

СХЕМИ СИМЕТРИЧНИХ ТРИФАЗНИХ ДВОШАРОВИХ ОБМОТОК З ПЕРЕМИКАННЯМ КІЛЬКОСТІ ПАР ПОЛЮСІВ У СПІВВІДНОШЕННІ 1:2 (КІЛЬКІСТЬ ПАЗІВ $Z = 48$)

Гаврилюк Р.Б., к.т.н., доц.

Івано-Франківський Національний технічний університет нафти і газу,

Україна, 34014, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, кафедра "Електропостачання та електрообладнання"

тел. (03422) 4-80-03, E-mail: feivt@ifdtung.if.ua

Розглянуті характеристики всіх можливих варіантів симетричних трифазних двошарових схем обмоток асинхронних електродвигунів із співвідношенням кількості пар полюсів 1:2 та кількістю пазів $z = 48$.

Рассмотрены характеристики всех возможных вариантов симметричных трехфазных двухскоростных схем обмоток асинхронных электродвигателей с соотношением чисел пар полюсов 1:2 и числом пазов $z = 48$.

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 інші схеми, одержані на підставі різних теоретичних підходів, наприклад [2-6]. Давно назрівала необхідність створення єдиної теорії проектування всіх можливих схем, яка подана в [7-9].

В цій статті на підставі єдиної теорії проаналізовано всі теоретично можливі варіанти створення схем обмоток з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 та кількості пазів $z = 48$.

Надалі ми розглянемо пошук всіх можливих варіантів симетричних схем обмоток з реверсуванням половини котушок в кожній фазі обмотки, тобто за відомими схемами № 1 (Δ/YY), № 2 (YY/Δ), № 3 (Y/YY), № 4 (YY/Y) і № 5 (Y/Y) [2]. Підставою для проектування схем обмоток для $z = 48$ є [8, табл. Д8]. Кількість різних теоретично можливих симетричних структур схем обмоток електричних машин змінного струму визначають на підставі [7, 8].

Пошук домінантних схем обмоток (домінантною схемою вважаємо схему, яка хоча б за одним параметром краща від інших схем) проведемо за дванадцятьма параметрами (нижній індекс 1 або 2 вказує відповідно на кількість пар полюсів):

- ✓ крок вкорочення обмотки y , критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ обмотковий коефіцієнт K_{p1} , критерій оптимальності - максимум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіювання τ_{d1} - критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіювання для вищих гармонік τ_{dn1} , критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки E_{p1} (відношення номінальної потужності двошарового двигуна для заданої кількості пар полюсів до потужності одно швидкісного двигуна), критерій оптимальності - максимум;
- ✓ обмотковий коефіцієнт K_{p2} , критерій оптимальності - максимум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіювання τ_{d2} , критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіювання вищих гар-

- монік τ_{dn2} , критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки E_{p2} , критерій оптимальності - максимум;
- ✓ усереднений коефіцієнт ефективності використання схеми обмотки - $E_{p\Sigma} = (E_{p1} + E_{p2})/2$, критерій оптимальності - максимум;
- ✓ сумарний коефіцієнт диференційного розсіювання $\tau_{d\Sigma} = \tau_{d1} + \tau_{d2}$, критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ сумарний коефіцієнт диференційного розсіювання для вищих гармонік $\tau_{dn\Sigma} = \tau_{dn1} + \tau_{dn2}$, критерій оптимальності - мінімум.

Кожному з 12 перелічених вище параметрів присвоюють логічну змінну, якщо ця логічна змінна має значення - *true* (*T*), то параметр враховують в пошуку домінант, в протилежному випадку (значення *false* (*F*)) - не враховують.

Надалі в табл. 2 всім логічним змінним присвоєні значення *T*.

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

Табл. 1 є копією чотирьох перших рядків [8, табл. Д8]. На підставі цієї копії відразу довідуємося, що для m фазної схеми обмотки в половині кожної фази є n елементів (котушок) кількість різних структур схеми шару обмотки $kw = 166$, тобто **існує тільки 166 теоретично можливих структур схем обмоток**. Значення "№" в таблиці відповідає номеру структури *NC* (див. нижче).

