

О. Б. Бабей

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
oleh.b.babei@lpnu.ua

Б. М. Харчишин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
Bohdan. M. Kharchyshyn@lpnu.ua

М. В. Хай

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
Mykhailo.V.Khai@lpnu.ua

АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ОБМОТОК БАГАТОПОЛЮСНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

<https://doi.org/>

© Бабей О. Б., Харчишин Б. М., Хай М. В., 2024

Виконано аналіз досліджень, пов’язаних з проєктуванням обмоток електричних машин з дробовою кількістю пазів на полюс і фазу, встановлено переваги електричних машин з неперехресними обмотками. Проаналізовано спроби відійти від побудови зірки електрорушійних сил під час побудови схем обмоток, що дасть змогу алгоритмізувати та автоматизувати проєктування таких обмоток.

У цьому дослідженні за допомогою елементів теорії чисел встановлено алгоритм формування багатозазної багатополісної неперехресної обмотки, що забезпечує порядок з’єднання секцій у фазну структуру. Алгоритм забезпечує електромагнітну симетрію фаз, максимальне значення коефіцієнта розподілу секцій у фазній зоні для основної гармоніки поля, мінімальну довжину з’єднань між секціями.

Описано конфігурацію секцій гладкої структури якоря для машин з осьовим та радіальним протіканням магнітного потоку, визначено оптимальні з погляду використання обмоткового матеріалу кількості секцій для заданої кількості фаз та полюсів, а також розміри величини вікна секції.

Встановлено умови електричної симетрії структури фаз щодо кількості секцій, пар полюсів, фаз та наявності у них спільних дільників. Описано можливість формування структури фазної зони обмотки шляхом послідовного з’єднання секцій, що відрізняються між собою фазовим фактором, вибіркою їх із замкненої кільцевої структури з відповідним кроком.

На основі теорії чисел обґрунтовано формування правоходової та лівоходової обмотки з прямим та зворотним чергуванням фаз.

Наведено вирази для визначення обмоткових коефіцієнтів неперехресних обмоток, які можна застосовувати для гладких та зубцевих структур якоря..

Запропоновано застосувати на основі теорії чисел табличний апарат математичного опису компоновання неперехресних обмоток без застосування зірки ЕРС. Окремо наведено вирази для однозонних та двозонних обмоток щодо визначення належності секцій до фазних зон, до фаз, напрямку увімкнення секцій.

Наведено приклади. Визначено напрями подальших досліджень

Ключові слова: обмотки електричних машин, неперехресні обмотки, алгоритми побудови обмоток, обмотковий коефіцієнт, умови симетрії обмоток, зірка електро-рушійних сил, фазна зона.

Вступ

Перші праці щодо проектування обмоток електричних машин сягають столітньої давнини і належать стовпам електромеханіки Е. Арнольду, Р. Ріхтеру і В. Каудерсу (В. Кліму) [1]. Саме вони заклали фундамент та розвинули системний метод проектування обмоток електричних машин як постійного, так і змінного струму, що полягає у побудові зірки пазових електрорушійних сил, який і досі вважається класичним [2]. Подальші дослідження у цьому напрямі мали характер удосконалення підходів синтезу обмоток та визначення їх обмоткових коефіцієнтів з урахуванням гармонічного складу для конкретних типів обмоток чи електричних машин, уникаючи узагальненого підходу.

В наш час посилена увага приділяється новітнім типам електричних машин, зокрема багатополюсним та багатофазним, що дає змогу вирішити велику кількість проблем, які виникають під час експлуатації в сучасних умовах. Це насамперед електричні машини з дробовою кількістю пазів на полюс та фазу (англ. “fractional-slot”) із зосередженими або неперехресними обмотками (англ. “non-overlapping windings”) [3, 4, 5, 6]. Такі конструктивні рішення дають змогу зменшити пульсації обертового моменту, знизити величину втрат в обмотці якоря, підвищити надійність та відмовостійкість, знизити взаємоіндуктивність фаз та окремих секцій обмотки, розширити діапазон частот обертання в сторону наднизьких величин тощо [7, 8, 9].

Пізніше почалися спроби алгоритмізації та автоматизації синтезу структури таких обмоток. Не припиняються вони і зараз, однак усі вони обмежуються окремими проектними завданнями і не можуть вважатися простими і універсальними [3, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Окремої уваги заслуговує останнє дослідження [15], де із застосуванням табличного апарату математично описано компоновання обмоток електричних машин без застосування зірки пазових ЕРС, зокрема можливість перенесення секцій в іншу зону з метою покращення гармонічного складу ЕРС.

