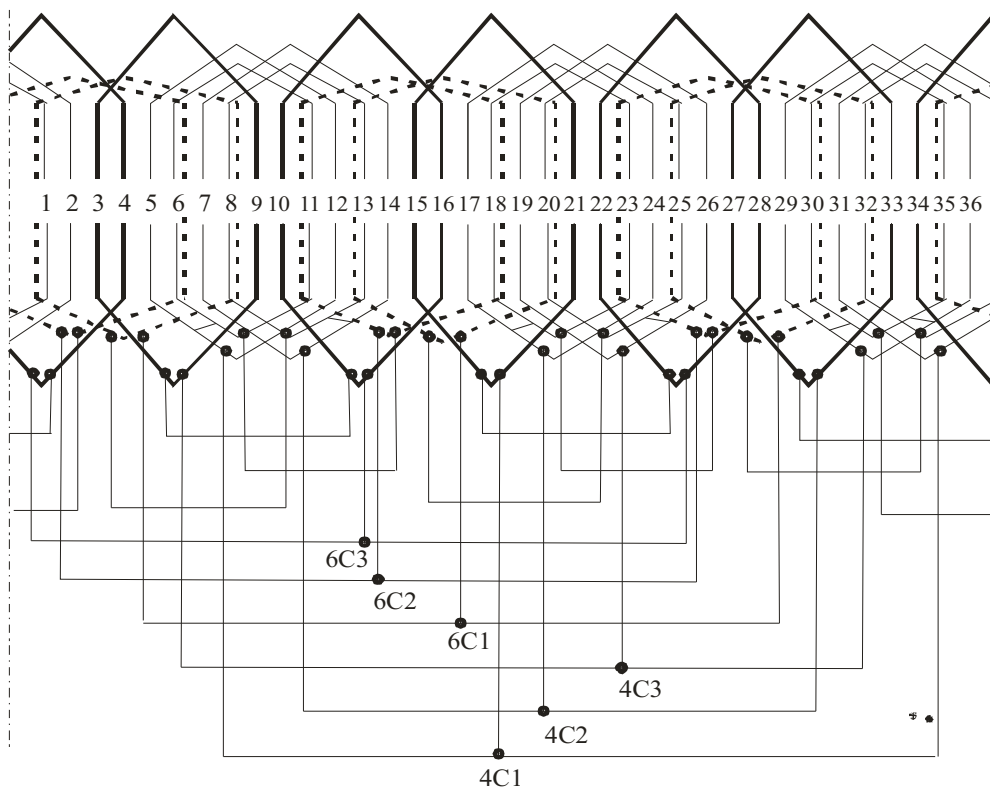


Л. Я. БЄЛІКОВА

СПЕЦІАЛЬНІ ОБМОТКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Монографія



Одеса
2024

Л. Я. БЄЛІКОВА

СПЕЦІАЛЬНІ ОБМОТКИ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Монографія

Одеса
2024

УДК 621.313.333.

Рецензенти: *Байдак Ю.В.*, д-р. техн. наук, проф.
Ставінський А.А., д-р. техн. наук, проф.
Шевченко В.П., канд. техн. наук, доц.

Белікова Л.Я

Спеціальні обмотки асинхронних двигунів

Робота присвячена синтезу й аналізу трифазних і двофазних двошвидкісних полюсоперемикальних обмоток (ППО) асинхронних двигунів зі співвідношенням чисел полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ та $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ з різними схемами комутації та у різних числах пазів статора. Особлива увага приділена одношаровим і одно-двошаровим варіантам ППО, що дає можливість спростити технологію виготовлення обмоток за рахунок механізації їхнього укладання. Розглянуті також шостифазні одношарові обмотки та сполучені обмотки.

Робота написана з використанням матеріалів патентів, авторських посвідчень і статей автора.

Авторка висловлює велику подяку всім співавторам, з якими їй доводилося у свій час співпрацювати.

Матеріали, представлені в роботі, будуть корисні для фахівців, що працюють в області проектування, виробництва й ремонту асинхронних двигунів.

УДК 621.313.333.

ISBN 978-966-927-877-7

©Белікова Л.Я.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТРИФАЗНІ ДВОШВИДКІСНІ ОБМОТКИ	10
1.1. Принцип утворення двошвидкісних полюсоперемикальних обмоток (ППО).....	10
1.2. Теоретичні основи методу фазової модуляції (ФМ).....	16
1.3. Практичний метод ФМ синтезу трифазних двошвидкісних ППО зі схемою комутації $\Delta/УУ$ або $У/УУ$	20
1.4. Зрушення хвилі модуляції.....	27
1.5. Схема комутації $УУУ/УУУ$ для двошвидкісних ППО	30
1.6. Синтез ППО зі схемою комутації $УУУ/УУУ$ методом ФМ.....	33
2. СИНТЕЗ ДВОШВИДКІСНИХ ППО ТАБЛИЧНО-ВЕКТОРНИМ СПОСОБОМ	38
2.1. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ зі схемою комутації $У/УУ$ або $\Delta/УУ$	38
2.2. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ зі схемою комутації $У/УУ$ або $\Delta/УУ$	43
2.3. Синтез ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ і схемою $УУУ/УУУ$	48
2.3.1. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у. $Z_1 = 36$	49
2.3.2. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у. $Z_1 = 54$	54
2.4. Синтез ППО с $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ і схемою комутації $УУУ/УУУ$	61
2.4.1. Синтез ППО в $Z_1 = 36$ з. $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$	61

2.4.2.	Синтез ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у. $Z_1 = 54$	66
2.4.3.	Синтез ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у. $Z_1 = 72$	71
3.	СПЕЦІАЛЬНІ ПИТАННЯ ППО	77
3.1.	Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$ зі схемою комутації УУУ / УУУ	77
3.2.	Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$ зі схемою комутації УУУ / УУУ	86
3.3.	Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 72$ зі схемою комутації УУУ / УУУ	92
3.4.	Виникнення синхронних моментів у АД з полюсо-перемикальними обмотками	99
4.	ДВОФАЗНІ ДВОШВИДКІСНІ ОБМОТКИ	107
4.1.	Двофазні одношвидкісні обмотки.....	107
4.2.	Двофазні двошвидкісні полюсоперемикальні обмотки..	111
4.2.1.	Синтез симетричних двофазних двошвидкісних полюсо-перемикальних обмоток (ППО) методом фазової модуляції.....	111
4.2.2.	Синтез двофазних ППО таблично-векторним способом..	119
4.2.3.	Синтез одно-двошарової двофазної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$	126
4.2.4.	Двофазні двошвидкісні обмотки з непарними числами пар полюсів.....	131
4.3.	Нова схема комутації для двошвидкісних двофазних обмоток.....	133
5.	ШОСТИФАЗНІ ОБМОТКИ	142
5.1.	Одношарові шостифазні обмотки.....	142

5.2.	Вмикання шостифазних обмоток у трифазну мережу	150
5.2.1.	Сполучена обмотка при $2p = 2$, $Z_1 = 24$	150
5.2.2.	Сполучена обмотка при $2p = 4$, $Z_1 = 36$	157
	ЛІТЕРАТУРА.....	161
	Свідомості про автора.....	170

ВСТУП

Найбільш економічним східчастим способом зміни частоти обертання асинхронних двигунів є перемикання двигуна на роботу з іншим числом полюсів.

Багатошвидкісні двигуни застосовуються в металорізальних і деревообробних верстатах, у вантажних і пасажирських ліфтах, для приводів вентиляторів і насосів та в ряді інших випадків.

Одним з найважливіших напрямків науково-технічного прогресу в сучасному машинобудуванні є зниження питомих трудових і матеріальних витрат у процесі виробництва електричних машин.

Можливість зміни числа полюсів двигуна може бути досягнута установкою в пази статора двох незалежних обмоток з різним числом полюсів, або перемиканням схеми з'єднання котушкових груп - полюсоперемикальні обмотки (ППО). Останній метод широко застосовується, зокрема, для зміни числа пар полюсів двигунів у відношенні 1:2 [55, 57].

В останні роки розроблені схеми обмоток, що дають можливість шляхом перемикання котушкових груп, змінювати число пар полюсів і у відношенні, відмінному від 1:2, зі збереженням досить високого обмотувального коефіцієнта для обох частот обертання без збільшення числа вивідних кінців обмотки (не більше шести) [27...31].

Однак для значного зменшення питомої матеріалоемності й трудових витрат (спрощення технології виготовлення) необхідно перейти на механізовані процеси укладання обмотки, а це означає, що полюсоперемикальні обмотки повинні бути одношаровими або однодвошаровими [32, 39, 41].

Більшість із існуючих сьогодні методів, що мають практичне застосування, формування схем ППО засновані саме на зміні порядку розподілу їх активних котушкових сторін по просторовій координаті уздовж розточення статора й фазам. Це методи фазової модуляції, полюсно-амплитудної модуляції та ін. [4].

Практика показує, що можливості даних способів істотно обмежені. Більша частина з перерахованих методів не забезпечує можливості проектування схем ППО з концентричними котушками, тому що методика їхньої побудови орієнтується, в основному, на двошарове конструктивне виконання обмоток.

Очевидно, що для більш ефективного рішення задач формування схем ППО варто шукати нові можливості, підходи й принципи побудови схем, придатних для механізованого укладання.

Двошвидкісні двигуни із ППО, як правило, мають більш високі показники. При цьому, незважаючи на велику рінманітність ППО, пошук нових схемних рішень триває.

Тому, розробка ефективного способу побудови трифазних одно- і одно-двошарових полюсоперемикальних і сполучених обмоток, придатних для механізованого укладання з використанням схем зовнішньої комутації з декількома паралельними гілками, є завданням актуальним й своєчасним.

Основною задачею проектування ППО є пошук раціонального розподілу активних котушкових сторін (АКС) по розточенню статора й гілкам схеми зовнішньої комутації.

Для синтезу симетричних ППО в даній роботі застосовується таблично-векторний спосіб (ТВС), заснований на перетворенні векторних діаграм і поданні їх у табличній формі [4, 35, 45].

Таблично-векторний спосіб (ТВС) представляє наочне формування обмоток на відміну від методу фазової модуляції, побудова обмоток у якому проводиться «наосліп».

За допомогою ТВС можна синтезувати симетричні ППО з будь-яким співвідношенням чисел пар полюсів (навіть при числах пар полюсів, кратних трьом), що неможливо при побудові обмоток методом фазової модуляції.

Дана робота присвячена синтезу двошвидкісних трифазних ППО з різними співвідношенням чисел пар полюсів і з різними схемами комутації $\Delta/УУ$, $У/УУ$, $УУУ/УУУ$, а також двошвидкісних двофазних ППО.

У процесі роботи на основі ТВС спроектовані нові варіанти одношарових і одношарових двошвидкісних ППО зі співвідношенням полюсів 8:6 і 6:4 [33, 38, 43].

Деякі схеми захищені авторськими посвідченнями й патентами, а деякі публікуються вперше.

В окремому розділі наведені схеми шостифазних одношарових обмоток, а також сполучених обмоток [63, 64].

1. ТРИФАЗНІ ДВОШВИДКІСНІ ОБМОТКИ

1.1. Принцип утворення двошвидкісних полюсоперемикальних обмоток (ШО)

Змінити число полюсів у асинхронному двигуні (АД) можна або укладанням у пази двох обмоток з різним числом полюсів, або укладанням на статорі однієї обмотки, конструкція якої дозволяє шляхом зміни схеми з'єднання котушкових груп змінювати число полюсів. Принцип перетворення чотирьохполюсної ($2p_1 = 4$) обмотки у двополюсну ($2p_2 = 2$) для однієї фази показаний на рис. 1.1.

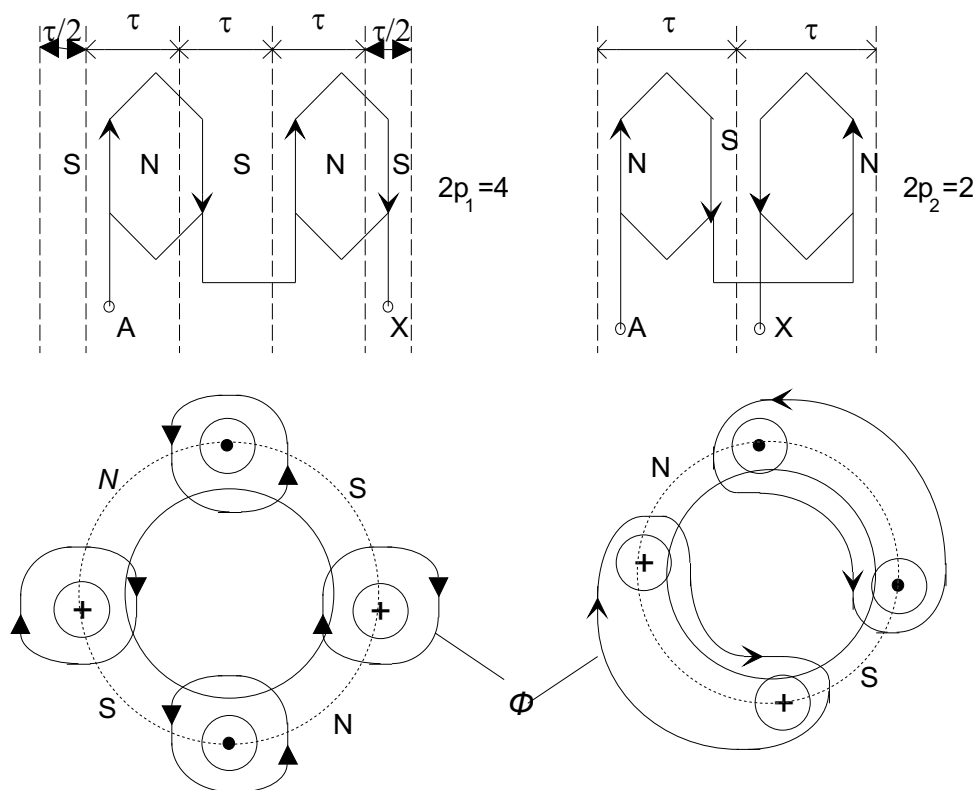


Рис. 1.1. Принцип створення обмотки статора з різним числом полюсів

При послідовнім й згоднім з'єднанні двох секцій (рис. 1.1, а) магнітний потік утворює чотири полюси. При послідовному й зустрічному (рис. 1.1, б) - два полюси. Таким чином, принцип створення полюсоперемикальних обмоток (ППО) ґрунтується на тому, що кожна фаза обмотки ділиться на дві частини, змінюючи схему з'єднання яких можна одержувати різне число полюсів.

Розглянемо принцип утворення двошвидкісної полюсоперемикальної обмотки (ППО) зі співвідношенням чисел полюсів $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$ у числі пазів статора $Z_1 = 6$. У такий ППО на більшому числі полюсів обмотка має 120° фазну зону (ФЗ), на меншому – 60° ФЗ [60].

Щоб одержати схему ППО в $Z_1 = 6$ зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$, досить визначити розподіл обмотки по фазах і пазам.

Визначимо число пазів на полюс і фазу для $2p_2 = 2$ (**60° ФЗ**):

$$q = \frac{Z_1}{2p_2} = \frac{6}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 1.$$

Чергування фаз у сусідніх фазних зонах - А, С', В, А', С, В'.

Число пазів на полюс і фазу для $2p_1 = 4$ (**120° ФЗ**):

$$q = \frac{Z_1}{p_1} = \frac{6}{2 \cdot 3} = 1.$$

Чергування фаз у сусідніх фазних зонах - А, С, В.

Розподіл пазів по фазах для $Z_1 = 6$ наведений в табл. 1.1. З табл. 1.1 видно, що для перемикання чисел полюсів необхідно:

- змінити напрямок струму в котушках з номерами 2, 4, 6 (C', A', B');
- змінити чергування будь-яких двох фаз обмотки для збереження напрямку обертання магнітного поля незмінним.

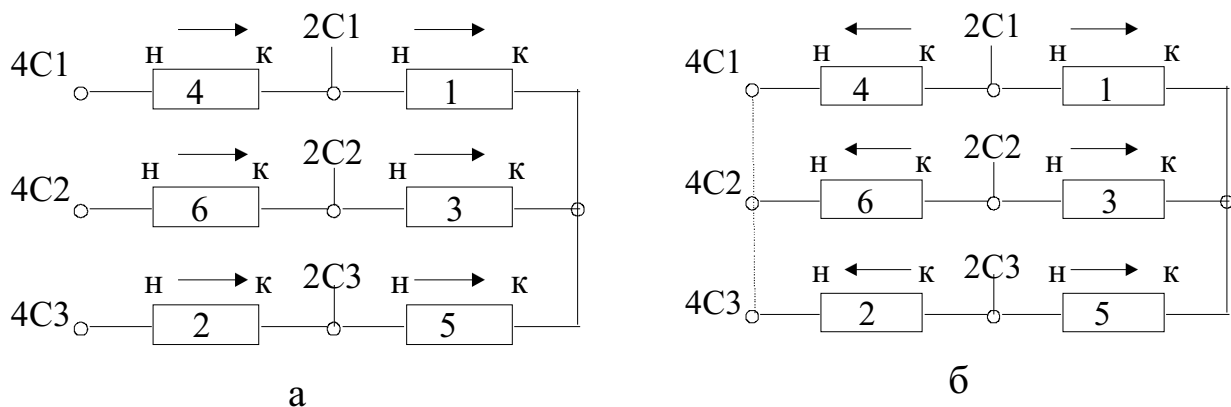
Розподіл пазів по фазах ППО

Z_1	1	2	3	4	5	6
$2p_2 = 2$	A	C'	B	A'	C	B'
$2p_1 = 4$	A	C	B	A	C	B

Котушки кожної фази такої обмотки діляться на дві частини. В одній частині струм зберігає свій напрямок, в іншій - змінює свій напрямок на 180° при перемиканні числа полюсів.

Обмотка може бути реалізована при використанні схем комутації Y/YU або Δ/YU із шістьма вивідними кінцями.

Схема з'єднання котушкових груп ППО показана на рис. 1.2. Котушкові групи показані прямокутниками з позначенням початків (н) та кінців (к). Номер котушкової групи збігається з номером паза. Стрілками показаний напрямок струму в напівфазах обмотки при включенні її на різне число полюсів.

Рис. 1.2. Схема з'єднання котушкових груп ППО з $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$ а - $2p_1 = 4$, Y ;б - $2p_2 = 2$, YU

Наведена схема ППО має шість вивідних кінців. Для роботи ППО із числом полюсів $2p_1 = 4$ трифазне живлення подається на затискачі 4С1, 4С2 і 4С3. Обмотка з'єднується в зірку (або в трикутник). Кожна фаза має одну паралельну гілку (рис. 1.2, а).

Для роботи ППО на $2p_2 = 2$ трифазне живлення необхідно подати на затискачі 2С1, 2С2, 2С3. При цьому затискачі 4С1, 4С2 і 4С3 необхідно з'єднати разом. Обмотка з'єднується в подвійну зірку і має в кожній фазі по дві паралельні гілки (рис. 1.2, б).

Залежно від схеми з'єднання ППО регулювання частоти обертання можна робити при постійному навантаженні на валу $M_{cm} = const$ або при постійній потужності $P_2 = const$.

При перемиканні полюсів змінюється схема з'єднання й змінюється співвідношення індукцій у повітряному зазорі $B_{\delta(1)} / B_{\delta(2)}$.

Розглянемо в загальному випадку, від чого залежить це співвідношення. Для цього знайдемо співвідношення ЕРС, наведених в обмотці статора при роботі АД на різних частотах обертання при $p_{(1)}$ й $p_{(2)}$:

$$\frac{E_{1(1)}}{E_{1(2)}} = \frac{\Phi_{m(1)} \cdot f_{1(1)} \cdot w_{1(1)} \cdot k_{w1(1)}}{\Phi_{m(2)} \cdot f_{1(2)} \cdot w_{1(2)} \cdot k_{w1(2)}}, \quad (1.1)$$

де $\Phi_m = 2 / \pi \cdot B_{\delta m} \cdot \tau \cdot l_\delta = B_{\delta m} \cdot \frac{D}{p} \cdot l_\delta$ - амплітудне значення магнітного потоку.

Підставивши значення Φ_m у вираз (1.1), одержимо співвідношення індукцій у повітряному зазорі:

$$\frac{B_{\delta(1)}}{B_{\delta(2)}} = \frac{E_{1(1)} \cdot p_{(1)} \cdot w_{1(2)} \cdot k_{w1(2)}}{E_{1(2)} \cdot p_{(2)} \cdot w_{1(1)} \cdot k_{w1(1)}}, \quad (1.2)$$

де $B_{\delta(1)}$, $B_{\delta(2)}$ - індукції в повітряному зазорі при вмиканні ППО, відповідно, на нижчу ($p_{(1)}$) і вищу ($p_{(2)}$) частоти обертання;

$E_{1(1)}$, $E_{1(2)}$ - фазні ЕРС при p_1 й p_2 ;

$w_{1(1)}$, $w_{1(2)}$, $k_{w1(1)}$, $k_{w1(2)}$ - число витків на фазу та обмотувальні коефіцієнти при p_1 й p_2 .

Для максимально припустимих (по перегріву двигуна) відносно нагрівання навантажень на валу M_2 при перемиканні полюсів має місце співвідношення

$$\frac{M_{2(1)}}{M_{2(2)}} \approx \frac{B_{\delta(1)}}{B_{\delta(2)}}. \quad (1.3)$$

При регулюванні з $M_{cm} = const$ необхідно, щоб

$$B_{\delta 1} / B_{\delta 2} \approx 1. \quad (1.4)$$

Схема з'єднання Y/YU для ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$ дозволяє забезпечити регулювання при $M_{cm} = const$.

На нижчій частоті обертання при $p_1 = 2$ схема з'єднання обмотки - зірка (Y), число витків на фазу у відносних одиницях - $w_{(1)}^* = 1$. На вищій частоті обертання при $p_2 = 1$ схема з'єднання обмотки - подвійна зірка (YU), число витків на фазу у відносних одиницях - $w_{(2)}^* = w_{(1)}^* / 2 = 1/2$, тому що число паралельних гілок у фазі збільшилося $a = 2$.

Підставимо у формулу (1.2) такі значення:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{2}{1}, \quad \frac{E_{1(1)Y}}{E_{1(2)YY}} = 1, \quad \frac{w_{(2)}}{w_{(1)}} = \frac{1}{2}.$$

Одержимо при $\kappa_{w(1)} \approx \kappa_{w(2)}$:

$$\frac{B_{\delta(1)Y}}{B_{\delta(2)YY}} = \frac{\kappa_{w1(2)}}{\kappa_{w1(1)}} \approx 1. \quad (1.5)$$

При правильному виборі кроку ППО можна одержати приблизно рівні обмотувальні коефіцієнти.

Механічні характеристики АД із ППО за умови $M_{cm} = const$ наведені на рис. 1.3. При перемиканні обмотки з однієї частоти на іншу момент на валу M_2 залишається незмінним, але потужність P_2 змінюється пропорційно частоті обертання ротора n :

$$P_{2(1)} = M_2 \cdot \frac{2\pi \cdot n_{(1)}}{60};$$

$$P_{2(2)} = M_2 \cdot \frac{2\pi \cdot n_{(2)}}{60}.$$

Тому що $n_{(2)} \approx 2n_{(1)}$, це $P_{2(2)} \approx 2P_{2(1)}$.

Для збереження постійної потужності $P_2 = const$ при перемиканні числа полюсів обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_{(1)} : 2p_{(2)} = 4 : 2$ підходить схема $\Delta / \text{УУ}$.

