

КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.333.2.045

СХЕМИ СИМЕТРИЧНИХ ТРИФАЗНИХ ДВОШАРОВИХ ОБМОТОК З ПЕРЕМІКАННЯМ 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@nunge.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 ($\Delta/Y/Y$), № 2 ($Y/Y/\Delta$), № 3 ($Y/Y/Y$), № 4 ($Y/Y/Y$) 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 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 двошвидкісного двигуна для заданої кількості пар полюсів до потужності одношвидкісного двигуна), критерій оптимальності – максимум;
- обмотковий коефіцієнт K_{p2} , критерій оптимальності – максимум;
- коефіцієнт диференційного розсіювання τ_{d2} , критерій оптимальності – мінімум;
- коефіцієнт диференційного розсіювання 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 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 доміант, в противному 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 довідуємося, 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 шістдесят 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	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 ÷ 20), тобто розглянуто 1056 можливих варіантів побудови схем обмоток.

Наведемо 12 параметрів схем обмоток: *y*, *K_{p1}*, *τ_{d1}*, *τ_{dn1}*, *E_{p1}*, *K_{p2}*, *τ_{d2}*, *τ_{dn2}*, *E_{p2}*, *E_{pΣ}*, *τ_{dΣ}*, *τ_{dnΣ}*, які вважаємо критеріями для пошуку доміант. 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_v – номер порядку максимальної вищої шкідливої гармоніки;

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

C – схема сполучення фаз:

- C* = 1, сполучення Δ\YY,
- C* = 2, сполучення YY\Δ,
- C* = 3, сполучення Y\YY,
- C* = 4, сполучення YY\Y,
- C* = 5, сполучення Y\Y;

B_{p1}/B_{p2} – відношення індукцій у повітряному 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 полови-

ні фази. З'єднання половин фаз здійснюють на підставі значення параметра *C*.

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

В ранзі доміантних схема з номером *NC* = 1 зустрічається 16 разів. Скорочено запишемо це таким чином: *NC1*(16). Отже ряд доміантних 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 доміантних схем найкраща в 12 вимірному просторі критеріїв. Для аналізу властивостей схем, наведених в таблиці 2, на рисунках 1 ÷ 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 *τ_{dΣ}* від усередненого коефіцієнта ефективності використання схеми обмотки *E_{pΣ}*

Діаграма взаємної залежності амплітуд максимальних шкідливих гармонік для *p₁* та *p₂* 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 – *τ_{dΣ}* від усередненого коефіцієнта ефективності використання схеми обмотки – *E_{pΣ}* за умови, що пошук проведено тільки за двома (*E_{pΣ}* та *τ_{dΣ}*) параметрами. Знайдено лише сім доміантних 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 *τ_{dΣ}/E_{pΣ}* = 2,33, а № 94 – за критерієм мінімальної суми максимальних шкідливих гармонік (*F_{v1}*+*F_{v2}*=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 доміантних 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.

Таблиця 2 – Домінантні схеми обмоток (кількість пазів $z = 42$)

