



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2019 00675

(22) Data de depozit: 24/10/2019

(41) Data publicării cererii:
30/06/2020 BOPI nr. 6/2020

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA,
STR.ALEXANDRU IOAN CUZA NR.13,
CRAIOVA, DJ, RO

(72) Inventatori:
• POPESCU MIHAELA,
CALEA BUCUREȘTI, NR.47, BL.27D, AP.8,
CRAIOVA, DJ, RO;

• BITOLEANU ALEXANDRU,
STR. ÎMPĂRATUL TRAIAN NR.1, BL.G,
SC.1, AP.10, CRAIOVA, DJ, RO

Această publicație include și modificările descrierii,
revendicărilor și desenele depuse conform art. 35,
alin. (20), din HG nr. 547/2008.

(54) METODĂ DE COMANDĂ OPTIMALĂ A MOTOARELOR
ASINCRONE DE TRACȚIUNE A LOCOMOTIVELOR
AUTONOME, BAZATĂ PE CONTROLUL FRECVENȚEI
DE ALUNECARE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă de control al motoarelor asincrone de tracțiune ale locomotivelor autonome. Metoda, conform invenției, se bazează pe faptul că, în orice punct staționar de funcționare a motorului asincron, există o valoare optimă a frecvenței de alunecare care maximizează randamentul motorului, iar dependența frecvenței de alunecare optime de viteză, la curent constant, este liniară pe două domenii de variație a vitezei, pe faptul că realizarea proceselor dinamice de accelerare sau decelerare, cu accelerațiile cerute de vehicul, se obțin tot prin controlul frecvenței rotorice de alunecare, prin forțarea valorilor optime corespunzătoare regimului staționar, rezultând tot o variație liniară, și pe modalitatea de modificare a frecvenței rotorice de alunecare la trecerea din regimul dinamic în regimul staționar și invers, astfel încât să nu existe șocuri dinamice nepermise, metoda cuprinzând descompunerea regimului tranzitoriu în două etape: regim tranzitoriu greu, când eroarea relativă de viteză (ϵ_v) depășește o limită impusă (ϵ_{vimp}), și regim tranzitoriu ușor, când eroarea relativă de viteză este egală cu sau sub limita impusă.

Revendicări inițiale: 12
Revendicări amendate: 7
Figuri: 8

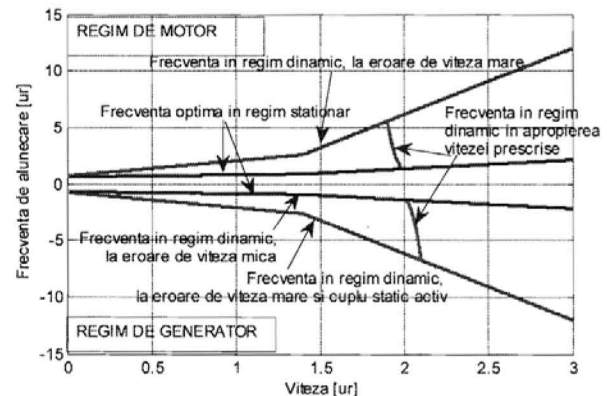


Fig. 7

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



**METODĂ DE COMANDĂ OPTIMALĂ A MOTOARELOR ASINCRONE DE
TRACȚIUNE A LOCOMOTIVELOR AUTONOME, BAZATĂ PE CONTROLUL
FRECVENȚEI DE ALUNECARE**

DESCRIEREA INVENȚIEI

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI Cerere de brevet de invenție Nr. <i>a 2019 00 675</i> Data depozit <i>24-10-2019</i>
--

Domeniul invenției

Invenția se referă la o metodă de control a motoarelor asincrone de tracțiune, bazată pe frecvența de alunecare optimală în regim staționar, care maximizează randamentul motorului. Concret, invenția propune o metodă pentru determinarea univocă a frecvenței de alunecare pentru un motor asincron dat, pentru fiecare din regimurile specifice tracțiunii electrice: regim de motor (regim dinamic de accelerare sau decelerare, regim staționar și trecerea din regim dinamic în regim staționar și invers); regim de frână cu recuperare de energie (regim dinamic de decelerare, regim staționar și trecerea din regim dinamic în regim staționar și invers).

Descrierea stadiului actual

Comanda motoarelor asincrone prin controlul frecvenței de alunecare este cunoscută și constă în determinarea frecvenței tensiunii de alimentare a motorului prin adăugarea unei cantități determinate, la frecvența corespunzătoare vitezei.

Cu referire la Fig. 1, care reprezintă structura clasică a sistemului de reglare bazat pe "frecvență rotorică constantă", după măsurarea vitezei motorului asincron (13) cu traductorul T_{ω} (8), semnalul obținut este convertit în frecvență prin multiplicare cu o constantă în blocul (6), iar prin adăugare la frecvența de alunecare impusă, în sumatorul (5), se obține frecvența tensiunii de alimentare a motorului.

Deși foarte simplu de implementat, metoda are o aplicabilitate limitată datorită a două dezavantaje principale.

1. Necesitatea unor dispozitive de calcul cu precizie ridicată, datorită ponderii reduse a frecvenței de alunecare comparativ cu frecvența de rotație, mai ales la viteze (frecvențe) mari.
2. Performanțele obținute prin menținerea constantă a frecvenței de alunecare în toată gama de viteze, sunt reduse.

