

*Р.Б. ГАВРИЛЮК*, канд. техн. наук, доц., ІФНТУНГ, Івано-Франківськ

## **СУЧАСНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ДВОШАРОВИХ БАГАТОФАЗНИХ СХЕМ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ**

Розглянуто стратегію проектування двошарових багатофазних симетричних схем обмоток електричних машин змінного струму з різною кількістю провідників у секціях обмотки та постійною кількістю провідників у кожному пазу на підставі аналізу всіх можливих структур фазних зон петлевої обмотки за заданою системою параметрів оптимізації. Запропоновано методику оптимізації гармонічного складу шкідливих гармонік.

Рассмотрена стратегия проектирования двухслойных многофазных симметричных схем обмоток электрических машин переменного тока с разным числом витков в секциях обмотки и постоянным количеством проводников в каждом пазу на основании всех возможных структур фазных зон петлевой обмотки для заданной системы параметров оптимизации. Предложено методику оптимизации гармонического состава паразитных гармоник.

**Вступ.** У статті розроблено стратегію та методику проектування двошарових багатофазних симетричних схем обмоток електричних машин змінного струму з різною кількістю провідників у секціях обмотки та незмінною кількістю провідників у кожному пазі на підставі створення [1] й аналізу необхідних параметрів всіх можливих структур фазних зон, для петлевої (або концентричної) схеми обмотки. Усі можливі структури схем обмоток "просіюють" через решето Паретто за заданою системою параметрів (критеріїв) оптимізації. У результаті "просіювання" одержують домінантні структури обмоток і параметри, що описують ці структури [9]. Домінантні структури оптимізують з метою покращення показників схеми обмотки для петлевої або концентричної схеми обмотки.

**Мета, завдання дослідження.** Створення сучасної методики проектування двошарових симетричних багатофазних схем обмоток електричних машин, яка уможливило створення схем обмоток з покращеними показниками на підставі аналізу всіх теоретично можливих структур фазних зон.

# 1 СТРАТЕГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ СХЕМ ОБМОТОК

**1 Структури схем обмоток.** Структури схем обмоток електричних машин змінного струму створюють із симетричних кілець елементів (СКЕ) [3, 4]. СКЕ може бути  $p = 1, 2, 3, \dots$  порядку. На рис. 1 зображені СКЕ: а) першого порядку, збудоване з трьох елементів  $a, b, c$ , які належать відповідно трьом фазам  $A, B, C$ ; б) третього порядку, збудованим з дев'яти елементів  $a, b, c$ , які теж належать трьом фазам.

На рис. 2 зображено початок послідовності побудови усіх можливих теоретичних варіантів одного шару обмотки. На рис 2,а зображена початкова структура розміщення СКЕ, з якої розпочинають побудову всіх можливих структур. На рис. 2,б четверте СКЕ (останнє за номером) повернене за годинниковою стрілкою на  $120^\circ$ , що спричинило утворення нової структури шару обмотки, а на рис. 2,в - четверте СКЕ повернене на  $240^\circ$ . На наступному кроці побудови четверте СКЕ повертається на  $360^\circ$  і одночасно з ним третє СКЕ зміщується на  $120^\circ$ . У подальшому четверте СКЕ продовжує свої повороти. Це ніби працює дискретний лічильник. Такий процес продовжується до зміщення другого СКЕ на  $360^\circ$ .

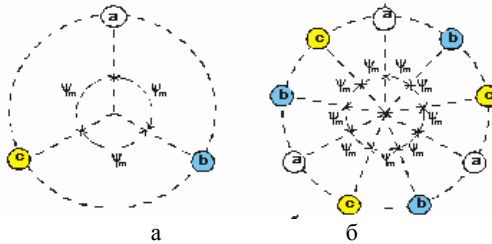


Рис. 1.

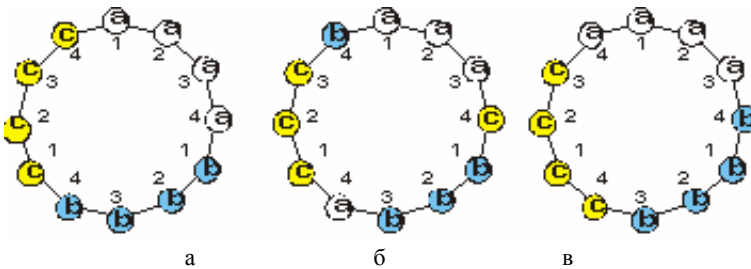


Рис. 2.