Завдання дослідження

Завданням цього дослідження було встановлення з використанням елементів теорії чисел алгоритму формування багатофазної неперехресної обмотки, що забезпечить порядок з'єднання секцій у структуру фазної зони та фазних зон між собою з дотриманням електромагнітної симетрії фаз проектованої обмотки, максимального обмоткового коефіцієнта основної гармоніки магнітного поля, найменшу довжину перемичок між секціями та компактне розташування виводів фаз обмотки.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження у цій статті є багатополюсна електрична машина.

Предмет дослідження

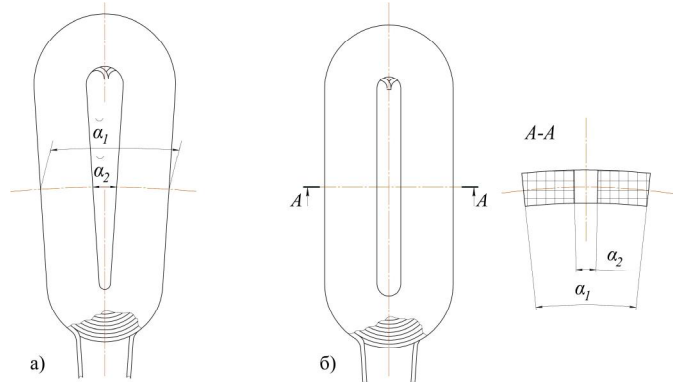
Предметом дослідження є структура обмотки багатополюсної електричної машини змінного струму.

Виклад основного матеріалу

Загальна характеристика неперехресних обмоток машин змінного струму

За конструкцією електричні машини взагалі та з неперехресними обмотками зокрема бувають зубцевими та з гладким якорем. З погляду структури обмотки, її властивостей та параметрів обмотки зубцевих машин є частковим випадком більш загального беззубцевого виконання, який ми розглядатимемо у подальшому. Секції якірних обмоток беззубцевого виконання дискового та циліндричного типу показані на рис. 1, а та б. Вони також відомі як обмотки електричних машин аксіального та радіального магнітного потоку.

Рис. 1. Форма секції неперехресної обмотки дискового (а) та циліндричного (б) виконання



Неперехресну обмотку m -фазної p -полюсної машини складають S спіралью навитих круглим або прямокутним обмотковим провідником двошарових або багатшарових секцій, показаних на рис. 1. Секції вклядено розточкою впритул одна до одної, тому зовнішній кутовий розмір секції α_1 є не більшим за величину $2\pi / S$, а розмір в середині вікна секції α_2 з огляду на оптимальне застосування матеріалу обмотки переважно лежить в межах $0,2\pi / p \leq \alpha_2 \leq 0,3\pi / p$ [5]. Перехід із шару в шар через технологічні міркування виконують у вікні секції, що дає змогу отримати початок і кінець секції зовні її контура, уникнувши при цьому перехрещувань виводів з лобовими частинами. Замість багатшарових секцій можна виконувати секції з двома шарами різної товщини. Переходи між шарами у вікні секції часто виконуються неперервним провідником, уникаючи припаювань чи зварювань.

Під час подальшого дослідження використовуватимемо елементи та категорії теорії чисел, через те кількості пар полюсів, секцій фаз тощо (p, S, m, \dots) розглядатимемо як числа. З огляду на умови симетрії структури фаз число S має бути кратним для однозонних обмоток числу m ($S = m t$, де t – це кількість секцій у зоні), а для двозонних симетричних обмоток S має бути парним, проте нижче буде показано, що таку обмотку можна виконати з фазними зонами, що мають різну ширину.

Умова електромагнітної симетрії фаз на числа p і m накладає такі обмеження – вони мають бути взаємно простими.

Щодо чисел p та S , вони спільні дільники можуть мати, але у цьому випадку при найбільшому дільнику a ($S = S_e a$ і $p = p_e a$) обмотка розпадеться в електричному сенсі на a елементарних симетричних систем S_e, p_e . Це дає змогу організувати максимальну кількість a паралельно з'єднаних віток в кожній із фаз обмотки. Отже, елементарна структура обмотки визначається числами S_e, p_e та m . Через те індекс “е” у подальшому не вказується, хоча розуміємо, що p, S та m утворюють елементарну систему.