Підставимо у формулу (1.2) такі значення:

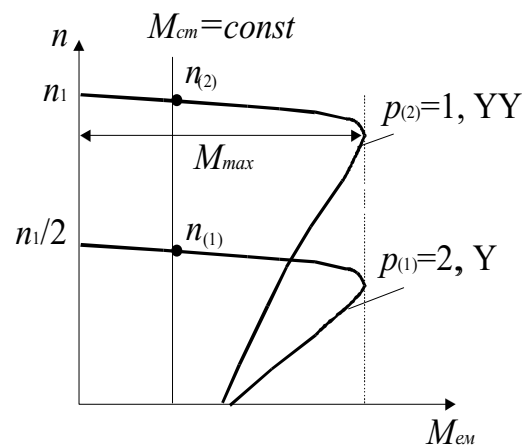


Рис. 1.3. Механічні характеристики АД при $M_{cm} = const$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{2}{1}, \quad \frac{E_{1(1)(\Delta)}}{E_{1(2)(YY)}} = \sqrt{3}, \quad \frac{w_{(2)}}{w_{(1)}} = \frac{1}{2}.$$

Якщо при виборі кроку ППО $\kappa_{w(1)} < \kappa_{w(2)}$, одержимо

$$\frac{B_{\delta(1)(\Delta)}}{B_{\delta(2)(YY)}} = \sqrt{3} \cdot \frac{\kappa_{w1(2)}}{\kappa_{w1(1)}} \approx 2. \quad (1.6)$$

Механічні характеристики АД за умови $P_2 = const$ наведені на рис. 1.4.

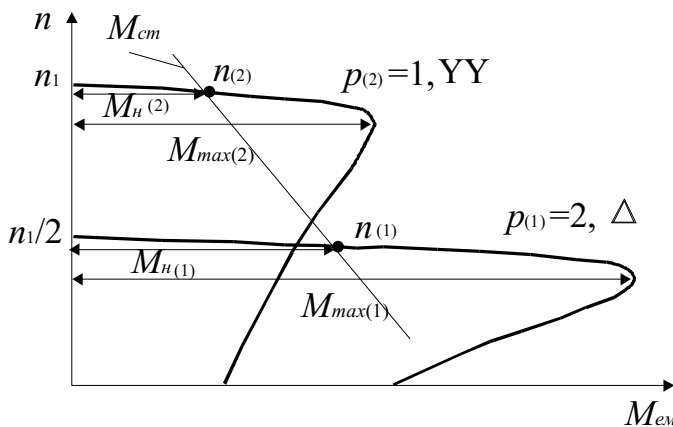


Рис. 1.4. Механічні характеристики АД при $P_2 = const$

З виразу (1.6) треба, щоб

$$\frac{M_{2(1)}}{M_{2(2)}} = \frac{M_{n(1)}}{M_{n(2)}} \approx \frac{B_{\delta(1)}}{B_{\delta(2)}} \approx 2,$$

і при $n_{(2)} \approx 2n_{(1)}$ одержимо, що потужність на валу залишається незмінною:

$$\frac{P_{2(1)}}{P_{2(2)}} = \frac{M_{n(1)} \cdot n_{(1)}}{M_{n(2)} \cdot n_{(2)}} = 1.$$

1.2. Теоретичні основи методу фазової модуляції (ФМ)

Для симетричної трифазної обмотки із числом пар полюсів p_1 вираження для МРС окремих фаз можна записати як добуток функцій розподілу провідників і струмів фаз

$$\begin{aligned}
F_A(t_1, \theta) &= \gamma_A(\theta) \cdot i_A(t) = \Gamma_m \cdot \sin(p_\delta \cdot \theta) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \beta), \\
F_B(t_1, \theta) &= \gamma_B(\theta) \cdot i_B(t) = \Gamma_m \cdot \sin(p_\delta \cdot \theta - 2\pi/3) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \beta - 2\pi/3), \\
F_C(t_1, \theta) &= \gamma_C(\theta) \cdot i_C(t) = \Gamma_m \cdot \sin(p_\delta \cdot \theta - 4\pi/3) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \beta - 4\pi/3),
\end{aligned} \quad (1.7)$$

де

$F_i(t, \theta)$ - МРС i - тої фази обмотки у функції часу t й кутової координати θ ;

$\gamma_i(\theta)$ - функція розподілу провідників i - тої фази обмотки з амплітудою Γ_m на осі фаз;

$i_i(t)$ - струм з амплітудою I_m , що обтікає провідники i - тої фази обмотки;

p_δ - початкове базове число пар полюсів обмотки;

ω - кутова частота струмів живильної мережі;

β - початкове зрушення фази струмів.

Принцип утворення полюсоперемикальних обмоток (ППО) на основі фазової модуляції складається в безперервній зміні початкових фаз струмів залежно від кутової координати θ . Припустимо, що початкове зрушення фази струму β у виразі (1.7) лінійно залежить від просторової координати

$$\beta = \pm p_m \cdot \theta, \quad (1.8)$$

де коефіцієнт p_m - ціле число й визначає період зміни функції, що модулює, у межах просторового $\theta = 2\pi$ кута, що відповідає повній довжині розгорнення статора.

В цьому випадку струми, що течуть у фазах обмотки, функціонально залежать як від тимчасовою t , так і від просторової θ координати:

$$\begin{aligned}
i_A(t, \theta) &= I_m \cdot \sin(\omega t \pm p_m \cdot \theta), \\
i_B(t, \theta) &= I_m \cdot \sin(\omega t \pm p_m \cdot \theta - 2\pi/3), \\
i_C(t, \theta) &= I_m \cdot \sin(\omega t \pm p_m \cdot \theta - 4\pi/3).
\end{aligned}
\tag{1.9}$$

У результаті підстановки (1.9) в (1.7) і перетворення виходить вираження для МРС обмотки з модуляцією фази

$$F(t_1, \theta) = F_A(t_1, \theta) + F_B(t_1, \theta) + F_C(t_1, \theta) = \frac{3}{2} \Gamma_m \cdot I_m \cdot \cos[(p_\delta \pm p_m) \cdot \theta + \omega t]. \tag{1.10}$$

Отже, просторова модуляція поля зміною фази струмів викликає зміну початкового числа полюсів p_δ обмотки на **число циклів хвилі модуляції** - p_m .

Живлення обмотки від трифазної мережі дозволяє робити зміну фази струмів β у функції кутової координати θ тільки за східчастим законом.

Ділянка обмотки, протягом якої збільшення фази струму залишається незмінним, називається **зоною модуляції**.

Прирост фази струмів на $\pm 60^\circ$ у зонах модуляції приводить до перетворення вихідного (базового) числа пар полюсів p_δ до першого модуляційного числа пар полюсів

$$p_1 = p_\delta \pm p_m. \tag{1.11}$$

Зрушення фази струмів β_1 у зонах модуляції залежно від порядкового номера i - тої зони визначається виразом

$$\beta_{1i} = (i - 1) \cdot 60^\circ, \tag{1.12}$$

де $i = 1, 2, 3 \dots$

Якщо в цих же зонах модуляції здійснити збільшення фази струмів на $\pm 120^\circ$, то перетворення базової обмотки приводить до другого модуляційного числа пар полюсів

$$p_2 = p_{\bar{6}} \pm 2p_m. \quad (1.13)$$

У цьому випадку зрушення фази струмів β_2 дорівнює

$$\beta_{2i} = \pm(i-1) \cdot 120^\circ. \quad (1.14)$$

Двошвидкісна обмотка зі співвідношенням чисел пар полюсів $p_1 : p_2$ утвориться обома післямодуляційними розподілами. Базова обмотка використовується тільки як допоміжна при формуванні ППО.

Зміна фази струмів β_{12} у зонах модуляції при переході від одного модуляційного розподілу до іншого буде дорівнювати

$$\beta_{12i} = \beta_{1i} - \beta_{2i} = \pm(i-1) \cdot 180^\circ. \quad (1.15)$$

Звідси треба, що для перемикання обмотки з одного числа полюсів на інше досить змінити напрямок струмів у котушках, розташованих у межах зон модуляції з парними порядковими номерами.

У загальному випадку **метод фазової модуляції** дозволяє одержувати для трифазних обмоток комбінації п'яти чисел пар полюсів:

$$p_1 : p_2 : p_3 : p_4 : p_5 = (p_{\bar{6}} - 2p_m) : (p_{\bar{6}} - p_m) : p_{\bar{6}} : (p_{\bar{6}} + p_m) : (p_{\bar{6}} + 2p_m). \quad (1.16)$$

Залежно від обраного співвідношення чисел пар полюсів для двошвидкісної обмотки, визначається й схема комутації.

Двошвидкісні обмотки, числа пар полюсів яких перемикаються у відношенні $p_1 : p_2 = (p_{\bar{6}} \pm p_m) : (p_{\bar{6}} \pm 2p_m)$, - це обмотки зі зміною фази струму на 180° .

Для складання схем зовнішньої комутації в цьому випадку досить мати в обмотках шість гілок перемикання. Для цього випадку підходять схеми з'єднання гілок і фаз обмотки $\Delta / УУ$ або $У / УУ$.

Двошвидкісні обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів

$$p_1 : p_2 = p_6 : (p_6 \pm 2p_m)$$

- це обмотки з використанням базових розподілів як робочих.

Для базової обмотки застосовується шостизонний розподіл. У результаті застосування трьохзонного модульованого розподілу, фаза струмів у зонах модуляції при переході від базового розподілу із числом пар полюсів $p_1 = p_6$ до післямодуляційного із числом пар полюсів $p_2 = p_6 \pm 2p_m$ може змінитися на 0, 120 і 240 градусів.

Схемою зовнішньої комутації обмотки в цьому випадку є схема із трьома паралельними гілками у фазах - УУУ/УУУ.

Число циклів модуляційного розподілу визначається по формулі:

$$p_m = \pm p_2 - p_1. \quad (1.17)$$

Вибір тієї або іншої схеми комутації для полюсоперемикальних обмоток дозволяє в широкому діапазоні регулювати електромагнітні характеристики багатошвидкісних електродвигунів.

1.3. Практичний метод ФМ синтезу трифазних двошвидкісних ППО зі схемою комутації $\Delta/УУ$ або $У/УУ$

Повинні бути задані число пазів статора Z_1 й співвідношення чисел пар полюсів двошвидкісної обмотки $p_1 : p_2$.

Для одержання симетричних двошвидкісних обмоток, що перемикають по схемах $\Delta/УУ$ або $У/УУ$, необхідно, щоб обидва числа пар полюсів $p_1 : p_2$ не були кратні трьом.

Для формування двошвидкісної обмотки необхідно розрахувати:

- число пар полюсів хвилі модуляції p_m

$$p_m = \frac{p_1 \pm p_2}{3} \quad (1.18)$$

(знак \pm у формулі вибирають так, щоб число p_m було цілим);

- число пар полюсів базової обмотки p_b

$$p_b = p_1 - p_m; \quad (1.19)$$

- число пазів на полюс і фазу базової обмотки q_b й хвилі модуляції q_m

$$q_b = \frac{Z_1}{6 \cdot p_b}, \quad q_m = \frac{Z_1}{6 \cdot p_m}. \quad (1.20)$$

Числа q_b й q_m можуть приймати як цілі, так і дробові, позитивні й негативні значення.

Для відповідних q , цілих або дробових, складають числові ряди допоміжних розподілів, тобто для базової обмотки й хвилі модуляції.

Зформувані розподіл і зобразити схему комутації Y/YU двошвидкісної ППО з такими даними: $Z_1 = 24$, $p_1 : p_2 = 4 : 1$.

Розраховуємо по виразах (1.13...15)

$$p_m = \frac{p_1 \pm p_2}{3} = \frac{4-1}{3} = 1; \quad p_b = p_1 - p_m = 4-1 = 3;$$

$$q_m = \frac{Z_1}{6 \cdot p_m} = \frac{24}{6 \cdot 1} = 4; \quad q_b = \frac{Z_1}{6 \cdot p_b} = \frac{24}{6 \cdot 3} = \frac{4}{3} = 1\frac{1}{3}.$$

Складаємо числові ряди в межах Z_1

- для базової обмотки: 4, 4, 4; 4, 4, 4;

A,C',B,A',C,B';

- для хвилі модуляції: 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1;

A,C',B, A',C,B', A,C',B,A',C,B', A,C',B,A',C,B'.

Формування ФМ обмоток роблять розрахунково-графічним способом. Для цього загальноприйняте позначення чергування фаз у зонах базової обмотки й модуляційного розподілу - А, С', В, А', С, В' замінюють на цифрові індекси - 0, 1, 2, 3, 4, 5, які показують кратність 60° фази струмів відносно початку відліку, прийнятого у фазі А.

Послідовність розподілу фазних зон і формування обмотки для розглянутого прикладу представлена в табл. 1.2.

У *першому рядку* зверху табл. 1.2 показана нумерація пазів Z_1 або номера активних котушкових сторін (АКС) обмотки.

Таблиця 1.2

Формування методом ФМ двошвидкісної ППО

$$Z_1 = 24, 2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
p_b	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5						
p_m	0			1			2			3			4			5								
p_1	0	1	2	4	5	0	2	3	4	0	1	2	4	5	0	2	3	4						
p_2	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	0	5	0	1						

У *другому рядку*, відповідно до числового ряду, розташовані фазні зони базової обмотки із числом пар полюсів p_b . При цьому максимальне значення індексу зони обмежується цифрою 5 (шестирична система числення).

В *третьому рядку* представлені зони модуляційного розподілу із числом пар полюсів p_m .

У результаті такої побудови в тому самому числі пазів вийшли два розподіли – базове і модуляційне, що дозволяє перейти до результуючого розподілу із заданим числом пар полюсів $p_1 = 4$.

Належність секцій цієї обмотки до фаз визначається алгебраїчним підсумовуванням чисел базового й модуляційного розподілів по всіх Z_1 секціях.

У четвертому рядку розташовані фазні зони робочого розподілу із числом пар полюсів $p_1 = 4$, які й отримані підсумовуванням індексів базового й модуляційного розподілів для всіх АКС.

Таким чином, у результаті модуляції базового розподілу із числом пар полюсів p_0 просторовою модуляційною хвилею із числом пар полюсів p_m утворюється результуюча обмотка із числом пар полюсів p_1 .

Для перемикавання обмотки з $p_1 = 4$ на число пар полюсів $p_2 = 1$ варто змінити фазу струму на 180° у секціях, що попадають під парні зони хвилі модуляції.

У п'ятому рядку наведений розподіл обмотки для другого числа пар полюсів $p_2 = 1$.

Для визначення індексів другого модуляційного розподілу із числом пар полюсів $p_2 = 1$ досить змінити індекси фаз АКС першого робочого розподілу з $p_1 = 4$ на три одиниці, якщо вони попадають під парні зони хвилі модуляції (у таблиці ці зони виділені). Інші індекси залишаються без зміни.

На рис. 1.5 показане з'єднання секцій двошвидкісної обмотки, що перемикається за схемою Y/YU .

Обмотка має шість вивідних затискачів: 8С1, 8С2, 8С3, 2С1, 2С2, 2С3.

Для роботи обмотки із числом полюсів $2p_1 = 8$ трифазну напругу подають на затискачі 8С1, 8С2, 8С3, обмотка з'єднана в U . Для перемикання на друге число полюсів $2p_2 = 2$ трифазну напругу необхідно подати на затискачі 2С1, 2С2, 2С3 при з'єднанні затискачів 8С1, 8С2, 8С3. Обмотка перез'єднується в схему UU із двома паралельними гілками у фазі.

При такій перемиканні міняється фаза струму на 180° у половині секцій обмотки. Схема складена з урахуванням цього. У праві частини кожної фази обмотки включені секції, у яких фаза струму не міняється при перемиканні числа полюсів, а в ліві частини включені секції, у яких міняється напрямок струму.

На схемі секції об'єднані в котушкові групи, які зображені прямокутниками із вказівкою їх початків (н) та кінців (к).

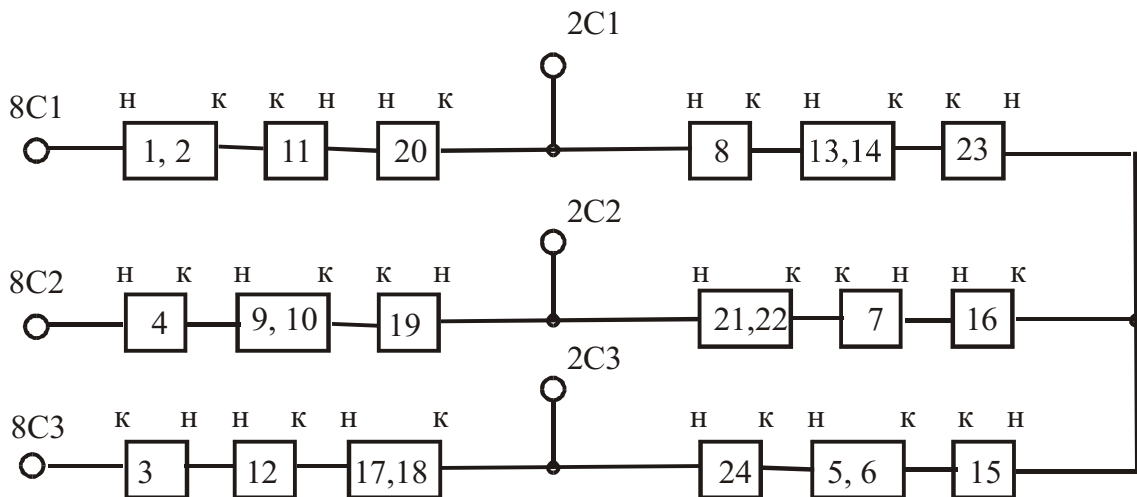


Рис. 1.5. Схема з'єднання котушкових груп двошвидкісної обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$. Схема комутації U/UU

По своїй конструкції така обмотка може бути виконана тільки двошаровою.

На рис. 1.6 наведені векторні діаграми пазових ЕРС трьох фаз для кожного із чисел полюсів двошвидкісної обмотки. З діаграм видно, що побудована обмотка симетрична.

Коефіцієнти розподілу двошвидкісної обмотки відповідно рівні

$$\text{при } 2p_1 = 8: \quad k_{r_8} = 0,901;$$

$$\text{при } 2p_2 = 2: \quad k_{r_2} = 0,83.$$

При двошаровому виконанні ППО крок обмотки може дорівнювати $y_1=9$ або $y_2=10$.

За результатами гармонійного аналізу МРС на кожному числі полюсів можна оцінити електромагнітні властивості отриманої двошвидкісної обмотки. Величини обмотувальних коефіцієнтів по робочих гармоніках дозволяють розрахувати співвідношення індукцій у повітряному зазорі при перемиканні полюсів.

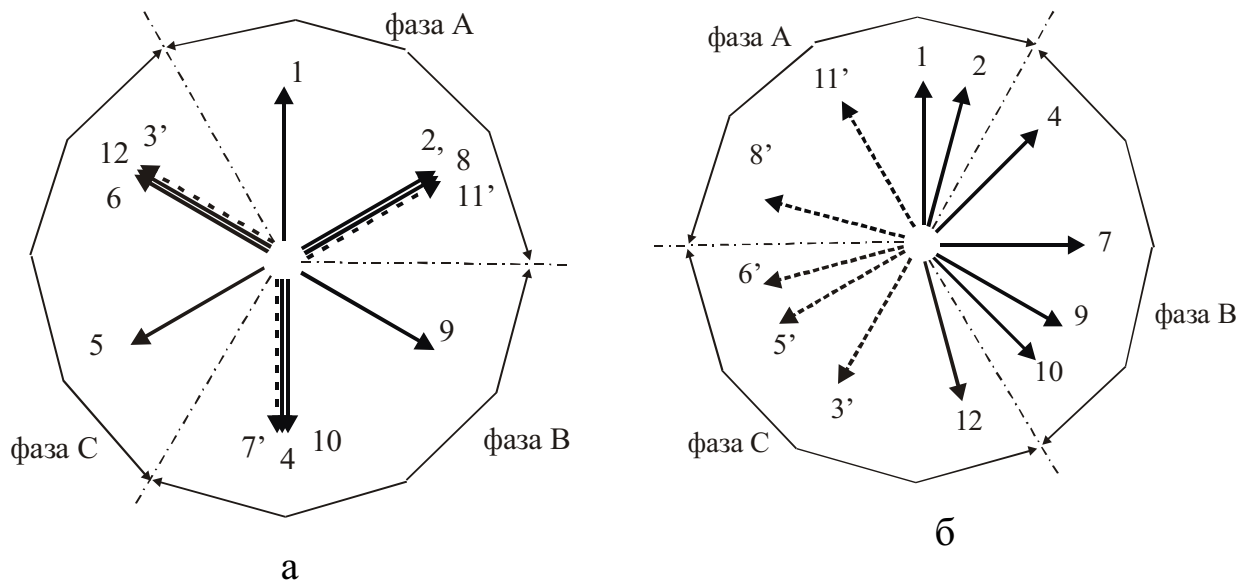


Рис. 1.6. Векторні діаграми ЕРС фаз ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$

а) $2p_1 = 8$; б) $2p_2 = 2$

Розрахунки обмотки проведені для кроків $y_1=9$, $y_2=10$. Коефіцієнти скорочення із цими кроками:

при $y=9$:

$$k_{y_8} = 1,0; \quad k_{y_2} = 0,924$$

при $y=10$:

$$k_{y_8} = 0,866; \quad k_{y_2} = 0,965.$$

Співвідношення індукцій при перемиканні полюсів з $2p_1=8$ на $2p_2=2$ при схемі комутації У/УУ:

$$\frac{B_{\delta 2(2p_1=8)(Y)}}{B_{\delta 2(2p_2=2)(YY)}} = \frac{4 \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{w_2}}{1 \cdot k_{w_8}} = 2 \cdot \frac{k_{w_2}}{k_{w_8}}.$$

У табл. 1.3. наведені коефіцієнти розподілу й обмотувальні коефіцієнти k_{w_8} , k_{w_2} для ППО при різних кроках, а також співвідношення індукцій у повітряному зазорі при перемиканні полюсів обмотки за схемою У/УУ.

Таблиця 1.3

Обмотувальні коефіцієнти й співвідношення індукцій у повітряному зазорі для двошвидкісної ППО зі співвідношенням чисел полюсів

$$2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$$

y	k_{y_8}	k_{y_2}	k_{r_8}	k_{r_2}	k_{w_8}	k_{w_2}	$B_{\delta 8}/B_{\delta 2}, У/УУ$
9	1,0	0,924	0,901	0,83	0,901	0,777	1,72
10	0,866	0,965			0,78	0,801	2,05

Аналізуючи дані табл. 1.3 можна зробити висновок, що дана ППО при схемі комутації $Y/Y\bar{Y}$ підходить для двигуна з постійною потужністю на валу $P_2 = const$.

1.4. Зрушення хвилі модуляції

Базовий і модуляційний розподіли мають дискретний характер. Зрушення кожного із цих розподілів може привести до одержання нових варіантів двошвидкісних обмоток. Умовимося робити зрушення модуляційного розподілу щодо нерухомого базового.

При послідовному зрушенні модуляційного розподілу із кроком в одне зубцеве ділення розподіл границі зон модуляції можуть займати Z_1 просторових положень, які визначають Z_1 варіантів розподілу фазних зон двошвидкісної обмотки.

Серед цього числа варіантів частина може характеризуватися рівнозначними числовими рядами й, отже, ідентичними в електромагнітному відношенні властивостями.

Число всіх можливих оригінальних варіантів обчислюється по виразу

$$N_{\text{дон}} = Z_1 / 12.$$

Зрушення модуляційного розподілу може здійснюватися в будь-якому обраному напрямку.

Для розглянутого приклада 1

$$N_{\text{дон}} = Z_1 / 12 = 24 / 12 = 2.$$

У табл. 1.4 показані розподіли нового варіанта двошвидкісної полюсоперемикальної обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$ при зрушенні хвилі модуляції на один зубцевий розподіл уліво.

Таблиця 1.4

Формування ППО зі зрушенням хвилі модуляції

$$Z_1 = 24, \quad 2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
p_b	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
p_m	0		1			2			3			4			5			0						
p_1	0	1	3	4	5	1	2	3	5	0	1	3	4	5	1	2	3	5						
p_2	0	1	0	1	2	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	0	5						

Векторні діаграми ЕРС фаз ППО показані на рис. 1.7.