Primul dezavantaj și-a pierdut din importanță odată cu dezvoltarea sistemelor de calcul bazate pe procesarea digitală a semnalelor (DSP) [1], [2].

Al doilea dezavantaj se manifestă mai pronunțat în cazul motoarelor destinate tracțiunii electrice, unde frecvența corespunzătoare vitezei maxime este de până la de trei ori frecvența nominală [3].

Pentru diminuarea efectelor acestui dezavantaj s-au propus diverse metode, unele complexe și necesitând un timp de calcul mare și implicit, o precizie scăzută, altele fără argumente tehnice solide.

Astfel, [CN104485867 (A) — 2015-04-01] [4], furnizează o metodă de control a motorului asincron bazată pe limitarea frecvenței de alunecare la de două ori frecvența de alunecare nominală, fără a argumenta cum s-a găsit această valoare, iar [CN102783013 (A) — 2012-11-14] [5], propune determinarea frecvenței efective a alunecării printr-un proces iterativ de modificare a parametrilor modelului și compararea frecvenței efective de alunecare cu valoarea obținută de la un estimator. [CN102694499 (A) — 2012-09-26] [6] propune ca, la frecvența de alunecare calculată prin metoda convențională, să se adauge un increment calculat printr-o metodă adaptivă care ține seama de modificarea parametrilor variabili ai motorului în vederea estimării cu precizie a poziției câmpului magnetic al rotorului. În [DE4032056 (C1) — 1992-05-21] [7], se propune ca frecvența de alunecare a motorului asincron să fie calculată din cuplul intern divizat la pătratul fluxului rotorului. [US2013271061 (A1) — 2013-10-17] [8]

propune o metodă de control care reduce (minimizează) pierderile electrice, pentru o clasă particulară de aplicații. [RU2402865 (C1)-2010-10-27] [9] valorifică rezultatele teoretice bazate pe un model simplificat al motorului asincron obținut prin simplificări grosiere care conduc la două rezultate principale: frecvența de alunecare optimă în regim staționar ("minimizează pierderile") nu depinde de cuplul static (rezistent)/curentul static și este invers proporțională cu frecvența tensiunii de alimentare sau depinde numai de cuplu și nu depinde de viteză; frecvența de alunecare optimă în regim dinamic ("corespunzătoare valorilor de limitare ale curentului și tensiunii") se obține prin înmulțirea cu un coeficient care nu depinde de cuplu/curent și este, aproximativ, proporțional cu viteza.

Scopul general al invenției propuse este de a îmbunătăți stadiul tehnicii în domeniul comenzii motoarelor asincrone de tracțiune a locomotivelor autonome, prin maximizarea randamentului la funcționarea în regim staționar și respectarea cu mai multă acuratețe, a performanțelor impuse în regim tranzitoriu și a limitării solicitărilor electromecanice, prin aplicarea unei frecvențe de alunecare variabile în funcție de viteza și curentul/cuplul punctelor de funcționare.

Descrierea detaliată a invenției

Conform invenției, aceasta are la bază trei rezultate originale obținute de către autori, prin analiza detaliată a comportării unui motor asincron destinat tracțiunii electrice a locomotivelor autonome. Primul rezultat, constă în aceea că, în orice punct staționar de funcționare, există o valoare optimă a frecvenței de alunecare care maximizează randamentul motorului [10]. Fig. 2 pune în evidență acest rezultat în condițiile de limitare a tensiunii de alimentare la $1.2U_N$ și respectiv, limitarea curentului la valoarea nominală, în toată gama de reglare a vitezei ($0 - 3n_N$), condiții obligatorii în tracțiunea electrică.

Conform invenției, frecvența de alunecare optimă corespunzătoare unui punct staționar de funcționare (cuplu, viteză) sau (curent, viteză) este determinată utilizând modelul complet al motorului asincron în regim staționar, cu luarea în considerare a dependenței inductivității ciclice de magnetizare (L_m) și a rezistenței corespunzătoare pierderilor principale în miezul magnetic (R_m), în funcție de gradul de saturație.

Conform invenției, pentru a determina parametrii motorului care sunt variabili (L_m , R_m), dar și toate mărimile electromecanice corespunzătoare unui punct static de funcționare impus, se utilizează caracteristica de magnetizare a motorului și un algoritm iterativ prezentat în sinteză în Fig. 3, în care apar mărimile: ψ_m – fluxul magnetic util; I_m – curentul de magnetizare; E_m – tensiunea electromotoare de magnetizare la pasul anterior; E_{mc} – tensiunea electromotoare de magnetizare la pasul curent; p_{fe} – pierderile principale în miezul magnetic; ε_E – eroarea admisă la calcularea tensiunii electromotoare de magnetizare; U_M – tensiunea maximă admisă; ε_i – eroarea admisă la calcularea curentului.

Conform invenției, pentru a calcula frecvența de alunecare optimă corespunzătoare unui punct staționar de funcționare impus, se utilizează o metodă îmbunătățită de căutare, care exploatează aspectul tehnic că maximul randamentului este unic și că, pornind de la valori suficient de mici ale frecvenței de alunecare, randamentul este crescător (Fig. 2). Metoda este prezentată în sinteză în Fig. 4, în care apar mărimile: η_{k-1} – randamentul la pasul anterior; η_k – randamentul la pasul curent; df_2 – pasul curent cu care se modifică frecvența de alunecare; df_{2min} – pasul minim al frecvenței de alunecare la care se consideră că optimul a fost găsit cu suficientă precizie.

