

**ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ И ЗАГУБИТЕ НА АСИНХРОННАТА
МАШИНА ПРИ ДИНАМИЧНИ И УСТАНОВЕНИ РЕЖИМИ****DETERMINATION OF INDUCTION MACHINE PARAMETERS AND
LOSSES IN CASE OF DYNAMIC AND STEADY-STATE OPERATING
MODES****Dimitar Spirov***University of Food Technologies – Plovdiv, Bulgaria***Nikolay Komitov***University of Food Technologies – Plovdiv, Bulgaria***Abstract**

A methodology, algorithms and mathematical models for determination of induction machine parameters and losses by means of voltages and current measurements in case of idle running regarding dynamic and steady-state operating modes have been developed. In order to determining of induction machine parameters and losses dynamic and steady-state induction machine models have been developed on the basis of electrical machines generalized theory. The reliability and efficiency of the methodology, algorithms and mathematical models developed have been corroborated by experimental investigations results for quantities in case of idle running.

Keywords: induction machine parameters and losses, idle no-load running, voltages and currents.

ВЪВЕДЕНИЕ

Един от основните проблеми, с които се налага да се съобразяват инженерите при проектиране и изследване на асинхронните машини, е свързан с нелинейностите на математичния модел на машината. Нелинейностите в електрическите машини най – общо могат да се класифицират в три вида, а именно [1, 2, 3, 4]:

- Нелинейност от електромагнитен характер. Тя се дължи на насищането на магнитните вериги и на токовото изместване в роторните намотки и се отразява като зависимост на индуктивностите, на активните и на индуктивните съпротивления на намотките от протичащите през тях токове;

- Нелинейност от електромеханичен характер. Тя се дължи на зависимостите на индуктивностите на намотките от ъгъла на завъртане на ротора;

- Нелинейност от топлинен характер. Тя се дължи на загряването на намотките.

За разлика от температурно зависимите съпротивления, чиито изменение е бавно, промяната на индуктивността на машината е много

бърза. Компенсирането на тази промяна следователно най-лесно може да бъде осъществена чрез използването на модифициран нелинеен модел на машината, в който е взето под внимание насищането на намагнитващата крива [1].

Цел на настоящата работа е да бъде разработен алгоритъм за експерименталното определяне на взаимната индуктивност и пълния магнитен поток на въздушната междина, както и на активно съпротивление в намагнитващия клон при различните режими на работа на асинхронната машина (АМ).

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ НА АМ

Наличието на магнитна и електрическа симетрия при асинхронните двигатели дава възможност уравненията на асинхронните машини да се представят във векторна форма и да се решават в този вид [1, 4].

Уравненията на асинхронната машина във векторен вид в координатна система, въртяща се с произволна скорост ω_k са [1, 4]:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_k \psi_s; \\ \mathbf{u}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \psi_r, \end{cases} \quad (1)$$

където

$$\begin{aligned} \psi_s &= L_{\sigma s} \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_{mp} = \psi_{\sigma s} + \psi_m; \\ \psi_r &= L_{\sigma r} \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_{mp} = \psi_{\sigma r} + \psi_m. \end{aligned}$$

При разглеждането на установения режим на работа на асинхронната машина изобразяващите вектори на напреженията, токовете и пълните магнитни потоци в координатна система, която се върти със синхронна скорост ω_s не зависят от времето и са постоянни (производните им по отношение на времето са нули) [1, 4]:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = \dot{U}_s; \mathbf{i}_s = \dot{I}_s; \mathbf{i}_r = \dot{I}_r; \\ \psi_s = \dot{\Psi}_s; \psi_r = \dot{\Psi}_r. \end{cases} \quad (2)$$

