

ing. D. MIRON

completare la teza de doctorat :
" **ACTIONAREA ELECTRICA A TRAMVAIELOR
FOLOSIND SCHEME CU TIRISTOARE** "

CONA ȘTIINȚIFIC prof. dr. ing. E. SERACIU

554564/a
332 H

APLICAREA RELATIILOR DE CALCUL DEDUSE, LA SCHEMA DE
ACTIONARE PROPUȘA ȘI VERIFICAREA PRIN CALCUL ȘI PE
CALE EXPERIMENTALA A REZULTATELOR

În perioada 1977-1978 am continuat preocupările privind principalele aspecte legate de utilizarea schemei cu variator de tensiune continuă la acționarea electrică a tramvaielor la noi în țară.

Am urmărit în mod deosebit două aspecte importante și anume: aplicarea relațiilor deduse în teza de doctorat la schema de acționare propusă și verificarea experimentală a rezultatelor.

Schema de acționare din fig. 50 a fost concepută pentru a fi folosită la acționarea tramvaiului de mare capacitate din dotarea I.T.B. Ea poate fi însă aplicată cu bune rezultate la acționarea mijloacelor de transport în comun urban (metrou, tramvaie sau troleibuze) dimensionând corespunzător elementele variatoarelor și ale schemei.

Având în vedere faptul că schema propusă nu a fost utilizată practic pînă în prezent, aplicarea relațiilor deduse în teză pentru calculul curenților în diferite regimuri de funcționare am făcut-o pentru schema prezentată în fig. 54 cu ajutorul căreia s-a putut face și verificarea experimentală a rezultatelor.

Menționez faptul că prin aceasta nu se diminuează cu nimic valabilitatea concluziilor la care s-a ajuns avînd în vedere că s-au menținut aceleași caracteristici de bază ale schemei de acționare și s-a folosit schema de comandă corespunzătoare prezentată în fig. 53 bis.

Motorul utilizat are următoarele caracteristici:

- puterea nominală : 74 kW;
- tensiunea nominală : 750 V
- curentul nominal : 100 A
- turația nominală : 1470 rot/min.

Motorul este cu excitație serie avînd $r = 0,42 \Omega$ și $L = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{H}$.

1. Răgimul de pornire.

Am calculat curenții I_{\max} , I_{\min} , I_m cu relațiile (38), (39), (41) știind că:

... / ...

$$U_1 = 750 \text{ V}$$

$$r = 0,42 \ \Omega$$

$$T = \frac{1}{400} \text{ S}$$

$$\tau_1 = 0,0136 \text{ S}$$

$$K = 0,48$$

$$\delta = \delta_{\min.} = \frac{T_{\min.}}{T} = \frac{42,5 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-4}} = 0,017$$

$$n = 0$$

Rezultă

$$I_{\max.} = \frac{1}{0,42} \left(750 \frac{1 - e^{-\frac{0,017 \cdot 0,0025}{0,0136}}}{1 - e^{-\frac{0,0025}{0,0136}}} \right) = 29,95 \text{ A}$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{0,42} \left[750 \frac{e^{-\frac{0,983 \cdot 0,0025}{0,0136}} \left(1 - e^{-\frac{0,017 \cdot 0,0025}{0,0136}} \right)}{1 - e^{-\frac{0,0025}{0,0136}}} \right] = 25,4 \text{ A}$$

$$I_m = 400 \left\{ \frac{750}{0,42} \left[0,017 \cdot 0,0025 - 0,0136 \left(1 - e^{-\frac{0,017 \cdot 0,0025}{0,0136}} \right) \right] + \right. \\ \left. + 0,0136 \cdot 29,95 \left(1 - e^{-\frac{0,983 \cdot 0,0025}{0,0136}} \right) + 0,0136 \cdot 25,4 \left(1 - e^{-\frac{0,017 \cdot 0,0025}{0,0136}} \right) \right\} \\ = 26,5 \text{ A}$$

Relațiile (38), (39), (41) pot fi simplificate dacă se dezvoltă în serie și se iau numai primii doi termeni ai seriei obținându-se :

$$I_{\max.} = \frac{1}{r} (\delta U_1 - \kappa n) \quad (1)$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{r} \left[\delta U_1 \left(1 - \frac{T}{\tau_1} \right) - \kappa n \right] \quad (2)$$

$$I_m = (1 - \delta) I_{\max.} + \delta I_{\min.} \quad (3)$$

În această situație se obțin următoarele valori:

$$I_{\max.} = \frac{1}{0,42} \cdot 0,017 \cdot 750 = 30,35 \text{ A}$$

$$I_{\min.} = \frac{1}{0,42} \left[750 \cdot 0,017 \cdot \left(1 - \frac{0,0025}{0,0136} \right) \right] = 24,88 \text{ A}$$

$$I_m = 30,25 \text{ A} \dots / \dots$$

Față de valorile obținute cu relațiile complete se înregistrează următoarele abateri:

| | | |
|----|------------|-------|
| La | I_{\max} | 1,33% |
| La | I_{\min} | 2,04% |
| La | I_m | 14,6% |

Considerînd cele două cazuri extreme în care poate avea loc pornirea vehiculului se pot determina valorile lui δ

$$I_{p_{\min}} = \frac{r}{r} \delta_{\min} U_i$$

Dar

$$I_{p_{\min}} = 30 A$$

Rezultă $\delta_{\min_1} = \frac{30 \cdot 0,42}{750} = 0,017$

Se știe că

$$\delta = \frac{T_i}{T}$$

Deci

$$T_{i_{\min_1}} = \delta_{\min_1} \cdot T = 42,5 \cdot 10^{-6} s$$

$$I_{p_{\max}} = 196 A$$

Rezultă $\delta_{\min_2} = \frac{196 \cdot 0,42}{750} = 0,11$; $T_{i_{\min_2}} = 275 \cdot 10^{-6} s$

În continuare voi evidenția legătura între creșterea lui δ și accelerarea motorului.