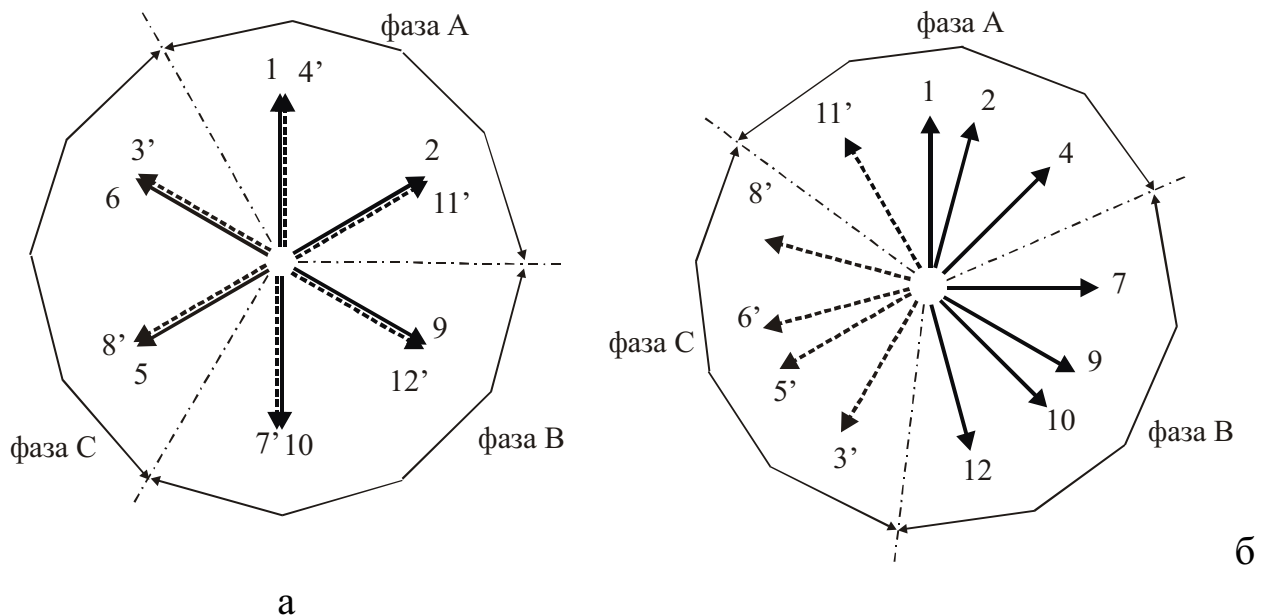


Рис. 1.7. Векторні діаграми ЕРС фаз ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$

зі зрушенням хвилі модуляції: а) $2p_1 = 8$; б) $2p_2 = 2$

Коефіцієнти розподілу нового варіанта двошвидкісної обмотки відповідно рівні

$$\text{при } 2p_1 = 8: \quad k_{r_8} = 0,866;$$

$$\text{при } 2p_2 = 2: \quad k_{r_2} = 0,892.$$

Коефіцієнти розподілу по робочих гармоніках для розглянутих варіантів ППО без зрушення хвилі модуляції й зі зрушенням різні, що свідчить про різні електромагнітні властивості відповідних обмоток.

Схема комутації ППО зі зрушенням хвилі модуляції показана на рис. 1.8.

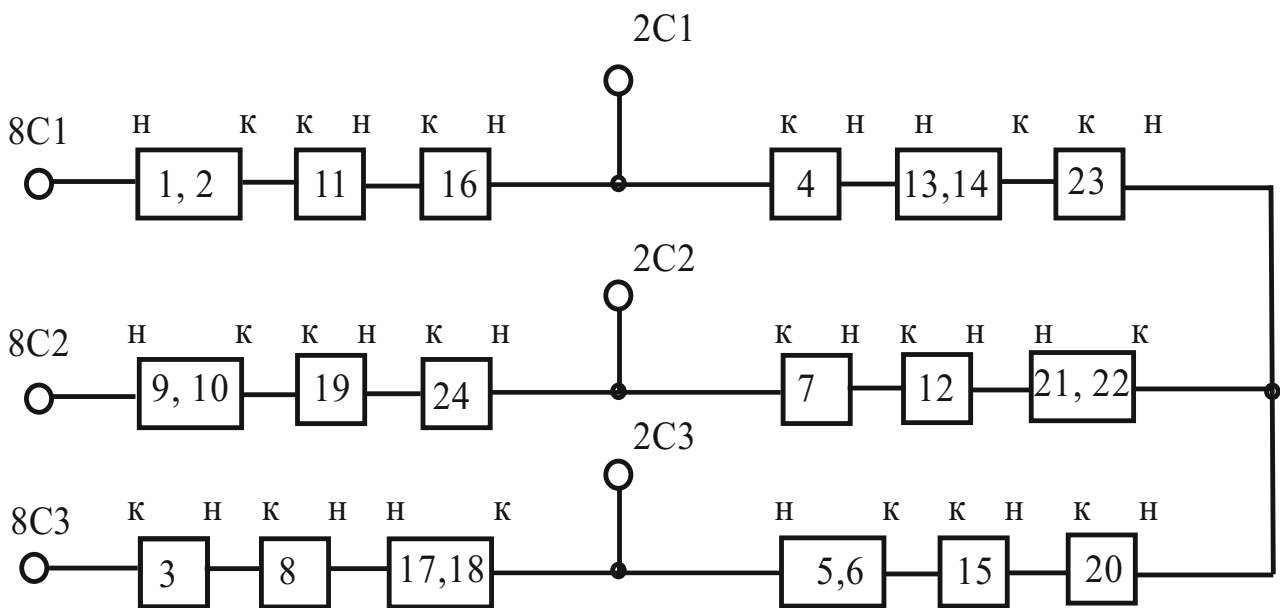
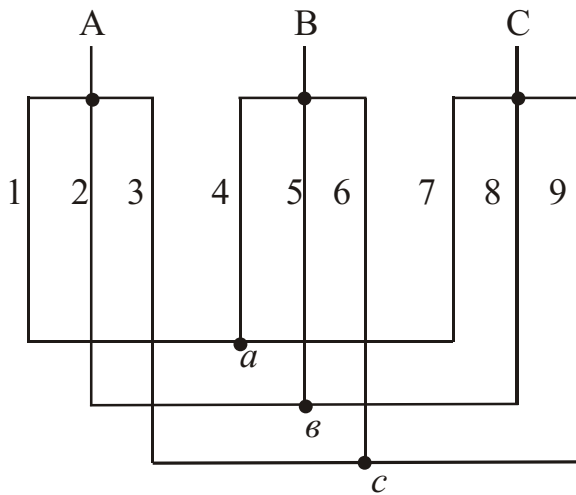


Рис. 1.8. Схема комутації ППО зі зрушенням хвилі модуляції

$$2p_1 : 2p_2 = 8 : 2$$

1.5. Схема комутації УУУ/УУУ для двошвидкісних ППО

Схема комутації УУУ/УУУ показана на рис. 1.9 [32, 43, 56].



ППО має шість незалежних затискачів:

A, B, C - для однієї частоти обертання з $2p_1$;

a, b, c - для другої частоти обертання с. $2p_2$

Позначення для різних полюсів можна міняти навпаки.

Рис. 1.9. Схема комутації ППО УУУ/УУУ

Для роботи обмотки із числом полюсів $2p_1$ живлення подається на затискачі A, B, C, а для роботи із числом полюсів $2p_2$ живлення подається на затискачі a, b, c.

Закон перемикування фаз для схеми УУУ/УУУ (рис. 1.9) записаний у вигляді табл. 1.5.

При перемикуванні обмотки з одного числа пар полюсів на інше при схемі комутації УУУ/УУУ відбувається зміна фази струму без зміни напрямку струму.

Таблиця 1.5

Закон перемикування фаз для схеми УУУ/УУУ

№ галузі схеми УУУ/УУУ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$2p_1$	A	A	A	B	B	B	C	C	C
$2p_2$	a	b	c	a	b	c	a	b	c

Особливістю схеми УУУ/УУУ є те, що ППО на обох числах полюсів мають по три паралельні гілки у фазі ($a=3$). Для ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ і $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ для $2p_2 = 4$ й $2p_1 = 8$ порушується умова симетрії $2p/a \neq$ цілому числу.

При не дотриманні цієї умови ЕРС паралельних гілок фаз (E_{11}, E_{12}, E_{13}) не рівні по величині й не збігаються по напрямку (рис. 1.10).

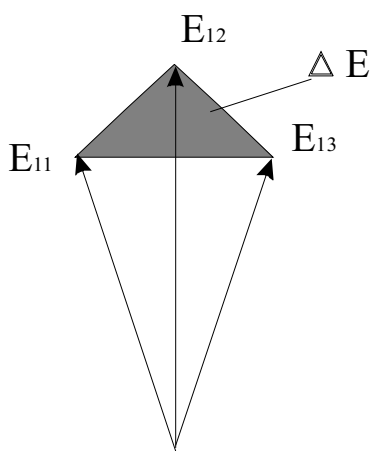


Рис. 1.10. Векторна діаграма зрівняльних ЕРС у фазі обмотки

Між кінцями векторів ЕРС паралельних гілок фаз утворюється трикутник зрівняльних ЕРС [1].

Під дією ЕРС по гілках схеми обмотки будуть протікати зрівняльні струми, які приводять до додаткових втрат у машині, шуму й вібрації. Величина зрівняльного струму залежить від величин опорів контурів, по яких протікають зрівняльні струми.

Для зменшення зрівняльних струмів необхідно, насамперед, розрахувати величини ЕРС, а також вживати заходів для зменшення зрівняльних ЕРС. Зрівняльні ЕРС визначаються по потокозчепленню тільки робочої гармоніки магнітного поля з контурами замикання зрівняльних струмів. З огляду на обов'язкову взаємну симетрію трьох фаз обмотки щодо магнітного поля з порядком $\nu = p$, всі зрівняльні ЕРС обмотки можна представити у вигляді симетричних складових двох трифазних систем

$$\Delta E_{np} = 1/3(\dot{E}_{11} + a\dot{E}_{12} + a^2\dot{E}_{13});$$

$$\Delta E_{звор} = 1/3(\dot{E}_{11} + a^2\dot{E}_{12} + a\dot{E}_{13}),$$

ΔE_{np} , $\Delta E_{звор}$ - складової прямої й зворотної послідовностей фазних ЕРС.

Результуюча величина зрівняльної ЕРС

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{np}^2 + \Delta E_{звор}^2}.$$

Відносні величини зрівняльної ЕРС

$$\Delta E_{np}^* = \Delta E_{np} / E_0, \quad \Delta E_{звор}^* = \Delta E_{звор} / E_0,$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta E_{np}^{*2} + \Delta E_{звор}^{*2}},$$

де $E_0 = 1/3(\dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13})$.

Розрахунок ЕРС ΔE^* робиться на основі методу симетричних складових по програмі «ДЕЕ», що розроблена на кафедрі «Електричних машин» ОНПУ для персональних комп'ютерів.

Для розрахунку зрівняльних ЕРС по цій програмі необхідно в якості вихідних даних задати числа пазів, які належать трьом паралельним гілкам однієї фази при $2p_2 = 4$ або при $2p_1 = 8$.

Крім розрахунків ΔE_{np}^* , $\Delta E_{звор}^*$, ΔE^* програма «ДЕЕ» дозволяє одержати результати гармонійного аналізу МРС ППО для $2p_1$ й $2p_2$ по всіх гармоніках до $\nu = Z_1 \pm p$.

Коефіцієнт розподілу для ν -х гармонік МРС фаз розраховуються по формулі

$$k_{R\nu} = \frac{1}{S_\Phi} \sqrt{\left[\sum_{S_\Phi} \cos\left(N_j \cdot \frac{2\pi}{z_1} \cdot \nu \right) \right]^2 + \left[\sum_{S_\Phi} \sin\left(N_j \cdot \frac{2\pi}{z_1} \cdot \nu \right) \right]^2},$$

де S_ϕ - число АКС у фазі обмотки на періоді повторення;

N_j - порядок номера АКС зі знаком включення;

$\frac{2\pi}{z_1} \nu$ - кут зрушення між АКС для вищих гармонік.

По наведеному виразу розраховують коефіцієнти розподілу фаз А, В, С, а потім коефіцієнти розподілу МРС прямої й зворотної послідовностей по всім ν - м гармонікам

$$k_{r_{np \nu}} = 1/3(k_{r_{A\nu}} + ak_{r_{B\nu}} + a^2k_{r_{C\nu}});$$

$$k_{r_{звор \nu}} = 1/3(k_{r_{A\nu}} + a^2k_{r_{B\nu}} + ak_{r_{C\nu}}).$$

Коефіцієнт скорочення

$$k_{y\nu} = \sin\left(\nu \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau}\right).$$

Обмотувальні коефіцієнти прямої й зворотної послідовностей

$$k_{w_{np \nu}} = k_{r_{np \nu}} \cdot k_{y\nu};$$

$$k_{w_{звор \nu}} = k_{r_{звор \nu}} \cdot k_{y\nu}.$$

Для всіх ППО зі схемою комутації УУУ / УУУ, представлених у розділах, будуть проведені розрахунки по програмі «ДЕЕ».

1.6. Синтез ППО зі схемою комутації УУУ / УУУ методом ФМ

Для приклада розглянемо синтез ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у числі пазів статора $Z_1 = 36$.

Розрахуємо:

- число пар полюсів базової обмотки:

$$p_{\bar{0}} = p_1 = 3;$$

- число циклів модуляційного розподілу по формулі (1.17)

$$p_m = \pm p_2 - p_6 \quad \pm 2 - 3.$$

Одержуємо два варіанти для числа циклів модуляційного розподілу

$$p_m = -1 \quad \text{и.} \quad p'_m = -5$$

Число пазів на полюс і фазу базової обмотки й хвилі модуляції для першого варіанта обмотки з $p_m = -1$

$$q_6 = \frac{Z_1}{6 \cdot p_6} = \frac{36}{6 \cdot 3} = 2;$$

$$q_m = \frac{Z_1}{3 \cdot p_m} = \frac{36}{3 \cdot (-1)} = -12.$$

Знак “-” означає, що змінюється чергування фаз А, В, С на А, С, В.

Складаємо числові ряди в межах Z_1 :

- для базової обмотки: 2, 2, 2; 2, 2, 2, 2, 2, 2; 2, 2, 2, 2, 2, 2; 2, 2, 2; 2, 2, 2;
А,С',В,А',С,В', А,С',В,А',С,В', А,С',В,А',С,В';

- для хвилі модуляції 12, 12, 12;

А, С, В.

Синтез ФМ обмотки розрахунково-графічним способом наведений у табл. 1.6.

З табл. 1.6 запишемо номери АКС, які входять у відповідні гілки перемикування схеми УУУ/УУУ:

1 гілка: 1, 2, -7, -8; 2 гілка: 25, 26, -31, -32;

3 гілка: 13, 14, -19, -20; 4 гілка: 17, 18, -23, -24;

5 гілка: 5, 6, -11, -12; 6 гілка: 29, 30, -35, -36;

7 гілка: 33, 34, -27, -28; 8 гілка: 21, 22, -15, -16;

9 гілка: 9, 10, -3, -4.

Формування ФМ обмотки зі схемою комутації УУУ / УУУ

$$Z_1 = 36, \quad 2p_1 : 2p_2 = 6 : 4, \text{ вар. 1}$$

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

Схема з'єднання котушкових груп наведена на рис. 1.11.

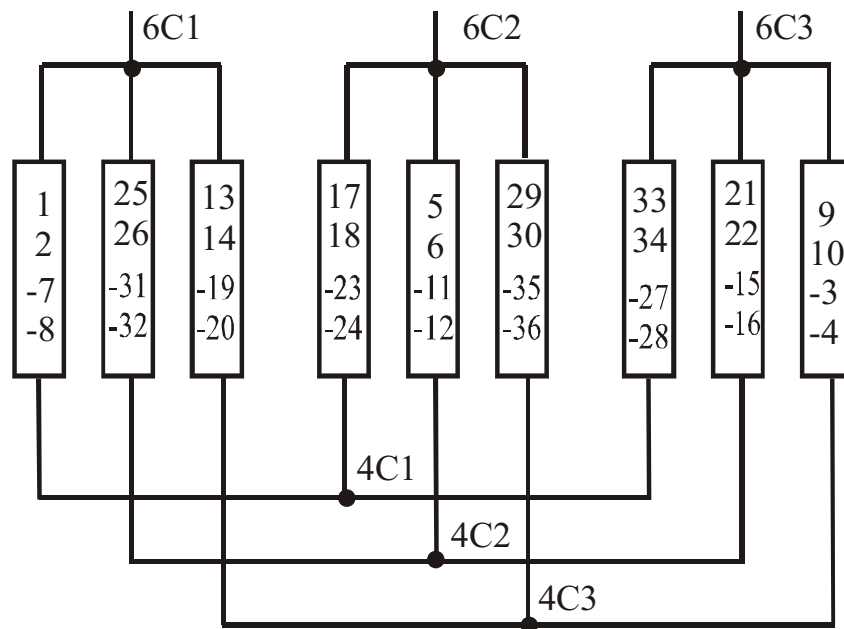


Рис. 1.11. Схема з'єднання котушкових груп ППО зі співвідношенням

полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ $p_m = -1$, УУУ / УУУ, вар. 1

Сформована обмотка може бути виконана одношарової з концентричних котушкових груп із кроками $y_1 = 7$ і $y_2 = 5$.

Розглянемо формування ППО для другого варіанта хвилі модуляції $p'_m = -5$.

Для цього розрахуємо число пазів на полюс і фазу модуляційного розподілу

$$q_m = \frac{Z_1}{3 \cdot p_m} = \frac{36}{3 \cdot (-5)} = -\frac{12}{5} = -2\frac{2}{5}.$$

Число q_m вийшло дробовим. Числовий ряд для модуляційного розподілу симетрируємо на його періоді повторення. Наприклад, запишемо в такому виді:

2, 3, 2, 3, 2.

Таблиця 1.7

Формування ППО зі схемою УУУ / УУУ, $Z_1=36$, $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$,

$p'_m = -5$, вар. 2

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

У табл. 1.7 наведено формування ППО для цього варіанта числового ряду модуляційного розподілу. Номера АКС, які входять у гілки перемикання схеми УУУ/УУУ :

1 гілка: -31, 1, 2, -8; 2 гілка: -7, 13, 14, -20; 3 гілка: -19, 25, 26, -32;
 4 гілка: 5, -11, -12, 18; 5 гілка: 17, -23, -24, 30; 6 гілка: 29, -35, -36, 6;
 7 гілка: 21, 22, -27, -28; 8 гілка: 33, 34, -3, -4; 9 гілка: 9, 10, -15, -16.

По програмі «ДЕЕ» розраховуємо зрівняльні ЕРС і обмотувальні коефіцієнти. Результати розрахунків варіантів ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ представлені в табл. 1.8.

У табл. 1.8 наведені середні значення обмотувальних коефіцієнтів ППО $k_{wcp} = 0,5(k_{w(2p=6)} + k_{w(2p=4)})$, а також співвідношення індукцій у повітряному зазорі

$$\frac{B_{\delta(2p=6)}}{B_{\delta(2p=4)}} = \frac{3 \cdot E_{2p=6} \cdot k_{w(2p=4)} \cdot w_{\phi(2p=4)}}{2 \cdot E_{2p=4} \cdot k_{w(2p=6)} \cdot w_{\phi(2p=6)}} = \frac{3 \cdot k_{w(2p=4)}}{2 \cdot k_{w(2p=6)}}$$

Таблица 1.8

Дані розрахунків обмотувальних коефіцієнтів і ΔE варіантів

ППО, $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, УУУ/УУУ

вар.	2p	k_r	ΔE^*_{np}	$\Delta E^*_{звор}$	ΔE^*	k_w	k_{wcp}	$\frac{B_{\delta(2p=6)}}{B_{\delta(2p=4)}}$
1	6	0,966	0,185	0,227	0,292	0,966	0,892	1,27
	4	0,819				0,819		
2	6	0,966	0,121	0,079	0,144	0,966	0,892	1,27
	4	0,819				0,819		

Варіанти ППО мають однакові коефіцієнти розподілу, але відрізняються величиною різницевої ЕРС при $2p = 4$.

2. СИНТЕЗ ДВОШВИДКІСНИХ ППО ТАБЛИЧНО-ВЕКТОРНИМ СПОСОБОМ

Основною задачею проектування ППО є пошук раціонального розподілу активних котушкових сторін (АКС) обмотки по розточенню статора й гілкам схеми зовнішньої комутації.

При синтезі методом ФМ двошвидкісних обмоток, які перемикаються за схемою Y/YU або Δ/YU , при кратності трьом одного із чисел пар полюсів, обмотка виходить несиметричною.

Для формування симетричних по робочій гармоніці розподілів ППО на обох числах пар полюсів застосовують таблично-векторний спосіб (ТВС).

Таблично-векторний спосіб базується на використанні векторних діаграм пазових ЕРС, записаних у табличній формі [4].

Вихідними даними для побудови таблиць активних котушкових сторін двошвидкісний обмотки є числа пазів статора Z_1 й співвідношення чисел полюсів $2p_1 : 2p_2$.

При синтезі ППО зі схемою комутації Δ/YU або Y/YU у таблиці включають АКС 120-градусних фазних зон (ФЗ) для половини числа пазів статора.

2.1. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ зі схемою комутації Y/YU або Δ/YU

Розглянемо синтез двошвидкісної ППО в $Z_1 = 36$ зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ і схемою комутації Δ/YU .

Для цього побудуємо зірки пазових ЕРС для чисел полюсів $2p_1 = 6$ і $2p_2 = 4$ в половині пазів $Z_1/2$.

Визначаємо кути зрушення між ЕРС, що наводяться у котушках сусідніх пазів в електричних градусах:

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

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

На зірках пазових ЕРС (рис. 2.1) проводимо осі, які розділяють обмотку на 120° фазні зони (ФЗ).

Номери АКС, які входять в 120° фазні зони, записуємо у вигляді таблиці.

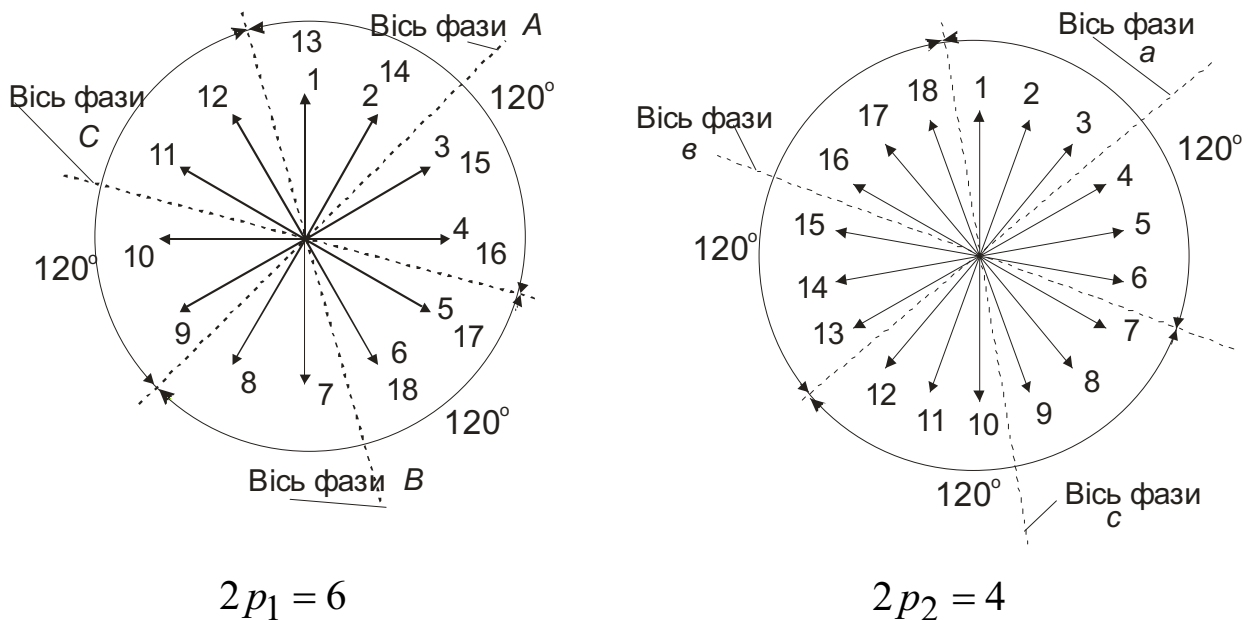


Рис. 2.1. Зірки пазових ЕРС

У перший рядок записуються номери АКС фази А 120° ФЗ.

