

СХЕМИ СИМЕТРИЧНИХ ТРИФАЗНИХ ДВОШАРОВИХ ОБМОТОК З ПЕРЕМИКАННЯМ КІЛЬКОСТІ ПАР ПОЛЮСІВ У СПІВВІДНОШЕННІ 1:2 (КІЛЬКІСТЬ ПАЗІВ $z = 42$)

Р.Б.Гаврилюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 48003

e-mail: feivt@nung.edu.ua

Описаны характеристики всех возможных вариантов симметричных трехфазных двухскоростных схем обмоток асинхронных электродвигателей с соотношением чисел пар полюсов 1:2 и числом пазов $z = 42$.

All the variants of symmetric three-phase two-layer winding charts of asynchronous electric motors are possible with the relation of amount of pole pairs 1:2 and by the amount of slots of $z = 42$ are described.

Перша схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2 запропонована Даландером [1]. Відтоді теорію симетричних схем обмоток з перемиканням кількості пар полюсів невпинно вдосконалюють [2-6] та пропонують, як нові схеми, так і розширюють сферу їх застосування для електроприводів в різних галузях промисловості, зокрема в нафтогазовій для приводів верстатів-гойдалок [10]. Давно назривала необхідність створення єдиної теорії проектування всіх можливих схем, яка подана в [7-9]. В цій статті проаналізовано всі теоретично можливі варіанти створення схем обмоток з діаметральним розтушуванням котушок у кожній фазі та перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, що уможливило вибір найкращих схем обмоток із врахуванням специфіки роботи електроприводів верстатів-гойдалок.

Надалі ми розглянемо пошук всіх можливих варіантів симетричних схем обмоток з реверсуванням половини котушок в кожній фазі обмотки, тобто за відомими схемами № 1 (Δ/Y), № 2 (Y/Δ), № 3 (Y/Y), № 4 (Y/Y) і № 5 (Y/Y) [2]. Підставою для проектування схем обмоток для $z = 42$ є [8, табл. Д7]. 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 першу або другу кількість пар полюсів):

- крок вкорочення обмотки u , критерій оптимальності – мінімум;
- обмотковий коефіцієнт K_{p1} , критерій оптимальності – максимум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння τ_{d1} , критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт диференційного розсіяння для вищих гармонік τ_{dn1} , 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 τ_{d2} , критерій оптимальності – мінімум;

• коефіцієнт диференційного розсіяння вищих гармонік 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 розсіяння $\tau_{d\Sigma} = \tau_{d1} + \tau_{d2}$, критерій оптимальності – мінімум;

• сумарний коефіцієнт диференційного розсіяння 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 таблиці 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].

Таблиця 1 є копією трьох перших рядків [8, табл. Д7]. На підставі цієї копії відразу відомо, що для *m* фазної схеми обмотки в половині кожної фази є *n* елементів (котушок) кількість різних структур схеми шару обмотки $kw = 66$, тобто *існує тільки шістьдесят шість теоретично можливих структур схем обмоток*. Окрім зазначених 66 структур інші симетричні структури теоретично виконати неможливо.

Таблиця 1 – Схеми симетричних обмоток, копія таблиці Д7 [8] ($m = 3, n = 7, kw = 66$)

№	Індекс	Схема						
		1	1	1	1	1	1	15
1	15	1	1	1	1	1	1	15
2	52	2	1	1	1	1	2	13

Структури схем обмоток створюють на підставі [2, табл. Д7] (всього 66 структур обмоток, які позначені індексом NC), зі зміною кроку вкорочення обмотки у в діапазоні ($5 \div 20$), тобто розглянуто 1056 можливих варіантів побудови схем обмоток.