Să presupunem că motorul se accelerează de la turația de 200 rot/min pînă la turația de 250 rot/min și apoi la turația de 300 rot/min la curenții de pornire I_{p_1} .

Rezultă:

$$\delta_1 = \frac{r I_{p_1}}{U_i} + \frac{k}{U_i} \cdot 200$$

$$\delta_2 = \frac{r I_{p_1}}{U_i} + \frac{k}{U_i} \cdot 250$$

$$\delta_3 = \frac{r I_{p_1}}{U_i} + \frac{k}{U_i} \cdot 300$$

Se observă că

$$\delta_2 - \delta_1 = \delta_3 - \delta_2 = \frac{k \Delta n}{U_i}$$

Deci în timpul pornirii la creșteri egale ale lui δ corespund

... / ...

creșteri egale ale turației motorului.

În timpul pornirii δ crește practic liniar de la valoarea δ_{\min} destul de apropiată de zero, la valoarea δ_{\max} , destul de apropiată de 1. Panta acestei drepte depinde de timpul de pornire așa cum se afată în fig. 1.

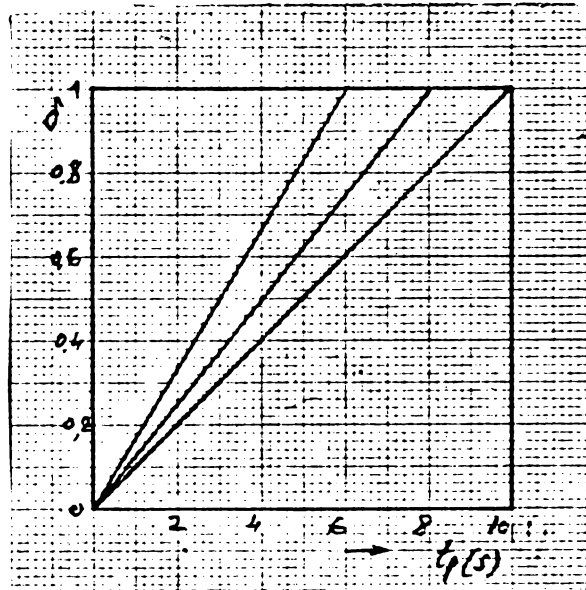


Figura 1

2. Răgimul de modificare a turației

Să presupunem că trebuie să modificăm turația motorului de la valoarea n_n la valoarea $n < n_n$

În baza relațiilor (47), (48) rezultă:

$$I_{\max} = \frac{I}{r+bn} \left(U_1 \frac{1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - an \right) \quad (4)$$

$$I_{\min} = \frac{I}{r+bn} \left[U_1 \frac{e^{-\frac{1-\delta}{\tau} T} (1 - e^{-\frac{\delta T}{\tau}})}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right] \quad (5)$$

Din caracteristica de magnetizare a motorului menționat am determinat constantele a, b.

$$a = 0,47$$

$$b = 2,5 \times 10^{-8}$$

În aceste condiții în urma calculelor efectuate pentru turația de 1445 rot/min corespunzătoare la $\delta = 0,96$ am obținut:

$$I_{\max} = 109 \text{ A}$$

$$I_{\min} = 90,4 \text{ A}$$

$$I_m = 91,2 \text{ A}$$

Si relațiile de mai sus, inclusiv relația (49) din teză

... / ...

pot fi simplificate obținându-se:

$$I_{max} = \frac{1}{r+bn} (\delta U_1 - an) = 97,6 A \quad (6)$$

$$I_{min} = \frac{1}{r+bn} \left[\delta \left(1 - \frac{1-\delta}{\tau} \right) U_1 - an \right] = 80,4 A \quad (7)$$

$$I_m = (1-\delta) I_{max} + \delta I_{min} = 80,9 A \quad (8)$$

In acest caz erorile sînt ceva mai mari și anume 10,46% pentru I_{max} , 11,06%, pentru I_{min} și 10,96 % pentru I_m .

3. Regimul de frînare

In cazul frînării dinamice rezistența de frînare rezultă din relația (81) pusă sub forma:

$$R = \frac{I_{max}}{I_{min}} = \frac{1000}{30} \approx 33 \Omega$$

Calculul curenților conform relațiilor (89), (90), (92) conduce la valorile:

$$I_{max} = 53,2 A$$

$$I_{min} = 20,4 A$$

$$I_m = 47,88 A$$

Ca și în cazurile anterioare se obțin următoarele expresii simplificate:

$$I_{max} = \frac{an}{r-bn} \frac{\delta z_2}{z_1 + \delta(z_2 - \tau)} + \frac{an}{R+r-bn} \frac{z_1 - \delta\tau}{z_1 + \delta(z_2 - \tau)} \quad (9)$$

$$I_{min} = \frac{an}{R+r-bn} \frac{z_1}{z_1 + \delta(z_2 - \tau)} + \frac{an}{r-bn} \frac{\delta(z_2 - \tau)}{z_1 + \delta(z_2 - \tau)} \quad (10)$$

$$I_m = (1-\delta) I_{max} + \delta I_{min} \quad (11)$$

Calculînd curenții și cu aceste relații am obținut valorile:

$$I_{max} = 50,29 A$$

$$I_{min} = 20,77 A$$

$$I_m = 47,33 A.$$

... / ...

