

УДК 621.313

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ МАГНІТНОГО СТАНУ МАГНІТОПРОВОДІВ

В.П. Оноприч, канд. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Наведено удосконалений алгоритм розрахунку параметрів схеми заміщення статора і ротора асинхронних двигунів (АД) малої потужності з урахуванням впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струму. Проведено порівняння основних характеристик АД, розрахованих за різними методиками, з експериментальними даними. Бібл. 3, табл. 5.

Ключові слова: асинхронний двигун, параметри схеми заміщення, урахування впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струму, основні характеристики АД, методика розрахунку.

Математичні моделі та методики для дослідження електромагнітних процесів, розрахунків і проектування асинхронних двигунів малої та середньої потужностей, які розроблені в Інституті електродинаміки НАН України [2], постійно уточнюються і вдосконалюються. Розрахунок характеристик двигунів зазвичай виконується за схемою заміщення фази, що складена на основі методу двох обертових полів для основної та вищих просторових гармонік магніторушійної сили.

Фізичні процеси в асинхронних машинах наочно відображаються схемами заміщення фаз обмоток статора і ротора. Параметри схем заміщення не залишаються незмінними при різних режимах роботи. Зі зростанням навантаження збільшується потік розсіювання, зростає насичення окремих ділянок магнітопроводу полями розсіювання та зменшуються індуктивні опори x_1 та x_2 .

Збільшення ковзання в двигунах з короткозамкненим ротором викликає зростання ефекту витиснення струму та змінення опорів обмотки ротора r_2' та x_2' . У робочих режимах АД (зміна ковзання від холостого ходу до номінального) ці зміни незначні, але при розрахунку пускових режимів, коли струми АД у декілька разів перевищують номінальний, а частота струму в роторі близька до частоти мережі живлення, необхідно враховувати зміну параметрів від насичення ділянок магнітопроводу полями розсіювання та від впливу ефекту витиснення струму. У навчальній літературі [1, 3] у практичних розрахунках наведено порядок урахування впливу витиснення струму та насичення ділянок магнітопроводу полями розсіювання на параметри великих електричних машин.

Метою роботи є створення алгоритму розрахунку параметрів статора і ротора асинхронних двигунів малої потужності з урахуванням впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струму, який введено в розроблені раніше математичні моделі, що дає змогу зменшити помилку визначення основних розрахункових характеристик АД у режимах пуску та перевантаження.

Урахування впливу насичення від полів розсіювання на параметри статора АД. Як зазначалося, при більших ковзаннях через насичення зубців зменшуються індуктивні опори та зростає струм, що враховується коефіцієнтом насичення від полів розсіювання $K_{НПР}$. Таким чином, струм фази при насиченні $I_{ф.нас} = K_{НПР} |I_1|$, А, а середня намагнічуюча сила, віднесена до одного паза статора, становить

$$F_{н.сп} = \frac{0,7 \cdot I_{ф.нас} \cdot S_{П}}{a_1} \cdot \left(\beta_K + K_{об1} \cdot \frac{z_1}{z_2} \right), \text{ А}.$$

Коефіцієнт насичення $C_H = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}$. Фіктивна (умовна) індукція в повітряному про-

міжку $B_{\phi,\delta} = \frac{F_{n.c.p.} \cdot 10^{-4}}{0,16 \cdot \delta \cdot C_H}$, Тл. З табл. 1 вибирається коефіцієнт α_δ , який залежить від $B_{\phi,\delta}$.

