

СИНТЕЗ ТА СИМЕТРУВАННЯ ПОЛЮСОПЕРЕМИКАЛЬНИХ ОБМОТОК ЗІ СХЕМОЮ УУУ/УУУ ТАБЛИЧНО-ВЕКТОРНИМ СПОСОБОМ

Л. Я. Белікова, В.П. Чайковський

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Використовуючи таблично-векторний спосіб, спроектовані схеми двошвидкісних полюсоперемикальних обмотки (ППО) зі співвідношенням полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ в 36 пазів статора з високими значеннями обмотувальних коефіцієнтів на обох числах полюсів з наступним симетруванням і нульовим значенням різницевої ЕРС при вмиканні обмотки на $2p_2=4$.

Наведено схему розгортку одно-двошарової ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ і схему її комутації УУУ/УУУ.

Ключові слова: фазні зони, число пазів статора, схема обмотки, паралельні гілки, зрівнювальні ЕРС.

Вступ

Поліпшення техніко-економічних і експлуатаційних властивостей асинхронних двигунів може бути досягнуте за рахунок застосування в них одношарової або одно-двошарової ППО зі співвідношенням полюсів 6:4 і схемою комутації УУУ/УУУ. Застосування такої обмотки у двошвидкісних двигунах дозволить спростити технологію їхнього виготовлення, поліпшити їх масогабаритні й енергетичні показники.

1. Постановка задач дослідження

При формуванні таких обмоток методом фазової модуляції як базовий розподіл необхідно використати обмотку із числом полюсів $2p_1=6$. У протилежному випадку ППО на $2p_1=6$ виходить несиметричною.

Таблично-векторний спосіб (ТВС) дозволяє отримувати симетричні по робочій гармоніці ППО з $2p_1:2p_2=6:4$ на обох числах пар полюсів.

При перемиканні обмотки з одного числа пар полюсів на інше відбувається зміна фази струму без зміни напрямку струму. Синтез варіантів таких обмоток можливо здійснювати за допомогою таблично-векторного способу.

Таблично-векторний спосіб (ТВС), заснований на використанні векторних діаграм пазових ЕРС, записаних у табличній формі. Початковими даними для побудови таблиць активних котушкових сторін (АКС) обмотки є числа пазів статора Z_1 , число фаз і число пар полюсів.

У якості приклада, розглянемо синтез двошвидкісної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ в $Z_1=36$ і схемою комутації УУУ/УУУ.

Для цього побудуємо зірки пазових ЕРС для чисел полюсів $2p_1=6$, $2p_2=4$ у третині пазів $Z_{1/3}$ (рис. 1). Визначаємо кути зрушення між ЕРС сусідніх пазів в електричних градусах

$$\alpha_{(2p_1=6)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 3}{36} = 30^\circ;$$

$$\alpha_{(2p_2=4)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ.$$

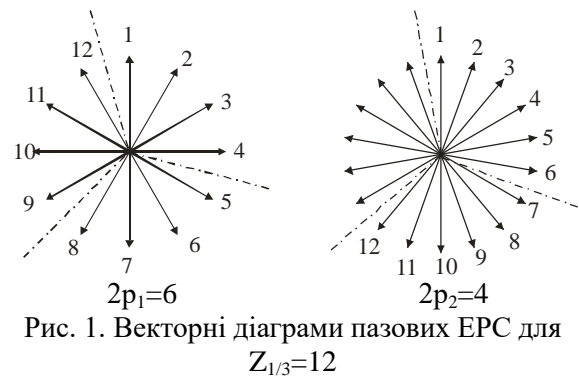


Рис. 1. Векторні діаграми пазових ЕРС для $Z_{1/3}=12$

Номери АКС, які входять в 120° фазні зони, приведені у вигляді табл. 1.

У якості симетричної обмотки при $2p_1=6$ розглянемо стандартну обмотку з 60° фазною зоною й $q=2$.

Для одержання розподілу при $2p_1=4$ необхідно номери АКС фаз А, В, С при $2p_1=6$ передати без зміни знака АКС фазам а, в, с при $2p_2=4$, так як показано в табл. 1.