Наведемо 12 параметрів схем обмоток: $u, K_{p1}, \tau_{d1}, \tau_{d11}, E_{p1}, K_{p2}, \tau_{d2}, \tau_{d22}, E_{p2}, E_{p\Sigma}, \tau_{d\Sigma}, \tau_{d\Sigma2}$, які вважаємо критеріями для пошуку домінант. Значення цих критеріїв подано в таблиці 2, в якій затінені чорним кольором в кожному стовпчику клітинки з екстремальними (мінімуму або максимуму залежно від критерію) значеннями критеріїв. Окрім того, в табл. 2 наведено:

NC – номер структури;

N_n – номер порядку максимальної нижчої шкідливої гармоніки;

F_n – амплітуда максимальної нижчої шкідливої гармоніки в % до амплітуди основної гармоніки;

N_b – номер порядку максимальної вищої шкідливої гармоніки;

F_b – амплітуда максимальної вищої шкідливої гармоніки в % до амплітуди основної гармоніки;

C – схема сполучення фаз:

$C = 1$, сполучення $\Delta \backslash YY$,

$C = 2$, сполучення $YY \backslash \Delta$,

$C = 3$, сполучення $Y \backslash YY$,

$C = 4$, сполучення $YY \backslash Y$,

$C = 5$, сполучення $Y \backslash Y$;

B_{p1}/B_{p2} – відношення індукцій у повітряно-му проміжку електричної машини у відповідних кількостях полюсів та заданій схемі сполучення фаз.

Надалі у табл. 3 представлено інформацію про розташування котушок в схемах обмоток та з'єднання котушок між собою в кожній половині фази. З'єднання половин фаз здійснюють на підставі значення параметра C .

В результаті дослідження параметрів у 1056 варіантах схем одержано 149 домінантних схем, а серед них є тільки тридцять різних структур схем (з 66 досліджуваних).

В ранзі домінантних схема з номером $NC = 1$ зустрічається 16 разів. Скорочено запишемо це таким чином: $NC1(16)$. Отже ряд домінантних схем матиме вигляд: $NC1(16), NC2(16), NC3(9), NC4(9), NC5(10), NC6(3), NC7(3), NC9(5), NC10(9), NC12(5), NC14(2), NC15(8), NC16(8), NC17(7), NC18(2), NC21(1), NC23(1), NC24(4), NC25(5), NC26(4), NC31(1), NC37(4), NC39(2), NC44(2), NC45(2), NC48(1), NC49(2), NC51(2), NC58(2), NC62(4)$.

Досить важко з'ясувати, яка з 149 домінантних схем найкраща в 12 вимірному просторі критеріїв. Для аналізу властивостей схем, наведених в таблиці 2, на рисунках 1 \div 8 подано залежності між деякими критеріями.

Для всіх критеріїв одержано екстремальні значення, які в таблиці 2 затінено чорним кольором.

На рисунку 1 та рисунку 2 зображені для всіх 149 схем залежності коефіцієнтів ефективності від коефіцієнтів диференційного розсіяння.

На рисунку 3 подано залежності сумарного коефіцієнта диференційного розсіяння $\tau_{d\Sigma}$ 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 рисунку 4 та ілюструє, що існують схеми обмоток з надзвичайно низькими амплітудами максимальних шкідливих гармонік.

На рисунку 5 подано 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. Знайдено лише сім домінантних схем, які теж є подані в табл. 2. Це схеми з порядковими номерами рядків: 113, 114, 132, 133, 88, 110, 100 в табл. 2, а на рисунку 5 відповідні точки в напрямі осі абсцис розташовані зліва направо.

Схема з порядковим номером 114 унікальна за додатковим критерієм $\tau_{d\Sigma}/E_{p\Sigma} = 2,33$, а № 94 – за критерієм мінімальної суми максимальних шкідливих гармонік ($F_{b1} + F_{b2} = 1,73 + 4,69 = 6,42$) в обох кількостях пар полюсів.

На рисунку 6 зображено зв'язок між усередненими коефіцієнтами ефективностей та сумами максимальних шкідливих гармонік, які є в обох швидкостях обертання. Це дозволяє оцінити скільки домінантних схем можуть забезпечити малі амплітуди шкідливих гармонік шару струму.

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

На підставі рисунку 7 можна уявити собі, який можливий 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 був крок вкорочення обмотки, що, практично, було серйозним обмеженням для пошуку оптимальних розв'язків. В нашому випадку проектування можливо здійснювати з врахуванням й оптимальних співвідношень магнітної на рисунку 8 зображено залежність суми відносних максимальних гармонік як функцію $E_{p\Sigma}$.