Еквівалентна зміна відкриття паза для урахування впливу насичення на пазове розсіювання статора $C_1 = (t_1 - b_{ш1}) \cdot (1 - \alpha_\delta)$. Зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання через насичення для напівзакритого паза, найбільш поширеного в машинах

Таблиця 1

$B_{\phi,\delta}$, Тл	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
α_δ	1,0	0,97	0,86	0,7	0,57	0,49	0,43

малої та середньої потужностей, становить $\Delta\lambda_{1nac} = \frac{h_{ш1} + 0,29 \cdot d_{1S}}{b_{ш1}} \cdot \left(\frac{C_1}{C_1 + 1,5 \cdot b_{ш1}} \right)$. Коефіці-

єнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора з урахуванням насичення від полів розсіювання $\lambda_{1n.nac} = \lambda_{1n} - \Delta\lambda_{1nac}$. Коефіцієнт магнітної провідності диференціаль-

ного розсіювання обмотки статора з урахуванням насичення коронок зубців $\lambda_{1\delta.nac} = \lambda_{1\delta} \cdot \alpha_\delta$

Сумарний коефіцієнт магнітної провідності розсіювання обмотки статора з урахуванням насичення від полів розсіювання становить $\Lambda_1 = \lambda_{1n.nac} + \lambda_{1l} + \lambda_{1\delta.nac}$. Реактивний опір розсію-

вання фази статора має вигляд $X_1 = \frac{4\pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot W_1^2}{p \cdot q} \cdot \Lambda_1$, Ом. Повний опір фази статора –

$$Z_1 = r_1 + jX_1, \text{ Ом.}$$

Урахування впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струму на параметри ротора АД. Відомо, що зі збільшенням частоти струму в стержнях обмотки короткозамкненого ротора виникає ефект витиснення струму та зменшується використання перерізу стержня. При цьому активний опір ротора збільшується, а індуктивний – зменшується

[3]. Активний опір стержня ротора при 75°C $r_{cm,75^\circ} = \frac{l_2 + a_k}{\gamma_{2,75} \cdot Q_{П2}} \cdot 10^{-3}$, Ом. «Чисельна» висота

стержня з алюмінію $\xi_R = 0,067 \cdot (h_{П2} - h_{ш2}) \cdot \sqrt{S_i}$. З табл. 2 для знайденого значення ξ_R визначаються коефіцієнти φ_R та ψ_R .

Коефіцієнт, що враховує витиснення струму, $K_R = 1 + \varphi_R$. Активний опір стержня ротора при 75°C з урахуванням витиснення струму $r_{cm,\xi_R} = r_{cm,75^\circ\text{C}} \cdot K_R$, Ом. Активний опір короткозамикаючих кілець, приведений

до струму стержня,

$$r_K = \frac{2\pi \cdot D_K \cdot 10^{-3}}{z_2 \cdot \gamma_{2,75^\circ} \cdot a_K \cdot b_K \cdot \left(2 \sin \frac{\pi \cdot p}{z_2} \right)^2}, \text{ Ом.}$$

Таблиця 2

ξ_R	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
φ_R	0	0,02	0,12	0,42	1,0	1,5	2,0
ψ_R	1,0	0,99	0,97	0,89	0,74	0,61	0,51

Коефіцієнт приведення опорів обмотки ротора до обмотки статора запишемо як

$K_{11} = \frac{4m_1 \cdot W_{\mathcal{E}1}^2}{z_2 \cdot K_{CK}^2}$. Приведений активний опір фази ротора з урахуванням витиснення струму

$$r_2' = K_{11} \cdot (r_{cm,\xi_R} + r_K), \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання ротора з урахуванням витис-

нення струму $\lambda_{2П} = \left\{ \left[\frac{h_{12R} + 0,4d_{2R}}{3 \cdot d_{1R}} \left(1 - \frac{\pi \cdot d_{1R}^2}{8 \cdot Q_{П2}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot d_{1R}} \right] \cdot \psi_R + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \right\}$.

Еквівалентна зміна відкриття паза для урахування впливу насичення на пазове розсіювання ротора $C_2 = (t_2 - b_{ш2}) \cdot (1 - \alpha_\delta)$.

Зменшення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання через насичення (для напівзакритого паза) $\Delta\lambda_{2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \left(\frac{C_2}{C_2 + b_{ш2}} \right)$. Коефіцієнт магнітної провідності пазо-

вого розсіювання ротора з урахуванням насичення від полів розсіювання $\lambda_{2П.нас} = \lambda_{2П} - \Delta\lambda_{2нас}$.

Коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання ротора $\lambda_{2Л} = \frac{0,575 \cdot D_K}{l_2 \cdot Z_2 \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_K}{a_K + 2b_K}$.

Реактивний опір пазового та лобового розсіювання ротора з урахуванням насичення $X_{2П,Л.нас} = 2\pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot l_2 \cdot (\lambda_{2П.нас} + \lambda_{2Л})$, Ом. Приведений реактивний опір пазового та лобового розсіювання ротора з урахуванням насичення $X'_{2П,Л.нас} = K_{11} \cdot X_{2П,Л.нас}$, Ом. Приведений опір диференціального розсіювання фази ротора з урахуванням насичення

$X'_{2\delta.нас} = X_m \cdot \left(\frac{1}{K_{ск}^2 \cdot K_p^2} - 1 \right) \cdot \alpha_\delta$, Ом. Опір взаємодії обмотки статора з полем статора

$X_m = \frac{4f_1 \cdot m_1 \cdot \tau_1 \cdot l_i \cdot \mu_0 \cdot W_{\Phi 1}^2}{\pi \cdot p \cdot K_\mu \cdot K_C \cdot \delta}$, Ом. Повний приведенний реактивний опір розсіювання фази рото-

ра з урахуванням насичення $X'_2 = X'_{2П,Л.нас} + X'_{2\delta.нас}$, Ом.

Наведений алгоритм розрахунку параметрів схеми заміщення АД з урахуванням зміни магнітного стану магнітопровода, впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струмів реалізований у математичних моделях і програмах розрахунку та проектування асинхронних двигунів малої та середньої потужностей.

У табл. 3 і 4 наведено зміни параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів АІР80А2 (табл. 3) та АІР80А4 (табл. 4) без урахування (1) та з урахуванням (2) впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струмів в основних режимах АД, що контролюються (ковзання $-S_i$). У табл. 5 наведено порівняння основних розрахункових характеристик

Таблиця 3

АІР80А2	XX		S_n		$S_{кр}$		$S_{пуск}$	
	1	2	1	2	1	2	1	2
S_i	0	0,001	0,041	0,04	0,23	0,29	1,0	1,0
X_1 , Ом	7,01	4,35	7,01	4,34	7,01	4,09	7,01	3,65
X_m , Ом	178,1	168,4	225,6	217,7	270,1	270,7	269,1	270,7
X'_2 , Ом	4,27	4,14	4,88	4,75	5,44	4,95	5,43	4,29
r'_2 , Ом	2,96	2,97	2,96	2,97	2,96	3,0	2,96	3,1

Таблиця 4

АІР80А4	XX		S_n		$S_{кр}$		$S_{пуск}$	
	1	2	1	2	1	2	1	2
S_i	0	0,001	0,057	0,056	0,336	0,335	1,0	1,0
X_1 , Ом	6,47	4,72	6,47	4,72	6,47	4,55	6,47	4,19
X_m , Ом	113,6	107,8	154,5	147,6	201,0	201,1	201,6	201,1
X'_2 , Ом	6,01	5,82	7,2	6,97	8,56	8,07	8,58	7,24
r'_2 , Ом	5,26	5,27	5,26	5,28	5,26	5,32	5,26	5,42

асинхронних двигунів АІР80А2 та АІР80А4 без урахування (1) та з урахуванням (2) впливу насичення від полів розсіювання та витиснення струмів з експериментальними даними (3). З [1, 3] відомо, що основна характеристика асинхронного двигуна – електромагнітний момент – за інших рівних умов тим більший, чим менші індуктивні опори розсіювання первинного та вторинного кіл.