Алгоритм створення неперехресної m -фазної обмотки має задавати порядок з'єднання секцій у фазну зону і під'єднання цих фазних зон між собою, водночас забезпечуючи:

- електромагнітну симетричність фаз обмотки;
- максимальну величину коефіцієнта обмоткового основної гармоніки поля $v = p$;
- найменшу довжину перемичок між секціями;
- зручність розміщення початків і кінців фаз.

Електромагнітна симетричність фаз обмотки досягається виконанням згаданих вище обмежень на співвідношення між числами S , m та p . Максимальне значення обмоткового коефіцієнта основної гармоніки магнітного поля $K_{\Phi v}$ буде за сформування фазної зони послідовно згідним з'єднанням секцій, які відрізняються фазовим фактором для p -ї гармоніки φ_p , що дорівнює найменшому можливому фазному фактору елементарної системи p , S та m , який утворює величину $\varphi = 2\pi / S$, тобто φ_p має також дорівнювати $2\pi / S$, що здійснено формуванням фазної зони вибіркою секцій із замкненої колової структури S із кроком

$$y = \frac{S k \pm 1}{p}, \quad (1)$$

де k – найменше додатне та ціле число, що забезпечує умову рівності числа y цілому додатному числі.

На основі китайської теореми про залишки [16] можна довести, що для циклічної S -групи та взаємно простих p та S завжди існує число k , що забезпечує рівняння (1). Крім того, таких чисел є два – k_1 та k_2 , які виконують умову $k_1 + k_2 = p$, і числа y_1 та y_2 за (1) є такими, що $y_1 + y_2 = S$. Одна з пар y_1 і k_1 формує обмотку правоходову з чергуванням фаз прямим, а інша пара y_2 та k_2 формує лівоходову обмотку із чергуванням фаз зворотним.

Для забезпечення найменшої довжини перемичок між секціями потрібно брати те з чисел y , для якого $y < 0,5S$, а потрібний порядок черговості фаз забезпечується зміною порядку підімкнення виводів фаз обмотки.

Зонний обмотковий коефіцієнт неперехресної обмотки для v -ї гармоніки поля описується таким виразом:

$$K_{fv} = K_{yv} K_{pv} K_{zv} = K_{cv} K_{zv}, \quad (2)$$

де $K_{yv} = \sin \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)v}{4}$ – коефіцієнт вкорочення кроку витків. Для зубцевої обмотки якоря цей

коефіцієнт визначається за $K_{yv} = \sin \left(\frac{v\pi p}{S} \right)$; $K_{pv} = \frac{\sin[(\alpha_1 - \alpha_2)v / 4]}{(\alpha_1 - \alpha_2)v / 4}$ – коефіцієнт розподілу

провідників по ширині активної сторони секції. Для зубцевої обмотки якоря цей коефіцієнт

дорівнює одиниці; $K_{zv} = \frac{\sin \frac{\pi y v t}{S}}{t \sin \frac{\pi y v}{S}}$ – коефіцієнт розподілу секцій обмотки по фазній зоні.

Добуток $K_{yv} K_{pv} = K_{cv}$ не залежить від будови обмотки і визначається за заданого p тільки параметрами секції α_1 та α_2 . Умова $\frac{K_{cv}}{m'} = \max$ виконується за оптимальних співвідношень

$$\alpha_{1onm} \approx \frac{\pi + 2}{4} \tau = \pi \frac{\pi + 2}{4p} \quad \text{і} \quad \alpha_{2onm} \approx \frac{\pi - 2}{4} \tau = \pi \frac{\pi - 2}{4p}, \quad (3)$$

де m' – відносне значення маси обмоткового матеріалу; $\tau = \pi / p$ – величина полюсної поділки [5].

Вираз (3) встановлює оптимальне значення кількості секцій в неперехресній обмотці S_{opt} для заданих p та m

$$S_{onm} = m \operatorname{Int} \left(\frac{8}{\pi + 2} \cdot \frac{p}{m} \right), \quad (4)$$

де Int – оператор, що виділяє цілу частину числа.