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}
1	2	20	0,932	0,24	0,24	0,118	1	0,00	5	1,82	0,113	76,12	76,12	0,118	1	0,00	4	35,81	0,118	76,36	76,36	4	0,121
2	1	20	0,953	0,38	0,38	0,130	1	0,00	5	3,82	0,124	46,22	46,22	0,130	1	0,00	4	50,00	0,130	46,60	46,60	4	0,130
3	2	19	0,924	0,26	0,26	0,233	1	0,00	5	1,45	0,223	22,23	22,23	0,233	1	0,00	4	34,60	0,233	22,49	22,49	4	0,241
4	1	19	0,945	0,30	0,30	0,256	1	0,00	5	3,03	0,245	33,52	33,52	0,256	1	0,00	4	48,32	0,256	33,82	33,82	4	0,259
5	2	18	0,911	0,25	0,25	0,344	1	0,00	13	1,23	0,328	15,79	15,79	0,344	1	0,00	4	32,62	0,344	16,04	16,04	4	0,360
6	1	18	0,932	0,24	0,24	0,377	1	0,00	5	1,82	0,360	25,70	25,70	0,377	1	0,00	4	45,56	0,377	25,94	25,94	4	0,386
7	2	17	0,893	0,24	0,24	0,446	1	0,00	11	1,13	0,448	12,72	12,72	0,446	1	0,00	4	29,92	0,446	12,96	12,96	4	0,477
8	14	5	0,326	0,80	0,80	0,271	1	0,00	19	3,90	0,426	17,82	17,82	0,469	1	0,00	4	35,41	0,370	18,62	18,62	2	0,794
9	1	17	0,913	0,22	0,22	0,490	1	0,00	7	1,12	0,468	19,90	19,90	0,490	1	0,00	4	41,78	0,490	20,12	20,12	4	0,512
10	18	5	0,319	1,62	1,62	0,286	1	0,00	5	7,52	0,473	9,85	9,85	0,496	1	0,00	4	24,99	0,391	11,48	11,48	2	0,858
11	23	5	0,297	3,91	3,91	0,294	1	0,00	5	12,94	0,487	3,91	3,91	0,510	1	0,00	4	10,67	0,402	7,82	7,82	2	0,945
12	21	5	0,273	9,06	9,06	0,286	1	0,00	5	23,35	0,497	3,54	3,54	0,496	1	0,00	4	12,42	0,391	12,60	12,60	2	1,050
13	58	5	0,271	5,84	5,84	0,283	1	0,00	5	17,51	0,500	3,56	3,56	0,491	1	0,00	4	8,31	0,387	9,40	9,40	2	1,067
14	25	5	0,312	2,94	2,94	0,303	1	0,00	5	11,40	0,502	5,37	5,37	0,525	1	0,00	4	15,68	0,414	8,31	8,31	2	0,930
15	25	16	0,794	0,34	0,34	0,525	1	0,00	7	2,23	0,502	5,37	5,37	0,525	1	0,00	4	15,68	0,525	5,71	5,71	4	0,632
16	44	5	0,275	2,47	2,47	0,288	1	0,00	7	7,42	0,508	7,65	7,65	0,499	1	0,00	4	21,71	0,393	10,12	10,12	2	1,067
17	2	16	0,870	0,24	0,24	0,539	1	0,00	17	1,34	0,514	9,94	9,94	0,539	1	0,00	4	26,54	0,539	10,18	10,18	4	0,591
18	2	5	0,341	0,81	0,81	0,311	1	0,00	5	5,10	0,514	9,94	9,94	0,539	1	0,00	4	26,54	0,425	10,74	10,74	2	0,870
19	7	5	0,326	2,13	2,13	0,316	1	0,00	5	10,26	0,523	14,62	14,62	0,547	1	0,00	4	35,25	0,432	16,75	16,75	2	0,925
20	51	5	0,265	7,08	7,08	0,277	1	0,00	5	23,61	0,529	2,84	2,84	0,554	1	0,00	14	10,02	0,415	9,93	9,93	5	0,998
21	17	5	0,305	2,96	2,96	0,320	1	0,00	5	14,03	0,531	4,47	4,47	0,554	1	0,00	4	12,62	0,437	7,43	7,43	2	1,004
22	17	16	0,778	0,44	0,44	0,556	1	0,00	17	2,57	0,531	4,47	4,47	0,556	1	0,00	4	12,62	0,556	4,91	4,91	4	0,682
23	24	5	0,281	7,18	7,18	0,280	1	0,00	5	22,17	0,536	2,56	2,56	0,561	1	0,00	20	6,15	0,421	9,74	9,74	5	0,952
24	62	5	0,267	2,86	2,86	0,280	1	0,00	13	7,76	0,537	4,15	4,15	0,560	1	0,00	4	13,01	0,420	7,01	7,01	5	1,005
25	49	5	0,246	6,57	6,57	0,244	1	0,00	5	15,11	0,537	2,95	2,95	0,563	1	0,00	14	8,70	0,403	9,52	9,52	1	0,944
26	5	17	0,675	0,45	0,45	0,564	1	0,00	7	4,00	0,538	1,46	1,46	0,564	1	0,00	4	6,24	0,564	1,91	1,91	4	0,798
27	31	7	0,426	0,55	0,55	0,446	1	0,00	11	3,56	0,539	9,89	9,89	0,446	1	0,00	4	17,79	0,446	10,44	10,44	4	1,267
28	18	6	0,378	1,10	1,10	0,329	1	0,00	5	5,18	0,544	6,90	6,90	0,570	1	0,00	4	21,25	0,449	8,00	8,00	2	0,830
