

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 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 двошарового двигуна для заданої кількості пар полюсів до потужності одношарового двигуна), критерій оптимальності - максимум;
- ✓ обмотковий коефіцієнт K_{p2} , критерій оптимальності - максимум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіяння τ_{d2} , критерій оптимальності - мінімум;
- ✓ коефіцієнт диференційного розсіяння 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 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 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-

теріїв подано в табл. 2, в якій затінені чорним кольором в кожному стовпчику клітинки з екстремальними (мінімуму або максимуму в залежності від критерію) значеннями критеріїв. Окрім того в табл. 2 наведено:

NC — номер структури;

N_H — номер порядку максимальної нижчої шкідливої гармоніки;

F_H — 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 $\Delta \backslash Y Y$,

$C = 2$, 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 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 2988 варі-

антах схем одержано 266 доміантних схем, а серед них є тільки сімдесят різних структур схем (з 166 досліджуваних): $1 \div 7, 9 \div 12, 14, 16 \div 22, 24, 29 \div 32, 34, 37, 40, 41, 46, 48, 49, 51 \div 53, 55, 61, 66 \div 68, 70, 74 \div 76, 79, 80, 82 \div 84, 88, 91 \div 94, 99, 108, 117, 119, 120, 124, 126, 129, 135, 136, 141, 144, 156, 157, 159, 161, 162$.

На підставі аналізу параметрів цих схем з'ясовано, що схеми з кроками вкорочення обмотки $y = 6, 7, 8$ та $21, 22, 23$ мають низькі значення коефіцієнтів $E_{p\Sigma}$ та високі значення $\tau_{d\Sigma}$. Тому було здійснено повторний вибір доміантних схем зі зміною кроку вкорочення обмотки y в діапазоні $9 \div 20$ та обмеження: $E_{p\Sigma} \geq 0,5$ та $\tau_{d\Sigma} \leq 4,56$. Розглянуто 1992 можливі варіанти побудови схем обмоток, з них 112 є доміантними (табл. 2), а серед доміантних тільки 41 структур (з 166 досліджуваних). В ранзі доміантних схема з номером $NC = 1$ зустрічається 5 разів. Скорочено запишемо це таким чином: $NC1(5)$. Отже ряд доміантних схем матиме вигляд: $NC1(5), NC2(7), NC3(6), NC4(7), NC5(6), NC6(9), NC7(2), NC9(1), NC10(1), NC11(3), NC12(7), NC14(1), NC16(2), NC17(1), NC18(3), NC19(5), NC20(4), NC21(5), NC22(1), NC24(3), NC29(2), NC30(1), NC31(1), NC32(2), NC40(3), NC41(2), NC46(1), NC48(2), NC49(1), NC51(2), NC61(2), NC74(1), NC80(2), NC92(1), NC93(1), NC99(2), NC135(1), NC136(1), NC141(1), NC156(2), NC161(2)$.

Таблиця 2

Доміантні схеми обмоток (кількість пазів $z = 48$)

