

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИМЕТРИЧНИХ ДВОШАРОВИХ ТРИФАЗНИХ СХЕМ ОБМОТОК ДВОШВИДКІСНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

*Р.Б.Гаврилюк*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: feivt@nuing.edu.ua*

*Описано характеристики варіантів симетричних трифазних схем обмоток двошвидкісних асинхронних електродвигунів зі співвідношенням кількості пар полюсів 4:5 та кількістю пазів  $z = 72$ .*  
Ключові слова: обмотка, симетричний, двошвидкісний електродвигун

*Описаны характеристики вариантов симметричных трехфазных схем обмоток двухскоростных асинхронных электродвигателей с соотношением чисел пар полюсов 4:5 и числом пазов  $z = 72$ .*  
Ключевые слова: обмотка, симметрический, двухскоростные электродвигатели

*The variants of symmetric three-phase winding charts of two-layer asynchronous electric motors are possible with the relation of amount of pole pairs 4:5 and by the amount of slots of  $z = 72$  are described.*  
Keywords: winding, symmetric, two-layer electric motors

З метою регулювання швидкості обертання виконавчого механізму інтенсивно використовують асинхронні короткозамкнені електричні двигуни з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 4:5 в усіх галузях промисловості, зокрема в нафтогазовій для привода pomp у процесі транспортування нафти [10], що сприяє заощадженню значних енергетичних ресурсів. У процесі проведення експериментів виявлено, що основним недоліком двошвидкісних двигунів є створення струмами у структурі схеми обмотки шкідливих гармонік намагнічуючої сили, які інколи унеможливають роботу двигуна [10].

Схема обмотки статора асинхронного короткозамкненого двигуна впливає на всі показники ефективності роботи електропривода. У світовій практиці постійно тривають пошуки оптимальної схеми. Перша схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 запропонована в позаминулому столітті Даландером [1]. Відтоді теорію симетричних схем обмоток з перемиканням кількості пар полюсів невпинно вдосконалюють та пропонують нові схеми, одержані на підставі різних теоретичних підходів. Опубліковано сотні статей, ми ж відзначимо публікації, які практично створили потужні школи, наприклад [2÷6]. Давно назрівала необхідність створення єдиної теорії проектування всіх можливих схем, наведених в [7÷9].

В даній статті на підставі єдиної теорії проаналізовано всі теоретично можливі варіанти створення схем обмоток з діаметральним розтушуванням котушок у кожній фазі та перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 4:5.

Надалі розглянемо пошук всіх можливих варіантів симетричних схем обмоток з реверсуванням половини котушок у кожній фазі обмотки, тобто за відомими схемами сполучення фаз

[2]: № 1 ( $\Delta/Y/Y$ ), № 2 ( $Y/Y/\Delta$ ), № 3 ( $Y/Y/Y$ ), № 4 ( $Y/Y/Y$ ) і № 5 ( $Y/Y$ ). Підставою для проектування схем обмоток для  $z = 72$  є [8, табл. Д12]. Кількість різних теоретично можливих симетричних структур схем обмоток електричних машин змінного струму визначають на підставі [7, 8].

Домінантні схеми обмоток (домінантною схемою вважаємо схему, яка хоча б за одним параметром є кращою від інших схем) описано параметрами (нижній індекс 1 або 2 вказує відповідно на першу або другу кількість пар полюсів):

- крок вкорочення обмотки  $y$ , критерій оптимальності – мінімум;
- обмотковий коефіцієнт  $K_{p1}$ , критерій оптимальності – максимум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння  $\tau_{d1}$  - критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння для вищих гармонік  $\tau_{d1n}$ , критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки  $E_{p1}$  (відношення номінальної потужності двошвидкісного двигуна для заданої кількості пар полюсів до потужності одношвидкісного двигуна), критерій оптимальності – максимум;
- обмотковий коефіцієнт  $K_{p2}$ , критерій оптимальності – максимум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння  $\tau_{d2}$ , критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння вищих гармонік  $\tau_{d2n}$ , критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки  $E_{p2}$ , критерій оптимальності – максимум;
- усереднений коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки –

$E_{p\Sigma} = \alpha \cdot E_{p1} + (1 - \alpha) \cdot E_{p2}$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ , у даній статті  $\alpha = 0,5$ ), критерій оптимальності – максимум;

– сумарний коефіцієнт диференційного розсіяння  $\tau_{d\Sigma} = \beta \tau_{d1} + (1 - \beta) \tau_{d2}$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ , у даній статті  $\beta = 0,5$ ), критерій оптимальності – мінімум;

– сумарний коефіцієнт диференційного розсіяння для вищих гармонік  $\tau_{d\Sigma} = \tau_{d\Sigma1} + \tau_{d\Sigma2}$ , критерій оптимальності – мінімум.