У наступні рядки фази А записуються номери АКС, які мають однакову фазу або зрушені на 180° відносно їх. Останнім АКС необхідно привласнити знак « - ».

При $2p_1 = 6$ фазі А належать АКС із номерами з 1 по 4 та з 13 по 16, а також АКС, ЕРС яких зрушені на кут 180° відносно їх, тобто з 7 по 10. Останнім номерам АКС привласнюють знак « - ».

Аналогічні записи АКС робимо для двох інших фаз при $2p_1 = 6$ й трьох фаз при $2p_2 = 4$. Таблична форма запису АКС для співвідношення полюсів 6:4 у половині пазів ($Z_1/2$) представлена в табл. 2.1.

АКС, які перебувають у вертикальних стовпцях різних фаз, мають кут зрушення 120° , наприклад АКС із номерами 1, 5, 9 при $2p_1 = 6$ або АКС із номерами 1, 13, 7 при $2p_2 = 4$.

Для синтезу двошвидкісної обмотки необхідно виділити загальні номери АКС у фазах А, В та С для двох чисел пар полюсів. Кожній фазі обмотки в половині пазів статора належать $Z_1/6$ котушок, тобто 6 АКС у даному прикладі.

Тому для одержання симетричної обмотки необхідно в кожній фазі виділити по 6 неповторюваних номерів АКС (без обліку знака) таким чином, щоб виділені АКС займали однакове положення щодо границь фазних зон (або вертикальних границь табл. 2.1).

У цьому випадку буде рівність коефіцієнтів розподілу фаз обмотки по робочих гармоніках для кожного із чисел пар полюсів, а кут зрушення 120° між осями фаз вийде автоматично.

Секції, які належать різним фазам ППО, позначені в табл. 2.1 різним штрихуванням.

Таблиця 2.1

Табличний запис АКС і формування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$

$2p_1 = 6$					$2p_2 = 4$						
<i>A</i>	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	<i>a</i>
	13	14	15	16	-10	-11	-12	-13	-14	-15	
	-7	-8	-9	-10							
<i>B</i>	5	6	7	8	13	14	15	16	17	18	<i>b</i>
	17	18	19	20	-4	-5	-6	-7	-8	-9	
	-11	-12	-13	-14							
<i>C</i>	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12	<i>c</i>
	-3	-4	-5	-6	-16	-17	-18	-1	-2	-3	
	-15	-16	-17	-18							

Виділені номери АКС дозволяють записати числовий ряд двошвидкісної обмотки зі співвідношенням чисел полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ для половини пазів статора $Z_1/2$ (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Числовий ряд ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ для $Z_1/2 = 18$

Числовий ряд	4	4	4	1	2	2	1
Фази при $2p_1 = 6$	A (0)	B (2)	C (4)	B' (5)	A (0)	C' (1)	B (2)
Фази при $2p_2 = 4$	<i>a</i> (0)	<i>b</i> ' (5)	<i>c</i> (4)	<i>b</i> (2)	<i>a</i> ' (3)	<i>c</i> ' (1)	<i>b</i> (2)

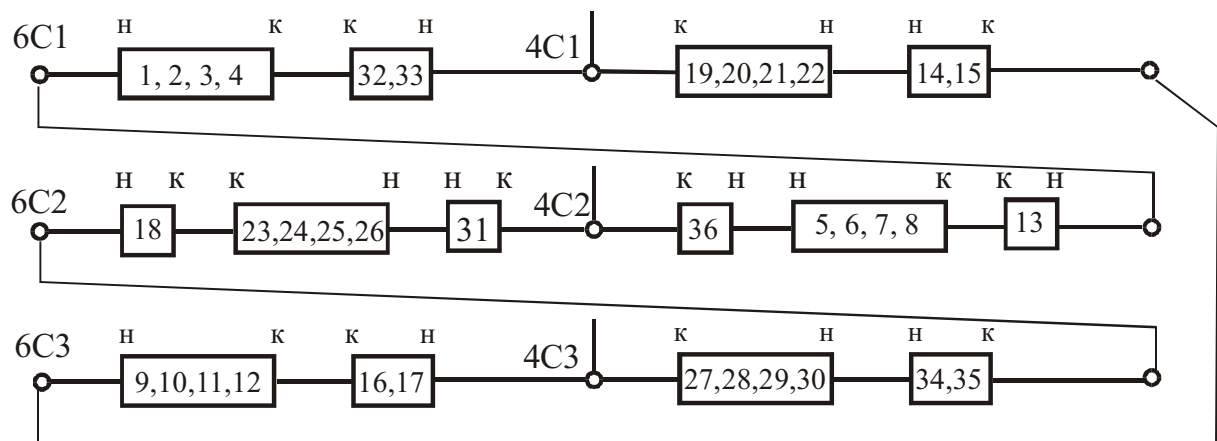
Для другої половини пазів числовий ряд повторюється. Розподіл по фазах для $2p_2 = 4$ буде таким же як і для першої половини обмотки, а для $2p_1 = 6$ змінюється на 180° . Розподіл пазів по фазах для повного числа Z_1 наведений у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Розподіл пазів по фазах ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ для Z_1

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

Схема сполучення котушкових груп ППО показана на рис. 2.2.

Рис. 2.2. Схема сполучення котушкових груп ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у $Z_1 = 36$ зі схемою комутації $\Delta / УУ$

У ліві гілки схеми включені котушки, фаза струму в яких не змінюється при перемиканні числа полюсів, а в праві гілки схеми включені котушки, фаза струму в яких міняється на 180° (у табл. 2.3 номери АКС цих котушок виділені сірими кольорами).

Схема комутації $\Delta / УУ$ має 6 вивідних кінців. Для роботи на $2p_1 = 6$ живлення подається на затиски 6C1, 6C2, 6C3, обмотка з'єднується у Δ .

Для роботи на $2p_2 = 4$ живлення подається на затискачі 4С1, 4С2, 4С3 при одночасному з'єднанні затискачів 6С1, 6С2, 6С3. Виходить схема сполучення УУ.

Двошвидкісна обмотка, яка розглянута в даному прикладі, по своїй конструкції може бути тільки двошаровою.

2.2. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ зі схемою комутації У/УУ або Δ /УУ

Розглянемо синтез двошвидкісної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у $Z_1 = 36$ зі схемою комутації Δ /УУ.

Побудуємо зірку пазових ЕРС для $2p_1 = 8$ в половині пазів $Z_1/2$.

Кут зрушення між ЕРС сусідніх пазів при $2p_1 = 8$:

$$\alpha_{(2p=8)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 4}{36} = 40 \text{ ел. град.}$$

Зірка пазових ЕРС для $2p_1 = 8$ наведена на рис. 2.3.

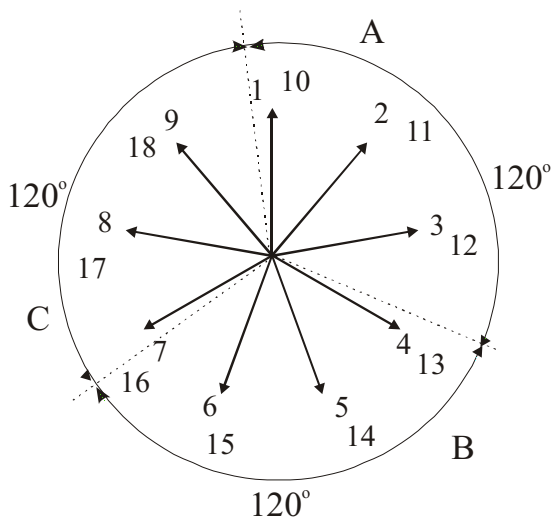


Рис. 2.3. Зірка пазових ЕРС
для $2p_1 = 8$

У табл. 2.4 позначені різним штрихуванням загальні й не повторювані номери АКС у фазах А, В, С та а, в, с для двох чисел пар полюсів.

Кожній фазі обмотки в половині пазів статора належать число АКС

$$Z_1 / 6 = 36 / 6 = 6.$$

Таблична форма запису АКС для обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у половині пазів ($Z_1/2 = 18$) представлена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Табличний запис АКС і синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 36$

		$2p_1 = 8$						$2p_2 = 6$							
A		1		2		3		1	2	3	4	a			
		10		11		12		13	14	15	16				
			-6		-7		-8	-7	-8	-9	-10				
			-15		-16		-17								
B		4		5		6		9	10	11	12	b			
		13		14		15		-3	-4	-5	-6				
			-9		-10		-11	-15	-16	-17	-18				
			-18		-1		-2								
C		7		8		9		5	6	7	8	c			
		16		17		18		17	18	19	20				
			-3		-4		-5	-11	-12	-13	-14				
			-12		-13		-14								

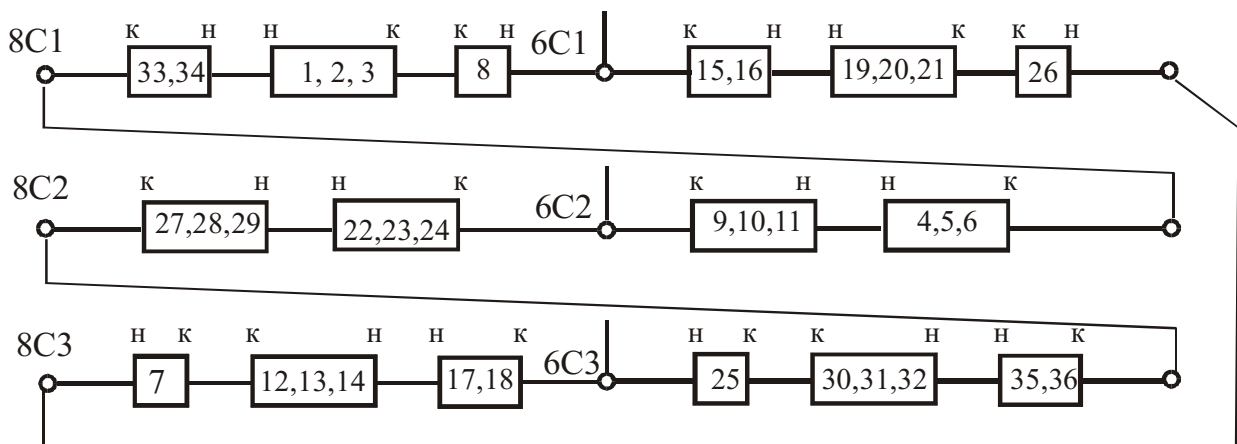
Позначені АКС займають однакове положення щодо вертикальних границь таблиці, що гарантує рівність коефіцієнтів розподілу по робочих гармоніках на кожному із чисел пар полюсів ППО.

Розподіл пазів по фазах для повного числа Z_1 показаний в табл. 2.5. Сірим кольором виділені ті АКС, фаза струму в яких змінюється на 180° при перемиканні числа полюсів обмотки.

Розподіл пазів по фазах ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 36$

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

Схема сполучення котушкових груп наведена на рис. 2.4.

Рис. 2.4. Схема сполучення котушкових груп ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ в $Z_1 = 36$ і схемою комутації Δ/UU

Двошвидкісна обмотка, яка розглянута в даному прикладі, по своїй конструкції може бути як двошаровою, так і одношаровою, тому що кожна гілка перемикачання містить однакове число АКС із позитивними й негативними знаками.

Розглянемо синтез двошвидкісної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у $Z_1 = 72$.

Для цього побудуємо зірки пазових ЕРС для чисел полюсів $2p_1 = 8$, $2p_2 = 6$ у половині пазів $Z_1/2$ (рис. 2.5). На зірках пазових ЕРС проведемо осі, що розділяють обмотку на 120° фазні зони.

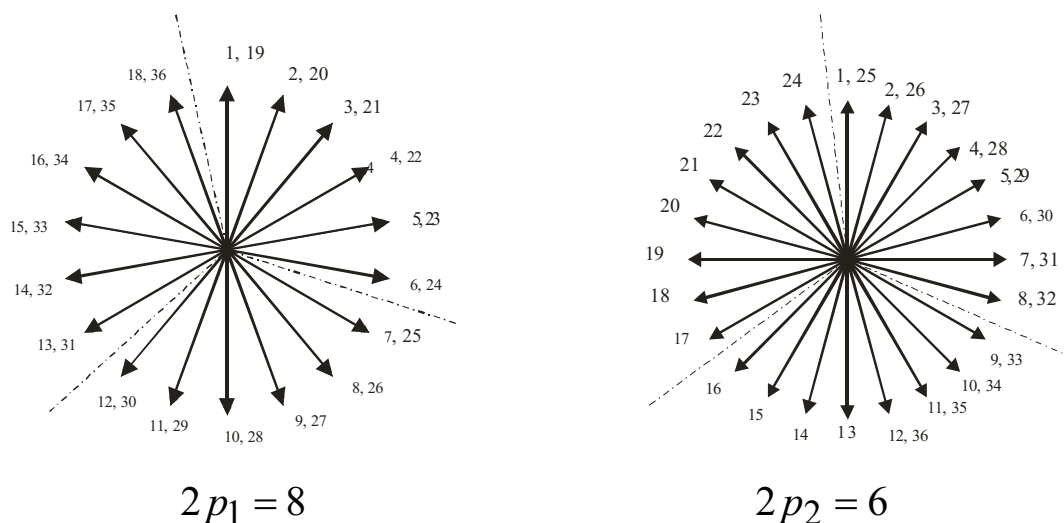


Рис. 2.5. Зірки пазових ЕРС, $Z_1 = 72$

У рядок таблиці записуються номери АКС фазної зони. Під кожним номером АКС записуються номери АКС, що мають однакову фазу, або зрушених на 180° стосовно них. Останнім АКС необхідно привласнити знак « - » (табл. 2.6).

Кожній фазі обмотки в половині пазів статора належать $Z_1/6$ котушок, тобто 12 АКС. Для одержання симетричної обмотки в кожній фазі виділимо по 12 АКС таким чином, щоб виділені АКС займали однакове положення щодо границь фазних зон. Ці секції позначені різним штрихуванням.

Позначені номери АКС дозволяють записати числовий ряд двошвидкісної обмотки 8:6 для половини пазів статора $Z_1/2$

6	6	2	1	1	5	6	5	1	1	2	Числовий ряд
А	В	С	А'	С	В'	С'	А'	С	В'	С	Фази при $2p_1 = 8$
a	в'	с	a'	с	в	с'	a	с	в'	с	Фази при $2p_2 = 6$

Для другої половини пазів числовий ряд повторюється. Розподіл по фазах для $2p_1 = 8$ зберігається таким же, як і для першої половини обмотки, а для $2p_2 = 6$ змінюється на 180° .

Таблиця 2.6

Синтез двошвидкісної ППО для $Z_1 = 72$ й $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$

Фаз а	$2p_1 = 8$						$2p_2 = 6$								
A	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	a
	19	20	21	22	23	24	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	
	-10	-11	-12	-13	-14	-15	25	26	27	28	29	30	31	32	
	-28	-29	-30	-31	-32	-33									
B	7	8	9	10	11	12	17	18	19	20	21	22	23	24	c
	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-29	-30	-31	-32	-33	-34	-35	-36	
	25	26	27	28	29	30	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	
	-34	-35	-36	-1	-2	-3									
C	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	e
	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28	
	-22	-23	-24	-25	-26	-27	33	34	35	36	-1	-2	-3	-4	
	31	32	33	34	35	36									

Розподіл по пазах і фазам у повнім числі пазів показаний у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Розподіл пазів по фазах ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 72$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
p_1	0			2			4			3	4	5			1			3			4	5	4													
p_2	0			5			4			3	4	2			1			0			4	5	4													
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
p_1	0			2			4			3	4	5			1			3			4	5	4													
p_2	3			2			1			0	1	5			4			3			1	2	1													

Схема сполучення котушкових груп ППО показана на рис. 2.6. Схема комутації має 6 вивідних кінців [23, 24, 33].

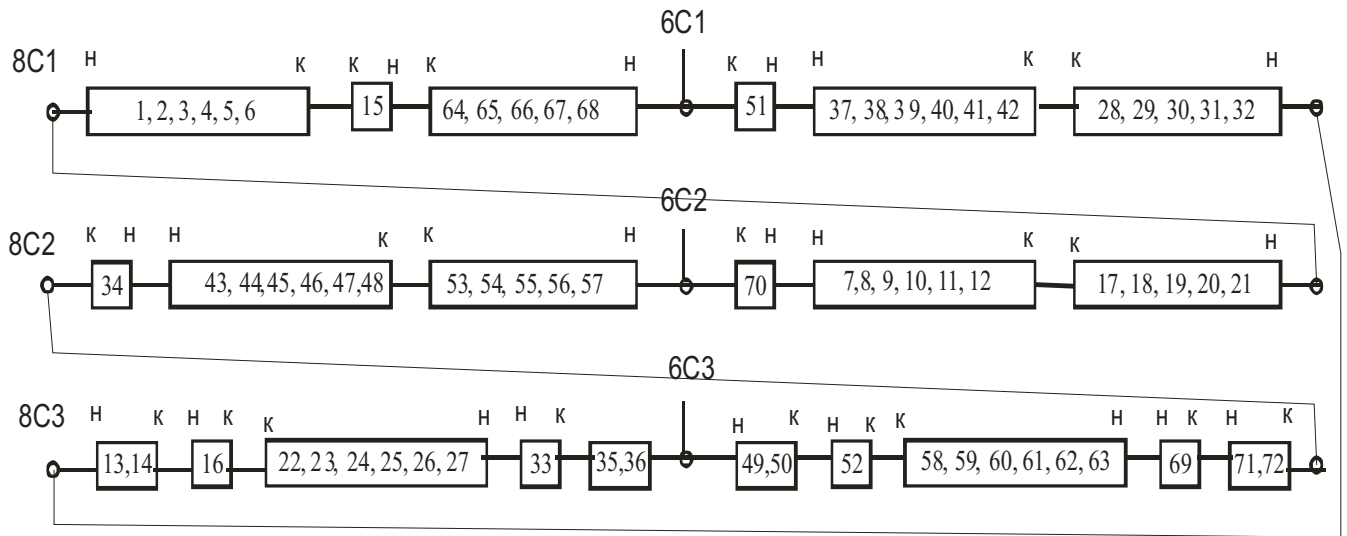


Рис. 2.6. Схема сполучення котушкових груп ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у $Z_1 = 72$ зі схемою комутації $\Delta / УУ$

Для роботи на $2p_1 = 8$ живлення подається на затискачі 8С1, 8С2, 8С3. Обмотка з'єднується у Δ Для роботи на $2p_2 = 6$ живлення подається на затискачі 6С1, 6С2, 6С3 і з'єднуються затискачі 8С1–8С2–8С3. Виходить схема сполучення УУ.

2.3. Синтез ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ і схемою УУУ / УУУ

При синтезі таких обмоток методом фазової модуляції у якості базового розподілу необхідно використати обмотку із числом полюсів $2p = 6$. У протилежному випадку ППО на $2p = 6$ виходить несиметричною.

Таблично-векторний спосіб (ТВС) дозволяє одержувати симетричні по робочій гармоніці ППО на обох числах пар полюсів.

Закон перемикавання фаз для схеми УУУ/УУУ був представлений у табл. 1.5.

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

Таблично-векторний спосіб 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.

2.3.1. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ в $Z_1 = 36$

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. 2.7). Визначаємо кути зрушення між ЕРС сусідніх пазів в електричних градусах:

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

$$\text{- при } 2p_2 = 4 \quad \alpha_{(2p=8)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ.$$

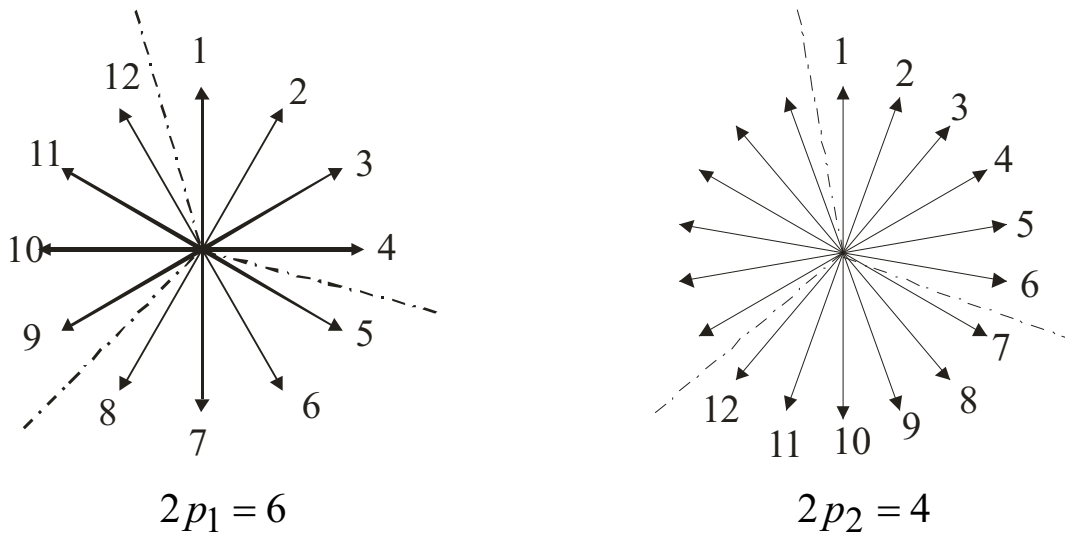


Рис. 2.7. Векторні діаграми пазових ЕРС для $Z_1/3 = 12$

Номера АКС, які входять в 120° фазні зони, записуємо у вигляді табл. 2.8.

У якості симетричної обмотки на $2p_1 = 6$ візьмемо стандартну обмотку з 60° фазною зоною та $q=2$.

Таблиця 2.8

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

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

Для одержання розподілу при $2p_2 = 4$ необхідно номери АКС фаз А, В, С при $2p_1 = 6$ передати без зміни знака АКС фазам *a*, *b*, *c* при $2p_2 = 4$, так як показано в табл. 2.8.

У розглянутому 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 жовтими кольорами);
- 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 зеленими кольорами);
- 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 червоними кольорами).

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

Розподіл на $2p_2 = 4$ в кожній наступній третині пазів має зрушення на 120° та 240° відносно розподілу в першій третині пазів.

Тому результуючий розподіл на $2p_2 = 4$ буде завжди симетричним по фазах.

Синтез обмотки робимо розрахунково-графічним способом. Для цього загальноприйняте позначення чергування фаз у зонах обмотки А, С', В, А', С, В' 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 двошвидкісної обмотки для повного числа пазів представлений у табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Розподіл пазів по фазах ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$, вар. 1,

УУУ/УУУ

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

При $2p_1 = 6$ розподіл АКС по фазах у кожній третині пазів у табл. 2.9 повторюється, а при $2p_2 = 4$ відрізняється на 120° та 240° , що еквівалентно додаванню цифр 2 і 4.

По отриманих розподілах формуються номери АКС по дев'яточ гілках схеми комутації УУУ/УУУ (табл. 2.10).

Таблиця 2.10

Номера АКС по гілках схеми УУУ/УУУ для ППО 6:4, вар.1

№ галузі	Закон перемикання	Номери АКС			
		1	2	3	4
1	$a-A$ (0-0 або 3-3)	1	2	-31	-32
2	$a-B$ (0-2 або 3-5)	5	6	-11	-12
3	$a-C$ (0-4 або 3-1)	-15	21	22	-28
4	$b-A$ (2-0 або 5-3)	-7	-8	13	14
5	$b-B$ (2-2 або 5-5)	17	18	-23	-24
6	$b-C$ (2-4 або 5-1)	-4	33	34	-7
7	$c-A$ (4-0 або 1-3)	-19	-20	25	26
8	$c-B$ (4-2 або 1-5)	29	30	-35	-36
9	$c-C$ (4-4 або 1-1)	-3	9	10	-16

Схема комутації котушкових груп першого варіанта ППО наведена на рис. 2.8 [26].