Conform invenției, la calculul randamentului motorului în vederea găsirii valorii maxime a acestuia și, implicit, a frecvenței de alunecare optime, se iau în considerare toate pierderile principale în motor.

Conform invenției, pentru motorul analizat (Anexa 1), dependența frecvenței de alunecare optime în funcție de viteză, la curent constant, este liniară pe două domenii de variație

ale vitezei (Fig. 5), iar punctul de frângere, respectiv de modificare a coeficientului unghiular al dreptelor, este determinat de restricția de limitare a tensiunii la valoarea $1.2U_N$ și coincide cu punctul în care apare limitarea (Fig. 6).

Conform invenției, al doilea rezultat constă în faptul că, realizarea proceselor dinamice de accelerare sau decelerare, cu accelerațiile cerute de vehicul, pot fi obținute tot prin controlul frecvenței rotorice de alunecare, prin "forțarea" valorilor optime corespunzătoare regimului staționar, rezultând tot o variație liniară, așa cum se arată în fig. 7.

Conform invenției, al treilea rezultat se referă la modalitatea de modificare a frecvenței rotorice de alunecare la trecerea din regim dinamic în regim staționar și invers, astfel încât să nu existe șocuri dinamice nepermise (depășirea curentului maxim admisibil, supratensiuni, suprareglare în evoluția vitezei). Conform invenției, se propune descompunerea regimului tranzitoriu în două etape: regim tranzitoriu greu, când eroarea relativă de viteză (ε_v) depășește o limită impusă (ε_{vimp}) și regim tranzitoriu ușor, când eroarea relativă de viteză este egală sau sub limita impusă.

Dacă v^* este viteza dorită, iar v_r este viteza reală, eroarea relativă de viteză este definită prin ecuația (1),

$$\varepsilon_v = \frac{v^* - v_r}{v^*} \quad (1)$$

Conform invenției, regimul tranzitoriu ușor este definit de condiția (2) în care, x_1 este un număr subunitar, iar x_2 este un număr supraunitar.

$$x_1 v^* \leq v_r \leq x_2 v^* \quad (2)$$

Conform invenției, dacă v_m și v_M sunt vitezele minimă și maximă ale gamei de reglare, v_f este viteza de frângere a caracteristicii de comandă optimală, $f_{2o}/f_{2N} = f(v/v_N)$, iar k_1 , k_2 și k_3 sunt factorii de forțare a frecvenței de alunecare optime corespunzătoare celor 3 viteze, parametrii dreptelor pe care evoluează frecvența de alunecare în regim tranzitoriu greu de accelerare se calculează cu relațiile:

$$m_1 = \frac{(k_2 - k_1)}{(v_2 - v_1)/v_N}; \quad n_1 = \frac{(k_1 v_2 - k_2 v_1)}{(v_2 - v_1)}; \quad (3)$$

$$m_2 = \frac{(k_3 - k_2)}{(v_3 - v_2)/v_N}; \quad n_2 = \frac{(k_2 v_3 - k_3 v_2)}{(v_3 - v_2)} \quad (4)$$

Conform invenției, se propune ca, în apropierea vitezei dorite (regim tranzitoriu ușor de accelerare), frecvența rotorică de alunecare să aibă variație parabolică, astfel încât: a) să existe continuitatea frecvenței cu variația din regim tranzitoriu greu; b) frecvența rotorică de alunecare să evolueze pe o parabolă cu vârful în punctul staționar de funcționare (Fig. 7).

Conform invenției, dacă f_{di} este frecvența de alunecare corespunzătoare vitezei $x_1 \cdot v^*$ pe caracteristica în regim tranzitoriu greu, iar f_{2o}^* este frecvența optimă de alunecare corespunzătoare vitezei prescrise (v^*), coeficienții a , b și c ai parabolei pentru regim tranzitoriu ușor de accelerare, se calculează cu relațiile:

$$a = \frac{(f_{di} - f_{2o}^*)}{f_{2N}(v^*/v_N)^2(1 - x_1)^2}; \quad b = -2a_1 \cdot \left(\frac{v^*}{v_N}\right); \quad c = \frac{f_{2o}^*}{f_{2N}} + a_1 \cdot \left(\frac{v^*}{v_N}\right)^2 \quad (5)$$

Conform invenției, f_2 este frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curente ale vitezei și curentului pentru următoarele regimuri:

- în regim staționar;
- în regim greu/ușor de accelerare peste viteza prescrisă;
- decelerare ca motor, în regim greu sub viteza prescrisă și regim ușor sub/peste viteza prescrisă;
- ca generator, în regim ușor peste viteza prescrisă.

Conform invenției, la decelerare ca motor, în regim greu peste viteza prescrisă, f_2 este frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curenți ale vitezei și curentului nominal.