Для прикладу на рисунках 9 \div 14 наведено розгорнені схеми обмоток, параметри яких описані відповідно в рядках: 100, 94, 132, 142, 144, 140 таблиці 2. індукції.

Продовження таблиці 2

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}
125	10	10	0,583	1,00	1,00	0,514	1	0,00	5	6,26	0,850	1,25	1,25	0,890	1	0,00	10	4,07	0,702	2,25	2,25	2	0,843
126	10	11	0,628	1,15	1,15	0,514	1	0,00	5	8,52	0,850	1,25	1,25	0,890	1	0,00	10	4,07	0,702	2,40	2,40	2	0,782
127	3	9	0,525	0,72	0,72	0,526	1	0,00	7	3,89	0,870	1,83	1,83	0,911	1	0,00	4	8,22	0,718	2,55	2,55	2	0,957
128	3	12	0,658	1,34	1,34	0,526	1	0,00	5	10,00	0,870	1,83	1,83	0,911	1	0,00	4	8,22	0,718	3,17	3,17	2	0,763
129	4	13	0,623	2,69	2,69	0,526	1	0,00	5	14,55	0,870	1,83	1,83	0,911	1	0,00	4	8,22	0,718	4,52	4,52	2	0,806
130	4	8	0,425	1,38	1,38	0,445	1	0,00	7	8,32	0,870	1,83	1,83	0,890	1	0,00	4	8,22	0,667	3,21	3,21	5	1,024
131	15	9	0,482	1,17	1,17	0,505	1	0,00	7	7,33	0,871	1,23	1,23	0,874	1	0,00	4	4,72	0,689	2,40	2,40	2	1,043
132	3	10	0,572	0,97	0,97	0,538	1	0,00	5	6,64	0,890	0,96	0,96	0,932	1	0,00	4	2,76	0,735	1,94	1,94	2	0,897
133	3	11	0,617	1,21	1,21	0,538	1	0,00	5	9,04	0,890	0,96	0,96	0,932	1	0,00	4	2,76	0,735	2,17	2,17	2	0,833
134	5	13	0,583	3,82	3,82	0,538	1	0,00	5	17,82	0,890	0,96	0,96	0,932	1	0,00	4	2,76	0,735	4,79	4,79	2	0,881
135	5	8	0,398	2,08	2,08	0,403	1	0,00	7	11,76	0,890	0,96	0,96	0,932	1	0,00	4	2,76	0,668	3,04	3,04	1	0,969
136	16	12	0,568	2,66	2,66	0,538	1	0,00	5	14,57	0,890	1,21	1,21	0,932	1	0,00	8	3,43	0,735	3,87	3,87	2	0,904
137	16	9	0,453	1,53	1,53	0,466	1	0,00	7	7,80	0,890	1,21	1,21	0,932	1	0,00	8	3,43	0,699	2,73	2,73	5	0,982
138	15	10	0,526	1,49	1,49	0,538	1	0,00	5	8,29	0,891	1,20	1,20	0,932	1	0,00	10	3,66	0,735	2,69	2,69	2	0,978
139	15	11	0,567	1,82	1,82	0,538	1	0,00	5	11,29	0,891	1,20	1,20	0,932	1	0,00	10	3,66	0,735	3,01	3,01	2	0,907
140	16	11	0,533	2,43	2,43	0,551	1	0,00	5	13,17	0,911	0,97	0,97	0,954	1	0,00	14	1,94	0,752	3,40	3,40	2	0,987
141	16	10	0,495	1,98	1,98	0,518	1	0,00	5	9,68	0,911	0,97	0,97	0,897	1	0,00	14	1,94	0,707	2,95	2,95	2	1,063
142	4	9	0,470	1,55	1,55	0,477	1	0,00	7	8,68	0,911	1,31	1,31	0,954	1	0,00	4	5,01	0,715	2,86	2,86	5	0,969
143	4	12	0,590	2,73	2,73	0,551	1	0,00	5	15,16	0,911	1,31	1,31	0,954	1	0,00	4	5,01	0,752	4,04	4,04	2	0,892
144	5	12	0,552	3,89	3,89	0,563	1	0,00	5	18,56	0,932	0,88	0,88	0,976	1	0,00	10	1,82	0,770	4,77	4,77	2	0,975
145	5	9	0,440	2,30	2,30	0,461	1	0,00	7	12,27	0,932	0,88	0,88	0,922	1	0,00	10	1,82	0,691	3,18	3,18	5	1,058
146	4	11	0,553	2,48	2,48	0,563	1	0,00	5	13,71	0,932	0,88	0,88	0,976	1	0,00	10	1,82	0,770	3,37	3,37	2	0,973
147	4	10	0,513	2,03	2,03	0,537	1	0,00	5	10,07	0,932	0,88	0,88	0,930	1	0,00	10	1,82	0,734	2,91	2,91	2	1,049
148	5	10	0,480	2,95	2,95	0,499	1	0,00	5	12,33	0,953	1,00	1,00	0,998	1	0,00	10	3,82	0,749	3,95	3,95	5	0,992
149	5	11	0,518	3,55	3,55	0,542	1	0,00	5	16,78	0,953	1,00	1,00	0,939	1	0,00	10	3,82	0,740	4,55	4,55	2	1,063