Окрім того, введемо додаткові параметри, які визначимо у процесі проектування усіх можливих варіантів схем обмоток:

$NC$  — номер структури;

$N_n$  — номер порядку нижчої шкідливої гармоніки;

$F_n$  — амплітуда нижчої шкідливої гармоніки з номером  $N_n$  в % до амплітуди основної гармоніки;

$N_v$  — номер порядку вищої шкідливої гармоніки, яка має найвищу відносну амплітуду від усіх вищих гармонік для заданої кількості полюсів;

$F_v$  — амплітуда вищої шкідливої гармоніки з номером  $N_v$  у % до амплітуди основної гармоніки;

$C$  — схема сполучення фаз;

$C = 1$ , сполучення  $\Delta \backslash Y Y$ ;  $C = 2$ , сполучення  $Y Y \backslash \Delta$ ;  $C = 3$ , сполучення  $Y \backslash Y Y$ ;  $C = 4$ , сполучення  $Y Y \backslash Y$ ;  $C = 5$ , сполучення  $Y \backslash Y$ ;

$B_{p1}/B_{p2}$  — відношення індукцій у повітряному проміжку електричної машини у відповідних кількостях полюсів і заданій схемі сполучення фаз.

Кожному з 12 перелічених вище критеріїв присвоюють логічну змінну, якщо ця логічна змінна, має значення – *true* ( $T$ ), то параметр враховують у пошуку домінант, в іншому випадку (значення *false* ( $F$ )) – не враховують.

На основі [8, табл. Д12] відразу довідуємося, що для  $m$  фазної схеми обмотки в половині кожної фази є  $n = 12$  елементів (секцій) і що кількість різних структур схеми шару обмотки  $kw = 7635$ . Окрім зазначених 7635 структур інші симетричні структури теоретично виконати неможливо.

Усі структури обмоток, з урахуванням діагетральної симетрії кожної фази, для заданої кількості пазів наведено в [8, табл. Д12]. На підставі кожної структури створимо схему симетричної двошарової петлевої (або двошарової концентричної) обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні  $p_1 : p_2 = 4 : 5$  та кроком вкорочення схеми обмотки  $y$ , який є в діапазоні 2 - 24. Отже розглянемо  $kw * (24-1) = 175605$  можливих варіантів побудови схем обмоток.

Алгоритм побудови схеми обмотки з перемиканням кількості пар полюсів на підставі [8, табл. Д1 ÷ Д12] детально пояснено в [9].

Для всіх 175605 варіантів схем обмоток розрахуємо зазначені вище критерії та параметри і з них виберемо домінантні схеми обмоток на підставі двох критеріїв –  $E_{p\Sigma}$  та  $\tau_{d\Sigma}$ .

Значення усіх критеріїв (див. рядки 1-13) наведено в табл. 1, в якій затінені чорним ко-

льором у кожному стовпчику клітинки з екстремальними (мінімум або максимум у залежності від критерію) значеннями.

У табл. 2 наведено інформацію про розташування котушок у схемах обмоток та з'єднання котушок між собою у кожній половині фази. З'єднання половин фаз здійснюють на підставі значення параметра  $C$ , який вибрано таким чином, щоб задовольнити максимальне значення критерію  $E_{p\Sigma}$ .

У результаті дослідження параметрів у 175605 варіантах схем одержано 13 домінантних схем, а серед них є 11 різних структур схем (з 7635 досліджуваних).

У ранзі домінантних схема з номером структури  $NC = 232$  зустрічається 1 раз. Скорочено запишемо це таким чином:  $NC232(1)$ . Отже ряд структур домінантних схем матиме вигляд:  $NC232(1)$ ,  $NC233(1)$ ,  $NC1051(1)$ ,  $NC1189(2)$ ,  $NC1910(1)$ ,  $NC1991(2)$ ,  $NC2679(1)$ ,  $NC3046(1)$ ,  $NC3870(1)$ ,  $NC4385(1)$ ,  $NC4688(1)$ .