У даному прикладі:

- АКС фази «А» при $2p_1=6$ з номерами 1, 2, переходять у фазу «а» при $2p_2=4$, а АКС із номерами -7, -8 переходять у фазу «в» при $2p_2=4$ (АКС позначені горизонтальним штрихуванням);
- АКС фази «В» при $2p_1=6$ з номерами 5, 6 переходять у фазу «в» при $2p_2=4$, а АКС із номерами -11, -12 переходять у фазу «а» при

$2p_2=4$ (АКС позначені вертикальним штрихуванням);
 - АКС фази «С» при $2p_1=6$ з номерами 9, 10 переходять у фазу «с» при $2p_2=4$, АКС із номером -3 переходить у фазу «с» при $2p_2=4$, а АКС із номером -4 переходить у фазу «в» при

$2p_2=4$ (АКС позначені косим штрихуванням).
 Причому для 1/3 пазів не має значення, скільки номерів АКС потрапило в кожну фазу при $2p_2=4$ і як вони розташовані щодо вертикальних границь таблиці.

Таблиця 1

Синтез ППО $2p_1:2p_2=6:4$, $Z_1=36$, вар. №1

	$2p_1=6$				$2p_2=4$						
A	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	a
	-7	-8	-9	-10	-10	-11	-12				
B	5	6	7	8							b
	-11	-12	-13	-14	-4	-5	-6	-7	-8	-9	
C	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12	c
	-3	-4	-5	-6				-1	-2	-3	

Розподіл АКС при $2p_2=4$ у кожній наступній третині пазів має зрушення на 120° і 240° відносно розподілу в першій третині пазів. Тому результуючий розподіл при $2p_2=4$ буде завжди симетричним по фазах.

Формування обмотки виконується розрахунково-графічним способом [2]. Для цього

загальноприйняте позначення чергування фаз у зонах обмотки - A, C', B, A', C, B' заміняємо на цифрові індекси - 0, 1, 2, 3, 4, 5, що показує кратність 60° фази струмів відносно початку відліку, прийнятого у фазі А.

Розподіл АКС двохшвидкісної обмотки для повного числа пазів представлений в табл. 2.

Таблиця 2.

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1:2p_2$ 6:4, $Z_1=36$, YYY/YYY, вар. №1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2p_1=6$	0		1		2		3		4		5	
$2p_2=4$	0	1	5		0		5		4		3	
Z_1	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$2p_1=6$	0		1		2		3		4		5	
$2p_2=4$	2	3	1		2		1		0		5	
Z_1	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1=6$	0		1		2		3		4		5	
$2p_2=4$	4	5	3		4		3		2		1	

На $2p_1=6$ розподіл АКС по фазах у кожній третині пазів у табл. 2 повторюється, а при $2p_2=4$ відрізняється на 120° і 240° , що еквівалентно додаванню цифр 2 і 4.

По отриманих розподілах формуються номери АКС по дев'ятьох гілках схеми комутації YYY/YYY (рис. 2).

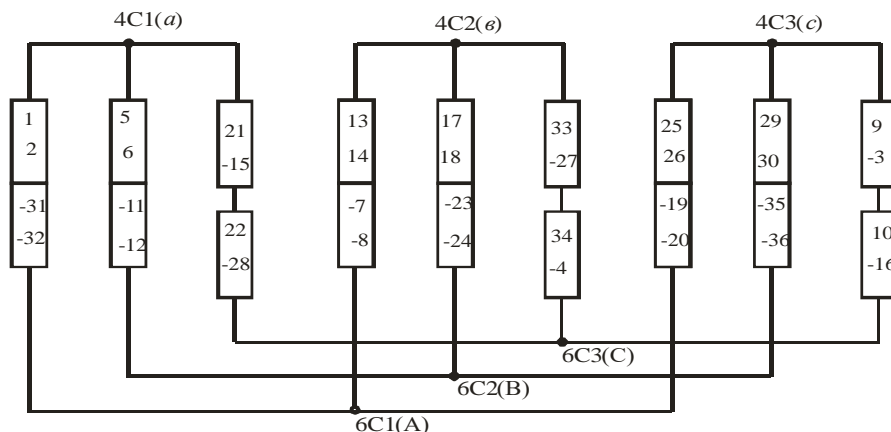


Рис.2. Схема з'єднання котушкових груп ППО $2p_1:2p_2 = 6:4$, $Z_1=36$, YYY/YYY, вар №1

Ця обмотка може бути одношаровою.

