



ЧУМАК В.В., канд. техн. наук., доцент,
ТИМОЩУК О.Л., канд. техн. наук., доцент,
СТУЛІШЕНКО А.С., студент, Національний технічний
 університет України "КПІ ім. І. Сікорського"

УДОСКОНАЛЕННЯ ВТОРИННИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ ЗІ ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ

В статті дані рекомендації щодо удосконалення високочастотних параметрів схем заміщення електричних машин змінного струму зі всипними обмотками для розрахунку амплітудно-частотних характеристик з метою оцінки якості міжвиткової ізоляції обмоток.

Ключові слова: частотні характеристики, високочастотний, високочастотні процеси, електричні машини зі всипними обмотками, хвильові параметри схем заміщення.

При аналізі специфічних умов роботи електричних машин зокрема низьковольтних асинхронних двигунів зі всипної обмоткою необхідно використовувати частотні характеристики в діапазоні від 1 кГц до 1 МГц. До частотних характеристик відносяться залежності характеристичного або хвильового опору від частоти, а також залежність вхідних опорів в режимах неробочого ходу та короткого замикання. На практиці у якості частотних характеристик зазвичай використовують частотні залежності модулів цих опорів від частоти (амплітудні частотні характеристики) та їх аргументів (фазові частотні характеристики).

Електричні машини зі всипними обмотками є досить чисельним видом електромеханічного обладнання. Всипні обмотки мають низку особливостей у порівнянні з високовольтними обмотками потужних електричних машин. Представляє інтерес визначити аналітично по конструктивним даним електричних машин частотні характеристики, які можуть бути використані для діагностичних цілей і оцінки стану, в першу чергу, ізоляції обмоток.

Для розрахунку частотних характеристик представимо схему заміщення однієї фази всипної обмотки у вигляді однорідного ланцюга який складається з П-подібних ланок зі зосередженими параметрами Рис. 1

В якості окремої ланки цього ланцюга приймаємо котушку як складову фази обмотки. Кожна ланка ланцюгової схеми заміщення складається з активного опору котушки R_g еквівалентного втрапам в сталі, еквівалентну індуктивність котушки L , повздовжню ємність K , поперечна ємність C_g тобто ємність котушки відносно корпусу, а також опір ізо-

ляції котушки відносно корпусу R_g . Перелічені параметри для всипних обмоток можуть бути розраховані по конструктивним даним двигунів. Зокрема ємність котушки відносно корпусу визначається з математичної моделі побудованої за принципом плоского конденсатора з еквівалентним проміжком [5].

Формули розрахунку. В зв'язку з необхідністю оцінки розподілення хвильової напруги вздовж обмотки низьковольтного асинхронного двигуна на стадії його проектування необхідно володіти методами розрахунку вторинних хвильових параметрів всипної обмотки і, зокрема, ємністю обмотки відносно корпусу по геометричним розмірам і обмоточним даним двигуна.

На основі вивчення літератури [1–3] вдалось визначити, що ємність котушки всипної обмотки може бути визначена за формулою плоского конденсатора.

$$C = 2 (\epsilon_0 S) / \delta, \quad (1)$$

де ϵ_0 – електрична стала, S – внутрішня поверхня паза, яка приймає участь в створенні ємності на корпус, δ – еквівалентний проміжок.

При периметрі паза Π і довжині пакета статора l_n внутрішня поверхня паза дорівнює

$$S = \Pi * l_n, \quad (2)$$

Під еквівалентним проміжком δ в виразі (1) слід розуміти проміжок між обкладками плоского повітряного конденсатора з площею обкладок S , яка дорівнює поверхні паза, і з ємністю C_n , яка дорівнює одній пазовій частині котушки обмотки.

Приймаючи до уваги властивості плоского конденсатора, доцільно математичну модель еквівалентного проміжку представити у вигляді.

$$\delta = \Delta / e'_r + A_1 d + A_2 (1 / f_n), \quad \Delta = \Delta_{i3} + (d_{i3} - d) / 2, \quad (3)$$

d – діаметр неізолюваного проводу обмотки, d_{i3} – діаметр ізолюваного проводу, Δ_{i3} – товщина пазової ізоляції, e'_r – відносна діелектрична проникність фіктивної однорідної області між міддю проводу і стінкою паза, f_n – коефіцієнт заповнення паза.