Таблиця 3 – Конструктивні параметри схем обмоток

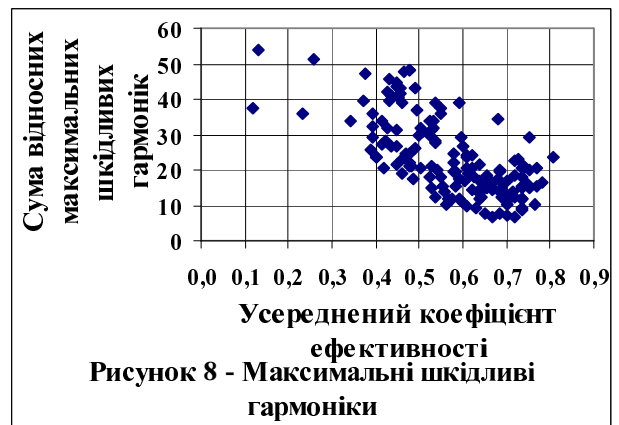
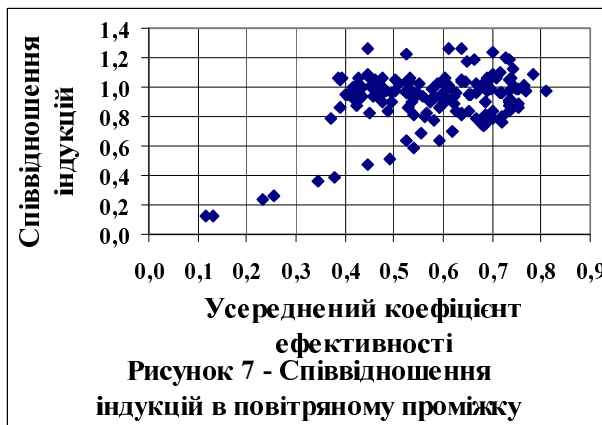
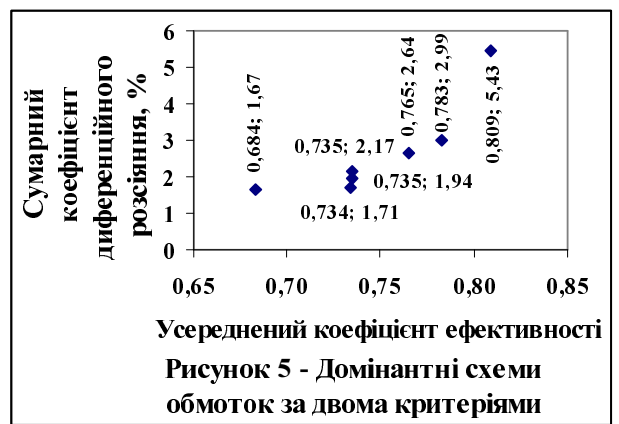
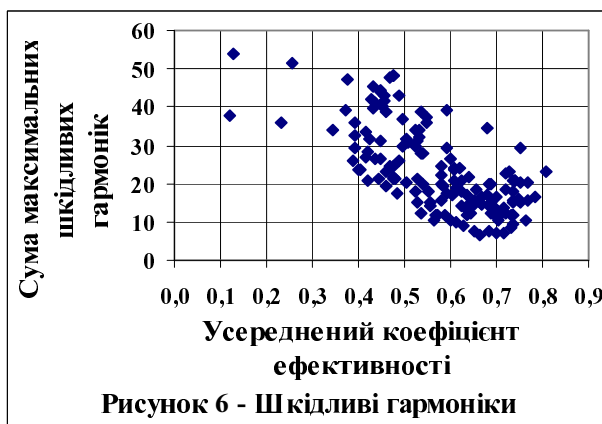
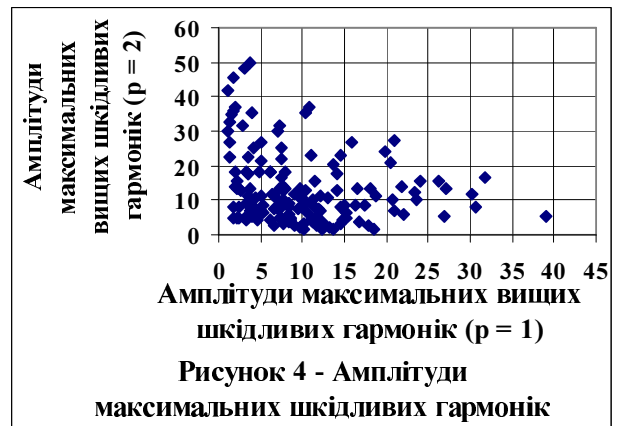
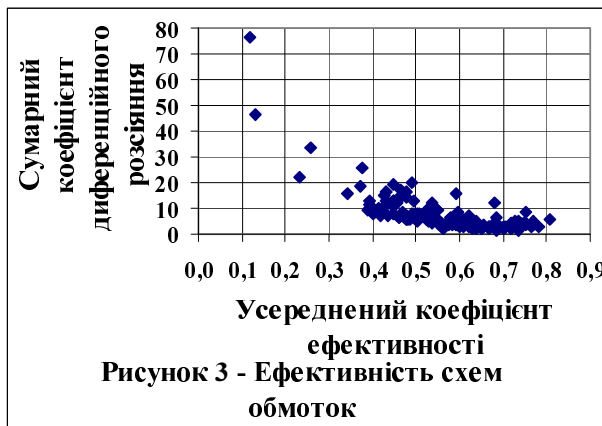
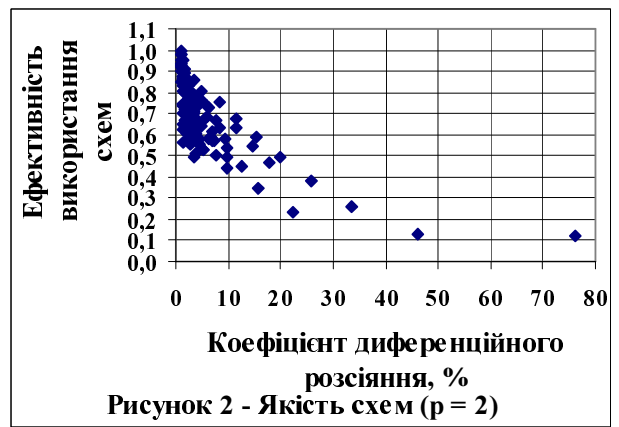
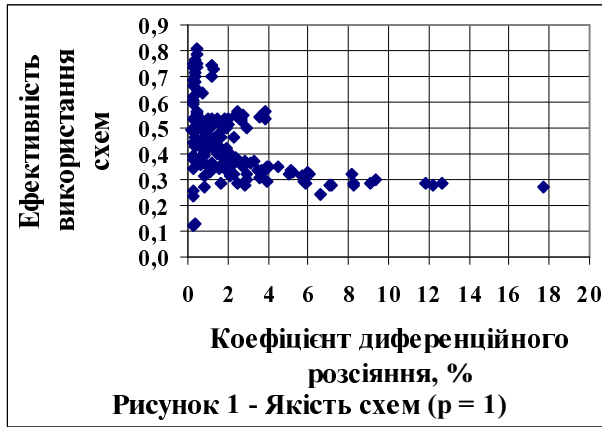
NC	Кількість груп котушок в схемі обмотки	Номери груп котушок в половині фази (знак мінус вказує на реверс)	Чергування кількості котушок в групі (повторення шість разів)	NC	Кількість груп котушок в схемі обмотки	Номери груп котушок в половині фази (знак мінус вказує на реверс)	Чергування кількості котушок в групі (повторення шість разів)
1	6	1	7, ...	21	24	1,4,6,-11,	1,2,2,2,...
2	18	1, 3, 5	1, 1, 5 ...	23	24	1,4,6,-11,	1,2,1,3,...
3	12	1, -4,	1, 6 ...	24	24	1,4,6,-11,	1,1,2,3,...
