e-LEE
e-Learning tools for Electrical Engineering

Determinarea parametrilor

Tematica: *Maşini electrice*
→ ***Capitol:*** *Maşina asincronă*
→ ***Secţiunea:*** *Ecuaţii de funcţionare*

Tip resursă: ☐ *Expunere* ☒ *Laborator virtual / Exerciţiu* ☐ *CVR*

În această lucrare de laborator, se prezintă metodele de determinare a parametrilor schemei electrice echivalente a maşinii asincrone

- rezistenţa unei faze a statorului, R_1
- rezistenţa, raportată la stator, a unei faze a rotorului, R'_2
- inductivitatea de magnetizare, L_m
- inductivitatea de dispersie a unei faze a statorului, $L_{1\sigma}$ sau $L_{s\sigma}$
- inductivitatea de dispersie, raportată la stator, a unei faze a rotorului, $L'_{2\sigma}$ sau $L_{r\sigma}$

şi a celor mecanici

- momentul de inerţie al rotorului, J
- coeficientul de frecări vâscoase k_v
- cuplul de frecări uscate m_f

necesari atât studiului prin simulare a sistemelor de acţionare cu motor asincron, cât parametrării schemelor de reglare aferente.

- cunoştinţe anterioare necesare: ecuaţii de funcţionare, scheme echivalente
- nivel: ciclul 2
- durata estimată: 1,5 h.
- autor: Sergiu Ivanov
- realizare: Sergiu Ivanov, Florin Ravigan

Resursă realizată cu sprijin financiar din partea Comunităţii Europene. Documentul de faţă nu angajează decât responsabilitatea autorului(rilor) lui. Comisia îşi declină orice responsabilitate ce ar putea decurge din utilizarea lui.

Enunțul lucrării de laborator

În primul rând, trebuie să se identifice datele nominale ale maşinii, înscrise pe plăcuța indicatoare. Aceasta poate conține, pe lângă valorile esențiale, necesare identificării maşinii, şi alte informații privind regimul de utilizare.

Informațiile prezente întotdeauna pe plăcuța indicatoare şi necesare pentru determinarea parametrilor schemei echivalente, se referă la:

- *Puterea nominală*, P_N, [W], [kW], sau [HP] - pentru o maşină ce este destinată să funcționeze ca **motor**, puterea nominală este **puterea mecanică** utilă la arbore. Pentru o maşină destinată să funcționeze ca **generator**, puterea nominală este **puterea electrică** disponibilă la borne;
- *Tensiunea nominală*, U_N, [V] - pentru o maşină trifazată, această valoare este cea a tensiunii **de linie**. În cazul în care ambele capete ale înfăşurărilor statorice sunt disponibile, pentru a se realiza fie conexiunea stea (Y) , fie triunghi (Δ), sunt indicate ambele valori, având alături simbolul conexiunii la care se referă;
- *Curentul nominal*, I_N, [A] - se indică două valori însoțite de simbolul conexiunii, în cazul în care ambele capete ale înfăşurărilor statorice sunt disponibile. Ambele au semnificație de curent **de linie**.
- *Turația nominală*, n_N, [min^{-1}];
- *Factorul de putere nominal*, $\cos\varphi_N$.

Date nominale motor.

Determinările din acest laborator virtual sunt aferente unei maşini cu următoarele date nominale, identificate pe plăcuța indicatoare:

- P_N = 2,2 kW
- U_N = 220/380 V, conexiune Δ/Y
- I_N = 8,73/5,02 A, conexiune Δ/Y
- n_N = 1430 min^{-1}
- $\cos\varphi_N$ = 0,82.

Conexiunea statorului este stea (Y).

Determinarea parametrilor schemei electrice echivalente

- ***1. Utilizând metoda voltmetrului şi ampermetrului în curent continuu, să se determine rezistența de fază a statorului, pentru mai multe valori ale tensiunii. Se va reține ca valoare a rezistenței de fază a statorului, media aritmetică a valorilor determinate.***

Răspuns >>

- ***2. Pe baza rezultatelor obținute în urma efectuării probei de mers în gol, să se determine inductivitatea de magnetizare L_m.***

Răspuns >>

- ***3. Pe baza rezultatelor obținute în urma efectuării probei cu rotorul calat, să se determine:***
  - ***rezistența, raportată la stator, a unei faze a rotorului, R'_2***
  - ***inductivitatea de dispersie a unei faze a statorului, $L_{1\sigma}$ ($L_{s\sigma}$)***
  - ***inductivitatea de dispersie, raportată la stator, a unei faze a rotorului, $L'_{2\sigma}$ ($L_{r\sigma}$)***

Răspuns >>

Determinarea parametrilor mecanici

- ***4. Folosind metoda lansării, să se determine parametrii mecanici***
  - ***momentul de inerție al rotorului, J***
  - ***coeficientul de frecări vâscoase k_v***
  - ***cuplul de frecări uscate m_f***

Răspuns >>

Întrebarea 1: răspuns

Două faze ale statorului sunt conectate la o sursă de curent continuu, prin intermediul unei rezistențe variabile *R* (figura 1). Se măsoară tensiunea şi curentul pentru mai multe valori ale acesteia, fără însă a se depăşi valoarea nominală a curentului de fază al maşinii.