У результаті такого процесу зміщень СКЕ будуть спроектовані всі теоретично можливі структури розміщення СКЕ в одному шарі обмотки, серед яких є еквівалентні структури, наприклад, зображені на рис. 2,а та рис. 2,в. Умови визначення еквівалентності та кількості нееквівалентних структур наведено в [5], а в [6], на підставі теорії груп [7], приведено всі можливі нееквівалентні структури для кількості пазів  $z = 3 - 36$  (кількість СКЕ першого порядку  $n = 1 - 12$ ) [6, табл. Д1-Д12].

В табл. 1 наведено кількості нееквівалентних структур для трифазної схеми обмотки збудованих на підставі СКЕ першого порядку.

Таблиця 1 – Кількість нееквівалентних структур.

Кількість СКЕ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Кількість структур $k_w$	1	2	3	7	13	30	66	166	405	1070	2806	7635	20805	57696	160527

Декілька секцій, які розташовані в пазах в одному шарі обмотки та належать одній фазі, що лежать поруч у сусідніх пазах і сполучених послідовно та згідно, утворюють активну сторону котушки або узагальнений елемент [6]. Узагальнене СКЕ - СКЕ, що складається з узагальнених елементів [6].

Кількість пазів  $z = mn$ , де  $m$  – кількість фаз, а  $n$  – кількість СКЕ. На підставі таблиць [6, табл. Д1 - Д12] уможлиблюється побудова структур шарів і з СКЕ порядку  $\rho$ , що створює умови побудови структур для кількості пазів  $z = mnr$  [6].

Теорія СКЕ наочно демонструє структуру шару обмотки, але незручна для математичних перетворень. Один шар схеми обмотки доцільніше зображувати за допомогою відображень множини номерів пазів на множину елементів (секцій) [6], пов'язаних з належністю струмів до певної фази багатофазної схеми обмотки. Наприклад, структуру шару обмотки зображену на рис 2,а, запишемо за допомогою відображення множини пазів на множину елементів (секцій, в яких вказана приналежність до фаз  $a, b, c$ ) структури:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ a & a & a & a & b & b & b & b & c & c & c & c \end{pmatrix} \quad (1)$$

Підстановкою називають взаємно однозначне відображення множини на себе [6]. Нехай нам задана підстановка номерів пазів

$$\beta = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1 & 2 & 3 & 12 & 5 & 6 & 7 & 4 & 9 & 10 & 11 & 8 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Підстановки можна множити на відображення (операцію множення позначимо " $\circ$ "). Помножимо зліва відображення (1) на підстановку (2). З використанням операції множення підстановок одержимо

$$\varphi_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1 & 2 & 3 & 12 & 5 & 6 & 7 & 4 & 9 & 10 & 11 & 8 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ a & a & a & a & b & b & b & b & c & c & c & c \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ a & a & a & c & b & b & b & a & c & c & c & b \end{pmatrix}$$

Відображення  $\varphi_1$  - репрезентує розміщення СКЕ, зображене на рис. 2,б.

Оскільки нумерація пазів послідовна, то відображення  $\varphi$  та  $\varphi_1$  можемо представити у спрощеному вигляді:  $\varphi = aaaabbbbccccc$ ,  $\varphi_1 = aaacbbbaccbb$ . З врахуванням структури будови СКЕ розташування елементів усіх фаз можемо знайти на підставі, наприклад, відображень  $\varphi = 111100000000$ ,  $\varphi_1 = 111000010000$ .

Отже, за допомогою алгебри відображень та підстановок можемо створити всі нееквівалентні структури схем шарів обмоток. Методика визначення всіх нееквівалентних структур та їх запису детально описана в [6].

Кожному нееквівалентному відображенню шару СКЕ можемо присвоїти одне число в двійковій системі числення, яке називають вагою відображення [6, 8] і на підставі якого можна однозначно відтворити структуру шару обмотки. Наприклад, для відображення  $\varphi$  цим числом є 111100000000, а для  $\varphi_1$  - 111000010000. Визначення вагового коефіцієнта та доведення ствердження його однозначності детально пояснено в [8].

**Першим стратегічним кроком** у процесі пошуку оптимальної схеми обмотки є знаходження всіх структур одного шару обмотки, кількість яких залежить від кількості СКЕ (табл. 1).

**Другим стратегічним кроком** оптимізації є встановлення кількості  $N_v$  кроків вкорочення обмотки  $u$ , кожне значення якого уможливить створення та розташування структури другого шару двошарової схеми петлевої (або концентричної) обмотки, і визначення умов, за яких СКЕ можемо змінювати кількість виків. Кількість варіантів, які потрібно буде проаналізувати за вибраними критеріями,  $K_{\text{вар}} = kw \cdot N_v$  (значення  $kw$  приймаємо за табл. 1).

За умови, що крок вкорочення двошарової петлевої схеми  $u = 4$  і на підставі рис. 2,а або підстановки (1), розташування в пазах номерів СКЕ у двох шарах двошарової схеми обмотки відобразимо в табл. 2.

