

УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ОБМОТКОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

Описана універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів, яка ґрунтується на використанні комплексних чисел. Методика надзвичайно проста і дозволяє обчислювати обмоткові коефіцієнти будь-яких обмоток без винятку. Розглянуті деякі публікації останніх років, які присвячені розрахункам обмоткових коефіцієнтів.

Изложена универсальная методика расчета обмоточных коэффициентов, которая основывается на использовании комплексных чисел. Методика чрезвычайно проста и позволяет вычислять обмоточные коэффициенты любых обмоток без исключения. Рассмотрены некоторые публикации последних лет, которые посвящены расчетам обмоточных коэффициентов.

Процес перетворення енергії в електричній машині пов'язаний з її магнітним полем. Розрахунок магнітного поля, яке утворюється струмами в обмотках, вимагає раціонального проектування обмоток, уміння вирахувати їх обмоткові коефіцієнти для правильного визначення ЕРС обмоток, а також уміння розраховувати МРС обмоток, величини яких залежать від обмоткових коефіцієнтів.

Обмоткові коефіцієнти для основної і вищих гармонік є якісними характеристиками обмотки і правильне обчислення їх простими способами має велике практичне значення.

Якщо вирахування обмоткових коефіцієнтів симетричних дво або одношарових обмоток з цілим числом пазів на полюс і фазу q та з суцільною фазною зоною не викликає труднощів [1, 2], то для більш складних обмоток розрахунок дуже ускладнюється [3], а інколи і взагалі неможливий з достатнім ступенем точності, як, наприклад, у випадку необхідності векторного складування пазових ЕРС [4].

Згідно з класичною методикою розрахунок обмоткових коефіцієнтів ґрунтується на окремому визначенні коефіцієнта розподілення k_{pv} і коефіцієнта скорочення $k_{ск.v}$ для v -их гармонік з метою подальшого їх перемноження для одержання $k_{обv}$. Жерве Г.К. [3] вводить ще й коефіцієнт з'єднання обмотки $k_{зв}$, що враховує ті особливості складання ЕРС, які залежать від характеру з'єднання котушкових груп, і можуть викликати появу в кривій ЕРС гармонічних парних порядків.

Але при виборі оптимального варіанту обмотки має практичне значення обмотковий коефіцієнт $k_{обv}$, а не його складові коефіцієнти розподілення k_{pv} , скорочення $k_{ск.v}$ та з'єднання $k_{зв}$.

Обмотковий коефіцієнт для основної (першої) гармоніки $k_{об1}$, який характеризує витрату міді обмотки, намагаються одержати максимально можливим. Обмоткові коефіцієнти для вищих гармонік визначають амплітуди магнітних полів вищих гармонік, наявність яких збільшує додаткові втрати, шум, вібрації, створює в асинхронних двигунах провали в кривій електромагнітного моменту. Тому намагаються спроектувати обмотку з як можна меншими значеннями обмоткових коефіцієнтів для вищих гармонік.

Розроблена універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів для m -фазних обмоток будь-якої складності, наприклад, для дробових,

несиметрично-дробових, з несучільними фазними зонами, з різним числом витків в котушках, для різного виду суміщених обмоток [5, 6]. Використання універсальної методики для розрахунків суміщених обмоток показано в [7]. Обмотковий коефіцієнт визначається відразу, без попереднього окремого визначення k_{pv} , $k_{ск.v}$ та $k_{зв}$, як відношення геометричної суми ЕРС активних провідників фази до їх арифметичної суми.

Геометричну суму зручно одержувати з допомогою комплексних чисел. Вісь ординат приймаємо за дійсну вісь комплексної площини і суміщаємо її з останнім Z -м пазом. Вісь абсцис, направлену вздовж розточки статора, приймаємо за вісь уявних чисел.

Вектор ЕРС першої активної сторони котушки, розміщеної в n -ому пазу, для v -ої гармоніки у відносних одиницях:

$$\dot{E}_{nv} = \cos(v \cdot n \cdot \alpha_1) + j \cdot \sin(v \cdot n \cdot \alpha_1), \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{360^\circ \text{ел.} \cdot p}{Z}, \quad (2)$$

де α_1 – кут в електричних градусах для основної гармоніки між поряд розміщеними пазами; p – число пар полюсів обмотки; Z – число пазів.

Вектор ЕРС другої активної сторони котушки, розміщеної в k -му пазу

$$\dot{E}_{kv} = -\cos(v \cdot k \cdot \alpha_1) - j \cdot \sin(v \cdot k \cdot \alpha_1). \quad (3)$$

ЕРС фази

$$\begin{aligned} \dot{E}_v &= \sum_{v=1,2,3,\dots} (\cos v n \alpha_1 + j \sin v n \alpha_1) - \\ &- \sum_{k=1+y_1, 2+y_2, \dots, n+y_n} (\cos v k \alpha_1 + j \sin v k \alpha_1). \end{aligned} \quad (4)$$

складається із двох груп складових. В першу групу входять позитивні значення ЕРС активних сторін, які при обході фази направлені знизу вгору, в другу групу – від'ємні значення ЕРС активних сторін, які при обході направлені зверху вниз.