29	39	5	0,278	8,24	8,24	0,288	1	0,00	5	24,04	0,550	4,54	4,54	0,576	1	0,00	4	15,53	0,432	12,78	12,78	5	0,988
30	9	5	0,319	3,50	3,50	0,333	1	0,00	5	15,96	0,551	9,45	9,45	0,577	1	0,00	4	26,92	0,455	12,95	12,95	2	0,997
31	26	5	0,296	5,78	5,78	0,290	1	0,00	5	20,45	0,554	6,36	6,36	0,580	1	0,00	4	20,80	0,435	12,15	12,15	5	0,935
32	1	16	0,890	0,26	0,26	0,591	1	0,00	7	1,99	0,565	15,34	15,34	0,591	1	0,00	4	37,07	0,591	15,60	15,60	4	0,635
33	1	5	0,349	1,60	1,60	0,341	1	0,00	5	10,70	0,565	15,34	15,34	0,591	1	0,00	4	37,07	0,466	16,94	16,94	2	0,933
34	58	6	0,321	3,67	3,67	0,337	1	0,00	5	12,07	0,575	2,57	2,57	0,583	1	0,00	4	7,07	0,460	6,23	6,23	2	1,032
35	25	6	0,370	1,59	1,59	0,349	1	0,00	5	7,85	0,577	3,77	3,77	0,604	1	0,00	4	13,34	0,476	5,36	5,36	2	0,900
36	37	5	0,273	11,80	11,80	0,286	1	0,00	5	30,25	0,579	2,95	2,95	0,571	1	0,00	4	11,81	0,428	14,75	14,75	5	1,062
37	10	5	0,313	5,27	5,27	0,328	1	0,00	5	19,77	0,580	7,39	7,39	0,568	1	0,00	4	24,01	0,448	12,66	12,66	2	1,070
38	45	6	0,343	2,77	2,77	0,352	1	0,00	5	11,24	0,582	2,78	2,78	0,610	1	0,00	4	9,99	0,481	5,55	5,55	2	0,981
39	12	5	0,289	9,35	9,35	0,302	1	0,00	5	27,10	0,583	3,59	3,59	0,605	1	0,00	4	13,28	0,453	12,94	12,94	5	1,009
40	44	6	0,327	1,86	1,86	0,342	1	0,00	17	6,14	0,584	6,76	6,76	0,592	1	0,00	4	18,46	0,467	8,62	8,62	2	1,033
41	2	15	0,842	0,24	0,24	0,619	1	0,00	5	1,35	0,591	6,98	6,98	0,619	1	0,00	4	22,58	0,619	7,22	7,22	4	0,702
42	2	6	0,405	0,65	0,65	0,357	1	0,00	5	3,51	0,591	6,98	6,98	0,619	1	0,00	4	22,58	0,488	7,63	7,63	2	0,842
43	7	6	0,387	1,16	1,16	0,363	1	0,00	5	7,07	0,601	11,54	11,54	0,629	1	0,00	4	29,98	0,496	12,70	12,70	2	0,896
44	3	5	0,307	5,67	5,67	0,318	1	0,00	5	20,97	0,607	8,51	8,51	0,635	1	0,00	4	27,08	0,477	14,18	14,18	5	0,987
45	15	5	0,282	8,24	8,24	0,275	1	0,00	5	26,19	0,607	3,99	3,99	0,636	1	0,00	4	15,56	0,456	12,23	12,23	1	0,931
46	51	6	0,315	5,00	5,00	0,318	1	0,00	5	16,26	0,608	2,05	2,05	0,637	1	0,00	10	8,31	0,477	7,05	7,05	5	0,966
47	17	6	0,362	2,20	2,20	0,369	1	0,00	5	9,67	0,610	3,13	3,13	0,639	1	0,00	4	10,73	0,504	5,33	5,33	2	0,971
48	17	15	0,753	0,45	0,45	0,639	1	0,00	5	3,71	0,610	3,13	3,13	0,639	1	0,00	4	10,73	0,639	3,58	3,58	4	0,810
49	14	8	0,503	0,61	0,61	0,526	1	0,00	7	3,52	0,613	5,41	5,41	0,526	1	0,00	4	17,65	0,526	6,02	6,02	4	1,220
50	24	6	0,334	3,95	3,95	0,350	1	0,00	5	15,27	0,616	2,09	2,09	0,606	1	0,00	10	6,65	0,478	6,04	6,04	2	1,064
51	62	6	0,318	2,26	2,26	0,323	1	0,00	17	6,53	0,617	3,15	3,15	0,647	1	0,00	4	11,06	0,485	5,41	5,41	5	0,972
52	49	6	0,293	3,55	3,55	0,307	1	0,00	5	10,41	0,618	3,05	3,05	0,613	1	0,00	10	12,92	0,460	6,59	6,59	5	1,055
53	16	5	0,266	12,16	12,16	0,278	1	0,00	5	30,56	0,621	1,89	1,89	0,642	1	0,00	4	8,22	0,460	14,05	14,05	1	1,013
54	39	6	0,331	3,79	3,79	0,331	1	0,00	5	16,56	0,632	3,90	3,90	0,662	1	0,00	4	13,21	0,497	7,68	7,68	5	0,956
55	9	6	0,379	1,73	1,73	0,383	1	0,00	5	10,99	0,634	7,53	7,53	0,663	1	0,00	4	22,89	0,523	9,26	9,26	2	0,965
56	4	5	0,276	12,62	12,62	0,288	1	0,00	5	31,81	0,636	3,67	3,67	0,666	1	0,00	4	16,50	0,477	16,29	16,29	1	0,999
57	26	6	0,352	2,80	2,80	0,368	1	0,00	5	14,09	0,636	4,97	4,97	0,638	1	0,00	4	17,69	0,503	7,77	7,77	2	