4	12	1, -4,	2, 5 ...	25	30	1,3,5,7,-14,	1,1,1,1,3,...
5	12	1, -4,	3, 4 ...	26	30	1,3,5,-12,-14,	1,1,1,1,2,...
6	18	1, -6, -8,	1, 4, 2 ...	31	30	1,-8,-10,-12,-14,	1,1,1,2,2,...
7	18	1, -6, -8,	1, 3, 3 ...	37	30	1,-8,-10,-12,19,	1,1,1,1,3,...
9	18	1, 3, -8,	2, 1, 4 ...	39	30	1,-8,-10,-12,19,	1,2,1,1,2,...
10	18	1, 3, -8,	1, 1, 5 ...	44	30	1,4,-8,-10,-12,	2,2,1,1,1,...
12	18	1, 3, -8,	1, 2, 4 ...	45	36	1,4,6,8,-15,-17,	1,1,1,1,1,2,...
14	30	1, -8, -10, -12, -14,	1, 3, 1, 1, 1 ...	48	36	1,3,-10,-12,-14,23,	1,1,1,1,1,2,...
15	24	1, 3, -8, -10,	1, 1, 4, 1 ...	49	30	1,4,-8,-10,-12,	1,2,1,2,1,...
16	24	1, 3, -8, -10,	1, 1, 3, 2 ...	51	30	1,-7,-10,-13,19,	1,1,1,1,3,...
17	24	1, 4, 6, -11,	1, 1, 1, 4 ...	58	36	1,-9,-12,-14,-16,23,	1,1,1,1,1,2,...
18	30	1, -8, -10, -12, -14,	1, 2, 1, 1, 2 ...	62	42	1,3,6,-12,-14,-16,-18,	1,1,1,1,1,1,1,...