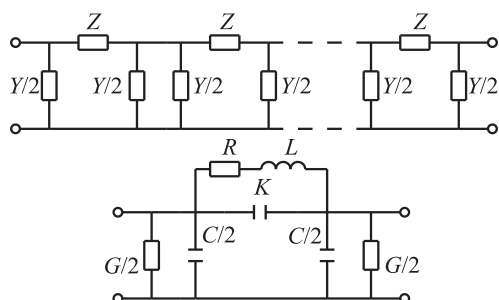
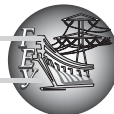


Рис. 1. П-подібна ланка зі зосередженими параметрами



Таблиця 1. Параметри двигунів 4АХ71Н8, 4А80А4, 4А100Л43

Тип Двигуна	4АХ71Н8	4А80А4	4А100Л43
$C_{ф.вимір}$, нФ	1,16	0,92	1,72
d , мм	0,41	0,67	1,3
$d_{із}$, мм	0,44	0,73	1,4
$\Delta_{із}$, мм	0,2	0,2	0,25
ν	4	4	4
ln , мм	90	100	140
f_n	0,73	0,72	0,715
Π , мм	30,6	31,6	39,4
S , мм ²	2754	3160	5516

Вводячи заміну $A=1/e_r'$ отримаємо для еквівалентного проміжку

$$\delta = A \Delta + A_1 d + A_2 (1/f_n), \quad (4)$$

$$\delta_{вимір} = 2 (\epsilon_0 \nu S_k) / C_{ф.вимір}, \quad (5)$$

де $C_{ф.вимір}$ – виміряна ємність однієї фази обмотки відносно корпусу, ν – число котушок в фазі обмотки. З іншого боку для k -го типорозміру, у відповідності з (4) можна записати

$$\delta_k = A \Delta_k + A_1 d_k + A_2 (1/f_{nk}). \quad (6)$$

Для визначення коефіцієнтів в (6) за загальними правилами методу найменших квадратів [4] складемо три рівняння:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n (\delta_{вимір} - \delta_k) (\partial \delta / \partial A)_k &= 0, \\ \sum_{k=1}^n (\delta_{вимір} - \delta_k) (\partial \delta / \partial A_1)_k &= 0, \\ \sum_{k=1}^n (\delta_{вимір} - \delta_k) (\partial \delta / \partial A_2)_k &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Знаходячи часткові похідні і виконуючи необхідні підстановки, отримаємо систему трьох лінійних алгебраїчних рівнянь, з трьома невідомими: A, A_1, A_2

$$\begin{aligned} \alpha_1 A + \alpha_2 A_1 + \alpha_3 A_2 &= \beta_1, \\ \alpha_2 A + \alpha_4 A_1 + \alpha_5 A_2 &= \beta_2, \\ \alpha_3 A + \alpha_5 A_1 + \alpha_6 A_2 &= \beta_3, \end{aligned} \quad (8)$$

В цій системі рівнянь

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \sum_{k=1}^n \Delta_k^2; \alpha_2 = \sum_{k=1}^n d_k \Delta_k; \alpha_3 = \sum_{k=1}^n \Delta_k / f_{nk}; \\ \alpha_4 &= \sum_{k=1}^n d_k^2; \alpha_5 = \sum_{k=1}^n d_k / f_{nk}; \alpha_6 = \sum_{k=1}^n 1 / f_{nk}^2; \\ \beta_1 &= \sum_{k=1}^n \delta_{вимір} \Delta_k; \beta_2 = \sum_{k=1}^n \delta_{вимір} d_k; \beta_3 = \sum_{k=1}^n \delta_{вимір} / f_{nk}. \end{aligned} \quad (9)$$

Дані досліджуваних двигунів наведено в Табл. 1

Периметр паза розраховувався шляхом його проектування в пакеті AutoCad, розміри взяті з довідника Кравчика.

Площа паза розраховується за формулою (2) – $S = \Pi * l_n$. Розрахована площа паза для двигунів типу: 4АХ71Н8 – 2754 мм², 4А80А4 – 3160 мм², 4А100Л43 – 5516 мм².