Conform invenției, la funcționarea ca generator, în regim greu peste viteza prescrisă, f_2 este frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curenți ale vitezei și curentului nominal, corectată cu un factor de stabilizare care ține seama de valoarea și semnul erorii de viteză (k_s),

$$k_s = 1 - \frac{\delta\omega}{\Omega_N}. \quad (6)$$

Conform invenției, trecerea din regim staționar în regim dinamic se face prin variație liniară a frecvenței de alunecare, cu limitarea pantei de variație la o valoare dependentă de constanta mecanică (T_m) a ansamblului vehicul-motor și de variația admisă a frecvenței de alunecare, cu relațiile:

$$\left(\frac{df_2}{dt}\right)_{lim} \geq \frac{|\Delta f_2|_{max}}{T_m}; \quad T_m = \frac{J\Omega_N}{2M_k}. \quad (7)$$

În constanta mecanică intervin: momentul de inerție total raportat la arborele motorului (J); viteza unghiulară nominală a motorului (Ω_N) și cuplul critic (M_k).

Conform invenției, până la viteza corespunzătoare punctului de frângere (în care apare limitarea de tensiune), frecvența de alunecare optimă determină, pe lângă maximizarea randamentului, și menținerea constantă, la valoarea nominală, a fluxului de magnetizare util (Fig. 8), ceea ce constituie condiția necesară pentru obținerea unor performanțe dinamice ridicate.

Conform invenției, în regim de frână, frecvența rotorică de alunecare este cea corespunzătoare regimului de tracțiune dar are semnul minus ("−") (Fig. 7).

Conform invenției, metoda de comandă poate fi aplicată și pentru alte sisteme de tracțiune electrică cu motor asincron în scurtcircuit și inverter de tensiune.

Conform invenției, metoda de comandă propusă are avantaje importante în raport cu soluțiile existente, deoarece este mai simplă de implementat și determină mai precis, atât frecvența optimă de alunecare în regim staționar care maximizează randamentul motorului, cât și frecvența de alunecare în regim tranzitoriu care conduce la performanțe dinamice foarte bune.

REVENDICĂRI

1. Metodă optimală de comandă a motoarelor asincrone de tracțiune a locomotivelor autonome, bazată pe controlul frecvenței de alunecare, caracterizată prin aceea că, **realizează determinarea univocă a frecvenței de alunecare optime pentru un motor asincron dat, pentru fiecare din regimurile specifice tracțiunii electrice: regim de tracțiune (regim dinamic de accelerare sau decelerare, regim staționar și trecerea din regim dinamic în regim staționar și invers); regim de frână cu recuperare de energie (regim dinamic de decelerare, regim staționar și trecerea din regim dinamic în regim staționar și invers).**
2. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **permite calcularea off-line, în orice punct staționar de funcționare, a valorii optime a frecvenței de alunecare care maximizează randamentul motorului, utilizând un model virtual care ține seama de variația inductivității ciclice de magnetizare și a rezistenței de magnetizare în funcție de gradul de saturație al motorului și ia în considerare toate pierderilor principale în motor.**
3. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **propune descompunerea regimului tranzitoriu în două etape: regim tranzitoriu greu, când eroarea relativă de viteză (ε_v) depășește o limită impusă (ε_{vimp}) și regim tranzitoriu ușor, când eroarea relativă de viteză este egală sau sub limita impusă.**
4. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **realizarea proceselor dinamice de accelerare sau decelerare, cu accelerațiile cerute de vehicul, se obțin prin controlul frecvenței rotorice de alunecare, prin "fortarea" valorilor optime corespunzătoare regimului staționar, tot prin variație liniară.**
5. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **în apropierea vitezei dorite (regim tranzitoriu ușor), la accelerare, frecvența rotorică de alunecare are variație parabolică, astfel încât există continuitatea frecvenței cu variația din regim tranzitoriu greu, iar frecvența rotorică de alunecare evoluează pe parabole cu vârful în punctul staționar de funcționare și sunt definiți parametrii celor două parabole, prin ecuațiile (5).**
6. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 2, caracterizată prin aceea că, **dependența frecvenței de alunecare optime în funcție de viteză, la curent constant, este liniară pe două domenii de variație ale vitezei, iar punctul de frângere, respectiv de modificare a coeficientului unghiular al dreptelor, este determinat de restricția de limitare a tensiunii la valoarea $1.2U_N$ și coincide cu punctul în care apare limitarea.**
7. Metodă ca la revendicarea 2, caracterizată prin aceea că, **până la viteza corespunzătoare punctului de frângere (în care apare limitarea de tensiune), frecvența de alunecare optimă determină menținerea constantă, la valoarea nominală, a fluxului de magnetizare util, ceea ce constituie condiția necesară pentru obținerea unor performanțe dinamice ridicate.**
8. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 4, caracterizată prin aceea că, **definește coeficienții dreptelor pe care evoluează frecvența de alunecare în regim tranzitoriu greu de accelerare prin ecuațiile (3) și (4).**
9. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 4, caracterizată prin aceea că, **frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curenți ale vitezei și curentului este frecvența rotorică prescrisă pentru regimurile: regim staționar; regim greu/ușor de accelerare peste viteza prescrisă; decelerare ca motor, în regim greu sub viteza prescrisă și regim ușor sub/peste viteza prescrisă; ca generator, în regim ușor peste viteza prescrisă.**

10. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 4, caracterizată prin aceea că, **frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curente ale vitezei și curentului nominal este frecvența rotorică prescrisă pentru regimul de decelerare ca motor, în regim greu peste viteza prescrisă.**
11. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 4, caracterizată prin aceea că, **la funcționarea ca generator, în regim greu peste viteza prescrisă, frecvența rotorică impusă este frecvența optimă de alunecare corespunzătoare valorilor curente ale vitezei și curentului nominal, corectată cu un factor de stabilizare care ține seama de valoarea și semnul erorii de viteză (k_s), definit prin ecuația (6).**
12. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 4, caracterizată prin aceea că, **trecerea din regim staționar în regim dinamic se face prin variație liniară a frecvenței de alunecare, cu limitarea pantei de variație la o valoare dependentă de constanta mecanică a ansamblului vehicul-motor și de variația admisă a frecvenței de alunecare și definește valoarea minimă a pantei prin ecuațiile (7).**

DESENELE EXPLICATIVE

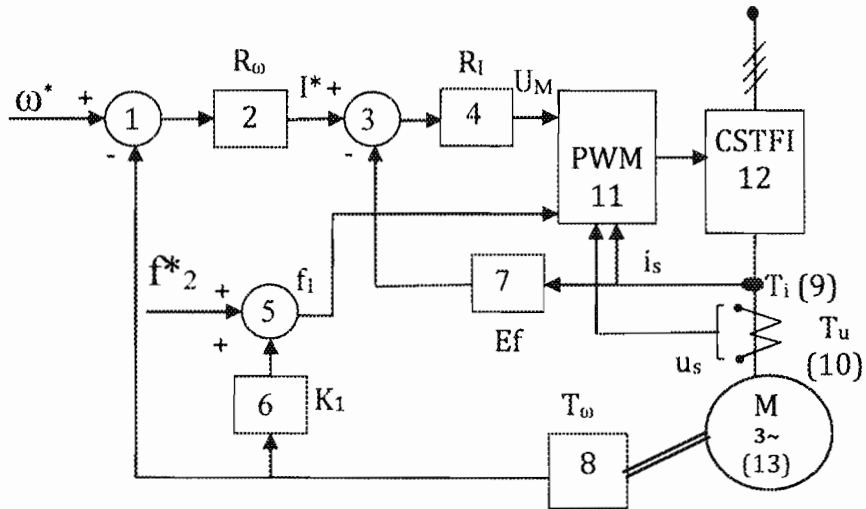


Fig. 1.

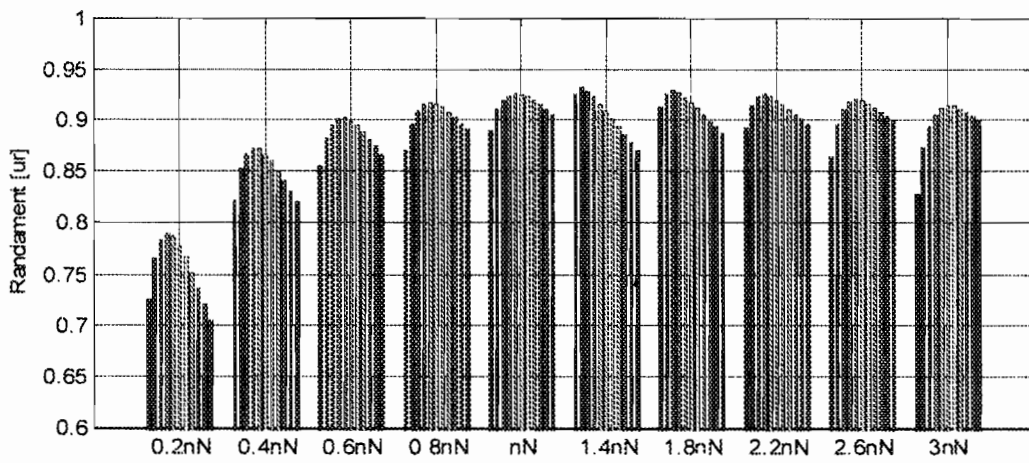


Fig. 2.