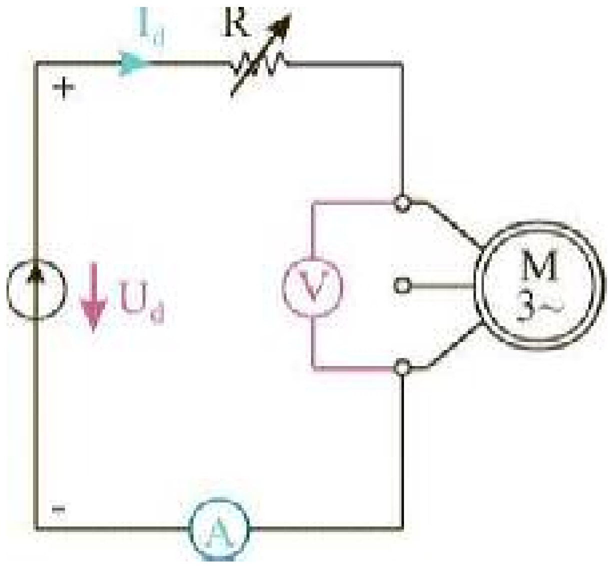


Figura 1

Pentru rezistența înfăşurării de fază a statorului, ținând cont de conexiunea acestuia, se va considera media aritmetică a valorilor determinate, rezultând:

$$R_1 = 1{,}8\ \Omega.$$

Întrebarea 1: demonstrație

Pe baza a cinci determinări ale rezistenței, realizate cu montajul din figura 2, se calculează media aritmetică a acestora.

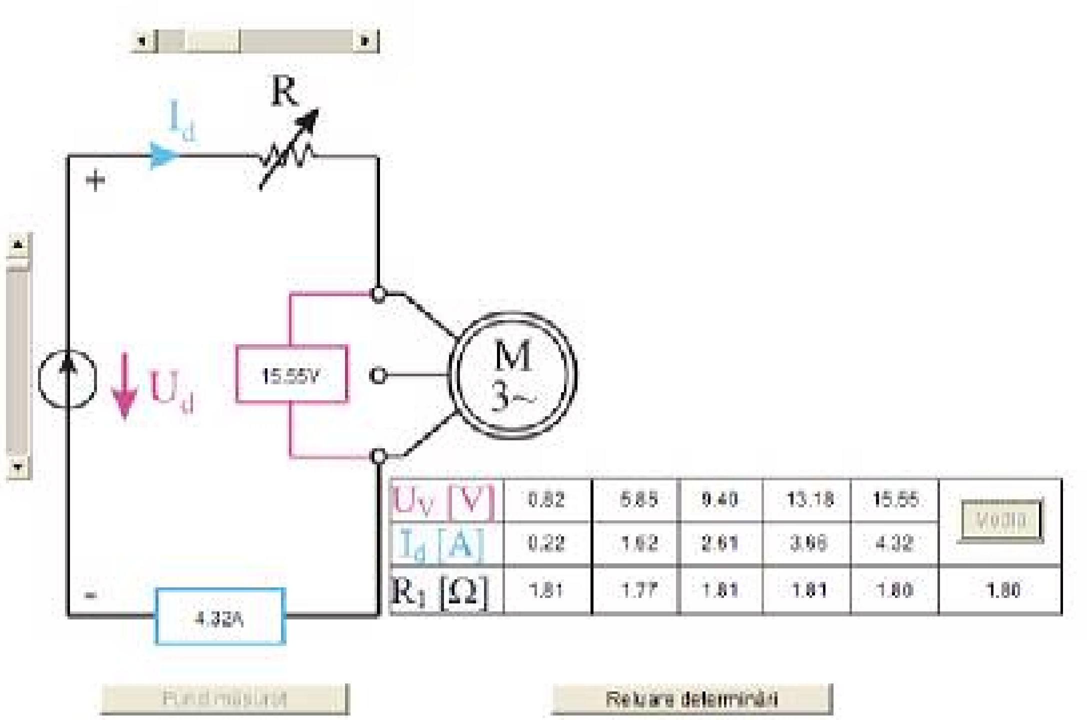


Figura 2

Rezistența de fază a statorului s-a calculat ținând cont de conectarea statorului în stea (Y), respectiv

$$R_1 = \frac{U_V}{2I_d},$$

deoarece curentul I_d parcurge două faze înseriate.