У ППО зі схемою комутації УУУ/УУУ при $2p_2=4$ і числі паралельних гілок $a=3$ сумарні ЕРС паралельних гілок не рівні по амплітуді й не збігаються по фазі.

Розглянемо такі векторні діаграми для 1-го варіанта ППО. Гілки фази a при $2p_2=4$ містять АКС із наступними номерами:

1-а гілка – $a-A$: +1,+2,-31,-32;

2-а гілка – $a-B$: +5,+6,-11,-12;

3-я гілка – $a-C$: -15,+21,+22,-28.

На рис. 3 зображені три векторні діаграми ЕРС гілок $a-A$, $a-B$, $a-C$.

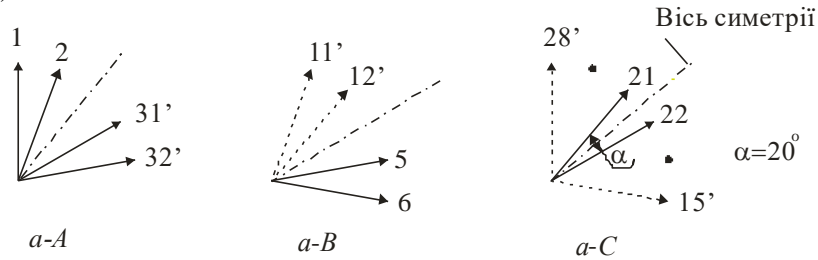


Рис. 3. Векторна діаграма ЕРС паралельних гілок фази А при $2p_2=4$

Для зменшення різницевої ЕРС паралельних гілок необхідно:

- зменшити величину кута між векторами ЕРС паралельних гілок;
- зблизити по величині амплітуди результуючих ЕРС паралельних гілок або вирівняти коефіцієнти розподілу паралельних гілок.

Для зменшення величини кута зрушення між осями симетрії паралельних гілок необхідно повернути результуючий вектор ЕРС гілок $a-A$ й $a-B$ перший по годинній, другий проти годинної стрілки. Для цього досить зробити обмотку одно-двошаровою, що складається з котушок з різним числом витків.

На векторній діаграмі (рис.3) в паралельній гілці $a-A$ повинен знаходитися ще один вектор ЕРС додаткової секції в правій частині від осі симетрії векторної діаграми, а в паралельній гілці $a-B$ - ще один вектор ЕРС додаткової секції у лівій частині від осі симетрії. При цьому результуючий розподіл на $2p_1=6$ не повинен змінитися.

Для того, щоб розподіл активних котушкових сторін (АКС) при $2p_1=6$ не змінився, додаткова АКС у гілці $a-A$ може бути тільки з номером **25**, а в гілці $a-B$ тільки з номером **18**.

Це наведено в табл. 3 для повного числа пазів. Причому сума витків у пазах **1** і **25**, а також **6** і **18** повинна дорівнювати числу витків повної котушки.

Геометричне підсумовування ЕРС паралельних гілок з наступним діленням на їхню арифметичну суму еквівалентно коефіцієнту розподілу гілки.

Розраховані коефіцієнти розподілу гілок

$$k_{R(a-A)} = k_{R(a-B)} = 0,852, \quad k_{R(a-C)} = 0,813.$$

Таким чином, вектор ЕРС паралельної гілки ($a-C$) є симетрируючим, а вектора ЕРС двох інших гілок зрушені стосовно нього в різні сторони на деякий кут.

Зобразимо на рис. 4 векторну діаграму гілки $A-a$ й визначимо відносне число витків у пазах **25** і **1**, що належать цієї гілці.