Для α_1 та α_2 , визначених за (3), коефіцієнти K_{yv} та K_{pv} визначаються

$$K_{yv} = \sin \frac{\pi^2 v}{8p}, \quad K_{pv} = \frac{4p}{\pi v} \sin \frac{\pi v}{4p}.$$

Отже, для просторової основної гармоніки магнітного поля $v = p$ величина обмоткового коефіцієнта секції є не більшою за $K_{cp} = K_{yp} K_{pp} = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\pi^2}{8}\right) \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0,845$.

Величина коефіцієнта K_{zv} залежить від будови обмотки та розглянута нижче.

Однозонні обмотки

В однозонному виконанні неперехресна обмотка складається з t секцій в одній фазі, що є вибраними із кроком y за формулою (1) з колової групи S та з'єднані послідовно згідно і утворюють фазну зону, а одночасно і фазу. Відповідно до цього номер секцій фазної зони $l = 0; 1; 2; \dots; (t-1)$ визначають за номером секцій y порядку її фізичного положення в розточці $i = 0, 1, 2, \dots, (S-1)$

$$l = \frac{S n + i}{y}, \quad (5)$$

де n – ціле додатне (включно з нулем) число, за якого l буде цілим числом.

Належність секцій за номером $l(i)$ фази із номером $j = 0, 1, 2, \dots, (m-1)$

$$j = \text{Int}\left(\frac{m}{S} l\right). \quad (6)$$

Для основної $v = p$ гармоніки магнітного поля коефіцієнт розподілу секцій у фазній зоні

$$K_{zp} = \frac{\frac{m}{S} \sin \frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{S}}, \quad (7)$$

а оскільки переважно $S \gg \pi$, то $K_{zp} \approx \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$ і для 3-фазних обмоток приблизно дорівнює 0,83.

Тоді сумарний обмотковий коефіцієнт неперехресної однозонної обмотки K_{fp} не більший за 0,7.

Приклад однозонної обмотки. Побудувати трифазну однозонну обмотку з кількістю пар полюсів $p = 11$ (обмотку можна виконати з такими числами m і p , бо вони є взаємно простими). Оптимальною кількістю секцій буде за (4)

$$S_{onm} = 3 \text{Int}\left(\frac{8}{\pi + 2} \cdot \frac{11}{3}\right) = 15.$$

Секцій у фазі $t = 5$. Крок $y = 4$ ($y < 0,5S$), коли $k_1 = 3$ за (1).

Для $k_2 = p - k_1 = 11 - 3 = 8$ $y' = 11$ (Або $y' = S - y = 15 - 4 = 11$).

Визначення належності секції $i = 0, 1, \dots, S - 1$ до фази $j = 0, 1, \dots, m-1$ за (6) наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків структури однозонної обмотки ($S = 15, p = 11$)

номер секції i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
число n для (5)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2
номер секції $l(i)$	0	4	8	12	1	5	9	13	2	6	10	14	3	7	11
номер фази $j(i)$	0	0	1	2	0	1	1	2	0	1	2	2	0	1	2

У цьому випадку коефіцієнт розподілу секцій по ширині фазної зони за (7) $K_{z11} = 0,833$.

Схема однозонної обмотки подана на рис. 2, а. Для наочності також показана зірка ЕРС цієї обмотки (рис. 2, б) з поділом на зони, побудована за відомими правилами [2].

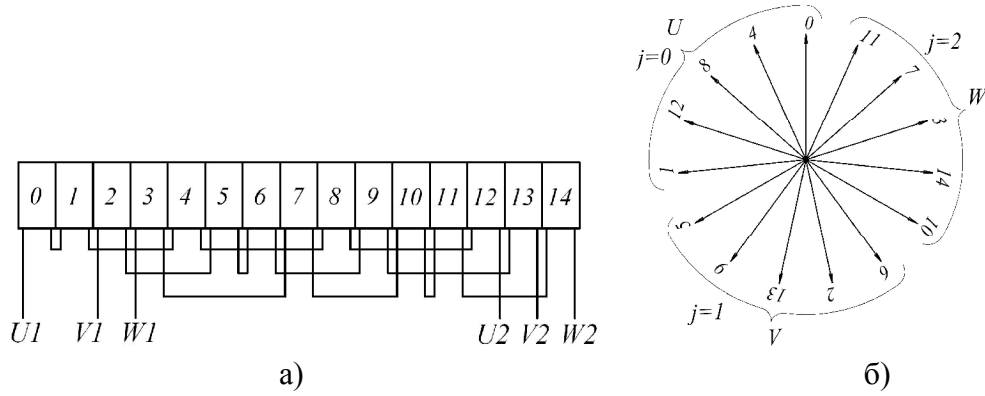


Рис. 2. Схема однозонної обмотки (а) та зірка секційних ЕРС (б)