Загальні показники			Кількість пар полюсів $p_1 = 1$								Кількість пар полюсів $p_2 = 2$								Загальні показники				
№	NC	Y	K_{p1}	τ_{d1}	τ_{d11}	E_{p1}	N_H	F_H	N_B	F_B	K_{p2}	τ_{d2}	τ_{d22}	E_{p2}	N_H	F_H	N_B	F_B	$E_{p\Sigma}$	$\tau_{d\Sigma}$	$\tau_{d\Sigma2}$	C	B_{p1}/B_{p2}
7	6	20	0,676	0,38	0,38	0,501	1	0,00	5	4,07	0,479	0,89	0,89	0,501	1	0,00	10	4,29	0,501	1,27	1,27	4	0,709
10	51	18	0,781	0,27	0,27	0,530	1	0,00	5	1,89	0,506	2,93	2,93	0,530	1	0,00	4	9,04	0,530	3,20	3,20	4	0,648
12	48	18	0,760	0,40	0,40	0,572	1	0,00	7	3,81	0,546	3,32	3,32	0,572	1	0,00	4	11,44	0,572	3,71	3,71	4	0,719
14	21	19	0,678	0,44	0,44	0,590	1	0,00	7	3,83	0,563	1,31	1,31	0,590	1	0,00	4	5,55	0,590	1,75	1,75	4	0,831
16	51	17	0,758	0,44	0,44	0,594	1	0,00	5	3,35	0,568	3,04	3,04	0,594	1	0,00	16	8,26	0,594	3,48	3,48	4	0,748
17	32	18	0,723	0,59	0,59	0,601	1	0,00	7	4,50	0,574	2,10	2,10	0,601	1	0,00	4	5,64	0,601	2,68	2,68	4	0,793
19	6	19	0,662	0,55	0,55	0,610	1	0,00	7	5,49	0,583	0,83	0,83	0,610	1	0,00	14	3,83	0,610	1,38	1,38	4	0,880
20	46	12	0,575	0,65	0,65	0,602	1	0,00	11	4,50	0,583	0,83	0,83	0,602	1	0,00	14	3,83	0,602	1,48	1,48	4	1,013
27	18	10	0,552	0,32	0,32	0,578	1	0,00	7	2,67	0,655	3,39	3,39	0,578	1	0,00	4	13,72	0,578	3,71	3,71	4	1,186
28	18	14	0,719	0,24	0,24	0,686	1	0,00	19	1,49	0,655	3,39	3,39	0,686	1	0,00	4	13,72	0,686	3,63	3,63	4	0,910
31	18	13	0,682	0,22	0,22	0,704	1	0,00	23	1,29	0,672	2,40	2,40	0,704	1	0,00	4	6,92	0,704	2,62	2,62	4	0,986
32	9	12	0,630	0,48	0,48	0,659	1	0,00	7	3,44	0,677	0,89	0,89	0,659	1	0,00	10	4,29	0,659	1,37	1,37	4	1,075
33	6	18	0,646	1,27	1,27	0,677	1	0,00	7	7,88	0,677	0,89	0,89	0,677	1	0,00	10	4,29	0,677	2,16	2,16	4	1,048
34	29	9	0,487	0,60	0,60	0,410	1	0,00	7	3,70	0,678	2,89	2,89	0,710	1	0,00	4	12,25	0,560	3,49	3,49	2	0,805
37	31	9	0,463	0,52	0,52	0,418	1	0,00	13	2,99	0,691	3,29	3,29	0,723	1	0,00	8	11,97	0,570	3,80	3,80	2	0,862
38	135	10	0,485	0,50	0,50	0,418	1	0,00	23	2,91	0,691	1,80	1,80	0,724	1	0,00	4	7,93	0,571	2,29	2,29	2	0,823
39	161	15	0,552	0,53	0,53	0,428	1	0,00	7	4,08	0,708	0,84	0,84	0,741	1	0,00	22	2,89	0,585	1,37	1,37	2	0,741
40	40	9	0,479	0,63	0,63	0,428	1	0,00	7	3,83	0,708	2,05	2,05	0,742	1	0,00	4	9,40	0,585	2,68	2,68	2	0,854
41	29	10	0,533	0,55	0,55	0,429	1	0,00	7	4,02	0,709	2,22	2,22	0,743	1	0,00	4	8,29	0,586	2,77	2,77	2	0,768
44	92	11	0,546	0,70	0,70	0,429	1	0,00	7	4,43	0,710	1,14	1,14	0,743	1	0,00	4	3,95	0,586	1,84	1,84	2	0,751
45	48	9	0,457	1,10	1,10	0,432	1	0,00	7	5,70	0,714	1,71	1,71	0,748	1	0,00	4	6,19	0,590	2,81	2,81	2	0,902
46	2	15	0,781	0,26	0,26	0,748	1	0,00	5	2,87	0,714	3,35	3,35	0,748	1	0,00	4	15,16	0,748	3,61	3,61	4	0,914
47	2	9	0,522	0,29	0,29	0,432	1	0,00	19	1,69	0,714	3,35	3,35	0,748	1	0,00	4	15,16	0,590	3,64	3,64	2	0,790
49	80	9	0,443	0,82	0,82	0,435	1	0,00	7	4,87	0,720	1,72	1,72	0,754	1	0,00	4	5,51	0,594	2,54	2,54	2	0,937
50	7	13	0,694	0,28	0,28	0,727	1	0,00	13	2,24	0,728	1,88	1,88	0,727	1	0,00	4	8,29	0,727	2,16	2,16	4	1,049
52	156	11	0,506	0,67	0,67	0,444	1	0,00	19	4,20	0,734	1,01	1,01	0,768	1	0,00	4	4,26	0,606	1,68	1,68	2	0,837
53	156	13	0,577	0,55	0,55	0,444	1	0,00	13	4,00	0,734	1,01	1,01	0,768	1	0,00	4	4,26	0,606	1,56	1,56	2	0,734
54	7	12	0,653	0,30	0,30	0,683	1	0,00	11	1,84	0,734	0,94	0,94	0,683	1	0,00	14	3,83	0,683	1,24	1,24	4	1,125
55	24	9	0,472	0,53	0,53	0,446	1	0,00	7	3,47	0,738	2,24	2,24	0,773	1	0,00	4	9,02	0,609	2,77	2,77	2	0,903
56	40	10	0,525	0,54	0,54	0,448	1	0,00	7	4,17	0,740	1,95	1,95	0,775	1	0,00	4	6,36	0,612	2,49	2,49	2	0,815
57	99	9	0,417	0,81	0,81	0,437	1	0,00	5	3,16	0,744	2,11	2,11	0,757	1	0,00	8	7,27	0,597	2,92	2,92	2	1,029
58	2	14	0,745	0,29	0,29	0,780	1	0,00	5	3,04	0,747	2,24	2,24	0,780	1	0,00	4	10,25	0,780	2,52	2,52	4	1,002