Визначити відносне число витків w_1^* можна з умови рівності нулю кута зрушення. Для цього припустимо, що в 25 пазу лежить котушка з відносним числом витків w_1^* , а в 1 пазу лежить котушка з відносним числом витків – $w_2^* = (1 - w_1^*)$.

Необхідно, щоб сума проекцій ЕРС векторів на вісь симетрії праворуч і ліворуч від неї дорівнювали б по величині.

Складемо рівняння, виходячи з рис. 4:

$$(1 - w_1^*) \cdot \cos 50^\circ + \cos 30^\circ = \cos 10^\circ + \cos 30^\circ + w_1^* \cdot \cos 70^\circ;$$

$$(1 - w_1^*) \cdot 0,643 = 0,985 + w_1^* \cdot 0,342;$$

$$w_1^* = 0,347;$$

$$w_2^* = 1 - w_1^* = 0,653;$$

де $w_1^* = w_1 / w$ - відносне число витків малої котушки;

- $w_2^* = w_2 / w$ - відносне число витків великої котушки;

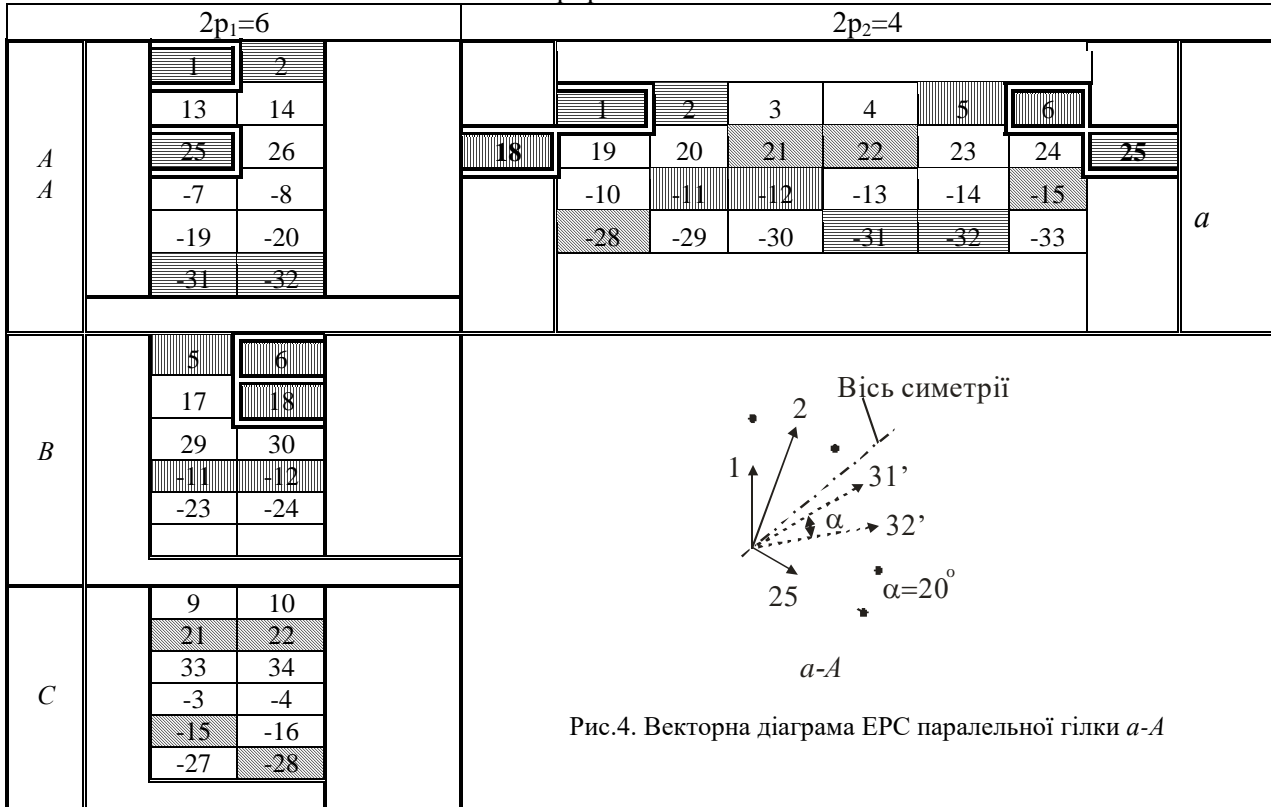
- $w = w_1 + w_2$ - повне число витків у пазу;