Досить важко з'ясувати, яка з 13 домінантних схем найкраща в 12 вимірному просторі критеріїв. Для аналізу властивостей схем, наведених у табл. 1, на рис. 1 ÷ 5 зображено залежності між деякими критеріями.

На рис. 1 зображено залежність сумарного коефіцієнта диференційного розсіяння -  $\tau_{d\Sigma}$  від усередненого коефіцієнта ефективності використання схеми обмотки -  $E_{p\Sigma}$  за умови, що пошук проведено тільки за двома ( $E_{p\Sigma}$  та  $\tau_{d\Sigma}$ ) параметрами. Це схеми з порядковими номерами 13 рядків у табл. 1, а на рис. 1 відповідні точки в напрямі осі абсцис розташовані зліва направо.

На рис. 2 зображено амплітуди нижчих шкідливих гармонік (у відсотках до основних гармонік) для обох кількостей пар полюсів.

На рис. 3 зображено найбільші амплітуди вищих шкідливих гармонік (у процентах до основних гармонік) для обох кількостей пар полюсів.

На рис. 4 зображено обмоткові коефіцієнти для обох кількостей пар полюсів.

Рис. 5 демонструє залежності співвідношень індукцій в повітряному проміжку електричного двигуна залежно від кількості пар полюсів та значення параметра  $C$ , який для представлених схем обмоток наведено у табл. 1.

Схеми з порядковими номерами 1 і 2 унікальні за додатковим критерієм  $\tau_{d\Sigma}/E_{p\Sigma} = 7,99$ , а — з № 4 за критерієм мінімальної суми максимальних шкідливих гармонік ( $F_{n1} + F_{n2} + F_{v1} + F_{v2} = 3,72 + 5,58 + 8,65 + 3,91 = 21,86$ ) в обох кількостях пар полюсів.

У табл. 2 наведено конструктивні параметри схем обмоток, на підставі яких, з урахуванням параметра  $C$  (див. табл. 1) та ґрунтовних пояснень, наведених в [9], можемо спроектувати розгорнені схеми обмоток для усіх структур.

У процесі проектування електричних асинхронних машин змінного струму надзвичайно важливим є забезпечення оптимального співвідношення амплітуд магнітних індукцій в повітряному проміжку, що уможливило максимальне використання магнітопровода.

Таблиця 1 – Домінантні схеми обмоток (кількість пазів  $z = 72$ )