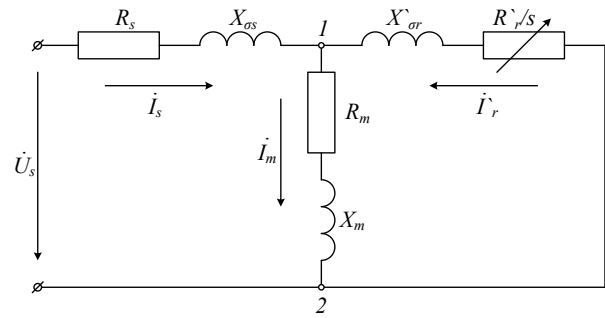
Уравненията на асинхронната машина с накъсосъединен ротор ($u_r=0$) в координатна система, въртяща се със синхронна скорост $\omega_k=\omega_s$ са [1, 4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = Z_s \dot{I}_s + Z_m \dot{I}_m = Z_s \dot{I}_s + \dot{E}_m; \\ 0 = Z_r \dot{I}_r + Z_m \dot{I}_m = Z_r \dot{I}_r + \dot{E}_m. \end{cases} \quad (3)$$

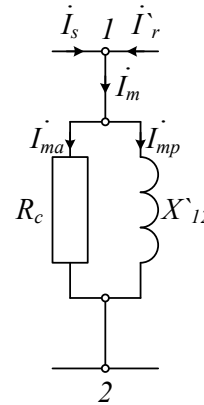
където

$$\begin{cases} Z_s = R_s + j\omega_s L_{\sigma s}; Z_r = R_{rs} + j\omega_s L_{\sigma r}; \\ R_{rs} = \frac{R_r}{s} = R_r + \frac{1-s}{s} R_r = R_r + R_D; \\ Z_m = R_m + j\omega_s L_m; \\ \dot{E}_m = Z_m \dot{I}_m = (R_m + j\omega_s L_m) \dot{I}_m = R_m \dot{I}_m + j\omega_s \dot{\Psi}_m. \end{cases}$$

Мощността отделена в допълнителното съпротивление R_D е равна на механичната мощност, която се предава към вала на двигателя при работата му с хлъзгане s . На тези уравнения съответства заместващата схема на асинхронния двигател показана на Фиг.1[1].



Фиг. 1. Заместваща схема на АД



Фиг. 2. Заместваща схема на АД с отчитане на загубите в стоманата

Загубите в стоманата могат да бъдат отчетени чрез въвеждане на допълнително активно съпротивление в намагнитващия клон R_c , паралелно свързано на индуктивното съпротивление на взаимна индукция X'_{12} . По този начин намагнитващия ток I_m има две съставки: активна I_{ma} , която определя мощността на загубите в стоманата, и реактивна I_{mp} , която възбужда основния магнитен поток в магнитопровода [1]. Пълното съпротивление на намагнитващия клон се определя от изказа:

$$Z_m = \frac{R_c jX'_{12}}{R_c + jX'_{12}} = R_m + jX_m = \frac{\dot{E}_m}{\dot{I}_m} \quad (4)$$

От тук за R_c и X'_{12} се получава:

$$R_c = \frac{R_m^2 + X_m^2}{R_m}; X'_{12} = \frac{R_m^2 + X_m^2}{X_m}. \quad (5)$$

От уравненията на асинхронната машина във векторен вид в координатна система uv , въртяща се с произволна скорост ω_k , при отчитане на загубите в стоманата се получават:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_{\sigma s} \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} + j\omega_k L_{\sigma s} \mathbf{i}_s + j\omega_k \psi_m; \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + L_{\sigma r} \frac{d\mathbf{i}_r}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} - j(\omega_k - \omega_r) L_{\sigma r} \mathbf{i}_r - j(\omega_k - \omega_r) \psi_m. \end{cases} \quad (6)$$

За намагнитващия контур може да се запише:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_m}{dt} + j\omega_k \psi_m = \mathbf{e}_m = R_c \mathbf{i}_{ma}; \\ \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_r = \mathbf{i}_m = \mathbf{i}_{ma} + \mathbf{i}_{mp}; \\ \psi_m = L_m \mathbf{i}_{mp}. \end{cases} \quad (7)$$

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ЗАМЕСТВАЩАТА СХЕМА

Активното съпротивление R_s на фазите на статорната намотка може да бъде измерено непосредствено по известните начини и да бъде приведено към работната температура [1]. Роторното съпротивление и индуктивностите от самоиндукция на статора и ротора се определят от опита на късо съединение при понижено напрежение U_K , така че $I_K = I_H$, като се приема, че намагнитващия контур не оказва влияние [1].