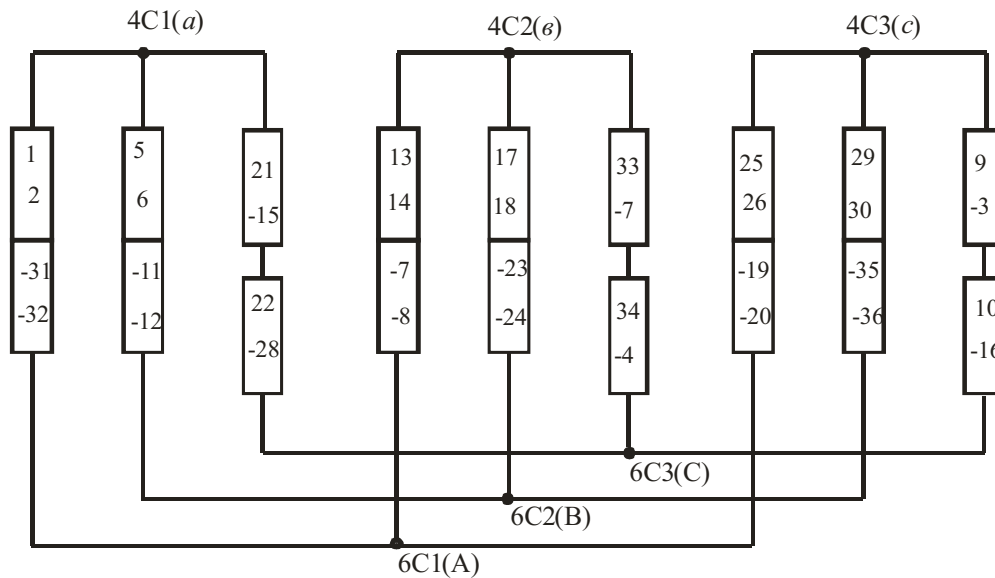


Рис. 2.8. Схема з'єднання котушкових груп ППО

$$2p_1 : 2p_2 = 6 : 4, Z_1 = 36, \text{ вар. 1, УУУ / УУУ}$$

Ця обмотка може бути одношаровою.

У ППО зі схемою комутації УУУ/УУУ при $2p_2 = 4$ й 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 «а» 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. 2.9 зображені векторні діаграми ЕРС гілок $a-A$, $a-B$, $a-C$. Геометричне підсумовування ЕРС паралельних гілок з наступним діленням на їхню арифметичну суму еквівалентно коефіцієнту розподілу гілки.

По програмі «ДЕЕ» розраховані коефіцієнти розподілу гілок і їхнє положення в просторі

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

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

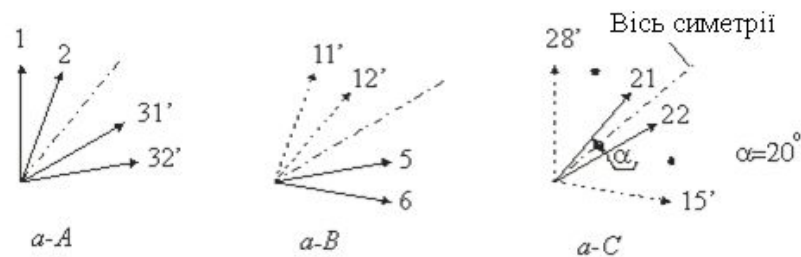


Рис. 2.9. Векторна діаграма ЕРС паралельних гілок фази «а» при $2p_2 = 4$

2.3.2. Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у $Z_1 = 54$

Розглянемо синтез двошвидкісної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ в $Z_1 = 54$ 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. 2.10). Визначаємо кути зрушення між ЕРС сусідніх пазів в електричних градусах:

- при $2p_1 = 6$
$$\alpha_{(2p=6)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 3}{54} = 20^\circ;$$

- при $2p_2 = 4$
$$\alpha_{(2p=8)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{54} = 23,33^\circ.$$

На зірках пазових ЕРС проводимо осі, які розділяють обмотку на 120° фазні зони.

Номери АКС, які входять в 120° фазні зони, записуємо у вигляді таблиці. У перший рядок записуються номери АКС 120° ФЗ фази А.

У наступні рядки фази А записуються номери АКС, які мають однакову фазу або зрушені на 180° відносно їх. Останнім АКС необхідно привласнити знак «-».

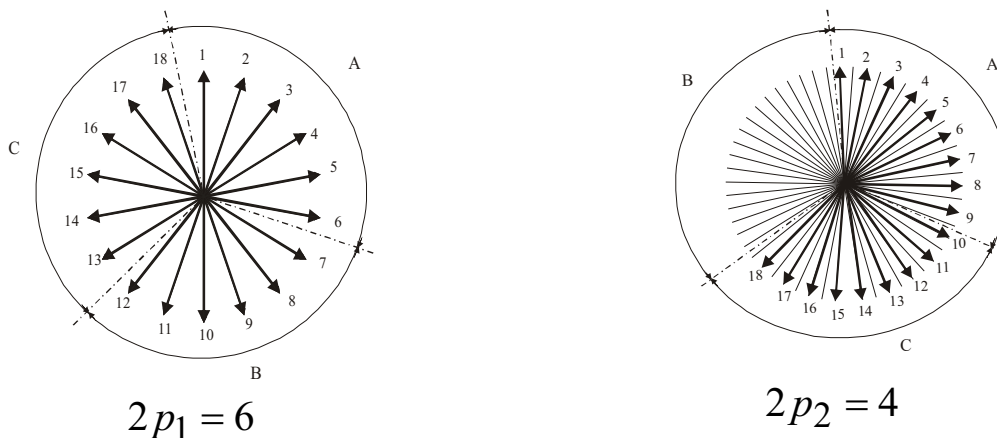


Рис. 2.10. Векторні діаграми пазових ЕРС для $Z_1/3 = 18$

При $2p_1 = 6$ до фази А належать АКС із номерами з 1 по 6, а також АКС, ЕРС яких зрушені на кут 180° відносно їх, тобто з 10 по 15. Останнім номерам АКС привласнюють знак « - » (табл. 2.11).

Зробимо аналогічні записи АКС для двох інших фаз при $2p_1 = 6$ й трьох фаз при $2p_2 = 4$. Таблична форма запису АКС, для співвідношення полюсів 6:4 у третині пазів ($Z_1/3$) представлена в табл. 2.11.

Синтез обмоток за допомогою ТВС при схемі комутації УУУ/УУУ можна здійснити в межах $1/3$ числа пазів статора. Це дозволяє скоротити число елементів таблиці при визначенні розподілу АКС обмотки.

У табл. 2.11 представлені номери АКС для однієї третини пазів $Z_1/3 = 18$ обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$.

Для синтезу варіантів ППО, насамперед, складаються симетричні розподіли обмотки з 120° ФЗ при $2p_1 = 6$.

Наприклад, у табл. 2.11 наведений один з можливих варіантів розподілу АКС обмотки при $2p_1 = 6$.

Таблиця 2.11

Синтез одношарової ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$ зі схемою комутації УУУ / УУУ, вар. 1

$2p_1 = 6$					$2p_2 = 4$										
А	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	а
	-10	-11	-12	-13	-14	-14	-15	-16	-17	-18					
В	7	8	9	10	11	10	11	12	13	14	15	16	17	18	с
	-16	-17	-18	-1	-2					-1	-2	-3	-4		
С	13	14	15	16	17	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	в	
	-4	-5	-6	-7	-8										

Для одержання розподілу при $2p_2 = 4$ необхідно номери АКС фаз А, В, С при $2p_1 = 6$ передати без зміни знака АКС фазам а, в, с при $2p_2 = 4$ як показано в табл. 2.11.

У даному прикладі:

- АКС фази «А» при $2p_1 = 6$ з номерами 2, 3, 4, -14 переходять у фазу «а» при $2p_2 = 4$, а АКС із номерами -10, -12 переходять у фазу «в» при $2p_2 = 4$ (АКС позначені жовтими кольорами);
- АКС фази «В» при $2p_1 = 6$ з номерами 7, 9, -17, -18 переходять у фазу «а» при $2p_2 = 4$, а АКС із номерами 11, -1 переходять у фазу «с» при $2p_2 = 4$ (АКС позначені зеленими кольорами);
- АКС фази «С» при $2p_1 = 6$ з номерами 13, 15, 16, переходять у фазу «с» при $2p_2 = 4$, а АКС із номерами -5, -6, -8 переходять у фазу «в» при $2p_2 = 4$ (АКС позначені червоними кольорами).

Розподіл при $2p_2 = 4$ в 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 обмоток роблять розрахунково-графічним способом.

Для цього загальноприйняте позначення чергування фаз у зонах обмотки - А, С', В, А', С, В' замінюють на цифрові індекси - 0, 1, 2, 3, 4, 5, що показує кратність 60° фази струмів відносно початку відліку, прийнятого у фазі А. У табл. 2.12 показаний розподіл отриманої двошвидкісної обмотки в повнім числі пазів.

Таблиця 2.12

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$,

УУУ / УУУ, вар. 1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$2p_1=6$	5		0			1	2	1	2	3	2	3	4	3	4		5	
$2p_2=4$	1		0			5	0	5	0	5	4	5	4	3	4		3	
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1=6$	5		0			1	2	1	2	3	2	3	4	3	4		5	
$2p_2=4$	3		2			1	2	1	2	1	0	1	0	5	0		5	
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
$2p_1=6$	5		0			1	2	1	2	3	2	3	4	3	4		5	
$2p_2=4$	5		4			3	4	3	4	3	2	3	2	1	2		1	

На $2p_1 = 6$ розподіл АКС по фазах у кожній третині пазів 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 УУУ / УУУ (табл. 2.13).

Таблиця 2.13

Номери АКС по гілках схеми УУУ/УУУ для ППО 6:4, $Z_1 = 54$, вар.1

№ гілки	Закон перемикування	Номери АКС					
		2	3	4	-14	-46	-48
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	2	3	4	-14	-46	-48
2	<i>A-в</i> (0-2 або 3-5)	20	21	22	-10	-12	-32
3	<i>A-с</i> (0-4 або 3-1)	-28	-30	38	39	40	-50
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	7	9	-17	-18	-19	47
5	<i>B-в</i> (2-2 або 5-5)	25	27	29	-35	-36	-37
6	<i>B-с</i> (2-4 або 5-1)	-1	11	43	45	-53	-54
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	-41	-42	-44	31	33	34
8	<i>C-в</i> (4-2 або 1-5)	-5	-6	-8	49	51	52
9	<i>C-с</i> (4-4 або 1-1)	13	15	16	-23	-24	-26

Аналогічним способом у табл. 2.14 показаний синтез ще одного варіанта ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, з іншим розподілом АКС обмотки при $2p_1 = 6$.

Таблиця 2.14

Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$

зі схемою комутації УУУ/УУУ, вар. 2

	$2p_1 = 6$	$2p_2 = 4$																													
A	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td><td>-13</td><td>-14</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	-10	-11	-12	-13	-14	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> <tr><td></td><td>-15</td><td>-16</td><td>-17</td><td>-18</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	7	8	9		-15	-16	-17	-18					a
1	2	3	4	5																											
-10	-11	-12	-13	-14																											
1	2	3	4	5	6	7	8	9																							
	-15	-16	-17	-18																											
B	<table border="1"> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td></tr> <tr><td>-16</td><td>-17</td><td>-18</td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table>	7	8	9	10	11	-16	-17	-18	-1	-2	<table border="1"> <tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>-4</td><td></td></tr> </table>	10	11	12	13	14	15	16	17	18					-1	-2	-3	-4		c
7	8	9	10	11																											
-16	-17	-18	-1	-2																											
10	11	12	13	14	15	16	17	18																							
				-1	-2	-3	-4																								
C	<table border="1"> <tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td></tr> <tr><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td></tr> </table>	13	14	15	16	17	-4	-5	-6	-7	-8	<table border="1"> <tr><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td><td>-13</td></tr> </table>	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	b									
13	14	15	16	17																											
-4	-5	-6	-7	-8																											
-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13																							

Розподіл пазів по фазах ППО наведений у табл. 2.15.

Таблиця 2.15

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$,
УУУ / УУУ, вар. 2

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	0	1	0	1	0	5	0	5	0	4		5		4				3
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	2	3	2	3	2	1	2	1	2	0		1		0				5
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	4	5	4	5	4	3	4	3	4	2		3		2				1

По отриманих розподілах формуються номери АКС по дев'ятох гілках схеми комутації УУУ / УУУ (табл. 2.16).

Таблиця 2.16

Номера АКС по гілках схеми УУУ / УУУ для ППО 6:4, вар. 2

№ гілки	Закон перемикування	Номери АКС					
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	1	3	5	-47	-48	-49
2	<i>A-b</i> (0-2 або 3-5)	-11	-12	-13	19	21	23
3	<i>A-c</i> (0-4 або 3-1)	-29	-30	-31	37	39	41
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	7	9	-17	-18	-20	28
5	<i>B-b</i> (2-2 або 5-5)	25	27	-35	-36	-38	46
6	<i>B-c</i> (2-4 або 5-1)	-2	10	43	45	-53	-54
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	-22	32	33	34	-42	-44
8	<i>C-b</i> (4-2 або 1-5)	-6	-8	-40	50	51	52
9	<i>C-c</i> (4-4 або 1-1)	-4	14	15	16	-24	-26

Для двох розглянутих варіантів ППО проведені розрахунки по програмі «ДЕЕ». Результати цих розрахунків представлені в табл. 2.17.

Другий варіант ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$, УУУ / УУУ має мале значення $\Delta E^* = 0,0021$. У цій обмотці будуть менше шум і вібрація. Крім того обмотка може бути одношаровою.

Таблиця 2.17

Дані розрахунків обмотувальних коефіцієнтів і ΔE варіантівППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$, УУУ / УУУ

№ вар.	$2p$	k_r	ΔE^*_{np}	$\Delta E^*_{згор}$	ΔE^*	k_w	k_{wcp}	$\frac{B_{\delta(2p=6)}}{B_{\delta(2p=4)}}$
1	6	0,902	0,189	0,186	0,265	0,902	0,829	1,259
	4	0,757				0,757		
2	6	0,902	0,013	0,017	0,0021	0,902	0,729	1,396
	4	0,84				0,84		

Схема комутації котушкових груп другого варіанта ППО наведена на рис. 2.11 [28].

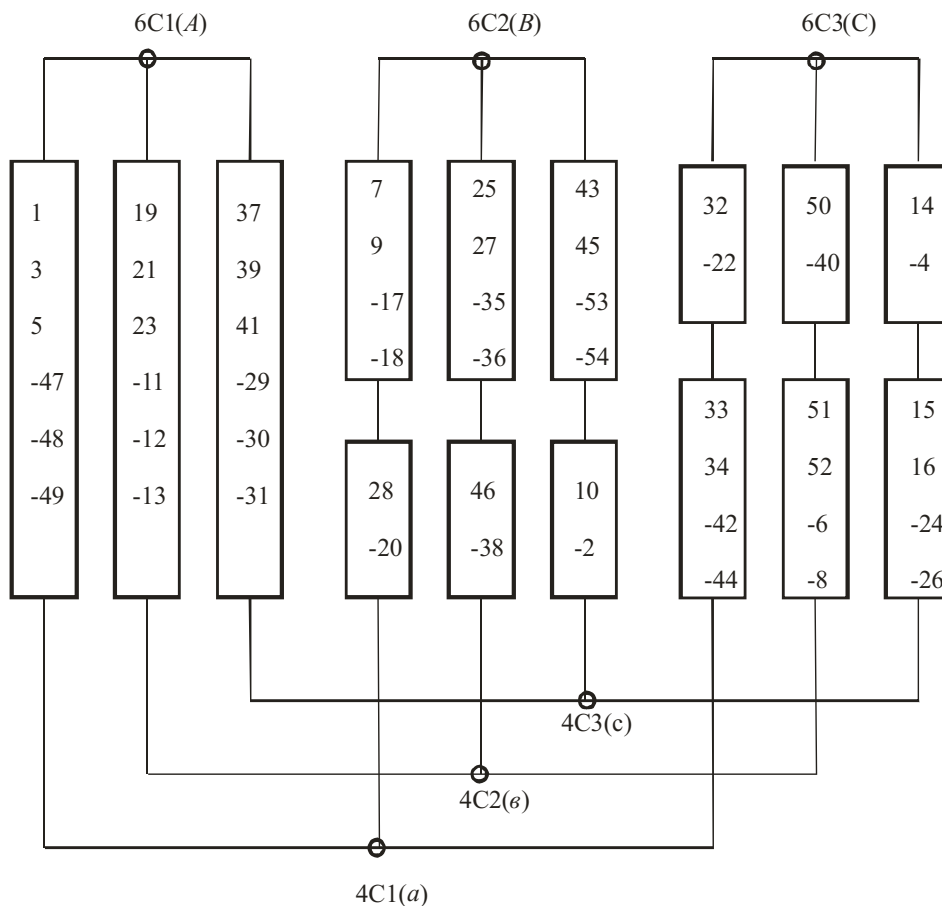


Рис. 2.11. Схема з'єднання котушкових груп ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$, УУУ / УУУ

2.4. Синтез ППО с $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ та схемою комутації УУУ / УУУ

Синтез двошвидкісних обмоток за допомогою ТВС при схемі комутації УУУ / УУУ здійснюють у межах $1/3$ числа пазів статора.

2.4.1. Синтез ППО у $Z_1 = 36$ з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$

У табл. 2.18 представлені номери АКС для однієї третини пазів $Z_1/3 = 12$. Для синтезу варіантів ППО насамперед проектуються симетричні розподіли обмотки з $120^\circ \Phi_3$ при $2p_2 = 6$. Наприклад, у табл. 2.19 наведений один з можливих варіантів розподілу АКС обмотки при $2p_2 = 6$.

Для одержання розподілу при $2p_1 = 8$ необхідно номери АКС фаз a, b, c при $2p_2 = 6$ передати без зміни знака АКС фазам A, B, C при $2p_1 = 8$ як показано в табл. 2.18.

Таблиця 2.18

Синтез ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 36$ і схемою комутації УУУ / УУУ, вар.1

	$2p_1 = 8$	$2p_2 = 6$																											
a	<table border="1"> <tr><td>1</td><td></td><td>2</td><td></td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td>11</td><td></td><td>12</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-6</td><td></td><td>-7</td><td></td><td>-8</td></tr> </table>	1		2		3		10		11		12			-6		-7		-8	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td></tr> </table>	1	2	3	4	-7	-8	-9	-10	A
1		2		3																									
10		11		12																									
	-6		-7		-8																								
1	2	3	4																										
-7	-8	-9	-10																										
b	<table border="1"> <tr><td>4</td><td></td><td>5</td><td></td><td>6</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-9</td><td></td><td>-10</td><td></td><td>-11</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>-1</td><td></td><td>-2</td></tr> </table>	4		5		6			-9		-10		-11				-1		-2	<table border="1"> <tr><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr><td>-11</td><td>-12</td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table>	5	6	7	8	-11	-12	-1	-2	B
4		5		6																									
	-9		-10		-11																								
			-1		-2																								
5	6	7	8																										
-11	-12	-1	-2																										
c	<table border="1"> <tr><td>7</td><td></td><td>8</td><td></td><td>9</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>-3</td><td></td><td>-4</td><td></td><td>-5</td></tr> <tr><td></td><td>-12</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	7		8		9			-3		-4		-5		-12					<table border="1"> <tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>-3</td><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td></tr> </table>	9	10	11	12	-3	-4	-5	-6	C
7		8		9																									
	-3		-4		-5																								
	-12																												
9	10	11	12																										
-3	-4	-5	-6																										

У розглянутому прикладі:

- АКС фази «А» при $2p_2 = 6$ з номерами 1, 2 переходять у фазу «а» при $2p_1 = 8$, а АКС із номерами -9, -10 переходять у фазу «в» при $2p_1 = 8$;
- АКС фази «В» при $2p_2 = 6$ з номерами 5, 6 переходять у фазу «в» при $2p_1 = 8$, а АКС із номерами 7, 8 переходять у фазу «с» при $2p_1 = 8$;
- АКС фази «С» при $2p_2 = 6$ з номерами 11, 12 переходять у фазу «а» при $2p_1 = 8$, а АКС із номерами -3, -4 переходять у фазу «с» при $2p_1 = 8$.

У табл. 2.19 показаний розподіл отриманої двошвидкісної обмотки в повнім числі пазів.

Таблиця 2.19

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 36$, УУУ / УУУ

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

По отриманому розподілі формуються номери АКС по дев'ятьох гілках схеми комутації УУУ / УУУ (табл. 2.20).

Номери АКС по гілках схеми УУУ / УУУ для ППО 8:6, $Z_1 = 36$, вар.1

№ гілки	Закон перемикання	Номери АКС			
		1	2	3	4
1	$A-a$ (0-0 або 3-3)	1	2	-33	-34
2	$A-b$ (0-2 або 3-5)	19	20	29	30
3	$A-c$ (0-4 або 3-1)	11	12	-15	-16
4	$B-a$ (2-0 або 5-3)	-9	-10	13	14
5	$B-b$ (2-2 або 5-5)	5	6	31	32
6	$B-c$ (2-4 або 5-1)	23	24	-27	-28
7	$C-a$ (4-0 або 1-3)	-21	-22	25	26
8	$C-b$ (4-2 або 1-5)	7	8	17	18
9	$C-c$ (4-4 або 1-1)	-3	-4	35	36

Схема з'єднання котушкових груп за схемою УУУ / УУУ представлена на рис. 2.12.

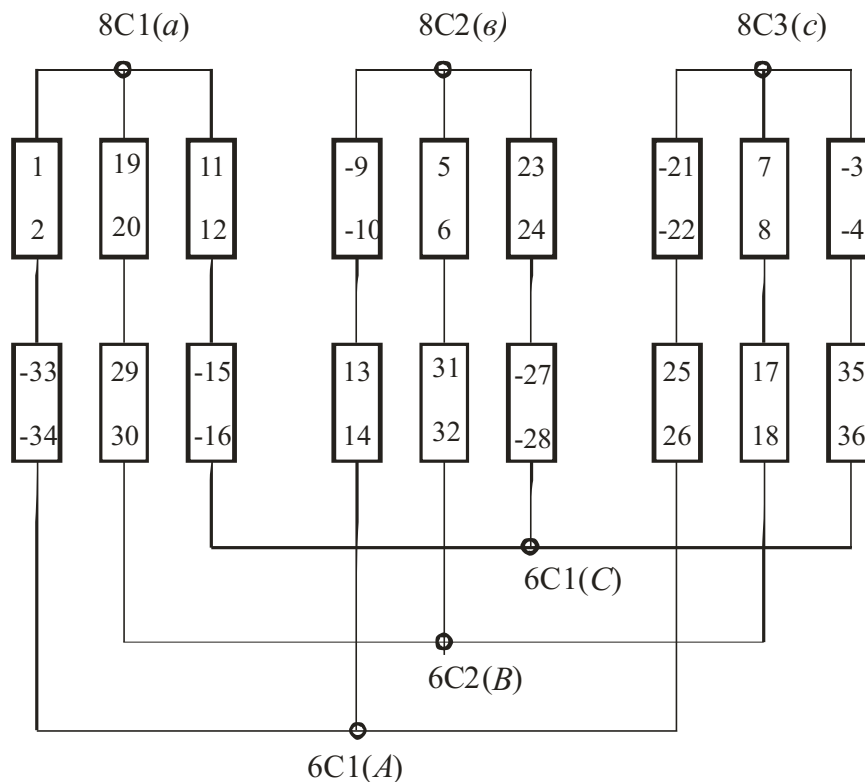


Рис.2.12. Схема з'єднання котушкових груп 1-го варіанта ППО

$$с 2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 36, УУУ / УУУ$$

Аналогічним чином у табл. 2.21 показаний синтез ще одного варіанта ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, але для одношарового розподілу АКС обмотки при $2p_2 = 6$.