Таблиця 2 – Розташування СКЕ у пазах обмотки.

Номер паза	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер СКЕ у верхньому шарі паза	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер СКЕ у нижньому шарі паза	1	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4

Задасмося кроком вкорочення двошарової петлевої схеми  $y = 5$  і на підставі рис. 2,а та підстановки (1) представимо в табл. 3 розташування в пазах номерів СКЕ у двох шарах двошарової схеми обмотки.

Таблиця 3 – Розташування СКЕ у пазах обмотки.

Номер паза	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер СКЕ у верхньому шарі паза	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер СКЕ у нижньому шарі паза	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

На підставі аналізу даних у табл. 3 (затінені елементи) можемо зробити висновок, відображення номерів СКЕ на себе задані підстановкою

$$\delta_{n=4, y=5} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Підстановку (4) можемо прочитати таким чином: СКЕ № 1 відображається в СКЕ № 4, СКЕ № 4 - в СКЕ № 3, СКЕ № 3 - в СКЕ № 2, СКЕ № 2 - в СКЕ № 1. Цикл замкнувся, - почали з СКЕ № 1 і повернулися в СКЕ з № 1. Часто застосовують скорочену форму запису підстановки:  $\delta_{n=4, y=5} = (1, 4, 3, 2)$  [7]. Підстановку (4) має тільки один цикл.

Для  $y = 4$  підстановку (табл. 2)

$$\delta_{n=4, y=4} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Отже номер кожного СКЕ відображений сам на себе. Скорочений запис  $\delta_{n=4, y=4} = (1), (2), (3), (4)$ . Підстановку (5) має чотири цикли.

Для  $y = 6$  підстановку

$$\delta_{n=4, y=6} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Скорочений запис підстановки  $\delta_{n=4, y=6} = (1,3), (2,4)$ .

Підстановка (6) має два цикли.

Для  $y = 7$  підстановка має один цикл,  $\delta_{n=4, y=7} = (1, 2, 3, 4)$ .

Кількість різних підстановок номерів СКЕ дорівнює кількості  $n$  СКЕ. Кількість циклів у підстановці залежить від значення  $y$ . Структура циклів залежить від значення  $(y \bmod n)$ .

Структура циклів відіграє дуже велике значення в процесі оптимізації параметрів різновиткових двошарових петлевих схем обмоток та однаковою кількістю витків у кожному пазу.

Введемо поняття – "таблиця логіки" визначення номерів СКЕ, в яких можна змінювати кількість витків та визначати кількість витків у всіх СКЕ. Перші два рядки чисел у табл. 4 (логіки) створюють на підставі копії підстановки, наприклад, (4).

Таблиця 4 – Логіка визначення номерів СКЕ.

Номер СКЕ верхнього шару	1	2	3	4
Номер СКЕ нижнього шару	4	1	2	3
Логіка зміни кількості витків петлевої обмотки	1	-1	-1	-1

В останньому рядку табл. 4 відображена інформація про можливу зміну кількості витків у СКЕ верхнього шару обмотки:

- додатне натуральне число вказує номер СКЕ верхнього шару, в якому може відбуватися незалежна зміна кількості витків у секції обмотки в межах від нуля до сумарної кількості витків в пазу;

- число нуль вказує, що кількість витків у секції у СКЕ верхнього шару обмотки може дорівнювати тільки половині кількості витків в пазі (число нуль записують лише тоді, коли номери СКЕ у верхньому і нижньому шарах обмотки ідентичні);

- число мінус одиниця вказує, що кількість витків у секції СКЕ верхнього шару обмотки залежить від кількості витків у секціях інших СКЕ.

Таким чином, у табл. 4 закодована інформація про те, що кількість витків може незалежно змінюватися тільки у першому СКЕ. Наприклад, якщо кількість витків у пазі дорівнює 20, а у першому СКЕ вибрано 2 витки, то в четвертому СКЕ буде 18 витків, у третьому – 2, у другому – 18.

Створена на підставі підстановки (5) таблиця логіки визначення номерів СКЕ наведена в табл. 5.

Отже, для  $y = 4$  в усіх номерах СКЕ мусить бути однакова кількість витків.

Таблиця 5 – Логіка визначення номерів СКЕ.

Номер СКЕ верхнього шару	1	2	3	4
Номер СКЕ нижнього шару	1	2	3	4
Логіка зміни кількості витків петлевої обмотки	0	0	0	0

При застосуванні двошарових концентричних симетричних багатофазних схем обмоток змінена стратегія формування номерів СКЕ другого шару обмотки. В узагальнених СКЕ номери СКЕ записують у зворотному порядку номерів порівнянї з їх записом у петлевих схемах обмоток.