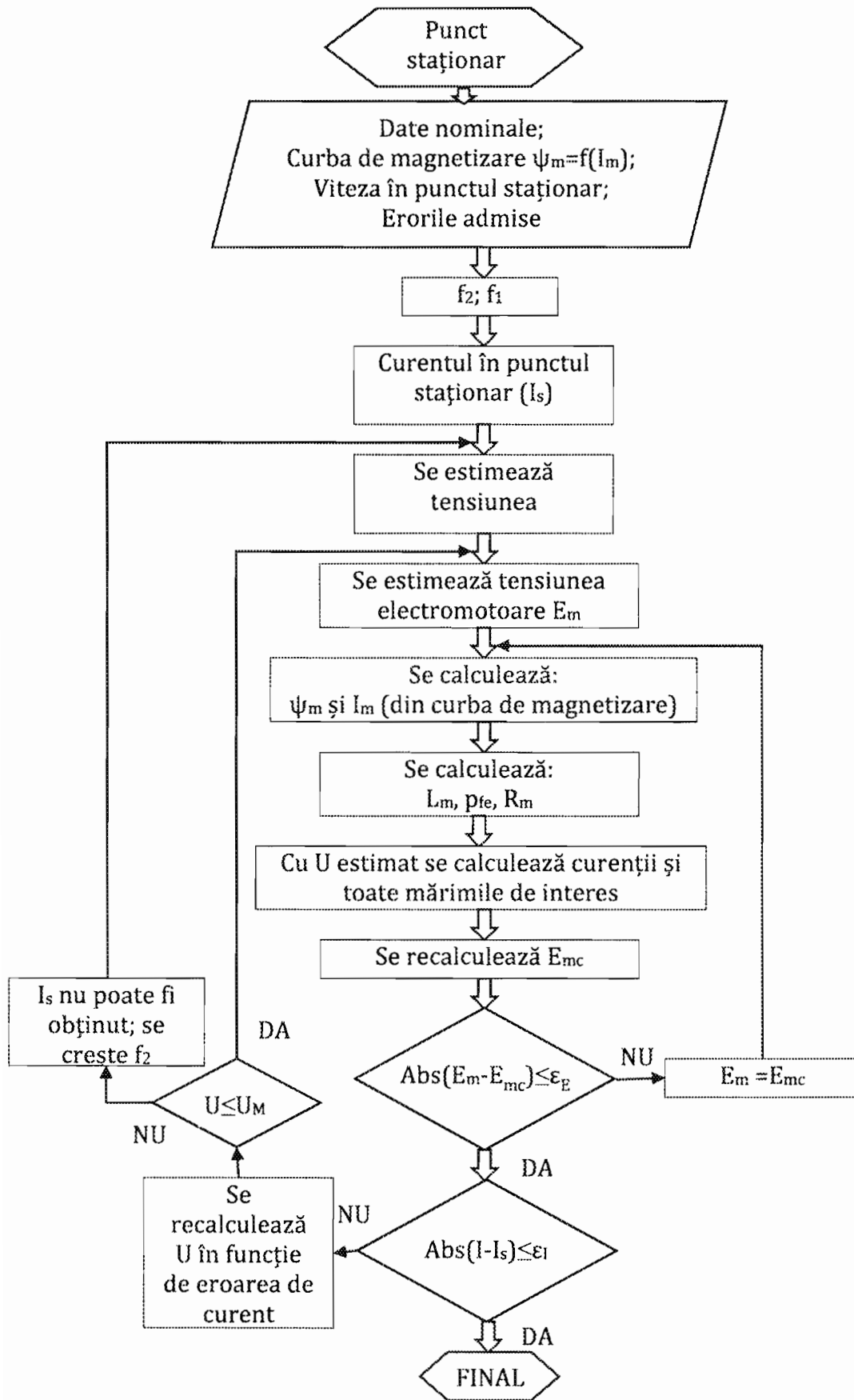


Fig. 3.