Отчитането на изменението на взаимната индуктивност изисква познаването на кривата на намагнитване на конкретния двигател. Ако се проведе опит на празен ход на двигателя при различни стойности на захранващото напрежение U_s и се измерят тока на празен ход I_{s0} и активната мощност P_0 , може да се получи зависимостта $\psi_m = f(I_{mp})$ и $L_m = f(I_{mp})$, както и зависимостта и $R_c = f(I_{ma})$.

Изобразяващия вектор на статорното напрежение и на статорния ток в координатна система система, която се върти със синхронна скорост ω_s се получава

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = \dot{U}_s = u_{sx} + ju_{sy} = \sqrt{2}U_s + j0; \\ \mathbf{i}_s = \dot{I}_s = i_{sx} + ji_{sy} = \sqrt{2}I_{s0}(\cos \varphi_0 - j \sin \varphi_0), \end{cases} \quad (8)$$

където $\cos \varphi_0 = P_0 / (3U_s I_{s0})$ е фактор на мощността при празен ход.

Напрежение на намагнитващия клон се получава:

$$\dot{E}_m = \dot{U}_s - Z_s \dot{I}_s = \dot{U}_s - (R_s + j\omega_s L_{\sigma s}) \dot{I}_s \quad (9)$$

Роторния и намагнитващия ток са съответно:

$$\dot{I}_r = -\frac{\dot{E}_m}{Z_r}; \quad \dot{I}_m = \dot{I}_s + \dot{I}_r \quad (10)$$

От пълното съпротивление на намагнитващия клон могат да бъдат получени активното съпротивление на загубите в стоманата R_c и индуктивното съпротивление на взаимна индукция X'_{12}

$$Z_m = \frac{\dot{E}_m}{\dot{I}_m} = R_m + jX_m; \quad (11)$$

Компонентите на намагнитващия ток се получават

$$\dot{I}_{ma} = \frac{\dot{E}_m}{R_c}; \quad \dot{I}_{mp} = \frac{\dot{E}_m}{jX'_{12}} = \frac{\dot{E}_m}{j\omega_s L_m}. \quad (12)$$

Взаимната индуктивност и пълния магнитен поток на въздушната междина се получават

$$L_m = \frac{X'_{12}}{\omega_s}; \quad \dot{\Psi}_m = \frac{\dot{E}_m}{j\omega_s} = L_m \dot{I}_{mp}. \quad (13)$$

Необходимо е да се получат изрази за компонентите на механичните загуби; електрическите загуби, загубите в стоманата и допълнителните загуби при установени режими на работа с използване на изобразяващите вектори.

За въртящия момент и за механичната мощност можем да запишем:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} \frac{P_p}{L_{\sigma r}} \operatorname{Im}(\dot{\Psi}_m \overline{\dot{\Psi}_r}); \\ P_{\text{мех}} &= M \Omega_r = M \frac{\pi n}{30}. \end{aligned} \quad (14)$$

При празен ход механичната мощност $P_{\text{мех}}$ отива за покриване на механичните загуби $p_{\text{мех}}$. За електрическите загуби получавате:

$$P_{\text{ел}} = \frac{3}{2} \left(R_s |\dot{I}_s|^2 + R_r |\dot{I}_r|^2 \right); \quad (15)$$

Входна комплексна мощност се изчислява с израза:

$$\dot{S}_1 = \frac{3}{2} \dot{U}_s \bar{I}_s = P_1 + jQ_1; \quad (16)$$

Комплексна мощност на намагнитващия контур се получава:

$$\dot{S}_m = \frac{3}{2} \dot{E}_m \bar{I}_m = P_c + jQ_m; \quad (17)$$

Активната мощност на намагнитващия контур е мощността отделена като загуби в стоманата P_c :

$$P_c = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{E}_m \bar{I}_m) = \frac{3}{2} R_m |\dot{I}_m|^2 = \frac{3}{2} \frac{|\dot{E}_m|^2}{R_c} = \frac{3}{2} R_c |\dot{I}_{ma}|^2 \quad (18)$$

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

С цел да се проверят разработените алгоритъм и математически модели е изследван експериментално трифазен асинхронен двигател тип 4АО-80В-4Д с номинални данни 0,75 kW, 380 V, 50 Hz в режим на празен ход.