Se observă că diferențele între valorile obținute sînt neglijabile.

Ca și în cazul pornirii, calculul valorilor lui d pentru curentul minim și curentul maxim de frînare pentru $n = 1470$ rot/min conduce la următoarele rezultate:

$$\begin{aligned} d_{\min_1} &= 0,03 \\ d_{\min_2} &= 0,58 \end{aligned}$$

La frînarea cu recuperare de energie considerînd că aceasta are loc la tensiunea maximă a motorului funcționînd în regim de generator serie autoexcitat aplicînd relațiile (114), (115), (116) am obținut:

$$I_{\max} = 794 \text{ A}$$

$$I_{\min} = 762 \text{ A}$$

$$I_m = 790 \text{ A}$$

Relațiile (114), (115), (116) pot fi aduse la forma simplificată

$$I_{\max} = \frac{an}{r-bn} - \frac{U_1}{r-bn} \frac{z_1 - d\tau}{z_1 [1 + d(1 - \frac{\tau}{z_1})]} \quad (12)$$

$$I_{\min} = \frac{an}{r-bn} - \frac{U_1}{r-bn} \frac{1}{1 + d(1 - \frac{\tau}{z_1})} \quad (13)$$

$$I_m = (1-d) I_{\max} + d I_{\min}$$

Calculul efectuat cu aceste relații a condus la următoarele valori:

$$I_{\max} = 759 \text{ A}$$

$$I_{\min} = 730 \text{ A}$$

$$I_m = 756 \text{ A}$$

Așa cum era de așteptat, curentul de frînare este foarte mare și el trebuie limitat la valoarea admisă de motor. Rezistența de limitare rezultă în baza relației:

$$(U_G)_{\max} - (U_i)_{\min} \leq (R_s + r) I_{\max}$$

$$R_s = 2,13 \Omega$$

Făcînd apel la fig. 38 din teză rezultă:

$$k = \frac{R_s}{r + R_s} = \frac{2,13}{2,55} = 0,835$$

$$f_1(d) = 1 - 0,1 = 0,9$$

... / ...

$$f_2(\sigma) = 0,835^2 \cdot 0,1^2 - 2 \cdot 0,835 \cdot 0,141 = 0,84$$

$$f_1(\sigma) > f_2(\sigma)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1-0,1}{(1-0,0835)^2} = \frac{0,9}{0,845} = 1,065$$

Deci pierderile de energie în rezistența de limitare vor fi cu 6,5 % mai mari în cazul legării acesteia între variator și linia de contact.

Puterea ce se disipă în rezistența de limitare la începutul perioadei de frînare cu recuperare este:

$$P = R_f I_f^2 \approx 83 \text{ kW}$$

Din această cauză unii autori recomandă ca limitarea curentului de frînare să nu se realizeze prin inserierea unei rezistențe suplimentare, ci cu ajutorul unor scheme electronice adecvate. Este adevărat că soluția este mai elegantă dar scumpește mult instalația și nu se justifică în schema de acționare a tramvaielor la noi în țară.

4. Influența perioadei de reglare asupra curenților

I_{\max} , I_{\min} , I_m .

Am calculat curenții în cele trei regimuri de funcționare a motorului pentru $T = 0,01\text{s}$; $T = 0,005\text{ s}$; $T = 0,0025\text{s}$; $T = 0,001\text{ s}$, folosind relațiile simplificate.

Datele obținute sînt prezentate în tabelul 1 și cu ajutorul lor am trasat graficul din fig. 2.

Tabelul 1

| Curentul (A) | Fornire | | | | |
|-----------------|---------|-------|--------|-------|--------------------|
| | T(S) | | | | |
| | 0,01 | 0,005 | 0,0025 | 0,001 | |
| I_{\max} | 30,35 | 30,35 | 30,35 | 30,35 | $\epsilon = 0,017$ |
| I_{\min} | 8,2 | 19,4 | 24,8 | 28,2 | |
| I_m | 29,97 | 30,15 | 30,25 | 30,3 | |

Tabel 1 (continuare)

Modificarea turației

| Curentul (A) | T(S) | | | | |
|-----------------|------|-------|--------|-------|-------------------------|
| | 0,01 | 0,005 | 0,0025 | 0,001 | |
| I_{max} | 97,6 | 97,6 | 97,6 | 97,6 | $\hat{\epsilon} = 0,96$ |
| I_{min} | 45 | 71,4 | 80,4 | 92,8 | |
| I_m | 47,1 | 72,4 | 80,9 | 92,9 | |

Frînare dinamică

| | | | | | |
|-----------|-------|------|------|------|------------------------|
| I_{max} | 134 | 69,4 | 50,3 | 32 | $\hat{\epsilon} = 0,1$ |
| I_{min} | 20,7 | 20,7 | 20,7 | 20,7 | |
| I_m | 122,7 | 64,5 | 47,3 | 30,8 | |

Frînare cu recuperare de energie

| | | | | | |
|-----------|-------|-----|-----|-------|------------------------|
| I_{max} | 875 | 816 | 759 | 752 | $\hat{\epsilon} = 0,1$ |
| I_{min} | 765 | 766 | 730 | 727 | |
| I_m | 863,5 | 811 | 756 | 749,0 | |