Таблиця 1

Схеми симетричних обмоток, копія таблиці [8, табл.Д8] ($m = 3, n = 8, kw = 166$)

№	Індекс	Схема							
k	17	1	1	1	1	1	1	1	17
2	60	2	1	1	1	1	1	1	15
3	81	1	1	1	1	1	1	1	9

Схеми обмоток створені шляхом розташування котушок в кожній половині фази на підставі значень [8, табл. Д8] (всього 166 схем обмоток, які позначені індексом *NC*), зі зміною кроку вкорочення обмотки y в діапазоні $6 \div 23$, тобто розглянуто 2988 можливих варіантів побудови схем обмоток.

Наведемо 12 параметрів схем обмоток: $y, K_{p1}, \tau_{d1}, \tau_{dn1}, E_{p1}, K_{p2}, \tau_{d2}, \tau_{dn2}, E_{p2}, E_{p\Sigma}, \tau_{d\Sigma}, \tau_{dn\Sigma}$, які вважаємо критеріями для пошуку домінант. Значення цих кри-

Загальні показники			Кількість пар полюсів $p_1 = 1$								Кількість пар полюсів $p_2 = 2$								Загальні показники				
№	NC	Y	K_{p1}	τ_{d1}	τ_{dH1}	E_{p1}	N_H	F_H	N_B	F_B	K_{p2}	τ_{d2}	τ_{dH2}	E_{p2}	N_H	F_H	N_B	F_B	$E_{p\Sigma}$	$\tau_{d\Sigma}$	$\tau_{dH\Sigma}$	C	B_{p1}/B_{p2}
127	4	13	0,581	2,16	2,16	0,554	1	0,00	5	13,28	0,917	0,84	0,84	0,960	1	0,00	4	3,41	0,757	3,00	3,00	2	0,911
128	5	14	0,570	3,45	3,45	0,554	1	0,00	5	17,57	0,917	0,84	0,84	0,960	1	0,00	4	3,41	0,757	4,29	4,29	2	0,929
129	5	10	0,437	1,84	1,84	0,458	1	0,00	7	11,31	0,917	0,84	0,84	0,916	1	0,00	4	3,41	0,687	2,68	2,68	5	1,048
130	21	12	0,506	2,39	2,39	0,530	1	0,00	5	12,60	0,925	0,62	0,62	0,918	1	0,00	22	1,20	0,724	3,01	3,01	2	1,055
131	4	12	0,546	1,86	1,86	0,559	1	0,00	5	11,14	0,925	0,62	0,62	0,969	1	0,00	22	1,20	0,764	2,48	2,48	2	0,977
133	6	10	0,426	2,16	2,16	0,419	1	0,00	7	12,84	0,925	0,62	0,62	0,969	1	0,00	22	1,20	0,694	2,78	2,78	1	0,941
134	5	13	0,540	3,27	3,27	0,566	1	0,00	5	16,77	0,941	0,79	0,79	0,980	1	0,00	10	2,75	0,773	4,06	4,06	2	1,006
135	5	11	0,474	2,31	2,31	0,493	1	0,00	7	9,97	0,941	0,79	0,79	0,986	1	0,00	10	2,75	0,739	3,11	3,11	5	0,993
136	5	12	0,508	2,85	2,85	0,497	1	0,00	5	14,06	0,949	0,74	0,74	0,994	1	0,00	10	3,43	0,746	3,59	3,59	5	0,934
137	6	11	0,461	2,69	2,69	0,483	1	0,00	7	11,32	0,949	0,74	0,74	0,966	1	0,00	10	3,43	0,724	3,42	3,42	5	1,029
138	6	13	0,526	3,75	3,75	0,551	1	0,00	5	18,12	0,949	0,74	0,74	0,954	1	0,00	10	3,43	0,752	4,49	4,49	2	1,042
139	6	12	0,495	3,29	3,29	0,501	1	0,00	5	15,19	0,958	0,89	0,89	1,003	1	0,00	10	4,29	0,752	4,18	4,18	5	0,968

Досить важко з'ясувати, яка з 112 доміантних схем найкраща в 12 вимірному просторі критеріїв. Для аналізу властивостей схем, наведених в табл. 2, на рис. 1 - 5 подано залежності деяких критеріїв проєкціями на осі двовимірного простору.

Рис. 1 та 2 демонструють для всіх 112 схем залежності коефіцієнтів ефективності від коефіцієнтів диференційного розсіювання.