În cazul în care statorul este conectat în triunghi (Δ), rezistența de fază a acestuia se calculează

$$R_1 = \frac{3}{2}\frac{U_V}{I_d},$$

doarece curentul I_d parcurge circuitul format de o fază, în paralel cu celelalte două înseriate.

Întrebarea 2: răspuns

În cazul funcționării în gol, ținând cont de schema echivalentă "π" şi de ecuația solenațiilor, curentul absorbit de motor, se poate aproxima ca fiind doar curentul de magnetizare

$$I_1 \simeq I_{01}.$$

Se măsoară curentul şi tensiunea de linie (I_1, U_1) şi puterea activă (P_{10}) absorbită la mersul în gol (figura 3).

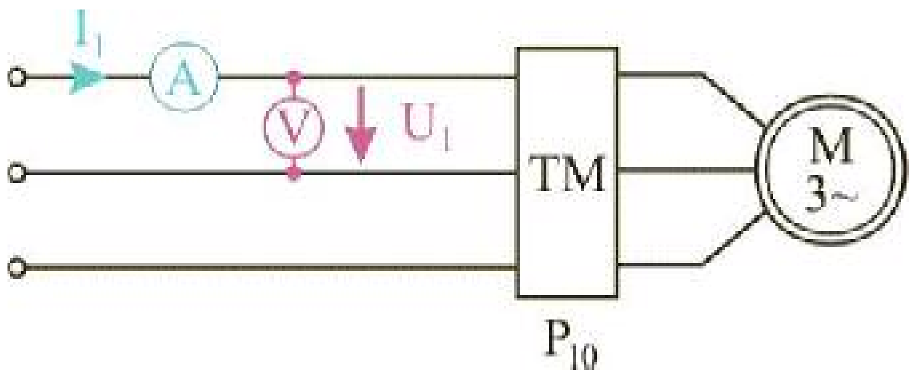


Figura 3

Se calculează impedanța circuitului de magnetizare, iar după separarea pierderilor Joule în înfăşurarea statorică şi a pierderilor mecanice, se determină rezistența echivalentă a circuitului de magnetizare (considerat circuit echivalent serie), rezultând

$$R_m = 2{,}31\ \Omega.$$

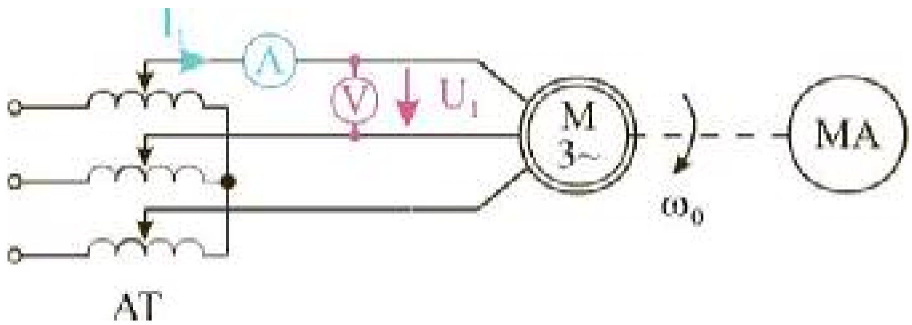
Se calculează apoi reactanța circuitului de magnetizare, rezultând imediat inductivitatea de magnetizare

$$L_m = 0{,}3\ \mathrm{H}.$$

Observație.

În cazul când se urmăreşte luarea în considerație, la studiul prin simulare, a saturației magnetice a motorului, curba de magnetizare se poate ridica prin prelucrarea datelor experimentale obținute în cadrul încercării de mers în gol la viteză constantă.

Aceasta constă în alimentarea motorului asincron cu tensiune variabilă (cu ajutorul autotransformatorului AT) , fiind însă antrenat în permanență la turația de sincronism, de către o altă maşină auxiliară MA (figura 5).



U:\Users\Ivanov\eLEE\Lucru\site\RO\realisations\MachinesElectriques\Induction\MiseEquations\MesureParametres\courbe_mag.htm - fig5#fig5Figura 5

În acest caz,

$$I_1 \equiv I_{01}.$$

Se ridică dependența

$$U_1 = f\,(I_1),$$

calculându-se apoi punctual fluxul:

$$\Psi_1 = \left(\frac{U_1}{\sqrt{3}} - R_1 I_1\right)\frac{1}{\omega_0},$$

în care ω_0 este pulsaţia de sincronism.