ВИСНОВКИ

1. З наведеного вище аналізу даних в таблицях 2 та 3 й дослідження графіків, представлених на рисунках 1 ÷ 8, можемо констатувати: коли найкращі значення 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 в значній мірі залежатиме від співвідношення часу роботи електроприводу на кожній із швидкостей (для верстатів-гойдалок див. [10]), необхідних номінальних потужностей чи моментів та вимоги забезпечення максимальної економії енергетичних ресурсів;



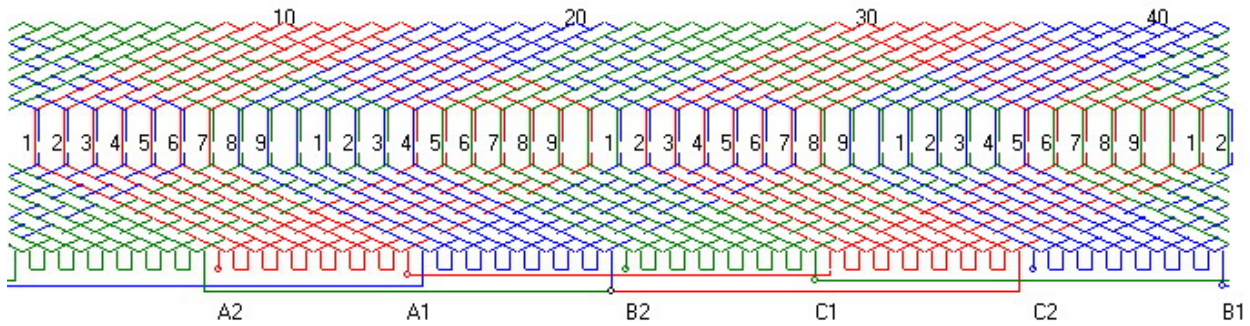


Рисунок 9 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – зірка, номер схеми $N_c = 1$