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}
63	2	7	0,467	0,32	0,32	0,396	1	0,00	5	1,95	0,655	5,82	5,82	0,686	1	0,00	4	18,10	0,541	6,14	6,14	2	0,809
64	37	6	0,324	5,18	5,18	0,339	1	0,00	5	20,84	0,666	2,45	2,45	0,678	1	0,00	4	10,05	0,509	7,63	7,63	5	1,028
65	10	6	0,372	2,41	2,41	0,389	1	0,00	5	13,62	0,667	5,73	5,73	0,674	1	0,00	4	20,42	0,532	8,14	8,14	2	1,036
66	12	6	0,343	4,05	4,05	0,351	1	0,00	5	18,67	0,670	3,35	3,35	0,701	1	0,00	4	11,30	0,526	7,40	7,40	5	0,977
67	17	7	0,418	0,78	0,78	0,408	1	0,00	5	5,37	0,676	3,67	3,67	0,707	1	0,00	4	8,61	0,558	4,45	4,45	2	0,934
68	24	7	0,385	1,49	1,49	0,403	1	0,00	5	8,48	0,682	3,15	3,15	0,698	1	0,00	8	9,31	0,550	4,64	4,64	2	1,023
69	62	7	0,366	0,88	0,88	0,358	1	0,00	19	3,26	0,684	3,20	3,20	0,716	1	0,00	4	8,87	0,537	4,08	4,08	5	0,935
70	25	8	0,480	0,80	0,80	0,415	1	0,00	13	4,21	0,687	2,35	2,35	0,719	1	0,00	4	7,82	0,567	3,14	3,14	2	0,825
71	45	8	0,445	0,94	0,94	0,419	1	0,00	7	3,97	0,693	2,44	2,44	0,726	1	0,00	14	7,65	0,573	3,38	3,38	2	0,900
72	3	6	0,365	3,09	3,09	0,365	1	0,00	5	14,45	0,698	6,44	6,44	0,730	1	0,00	4	23,04	0,548	9,53	9,53	5	0,955
73	15	6	0,335	4,46	4,46	0,351	1	0,00	5	18,04	0,698	2,97	2,97	0,702	1	0,00	4	13,24	0,527	7,43	7,43	5	1,041
74	9	7	0,437	0,89	0,89	0,424	1	0,00	5	6,10	0,702	5,81	5,81	0,735	1	0,00	4	18,36	0,580	6,70	6,70	2	0,927
75	2	13	0,772	0,29	0,29	0,737	1	0,00	5	2,33	0,704	3,20	3,20	0,737	1	0,00	4	13,23	0,737	3,49	3,49	4	0,912
76	2	8	0,526	0,38	0,38	0,426	1	0,00	13	2,18	0,704	3,20	3,20	0,737	1	0,00	4	13,23	0,581	3,58	3,58	2	0,772
77	26	7	0,405	1,27	1,27	0,424	1	0,00	5	7,82	0,705	4,20	4,20	0,735	1	0,00	4	14,19	0,580	5,47	5,47	2	1,005
78	6	12	0,714	0,32	0,32	0,747	1	0,00	5	1,98	0,713	4,25	4,25	0,747	1	0,00	4	13,78	0,747	4,57	4,57	4	0,999
79	16	6	0,315	6,03	6,03	0,324	1	0,00	5	21,06	0,714	1,57	1,57	0,748	1	0,00	4	6,99	0,536	7,60	7,60	1	0,980
80	1	14	0,828	0,44	0,44	0,753	1	0,00	5	4,09	0,719	8,27	8,27	0,753	1	0,00	4	25,28	0,753	8,70	8,70	4	0,868
81	1	7	0,478	0,44	0,44	0,435	1	0,00	5	4,09	0,719	8,27	8,27	0,753	1	0,00	4	25,28	0,594	8,70	8,70	2	0,868
82	17	8	0,471	0,69	0,69	0,439	1	0,00	7	3,76	0,726	2,46	2,46	0,760	1	0,00	8	6,87	0,600	3,15	3,15	2	0,891
83	6	10	0,621	0,44	0,44	0,651	1	0,00	11	3,13	0,730	1,45	1,45	0,651	1	0,00	4	4,63	0,651	1,89	1,89	4	1,175
84	6	11	0,670	0,38	0,38	0,701	1	0,00	13	2,51	0,730	1,45	1,45	0,701	1	0,00	4	4,63	0,701	1,83	1,83	4	1,090
85	4	6	0,327	5,97	5,97	0,331	1	0,00	5	21,91	0,731	3,02	3,02	0,765	1	0,00	4	14,03	0,548	8,99	8,99	1	0,967
86	24	8	0,434	1,22	1,22	0,443	1	0,00	7	7,06	0,733	2,37	2,37	0,767	1	0,00	8	9,97	0,605	3,59	3,59	2	0,976
87	62	8	0,412	1,58	1,58	0,432	1	0,00	19	5,39	0,735	1,75	1,75	0,748	1	0,00	4	6,48	0,590	3,33	3,33	2	1,030
88	2	12	0,731	0,33	0,33	0,765	1	0,00	5	2,43	0,737	2,32	2,32	0,765	1	0,00	4	8,06	0,765	2,64	2,64	4	1,009
89	37	7	0,373	2,16	2,16	0,386	1	0,00	5	11,56	0,737	2,32	2,32	0,772	1	0,00	4	8,06	0,579	4,47	4,47	5	0,988
90	2	9	0,583	0,31	0,31	0,610	1	0,00	17	1,80	0,737	2,32	2,32	0,610	1	0,00	4	8,06	0,610	2,62	2,62	4	1,266
91	10	7	0,428	1,08	1,08	0,446	1	0,00	5	7,56	0,738	4,35	4,35	0,773	1	0,00	4	16,38	0,610	5,43	5,43	2	0,995