- w_1 - число витків малої котушки;

- w_2 - число витків великої котушки;

- $w^* = 1$ - відносне число витків повної котушки;

Симметрирование ППО 6:4



Таким чином, в 25 пазу повинна лежати додаткова АКС із відносним числом витків $w_1^* = 0,347$, а в 1 пазу повинна лежати додаткова АКС із відносним числом витків $w_2^* = 0,653$ (рис. 5).

Були визначені додаткові АКС тільки в гілках фази А. Теж необхідно зробити й для фази В.

Для цього зобразимо на рис. 6 торцеву схему ППО для кожної третини пазів одну під іншою. Обведемо товстими лініями АКС трьох гілок тільки фази *a* при $2p_2=4$ з урахуванням відносного числа витків у кожній котушці.

Розподіляємо АКС, що залишилися по двох інших фазах. При цьому враховуємо, що при $2p_1=6$ у кожній третині пазів розподіл АКС повторюється, а при $2p_2=4$ у кожній наступній третині пазів розподіл АКС відрізняється на 120° і 240° , що еквівалентно додатку чисел 2 і 4.

Аналогічно в гілку *a-B* повинні бути додані АКС із числом $w_2^* = 0,653$ в 6 пазу й $w_1^* = 0,347$ в 18 пазу.

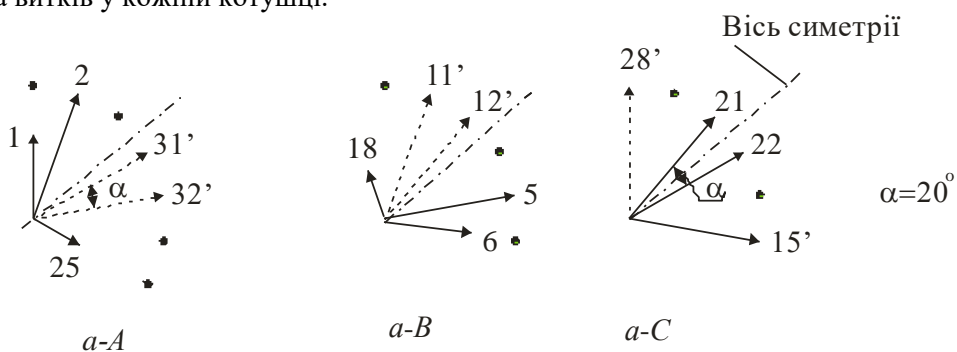


Рис.5. Векторні діаграми ЕРС паралельних гілок після симетрування ППО $2p_1:2p_2=6:4$, $Z_1=36$, УУУ/УУУ, вар.2

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2p_1=6$	0					2		3			5	
	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
$2p_2=4$	2					4		5			3	
	0	0	1	5	0	0	5	5	4	4	3	3
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$2p_1=6$	0					0		3			5	
	0	0	1	1	2		3	3	0	4		5
$2p_2=4$	4					2		1			5	
	2	2	3	1	2	2	1	1	4	0	5	5
Z_1	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1=6$	0					2		3			5	
	0	0	1	1	2		3	3	4	4		5
$2p_2=4$	0					4		3			1	
	4	4	5	3	4	4	3	3	2	2	1	1

Рис. 6. Торцева схема ППО $2p_1:2p_2 = 6:4$, $Z_1=36$, УУУ/УУУ, вар.2

Таке симетрування дало позитивний результат і дозволило практично знищити зрівняльні ЕРС при $2p_2=4$.

Для визначення величини ΔE по програмі «ДЕЕ» [1] необхідно занести номери АКС трьох гілок фази a при $2p_2=4$ з урахуванням відносного числа витків у котушках, що належать гілкам $a-A$, $a-B$, $a-C$:

Для розглянутих варіантів ППО проведені розрахунки коефіцієнтів розподілу k_r ,

обмоткових k_w та зрівнювальних ЕРС ΔE_{np}^* ,

$\Delta E_{звор}^*$, ΔE^* (табл. 4).