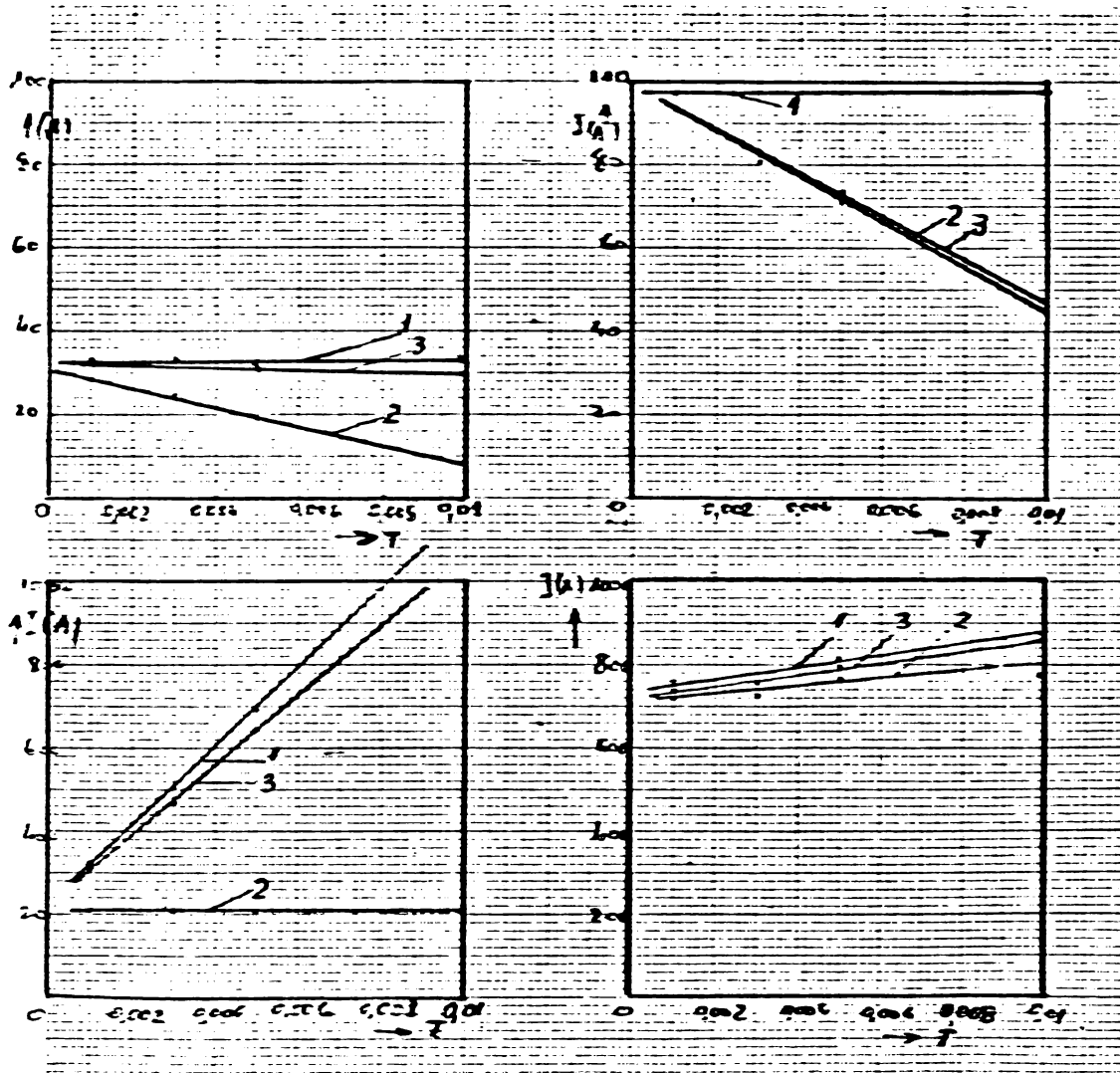


Figura 2

- 1 - I_{mov}
- 2 - I_{min}
- 3 - I_m

Analizînd tabelul 1 și fig. 2 se desprind următoarele concluzii:

- La pornire și la modificarea turației curenții scad odată cu creșterea perioadei de reglare;
- La frînare curenții cresc odată cu creșterea perioadei de reglare;
- Variația curenților în funcție de perioada de reglare este practic liniară;
- La pornire I_{\max} și I_m practic nu variază în funcție de perioada de reglare;
- La modificarea turației la valori mari ale lui δ , I_m este practic egal cu I_{\min} ;
- La frînarea reostatică variația curenților I_{\max} , I_m în funcție de T este foarte pronunțată în timp ce valoarea lui I_{\min} rămîne practic constantă;
- La frînarea cu recuperare de energie variația curenților în funcție de T este mult mai reușă, iar diferențele între I_{\max} , I_{\min} și I_m sînt neglijabile la valori mici ale perioadei de reglare;
- Ondularea curentului prin motor scade odată cu scăderea perioadei de reglare a variatorului. Reducerea de o sută de ori a perioadei de reglare duce la scăderea ondulării de zece ori la pornire, de 11 ori la modificarea turației, de 10 ori la frînarea reostatică și de 200 ori la frînarea cu recuperare de energie.

De obicei, comanda aprinderii și stingerii tiristorului principal al variatorului se dă în funcție de valoarea $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ stabilită pentru regimul de funcționare considerat.