92	12	7	0,395	1,91	1,91	0,388	1	0,00	5	10,36	0,742	2,82	2,82	0,777	1	0,00	4	9,06	0,583	4,73	4,73	5	0,939
93	5	6	0,306	8,18	8,18	0,321	1	0,00	5	26,83	0,747	1,33	1,33	0,741	1	0,00	10	5,10	0,531	9,51	9,51	1	1,056
94	2	10	0,636	0,31	0,31	0,666	1	0,00	19	1,74	0,754	1,73	1,73	0,666	1	0,00	14	4,69	0,666	2,04	2,04	4	1,187
95	2	11	0,685	0,33	0,33	0,717	1	0,00	5	2,20	0,754	1,73	1,73	0,717	1	0,00	14	4,69	0,717	2,06	2,06	4	1,101
96	9	8	0,492	0,92	0,92	0,456	1	0,00	7	7,18	0,754	3,38	3,38	0,790	1	0,00	4	13,41	0,623	4,30	4,30	2	0,885
97	26	8	0,456	1,26	1,26	0,458	1	0,00	7	7,74	0,758	2,44	2,44	0,794	1	0,00	4	10,37	0,626	3,70	3,70	2	0,958
98	17	9	0,521	0,75	0,75	0,460	1	0,00	7	3,92	0,761	1,70	1,70	0,796	1	0,00	8	5,14	0,628	2,45	2,45	2	0,843
99	7	10	0,607	0,74	0,74	0,636	1	0,00	7	5,04	0,767	1,75	1,75	0,636	1	0,00	10	6,85	0,636	2,50	2,50	4	1,262
100	1	13	0,790	0,47	0,47	0,809	1	0,00	5	4,90	0,773	4,95	4,95	0,809	1	0,00	4	18,47	0,809	5,43	5,43	4	0,978
101	1	8	0,538	0,36	0,36	0,467	1	0,00	7	3,28	0,773	4,95	4,95	0,809	1	0,00	4	18,47	0,638	5,31	5,31	2	0,829
102	3	7	0,421	1,10	1,10	0,441	1	0,00	5	8,02	0,773	4,95	4,95	0,763	1	0,00	4	18,47	0,602	6,05	6,05	2	1,060
103	15	7	0,386	1,67	1,67	0,405	1	0,00	5	10,01	0,773	2,64	2,64	0,809	1	0,00	4	10,62	0,607	4,30	4,30	5	1,000
104	9	9	0,545	0,96	0,96	0,478	1	0,00	7	7,49	0,790	1,93	1,93	0,827	1	0,00	4	8,17	0,652	2,89	2,89	2	0,837
105	16	7	0,364	2,22	2,22	0,359	1	0,00	5	11,69	0,791	1,69	1,69	0,828	1	0,00	4	5,61	0,593	3,91	3,91	1	0,942
106	37	8	0,420	1,73	1,73	0,415	1	0,00	7	8,41	0,793	1,28	1,28	0,830	1	0,00	4	5,89	0,622	3,01	3,01	5	0,943
107	10	13	0,708	1,16	1,16	0,741	1	0,00	5	9,05	0,794	2,49	2,49	0,741	1	0,00	4	11,97	0,741	3,65	3,65	4	1,122
108	10	8	0,483	0,92	0,92	0,480	1	0,00	7	6,34	0,794	2,49	2,49	0,831	1	0,00	4	11,97	0,656	3,41	3,41	2	0,950
109	12	8	0,445	1,67	1,67	0,466	1	0,00	7	10,51	0,797	1,57	1,57	0,807	1	0,00	4	6,62	0,637	3,24	3,24	2	1,034
110	1	12	0,747	0,48	0,48	0,783	1	0,00	5	5,10	0,809	2,52	2,52	0,783	1	0,00	4	11,25	0,783	2,99	2,99	4	1,083
111	1	9	0,596	0,38	0,38	0,489	1	0,00	7	3,42	0,809	2,52	2,52	0,847	1	0,00	4	11,25	0,668	2,89	2,89	2	0,784
112	4	7	0,377	2,27	2,27	0,367	1	0,00	5	12,16	0,809	2,52	2,52	0,847	1	0,00	4	11,25	0,607	4,79	4,79	1	0,929
113	1	10	0,650	0,42	0,42	0,500	1	0,00	5	3,39	0,828	1,25	1,25	0,867	1	0,00	10	4,09	0,684	1,67	1,67	2	0,735
114	1	11	0,701	0,45	0,45	0,734	1	0,00	5	4,61	0,828	1,25	1,25	0,734	1	0,00	10	4,09	0,734	1,71	1,71	4	1,181
115	5	7	0,353	3,27	3,27	0,370	1	0,00	5	14,89	0,828	1,25	1,25	0,854	1	0,00	10	4,09	0,612	4,52	4,52	1	1,015
116	3	13	0,695	1,32	1,32	0,728	1	0,00	5	9,60	0,831	3,35	3,35	0,728	1	0,00	4	13,50	0,728	4,67	4,67	4	1,194
117	3	8	0,474	0,63	0,63	0,496	1	0,00	7	3,73	0,831	3,35	3,35	0,860	1	0,00	4	13,50	0,678	3,98	3,98	2	1,011
118	15	13	0,639	1,90	1,90	0,503	1	0,00	5	11,98	0,831	1,79	1,79	0,870	1	0,00	4	7,76	0,686	3,68	3,68	2	0,751
119	15	8	0,435	1,17	1,17	0,435	1	0,00	7	7,03	0,831	1,79	1,79	0,870	1	0,00	4	7,76	0,653	2,96	2,96	5	0,955
120	10	12	0,670	1,21	1,21	0,701	1	0,00	5	9,42	0,831	1,77	1,77	0,7									