Таблиця 2.21

Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, УУУ / УУУ, $Z_1 = 36$, вар.2

	$2p_1 = 8$					$2p_2 = 6$					
<i>a</i>	1		2		3	1	2	3	4	<i>A</i>	
	10		11		12	-7	-8	-9	-10		
		-6		-7		-8					
<i>b</i>	4		5		6	5	6	7	8	<i>B</i>	
		-9		-10		-11	-11	-12	-1		-2
				-1		-2					
<i>c</i>	7		8		9	9	10	11	12	<i>C</i>	
		-3		-4		-5	-3	-4	-5		-6
		-12									

У табл. 2.22 показаний розподіл 2-го варіанта двошвидкісної обмотки в повнім числі пазів.

Таблиця 2.22

Розподіл пазів по фазах ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, УУУ / УУУ, $Z_1 = 36$, вар.2

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

По отриманому розподілу формуються номери АКС по гілках схеми комутації УУУ/УУУ (табл. 2.23).

Таблиця 2.23

Номери АКС по гілках схеми УУУ/УУУ для ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$,
 $Z_1 = 36$, вар.2

№ гілки	Закон перемикавання	Номери АКС			
1	$A-a$ (0-0 або 3-3)	-34	2	3	-7
2	$A-b$ (0-2 або 3-5)	20	-24	-25	29
3	$A-c$ (0-4 або 3-1)	-6	11	-16	21
4	$B-a$ (2-0 або 5-3)	-10	14	15	-19
5	$B-b$ (2-2 або 5-5)	-1	5	32	-36
6	$B-c$ (2-4 або 5-1)	-18	23	-28	33
7	$C-a$ (4-0 або 1-3)	-22	26	27	-31
8	$C-b$ (4-2 або 1-5)	8	-12	-13	17
9	$C-c$ (4-4 або 1-1)	-4	9	-30	35

Схема з'єднання котушкових груп другого варіанта ППО за схемою УУУ/УУУ представлена на рис. 2.13.

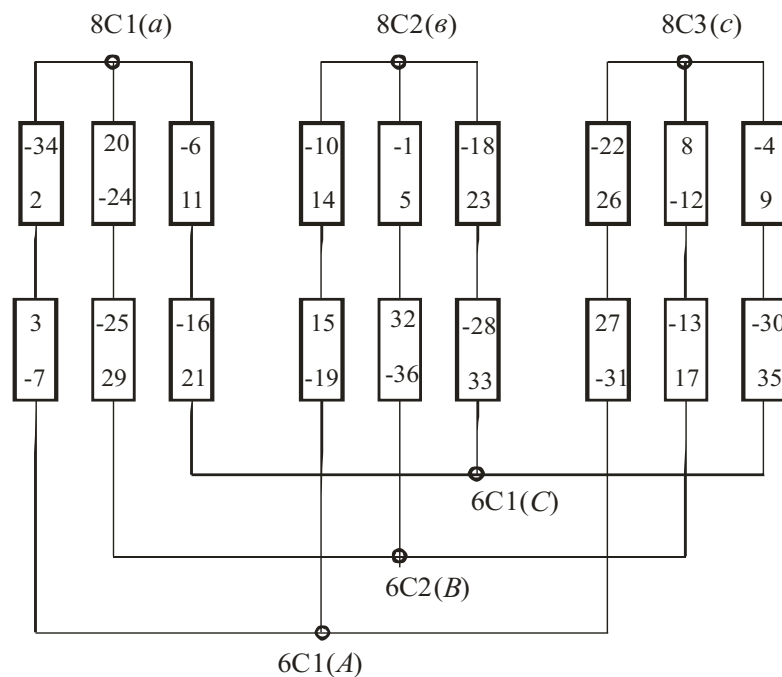


Рис. 2.13. Схема з'єднання котушкових груп 2-го варіанта ППО

с $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 36$, УУУ/УУУ

Другий варіант ППО може бути виконаний, як в одношаровому, так і у двошаровому виконаннях.

2.4.2. Синтез ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у $Z_1 = 54$

Для цього побудуємо зірки пазових ЕРС для чисел полюсів $2p_1 = 8$, $2p_2 = 6$ у третині пазів $Z_1/3$ (рис. 2.14). Визначаємо кути зрушення між ЕРС сусідніх пазів в електричних градусах:

- при $2p_2 = 6$:
$$\alpha_{(2p=6)} = \frac{360 \cdot 3}{54} = 20^\circ;$$

- при $2p_1 = 8$:
$$\alpha_{(2p=8)} = \frac{360 \cdot 4}{54} = 26,66^\circ.$$

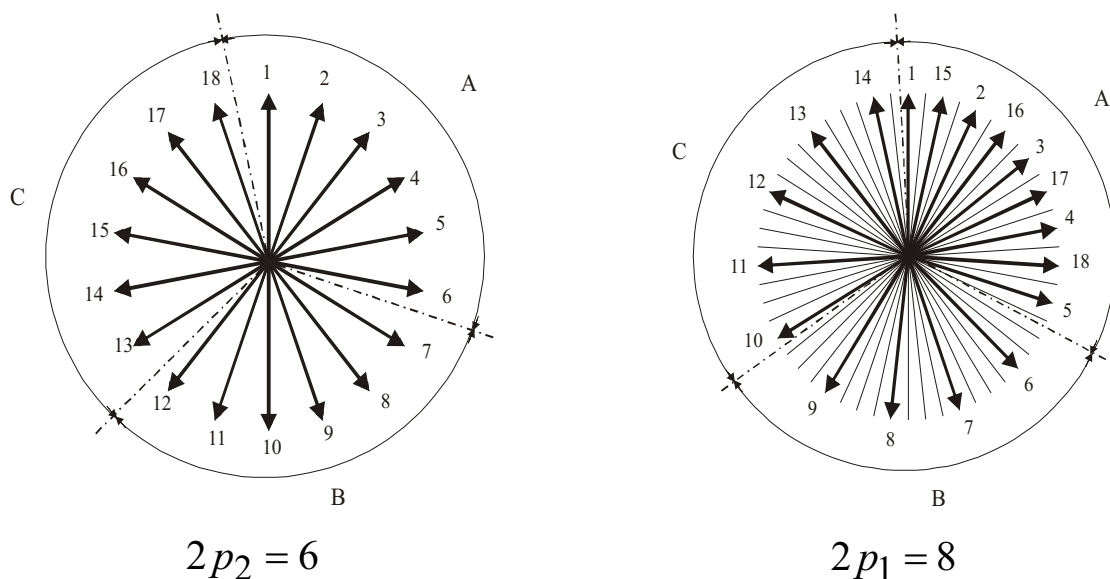


Рис. 2.14. Векторні діаграми пазових ЕРС, $Z_1 = 54$

На зірках пазових ЕРС проводимо осі, які розділяють обмотку на 120° фазні зони. Номери АКС, які входять в 120° фазні зони, записуємо у вигляді табл. 2.24.

Таблиця 2.24

Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, УУУ / УУУ, $Z_1 = 54$, вар. 1

$2p_2 = 6$						$2p_1 = 8$											
A	1	2	3	4	5	6	1		2		3		4		5		a
	-10	-11	-12	-13	-14	-15		15		16		17		18			
B	7	8	9	10	11	12		6		7		8		9			b
	-16	-17	-18	-1	-2	-3	-12		-13		-14		-15		-16		
C	13	14	15	16	17	18	10		11		12		13		14		c
	-4	-5	-6	-7	-8	-9		-3		-4		-5		-6		-7	

У табл. 2.25 показаний розподіл отриманої двошвидкісної обмотки в повнім числі пазів. На $2p_2 = 6$ розподіл АКС по фазах у кожній третині пазів повторюється, а при $2p_1 = 8$ відрізняється на 120° і 240° , що еквівалентно додаванню цифр 2 і 4.

Таблиця 2.25

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 54$, УУУ / УУУ, вар. 1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$2p_1 = 8$	5		0		1	2	3	2	3	4	5	4	5	0	1			
$2p_2 = 6$	5		0		1	2	1	2	3	2	3	4	3	4			5	
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1 = 8$	1		2		3	4	5	4	5	0	1	0	1	2			3	
$2p_2 = 6$	5		0		1	2	1	2	3	2	3	4	3	4			5	
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
$2p_1 = 8$	3		4		5	0	1	0	1	2	3	2	3	4			5	
$2p_2 = 6$	5		0		1	2	1	2	3	2	3	4	3	4			5	

По отриманому розподілі формуються номери АКС по дев'ятьох гілках схеми комутації УУУ / УУУ (табл. 2.26).

Таблиця 2.26

Номери АКС по гілках схеми УУУ / УУУ для ППО 8:6, $Z_1 = 54$, вар. 1

№ гілки	Закон перемикування	Номери АКС					
		2	3	4	-10	-48	-50
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	2	3	4	-10	-48	-50
2	<i>A-в</i> (0-2 або 3-5)	29	-35	-36	-37	43	45
3	<i>A-с</i> (0-4 або 3-1)	-8	15	16	-23	-24	-31
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	-12	-14	20	21	22	-28
5	<i>B-в</i> (2-2 або 5-5)	-1	7	9	47	-53	-54
6	<i>B-с</i> (2-4 або 5-1)	-26	33	34	-41	-42	49
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	-30	-32	38	39	40	-46
8	<i>C-в</i> (4-2 або 1-5)	11	-17	-18	-19	25	27
9	<i>C-с</i> (4-4 або 1-1)	-5	-6	13	-44	51	52

У табл. 2.27 наведений синтез другого варіанта ППО з іншим розподілом при $2p_2 = 6$.

Таблиця 2.27

Синтез одношарової ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, УУУ / УУУ, $Z_1 = 54$, вар.2

$2p_2 = 6$		$2p_1 = 8$																												
<i>A</i>	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td><td>-13</td><td>-14</td><td>-15</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	6	-10	-11	-12	-13	-14	-15	<i>a</i>	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td></td></tr> <tr><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td></tr> </table>	1	2	3	4	5	15	16	17	18		-8	-9	-10	-11	-12
	1	2	3	4	5	6																								
-10	-11	-12	-13	-14	-15																									
1	2	3	4	5																										
15	16	17	18																											
-8	-9	-10	-11	-12																										
<i>B</i>	<table border="1"> <tr><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> <tr><td>-16</td><td>-17</td><td>-18</td><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td></tr> </table>	7	8	9	10	11	12	-16	-17	-18	-1	-2	-3	<i>в</i>	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td></td></tr> <tr><td>-12</td><td>-13</td><td>-14</td><td>-15</td><td>-16</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table>	6	7	8	9		-12	-13	-14	-15	-16				-1	-2
	7	8	9	10	11	12																								
-16	-17	-18	-1	-2	-3																									
6	7	8	9																											
-12	-13	-14	-15	-16																										
			-1	-2																										
<i>C</i>	<table border="1"> <tr><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td></tr> <tr><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td></tr> </table>	13	14	15	16	17	18	-4	-5	-6	-7	-8	-9	<i>с</i>	<table border="1"> <tr><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td></tr> <tr><td>-3</td><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td></tr> <tr><td>-17</td><td>-18</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	10	11	12	13	14	-3	-4	-5	-6	-7	-17	-18			
	13	14	15	16	17	18																								
-4	-5	-6	-7	-8	-9																									
10	11	12	13	14																										
-3	-4	-5	-6	-7																										
-17	-18																													

Таблиця 2.28

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 54$,

УУУ / УУУ, вар. 2

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$p_2=3$	0	5	0	1	0	1	2		1	3	3	2	4		3	5	4	5
$p_1=4$	0	1	0	5	0	5	4		3	3	3	2	2		1	1	0	5
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$p_2=3$	0	5	0	1	0	1	2		1	3	3	2	4		3	5	4	5
$p_1=4$	2	3	2	1	2	1	0		5	5	5	4	4		3	3	2	1
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
$p_2=3$	0	5	0	1	0	1	2		1	3	3	2	4		3	5	4	5
$p_1=4$	4	5	4	3	4	3	2		1	1	1	0	0		5	5	4	3

По отриманому розподілі формуються номери АКС по дев'ятох гілках схеми комутації УУУ / УУУ (табл. 2.29).

Таблиця 2.29

Номери АКС по гілках схеми УУУ / УУУ, $Z_1 = 54$ для ППО 8:6, вар. 2

№ гілки	Закон перемикання	Номери АКС					
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	+1	+3	+5	-10	-11	-33
2	<i>A-в</i> (0-2 або 3-5)	+19	+21	+23	-28	-29	-51
3	<i>A-с</i> (0-4 або 3-1)	+37	+39	+41	-15	-46	-47
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	+25	+26	+48	-20	-34	-54
5	<i>B-в</i> (2-2 або 5-5)	+12	+43	+44	-18	-38	-52
6	<i>B-с</i> (2-4 або 5-1)	+7	+8	+30	-2	-16	-36
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	+17	+31	+32	-9	-22	-24
8	<i>C-в</i> (4-2 або 1-5)	+13	+14	+35	-4	-6	-27
9	<i>C-с</i> (4-4 або 1-1)	+31	+32	+53	-22	-24	-45

У табл. 2.30 наведені результати розрахунків по програмі «ДЕЕ» обмотувальних коефіцієнтів і різницевої ЕРС варіантів ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ у $Z_1 = 54$.

Перший варіант обмотки має мале значення різницевої ЕРС $\Delta E^* = 0,001$.

Таблиця 2.30

Дані розрахунків обмотувальних коефіцієнтів і ΔE варіантів ППО

$$2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 54, УУУ / УУУ$$

№ вар.	2p	k_R	ΔE^*_{np}	$\Delta E^*_{обр}$	ΔE^*	k_w	k_{WCP}	$\frac{B_{\delta(2p=8)}}{B_{\delta(2p=6)}}$
1	8	0,890	0,007	0,006	0,010	0,890	0,896	1,36
	6	0,902				0,902		
2	8	0,877	0,027	0,022	0,035	0,877	0,809	1,13
	6	0,742				0,742		

Схема комутації ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 54, УУУ / УУУ$ для першого варіанта представлена на рис. 2.15, а схема-розгортка в одношаровому виконанні – на рис. 2.16.

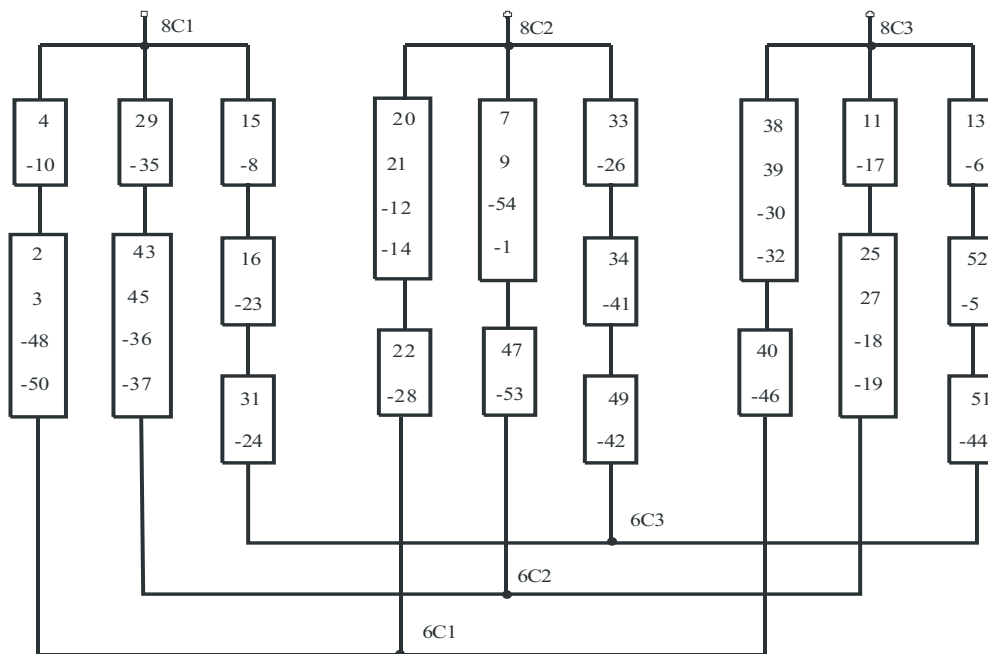


Рис. 2.15. Схема комутації УУУ / УУУ ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 54,$
вар. 1

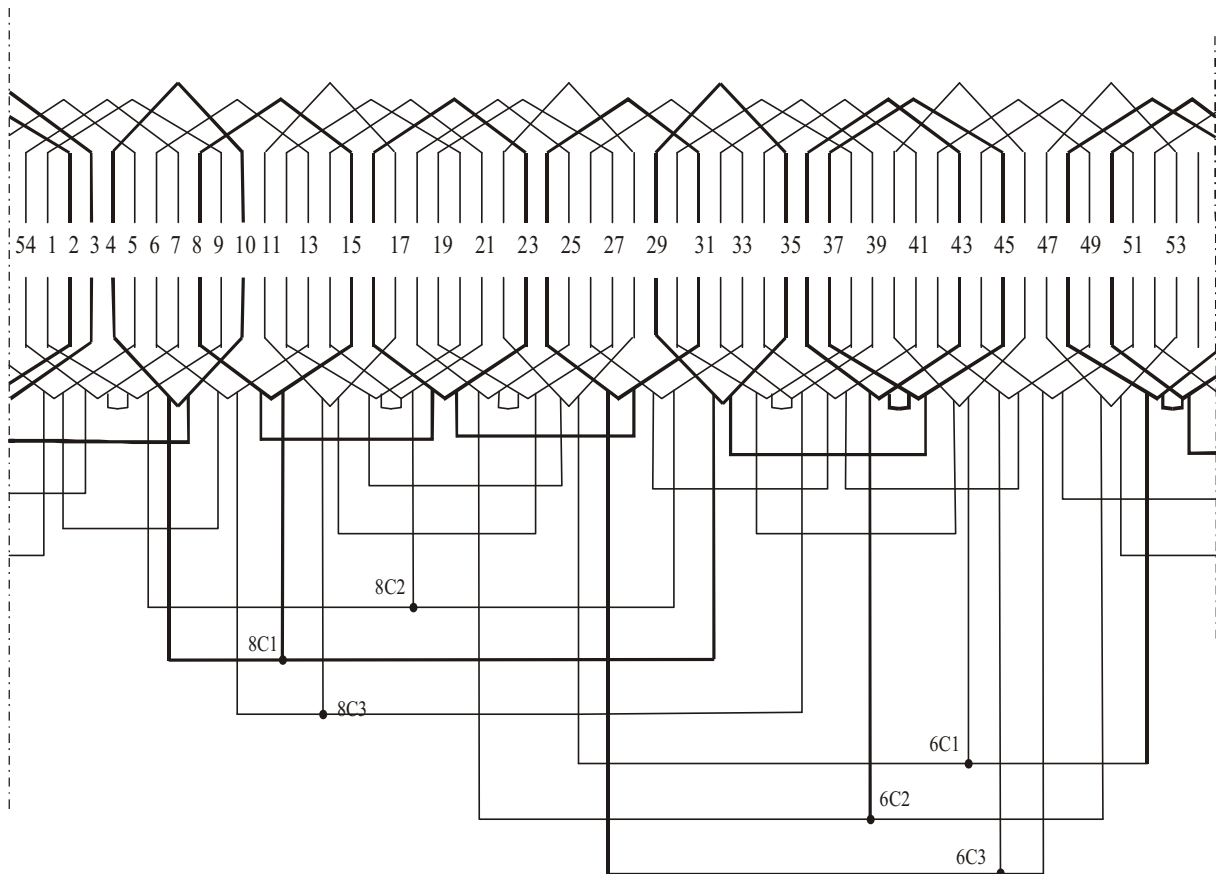


Рис. 2.16. Схема-розгортка одношарової ППО зі схемою комутації

$УУУ/УУУ$, $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 54$, вар. 1

2.4.3. Синтез ППО с $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ в $Z_1 = 72$

Для цього побудуємо зірки пазових ЕРС для чисел полюсів $2p_1 = 8$, $2p_2 = 6$ у третині пазів $Z_1/3 = 24$ (рис. 2.17).

Визначаємо кути зрушення між ЕРС сусідніх пазів в електричних градусах:

$$\text{- при } 2p_1 = 8 : \quad \alpha_{(2p=8)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 4}{72} = 20^\circ;$$

$$\text{- при } 2p_2 = 6 : \quad \alpha_{(2p=6)} = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 3}{72} = 15^\circ.$$

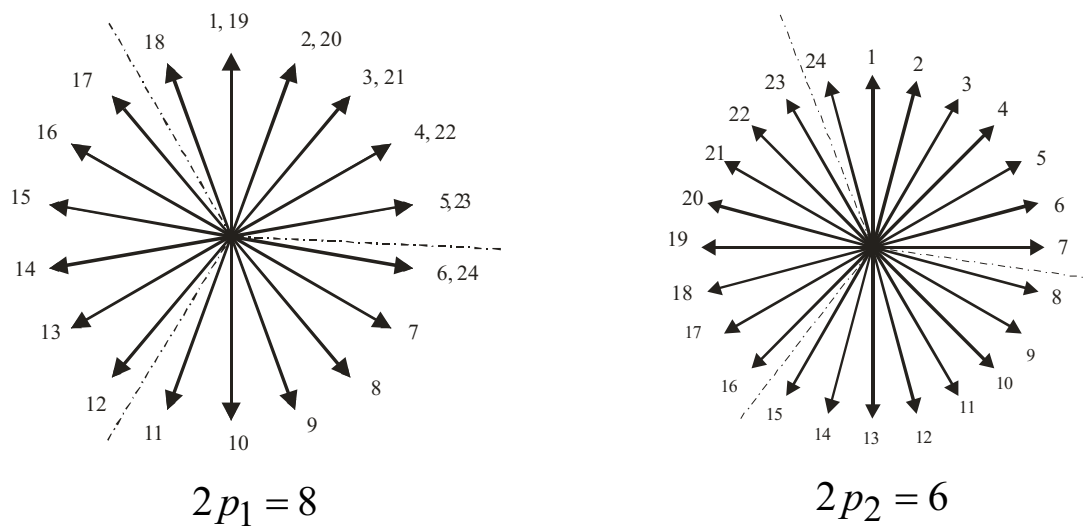


Рис. 2.17. Зірки пазових ЕРС, $Z_1 = 72$

У табл. 2.28 представлені номери АКС для однієї третини пазів ППО.

Для синтезу ППО насамперед проектуються симетричні розподіли обмотки при $2p_2 = 6$. Обмотка на $2p_2 = 6$ в кожній третині пазів повторюється. Тому розподіл АКС по фазах для $Z_{1/3}$, буде таким же й у наступних двох третинах пазів.

У табл. 2.31 при $2p_2 = 6$ АКС фази А виділені жовтими кольорами, фази В – зеленим, фази С - червоним.

Для одержання розподілу при $2p_1 = 8$ необхідно присвоїти номери АКС фаз при $2p_2 = 6$ фазам при $2p_1 = 8$ без зміни знака АКС.

Тут не має значення, скільки АКС на $1/3$ пазів виділяється в кожній фазі при $2p_1 = 8$, тому що розподіл на $2p_1 = 8$ в кожній наступній третині пазів має зрушення на 120° і 240° стосовно розподілу в першій третині пазів.