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}		
59	2	10	0,572	0,23	0,23	0,451	1	0,00	17	1,58	0,747	2,24	2,24	0,782	1	0,00	4	10,25	0,616	2,47	2,47	2	0,754		
60	32	9	0,435	1,02	1,02	0,453	1	0,00	7	6,74	0,750	1,71	1,71	0,785	1	0,00	8	7,22	0,619	2,73	2,73	2	0,995		
61	80	10	0,486	0,77	0,77	0,455	1	0,00	7	5,29	0,752	1,38	1,38	0,788	1	0,00	16	4,76	0,621	2,14	2,14	2	0,894		
62	161	13	0,499	0,60	0,60	0,459	1	0,00	17	3,61	0,760	0,92	0,92	0,796	1	0,00	10	5,36	0,627	1,52	1,52	2	0,879		
63	136	12	0,544	0,60	0,60	0,459	1	0,00	7	3,09	0,760	0,92	0,92	0,796	1	0,00	10	5,36	0,627	1,52	1,52	2	0,806		
64	11	9	0,488	0,76	0,76	0,459	1	0,00	7	6,40	0,760	3,13	3,13	0,796	1	0,00	4	13,93	0,627	3,90	3,90	2	0,899		
65	40	11	0,568	0,62	0,62	0,459	1	0,00	7	3,68	0,760	1,22	1,22	0,796	1	0,00	20	3,80	0,628	1,84	1,84	2	0,772		
66	10	10	0,543	0,73	0,73	0,461	1	0,00	7	6,65	0,763	2,62	2,62	0,799	1	0,00	4	11,19	0,630	3,35	3,35	2	0,811		
69	2	13	0,706	0,29	0,29	0,739	1	0,00	5	2,90	0,766	1,42	1,42	0,739	1	0,00	4	5,17	0,739	1,71	1,71	4	1,085		
70	2	11	0,619	0,24	0,24	0,648	1	0,00	5	1,63	0,766	1,42	1,42	0,648	1	0,00	4	5,17	0,648	1,66	1,66	4	1,237		
71	93	12	0,574	0,85	0,85	0,463	1	0,00	5	6,01	0,767	1,32	1,32	0,803	1	0,00	22	5,27	0,633	2,17	2,17	2	0,771		
72	41	9	0,452	1,11	1,11	0,465	1	0,00	7	7,61	0,770	1,98	1,98	0,806	1	0,00	4	9,95	0,636	3,09	3,09	2	0,983		
73	30	12	0,596	0,85	0,85	0,465	1	0,00	5	5,91	0,770	1,16	1,16	0,806	1	0,00	10	6,21	0,636	2,01	2,01	2	0,745		
74	24	10	0,517	0,56	0,56	0,466	1	0,00	7	3,78	0,772	1,45	1,45	0,808	1	0,00	4	6,10	0,637	2,01	2,01	2	0,862		
75	2	12	0,664	0,27	0,27	0,695	1	0,00	5	2,43	0,773	1,12	1,12	0,695	1	0,00	14	3,83	0,695	1,39	1,39	4	1,164		
76	14	10	0,504	1,43	1,43	0,468	1	0,00	7	10,25	0,774	1,77	1,77	0,811	1	0,00	4	7,80	0,640	3,20	3,20	2	0,887		
77	99	10	0,457	0,86	0,86	0,470	1	0,00	17	4,99	0,778	1,20	1,20	0,815	1	0,00	8	6,02	0,643	2,05	2,05	2	0,982		
78	12	15	0,720	1,00	1,00	0,754	1	0,00	5	8,49	0,790	2,71	2,71	0,754	1	0,00	4	13,40	0,754	3,71	3,71	4	1,097		
79	12	9	0,481	0,73	0,73	0,477	1	0,00	7	5,35	0,790	2,71	2,71	0,827	1	0,00	4	13,40	0,652	3,43	3,43	2	0,948		
