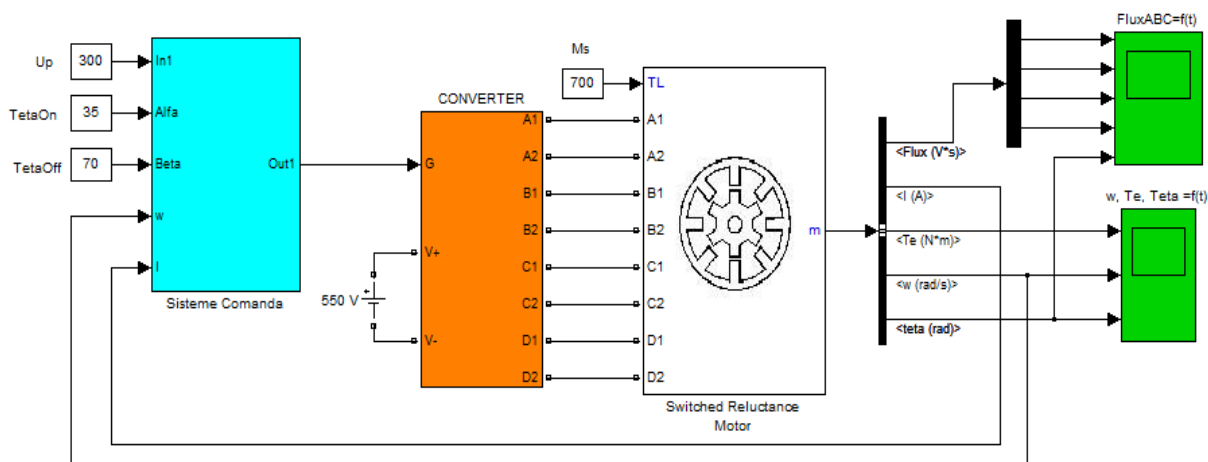


Fig. 9. Modelul Simulink al sistemului de acționare cu motor reluctant SRM

### 3. Simularea sistemului de acționare cu motor reluctant

În baza modelului Simulink (fig.9) elaborat au fost studiat procesele tranzitorii în sistemului de acționare cu motor reluctant în funcție de mai mulți parametri (parametrii reguletoarelor și valorile TetaOn și TetaOff de comandă a convertorului, cu și fără sarcină etc.).

În fig.10-11 sunt prezentate rezultatele simulării motorului reluctatnt de tracțiune al troleibuzului cu puterea de 120 kW, cu 6/4 poli. Fig.10 reprezintă varierea în timp a fluxurilor și curenților de fază (A,B,C) statorice, cuplului electromagnetic  $T_e$ , turației  $n$  și poziției  $\theta$  rotorului. Dacă forma curentului de fază este aproape dreptunghiulară, atunci forma fluxului de fază este mai aproape trapezoidală. Forma cuplului electromagnetic din fig.10 și caracteristica mecanică din fig.11 demonstrează particularitatea (dezavantajul) principal al motorului reluctant – riplurile (bătăile) de cuplu.

Simularea pe calculator demonstrează capacitățile dinamice bune ale motorului reluctant și posibilitatea utilizării lui în tracțiunea vehiculelor electrice, inclusiv a celor urbane de pasageri.

#### 4. Concluzii

În lucrare au fost prezentate unele aspecte ale utilizării modelului Simulink pentru sistemelor de acționare electrică cu motoare reluctante. Sunt examinate modelele motoarelor reluctante cu structurile tipice 6/7, 8/6 și 10/8 poli stator/rotor, cât și convertoarele corespunzătoare cu 3,4 și 5 faze.

Simularea în mediul MatLab demonstrează abilitățile motoarelor reluctante pentru utilizarea în sistemele de tracțiune electrice. Din altă parte este necesar de avut în vedere riplurile cuplului dezvoltat de motorul reluctant și necesitatea compensării acestora. Pentru simularea sistemelor de tracțiune cu motoare electrice reluctante e necesar de ținut cont de numărului de faze și structura magnetică (numărul de poli stator/rotor).