Після одержання торцевої схеми в повному числі пазів, можна скласти схему-розгортку одно-двошарової обмотки.

Обмотка складається із трьох типів концентричних котушкових груп. Типи котушкових груп ППО вар. №2 показані в табл. 5.

Таблиця 4

Дані розрахунків обмоткових коефіцієнтів і ΔE варіантів ППО $2p_1:2p_2 = 6:4$, $Z_1=36$, УУУ/УУУ

№ вар.	$2p$	k_r	ΔE_{np}^*	$\Delta E_{звор}^*$	ΔE^*	k_w	Тип обмотки	$\frac{B_{\delta(2p=6)}}{B_{\delta(2p=4)}}$
1	6	0,966	0,092	0,113	0,146	0,966	Одношарова	1,29
	4	0,831				0,831		
2	6	0,966	0,0	0,0	0,0	0,966	Одно-двошарова	1,264
	4	0,814				0,814		

Схема-розгортка одно-двошарової ППО наведена на рис. 7. Схема комутації УУУ/УУУ - на рис. 8

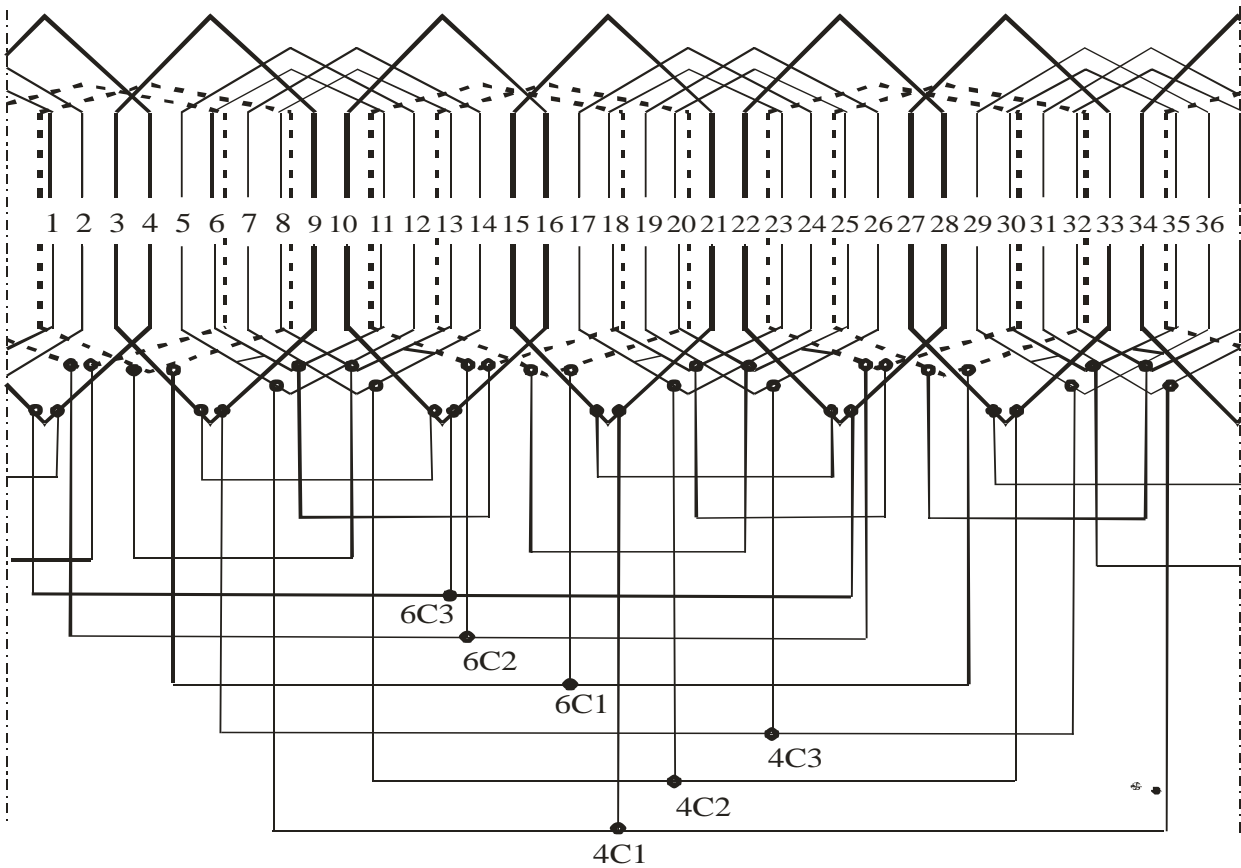


Рис. 7. Схема-розгортка ППО $2p_1:2p_2=6:4$, $Z_1=36$ УУУ/УУУ, вар. №2

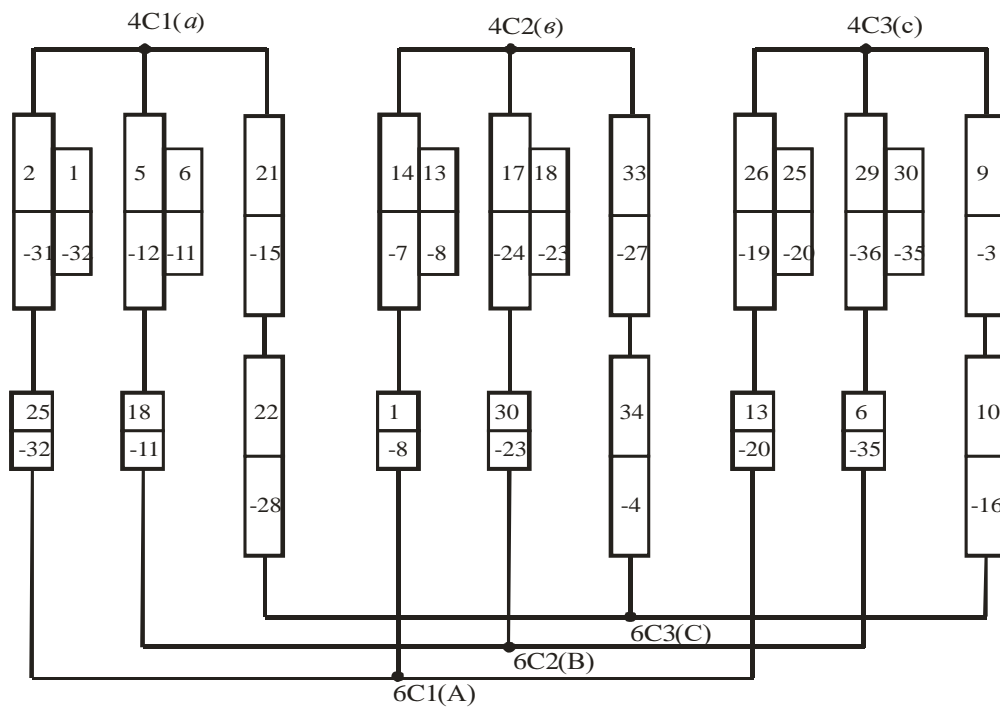
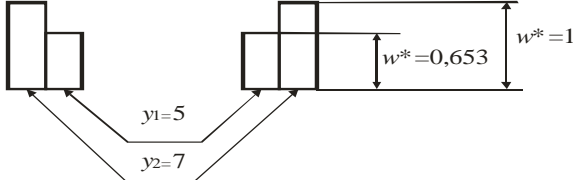
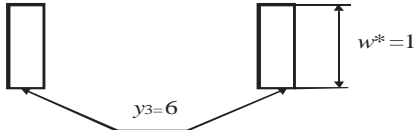



Рис. 8. Схема з'єднання котушкових груп ППО $2p_1:2p_2=6:4$, $Z_1=36$, УУУ/УУУ, вар. №2

Тип катушкової групи	Вид концентричних катушкових груп	У кат. груп
1		6
2		6
3		6

Висновки

ТВС дозволяє здійснити симетрування ППО при зміні розподілу АКС на $2p_2=4$ за рахунок додаткових АКС при збереженні розподілу на $2p_1=6$, що значно знижує різниці в ЕРС. Обмотка при цьому стає одношаровою.