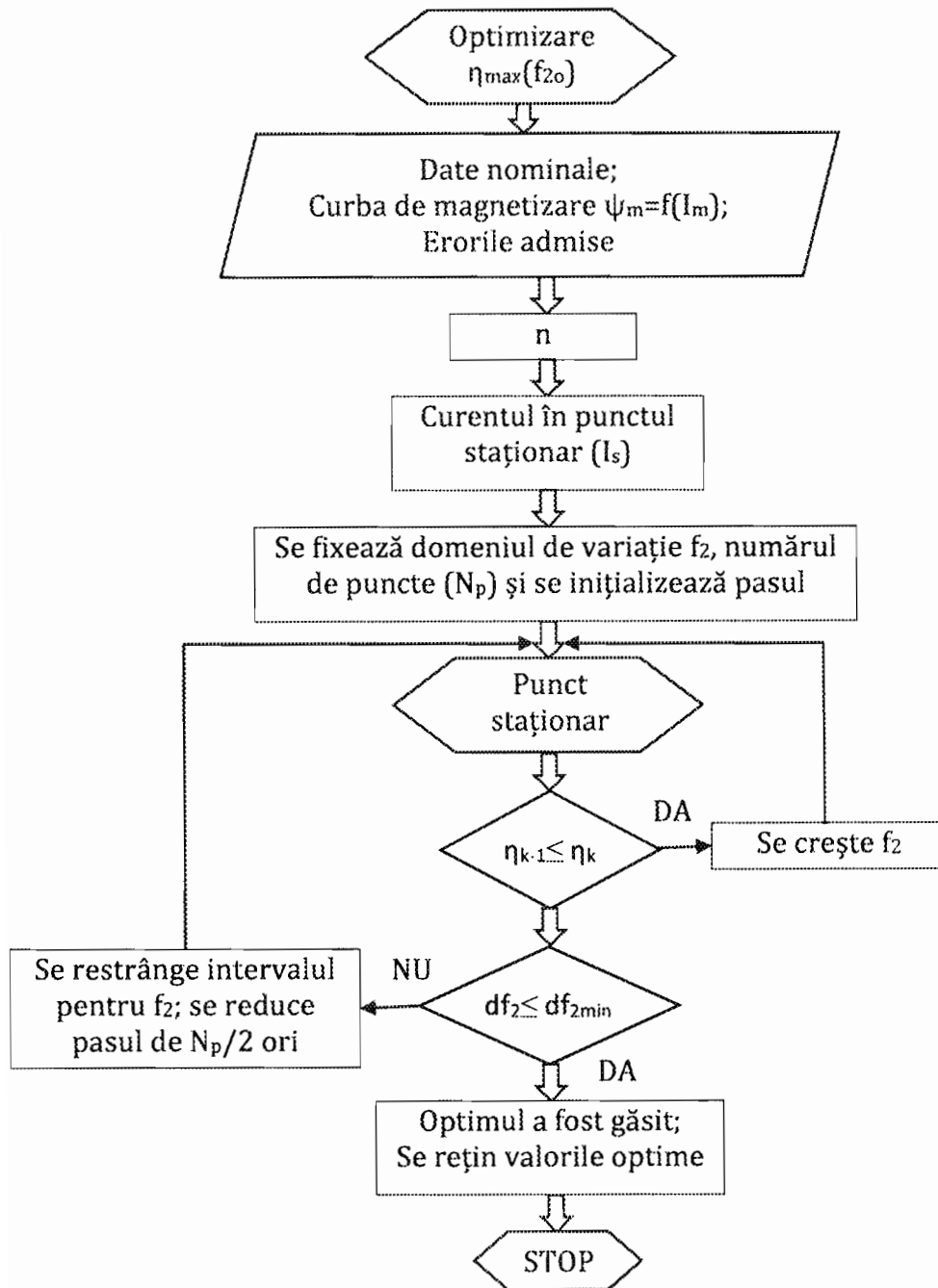


Fig. 4.

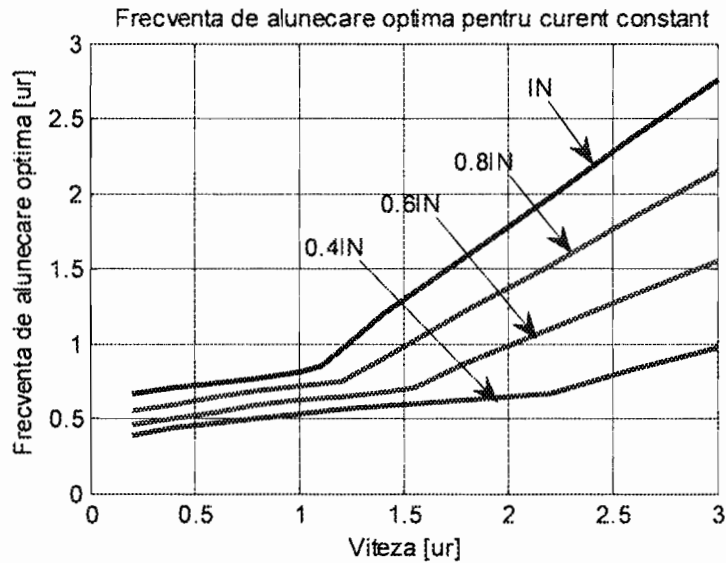


Fig. 5.

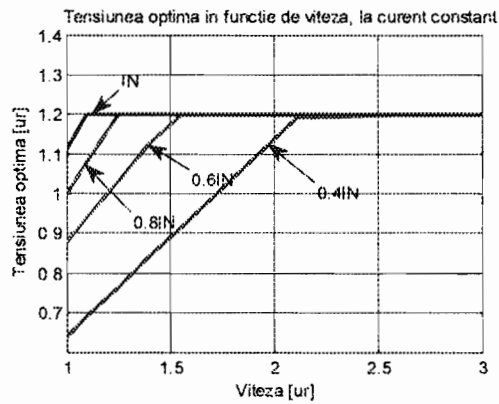


Fig. 6.

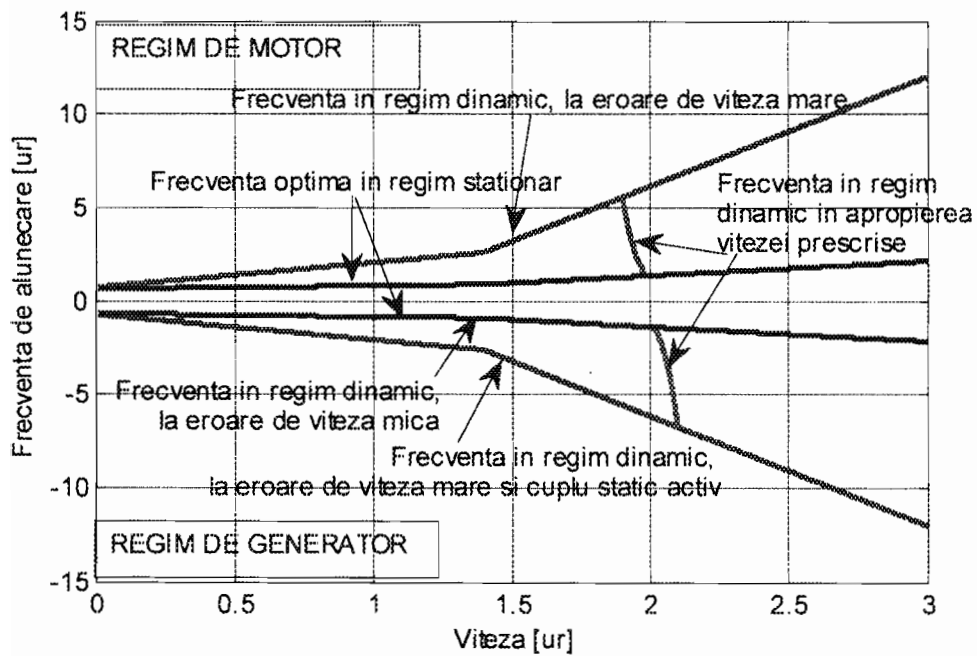


Fig. 7.