Menținerea constantă a lui ΔI , așa cum rezultă din relația:

$$\Delta I = \frac{4T}{L} \delta (1 - \delta)$$

presupune modificarea continuă a frecvenței de lucru odată cu modificarea raportului ciclic δ .

În fig. 3 am trasat curba $T = f(\delta)$, pentru $\Delta I = 155 \text{ A}$, respectiv 100 A în cazul motorului studiat, alimentat la tensiunea de 750 V .

Din figură se constată că raportul între frecvența maximă și minimă este $\frac{212}{79} = 2,75$ pentru $\Delta I = 155 \text{ A}$ și $\frac{333}{125} = 2,66$ pentru $\Delta I = 100 \text{ A}$.

. . . / . . .

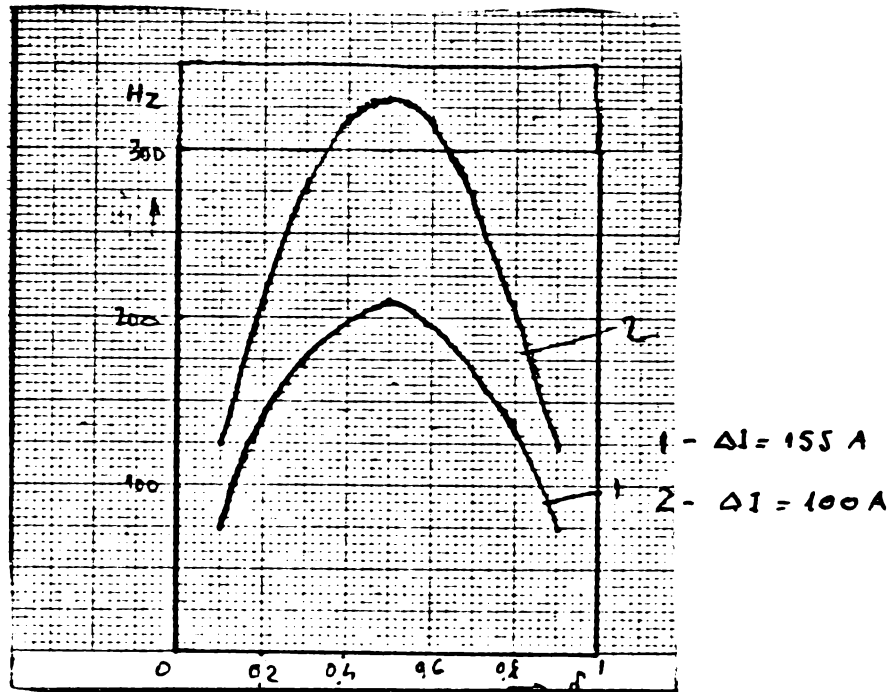


Figura 3

~~Schema propusă și analizată de mine funcționează cu frecvența de lucru.~~ Schemele utilizate practic lucrează cu două frecvențe de 200 Hz pentru $0,2 > d > 0,8$ și cu frecvența de 400 Hz pentru $0,2 < d < 0,8$. În această situație apar variații ale lui ΔI între valorile 52 A și 82 A respectiv într-o plajă care reprezintă peste 35 % din valoarea maximă, așa cum se arată în fig. 4 curba 1. Dacă modificarea frecvenței s-ar fi realizat la $d = 0,3$ respectiv $d = 0,7$ ΔI ar fi avut aspectul curbei 2, iar plaja de variație ar fi fost între 59 A și 105 A respectiv aproape 45% din valoarea maximă.

5. Determinarea prin calcul a economiei de energie la pornire

Consider cazul când pornirea s-ar realiza conform schemei din fig. 22 din teză.

Rezistența de pornire e determin din condiția ca la începutul perioadei de pornire să nu se depășească curentul maxim de pornire chiar la tensiunea maximă a liniei de contact.

$$R = \frac{U_{max}}{I_{max}} - r = 4,18 \Omega$$

... / ...

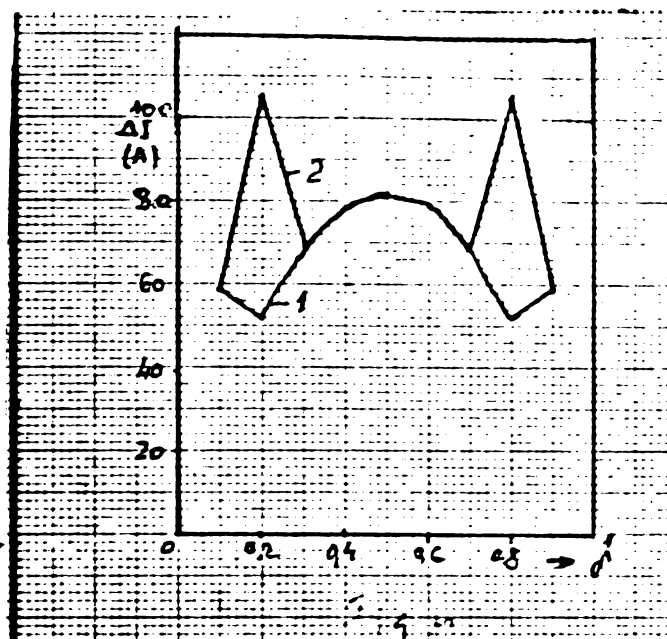


Figura 4

Variatorul asigură o creștere liniară a tensiunii la bornele motorului în perioada pornirii prin reducerea progresivă a rezistenței înseriate. În aceste condiții, energia disipată în timpul pornirii în rezistența de pornire va fi:

$$W_p = \frac{P_m t_p}{3600}$$

Pentru $t_p = 6\text{ s}$ rezultă $W_p = 134\text{ Wh}$

Energia totală va fi

$$W = 134 n_p t_e$$

unde: n_p = numărul pornirilor pe oră

t_e = timpul de exploatare pe zi (ore)

Considerînd $n_p = 50$ și $t_e = 15$ ore (valori ce concordă cu datele din statisticile ITB) rezultă că într-o zi se consumă în rezistență $W_t = 100,5\text{ kWh}$.