Якщо фаза складається із паралельних віток, як це частіше всього трапляється в суміщених обмотках, необхідно підсумувати ЕРС котушок якої-небудь одної паралельної вітки. Якщо паралельні вітки якимсь чином відрізняються, необхідно визначити ЕРС кожної паралельної вітки для розглядуваних гармонік.

Вектор ЕРС фази \dot{E}_v після розрахунків для якої-

небудь гармоніки подають у вигляді суми дійсної і уявної складових:

$$\dot{E}_v = A_v + jB_v. \quad (5)$$

Модуль комплексної величини \dot{E}_v буде являти собою геометричну суму ЕРС активних провідників фази для v -ої гармоніки:

$$E_v = \sqrt{A_v^2 + B_v^2}. \quad (6)$$

Арифметична сума ЕРС активних провідників фази є сума максимальних значень ЕРС активних сторін котушок, що складають паралельну вітку фази. Приймаючи максимальне значення ЕРС одної активної сторони котушки при визначенні \dot{E}_v за одиницю, арифметичну суму ЕРС активних провідників фази визначають числом активних сторін котушок паралельної вітки даної фази.

Отже, обмотковий коефіцієнт для v -ої гармоніки

$$K_{об.v} = E_v / N, \quad (7)$$

де E_v – модуль комплексної величини \dot{E}_v ; N – число активних сторін котушок паралельної вітки фази.

Якщо числа витків котушок розглядуваної фази відрізняються, то в формулу вектора ЕРС фази необхідно вводити як співмножник число витків котушок W_n .

Якщо m -фазна обмотка несиметрична, то потрібно врахувати ЕРС \dot{E}_1 основної гармоніки для всіх m фаз і упевнитись, що ЕРС трифазних обмоток зсунуті між собою на кут 120° ел., двофазних обмоток – на кут 90° ел.

Розглянемо застосування розглянутої методики на прикладі несиметричної дробової обмотки, $Z = 24$, $2p = 6$, $q = 1\frac{1}{3}$ (рис. 1), яка трапляється на ремонтних підприємствах в зв'язку з обмеженим вибором необхідних магнітопроводів.

Для цієї обмотки

$$\alpha_1 = \frac{360^\circ \cdot p}{Z} = \frac{360^\circ \cdot 3}{24} = 45^\circ \text{ ел.}$$

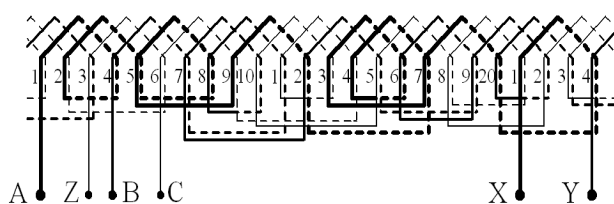


Рис. 1. Схема несиметричної дробової обмотки

Для фази А

$n = 1, 2, 8, 9, 16, 17, 17, 24$;
 $k = 4, 5, 5, 12, 13, 14, 20, 21$.

Для фази В

$n = 3, 4, 10, 11, 12, 19, 19, 20$;
 $k = 7, 7, 8, 15, 16, 22, 23, 24$.

Для фази С

$n = 6, 6, 13, 14, 15, 21, 22, 23$;
 $k = 9, 10, 11, 18, 18, 1, 2, 3$.

$$N = \sum n + \sum k \approx 16.$$

Одержуємо:

для фази А: $A + jB = 11,657 + j7,657$;

для фази В: $A + jB = -11,657 + j7,657$;

для фази С: $A + jB = -j13,657$.

Обмоткові коефіцієнти:

для фази А: $k_{об.1} = 0,872$;

для фази В: $k_{об.1} = 0,872$;

для фази С: $k_{об.1} = 0,854$.

Отже викладена методика, яка використовує комплексні числа і легко реалізується на комп'ютерах чи програмованих мікрокалькуляторах, дозволяє з великою точністю і швидкістю розрахувати обмоткові коефіцієнти основної і вищих гармонік будь-якої обмотки і полегшити вибір оптимального варіанту обмотки.

Найвизначніша книга про обмотки електричних машин – це монографія Жерве Г.К. [3]. В ній 96 сторінок тексту разом з додатками присвячено обмотковим коефіцієнтам, їх фізичній сутності та розрахункам. Монографія Жерве Г.К. – взірць професійної досконалості, ретельності та завершеності.

Однак, з'являються публікації, які викликають подив і незрозуміння. Так, в [8] зазначено, що стаття присвячена аналізу електромагнітних властивостей нетрадиційних обмоток, і, як можна здогадатись після декількоразового прочитання, мова йде про обмотки з несущільними фазними зонами. Однак стаття присвячена лише виводу формули для k_{pv} . Висновок надзвичайно складний і незрозумілий, не всі літерні позначення пояснені, одержана формула для k_{pv} ледь вміщується в два рядки тексту. Як формулою користуватись – незрозуміло, тоді як Жерве Г.К. [3, приклад 3.2] дає просте і зрозуміле пояснення знаходження k_{pv} для подібних обмоток.