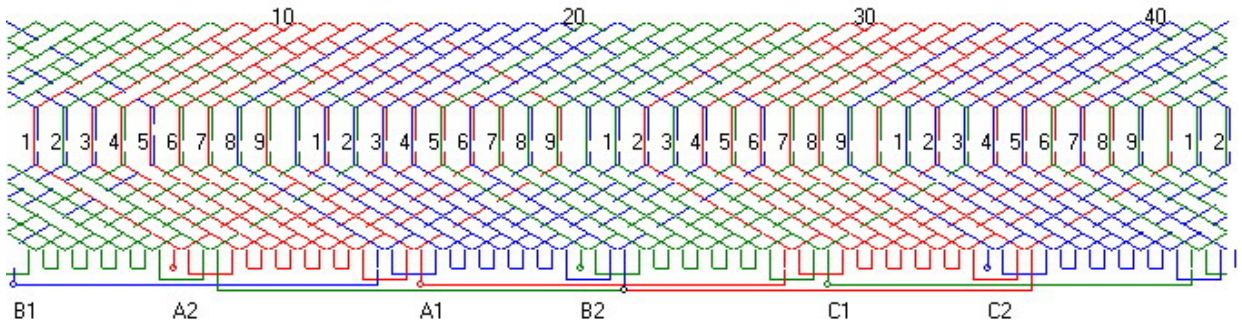


Рисунок 10 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – зірка, номер схеми $N_c = 2$