80	11	10	0,535	0,78	0,78	0,480	1	0,00	7	6,96	0,794	1,82	1,82	0,832	1	0,00	4	9,42	0,656	2,60	2,60	2	0,858		
81	61	9	0,426	1,27	1,27	0,417	1	0,00	7	6,17	0,796	1,31	1,31	0,834	1	0,00	4	7,85	0,625	2,58	2,58	5	0,934		
82	24	12	0,601	0,66	0,66	0,483	1	0,00	5	5,48	0,799	1,36	1,36	0,836	1	0,00	14	5,64	0,660	2,03	2,03	2	0,768		
83	16	9	0,444	1,38	1,38	0,465	1	0,00	7	9,08	0,800	1,48	1,48	0,805	1	0,00	4	7,82	0,635	2,85	2,85	2	1,040		
84	1	14	0,758	0,43	0,43	0,794	1	0,00	5	5,09	0,801	2,79	2,79	0,794	1	0,00	4	13,05	0,794	3,22	3,22	4	1,057		
85	1	10	0,582	0,31	0,31	0,484	1	0,00	7	3,44	0,801	2,79	2,79	0,839	1	0,00	4	13,05	0,662	3,11	3,11	2	0,795		
86	49	12	0,587	0,86	0,86	0,484	1	0,00	5	6,11	0,801	0,75	0,75	0,839	1	0,00	10	2,22	0,662	1,61	1,61	2	0,789		
87	41	10	0,495	1,01	1,01	0,486	1	0,00	7	8,28	0,805	1,57	1,57	0,843	1	0,00	4	6,73	0,664	2,58	2,58	2	0,938		
88	3	9	0,475	0,50	0,50	0,494	1	0,00	7	3,16	0,817	3,54	3,54	0,856	1	0,00	4	14,77	0,675	4,04	4,04	2	0,994		
89	1	11	0,630	0,35	0,35	0,497	1	0,00	7	3,03	0,822	1,37	1,37	0,861	1	0,00	4	6,58	0,679	1,72	1,72	2	0,753		
90	1	13	0,718	0,41	0,41	0,752	1	0,00	5	4,85	0,822	1,37	1,37	0,752	1	0,00	4	6,58	0,752	1,78	1,78	4	1,144		
91	11	12	0,621	0,80	0,80	0,497	1	0,00	5	6,23	0,822	1,33	1,33	0,861	1	0,00	10	6,63	0,679	2,13	2,13	2	0,765		
92	19	9	0,437	0,98	0,98	0,432	1	0,00	7	6,49	0,826	1,83	1,83	0,864	1	0,00	4	9,27	0,648	2,81	2,81	5	0,945		
93	12	14	0,687	1,06	1,06	0,719	1	0,00	5	8,99	0,826	1,81	1,81	0,719	1	0,00	4	9,06	0,719	2,88	2,88	4	1,202		
94	12	10	0,527	0,67	0,67	0,499	1	0,00	7	5,82	0,826	1,81	1,81	0,864	1	0,00	4	9,06	0,682	2,49	2,49	2	0,905		
95	1	12	0,676	0,38	0,38	0,708	1	0,00	5	4,07	0,829	0,89	0,89	0,708	1	0,00	10	4,29	0,708	1,27	1,27	4	1,227		
96	17	10	0,465	1,97	1,97	0,486	1	0,00	7	12,61	0,832	1,06	1,06	0,843	1	0,00	4	3,75	0,665	3,03	3,03	2	1,035		
97	16	10	0,486	1,41	1,41	0,505	1	0,00	7	9,88	0,836	1,11	1,11	0,876	1	0,00	4	5,29	0,690	2,52	2,52	2	0,993		
98	20	9	0,408	1,36	1,36	0,427	1	0,00	7	7,70	0,847	1,13	1,13	0,854	1	0,00	4	5,22	0,641	2,50	2,50	5	1,039		