Розрахунок $\Delta, \delta_{вимір}$

Тип двигуна	4АХ71Н8	4А80А4	4А100Л43
Δ , мм	0,215	0,23	0,3
$\delta_{вимір}$, м	0,000168	0,000243	0,000227

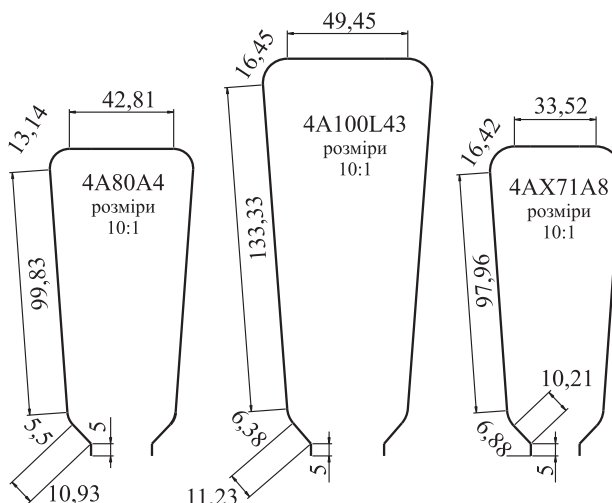


Рис. 2. Периметр паза для 4АХ71Н8, 4А80А4, 4А100Л43. Дані занесені в Табл. 1.

Для того щоб розрахувати δ по формулі (6) необхідно розрахувати коефіцієнти (9) з системи рівнянь (8), щоб після цього визначити коефіцієнти A, A_1, A_2 . Коефіцієнти $\alpha_1 - \alpha_6$:

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
0,189	0,632	1,05	2,31	3,369	5,953

Коефіцієнти $\beta_1 - 0,16; \beta_2 - 0,527; \beta_3 - 0,9$ для матриці
Складемо і розрахуємо матрицю методом Гауса:

$$\begin{pmatrix} 0,189A & 0,632A_1 & 1,051A_2 & = & 0,160 \\ 0,632A & 2,307A_1 & 3,369A_2 & = & 0,527 \\ 0,051A & 3,369A_1 & 5,953A_2 & = & 0,9 \end{pmatrix}$$

Звідси $A = -5,7667; A_1 = 0,5833; A_2 = 0,8391$

Розраховуємо δ по формулі (6). Розраховані $\delta_k, C_{розр}$ для 4АХ71Н8, 4А80А4, 4А100Л43:

Тип двигуна	4АХ71Н4	4А80А4	4А100Л43
δ_k , м	0,000352	0,000298	0,000174
$C_{розр}$, нФ	0,2898	0,2427	0,5
Похибка C , %	0,045	-5,52	-16,5

Приклад розрахунку ємності двигунів для двигунів серії 4А. Обрані двигуни – 4А160Н8, 4А200А4, 4А250А4. Необхідні параметри двигунів:

Тип двигуна	4А160Н8	4А200А4	4А250А4
d , мм	1,4	1,35	1,5
$d_{із}$, мм	1,465	1,41	1,565
$\Delta_{із}$, мм	0,41	0,41	0,41
ν	4	4	4
ln , мм	210	267	349
f_n	0,714	0,713	0,712
Π , мм	53	65	53
S , мм ²	11130	17355	18497

Розраховуємо δ за формулою (6) і $C_{розр}$ по формулі (2)

Тип двигуна	4А160М4	4А200М4	4А250М4
δ_k , м	0,00294	0,000529	0,000736
$C_{розр}$, нФ	44,5	58	67

Висновки. Існуючі методи розрахунку ємності не задовольняють вимогам точності особливо електричних машин із всипними обмотками. Запропонована методика дозволяє збільшити точність розрахованої ємності і розповсюдити цей розрахунок на відрізок серії машин з однаковим типорозміром.



Представлені результати розрахунку за запропонованою методикою достатньо точно збігаються з вимірними на трьох двигунах, які представляють відрізок серії 4А.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Каганов З. Г.* Емкостные параметры обмоток электрических машин переменного тока. Труды Ленинградского политехнического института. —1960. вып. 209, — С. 64–65.

2. *Каганов З. Г.* Волновые напряжения в электрических машинах. Изд-во "Энергия", 1970. — 124 с.

3. *Комаров Н. Г., Мартынова Н. М. Суворов Н. И.* Волновые параметры низковольтных асинхронных двигателей. Сб. "Электротехническая промышленность" серия "Электрические машины". — 1971. вып.10. — 76 с.

4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. Изд-во "Наука", 1969. — 228 с.

5. *Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M.* (2007). Experimental High-Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors. Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale, C.so Duca degli Abruzzi, 24 10129 Torino, Italy. — 2 с.

© Чумак В.В., Тимошук О.Л., Стулішенко А. С., 2018