Таблиця 2.31

Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 72$, УУУ / УУУ, вар. 1

Фаза	$2p_1 = 8$	$2p_2 = 6$																																			
a	<table border="1"> <tr><td>18</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td>-9</td><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td><td>-13</td><td>-14</td></tr> </table>	18	1	2	3	4	5	18	19	20	21	22	23	-9	-10	-11	-12	-13	-14	<table border="1"> <tr><td>24</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>-12</td><td>-13</td><td>-14</td><td>-15</td><td>-16</td><td>-17</td><td>-18</td><td>-19</td></tr> </table>	24	1	2	3	4	5	6	7	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	A
18	1	2	3	4	5																																
18	19	20	21	22	23																																
-9	-10	-11	-12	-13	-14																																
24	1	2	3	4	5	6	7																														
-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19																														
b	<table border="1"> <tr><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td></tr> <tr><td>-15</td><td>-16</td><td>-17</td><td>-18</td><td>-19</td><td>-20</td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td></td><td></td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table>	6	7	8	9	10	11	-15	-16	-17	-18	-19	-20	24				-1	-2	<table border="1"> <tr><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td></tr> <tr><td>-20</td><td>-21</td><td>-22</td><td>-23</td><td>-24</td><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td></tr> </table>	8	9	10	11	12	13	14	15	-20	-21	-22	-23	-24	-1	-2	-3	B
6	7	8	9	10	11																																
-15	-16	-17	-18	-19	-20																																
24				-1	-2																																
8	9	10	11	12	13	14	15																														
-20	-21	-22	-23	-24	-1	-2	-3																														
c	<table border="1"> <tr><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td></tr> <tr><td>-3</td><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td></tr> <tr><td>-21</td><td>-22</td><td>-23</td><td>-24</td><td></td><td></td></tr> </table>	12	13	14	15	16	17	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-21	-22	-23	-24			<table border="1"> <tr><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td>-4</td><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td><td>-11</td></tr> </table>	16	17	18	19	20	21	22	23	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	C
12	13	14	15	16	17																																
-3	-4	-5	-6	-7	-8																																
-21	-22	-23	-24																																		
16	17	18	19	20	21	22	23																														
-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11																														

Тому результуючий розподіл на $2p_1 = 8$ буде завжди симетричним по фазах. У табл. 2.32 наведений розподіл двошвидкісної обмотки вар. 1 у повнім числі пазів $Z_1 = 72$.

Таблиця 2.32

Розподіл ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ в числі пазів $Z_1 = 72$, вар. 1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$p_2=3$	0	5		1		0	2		1	3	2		3		4		5							
$p_1=4$	0	1		1		2	2		3	3	4		5		0		1							
Z_1	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$p_2=3$	0	5		1		0	2		1	3	2		3		4		5							
$p_1=4$	2	3		3		4	4		5	5	0		1		2		3							
Z_1	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
$p_2=3$	0	5		1		0	2		1	3	2		3		4		5							
$p_1=4$	4	5		5		0	0		1	1	2		3		4		5							

На $2p_2 = 6$ розподіл АКС по фазах у кожній третині пазів повторюється, а при $2p_1 = 8$ відрізняється на 120° і 240° , що еквівалентно додатку цифр 2 і 4. По отриманому розподілі формуються АКС по дев'яточ гілках схеми комутації УУУ/УУУ (табл. 2.33).

Таблиця 2.33

Номери АКС по гілках схеми УУУ/УУУ, $Z_1 = 72$ для ППО 8:6, вар. 1

№ гілки	Закон перемикання	Номери АКС							
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	+1	+2	-12	+55	-63	-64	-65	-66
2	<i>A-в</i> (0-2 або 3-5)	+7	-15	-16	-17	-18	-36	+25	+26
3	<i>A-с</i> (0-4 або 3-1)	-9	-10	-11	+19	+20	-28	-29	-30
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	-27	+37	+38	-45	-46	-47	-48	+56
5	<i>B-в</i> (2-2 або 5-5)	+8	-51	+61	+62	-69	-70	-71	-72
6	<i>B-с</i> (2-4 або 5-1)	-3	+13	+14	-21	-22	-23	-24	+32
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	+31	-39	-40	-41	-42	+49	+50	-60
8	<i>C-в</i> (4-2 або 1-5)	-33	-34	-35	+43	+44	-52	-53	-54
9	<i>C-с</i> (4-4 або 1-1)	-4	-5	-6	-57	-58	-59	+67	+68

У табл. 2.34 наведений синтез другого варіанта ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$.

Таблиця 2.34

Синтез ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 72$, УУУ/УУУ, вар. 2

Фаза	$2p_1 = 8$						$2p_2 = 6$								
<i>a</i>			1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>A</i>
	17	18	19	20	21	22	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	
	-8	-9	-10	-11	-12	-13									
<i>в</i>	5	6	7	8	9	10	9	10	11	12	13	14	15	16	<i>B</i>
	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-21	-22	-23	-24	-1	-2	-3	-4	
	23	24				-1									
<i>с</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	<i>C</i>
	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	
	-20	-21	-22	-23	-24										

У табл. 2.35 наведений розподіл двошвидкісної обмотки вар. 2 у повнім числі пазів $Z_1 = 72$.

Таблиця 2.35

Розподіл ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$ в повнім числі пазів $Z_1 = 72$, вар. 2

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
$P_{2=3}$	0		5		1		0		1		2		1		2		3		4		3		4		5		4
$P_{1=4}$	0		1		1		2		3		2		3		4		5		0		1		0		1		2
Z_1	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48			
$P_{2=3}$	0		5		1		0		1		2		1		2		3		4		3		4		5		4
$P_{1=4}$	2		3		3		4		5		4		5		0		1		2		3		2		3		4
Z_1	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72			
$P_{2=3}$	0		5		1		0		1		2		1		2		3		4		3		4		5		4
$P_{1=4}$	4		5		5		0		1		0		1		2		3		4		5		4		5		0

По отриманому розподілі формуються АКС по дев'ятьох гілках схеми комутації УУУ/УУУ (табл. 2.36).

Таблиця 2.36

Номери АКС по гілках схеми УУУ/УУУ, $Z_1 = 72$ для ППО 8:6, вар. 2

№ гілки	Закон перемикання	Номери АКС							
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	+1	+2	-44	+54	+55	-63	-64	-65
2	<i>A-в</i> (0-2 або 3-5)	+6	+7	-15	-16	-17	+25	+26	-68
3	<i>A-c</i> (0-4 або 3-1)	-20	+30	+31	-39	-40	-41	+49	+50
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	-27	-28	+36	+37	+38	-46	-47	+57
5	<i>B-в</i> (2-2 або 5-5)	+9	-51	-52	+61	+62	+63	-70	-71
6	<i>B-c</i> (2-4 або 5-1)	+24	-32	-34	-35	+42	+43	+45	-53
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	-8	-10	-11	+18	+19	+21	-29	+72
8	<i>C-в</i> (4-2 або 1-5)	-3	-4	+12	+13	+14	-22	-23	+33
9	<i>C-c</i> (4-4 або 1-1)	-5	+48	-56	-58	-59	+66	+67	+69

У табл. 2.37 наведені дані розрахунків ППО у двошаровому виконанні з різними кроками. Для другого варіанта більше значення ΔE^* . Другий варіант ППО може бути виконаний як у двошаровому, так і в одношаровому виконанні.

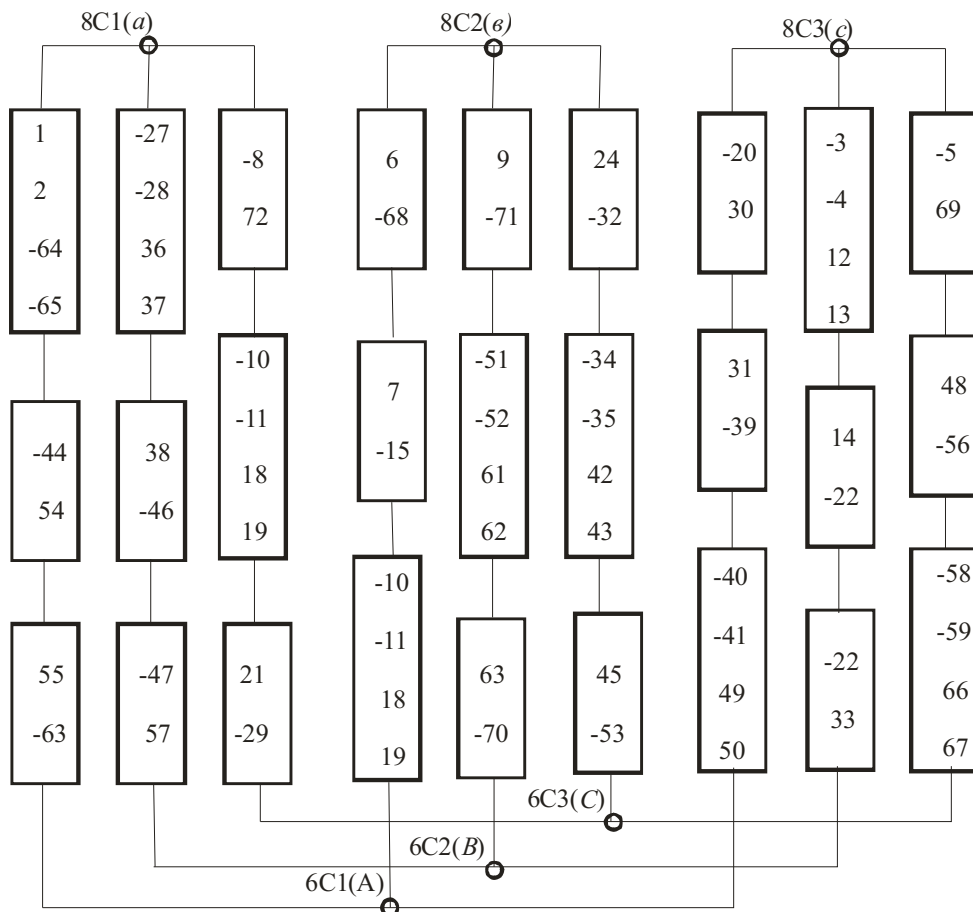
Таблиця 2.37

Дані розрахунків обмотувальних коефіцієнтів і ΔE^* варіантів ППО

$$2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 72, УУУ / УУУ$$

№ вар.	2p	k_R	ΔE^*_{np}	$\Delta E^*_{звop}$	ΔE^*	B=9			B=10		
						k_w	$k_{w_{CP}}$	$\frac{B_{\delta(2p-8)}}{B_{\delta(2p-6)}}$	k_w	$k_{w_{CP}}$	$\frac{B_{\delta(2p-8)}}{B_{\delta(2p-6)}}$
1	8	0,945	0,02	0,03	0,036	0,945	0,855	1,078	0,931	0,866	1,14
	6	0,829				0,766			0,801		
2	8	0,931	0,039	0,06	0,072	0,931	0,848	1,094	0,917	0,859	1,16
	6	0,829				0,766			0,801		

Схема комутації ППО другого варіанта наведена на рис. 2.18.

Рис. 2.18. Схема УУУ / УУУ 2-го варіанта ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6, Z_1 = 72$

3. СПЕЦІАЛЬНІ ПИТАННЯ ППО

3.1. Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$

зі схемою комутації УУУ/УУУ

Розглянемо другий варіант ППО, рис. 2.8. Зобразимо векторні діаграми ЕРС паралельних галузей на $2p_2 = 4$.

У ППО зі схемою комутації УУУ/УУУ при $2p_2 = 4$ й числі паралельних галузей $a = 3$ сумарні ЕРС паралельних галузей не рівні по амплітуді й не збігаються по фазі. Розглянемо такі векторні діаграми для 1-го варіанта ППО [63]. Галузі фази «а» при $2p_2 = 4$ [61] містять АКС із наступними номерами:

- 1-я гілка – $a-a$: $+1,+2,-31,-32$;
- 2-я гілка – b : $+5,+6,-11,-12$;
- 3-я гілка – z : $-15,+21,+22,-28$.

На рис. 3.1 зображені три векторні діаграми ЕРС паралельних гілок $a-a$, b , z .

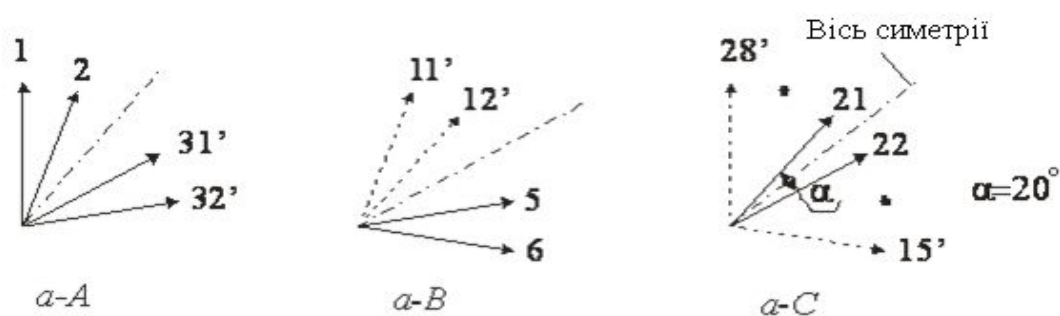


Рис. 3.1. Векторна діаграма ЕРС паралельних гілок фази «а» при $2p_2 = 4$

Геометричне підсумовування ЕРС паралельних гілок з наступним діленням на їхню арифметичну суму еквівалентно коефіцієнту розподілу гілки [42].

По програмі «ДЕЕ» розраховані коефіцієнти розподілу галузей

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

Таким чином вектор ЕРС паралельної гілки з є симетруючим, а вектора ЕРС двох інших гілок зрушені стосовно нього в різні сторони на деякий кут γ .

Для зменшення різницевої ЕРС паралельних гілок необхідно:

- зменшити величину кута між векторами ЕРС паралельних гілок;
- зменшити відмінність по величині амплітуд результуючих ЕРС паралельних гілок або вирівняти коефіцієнти розподілу паралельних галузей.

Для зменшення величини кута зрушення між осями симетрії паралельних гілок необхідно повернути результуючого вектора ЕРС галузей $a-a$ й у перший по вартувий, другий проти вартувий стрілки.

Для цього досить зробити обмотку одне-двошарової, що складається з котушок з різним числом витків.

На векторній діаграмі в паралельній гілці $a-a$ повинен перебувати ще один вектор ЕРС додаткової секції в правій частині від осі симетрії векторної діаграми, а в паралельній гілці b ще один вектор ЕРС додаткової секції в лівій частині від осі симетрії.

При цьому результуючий розподіл АКС на $2p_1 = 6$ не повинне змінитися.

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

Це можна побачити в табл. 3.1, де наведені АКС при $2p_1 = 6$ для повного числа пазів. Причому сума витків у пазах 1 і 25, а також 6 і 18 повинна бути дорівнює числу витків повної котушки.

Зобразимо на рис. 3.2 векторну діаграму галузі *A-a* й визначимо відносне число витків у пазах 25 і 1, що належать цієї галузі.

Визначити відносне число витків w_1^* можна з умови рівності кута $\gamma = 0$. 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 проєкцій ЕРС векторів на вісь симетрії праворуч була дорівнює сумі проєкцій ліворуч. Складемо рівняння, виходячи з рис. 3.2:

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

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

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

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

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.

Таблиця 3.1

Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, УУУ/УУУ

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

Рис. 3.2. Векторна діаграма ЕРС паралельної гілки $a-A$

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 $w_2^* = 0,653$.

Були визначені додаткові АКС тільки в гілках фази А.

Те ж необхідно зробити й для фази В.

Для цього зобразимо на рис. 3.3 торцеву схему ППО для кожної третини пазів одну під іншою. Обведемо товстими лініями АКС трьох галузей тільки фази «а» при $2p_2 = 4$ з урахуванням відносного числа витків у кожній катушці.

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

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$p_1=3$	0					2		3			5	
	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
$p_2=2$	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
$p_1=3$	0					0		3			5	
	0	0	1	1	2	2	3	3	0	4	5	5
$p_2=2$	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
$p_1=3$	0					2		3			5	
	0	0	1	1	2		3	3	4	4		5
$p_2=2$	0					4		3			1	
	4	4	5	3	4	4	3	3	2	2	1	1

Рис. 3.3. Торцева схема ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$, УУУ / УУУ, вар. 2

Аналогічно в гілку $a-B$ повинні бути додані АКС із числом $w_2^* = 0,653$ у 6 пазу й $w_1^* = 0,347$ у 18 пазу. Векторні діаграми ЕРС паралельних гілок після симетрування наведені на рис. 3.4.

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

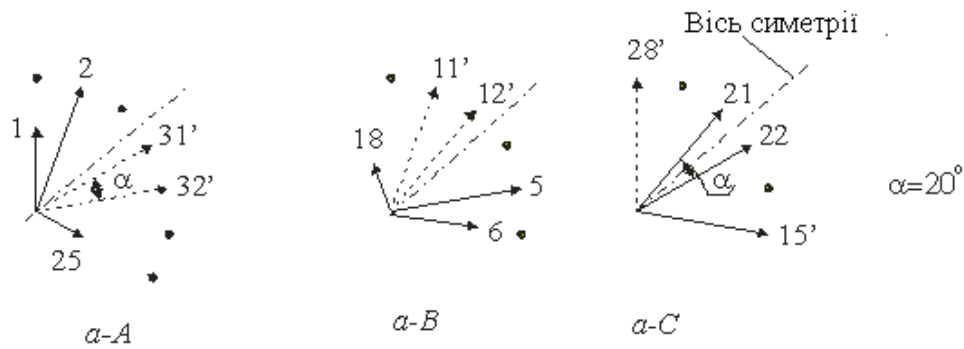


Рис. 3.4. Векторні діаграми ЕРС паралельних гілок після симетрування

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

Для визначення величини ΔE по програмі «ДЕЕ» у вхідні дані необхідно занести номери АКС трьох гілок фази «а» при $2p_2 = 4$ (табл. 3.2) з урахуванням відносного числа витків у котушках, що належать гілкам *a-A*, *a-B*, *a-C*. Результати розрахунків занесені в табл. 3.3.

Таблиця 3.2

Число витків у секціях після симетрування

<i>a</i>	+1	+2	-31	-32	+25	-32
w^*	0,653	1,0	1,0	0,653	0,347	0,347
<i>b</i>	+5	+6	-11	-12	-11	+18
w^*	1,0	0,653	0,653	1,0	0,347	0,347
<i>c</i>	-15	+21	+22	-28		
w^*	1,0	1,0	1,0	1,0		

Таблиця 3.3

Дані розрахунків обмотувальних коефіцієнтів і ΔE варіантів

ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$, УУУ / УУУ

№ вар.	2p	k_r	ΔE^*_{np}	$\Delta E^*_{згор}$	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		

Після одержання торцевої схеми в повнім 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. 3.4.

Схема-розгортка одно-двошарової ППО наведена на рис. 3.5.

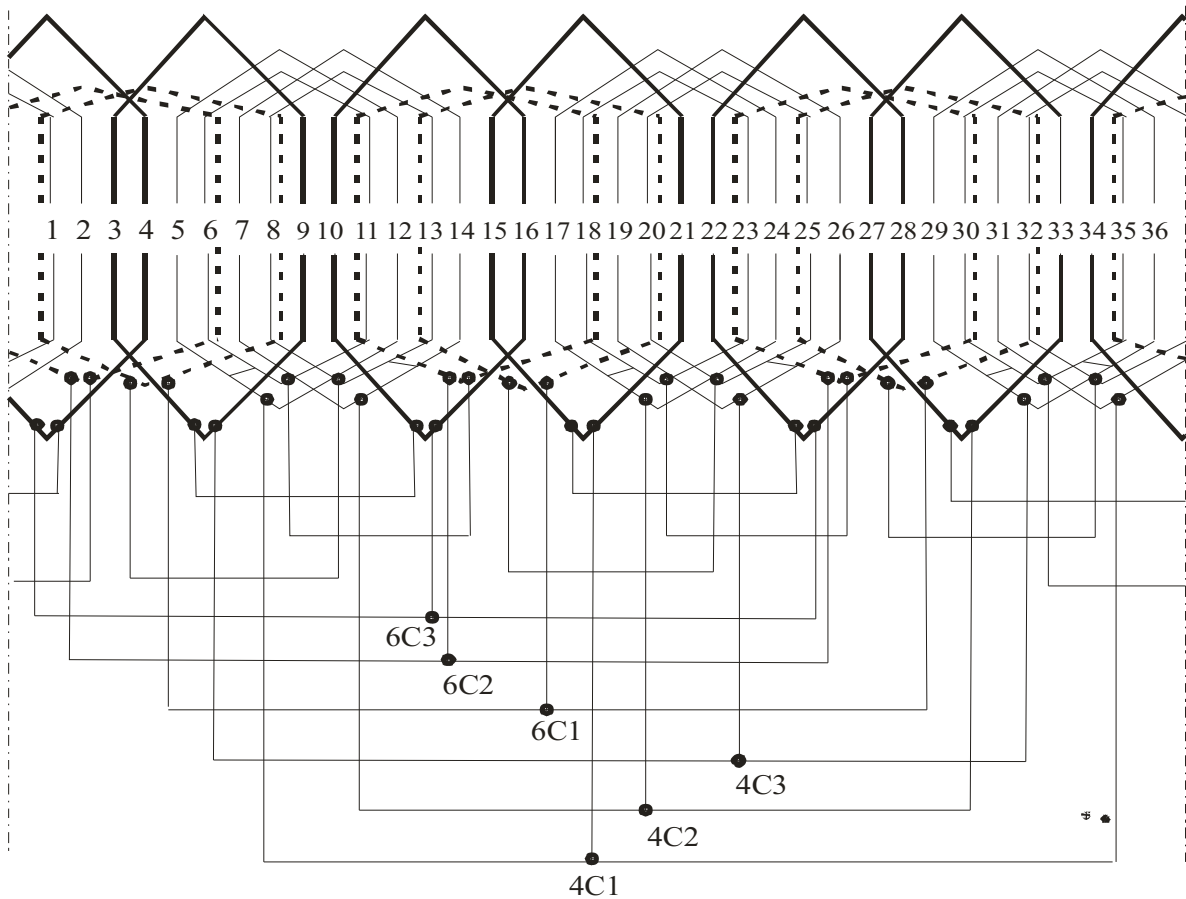


Рис. 3.5. Схема-розгортка ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 36$, УУУ/УУУ, вар. 2

Таке симетрування ППО при зміні розподілу на $2p_2 = 4$ за рахунок додаткових АКС без зміни розподілу на $2p_1 = 6$ дозволяє значно знизити різниці ЕРС.

Обмотка при цьому стає одно-двошаровою [26].

Вид концентричних котушкових груп

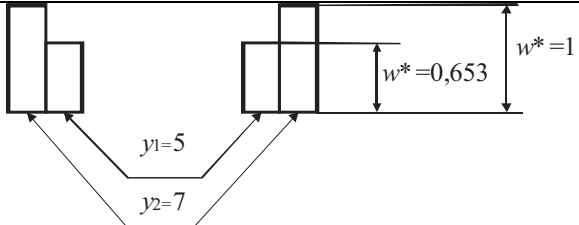
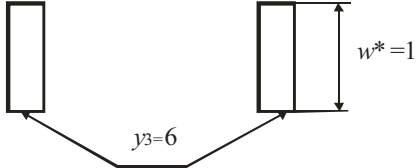
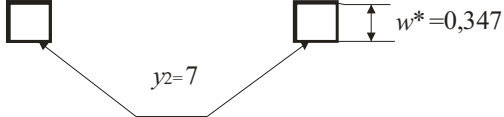
Тип котушкової групи	Вид котушкової групи	Кількість кат. груп
1		6
2		6
3		6

Схема комутації УУУ/УУУ наведена на рис. 3.6.