Припустимо, що СКЕ підстановки (5) відповідають поняттю узагальнених СКЕ. За прийнятої умови підстановка (5) трансформується у

$$\delta_{n=4, y=4} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

На підставі підстановки (5) таблиця логіки визначення номерів СКЕ (табл. 6).

Таблиця 6. Логіка визначення номерів СКЕ.

№ СКЕ верхнього шару	1	2	3	4
№ СКЕ нижнього шару	4	3	2	1
Логіка зміни кількості витків концентричної обмотки	1	2	-1	-1

За інформацією, поданою в табл. 6, довідуємося, що незалежно можна змінювати кількість витків у верхньому шарі обмотки (в межах від нуля до кількості витків в пазу) тільки в першому та другому СКЕ.

При крокові  $y = 5$  таблиця логіки визначення номерів СКЕ показана в табл. 7.

Таблиця 7 – Логіка визначення номерів СКЕ.

№ СКЕ верхнього шару	1	2	3	4
№ СКЕ нижнього шару	1	4	3	2
Логіка зміни кількості витків концентричної обмотки	0	2	0	-1

**Третім стратегічним кроком** оптимізації є розрахунок для всіх схем та вибраних кроків вкорочення схеми обмотки параметрів, за якими оцінюють ефективність схеми обмотки.

Подамо параметри, за якими оцінюватимемо схему обмотки одношвидкісної машини:

1 Крок вкорочення обмотки  $u$ , критерій оптимальності – мінімум.

2 Обмотковий коефіцієнт [9] (критерій оптимальності - максимум)

$$k_{0v} = \frac{\sqrt{\left(\sum_i \sum_{k=1}^{\xi} (N_{ik} \sin(\Psi_i v + \alpha_{ik}))\right)^2 + \left(\sum_i \sum_{k=1}^{\xi} (N_{ik} \cos(\Psi_i v + \alpha_{ik}))\right)^2}}{\sum_i |N_{ik}|}, \quad (8)$$

де  $i$  – приймає всі значення від 1 до кількості пазів  $z$ , але в яких розташовані провідники фази А;

$\xi$  – номер шару обмотки;

$v$  – порядок гармоніки (для основної гармоніки  $v$  дорівнює кількості пар полюсів);

$N_{ik}$  – кількість провідників в  $i$ -му пази  $k$  шару;

$\Psi_i$  – кутовий зсув  $i$ -го паза;

$\alpha_{ik} = 1$ , якщо струм у провідниках фази А протікає в додатному напрямі, та  $\alpha_{ik} = -1$ , якщо напрям струму протилежний.

3 Коефіцієнт диференційного розсіяння (критерій оптимальності - мінімум)

$$\tau_d = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} (k_{0v}/v)^2 - (k_{0p}/p)^2}{(k_{0p}/p)^2} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} k_{0v}^2/v^2}{k_{0p}^2/p^2} - 1 = \frac{\sum_{v=1}^{\text{entier}(z/2)} A_v k_{0v}^2}{(k_{0p}/p)^2} - 1, \quad (9)$$

де  $A_v = (\pi/(z \cdot \sin(\pi/z \cdot v)))^2$

Значення  $A_v$  зменшуються за умови збільшення порядку гармоніки  $v$ , яка не може перебільшувати величини  $\text{entier}(z/2)$ .

4 Виражене у відсотках значення амплітуди шкідливої гармоніки з максимальним значенням амплітуди (фіксуємо додатково порядок гармоніки) по відношенню до амплітуди основної гармоніки

$$F_{v \max} = \frac{k_{0v}/v}{k_{0p}/p} 100. \quad (10)$$

Інколи для схем обмоток бажано знати відносні максимальні значення, зокрема для нижчої від основної шкідливої гармоніки  $F_{v \max \text{ н}}$  та вищої  $F_{v \max \text{ в}}$ . Можна оцінювати схему обмотки теж за сумою значень максимальних гармонік

$$F_{v \max \Sigma} = F_{v \max \text{ н}} + F_{v \max \text{ в}}. \quad (11)$$

Параметри, за якими оцінюватимемо схему обмотки двохшвидкісної машини, вміщують, зазначені вище, критерії для оцінки одношвидкісної машини для кожної кількості пар полюсів, в яких додатково додають нижні індекси (1 або 2, що вказують на позначення пар полюсів  $p_1$  або  $p_2$ ) та додаткові параметри:



а) коефіцієнти ефективності використання схеми обмотки  $E_{p1}$  та  $E_{p2}$  [11] (відношення номінальної потужності двошвидкісного двигуна для заданої кількості пар полюсів  $p$  до потужності одношвидкісного двигуна з таким самим  $p$ ), критерій оптимальності – максимум.  $E_{p1}$  та  $E_{p2}$  залежать від величин обмоткових коефіцієнтів та схеми перемикачів кількості пар полюсів.