Таблица 1. Опит на празен ход на АД тип 4 АО 80 В-4Д.

№	U_s	I_{s0}	P_0	n_0
	V	A	W	min ⁻¹
1	60,622	0,578	63	1435
2	81,406	0,688	72,0	1465
3	101,845	0,843	84,0	1479
4	119,858	1,003	99	1485
5	140,296	1,198	114	1490
6	160,215	1,392	136,5	1492
7	179,267	1,622	172,5	1493
8	191,218	1,893	213	1495
9	216,506	2,231	282	1496
10	239,023	2,678	391,5	1499

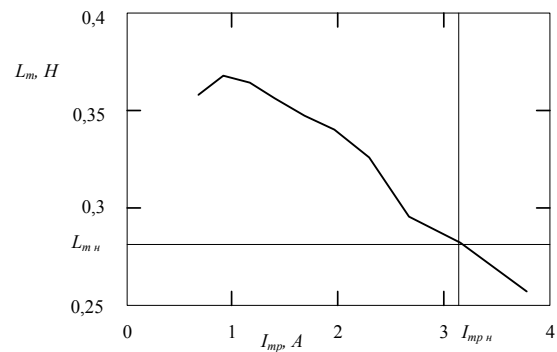
В таблица 1 са дадени експерименталните резултати, получени от опита на празен ход, проведен с асинхронен двигател тип 4 АО 80 В-4Д.

С помощта на предложената изчислителна методика са получени електродвижещото напрежение на намагнитващия клон, роторния и намагнитващия ток, компонентите на намагнитващия ток, взаимната индуктивност и пълния магнитен поток на въздушна

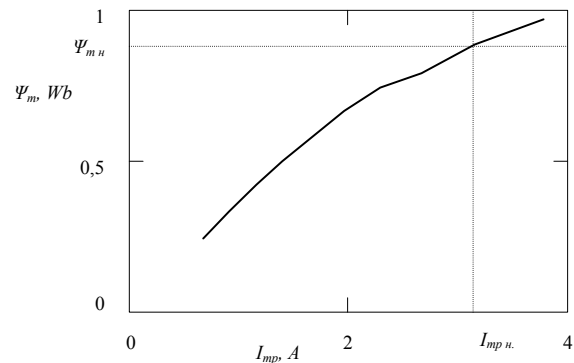
та междина, както и активно и индуктивно съпротивление в намагнитващия клон. Част от получените резултати са представени в таблица 2.

Таблица 2. Получени резултати

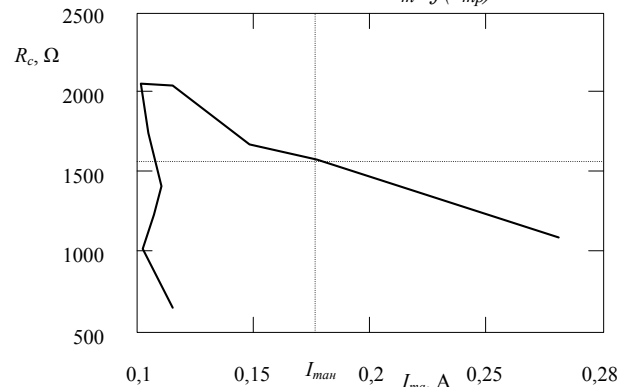
№	$\cos\varphi_0$	I_{mp}	L_m	Ψ_m	I_{ma}	R_c
	-	A	H	Wb	A	Ω
1	0,599	0,670	0,358	0,240	0,115	654,0
2	0,428	0,903	0,367	0,332	0,102	1017,8
3	0,326	1,153	0,364	0,419	0,107	1232,3
4	0,274	1,392	0,356	0,496	0,110	1410
5	0,226	1,677	0,347	0,582	0,105	1747,3
6	0,204	1,956	0,340	0,665	0,102	2057,4
7	0,198	2,282	0,325	0,742	0,115	2036,4
8	0,196	2,666	0,295	0,786	0,148	1670,9
9	0,195	3,145	0,282	0,887	0,177	1578,2
10	0,204	3,776	0,257	0,970	0,282	1087,9