Список використаної літератури

1. Беликова Л. Я., Захаров М. К., Радимов И. Н. Уравнительные ЭДС и токи в полюсопереключаемых обмотках с внутренней несимметрией. – Электромашиностроение и электрооборудование // 1977. Вып. 24. с. 67-73.
2. Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Здельник О. А. Полюсопереключаемые обмотки с соотношением чисел полюсов 8:6 и

схемой коммутации YYY/YYY. // Труды ОНПУ, выпуск 1(23). – 2005 г. с.53-58.

References

1. Bielikova L. Ya., Zakharov M.K., Radimov I. N. Balanced EMF and currents in pole-switched windings with internal unsymmetry. – Electromachinery and electrical equipment // 1977. Issue 24. p. 67-73.
2. Bielikova L. Ya., Bylonenko N.Y., Zdelnyk O.A. Pole-switchable windings with the ratio of the number of poles 8:6 and the switching scheme YYY/YYY. // Proceedings of the ONPU, issue 1(23). - 2005, pp. 53-58.

SYNTHESIS AND SYMMETRY OF HALF SWITCHING WINDINGS WITH THE UUU/UUU SCHEME IN THE TABULAR-VECTOR METHOD

L. Ya. Bielikova, V. P. Chaikovskiy
Odessa Polytechnic National University

Abstract. Using the tabular-vector method, schemes of two-speed pole-switched windings (PSW) with a pole ratio of $2p_1:2p_2=6:4$ were designed in 36 slots of the stator with high values of winding coefficients on both numbers of poles with subsequent symmetrization and a zero value of the differential EMF when the winding is turned on at $2p_2=4$.

The switching schemes and the scanning scheme of a single-double-layer PPO with the ratio of poles $2r_1:2r_2=6:4$ and the UUU/UUU switching scheme are given.

Key words: phase zones, number of stator grooves, winding scheme, parallel branches, equalizing EMF.

СИНТЕЗ И СИММЕТРИРОВАНИЕ ПОЛЮСОПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ ОБМОТОК СО СХЕМОЙ УУУ/УУУ ТАБЛИЧНО-ВЕКТОРНЫМ СПОСОБОМ

Л. Я. Беликова, В.П. Чайковский

Национальный университет «Одесская политехника»

Аннотация. *Используя таблично-векторный способ, спроектированы схемы двухскоростных полюсопереключаемых обмотки (ППО) с соотношением полюсов $2p_1:2p_2=6:4$ в 36 пазах статора с высокими значениями обмоточных коэффициентов на обоих числах полюсов с последующим симметрированием и нулевым значением разностной ЭДС при включении обмотки на $2p_2=4$.*

Приведены схема развертка одно-двухслойной ППО с соотношением полюсов $2p_1:2p_2=6:4$ и ее схема коммутации УУУ/УУУ.

Ключевые слова: *фазные зоны, число пазов статора, схема обмотки, параллельные ветви, уравнительные ЭДС.*

Отримано 22.08.2022



Белікова Людмила Яківна, кандидат технічних наук, доцент кафедри ЕМІ. Національний університет «Одеська політехніка». 65044, Одеса, пр-т Шевченко, 1, тел. +380666993342. E-mail: Conda@ukr.net

Belikova Liudmyla, Ph.D, docent of EMI, Odessa Polytechnic National University Shevchenko av. 1, Odessa, 65044, Phone: +380666993342. E-mail: conda@ukr.net.

ORCID ID 0000-0001-5999-8205



Чайковський Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри ЕМІ Національний університет «Одеська політехніка», 65044, Одеса, проспект Шевченко, 1, тел. +380996002983.

E-mail: v.p.chaikovskyi@op.edu.ua

Vladimir Chaikovskyi, Ph.D, docent of EMI, Odessa Polytechnic National University, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ph. +380996002983.

E-mail: v.p.chaikovskyi@op.edu.ua.

ORCID ID: 0000-0001-6057-7483