În final, se construieşte dependenţa

$$L_m = \frac{\Psi_1}{I_1} = f\left(I_{01} \equiv I_1\right).$$

Întrebarea 2: demonstraţie

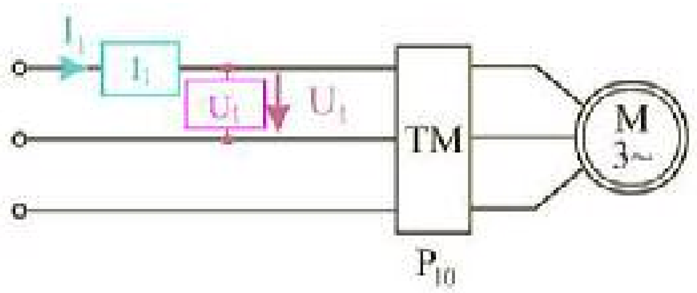
Alimentând maşina asincronă cu tensiunea nominală şi lăsând-o să funcţioneze în gol (fără sarcină mecanică), se poate aproxima că viteza mecanică este cea de sincronism, respectiv alunecare *s* este nulă.

În aceste condiţii, curentul rotoric I'_2 se poate aproxima ca fiind nul şi ţinând cont de schema echivalentă "π" şi de ecuaţia solenaţiilor, curentul absorbit de motor este doar curentul de magnetizare

$$I_1 \simeq I_{01}.$$

Folosind o trusă trifazată de măsură TM (figura 4), se măsoară:

- tensiunea de linie U_1,
- curentul de linie I_1,
- puterea activă P_{10}.



U_1 [V]	I_1 [A]	P_{10} [W]
380	2,327	157,06

Figura 4 (animaţie)

Ţinând cont conexiunea în stea (Y) a statorului, se calculează impedanţa circuitului de magnetizare

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} = \frac{U_1}{\sqrt{3} I_1}.$$

Trebuind separată reactanţa de magnetizare X_m, rezistenţa echivalentă a circuitului de magnetizare se poate determina scăzând din puterea activă absorbită de motor în gol P_{10}, pierderile Joule în înfăşurarea statorică şi pierderile mecanice, rezultatul fiind, aşa numitele, pierderi în fier

$$P_{Fe} = P_{10} - 3R_1 I_1^2 - P_{mec}.$$

Rezultă rezistența echivalentă a circuitului de magnetizare

$$R_m = \frac{P_{Fe}}{3I_1^2},$$

apoi reactanța de magnetizare

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

şi în final inductivitatea de magnetizare

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f}.$$

Determinarea pierderilor mecanice

La funcționarea în gol, puterea activă absorbită de motorul asincron acoperă pierderile Joule în înfăşurarea statorică, pierderile în rezistența echivalentă a circuitului de magnetizare (numite pierderi în fier) şi pierderile mecanice.

$$P_{10} = 3R_1 I_1^2 + P_{Fe} + P_{mec}.$$

Suma ultimelor două componente

$$P_{Fe} + P_{mec} = P_{10} - 3R_1 I_1^2,$$

se determină experimental, pentru valori din ce în ce mai mici ale tensiunii de alimentare (figura 6).

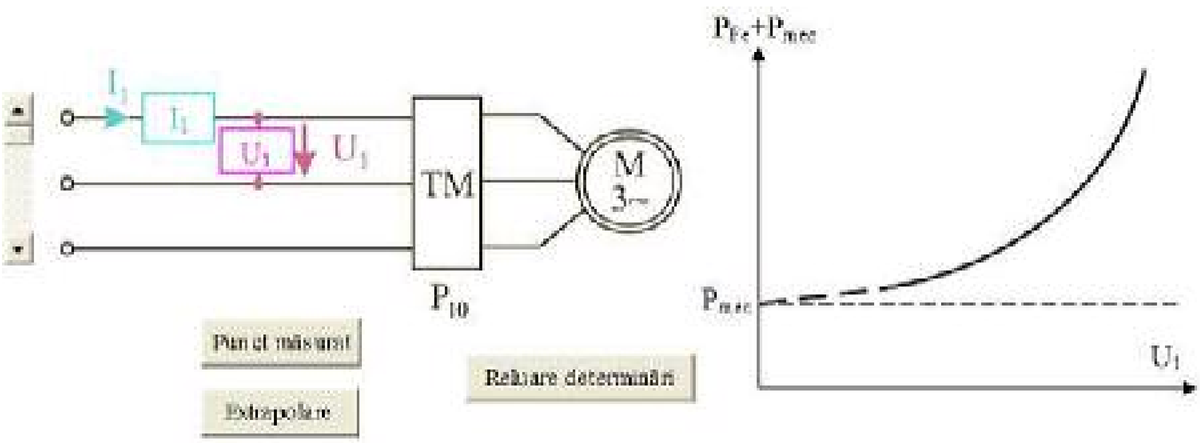


Figura 6 (animație)