Двוזонні обмотки

Для збільшення обмоткового коефіцієнта $K_{\text{ф}}$ обмотку потрібно виконувати двозонною. Загалом t секцій кожної фази розбивають на 2 зони, одна з них має t_1 , а інша – t_2 секцій, притому $t_1 + t_2 = t$. Належність до фазної зони $g = 0, 1, \dots, 2m-1$ i -ї секції за кроку вибірки у визначається

$$g(i) = 2 \operatorname{Int}\left(\frac{l}{t}\right) + \operatorname{Int}\left(\frac{t}{t_1} \operatorname{Fr}\left(\frac{l}{t}\right)\right), \quad (8)$$

де Fr – оператор, що виділяє дробову частину числа; l – номер секції у порядку її розташування у магнітному полі за (5), тобто порядок зміщення осі секцій відносно осі умовного північного полюса індуктора.

Як частковий випадок за умови рівності фазних зон (8) набуває такого вигляду:

$$g(i) = 2 \operatorname{Int}\left(\frac{l}{t}\right) + \operatorname{Int}\left(2 \operatorname{Fr}\left(\frac{l}{t}\right)\right). \quad (8, a)$$

І, нарешті, належність до фази j i -ї секції визначається

$$j(i) = m \operatorname{Fr} \frac{g(i)}{m}, \quad (9)$$

при цьому секції за номером i присвоюється знак

$$\operatorname{sign}(i) = \operatorname{sign}(-1)^{g(i)}. \quad (10)$$

Відповідно до цього знака секція i вмикається у j -у фазу згідно послідовно, коли $\operatorname{sign}(i) = \operatorname{sign}(+1)$, або зустрічно послідовно при $\operatorname{sign}(i) = \operatorname{sign}(-1)$.

ЕРС секцій у фазних зонах g з кількістю t_1 і t_2 від v -ї гармоніки магнітного поля є пропорційні величинам

$$K_{zv}(t_1) \cdot e^{-j\varphi_1} \quad \text{і} \quad K_{zv}(t_2) \cdot e^{-j\varphi_2}, \quad (11)$$

де $K_{zv}(t_1) = K_{zv}$ за (7) для $t = t_1$, а $K_{zv}(t_2) = K_{zv}$ за (7) для $t = t_2$;

$\varphi_1 = \frac{y\nu\pi(t_1-1)}{S}$, $\varphi_2 = \frac{y\nu\pi(S+t_1-1)}{S}$ – фазні фактори ЕРС відповідних фазних зон.

Коефіцієнт розподілу секцій у фазі

$$K'_{zv} = \frac{1}{t} \cdot \sqrt{(t_1 K_{zv}(t_1))^2 + (t_2 K_{zv}(t_2))^2 - 2t_1 t_2 K_{zv}(t_1) K_{zv}(t_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}.$$

Різниця $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi\nu y$, тоді $\cos(\pi\nu y) = \pm 1$, і

$$K'_{zv} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\sin \frac{\pi\nu y t_1}{S} \pm \sin \frac{\pi\nu y t_2}{S}}{\sin \frac{\pi\nu y t}{S}}, \quad (12)$$

а це для основної гармоніки поля $\nu = p$ перетворюється у

$$K'_{zp} = \frac{\sin \frac{\pi t_1}{S} + \sin \frac{\pi t_2}{S}}{t \sin \frac{\pi}{S}} = \frac{2 \sin \frac{\pi}{2m} \cos \frac{\pi(t_1 - t_2)}{2S}}{t \sin \frac{\pi}{S}}. \quad (13)$$

Як частковий випадок, за однакової величини фазних зон $t_1 = t_2 = t/2$ (13) набуває вигляду

$$K'_{zp} = 2 \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{t \sin \frac{\pi}{mt}} \approx \frac{2m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m}. \quad (14)$$

Цей же результат отримуємо і за невеликої різниці між величиною фазних зон $t_1 - t_2 = 1$

$$K'_{zp} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{t \sin \frac{\pi}{2mt}} \approx \frac{2m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m}. \quad (15)$$

Приклад двозонної обмотки. Побудувати двозонну 3-фазну обмотку з кількістю пар полюсів $p = 11$, кількістю секцій $S = 15$, кількістю секцій у фазі $t = S / m = 5$, кількістю секцій у фазних зонах $t_1 = 3, t_2 = t - t_1 = 2$.