б) усереднений коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки  $E_{p\Sigma} = \alpha_e \cdot E_{p1} + (1 - \alpha_e) \cdot E_{p2}$  ( $0 \leq \alpha_e \leq 1$ , у цій статті  $\alpha_e = 0,5$ ), критерій оптимальності – максимум. Коефіцієнт  $\alpha_e$  вибирають у залежності від співвідношення часу роботи двигуна на кожній швидкості обертання або мінімізації втрат потужності в робочому циклі роботи двошвидкісного двигуна.

в) сумарний коефіцієнт диференційного розсіяння  $\tau d_\Sigma = \beta \cdot \tau d_1 + (1 - \beta) \cdot \tau d_2$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ , у цій статті  $\tau d_\Sigma = \tau d_1 + \tau d_2$ ), критерій оптимальності – мінімум. Коефіцієнт  $\beta$  вибирають залежно від того, на якій швидкості потрібно в першу чергу знешкодити амплітуди шкідливих гармонік. При зростанні коефіцієнта  $\beta$  зменшується коефіцієнт диференційного розсіяння на першій швидкості обертання і збільшується на другій швидкості.

г) Відношення магнітних індукцій в повітряному проміжку для обох кількостей пар полюсів  $B_{p1}/B_{p2}$ .

д) Сума максимальних амплітуд шкідливих гармонік у відносних одиницях (як нижчих, так і вищих) для обох швидкостей обертання, критерій оптимальності - мінімум.

$$F_{v \max \Sigma} = F_{v1 \max i} + F_{v2 \max i} + F_{v1 \max a} + F_{v2 \max a}. \quad (12)$$

Введемо нове поняття: ваговий коефіцієнт диференційного розсіяння

$$\tau_{d\mu} = \frac{\sum_{v=1}^{\text{entier}(z/2)} \mu_v A_v k_{ov}^2}{k_{op}^2 / p^2} - 1, \quad (13)$$

де  $\mu_v$  - коефіцієнт ваги класу гармонік,  $\mu_v \geq 0$ ). Задаючись коефіцієнтами  $\mu_v$  та мінімізуючи функцію (13) за допомогою вибору кількості витків у СКЕ, можемо зменшувати амплітуди класів гармонік [9].

**Четвертим стратегічним кроком** є "просіювання" через решето Паретто за вибраними для оптимізації параметрами і знаходження домінуючих схем обмоток. Домінують схемою обмотки назвемо схему, яка хоча б за одним параметром оптимізації краща від всіх схем, що залишилися в множині схем після "просіювання". Відсіані

схеми обмоток гірші за всіма параметрами від якоїсь, хоча б одної, домінантної схеми обмотки.

**Приклад.** Демонстрація викладеної стратегії оптимізації параметрів схем обмоток виходить за рамки цієї статті. Справа в тому, що в області Паретто в процесі оптимізації можуть залишитися тисячі схем обмоток. Для прикладу скористаємося дещо спрощеною стратегією оптимізації. Спочатку знайдемо можливі варіанти схем обмоток з діаметральною симетрією котушок кожної фази (створених з СКЕ другого порядку за  $p = 2$ ) з перемиканням кількості пар полюсів за схемою Даландера у співвідношенні  $p_1: p_2 = 1:2$  для кількості пазів  $z = 72$ . Для такої схеми [6] кількість СКЕ  $n = 12$ . Попробуємо здійснити пошук домінантних схем обмоток з найменшими амплітудами шкідливих гармонік. Згідно з табл. 1 кількість спроектованих та аналізованих структур одного шару обмотки дорівнює 7635. Задамо кількість кроків вкорочення обмотки у в діапазоні 4–25, тобто  $N_v = 22$  і спроекуємо  $7635 \cdot 22 = 167970$  варіантів структур двошарових схем обмоток. Розрахуємо параметри схем обмоток і "просіємо" їх через решето Паретто за двома параметрами  $E_{p\Sigma}$  та  $\tau_{d\Sigma}$ . У табл. 8 продемонстровано одержані результати розрахунку петлевих, з однаковою кількістю витків у кожній секції, схем обмоток.

В табл. 8  $C$  вибрано таким чином, щоб забезпечити максимальне значення параметра  $E_{p\Sigma}$ .