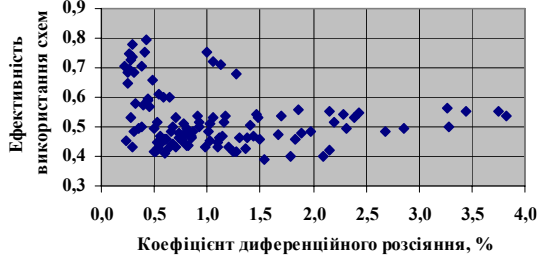


Рис. 1. Якість схем ($p = 1$)

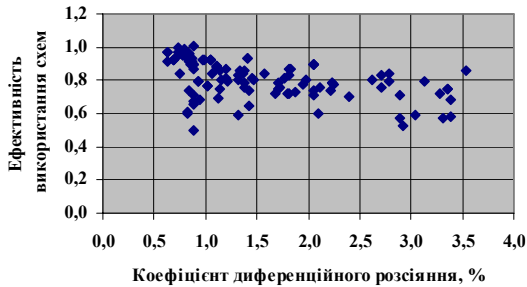


Рис. 2. Якість схем ($p = 2$)

На рис. 3 подано залежності сумарного коефіцієнта диференційного розсіювання $\tau_{d\Sigma}$ від усередненого коефіцієнта ефективності використання схеми обмотки $E_{p\Sigma}$.

Діаграма взаємної залежності амплітуд максимальних шкідливих гармонік для p_1 та p_2 зображена на рис. 4 та ілюструє, що існують схеми обмоток з надзвичайно низькими амплітудами максимальних шкідливих гармонік.

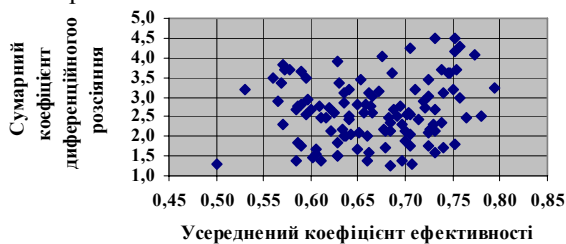


Рис. 3. Ефективність схем обмоток

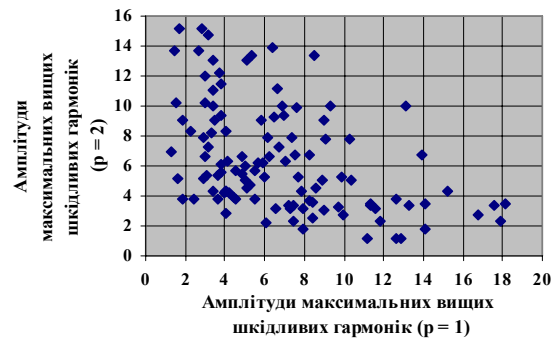


Рис. 4. Амплітуди максимальних шкідливих гармонік

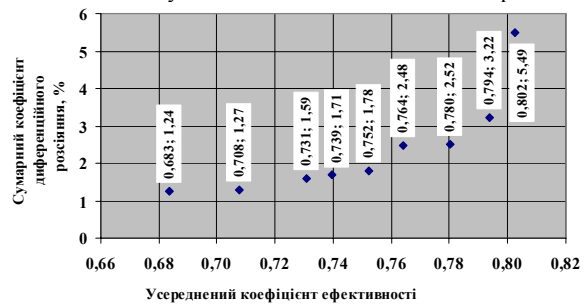


Рис. 5. Доміантні схеми обмоток за двома критеріями

На рис. 5 подано залежність сумарного коефіцієнта диференційного розсіювання - $\tau_{d\Sigma}$ 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. Знайдено лише дев'ять доміантних схем, вісім перших з яких теж є подані в табл. 2 (дев'ята схема ($NC1, y = 15$) мала завеликий коефіцієнт сумарного диференційного розсіювання $\tau_{d\Sigma} = 5.49$ для визначеного обмеження). Це схеми з порядковими номерами рядків: 54, 95, 113, 69, 90, 131, 58, 84 в табл. 2, а на рис. 5 відповідні точки в напрямі осі абсцис розташовані зліва направо. В доміантні схеми ввійшли структури $NC1$ (номери рядків в табл. 2: $NC1$ (84, 90, 95), $NC2$ (№ 58, № 69), $NC3$ (№ 113), $NC4$ (№ 131), $NC7$ (№ 54) та $NC1$ (номер в табл. 2 - 3, відсутній).