Фиг. 3. Зависимост $L_m = f(I_{mp})$



Фиг. 4. Зависимост $\Psi_m = f(I_{mp})$



Фиг. 5. Зависимост $R_c = f(I_{ma})$

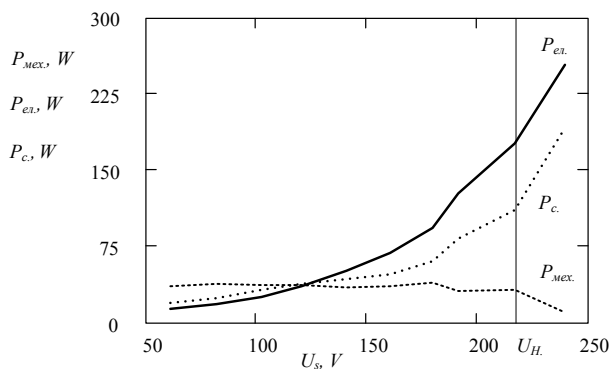
На фиг. 3 – фиг. 5 са показани зависимостите на $L_m=f(I_{mp})$, $\Psi_m=f(I_{mp})$ и $R_c=f(I_{ma})$. На графиките са отбелязани $L_{mн}$ и $\Psi_{mн}$ при номинални стойности на тока $I_{mрн}$, а за $R_{сн}$ при $I_{тап}$.

В Таблица 3 са получени M , $P_{мех}$, $P_{ел}$, P_c за асинхронен двигател тип 4 АО 80 В-4D.

Таблица 3. Загуби при празен ход на асинхронен двигател тип 4 АО 80 В-4D.

№	M	$P_{мех}$	$P_{ел}$	P_c
	Nm	W	W	W
1	0,2414	36,2809	13,4914	19,5382
2	0,2494	38,2543	17,6877	23,9739
3	0,2397	37,1324	25,7026	31,6936
4	0,2392	37,1909	36,0099	38,6658
5	0,2199	34,3127	50,9942	43,0237
6	0,2299	35,9135	68,7563	47,7342
7	0,2505	39,1662	93,2825	60,0668
8	0,2006	31,4007	126,8921	82,0543
9	0,2043	32,0055	176,2526	110,6075
10	0,0611	9,5919	253,9409	191,9503

На фиг. 6 са показани зависимостите на $P_{мех}$, $P_{ел}$, $P_c=f(U_s)$.



Фиг. 6. Зависимости на $P_{мех}$, $P_{ел}$, $P_c=f(U_s)$

От графиката се вижда че, с увеличаване на напрежението електрическите загуби нарастват в най-голяма степен. Загубите в стоманата също нарастват в по малка степен от електрическите. След достигане на номиналното напрежение, механичните загуби намаляват.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработени са методика, алгоритми и математически модели за определяне на параметрите на асинхронната машина чрез измерване на напреженията и токовете при опит на празен ход за динамичния и установения режим.

Относително много доброто съгласуване на получените стойности на параметрите на машината потвърждава достоверността и точността на разработената методика, алгоритми и математически модели.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krishnan, R. Electric motor drives: modeling, analysis and control, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [2] Levi, E. A unified approach to main flux saturation modeling in d-q axis models of induction machines. IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, Sept., 1995, pp. 455–461.
- [3] Toliyat H. A., E. Levi, M. Raina A Review of RFO induction motor parameter estimation techniques. IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 18, no. 2, June, 2003, pp. 271-283.
- [4] Spirov, D., P. Vladimirov. Determination of Induction Machine Parameters in Case of Dynamic and Steady-State Operating Modes. Jornal “Electrical engineering and electronics, vol. 11-12, 2008, pp. 24-27.