Таблиця 8. Домінантні схеми обмоток

Загальні показники			Кількість пар полюсів $p_1 = 1$					Кількість пар полюсів $p_2 = 2$					Загальні показники			
№	NC	y	$K_{p1}$	$\tau_{d1}$	$E_{p1}$	$N_{v1}$	$F_{v1}$	$K_{p2}$	$\tau_{d2}$	$E_{p2}$	$N_{v2}$	$F_{v2}$	$E_{p\Sigma}$	$\tau_{d\Sigma}$	C	$B_{p1}/B_{p2}$
1	7215	21	0,530	0,23	0,459	29	2,16	0,759	0,35	0,795	22	1,86	0,627	0,59	4	1,124
2	32	18	0,655	0,14	0,686	5	1,58	0,736	0,47	0,686	34	2,17	0,686	0,611	4	1,198
3	2	18	0,670	0,21	0,702	5	3,30	0,803	0,42	0,702	26	1,74	0,702	0,63	4	1,226
4	1	18	0,675	0,29	0,707	5	4,03	0,828	0,52	0,707	10	4,12	0,707	0,81	4	1,144
5	2	19	0,699	0,23	0,732	5	3,78	0,800	0,59	0,732	4	3,97	0,732	0,82	4	1,171
6	1	19	0,704	0,31	0,737	5	4,61	0,825	0,73	0,737	4	4,37	0,737	1,04	4	1,037
7	23	20	0,715	0,15	0,749	5	2,39	0,742	1,01	0,749	4	6,25	0,749	1,16	4	1,089
8	2	20	0,726	0,25	0,760	5	4,05	0,791	1,10	0,760	4	7,90	0,760	1,35	4	0,983
9	23	21	0,741	0,15	0,762	5	2,44	0,728	1,40	0,762	4	9,32	0,762	1,54	4	1,114
10	1	20	0,732	0,33	0,766	5	4,94	0,815	1,35	0,766	4	8,72	0,766	1,68	4	1,007
11	3	21	0,746	0,21	0,781	5	3,31	0,752	1,78	0,781	4	10,61	0,781	1,99	4	1,031
12	2	21	0,752	0,25	0,788	5	4,12	0,776	1,93	0,788	4	11,78	0,788	2,18	4	1,055
13	1	21	0,758	0,33	0,794	5	5,04	0,800	2,38	0,794	4	12,99	0,794	2,71	4	0,994

В табл. 9 наведені конструктивні параметри схем обмоток, на

підставі яких, з врахуванням параметра  $C$  (табл. 8) та ґрунтовних пояснень, представлених в [10], можемо спроєктувати розгорнені схеми обмоток для усіх структур, де параметр  $C$  визначає відомі схеми сполучення фаз:  $C = 1 - \Delta/Y\Upsilon$ ,  $2 - Y\Upsilon/\Delta$ ,  $3 - Y/Y\Upsilon$ ,  $4 - Y\Upsilon/Y$ ,  $5 - Y/Y$ .

Є можливість покращити показники наведених в табл. 8-9 двошарових схем обмоток двошвидкісних електричних машин змінного струму, якщо замість звичайних петлевих двошарових схем обмоток застосувати удосконалені петлеві або концентричні двошарові схеми обмоток з різною кількістю провідників у секціях і однаковою кількістю провідників у пазах, які визначають на підставі мінімізації коефіцієнта  $\tau d_{\Sigma}$ .

Таблиця 9 – Конструктивні параметри петлевих схем обмоток.

$NC$	Кількість груп котушок	Номери груп котушок у половині фази	Чергування кількості котушок у групі
1	6	1	12, ...
2	18	1, 3, 5,	1, 1, 10, ...
3	18	1, 3, 5,	2, 1, 9, ...
23	30	1, 3, 5, 7, 9,	1, 1, 1, 1, 8, ...
32	30	1, -8, -10, -12, -14,	1, 7, 1, 1, 2, ...
7215	72	1, 3, 5, 8, 10, 12, -19, -21,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,

На основі даних табл. 10-11 продемонструємо, як покращити показники деяких наведених у табл. 9 петлевих схем обмоток, за допомогою перетворення їх у концентричні схеми обмоток. Оптимізацію здійснимо за допомогою мінімізації сумарного коефіцієнта диференційного розсіяння  $\tau d_{\Sigma}$  зміною витків у кожній котушці концентричної обмотки таким чином, щоб кількість витків у всіх пазах була константою (наприклад, рівною 20).

Таблиця 10 – Параметри звичайних петлевих і оптимізованих концентричних схем обмоток.