Величина кроку $y = 4$ (див. приклад однозонної обмотки).

Результати визначення належності секцій з номерами $i = 0, 1, \dots, S-1$ до фазних зон $g = 0, 1, \dots, 2m-1$ за (8) та фаз $j = 0, 1, \dots, m-1$ за (9) подано у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків структури двозонної обмотки ($S = 15, p = 11$)

номер секції i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
число n для (5)	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2
номер секції $l(i)$	0	4	8	12	1	5	9	13	2	6	10	14	3	7	11
номер фазної зони $g(i)$	0	1	3	4	0	2	3	5	0	2	4	5	1	2	4
знак i за (10)	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+
номер фази $j(i)$	0	1	0	1	0	2	0	2	0	2	1	2	1	2	1

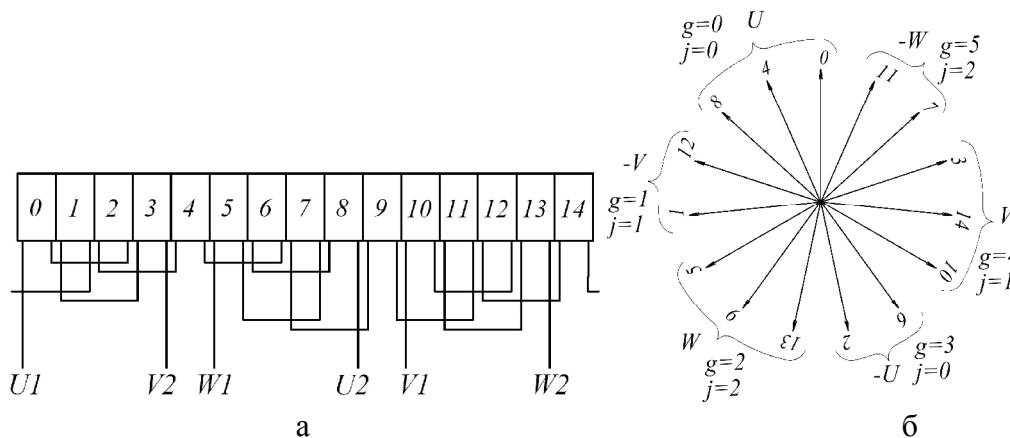


Рис. 3. Схема двозонної обмотки (а) та зірка секційних ЕРС (б)

Секції зі знаком “-” вмикаються зустрічно до секцій зі знаком “+”. У цьому випадку сумарний коефіцієнт розподілу секцій по фазі для основної гармоніки поля за (13) $K_{z11} = 0,957$ або за (15) $K_{z11} = 0,955$, що є значно більше від однозонної обмотки і визначає переважне застосування двозонної.

Схема двозонної обмотки подана на рис. 3, а. Для наочності також показано зірку ЕРС цієї обмотки (рис. 3, б) з поділом на зони.

Висновки

Запропонований метод синтезу структурних схем багатополосних електричних машин змінного струму, базований на теорії чисел, дасть змогу при заданих кількостях пар полюсів p та фаз m визначити оптимальне значення кількості секцій S гладкої структури якоря та встановити однозначно належність кожної секції до зони та фази в однозонному і двозонному виконанні із забезпеченням максимального значення обмоткового коефіцієнта основної гармоніки магнітного поля. Також алгоритм забезпечує мінімальну довжину перемичок між секціями та зручність розташування виводів обмотки.

Напрямом подальших досліджень стане визначення оптимальної кількості секцій зубцевої структури з погляду максимуму енергетичних показників. Також цікавим є подальше застосування розглянутого методу до опису структури модульних електричних машин.