La pornirea cu schema din fig. 23 aceste pierderi sînt evitate.

Dacă motorul funcționează pe toată durata la puterea nominală, energia consumată de acesta ar fi 1100 kWh.

Deci energia economisită în această situație prin utilizarea schemei din fig. 23 reprezintă cca. 9%.

La frînarea cu recuperare de energie din relațiile (12),

... / ...

(13) se observă că $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$ crește ddată cu creșterea duratei relative de conectare. Acest lucru constituie un avantaj care permite realizarea frînării cu recuperare chiar în situația când turația motorului scade sub valoarea turației nominale. În timpul procesului de frînare curentul prin motor variază între I_{\max} și I_{\min} cu frecvența de lucru a variatorului. În perioada $T(1 - \delta)$ când motorul funcționând în regim de generator debitează energie în linia de contact, curentul scade de la I_{\max} la I_{\min} într-un timp cu atît mai scurt cu cît δ este mai mare.

Astfel pentru $\delta = \delta_{\max} = 0,96$ din (9) și (10) rezultă $\Delta I = 166 \text{ A}$ iar $\frac{di}{dt} = 1,66 \cdot 10^6 \text{ A/S}$.

6. Acceleratia la pornire

Pornind de la relația

$$M = M_D + M_r \quad (15)$$

unde

$$M = c i$$

$$M_D = \frac{G \delta^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

$$M_r = \frac{k C \Delta n}{r}$$

În cazul comenzii prin impulsuri de tensiune se ajunge la ecuația

$$\frac{dn}{dt} + \frac{n}{T_{x1}} = \frac{dn_1 - (kn)_1}{T_{x1}} \quad (16)$$

care conduce la soluția

$$n = dn_1 - (kn)_1 - [dn_1 - (kn)_1] e^{-\frac{t}{T_{x1}}} \quad (17)$$

unde:

$$T_{x1} = \frac{G \delta^2}{375} \frac{r}{k C}$$

$$n_1 = \frac{U_1}{k}$$

$$(kn)_1 = \frac{i r}{k}$$

În cazul pornirii cu reostat turația crește conform relației cunoscute

$$n = n_1 - (kn)_2 - [n_1 - (kn)_2] e^{-\frac{t}{T_{x2}}} \quad (18)$$

... / ...

unde:

$$T_{x_2} = \frac{G D^2}{375} \frac{r+R}{kC}$$

$$(\Delta n)_2 = \frac{i(r+R)}{k}$$

Din (17) și (18) rezultă accelerațiile la pornire pentru cele două cazuri.

$$a_1 = \left(\frac{d^2 n}{dt^2} \right)_1 = - \frac{1}{T_{x_1}^2} [n_1 - kn_2] e^{-\frac{t}{T_{x_1}}} \quad (19)$$

$$a_2 = \left(\frac{d^2 n}{dt^2} \right)_2 = - \frac{1}{T_{x_2}^2} [n_1 - (\Delta n)_2] e^{-\frac{t}{T_{x_2}}} \quad (20)$$

Analizînd relațiile (19), (20) pentru cele două cazuri extreme ($t = 0$ și $T = t_p$) rezultă următoarele:

$$a^* \quad t = 0$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}} \right)^2 \frac{n_1 - (\Delta n)_1}{n_1 - (\Delta n)_2} \quad (21)$$

Se consideră că la $t = t_p$, $\delta = 1$ și $(\Delta n)_1 - kn_2 = \Delta n$

In aceste condiții

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}} \right)^2 \frac{e^{\frac{t_p}{T_{x_1}}}}{e^{-\frac{t_p}{T_{x_1}}}} \quad (22)$$

Relația (22) poate fi adusă la forma:

... / ...

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}}\right)^2 \frac{1 - \frac{t_{p_1}}{T_{x_1}}}{1 - \frac{t_{p_2}}{T_{x_2}}} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}}\right)^3 \frac{T_{x_1} - t_{p_1}}{T_{x_2} - t_{p_2}} \quad (23)$$

știind că

$$t_{p_1} = T_{x_1} \ln \frac{n_1 - (\Delta n)_1}{n_1 - (\Delta n)_1 - n}$$

$$t_{p_2} = T_{x_2} \ln \frac{n_1 - (\Delta n)_2}{n_1 - (\Delta n)_2 - n}$$

rezultă

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}}\right)^3 \frac{T_{x_1} \left(1 - \ln \frac{n_1 - \Delta n}{n_1 - \Delta n - n}\right)}{T_{x_2} \left(1 - \ln \frac{n_1 - \Delta n}{n_1 - \Delta n - n}\right)} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}}\right)^2 = 1 \quad (24)$$

deoarece la sfârșitul perioadei de pornire $R \neq 0$ și $T_{x_1} = T_{x_2}$.
 Pentru motorul considerat, în cazul când pornirea se face la
 curentul maxim $i = 196 \text{ A}$ rezultă:

$$\begin{aligned} T_{x_1} &= 0,125 \text{ s} \\ n_1 &= 1800 \text{ rot/min} \\ (\Delta n)_1 &= 170 \text{ rot/min} \\ r + R &= 3,82 \Omega \\ (\Delta n)_2 &= 1560 \text{ rot/min} \\ T_{x_2} &= 1,14 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{1,14}{0,125}\right)^2 \frac{0,125 \cdot \frac{1800 - 170}{1800 - 170 - 196}}{1,14 \cdot \frac{1800 - 1560}{1800 - 1560 - 196}} = 1,66$$