На рис. 6 - 10 зображено по одній схемі, що належать переліченим вище структурам.

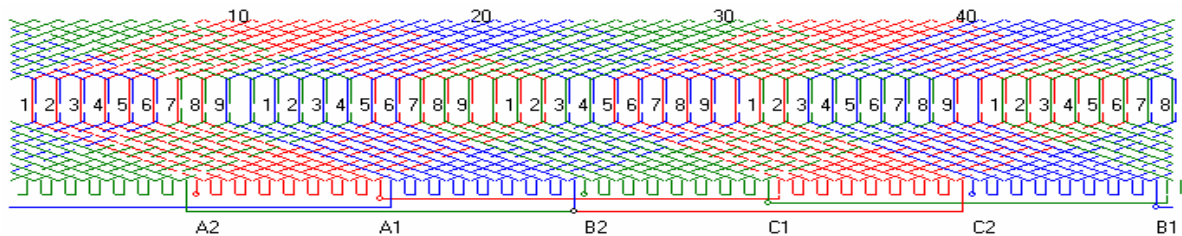
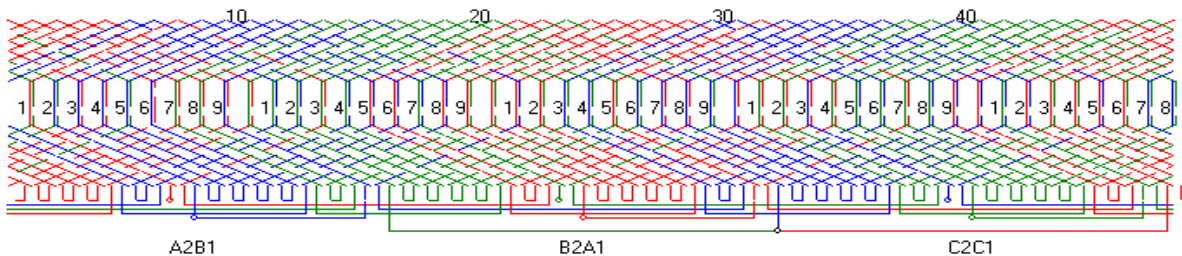
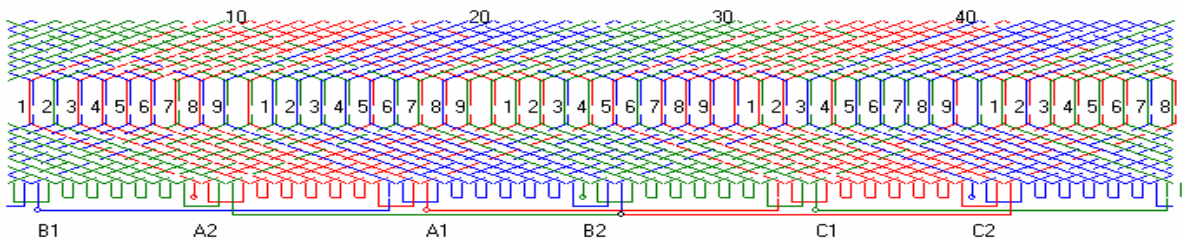
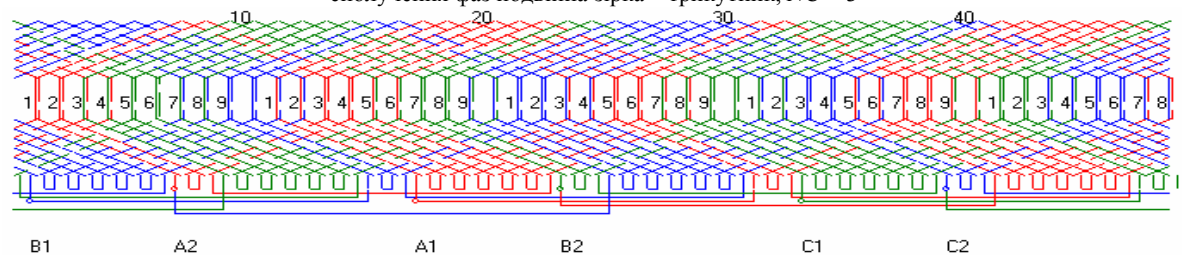
Схема з порядковим номером 95 екстремальна теж за додатковим критерієм $\tau_{d\Sigma}/E_{p\Sigma} = 1.8$, а схема № 54 — за додатковим критерієм мінімальної суми максимальних шкідливих гармонік для обох кількостей пар полюсів ($F_{B1} + F_{B2} = 1.84 + 3.83 = 5.67$). Максимальна гармоніка для обох швидкостей не перевищує 3, 83 %.