Загальні показники		Кількість пар полюсів $p_1 = 4$										Кількість пар полюсів $p_2 = 5$										Загальні показники				
№	NC	$\gamma$	$K_{p1}$	$\tau_{d1}$	$\tau_{dH1}$	$E_{p1}$	$N_{H1}$	$F_{H1}$	$N_{B1}$	$F_{B1}$	$K_{p2}$	$\tau_{d2}$	$\tau_{dH2}$	$E_{p2}$	$N_{H2}$	$F_{H2}$	$N_{B2}$	$F_{B2}$	$E_{p\Sigma}$	$\tau_{dH\Sigma}$	$C$	$B_{p1}/B_{p2}$				
1	2679	6	0,769	3,39	1,85	0,734	2	12,43	32	4,55	0,759	2,67	2,52	0,794	1	3,84	17	5,34	0,764	6,06	4,37	2	0,911			
2	1189	10	0,769	3,39	1,85	0,734	2	12,43	32	4,55	0,759	2,67	2,52	0,794	1	3,84	17	5,34	0,764	6,06	4,37	2	0,911			
3	3870	6	0,725	2,89	2,57	0,759	2	5,59	8	5,85	0,799	3,74	2,75	0,822	1	9,96	7	7,39	0,790	6,62	5,32	2	1,018			
4	4688	6	0,667	3,40	3,26	0,688	2	3,72	14	8,65	0,822	2,79	2,48	0,860	1	5,58	31	3,91	0,774	6,19	5,74	5	0,986			
5	4385	6	0,701	2,89	2,43	0,698	2	6,79	14	6,71	0,833	3,52	2,47	0,872	1	10,28	7	5,68	0,785	6,42	4,90	5	0,951			
6	1910	7	0,785	3,94	2,48	0,821	2	12,06	14	9,91	0,855	4,17	4,01	0,889	1	4,02	13	10,34	0,855	8,10	6,49	2	1,007			
7	3046	7	0,781	4,02	2,75	0,818	2	11,30	14	11,25	0,856	2,92	2,82	0,885	1	3,09	13	7,61	0,852	6,94	5,57	2	1,012			
8	1991	6	0,698	3,61	2,58	0,721	2	10,14	14	8,10	0,861	3,25	3,19	0,902	1	2,58	7	10,38	0,811	6,86	5,77	5	0,987			
9	1051	7	0,796	5,66	2,53	0,834	2	17,70	14	9,67	0,868	5,24	4,39	0,903	1	9,20	7	10,43	0,868	10,90	6,92	2	1,007			
10	232	8	0,824	8,33	3,40	0,849	2	22,20	14	12,01	0,877	8,23	4,67	0,919	1	18,88	13	11,39	0,884	16,56	8,06	2	0,983			
11	1991	8	0,794	5,49	4,18	0,831	2	11,46	14	14,03	0,878	3,96	3,85	0,900	1	3,35	13	9,65	0,866	9,45	8,03	2	1,021			
12	233	8	0,806	7,03	4,04	0,844	2	17,28	14	13,72	0,891	4,83	4,06	0,914	1	8,80	7	10,32	0,879	11,86	8,10	2	1,021			
13	1189	7	0,734	5,55	4,60	0,769	2	9,75	14	15,34	0,925	3,77	3,71	0,961	1	2,24	7	11,54	0,865	9,32	8,31	5	1,009			
14	ПАМ4	6	0,831	1,41		0,870	2	0	20	4,53	0,592	47,32		0,544	1	59,08	7	27,76	0,707	48,73		4	1,139			
15	ПАМ4	7	0,902	1,11		0,944	2	0	28	2,15	0,612	56,78		0,590	1	66,35	7	23,43	0,767	57,89		4	1,086			
16	ПАМ4	8	0,945	1,15		0,990	2	0	20	2,96	0,603	76,61		0,619	1	76,51	13	25,23	0,804	77,76		4	1,021			
17	ПАМ5	6	0,502	61,13		0,386	2	70,30	8	19,06	0,923	2,497		0,966	1	6,12	7	5,80	0,676	63,62		3	0,735			
18	ПАМ5	7	0,549	67,65		0,400	2	74,34	14	20,47	0,954	2,781		0,999	1	6,86	7	4,90	0,6995	70,43		3	0,701			
19	ПАМ5	8	0,571	72,11		0,598	2	79,49	14	21,22	0,941	2,638		0,863	1	7,84	7	3,74	0,730	74,75		1	1,142			

Таблиця 2 – Конструктивні параметри схем обмоток

NC	Кількість груп котушок у схемі обмотки	Номери груп котушок у половині фази (знак мінус вказує на реверс)	Чергування кількості котушок у групі (повторення шість разів)
232	24	1, -3, 6, -8,	1, 4, 4, 3, ...
233	24	1, -3, 6, -8,	2, 4, 4, 2, ...
1051	36	1, 3, -5, 10, -12, -14,	1, 1, 1, 4, 4, 1, ...
1189	30	1, -4, 7, -10, 13,	1, 4, 1, 3, 3, ...
1910	36	1, -3, -5, 8, -12, 16,	1, 4, 2, 1, 1, 3, ...
1991	36	1, -3, -5, 8, -12, 16,	1, 4, 1, 1, 2, 3, ...
2679	42	1, -4, -6, 10, -14, -16, 19,	1, 2, 4, 2, 1, 1, 1, ...
3046	42	1, -4, -6, 10, -14, -16, 19,	1, 1, 4, 1, 1, 2, 2, ...
3870	48	1, 3, -5, -7, 12, -16, -18, 22,	1, 1, 1, 4, 2, 1, 1, 1, ...
4385	48	1, 3, -5, -7, 12, -16, -18, 22,	1, 1, 1, 4, 1, 1, 2, 1, ...
4688	48	1, -5, -7, 10, 12, -16, 22, -27,	1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 3, ...
ПАМ4	24	1, -4, 7, -10	3,3,3,3,
ПАМ5	30	1, -4, 7, -10, 13,	3,2,3,2,2, ...