Pentru un moment oarecare $0 \leq t_1 \leq t_p$

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{T_{x_2}}{T_{x_1}}\right)^2 \frac{1 - \ln \frac{n_1 - \Delta n}{n_1 - \Delta n - n}}{1 - \ln \frac{n_1 - \Delta n}{n_1 - \Delta n - n}} = 1,66 \quad (25)$$

... / ...

d. Influența curentului de pornire asupra raportului $\frac{a_1}{a_2}$

Calculînd raportul $\frac{a_1}{a_2}$ conform relației (21) pentru diferite valori ale curentului de pornire am obținut datele din tabelul 2 și graficul din fig. 5.

Tabelul 2

| | Curentul de pornire (A) | | | | |
|-------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 30 | 50 | 100 | 150 | 196 |
| δ | 0,015 | 0,026 | 0,054 | 0,083 | 0,097 |
| T_{x_1} | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| T_{x_2} | 7,47 | 4,47 | 2,23 | 1,49 | 1,14 |
| $(\Delta n)_1$ | 26 | 44 | 88 | 131 | 170 |
| $(\Delta n)_2$ | 1562 | 1562 | 1562 | 1562 | 1562 |
| $\frac{a_1}{a_2}$ | 2,76 | 2,33 | 2,03 | 1,79 | 1,66 |

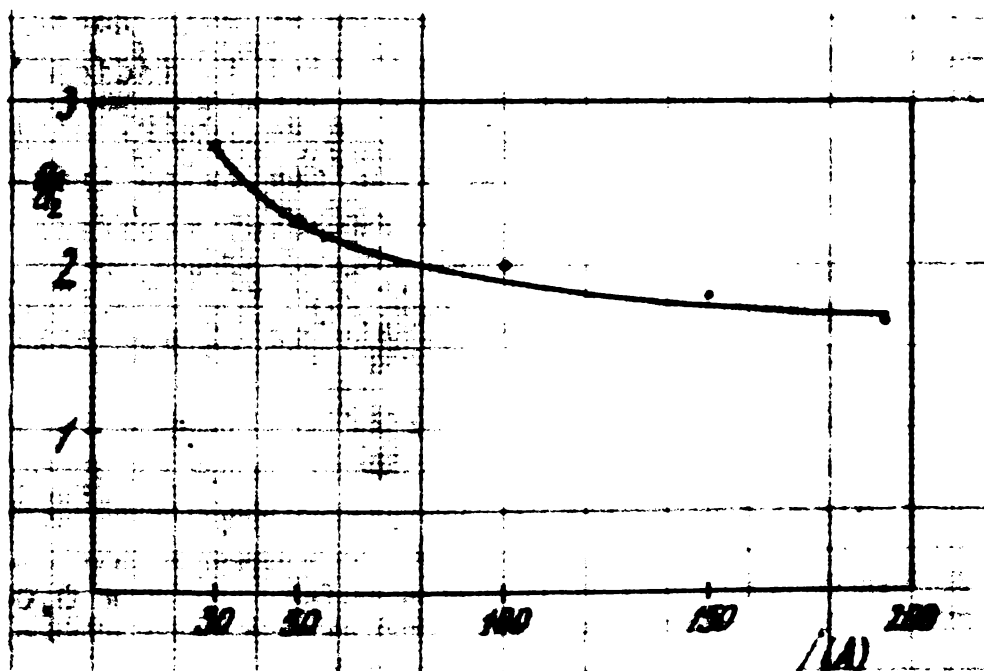


Figura 5

Se constată că raportul accelerațiilor la pornire este cu atât mai mare cu cât curentul de pornire este mai mic. Scăderea acestui raport este mai accentuată în domeniul curenților mai mici decât curentul nominal al motorului.

... / ...

7. Verificarea experimentală a rezultatelor obținute prin calcul

Pentru verificarea experimentală a rezultatelor obținute prin calcul am folosit standul realizat conform schemei din fig. 54.

Poziția contactelor din schemă pentru diferite regimuri de funcționare rezultă din tabelul 3.

Tabelul 3

| Regimul | AV ₂ | L | KT, | KT ₂ | KT ₃ | KF ₁ | KF ₂ | KF ₃ | KF ₄ | I ₁ | I ₂ |
|---------------------------------|-----------------|---|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Pornire și funcționare ca motor | x | x | x | x | x | | | | | x | x |
| Frînare reostatică | | | | | | x | x | x | | | |
| Frînare recuperativă și mixtă | x | | | | | x | x | x | x | x | x |

Pentru pornirea la sarcină minimă se acționează asupra rezistenței variabile R₁ pînă cînd ampermetrul A₂ indică 30 A.