Cum doar pierderile în fier depind de aceasta, punctul de intersecție al extrapolării dependenței grafice

$$P_{Fe} + P_{mec} = f(U_1),$$

va reprezenta pierderile mecanice P_{mec}.

Întrebarea 3: răspuns

În cazul probei cu rotorul calat, datorită tensiunii reduse de alimentare (care este tensiunea la bornele impedanței de magnetizare dacă se ține cont de schema echivalentă "π"), curentul prin impedanța de magnetizare poate fi aproximat ca fiind nul, respectiv

$$I_1 \simeq I'_2.$$

Se măsoară curentul şi tensiunea de linie (I_c, U_c) şi puterea activă (P_c) absorbită cu rotorul calat (figura 7).

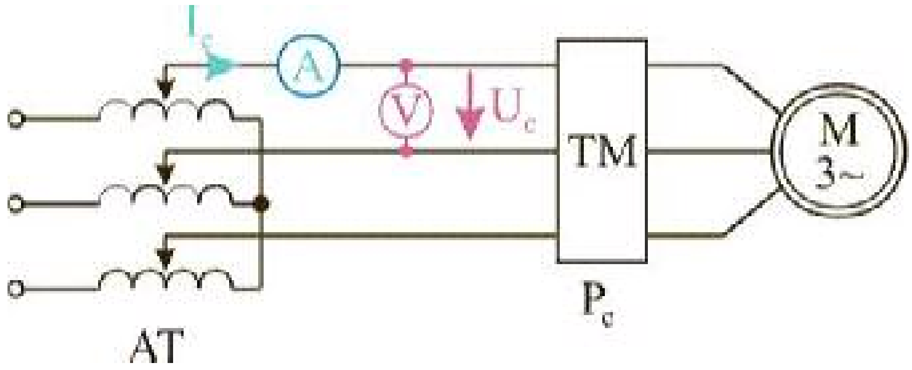


Figura 7

Puterea activă P_c se disipă pe suma rezistențelor statorică R_1 şi rotorică raportată la stator R'_2, rezultând

$$R'_2 = 1{,}93\ \Omega.$$

Se calculează suma impedanțelor statorică Z_1 şi rotorică raportată la stator Z'_2 şi considerând inductivitățile de dispersie egale rezultă

$$L_{1\sigma} = L'_{2\sigma} = 0{,}02\ \text{H}.$$

Întrebarea 3: demonstrație

Menținând rotorul calat şi crescând, de la zero, tensiunea de alimentare (figura 8) până când

$$I_c \simeq I_N,$$

se măsoară

- tensiunea de linie U_c,
- curentul de linie I_c,
- puterea activă P_c.

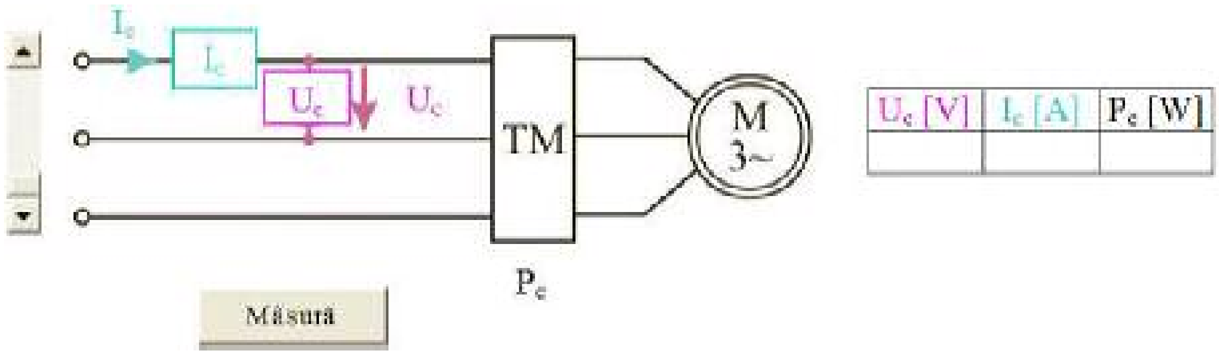


Figura 8 (animație)

În acest caz, schema echivalentă pe fază (figura 9) evidențiază reactanțele de dispersie ale statorului şi rotorului.