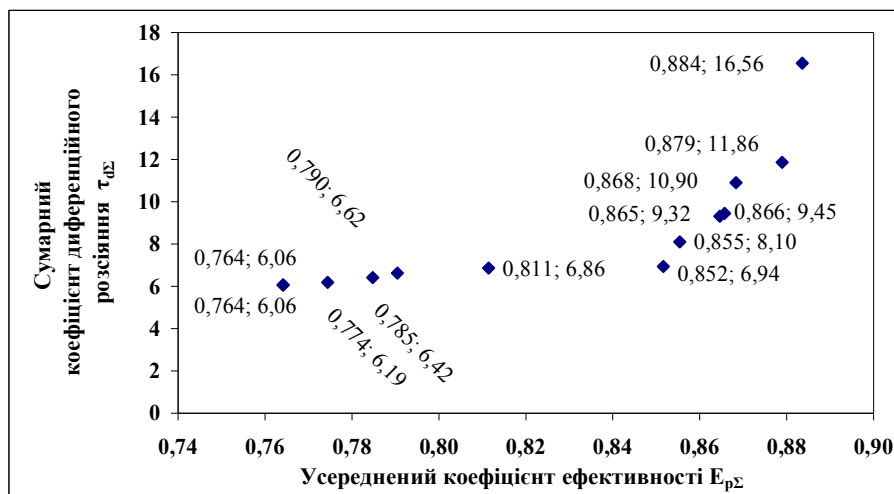


Рисунок 1 – Узагальнені показники схеми обмотки

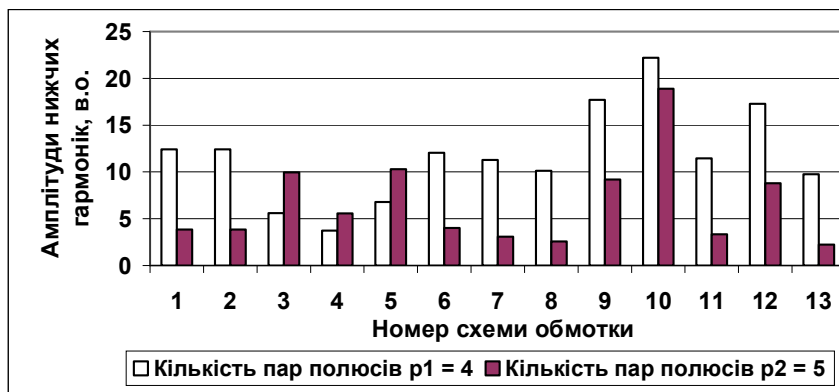


Рисунок 2 – Відносні амплітуди нижчих гармонік

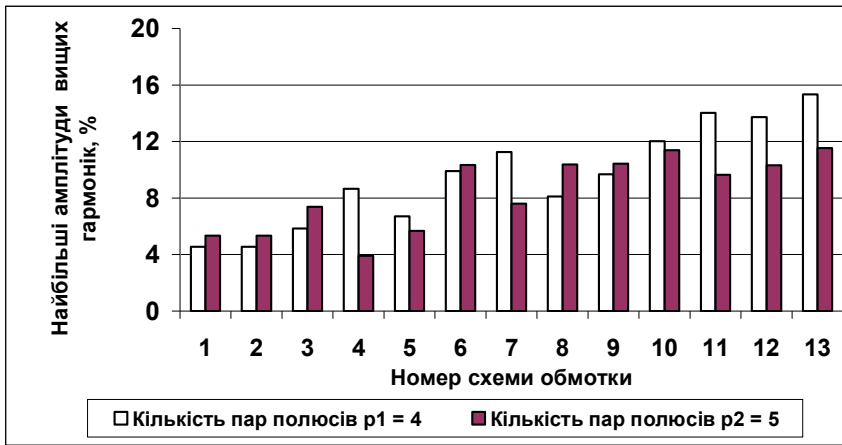


Рисунок 3 – Відносні найбільші амплітуди вищих гармонік



Рисунок 4 – Обмоткові коефіцієнти

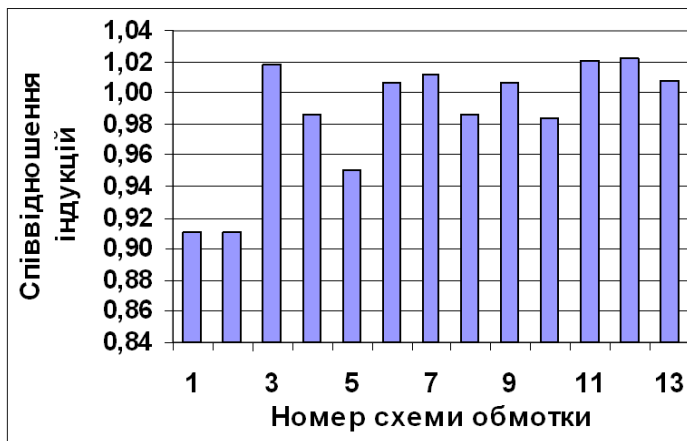


Рисунок 5 – Співвідношення індукцій  $B_{p1}/B_{p2}$

На підставі рис. 5 можна уявити собі, який діапазон співвідношень амплітуд магнітних індукцій можливий для вибору різних структур схем обмоток. Такий підхід раніше практично був неможливим для дослідників. Єдиною варіацією для вирішення цієї проблеми були крок вкорочення обмотки та вибір схеми з'єднання фаз обмоток, що, практично, було серйозним обмеженням для пошуку оптимальних розв'язків. У нашому випадку проектування можна здійснювати з урахуванням й оптимальних співвідношень магнітної індукції.

Теорія повністю-амплітудної модуляції (ПАМ) [2], уможливило проектування схеми обмотки двошвидкісної електричної машини із заданим співвідношенням кількості пар полюсів, наприклад 4:5. Підставою для проектування може бути відома схема обмотки одношвидкісної електричної машини з кількістю пар полюсів  $p_1 = 4$  (ПАМ4) або  $p_2 = 5$  (ПАМ5).

Параметри петлевих схем обмоток, спроектованих за ПАМ [2] на підставі схем обмоток ПАМ4 та ПАМ5 наведено в рядках 14-19 табл. 1 та останніх двох рядках табл. 2.

Відмітимо, що спроектовані за теорією ПАМ схеми обмоток були вилучені програмно з проекту як не домінуючі. Ці схеми обмоток характеризуються найкращими параметрами для кількості пар полюсів, на підставі яких вони спроектовані, та дуже поганими показниками для кількості пар полюсів, на які можна перемикаєти схему, наприклад, амплітуди максимальних шкідливих гармонік під час перемикаєння за ПАМ4 (див. рядки 14-16 табл.1) є в діапазоні 59,08 % - 79,49 %, коефіцієнти диференційного розсіяння