99	12	13	0,651	1,02	1,02	0,512	1	0,00	5	8,59	0,847	1,11	1,11	0,887	1	0,00	4	4,57	0,700	2,14	2,14	2	0,752		
100	12	11	0,571	0,78	0,78	0,512	1	0,00	7	5,14	0,847	1,11	1,11	0,887	1	0,00	4	4,57	0,700	1,89	1,89	2	0,857		
101	3	14	0,678	1,13	1,13	0,710	1	0,00	5	9,30	0,855	2,05	2,05	0,710	1	0,00	4	9,99	0,710	3,18	3,18	4	1,261		
102	3	10	0,520	0,52	0,52	0,517	1	0,00	7	3,44	0,855	2,05	2,05	0,895	1	0,00	4	9,99	0,706	2,58	2,58	2	0,949		
103	21	9	0,398	1,54	1,54	0,387	1	0,00	7	8,23	0,855	0,88	0,88	0,895	1	0,00	8	3,66	0,641	2,42	2,42	1	0,930		
104	4	15	0,643	2,20	2,20	0,517	1	0,00	5	13,14	0,855	2,05	2,05	0,895	1	0,00	4	9,99	0,706	4,26	4,26	2	0,768		
105	74	10	0,414	1,21	1,21	0,434	1	0,00	7	7,93	0,855	0,88	0,88	0,867	1	0,00	16	3,17	0,650	2,09	2,09	5	1,032		
106	61	11	0,506	1,16	1,16	0,517	1	0,00	5	7,32	0,855	0,88	0,88	0,895	1	0,00	16	3,17	0,706	2,04	2,04	2	0,975		
107	4	9	0,429	1,10	1,10	0,447	1	0,00	7	6,89	0,855	2,05	2,05	0,895	1	0,00	4	9,99	0,671	3,15	3,15	5	0,995		
108	12	12	0,612	0,92	0,92	0,517	1	0,00	5	7,20	0,855	0,86	0,86	0,895	1	0,00	10	3,32	0,706	1,77	1,77	2	0,806		
109	19	10	0,479	0,93	0,93	0,501	1	0,00	7	7,06	0,863	1,21	1,21	0,868	1	0,00	4	6,27	0,685	2,13	2,13	2	1,041		
110	3	11	0,563	0,70	0,70	0,530	1	0,00	5	4,99	0,877	1,04	1,04	0,919	1	0,00	4	5,04	0,724	1,75	1,75	2	0,899		
111	5	9	0,399	1,78	1,78	0,398	1	0,00	7	10,39	0,877	1,04	1,04	0,919	1	0,00	4	5,04	0,658	2,82	2,82	1	0,951		
112	3	13	0,642	1,06	1,06	0,530	1	0,00	5	8,88	0,877	1,04	1,04	0,919	1	0,00	4	5,04	0,724	2,10	2,10	2	0,788		
113	3	12	0,604	0,91	0,91	0,535	1	0,00	5	7,44	0,885	0,69	0,69	0,926	1	0,00	14	2,35	0,731	1,59	1,59	2	0,845		
114	6	9	0,389	2,09	2,09	0,401	1	0,00	7	11,80	0,885	0,69	0,69	0,926	1	0,00	14	2,35	0,664	2,78	2,78	1	0,986		
115	6	15	0,582	3,82	3,82	0,535	1	0,00	5	17,91	0,885	0,69	0,69	0,926	1	0,00	14	2,35	0,731	4,51	4,51	2	0,878		
116	20	10	0,447	1,31	1,31	0,464	1	0,00	7	8,38	0,886	0,98	0,98	0,928	1	0,00	4	3,53	0,696	2,29	2,29	5	0,991		
117	19	13	0,591	1,70	1,70	0,536	1	0,00	5	11,60	0,886	0,97	0,97	0,928	1	0,00	4	3,16	0,732	2,68	2,68	2	0,865		
118	19	11	0,519	1,17	1,17	0,536	1	0,00	5	6,53	0,886	0,97	0,97	0,928	1	0,00	4	3,							