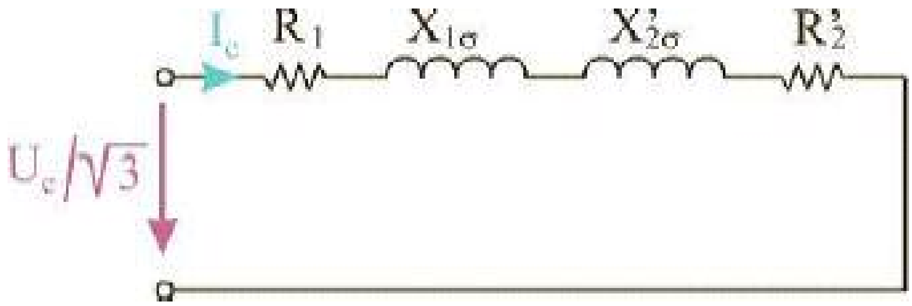


Figura 9

Datorită căderii reduse de tensiune pe impedanța de magnetizare, curentul de magnetizare poate fi neglijat, rezultând

$$P_{Fe} \simeq 0 \text{ şi } I_1 \simeq I_2'.$$

În aceste condiții se obține:

$$R_1 + R_2' = \frac{P_c}{3I_c^2}\text{, respectiv } R_2' = \frac{P_c}{3I_c^2} - R_1.$$

De asemenea

$$\sqrt{\left(R_1 + R_2'\right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'\right)^2} = \frac{U_c}{\sqrt{3}I_c}.$$

Presupunând inductivitățile de dispersie egale ($L_{1\sigma} = L'_{2\sigma}$), rezultă

$$L_{1\sigma} = L_{2\sigma}' = \frac{1}{4\pi f}\sqrt{\frac{U_c^2}{3I_c^2} - \left(R_1 + R_2'\right)^2}.$$

Ținând cont şi de inductivitatea de magnetizare, rezultă inductivitățile totale statorică şi rotorică raportată la stator

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m,$$

$$L_2' = L_{2\sigma}' + L_m.$$

Întrebarea 4: răspuns

Momentul de inerție J al rotorului poate fi determinat prin mai multe metode, unele necesitând demontarea acestuia (metoda oscilațiilor de torsiune, metoda pendulului oscilant).

O metodă simplă, care nu necesită demontarea rotorului şi permite determinarea şi a coeficientului de frecări vâscoase k_v şi a cuplului de frecări uscate m_f, este metoda lansării. În plus, utilizând acestă metodă, se determină nu numai parametrii mecanici ai motorului, ci ai ansamblului motor-maşină de lucru.

Aceasta constă în înregistrarea şi prelucrarea curbei de evoluție a vitezei la oprirea liberă (figura 10), deconectând motorul, alimentat inițial la tensiunea nominală.