Показники		Кількість пар полюсів $p_1 = 1$						Кількість пар полюсів $p_2 = 2$						Загальні показники			
№	Тип намотки	$NC$	$У_{cp}$	$K_{p1}$	$\tau_{d1}$	$E_{p1}$	$N_{в1}$	$F_{в1}$	$K_{p2}$	$\tau_{d2}$	$E_{p2}$	$N_{в2}$	$F_{в2}$	$E_{p\Sigma}$	$\tau_{d\Sigma}$	$C$	$B_{p1}/B_{p2}$
1	Петлева	1	18	0,675	0,29	0,707	5	4,03	0,828	0,52	0,707	10	4,12	0,707	0,807	4	1,144
2	Концентрична	1	18	0,677	0,35	0,709	5	4,98	0,838	0,42	0,709	10	3,14	0,709	0,766	4	1,237
3	Петлева	2	18	0,670	0,21	0,702	5	3,30	0,803	0,42	0,702	26	1,74	0,702	0,628	4	1,226
4	Концентрична	2	18	0,671	0,22	0,702	5	3,44	0,804	0,41	0,702	26	1,64	0,702	0,627	4	1,199
5	Петлева	3	18	0,660	0,14	0,691	5	1,95	0,753	0,64	0,691	14	2,90	0,691	0,784	4	1,141
6	Концентрична	23	18	0,664	0,14	0,695	5	2,18	0,77	0,51	0,695	34	3,02	0,695	0,671	4	1,161
7	Петлева	32	18	0,655	0,14	0,686	5	1,58	0,736	0,47	0,686	34	2,17	0,686	0,611	4	1,198
8	Концентрична	32	18	0,658	0,15	0,689	5	2,07	0,746	0,44	0,689	34	1,96	0,689	0,596	4	1,134

У табл. 11-12 вилучені схеми *NC3* та *NC7215*. Параметри концентричної схеми *NC7215* ідентичні з параметрами петлевої схеми обмотки. Схема *NC3* за кроком вкорочення схеми обмотки  $y = 18$  характеризується незадовільними показниками.

Таблиця 11 – Кількість витків у котушках половини фази  $n$  удосконалених схем обмоток.

Структура			Номери ( $n = 12$ ) котушок у половині фази А											
Тип намотки	NC	Шар обмотки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Петлева	1	Верхній та нижній	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Концентрична	1	Верхній	10	8	9	11	12	10	10	12	11	9	8	10
		Нижній	10	12	11	9	8	10	10	8	9	11	12	10
Петлева	2	Верхній та нижній	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Концентрична	2	Верхній	10	10	10	9	11	10	10	10	10	11	9	10
		Нижній	10	10	10	11	9	10	10	10	10	9	11	10
Петлева	23	Верхній та нижній	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Концентрична	23	Верхній	7	12	12	7	13	7	13	8	8	13	7	13
		Нижній	13	8	8	13	7	13	7	12	12	7	13	7
Петлева	32	Верхній та нижній	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Концентрична	32	Верхній	9	10	11	10	10	10	11	10	9	10	10	10
		Нижній	11	10	9	10	10	10	9	10	11	10	10	10

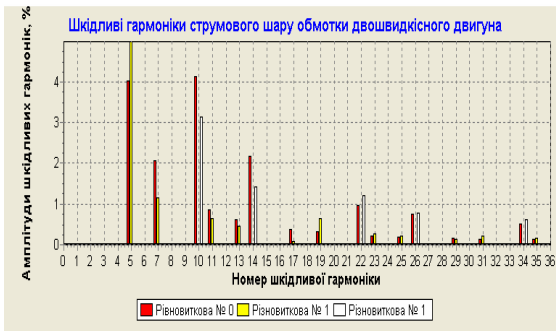


Рис. 3. рядки №7-8) – схеми *NC32* з мінімальним коефіцієнтом  $\tau_{d2}$ . Всі

Схема обмотки зі структурою *NC1* – загально прийнята схема Даландера. Склад шкідливих гармонік залежить від структури обмотки. На рис. 3 продемонстровано склад шкідливих гармонік (табл. 10, рядки №1-2) схеми обмотки *NC1*, а на рис. 4 (табл. 10,

відносні амплітуди шкідливих гармонік схеми  $NC1$  не перевищують

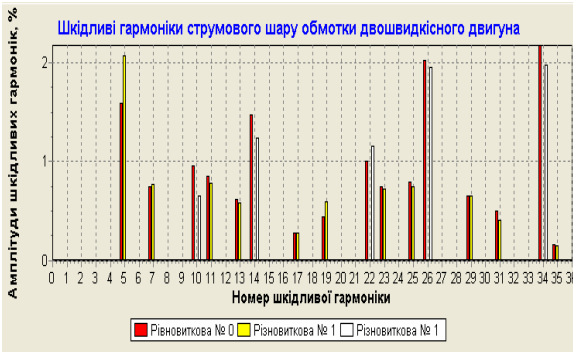


Рис. 4.

значення 4,98 %, а схеми  $NC32$  – 2,07 %, отже в останній в 2,4 раз менші; сумарний коефіцієнт  $\tau d_{\Sigma}$  відповідно – менший в 1,29 раз.

Значне покращення параметрів схем можемо одержати і для інших кроків вкорочення у схем обмоток, але

мінімальне значення коефіцієнта диференційного розсіяння буде більшим від його можливого екстремального значення.