У табл. 1–5 використані такі позначення: $P_{2н}$ – номінальна корисна потужність, $U_{нф}$ – номінальна фазна напруга, f_1 – частота мережі живлення, I_1 – номінальний струм статора, η – коефіцієнт корисної дії, $\cos \varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності, $\cos \varphi_k$ – коефіцієнт потужності при

Таблиця 5

	AIP80A2			AIP80A4		
	1	2	3	1	2	3
P_{2n} , Вт	1500	1500	1500	1100	1100	1100
$U_{нф}$, В	220	220	220	220	220	220
f_1 , Гц	50	50	50	50	50	50
I_1 , А	2,96	3,03	3,1	2,53	2,64	2,84
η , %	85	84,1	83,6	80,7	80,1	76,9
$\cos \varphi_n$	0,91	0,89	0,859	0,823	0,80	0,77
S_n	0,041	0,039	0,037	0,057	0,055	0,054
n_n , хв ⁻¹	2877	2881	2889	1414	1417	1418
I_{xx} , А	1,18	1,27	1,555	1,82	2,04	2,32
P_{xx} , Вт	21	71	137	85	118	210
$I_{кз}$, А	15,4	19,5	22	11,6	12,6	14,2
P_k , Вт	5662	9179	11000	5354	6336	7350
$\cos \varphi_k$	0,555	0,71	0,759	0,695	0,76	0,785
K_I	5,21	6,65	6,94	4,61	4,97	5,0
K_{II}	1,35	2,28	2,4/ 2,35	1,75	2,15	2,28/ 2,08
K_{max}	2,56	2,95	2,85	2,53	2,48	2,48
P_{CT} , Вт	77	39,4	46,4	66,1	68,7	70
$T_{об}$, °С	50,8	50,1	50,3	65	66	69,2

короткому замиканні, S_i – ковзання в i -точці, S_n – номінальне ковзання, n_n – номінальна кількість обертів двигуна, I_{xx} – струм холостого ходу, P_{xx} – потужність холостого ходу, P_k – потужність короткого замикання, $I_{кз}$ – струм короткого замикання, K_I – кратність пускового струму, K_{II} – кратність пускового моменту, K_{max} – кратність максимального моменту, P_{CT} – втрати у сталі, $T_{об}$ – температура перегріву обмотки статора.

Висновок. Таким чином, врахування зменшення індуктивних параметрів схеми заміщення при насиченні зубців від полів розсіювання та витиснення струмів в обмотках статора і ротора зменшує на 8...15 % похибку визначення основних розрахункових характеристик по відношенню до експериментальних даних у режимах пуску та перевантаження, а саме кратності пускового струму K_I та кратності пускового моменту K_{II} .

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Кисленко В.И., Оноприч В.П., Ракицкий Л.Б. Задачи расчёта и проектирования асинхронных двигателей малой мощности // Техн. электродинамика. – 1997. – № 2. – С. 38–41.
3. Проектирование электрических машин / Под ред. Копылова И.П. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

УДК 621.313

В.П. Оноприч, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Основные характеристики и параметры схемы замещения асинхронных двигателей с учётом изменения магнитного состояния магнитопроводов

Приведен усовершенствованный алгоритм расчёта параметров схемы замещения статора и ротора асинхронных двигателей (АД) малой мощности с учётом влияния насыщения от полей рассеяния и вытеснения тока. Проведено сравнение основных характеристик АД, рассчитанных по различным методикам, с экспериментальными данными. Библи. 3, табл. 5.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, параметры схемы замещения, учёт влияния насыщения от полей рассеяния и вытеснения токов, основные характеристики АД, методика расчёта.

V. Onoprych

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The main characteristics and parameters of the equivalent circuit of induction motors taking into account the changes of the magnetic condition of the magnetic cores

An improved algorithm for calculating the equivalent circuit parameters of the stator and rotor of low-power induction motors, taking into account the saturation effects from stray fields and current displacement has been considered. Comparison of the basic characteristics of the induction motor, which were calculated by various methods, with the experimental data has been performed. References 3, tables 5.

Key words: induction motors, equivalent circuit parameters, account of saturation influence from the stray fields and displacement currents, the main characteristics of the induction motor, calculation method.

Надійшла 11.11.2015
Received 11.11.2015