Список джерел

1. Caruso M., Di Tommaso A O., Marignetti F., Miceli R., Ricco Galluzzo G. A General Mathematical Formulation for Winding Layout Arrangement of Electrical Machines. *Energies*. 2018. 11(2). 446. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11020446>.
2. Яцун М. А. Електричні машини : підруч. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2011. 464 с.
3. Bianchi N., Dai Pre M. Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* 2006. 153. 459–466. DOI: 10.1049/ip-epa:20050284.
4. Patel V. I., Wang J., Wang W., Chen X. Six-phase fractional-slot-per-pole-per-phase permanent-magnet machines with low space harmonics for electric vehicle application. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50 (4). Pp. 2554–2563. DOI: 10.1109/TIA.2014.2301871.
5. Zavgorodniy V. Multiphase electromechanical converters nonoverlapping windings creating algorithms. Unconventional electromechanical and electrotechnical systems (2-nd ISTC UEES'96). Szczecin and Miedzyzdroje. dec. 15–17. 1996. Pp. 415–420.
6. Germishuizen J. J. Analysis of interior permanent magnet motors with non-overlapping windings. 2009. Dissertation approved for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering at Stellenbosch University (дата звернення 21.01.2024).
7. Patel V. I., Wang J., Nugraha D. T., Vuletić R., Tosen J. Enhanced availability of drivetrain through novel multiphase permanent-magnet machine drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 63(1). Pp. 469–480. DOI: 10.1109/TIE.2015.2435371.
8. Fornasiero E., Alberti L., Bianchi N., Bolognani S. Considerations on Selecting Fractional-Slot Nonoverlapped Coil Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013. 49. 1316–1324. DOI: 10.1109/TIA.2013.2251853.
9. Libert F., Soulard J. Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated. 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237458473> (дата звернення 21.01.2024).
10. Wach P. Algorithmic method of design and analysis of fractional-slot windings of AC machines. *Electr. Eng.* 1998. 81. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01236235>.
11. Steinbrink J. Design and Analysis of Windings of Electrical Machines. In Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2008). Ischia, Italy. 11–13 June 2008. Pp. 717–720. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581183.
12. Smith A., Delgado D. Automated AC Winding Design. In Proceedings of the 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010). Brighton, UK. 19–21 April 2010. Pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2010.0132.
13. Niessen F. Winding Scheme Calculator. URL: <https://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/> (дата звернення 21.01.2024).
14. Di Tommaso A. O., Genduso F., Miceli R. A. New Software Tool for Design, Optimization, and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings. *IEEE Trans. Magnet.* 2015. 51. 1–10. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2369860.

15. Makarchuk O., Kharchyshyn B., Kasha L. Analysis of the Magneto-Mechanical Characteristic of Double Three-phase PMSM. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. Pp. 333–338. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575684.
16. Shchur I., Kharchyshyn B., Turkovskiy V. Simulation and experimental investigation of dual three-phase BLDC motor operation at imbalanced modular loading. *Технічна електродинаміка*. 2023. 3. 022. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.022>.
17. Sivaramakrishnan R. Certain Number-Theoretic Episodes In Algebra, Second Edition (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351023344>.