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,	1,1,1,1,3,...
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,...

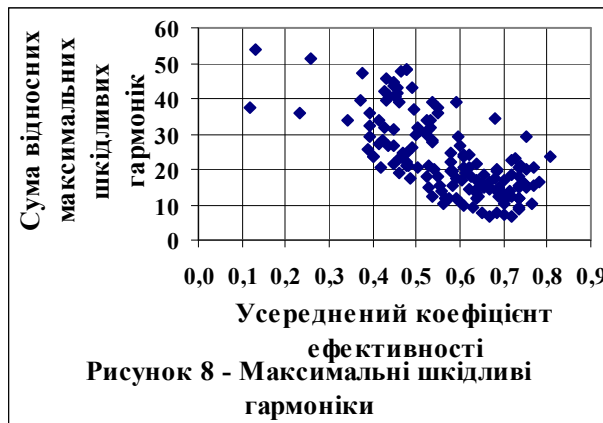
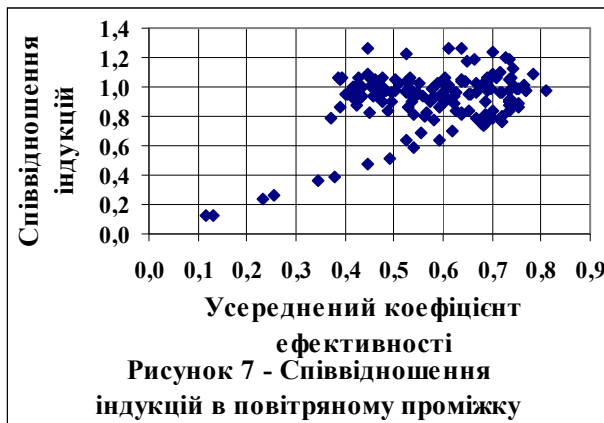
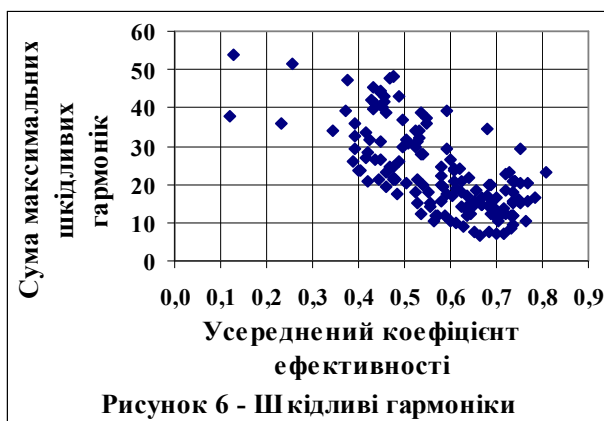
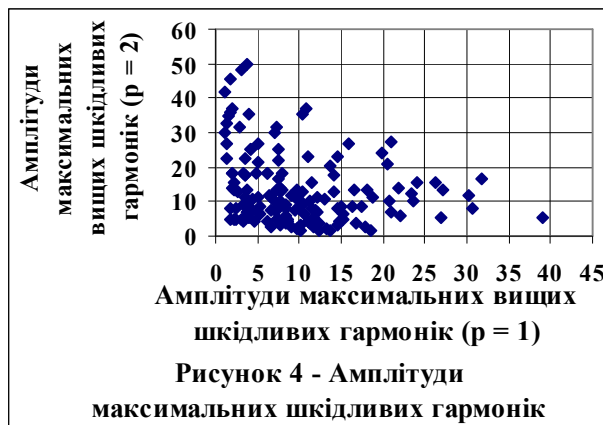
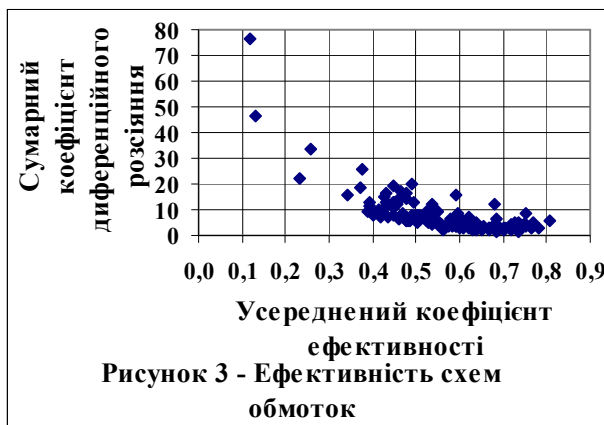
На підставі рисунку 7 можна уявити собі, який можливий діапазон співвідношень амплітуд магнітних індукцій можливий для вибору різних структур схем обмоток. Такий підхід раніше практично був неможливим для дослідників. Єдиною варіацією для вирішення цієї проблеми був крок вкорочення обмотки, що, практично, було серйозним обмеженням для пошуку оптимальних розв'язків. В нашому випадку проектування можливо здійснювати з врахуванням й оптимальних співвідношень магнітної індукції.