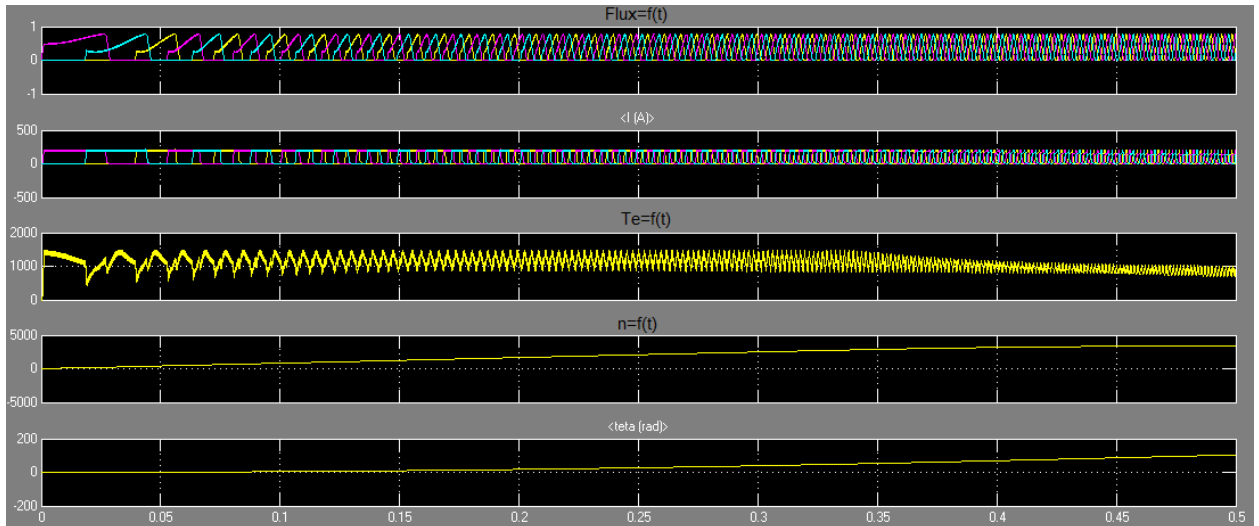


Fig.10. Procese tranzitorii la pornirea motorului reluctant și comanda  $TetaOn=40^0$  și  $TetaOff=80^0$

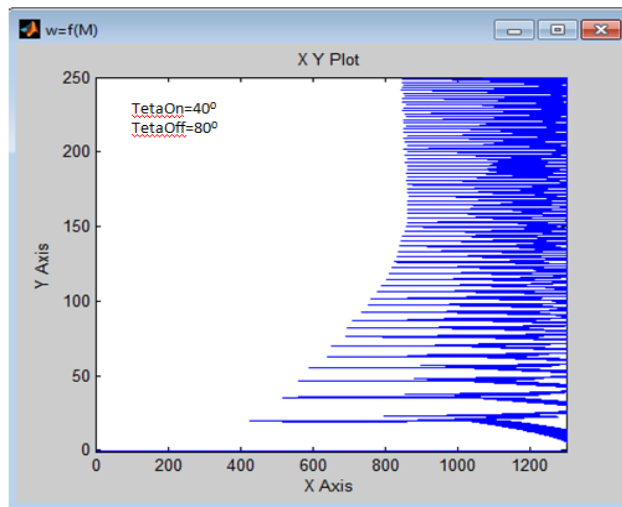


Fig.11. Caracteristica mecanică a motorului reluctant

#### Bibliografie

1. A. Campeanu, Introducere in dinamica masinilor de curent alternativ, Editura Academiei, Bucuresti, 1995.
2. O.Dabija. *Contribuții privind ameliorarea performanțelor mașinilor cu reluctanță variabilă*. Rezumatul tezei de doctorat. Iasi, 2013, -61 p.
3. T.Wichert. *Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines*. PhD thesis. Warsaw, 2008. -161 p.
4. <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/switchedreluctancemotor.html>