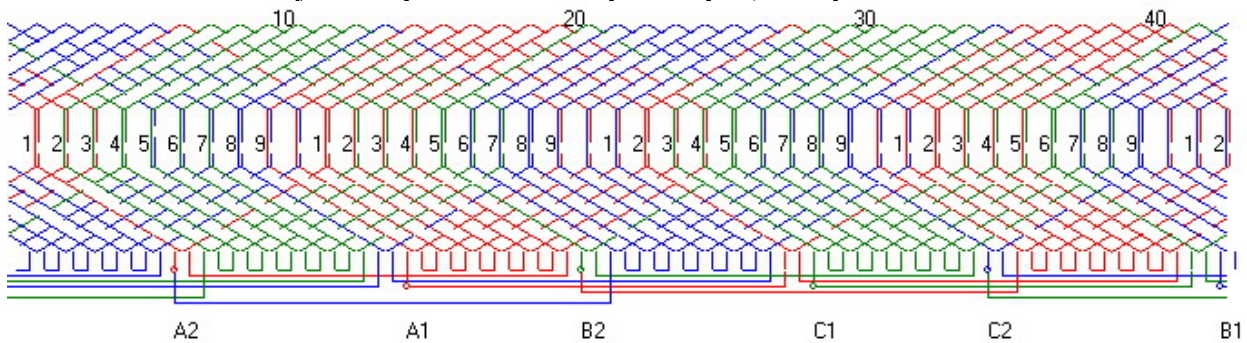


Рисунок 11 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 3$

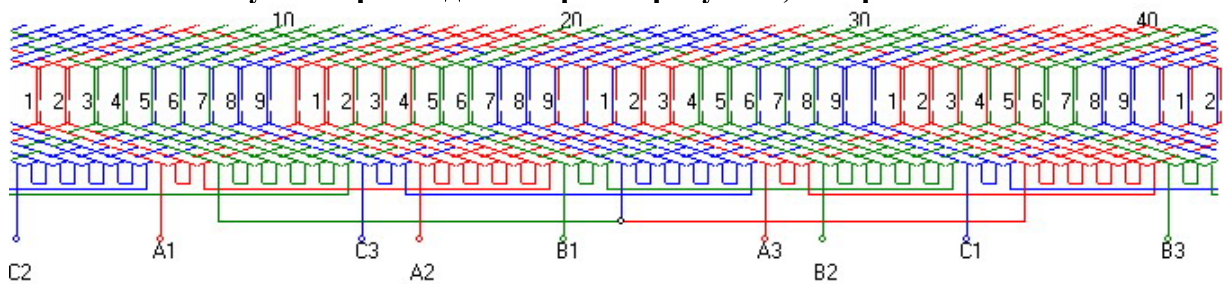


Рисунок 12 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: зірка – зірка, номер схеми $N_c = 4$

існують схеми з мінімальними у відносно-му 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 двохшарових 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

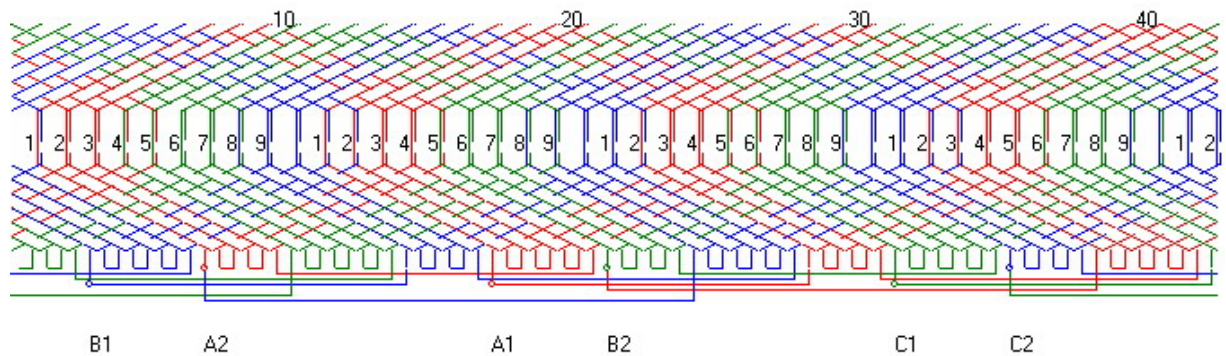


Рисунок 13 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 5$

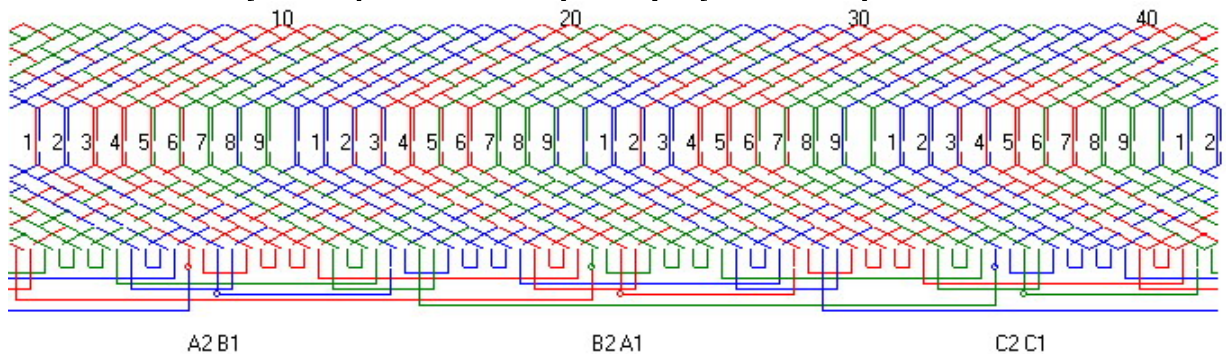


Рисунок 14 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 6$

створення оптимальних двошвидкісних електроощадних асинхронних двигунів для різних специфічних електроприводів з врахуванням їх особливостей, наприклад верстатів-гойдалок [10].

4. Надалі за допомогою математичного моделювання в процесі проектування та експериментальних досліджень електричних асинхронних двигунів необхідно виявити найефективніші схеми обмоток.

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: further 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 много-скоростных 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.

10 Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. – М: ОАО «Недра», 2000. – 487 с.