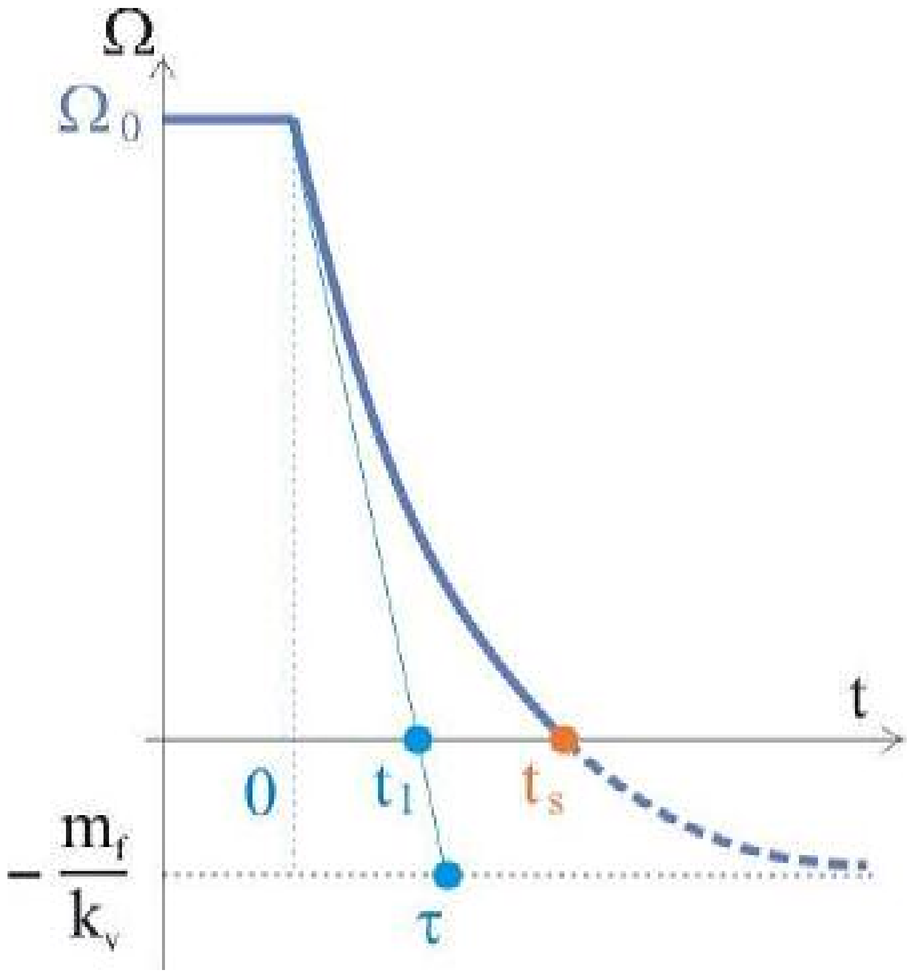


Figura 10

Curba are semnificație doar până la oprire ($\Omega = 0$), la momentul t_s.

Ținând cont de ecuația generală a mişcării în momentul deconectării motorului

$$0 = M_{s0} + J\frac{d\Omega}{dt},$$

şi că M_{s0} este datorat doar pierderilor mecanice, rezultă

$$J = 0{,}0222 \text{ kgm}^2.$$

Pornind de la ecuația diferențială a vitezei pe durata opririi libere

$$J\frac{d\Omega}{dt} + k_v\Omega + m_f = 0,$$

particularizată pentru $t = t_s$, rezultă coeficientul frecărilor vâscoase

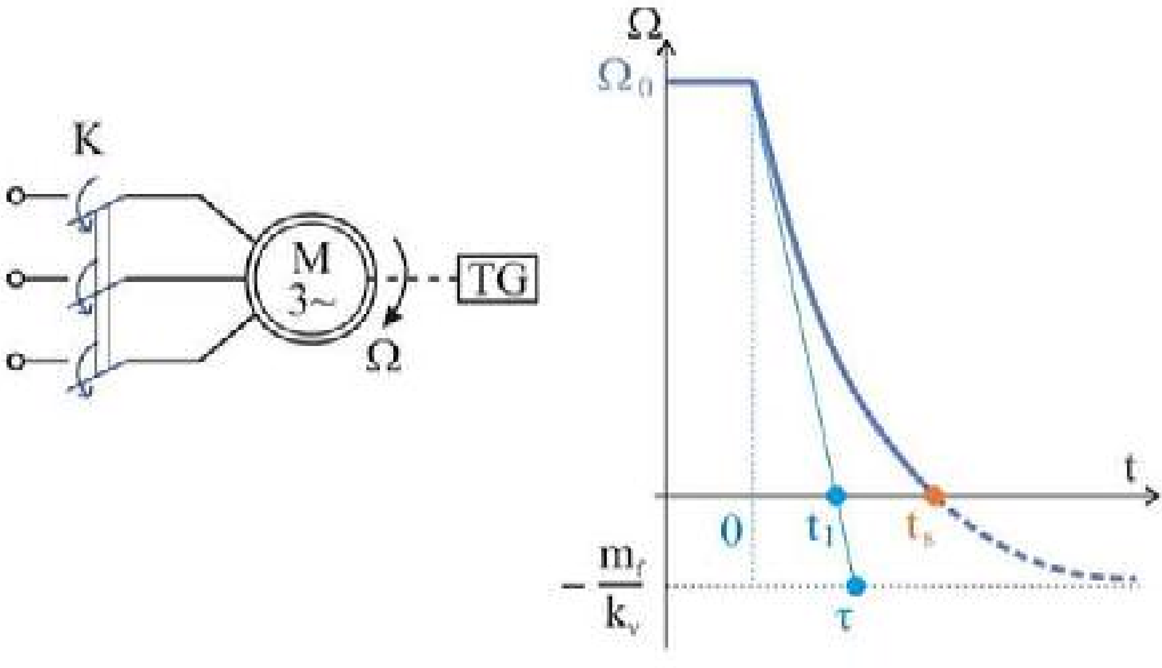
$$k_v = 0{,}003262 \text{ Nms}$$

şi cuplul de frecări uscate

$$m_f = 0{,}1 \text{ Nm}.$$

Întrebarea 4: demonstrație

Motorul este alimentat cu tensiunea nominală şi se înregistrează evoluția vitezei pe durata opririi libere, determinată de deconectarea de la rețea (figura 11).