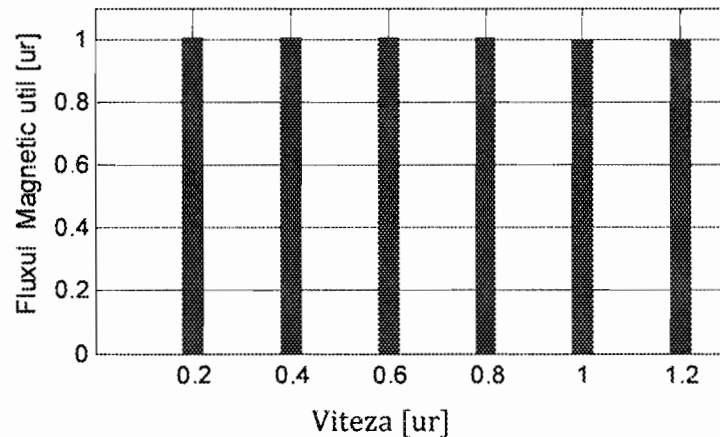


Fig. 8.

Scurtă descriere a desenelor

Semnificația figurilor care însoțesc prezenta propunere de invenție este prezentată în continuare.

Fig. 1 reprezintă structura clasică a sistemului de reglare bazat pe "frecvență rotorică constantă".

Fig. 2 reprezintă dependența randamentului motorului în funcție de frecvența de alunecare (o bară corespunde unei valori), pentru diferite valori ale vitezei și arată existența frecvenței rotorice optime, care maximizează randamentul motorului, în toată gama de viteză.

Fig. 3 reprezintă schema logică a algoritmului iterativ pentru determinarea parametrilor motorului care sunt variabili (L_m , R_m), dar și toate mărimile electromecanice corespunzătoare unui punct static de funcționare impus.

Fig. 4 reprezintă schema logică a metodei îmbunătățite de căutare pentru calculul frecvenței de alunecare optime corespunzătoare unui punct staționar de funcționare impus.

Fig. 5 arată că dependența frecvenței de alunecare optime în funcție de viteză, la curent constant, este liniară pe două domenii de variație ale vitezei.

Fig. 6 arată că punctul de frângere, respectiv de modificare a coeficientului unghiular al dreptelor, este determinat de restricția de limitare a tensiunii la valoarea $1.2U_N$ și coincide cu punctul în care apare limitarea.

Fig. 7 este explicativă asupra evoluției frecvenței rotorice prescrise în funcție de: regimul de funcționare (tracțiune/frână); regimul staționar/dinamic; zona de apartenență a vitezei în raport cu viteza prescrisă.

Fig. 8 reprezintă dependența fluxului de magnetizare util corespunzător frecvenței de alunecare optime, pentru diferite valori ale vitezei și arată că, în regim staționar, fluxul de magnetizare util se menține constant la valoarea nominală.

REVENDICĂRI

1. Metodă optimală de comandă a motoarelor asincrone de tracțiune a locomotivelor autonome, bazată pe controlul frecvenței de alunecare, caracterizată prin aceea că, **frecvența rotorică de comandă pentru regimurile dinamice, la funcționarea în regim de tracțiune (accelerare sau decelerare), și pentru regimurile staționar și dinamic, la funcționarea în regim de frână cu recuperare de energie, se determină pe baza valorilor optime care maximizează randamentul motorului de tracțiune în regim staționar, în funcție de viteza și curentul/cuplul la momentul respectiv.**
2. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **frecvența rotorică de comandă pentru regim tranzitoriu de accelerare greu (când eroarea relativă de viteză depășește o limită impusă), are variație liniară în funcție de viteză, iar parametrii dreptelor de dependență sunt definiți prin relațiile (3) și (4).**
3. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **frecvența rotorică de comandă pentru regim tranzitoriu ușor de accelerare (când eroarea relativă de viteză nu depășește o limită impusă), se determină din ecuația unei parabole și definește parametrii parabolilor, prin ecuațiile (5).**
4. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **valorile frecvenței rotorice de comandă sunt egale cu valorile optime în regim staționar de motor corespunzătoare valorilor curente ale vitezei și curentului, pentru următoarele regimuri de funcționare: accelerare peste viteza prescrisă; decelerare ca motor în regim ușor; decelerare ca motor în regim greu sub viteza prescrisă; ca generator în regim ușor peste viteza prescrisă.**
5. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **frecvența rotorică de comandă pentru regimul greu de decelerare ca motor, este frecvența optimă de alunecare a regimului staționar de motor, corespunzătoare curentului nominal și valorilor curente ale vitezei.**
6. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **frecvența rotorică de comandă pentru funcționarea ca generator peste viteza prescrisă și în regim tranzitoriu greu, este frecvența optimă de alunecare a regimului staționar de motor, corespunzătoare curentului nominal și valorilor curente ale vitezei, corectată cu un factor de stabilizare care ține seama de valoarea și semnul erorii de viteză (ks), definit prin ecuația (6).**
7. Metodă optimală de comandă ca la revendicarea 1, caracterizată prin aceea că, **determină frecvența rotorică de alunecare la trecerea din regim staționar în regim dinamic prin variație liniară, cu limitarea pantei de variație la o valoare dependentă de constanta mecanică a ansamblului vehicul-motor și de variația admisă a frecvenței de alunecare și definește valoarea minimă a pantei prin ecuațiile (7).**