**Висновки. 1.** Запропонований алгоритм є фундаментальним та єдиним для пошуку всіх можливих варіантів створення симетричних багатофазних двошарових схем обмоток електричних машин змінного струму, оскільки уможливує одержання всіх відомих та невідомих схем обмоток електричних машин змінного струму та вибір оптимальних за заданими параметрами оптимізації. **2.** Алгоритм уможливує оптимізацію схем обмоток двошвидкісних електричних машин змінного струму з кількістю виводів 6 або 9 (9 виводів для значення  $C = 5$ ). **3.** Вибір оптимальної схеми обмотки в значній мірі залежатиме від співвідношення тривалості часу роботи на кожній із швидкостей. У цьому випадку бажано вибрати необхідний коефіцієнт  $\alpha_e$  для мінімізації сумарного коефіцієнта ефективності  $E_{p\Sigma}$ . **4.** Існують схеми з мінімальними у відносному значенні амплітудами шкідливих гармонік за умови дещо зменшених значень коефіцієнтів ефективності порівняно з їх екстремальними величинами, що можна було б перефразувати таким чином: за одночасне зниження амплітуд шкідливих гармонік для обох пар полюсів необхідно "платити" зменшенням усередненого коефіцієнта використання. **5.** У подальшому за допомогою математичного моделювання в процесі проектування й експериментальних досліджень електричних асинхронних двигунів необхідно виявити найефективніші схеми обмоток для конкретних умов їх застосування з метою забезпечення максимального заощадження енергетичних ресурсів.

**Список джерел інформації:** **1.** Гаврилюк Р.Б. Багатофазні симетричні обмотки машин змінного струму з різними секціями / Р.Б. Гаврилюк; Вісн. Львів. орденна Леніна політехн. ін-ту - Регулювання електричних машин і передача електричної енергії на відстань // - Львів: – Видавниче об'єднання "Вища школа". Видавн. при Львів. Держ. ун-ті, 1974. - Вип. 83. - С. 5-8. **2.** Гаврилюк Р.Б. Схеми симетричних трифазних двошарових обмоток з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 (кількість пазів  $z=24$ ) // Промелектро. – 2007. - № 5 – С. 21-28. **3.** Губенко Т.П. Симметричные схемы обмоток машин переменного тока: асинхронные микромашины. Материалы межв. научно-техн. конф. по электрическим асинхронным микромашинам / Губенко Т.П., Гаврилюк Р.Б., Онышко Е.А. // - Каунас, 1969. - С. 145-150. **4.** Гаврилюк Р.Б. Синтез и анализ симметричных обмоток машин переменного тока : дис. ... канд. техн. наук. 05.09.01 Гаврилюк Роман Богданович. - Львів, 1970. – 184 с. **5.** Гаврилюк Р.Б. Множество неэквивалентных симметричных токовых слоев машин переменного тока / Р.Б. Гаврилюк; изв. высш. учебн. завед. // Электромеханика. - 1989. - Т. 7. – С. 28 - 35. **6.** Гаврилюк Р.Б. Множини структур схем обмоток електричних машин змінного струму / Роман Гаврилюк – Івано-Франківськ: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка. - 2003. - 396 с. - ISBN 996-694-008-6. **7.** Брейн Н. Дж. Теория перечисления Пойя / Н. Дж. де Брейн // Сб. статей под ред. Э. Бакенбаха. Прикладная комбинаторная математика. - М.: Мир, 1968. - С. 61-106. **8.** Текстовые индексы симметричных схем обмоток электрических машин переменного тока / Р.Б. Гаврилюк // Электрик. – 2008. - № 1 - 2. - С. 12 - 14. **9.** Гаврилюк Р.Б. Класи гармонік симетричних схем обмоток електричних машин змінного струму / Роман Гаврилюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2009. - № 637. - С.18 - 23. **10.** Гаврилюк Р.Б. Схеми симетричних трифазних двошарових обмоток з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 (кількість пазів  $z = 24$ ) / Р.Б. Гаврилюк // Промелектро. - 2007. - № 5. – С. 21-28. **11.** Rajaraman K.C. Design criteria for pole-changing windings / K.C. Rajaraman // Proc. IEE. - 1977. – V.124. - № 9. - P. 775-783.



**Гаврилюк Роман Богданович.** Доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертацію кандидата технічних наук в Львівському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1962 і 1971 рр. Доцент кафедри "Електропостачання та електрообладнання промислових підприємств" Івано-Франківського Національного технічного університету нафти і газу з 1979 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами створення та аналізу всіх можливих варіантів симетричних багатофазних схем обмоток електричних машин змінного струму, математичними макромоделями колекторних машин малої потужності та асинхронних двигунів, математичними об'єктами різної фізичної природи, питаннями покращення ефективності роботи асинхронних двигунів.

*Надійшла до редколегії 21.10.2009*