В [9] взагалі розглядається абсурдний варіант обмотки [9, рис. 1]. В фазі А в два рази більше котушок, ніж в фазах В і С.

Які ж практичні досягнення одержані в результаті цих складних і незрозумілих досліджень? В [10] на рис. 4, 5 показані схеми двофазних обмоток, які пропонуються для серійного впровадження. По схемі на рис. 4 за рахунок скорочення середнього кроку зменшується витрата обмоткового проводу на 2,6 %. В табл. 2 приводиться порівняльний аналіз обмоткових коефіцієнтів $k_{обv}$ обмотки на рис. 4 і серійної обмотки, яка названа базовою (чомусь обмоткові коефіцієнти в табл. 2 названі коефіцієнти розподілення і позначені k_{pn}). Як видно із таблиці, $k_{об1}$ зменшується на 7 %, що призведе до збільшення числа витків на 7 %, зменшення поперечного перетину проводу на 7 %, збільшення опору обмотки на 12,3 %. На стільки ж збільшуються втрати в міді, збільшується нагрівання двигуна, на кілька відсотків зменшується ККД. Звичайно, таку обмотку впроваджувати в серійне виробництво ніхто не буде.

По схемі на рис. 5, позначеної як обмотка M_{6S02} , порівняльна таблиця обмоткових коефіцієнтів не

приводиться. Нижче, в табл. 1 приведені обмоткові коефіцієнти і номери пазів n і k базової обмотки (однієї фази) та двох фаз запропонованої в [10] обмотки M_{6S02} , фази якої відрізняються між собою.

Таблиця 1

Обмоткові коефіцієнти обмотки M_{6S02}

	Базова обмотка	Обмотка M_{6S02}	
		Фаза В	Фаза С
v	$k_{обв}$	$k_{обв}$	$k_{обв}$
1	0,903	0,782	0,782
2	0	0	0,322
3	0,308	0	0
4	0	0,5	0
5	0,194	0,168	0,168
6	0	0	0,471
7	0,149	0,129	0,129
8	0	0,289	0
9	0,128	0	0
10	0	0	0,086
11	0,119	0,103	0,103
n, k	$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6;$ $k = 13, 14, 15, 16, 17, 18$	$n = 7, 8, 9, 10, 13, 14;$ $k = 17, 18, 21, 22, 23, 24$	$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ $k = 11, 12, 15, 16, 19, 20$

Як видно із табл. 1, обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці зменшується на 13,4 % зі всіма негативними наслідками, які розглянуті в попередньому випадку. По обмотковим коефіцієнтам вищих гармонік обмотка M_{6S02} також значно поступається базовій обмотці, особливо якщо взяти до уваги, що 2-а, 6-а і 10-а гармоніки в лінійній ЕРС двофазної обмотки збільшуються в 2 рази, в той час як решта гармонік збільшується в $\sqrt{2}$ раз.

Приведений вище аналіз останніх публікацій додатково підтверджує актуальність і необхідність повсюдного застосування універсальної методики розрахунку обмоткових коефіцієнтів, яка є надзвичайно простим способом визначення обмоткових коефіцієнтів обмоток будь-якої складності і є доступною спеціалістам із середньою технічною освітою.

Універсальна методика розрахунку обмоткових коефіцієнтів знімає проблему знаходження обмоткових коефіцієнтів, яка є штучно створена і надумана заради одержання сумнівних наукових дивідендів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: 2003. – 496 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: 1980. – 928 с.
3. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.
4. Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 768 с.
5. Луцки В.Д. Расчет обмоточных коэффициентов m-фазных обмоток // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – №3. – С. 267-275.
6. Луцки В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. – К.: Техніка, 1993. – 203 с.
7. Луцки В.Д. Асинхронні двигуни з фазними роторами з каскадними властивостями при пуску // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 2. – С. 39-41.
8. Дегтев В.Г., Шульгин Д.Н., Дмитриева Т.Н. Анализ электромагнитных свойств нетрадиционных обмоток // Электротехніка і електромеханіка. – 2005. – № 3. – С. 20-25.
9. Дегтев В.Г., Бабушанов А.В., Коваленко И.А. Синтез полных гомологических рядов трехфазных обмоток // Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). Частина 1. – С. 78-81.
10. Смірнов С.Б. Структурний синтез двофазних обмоток асинхронних двигунів // Автореферат дисертації на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук. 2008.

Надійшла 09.09.2010

Луцки В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.
Донбаський державний технічний університет
кафедра електричних машин та апаратів,
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел.: (06442) 2-31-23
e-mail: info@dgmi.edu.ua

V.D. Luschiuk

Universal method of winding coefficients calculation.

The universal method of winding coefficients calculation is expounded, which is based on the use of imaginaries. A method is extraordinarily simple and allows to calculate the winding coefficients of any winding without an exception. Some publications of the last years which are devoted the calculations of winding coefficients are considered.

Key words – winding coefficients, calculations method.