Таблиця 3

Конструктивні параметри схем обмоток

Номер NC	Кількість груп котушок в схемі обмотки	Номери груп котушок в половині фази (знак мінус вказує на реверс)	Чергування кількості котушок в групі (повторення шість разів)
1	6	1	8, ...
2	18	1, 3, 5,	1, 1, 6, ...
3	12	1, -4,	1, 7, ...
4	12	1, -4,	2, 6, ...
5	12	1, -4,	3, 5, ...
6	12	1, -4,	4, 4, ...
7	18	1, -6, -8,	1, 5, 2, ...
9	18	1, -6, -8,	2, 4, 2, ...
10	18	1, 3, -8,	3, 1, 4, ...
11	18	1, 3, -8,	2, 1, 5, ...
12	18	1, 3, -8,	1, 1, 6, ...
14	18	1, 3, -8,	2, 2, 4, ...
16	18	1, 3, -8,	1, 2, 5, ...
17	18	1, 3, -8,	1, 3, 4, ...
18	30	1, -8, -10, -12, -14,	1, 4, 1, 1, 1, ...
19	24	1, 3, -8, -10,	1, 1, 5, 1, ...
20	24	1, 3, -8, -10,	1, 1, 4, 2, ...
21	24	1, 3, -8, -10,	1, 1, 3, 3, ...

22	30	1, -8, -10, -12, -14,	1, 3, 1, 1, 2, ...
24	24	1, 4, 6, -11,	1, 1, 1, 5, ...
29	30	1, 3, 5, 7, -14,	1, 1, 2, 1, 3, ...
30	30	1, 3, 5, -12, -14,	2, 1, 1, 1, 3, ...
31	24	1, 4, 6, -11,	1, 2, 1, 4, ...
32	24	1, 4, 6, -11,	1, 1, 2, 4, ...
40	30	1, 3, 5, 7, -14,	1, 1, 1, 1, 4, ...
41	30	1, 3, 5, -12, -14,	1, 1, 1, 1, 4, ...
46	24	1, -8, -11, 18,	2, 1, 3, 2, ...
48	24	1, -4, -7, -10,	1, 1, 5, 1, ...
49	30	1, 3, 5, -12, -14,	1, 1, 2, 1, 3, ...
51	30	1, 3, 5, 7, -14,	1, 2, 1, 1, 3, ...
61	30	1, -8, -10, -12, 19,	1, 1, 1, 1, 4, ...
74	36	1, 3, -10, -12, -14, 23,	1, 1, 1, 1, 1, 3, ...
80	36	1, 4, 6, 8, -15, -17,	1, 1, 1, 1, 1, 3, ...
92	42	1, 3, 5, 7, 9, -18, -20,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, ...
93	42	1, 3, 5, 7, -16, -18, -20,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, ...
99	30	1, -7, -10, -13, 19,	1, 1, 1, 1, 4, ...
135	48	1, 4, 6, 8, 10, -19, -21, -23,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...
136	42	1, 3, 6, -12, -14, -16, -18,	1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, ...
141	42	1, -10, -12, -14, -16, -18, 27,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, ...
156	48	1, 3, 5, 8, -15, -18, -20, -22,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...
161	48	1, 3, 6, 8, -13, -15, -18, -20,	1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...

Рис. 6. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – зірка, $NC = 1$ Рис. 7. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – зірка, $NC = 2$ Рис. 8. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – трикутник, $NC = 3$ Рис. 9. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – трикутник, $NC = 4$

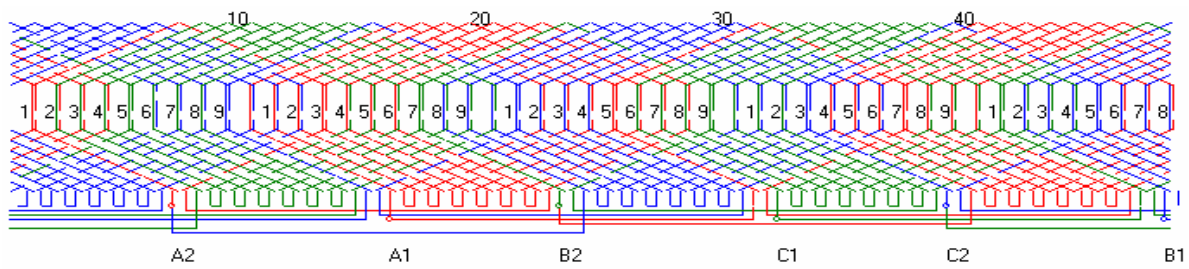


Рис. 10. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – зірка, $NC = 7$

Методика побудови розгорнутих схем обмоток на підставі даних, наведених в табл. 1, 2, детально пояснена [9].