References

1. Caruso, M., Di Tommaso, A. O., Marignetti, F., Miceli, R., & Ricco Galluzzo, G. (2018). A General Mathematical Formulation for Winding Layout Arrangement of Electrical Machines. *Energies*, 11(2), 446. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11020446> (in English).
2. Yatsun, M. A. (2011). *Elektrychni mashyny*. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki (in Ukrainian).
3. Bianchi, N., & Dai Pre, M. (2006). Use of the star of slots in designing fractional-slot single-layer synchronous motors. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 153, 459–466. DOI: 10.1049/ip-epa:20050284 (in English).
4. Patel, V. I., Wang, J., Wang, W., & Chen, X. (2014). Six-phase fractional-slot-per-pole-per-phase permanent-magnet machines with low space harmonics for electric vehicle application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (4), 2554–2563. DOI: 10.1109/TIA.2014.2301871 (in English).
5. Zavgorodniy, V. (1996). Multiphase electromechanical convertors nonoverlapping windings creating algorithms. Unconventional electromechanical and electrotechnical systems (2-nd ISTC UEES'96). Szczecin and Miedzyzdroje. dec. 15–17, 415–420 (in English).
6. Germishuizen, J. J. Analysis of interior permanent magnet motors with non-overlapping windings. 2009. Dissertation approved for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering at Stellenbosch University (data zvernennia: 21.01.2024) (in English).
7. Patel, V. I., Wang, J., Nugraha, D. T., Vuletić, R., & Tousein, J. (2015). Enhanced availability of drivetrain through novel multiphase permanent-magnet machine drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), 469–480. DOI: 10.1109/TIE.2015.2435371 (in English).
8. Fornasiero, E., Alberti, L., Bianchi, N., & Bolognani, S. (2013). Considerations on Selecting Fractional-Slot Nonoverlapped Coil Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49, 1316–1324. DOI: 10.1109/TIA.2013.2251853 (in English).
9. Libert, F., & Soulard, J. (2004). Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/237458473> (дата звернення 21.01.2024) (in English).
10. Wach, P. (1998). Algorithmic method of design and analysis of fractional-slot windings of AC machines. *Electr. Eng.*, 81, 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01236235> (in English).
11. Steinbrink, J. (11–13 June 2008). Design and Analysis of Windings of Electrical Machines. In Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2008). Ischia, Italy, 717–720. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581183 (in English).
12. Smith, A., & Delgado, D. (19–21 April 2010). Automated AC Winding Design. In Proceedings of the 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010). Brighton, UK. Pp. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2010.0132 (in English).
13. Niessen, F. Winding Scheme Calculator. Retrieved from <https://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/> (data zvernennia: 21.01.2024) (in English).
14. Di Tommaso, A. O., Genduso, F., & Miceli, R. A. (2015). New Software Tool for Design, Optimization, and Complete Analysis of Rotating Electrical Machines Windings. *IEEE Trans. Magnet*, 51, 1–10. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2369860 (in English).
15. Makarchuk, O., Kharchyshyn, B., & Kasha, L. (2021). Analysis of the Magneto-Mechanical Characteristic of Double Three-phase PMSM. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 333–338. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575684 (in English).
16. Shchur, I., Kharchyshyn, B., & Turkovskiy, V. (2023). Simulation and experimental investigation of dual three-phase BLDC motor operation at imbalanced modular loading. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 3, 022. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.022> (in English).
17. Sivaramakrishnan, R. (2019). Certain Number-Theoretic Episodes In Algebra, Second Edition (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351023344> (in English).

О. Б. Бабей, Б. М. Харчишин, М. В. Хай

O. B. Babei,
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
Oleh.B.Babei@lpnu.ua

B. M. Kharchyshyn,
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
Bohdan.M.Kharchyshyn@lpnu.ua

M. V. Khai,
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
Mykhailo.V.Khai@lpnu.ua

WINDING CONSTRUCTION ALGORITHMS MULTIPOLE ELECTRIC MACHINES

© Babei O. B., Kharchyshyn B. M., Khai M. V., 2024

The analysis of studies related to the design of fractional-slot windings of electric machines was performed, the advantages of electric machines with non-overlapping windings were established. Attempts to move away from the construction of a star of electromotive forces in the construction of winding schemes have been analyzed, which will allow to algorithmize and automate the design of such windings.

In this study, with the help of elements of number theory, an algorithm for forming a multiphase, multipole, non-overlapping winding is established, which ensures the order of connecting sections into a phase structure. The algorithm ensures the electromagnetic symmetry of the phases, the maximum value of the coefficient of distribution of sections in the phase zone for the main harmonic of the field, the minimum length of connections between sections.

The configuration of the sections of the smooth structure of the armature for machines with axial and radial flow of magnetic flux is described, the optimal number of sections from the point of view of the use of winding material for a given number of phases and poles, as well as the dimensions of the section window are determined.

The conditions of electrical symmetry of the phase structure have been established regarding the number of sections, pairs of poles, phases and the presence of common divisors. The possibility of forming the structure of the phase zone of the winding by sequentially connecting sections differing in phase factor by selecting them from the closed ring structure with the appropriate step is described.

On the basis of number theory, the formation of right-hand and left-hand windings, respectively, with direct and reverse phase alternation is substantiated.

Expressions are given for determining the winding coefficients of non-overlapping windings, which can be used for smooth and toothed armature structures.

It is proposed to apply, based on number theory, a tabular apparatus for the mathematical description of the arrangement of non-overlapping windings without the use of an EMF star. Expressions for single-zone and two-zone windings are given separately for determining whether the sections belong to the phase zones, to the phases, and the direction of switching on of the sections.

Examples are given. The directions of further research are determined.

Keywords: windings of electric machines, non-overlapping windings, algorithms for constructing windings, winding coefficient, symmetry conditions of windings, star of electromotive forces, phase zone.