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.

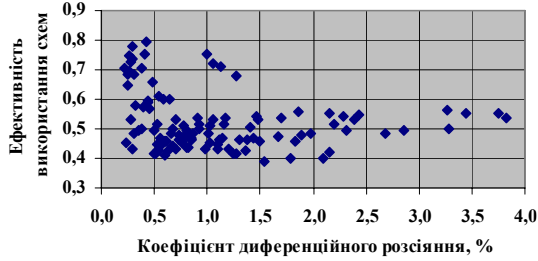


Рис. 1. Якість схем ($p = 1$)

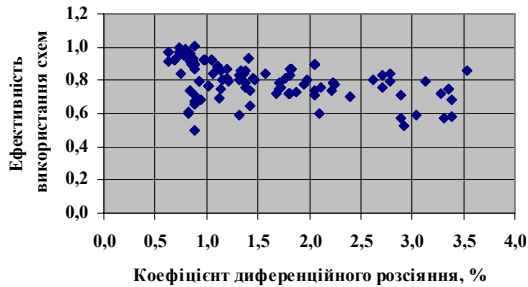


Рис. 2. Якість схем ($p = 2$)

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.

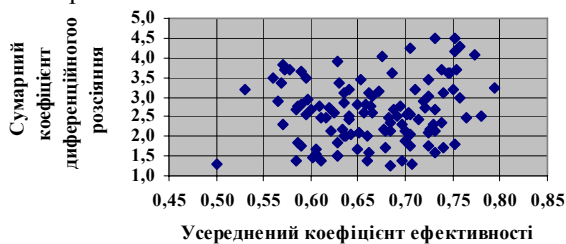


Рис. 3. Ефективність схем обмоток

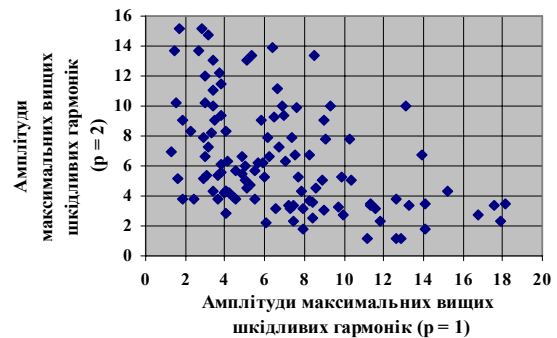


Рис. 4. Амплітуди максимальних шкідливих гармонік

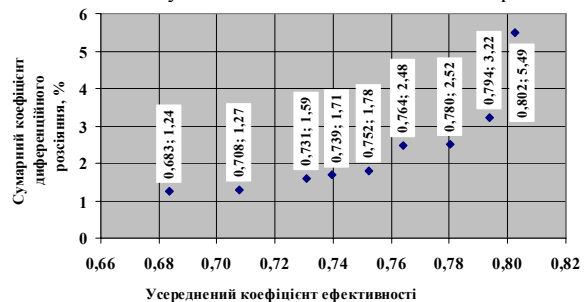


Рис. 5. Доміантні схеми обмоток за двома критеріями

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.