Вихідними даними для побудови всіх досліджуваних схем обмоток є параметр NC в табл. 3, який визначає структуру схеми обмотки та схему з'єднання котушок у групах; параметр C (табл. 2) – з'єднання груп, половин фаз та утворення виводів схеми, а крок вкорочення схеми обмотки y (табл. 2) – структурний зсув шарів схеми обмотки.

Практично [9] є досить легко відтворити всі розгорнені схеми обмоток, якщо така необхідність виникне в процесі аналізу параметрів табл. 2.

ВИСНОВОК

1. З наведеного вище аналізу даних в табл. 3 та дослідження графіків, представлених на рис. 1 - 5, можемо констатувати:

- ✓ коли найкращі критерії для однієї кількості пар полюсів, то для іншої кількості пар полюсів ці ж параметри можуть бути найгіршими, це стосується, зокрема, коефіцієнтів диференційного розсіяння та максимальних амплітуд шкідливих гармонік;
- ✓ вибір оптимальної, в певному розумінні, схеми обмотки в значній мірі залежатиме від співвідношення часу роботи на кожній із швидкостей (у цьому випадку бажано змінити формулу визначення сумарного коефіцієнта ефективності на $E_{p\Sigma} = \alpha \cdot E_{p1} + (1-\alpha) \cdot E_{p2}$, де $\alpha = 0 \div 1$), необхідних номінальних потужностей чи моментів та вимоги забезпечення максимальної економії енергетичних ресурсів;
- ✓ існують схеми з мінімальними у відносному значенні амплітудами шкідливих гармонік за умови дещо зменшених значень коефіцієнтів ефективності в порівнянні до їх оптимальних величин, що можна було б перефразувати таким чином: за одночасне отримання 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 одношвидкісних та двошвидкісних симетричних двошарових схем обмоток електричних машин змінного струму оскільки узагальнює всі відомі в літературі методи проектування схем.

3. Наведені основні характеристики схем обмоток електричних машин змінного струму та їх конструктивні параметри уможливають створення опти-

мальних двошвидкісних електроощадних асинхронних двигунів для різних специфічних електроприводів з врахуванням їх особливостей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Dahlander R. Drehstrommotoren mit variabler polzahl // ETZ. -1897. -№ 18. -p. 257-259.
- [2] Rawcliffe G. H., Burbidge R.F., Fong W. Induction motor speed-changing by pole-amplitude modulation // Proc. IEE. - 1958. 105a. -№ 22. -p. 411-419.
- [3] Rawcliffe G. H., Fong W. Speed changing induction motors: father developments for pole-amplitude modulation // Proc. IEE. 1960. -107a. -№ 36. -p. 513-528.
- [4] Дегтев В.Г., Радимов И.Н. Сдвиг модуляционной волны при построении двухскоростных обмоток методом полюсно-амплитудной модуляции В сб. Электромашиностроение и электрооборудование. -1973.-Т. 16.- С. 87-96.
- [5] Захаров М.К., Радимов М.К., Дегтев В.Г. Сравнительная оценка образования многоскоростных обмоток методом амплитудного и фазного модулирования // Электричество. 1977. -Т 2. - С. 70-81.
- [6] Дартау А.А. Общая методика составления схем многофазных двухскоростных обмоток // Электричество. - 1970. -Т. 3. - С. 43-47.
- [7] Гаврилюк Р.Б. Множество неэквивалентных симметричных токовых слоев машин переменного тока // Электромеханика. -1989. -Т. 7. -с. 28-35. (Изв. высш. учебн. завед).
- [8] Гаврилюк Р.Б. Множини структур схем обмоток електричних машин змінного струму. – Івано-Франківськ: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка. - 2003. - 396 с.
- [9] 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.

Надійшла 03.01.2008