Schema de comandă din fig. 53 bis dă posibilitatea alimentării motorului cu impulsuri de tensiune avînd frecvența de 200 Hz și de 400 Hz. În felul acesta am putut verifica valorile curenților din tabelul 1 pentru T = 0,005 S și T = 0,0025 prezentate în tabelul 4, iar compararea rezultatelor și abaterile rezultă din tabelul 5.

Tabelul 4

| Valori medii măsurate (A) | T = 0,005 | T = 0,0025 |
|--|-----------|------------|
| Curentul la pornire | 35,7 | 36,2 |
| Curentul corespunzător funcționării la turația de 1445 rot/min | 95,7 | 96,2 |
| Curentul la frînare dinamică | 67,2 | 52,5 |

Tabelul 5

| Regimul | T (S) | Valori medii (A) | | Abateri % (față de cele calculate) |
|---------------------|----------|------------------|----------|---|
| | | calculate | măsurate | |
| Pornire | 0,005 | 30,15 | 35,7 | + 18,4 |
| | 0,0025 | 36,25 | 36,2 | + 19,6 |
| Funcționare | 0,005 | 72,4 | 60 | - 17 |
| | 0,0025 | 80,9 | 60,5 | - 25,0 |
| Frînare dinamică | 0,005 | 64,5 | 67,2 | + 4 |
| | 0,0025 | 47,3 | 52,5 | + 11,4 |

În funcționare s-a măsurat curentul de sarcină pentru care turația motorului a fost de 1445 rot/min și tensiunea la bornele acestuia de 720 V (0,96 x 750) așa cum s-a calculat de fapt cu ajutorul relațiilor (6), (7), (8).

Abaterile valorilor măsurate față de cele calculate cu ajutorul relațiilor deduse se găsesc în limitele normale. Ele au apărut ca urmare a faptului că la efectuarea calculelor s-au neglijat o serie de elemente și fenomene ce au loc în motor ca urmare a alimentării acestuia cu tensiune sub formă de impulsuri.

În relațiile de calcul s-a considerat reactanța motorului constantă, s-a neglijat reactanța și rezistența conductoarelor de legătură, s-a făcut abstracție de fenomenul de saturație etc.

Rezultă că relațiile de calcul deduse sînt corecte și pot fi aplicate în bune condiții pentru determinarea curenților motorului comandat prin variator de tensiune continuă.

Măsurătorile efectuate pe tramvaiul Timiș 1 echipat cu variator de tensiune continuă asupra accelerației la pornire la curentul maxim de pornire au evidențiat valori cu 15% mai mari decît cele măsurate la același tip de tramvai echipat cu reostat de pornire. Diferența față de valoarea calculată și prezentată în tabelul 2 (66%) se explică prin aceea că raportul constantelor de timp $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ este sensibil influențat de valoarea GD^2 a vehiculului raportată la axul motorului.

În tabelul 6 am prezentat principalele elemente care stau la baza comparării schemei propuse de mine pentru acționarea elec-

... / ...

trică a tramvaiului la noi în țară cu alte scheme similare.

Din acest tabel se constată că schema propusă de mine este astfel dimensionată încât fiecare variator să poată fi folosit la o putere de 300 KW. Variatoarele sînt comandate decalat cu o semiperioadă pentru $0,2 \leq \delta \leq 0,8$ astfel că filtrul de rețea se dimensionează pentru frecvența de 400 Hz.

Cu toate că conține două variatoare și realizează aceleași funcții ca și schema tramvaiului ACEC, schema propusă se caracterizează prin diminuarea numărului de diode cu 50% numărul contactelor mecanice fiind mai mare doar cu 25%.

Fiabilitatea calculată în aceleași condiții și pentru aceleași valori ale intensității de defectare a elementelor componente este mai mare cu 6% la schema propusă de mine decît cea corespunzătoare schemei tramvaiului KT(RSC), cu 7 % față de schema tramvaiului Timiș 1 și cu 8,6 % față de schema ACEC

Comparație între schema propusă și alte
schemă similare pentru acționarea
tramvaiului

Tabelul 6

| Elemente de comparație | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|----------------------|--|--|---|-------------------------|---|------|--------|
| Schema | Puterea nominală a variatorului (kW) | Tensiunea Felul nominală (V) | Frecv. de lucru (Hz) | Nr. de țigane (buc) | Nr. contacte- lor semiconducător (buc) | Nr. elemente- lor semiconducător (buc) | toarelor electrice ca slăbirea de bună fluxului funcționare (buc) | Nr. treptelor de litate | Probabilitatea de litate | R(t) | |
| Schema propusă | 300 | 750 | decalată prin lățimea impulsurilor | 200 | 2 | 15 | 3 | 2 | mixtă motoarele funcționând cu înfăș. de excitație serie în-crușișate | 3 | 0,6136 |
| Schema tramvaiului Timiș 1 | 150 | 750 | prin lățime și prin frecv. impulsurilor | min. 120 max. 350 | 2 | 20 | 4 | 2 | reostatică motoarele funcționând cu excitație separată. Variatoarele reglează curentul de excitație | 2 | 0,758 |
| Schema tramvaiului ACEC | 300 | 750 | prin lățimea impulsurilor | 200 | 4 | 12 | 6 | 1 | mixtă motoarele funcționând cu înfăș. de excitație serie încrușișate | 1 | 0,748 |
| Schema tramvaiului KT (KSC) | 100 | 600 | prin lățimea impulsurilor | 400 | 4 | 2 | 2 | 2 | nu este prevăzută | 1 | 0,769 |