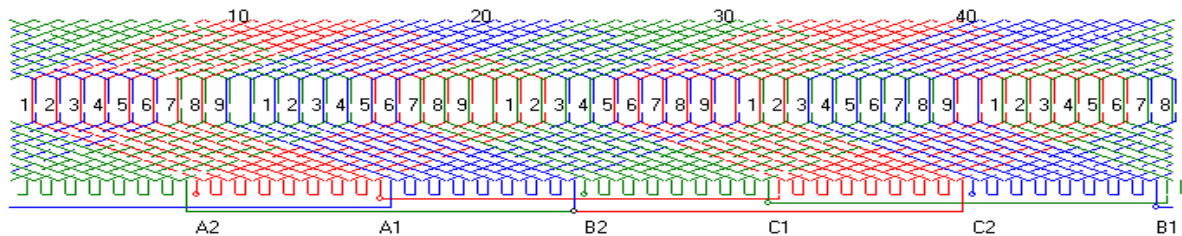
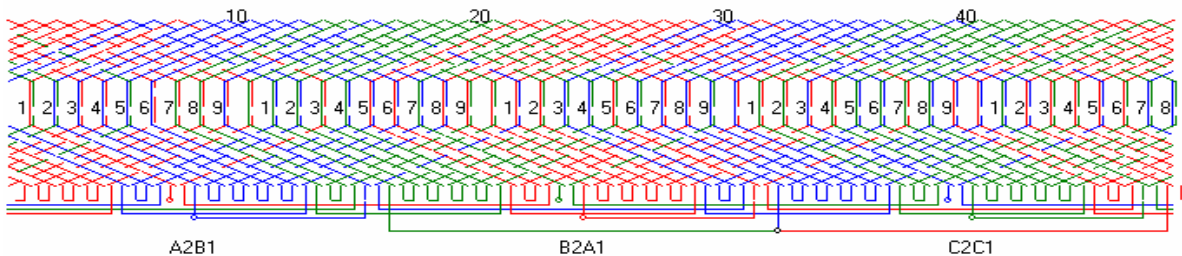
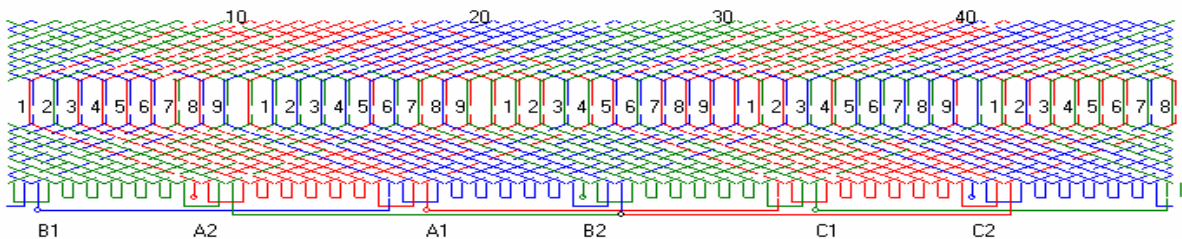
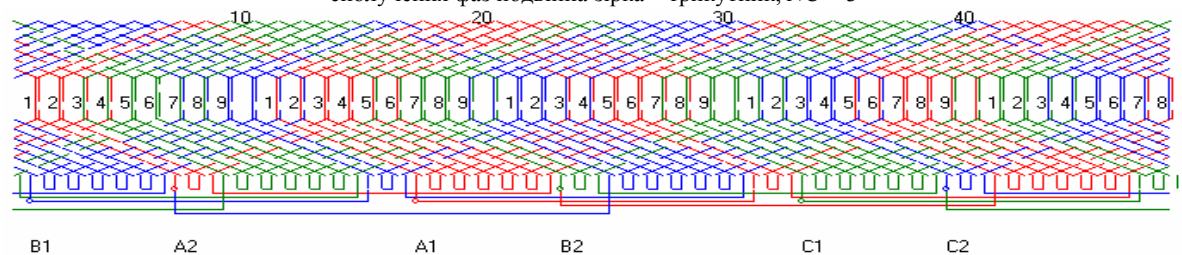
Схема з порядковим номером 95 екстремальна теж за додатковим критерієм $\tau_{d\Sigma}/E_{p\Sigma} = 1.8$, а схема № 54 — за додатковим критерієм мінімальної суми максимальних шкідливих гармонік для обох кількостей пар полюсів ($F_{B1} + F_{B2} = 1.84 + 3.83 = 5.67$). Максимальна гармоніка для обох швидкостей 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, $NC = 4$

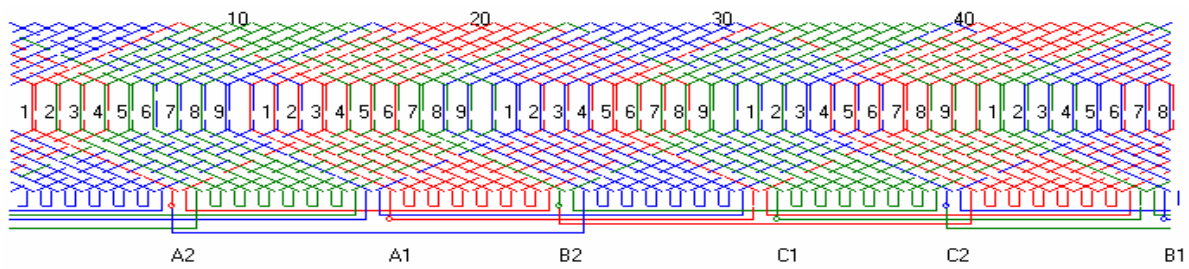


Рис. 10. Схема обмотки з перемиканням кількості пар полюсів у співвідношенні 1:2, сполучення фаз подвійна зірка – зірка, $NC = 7$

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 розсіювання 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