відповідно 48,73 % - 77,76 %. Відповідні показники для схем обмоток (див. рядки 1-13 табл.1) для амплітуд максимальних шкідливих гармонік: 8,65% - 22,2% (тобто менші в 9,189 - 2,661 разів), а для коефіцієнтів сумарного диференційного розсіяння: 6,06 - 16,56 (отже менші в 12,83 - 2,94 разів). За цими показниками всі схеми обмоток (див. рядки 1 - 13 табл. 1) кращі від схем, створених на підставі ПАМ (див. рядки 14 - 19 табл. 1).

Є можливість покращити показники наведених вище двошарових схем обмоток двошвидкісних електричних машин змінного струму, якщо замість петлевих двошарових схем обмоток застосувати концентричні двошарові схеми обмоток з різною кількістю провідників у секціях, що визначені на підставі мінімізації коефіцієнта  $\tau_{\Sigma 2}$ , та однакової кількості провідників у пазах.

Продемонструємо покращення показників деяких схем обмоток, наведених у табл. 1, за допомогою демонстрації параметрів деяких оптимізованих схем обмоток у табл. 3. Оптимізацію здійснимо за рахунок зміни витків у кожній котушці обмотки таким чином, щоб кількість витків в усіх пазах була константою (наприклад, рівною 20).

На підставі аналізу даних табл. 3 можемо стверджувати, що оптимізація на підставі зміни кількості витків у котушках схем обмоток призводить до покращення показників  $\tau_{\Sigma 2}$  не опти-

мізованих схем обмоток. Наприклад, для схеми NC2679 показник зменшився в  $6,06/5,59 = 1,084$  раз, для ПАМ4 - в 2,901 раз, для ПАМ5 - 4,06 раз. Максимальна амплітуда шкідливої гармоніки (на обох швидкостях роботи асинхронного двигуна) для оптимізованої схеми обмотки NC2679 дорівнює 8,24%, для ПАМ4 - 29,95%, для ПАМ5 - 23,12%. Зауважимо, що усереднений крок вкорочення схеми обмотки у в NC2679 дорівнює 6, для ПАМ4 - 8,136, для ПАМ5 - 7,664. Зменшення значення у призводить до зменшення втрат електроенергії у двигуні. За цим показником та амплітудами шкідливих гармонік схема NC2679 - найкраща.