На рисунку 8 зображено залежність суми відносних максимальних гармонік як функцію $E_{p\Sigma}$.

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

ВИСНОВКИ

1. З наведеного вище аналізу даних в таблицях 2 та 3 й дослідження графіків, представлених на рисунках 1 ÷ 8, можемо констатувати:



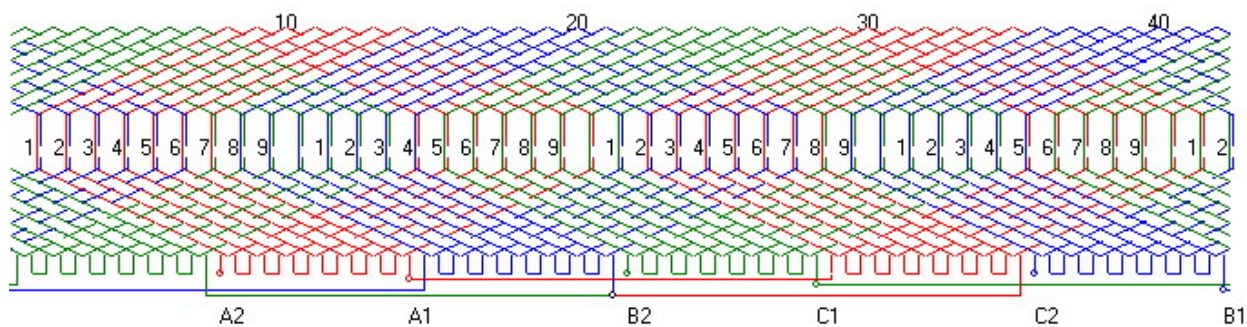


Рисунок 9 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – зірка, номер схеми $N_c = 1$

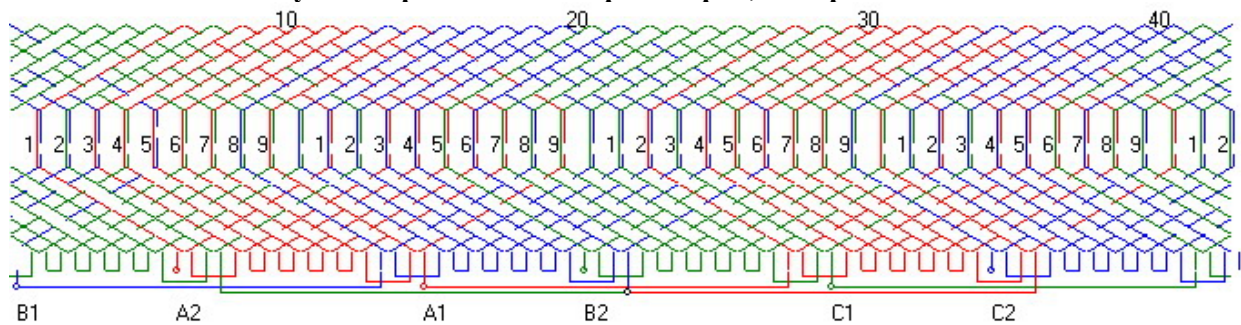


Рисунок 10 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – зірка, номер схеми $N_c = 2$