Ω_0 [s^{-1}]	t_0 [s]	t_1 [s]	t_s [s]
151,63	0	5,66	12,3

Figura 11 (animație)

În continuare, se consideră originea timpului translatată în momentul t_0, respectiv $t_0 = 0$.

Momentul de inerție *J*. Din ecuația generală a mişcării în momentul deconectării motorului

$$0 = M_{s0} + J\frac{d\Omega}{dt},$$

rezultă

$$J = -M_{s0}\frac{dt}{d\Omega}.$$

Cuplul static în momentul deconectării M_{s0} este datorat doar pierderilor mecanice,

$$M_{s0} = \frac{P_{mec}}{\Omega_0},$$

iar raportul $dt/d\Omega$ se determină trasând tangenta la curba vitezei în momentul deconectării, rezultând

$$\frac{dt}{d\Omega} = -\frac{t_1}{\Omega_0}.$$

În final, se obține

$$J = P_{mec}\frac{t_1}{\Omega_0^2} = P_{mec}\frac{\tau}{\Omega_0\left(\Omega_0 + \frac{m_f}{k_v}\right)},$$

întrucât

$$\frac{t_1}{\tau} = \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + \frac{m_f}{k_v}}.$$

Coeficientul de frecări vâscoase k_v. Deoarece în momentul deconectării

$$M_{s0} = k_v\Omega_0 + m_f,$$

se poate scrie

$$J = -M_{s0}\frac{\Delta t}{\Delta\Omega} = (k_v\Omega_0 + m_f)\,\frac{t_1}{\Omega_0},$$

respectiv

$$J = \left(k_v + \frac{m_f}{\Omega_0}\right)t_1. \qquad (1)$$

Ecuația generală a mişcării pe durata opririi libere

$$J\frac{d\Omega}{dt} + k_v\Omega + m_f = 0,$$

are soluția

$$\Omega = \left(\Omega_0 + \frac{m_f}{k_v}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{m_f}{k_v},$$

cu

$$\tau = \frac{J}{k_v}, \tag{2}$$

constanta mecanică de timp.

Particularizând soluția generală pentru $t = t_s$, $\Omega = 0$, rezultă

$$\left(\Omega_0 + \frac{m_f}{k_v}\right) e^{-\frac{t_s}{\tau}} = \frac{m_f}{k_v}, \text{ respectiv } (k_v \Omega_0 + m_f)\, e^{-\frac{t_s}{\tau}} = m_f.$$

Exprimând cuplul de frecări uscate m_f din (1),

$$m_f = \left(\frac{J}{t_1} - k_v\right) \Omega_0, \tag{3}$$

ecuația de mai sus devine

$$(k_v \Omega_0 + m_f)\, e^{-\frac{t_s}{\tau}} = \left(\frac{J}{t_1} - k_v\right) \Omega_0.$$

Ținând cont de (1) pentru exprimarea membrului drept al ecuației de mai sus, se obține:

$$\frac{J}{t_1} \Omega_0 e^{-\frac{t_s}{\tau}} = \left(\frac{J}{t_1} - k_v\right) \Omega_0.$$

Rezultă:

$$k_v = \frac{J}{t_1}\left(1 - e^{-\frac{t_s}{\tau}}\right).$$

Ținând cont şi de expresia constantei mecanice de timp (2), rezultă ecuația:

$$k_v = \frac{J}{t_1}\left(1 - e^{-\frac{t_s}{J/k_v}}\right), \tag{4}$$

în care necunoscuta este k_v.

Ecuația (4) este neliniară, soluția fiind de forma

$$k_v = \left[W\left(-e^{-\frac{t_s}{t_1}} \cdot \frac{t_s}{t_1}\right) + \frac{t_s}{t_1}\right] \cdot \frac{J}{t_s},$$

în care $W(a)$ este funcția Lambert W. Aceasta este inversul funcției $x \cdot e^x$, valoarea ei pentru

$$a = -e^{-\frac{t_s}{t_1}} \cdot \frac{t_s}{t_1},$$

rezultând ca soluție a ecuației

$$x \cdot e^x = a,$$

ce poate fi rezolvată prin iterații numerice.

În final, pentru valorile determinate experimental, se obține

$$k_v = 0{,}003262 \text{ Nms.}$$

Cuplul de frecări uscate m_f. Se calculează direct cu relația (3), rezultând

$$m_f = 0{,}1 \text{ Nm.}$$