## ВИСНОВОК

1. З наведеного вище аналізу даних таблиць 2 та 3 й дослідження графіків, зображених на рисунках 1 ÷ 5, можемо констатувати:

- якщо найкращі значення створені на підставі ПАМ критеріїв для однієї кількості пар полюсів, то для іншої кількості пар полюсів ці ж значення можуть бути найгіршими, це стосується, зокрема, коефіцієнтів диференційного розсіяння та максимальних амплітуд шкідливих гармонік;

- вибір оптимальної схеми обмотки значною мірою залежатиме від співвідношення часу роботи на кожній зі швидкостей (у цьому випадку бажано змінити формулу визначення сумарного коефіцієнта ефективності), необхідних номінальних потужностей чи моментів та вимоги забезпечення максимальної ошадності енергетичних ресурсів;

- існують схеми з мінімальними у відносному значенні амплітудами шкідливих гармонік за умови дещо зменшених значень коефіцієнтів ефективності порівняно з їх оптимальними величинами, що можна було б перефразувати таким чином: за одночасне одержання понижених амплітуд шкідливих гармонік в обох кількостях пар полюсів необхідно "платити" зменшенням усередненого коефіцієнта використання.

2. Запропонований алгоритм є фундаментальним та єдиним для пошуку всіх можливих варіантів створення двошвидкісних симетричних двошарових схем обмоток електричних машин змінного струму оскільки уможливорює одержання всіх відомих та невідомих схем обмоток електричних машин змінного струму з кількістю виводів 6 або 9 (9 виводів для значення  $C = 5$ ).

3. Наведені основні характеристики схем обмоток електричних машин змінного струму та їх конструктивні параметри уможливають створення оптимальних двошвидкісних електроощадних асинхронних двигунів для різних специфічних електроприводів з урахуванням їх особливостей.

4. У подальшому, за допомогою математичного моделювання у процесі проектування й експериментальних досліджень електричних асинхронних двигунів необхідно виявити найефективніші схеми обмоток для конкретних умов їх застосування.



*Література*

1 Dahlander R. Drehstrommotoren mit variabler polzahl / Rob. Dahlander // ETZ. -1897. -№ 18. - S. 257-259.

2 Rawcliffe G.H. Induction motor speed-changing by pole-amplitude modulation / G.H. Rawcliffe, R.F. Burbidge, W. Fong // Proc. IEE. - 1958. 105a. -№ 22. -P.411-419.

3 Rawcliffe G.H. Speed changing induction motors: father developments for pole-amplitude modulation / G.H. Rawcliffe, W. Fong // Proc. IEE. 1960. -107a. -№ 36. -P.513-528.

4 Дегтев В.Г. Сдвиг модуляционной волны при построении двухскоростных обмоток методом полюсно-амплитудной модуляции / В.Г. Дегтев, И.Н. Радимов // Электромашиностроение и электрооборудование. - 1973. - Т. 16. - С.87-96.

5 Захаров М.К. Сравнительная оценка образования многоскоростных обмоток методом амплитудного и фазного модулирования / М.К. Захаров, И.Н. Радимов, В.Г. Дегтев // Электричество. - 1977. - Т 2. - С. 70-81.

6 Дартау А.А. Общая методика составления схем многофазных двухскоростных обмоток / А.А. Дартау // Электричество. - 1970. - Т. 3. - С. 43-47.

7 Гаврилюк Р.Б. Множество неэквивалентных симметричных токовых слоев машин переменного тока / Р.Б. Гаврилюк // Электромеханика. - 1989. - Т. 7. - С. 28-35. (Изв. высш. учебн. завед).

8 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 978 966-694-093-6.

9 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.

10 Такахаси Т. Современные асинхронные двигатели с переключением числа полюсов : перевод № 3030 / Т. Такахаси , Ё. Цудзи ; пер. с япон. Р.Г. Голубевой; - Торгово-пром. палата СССР, Свердл. отд-ние, Бюро переводов. - Свердловск, 1982. - 17 с. Источник : Денки Гаккай дзасси (япон. журн.). - 1980. - Т.100, №12. - С.1143-1150.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
11.02.10*

*Рекомендована до друку  
за результатами Міжнародної конференції  
професором Костишиним В.С.*