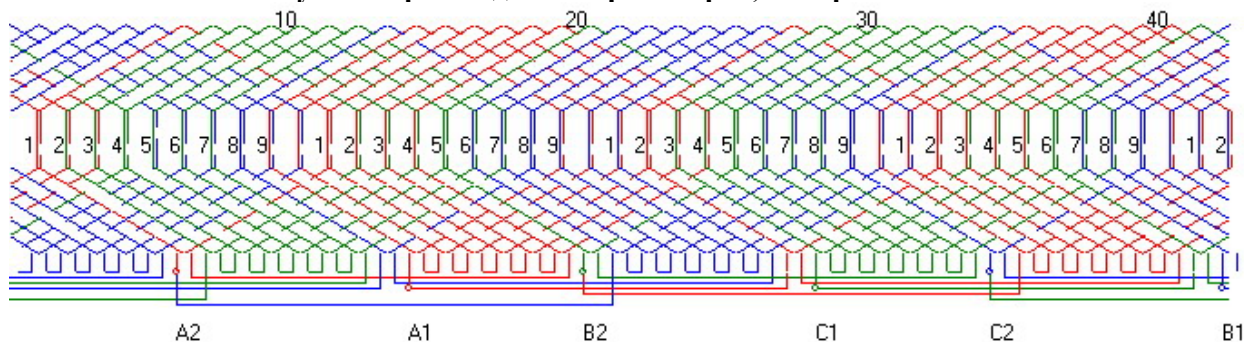


Рисунок 11 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 3$

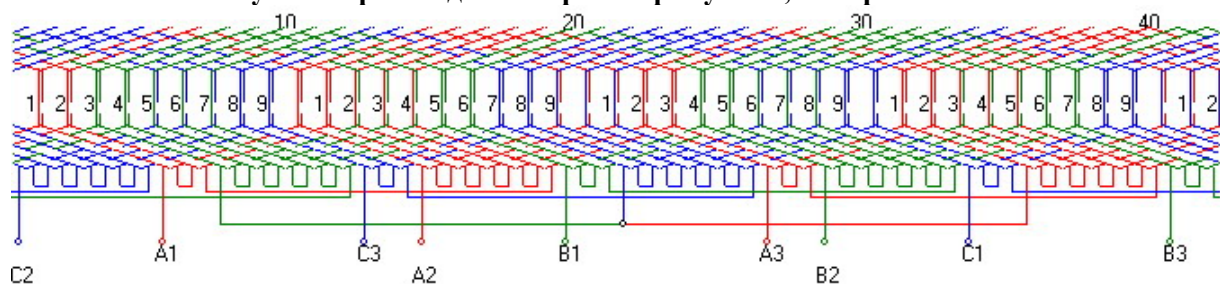


Рисунок 12 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: зірка – зірка, номер схеми $N_c = 4$

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 електродвигуна на кожній із швидкостей (для верстатів-гойдалок див. [10]), 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.

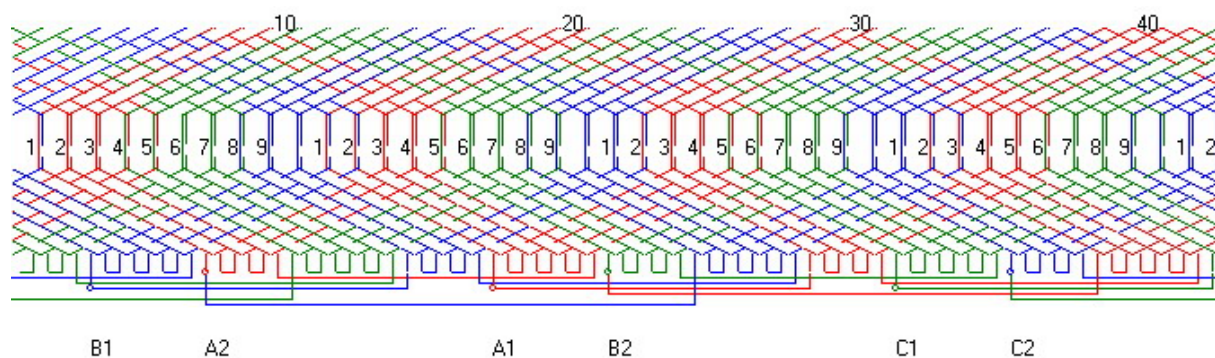


Рисунок 13 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 5$

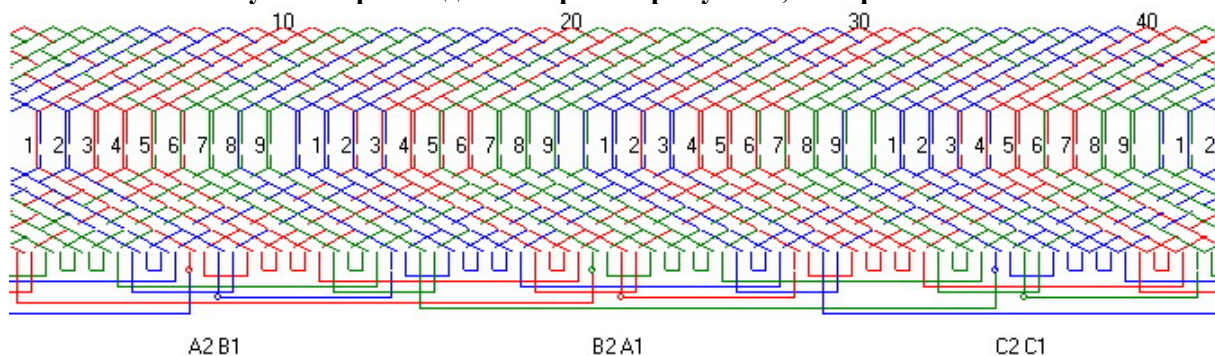


Рисунок 14 – Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз: подвійна зірка – трикутник, номер схеми $N_c = 6$

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 оптимальних двошвидкісних електрошадних 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: 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.

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