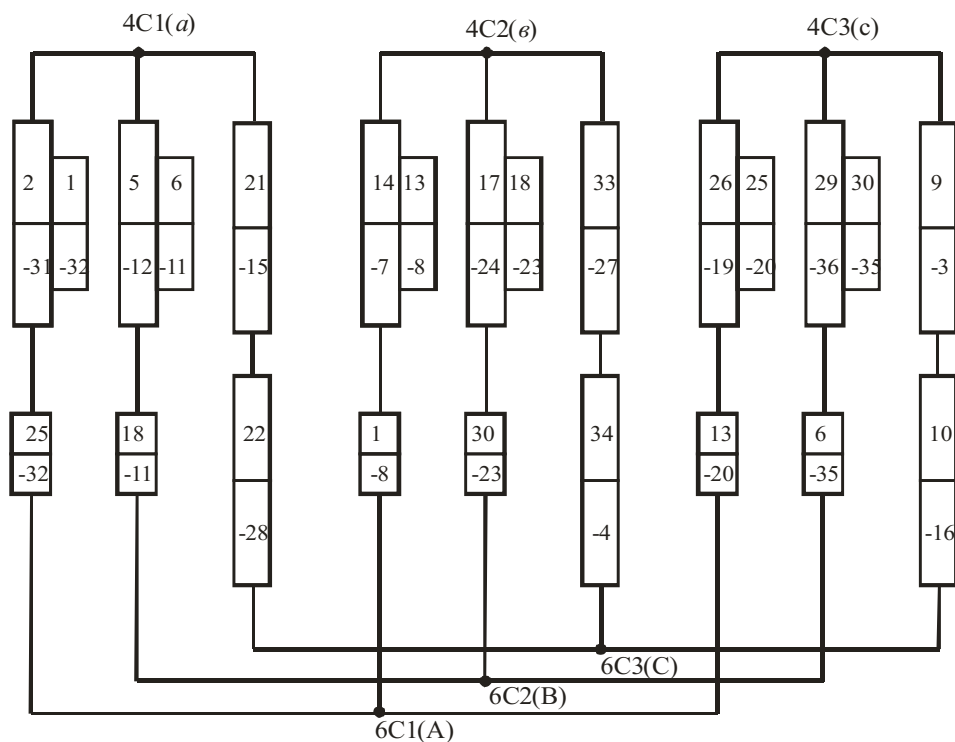


Рис. 3.6. Схема з'єднання котушкових груп ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$,

$$Z_1 = 36, \text{УУУ/УУУ, вар. 2}$$

Обмотка може бути покладена на сучасному статорообмотковому устаткуванні роздільного укладання, тому що її конструкція задовольняє всім вимогам, пропонованим до обмоток для механізованого укладання:

- обмотка складається тільки з концентричних котушкових груп;
- укладання всіх котушкових груп робиться обома сторонами одночасно, тобто виключена операція «підйом кроку»;
- котушкові групи можуть бути розподілені по комплектах, у межах кожного з яких виключається перетинання лобових частин.

Механізоване укладання здійснюється в шість етапів, що показано на рис. 3.7. У межах кожного ярусу виключене перетинання в лобових частинах.

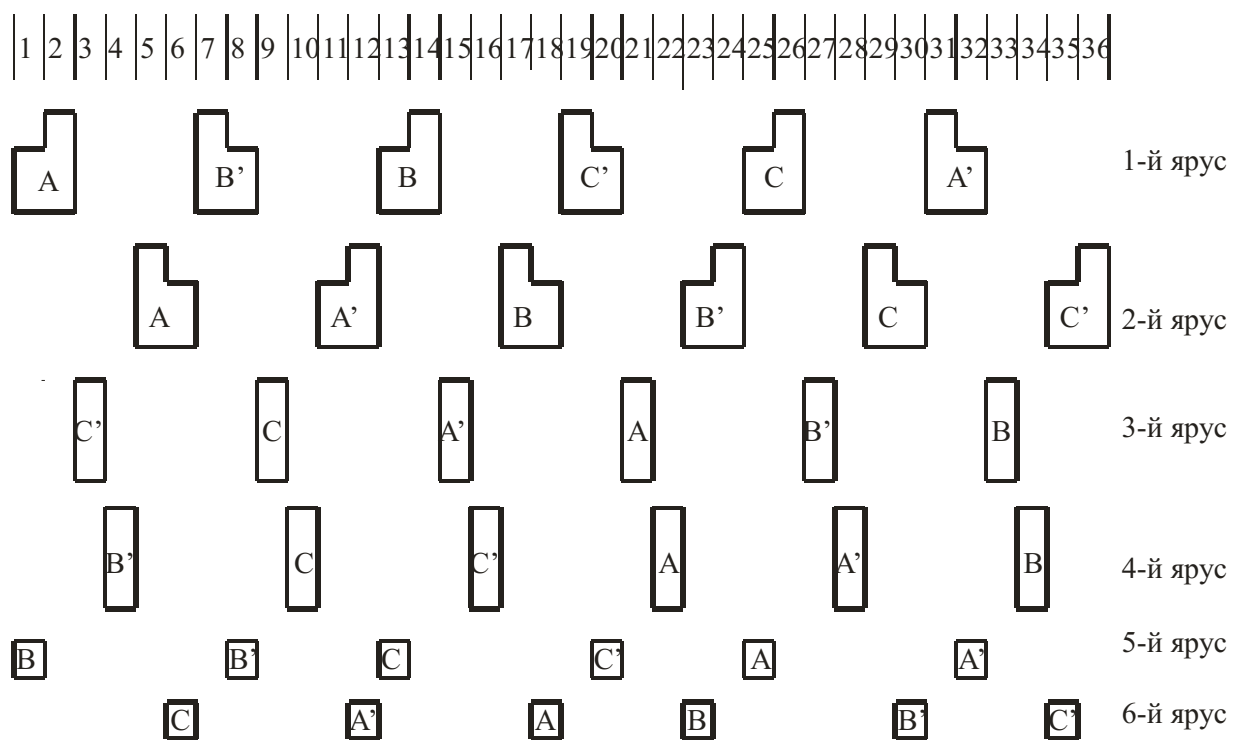


Рис. 3.7. Етапи механізованого укладання ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$

$$Z_1 = 36, \text{УУУ / УУУ, вар. 2}$$

3.2. Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$

зі схемою комутації УУУ / УУУ

Розглянемо ППО на рис. 2.11. Проведемо симетрування (зменшення ΔE^*) шляхом зміни номерів АКС, що входять у паралельні гілки обмотки.

В обмотці при $2p_2 = 4$ й числі паралельних гілок $a = 3$ сумарні ЕРС паралельних гілок не рівні по амплітуді й не збігаються по напрямку.

У фазу «а» при $2p_2 = 4$ входять гілки з номерами АКС:

- $a-A$: +1, +3, +5, -47, -48, -49;
- $a-B$: +7, +9, -17, -18, +28, -20;
- $a-C$: +32, -22, +33, +34, -42, -44.

На рис. 3.8 зображені три векторні діаграми ЕРС паралельних гілок фази «а» при $2p_2 = 4$ ($a-A$, $a-B$, $a-C$).

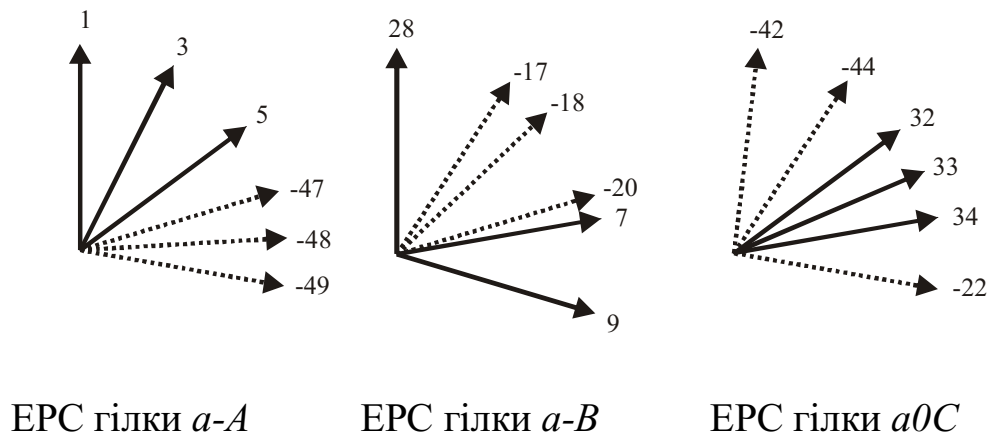


Рис. 3.8. Векторна діаграма пазових ЕРС паралельних гілок фази «а» при $2p_2 = 4$, ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, вар. 2

По програмі «ДЕЕ» розраховані коефіцієнти розподілу гілок

$$k_{r(a-A)} = 0,8277, \quad k_{r(a-B)} = 0,8287, \quad k_{r(a-C)} = 0,865,$$

тобто коефіцієнти розподілу всіх гілок не рівні.

Для зменшення зрівняльних ЕРС паралельних гілок необхідно:

- зробити вектор однієї з гілок симетруючим;
- зблизити по величині амплітуди результуючих ЕРС паралельних гілок або вирівняти коефіцієнти розподілу паралельних гілок.

Синтез обмоток в 1/3 пазів обмотки статора не показує положення векторів паралельних гілок на площині.

Для зміни номерів АКС, що входять у паралельні гілки ППО вар.2, зобразимо таблицю АКС для всіх пазів статора (табл. 3.5).

При цьому в табл. 3.5 наведені АКС всіх трьох фаз симетричної обмотки при $2p_1 = 6$ й тільки одна фаза обмотки для $2p_2 = 4$. У табл. 3.5 різними кольорами виділені АКС фази А, В, С при $2p_1 = 6$.

При $2p_2 = 4$ аналогічним чином відзначені АКС паралельних гілок – $a-A$, $a-B$, $a-C$. Векторна діаграма фази «а» показана на рис. 3.9.

У паралельній гілці $a-A$ замість АКС із номером 1 виділимо АКС із номером 37, у гілці $a-B$ замість АКС із номером 28 – АКС із номером 10, у гілці $a-C$ замість АКС із номером –42 - АКС із номером –24.

На рис. 3.10 показані векторні діаграми ЕРС паралельних гілок фази «а» відповідно до табл. 3.5 після симетрування.

Із рис. 3.10 видно, що ЕРС гілки $a-B$ є симетрируючої.

Таблиця 3.5

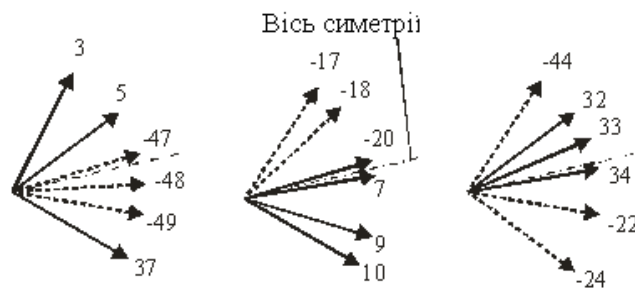
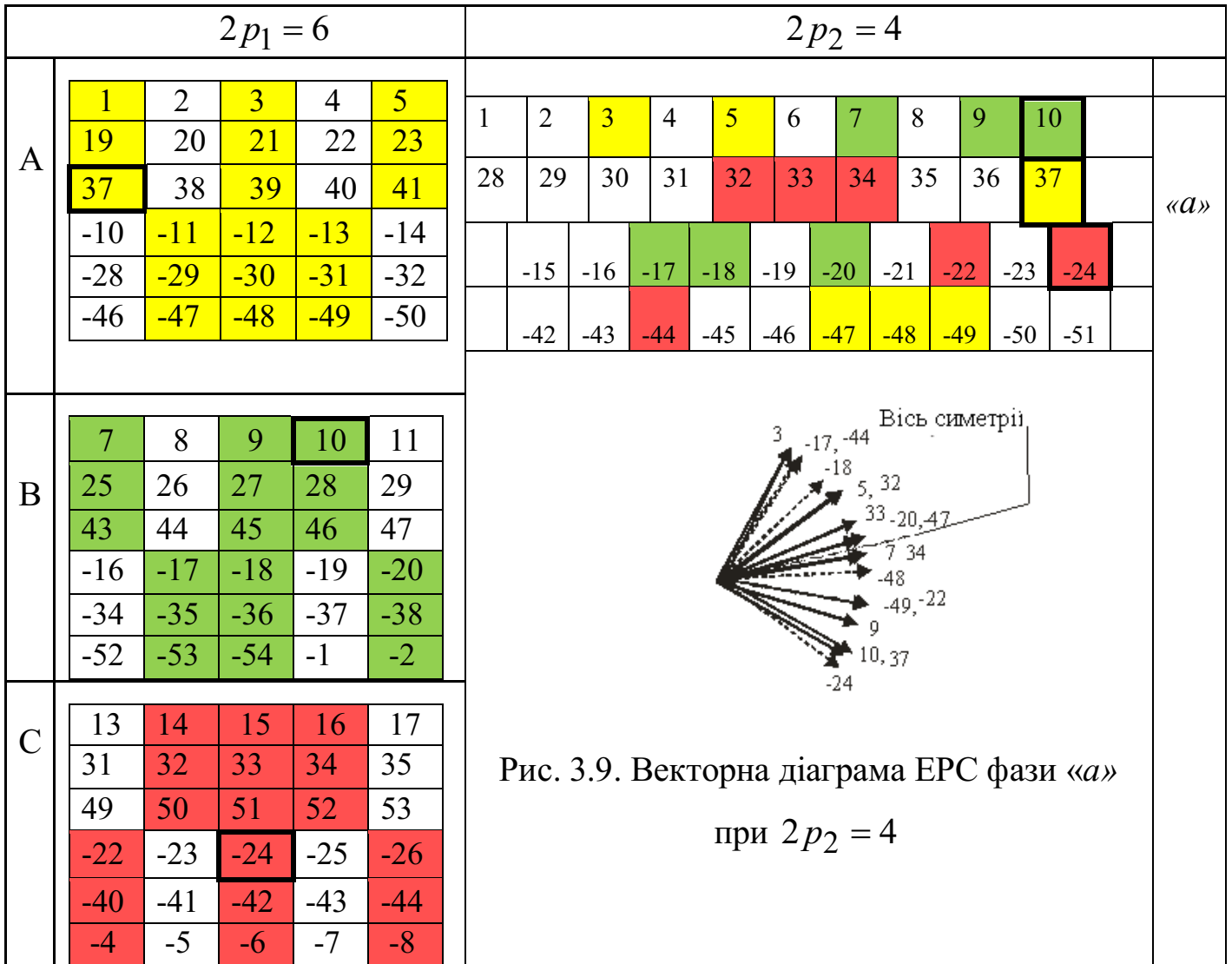
Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$ ЕРС гілки $a-A$ ЕРС гілки $a-B$ ЕРС гілки $a-C$

Рис. 3.10. Векторна діаграма пазових ЕРС паралельних гілок фази «a» при $2p_2 = 4$ ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ після симетрування, вар. 3

Для визначення величини зрівняльної ЕРС по програмі «ДЕЕ» у вихідні дані необхідно занести нові номери АКС трьох гілок фази «а» при $2p_2 = 4$:

- а-а: 3, 5, **37**, -47, -48, -49;

- в: 7, 9, **10**, -17, -18, -20;

- з: -22, **-24**, 32, 33, 34, -44.

Результати розрахунків при $2p_2 = 4$

$$k_{r(a-A)} = 0,865 = k_{r(c-A)} = 0,865 ; \quad k_{r(b-A)} = 0,8638 .$$

Величини зрівняльних ЕРС

$$\Delta E_{np}^* = 0,004 , \quad \Delta E_{звор}^* = 0,004 , \quad \Delta E^* = 0,001 .$$

Величини коефіцієнтів розподілу ППО

$$k_{r(2p_1=8)} = 0,904 , \quad k_{r(2p_2=6)} = 0,865 .$$

Таке симетрування дало позитивний результат і дозволило практично знищити зрівняльні ЕРС при $2p_2 = 4$. Розподіл АКС по фазах всієї обмотки для вар. 3 наведений в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Розподіл пазів по фазах ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, УУУ / УУУ , $Z_1 = 54$,

вар. №3

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	2	1	0	1	0	1	0	5	0		5		4		3			
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	4	3	2	3	2	3	2	1	2		1		0		5			
Z_1	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
$2p_1=6$	0	5	0	1	0	1	2	1	2		3		4		5			
$2p_2=4$	0	5	4	5	4	5	4	3	4		3		2		1			

По отриманому розподілу формуються номери АКС по дев'ятьох гілках схеми комутації УУУ/УУУ (табл. 3.3).

Схема комутації ППО вар. 3 наведена на рис. 3.11, а схема-розгортка ППО наведена на рис. 3.12. Обмотка по конструкції одношарова, що спрощує технологію її виготовлення.

Таблиця 3.7

Номера АКС по гілкам схеми УУУ/УУУ для ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$,
 $Z_1 = 54$, 3-й варіант

№ гілки	Закон перемикання	Номери АКС					
		3	5	37	-47	-48	-49
1	<i>A-a</i> (0-0 або 3-3)	3	5	37	-47	-48	-49
2	<i>A-b</i> (0-2 або 3-5)	1	-11	-12	-13	21	23
3	<i>A-c</i> (0-4 або 3-1)	19	-29	-30	-31	39	41
4	<i>B-a</i> (2-0 або 5-3)	7	9	10	-17	-18	-20
5	<i>B-b</i> (2-2 або 5-5)	25	27	28	-35	-36	-38
6	<i>B-c</i> (2-4 або 5-1)	43	45	46	-53	-54	-2
7	<i>C-a</i> (4-0 або 1-3)	-22	-24	32	33	34	-44
8	<i>C-b</i> (4-2 або 1-5)	-40	-42	50	51	52	-8
9	<i>C-c</i> (4-4 або 1-1)	-4	-6	14	15	16	-26

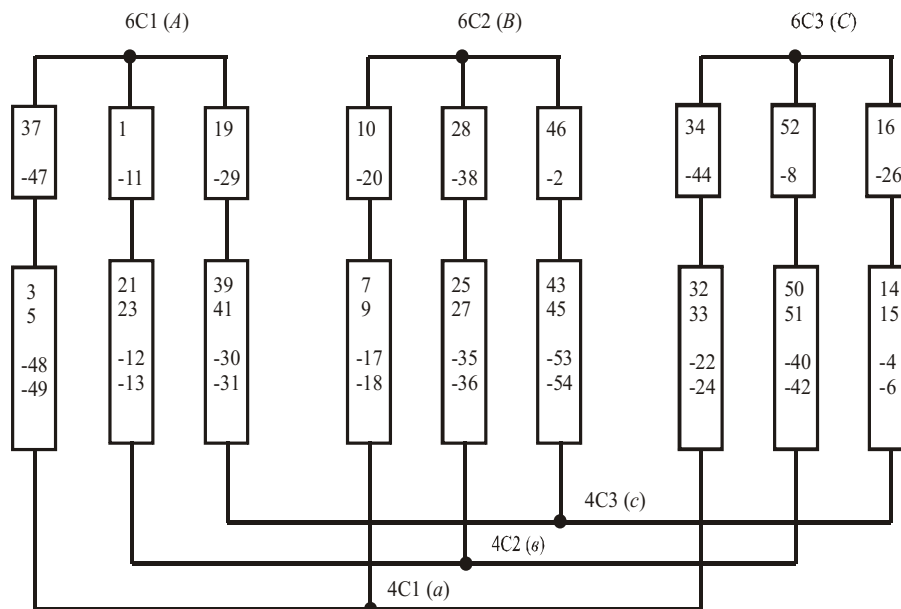


Рис. 3.11. Схема комутації УУУ/УУУ одношарової ППО

$$2p_1 : 2p_2 = 6 : 4, Z_1 = 54, \text{ вар. 3}$$

З рис. 3.10 видно, що обмотка складається з 18 котушкових груп. Причому 9 котушкових груп мають дві котушки із кроками $y_1 = 10$ й $y_2 = 9$ і 9 котушкових груп по одній котушці із кроком $y_1 = 10$. У кожній паралельній гілці однакові по величині котушкові групи, що спрощує процес укладання й комутації одношарової ППО [28].

Середній крок обмотки

$$y_{cp} = \frac{y_1 \cdot 18 + y_2 \cdot 9}{27} = \frac{10 \cdot 18 + 9 \cdot 9}{27} = 9,67.$$

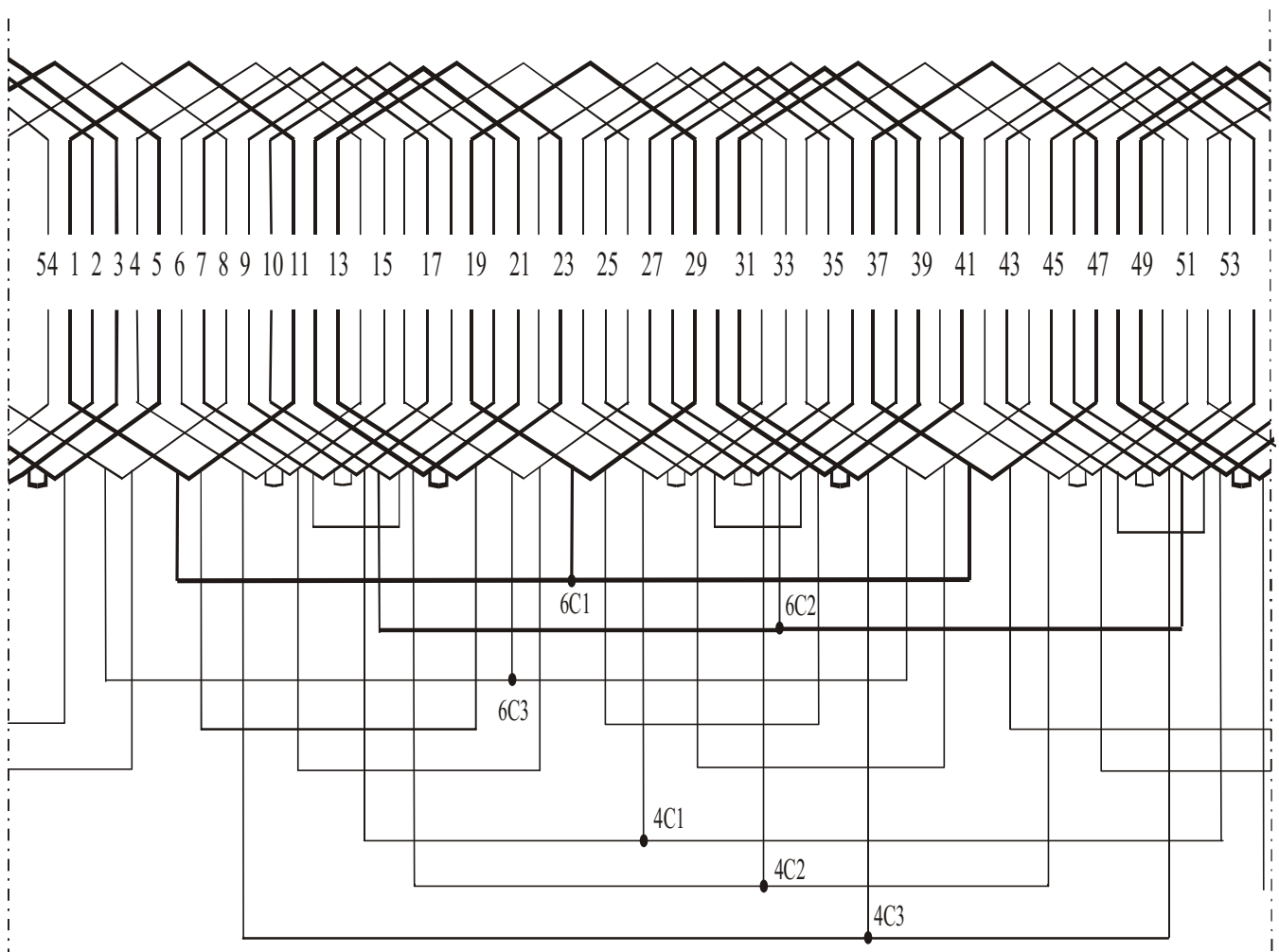


Рис. 3.12. Схема-розгортка одношарової ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 54$, зі схемою комутації УУУ / УУУ, вар. 3

3.3. Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, $Z_1 = 72$ зі схемою

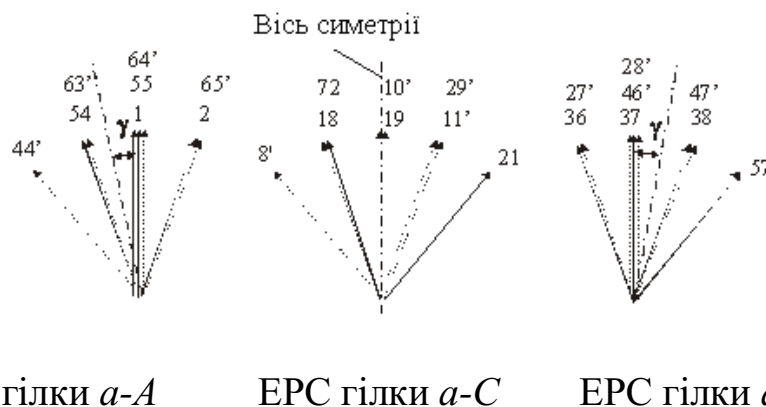
комутації УУУ / УУУ

Проведемо симетрування ППО, рис. 2.18 за рахунок зміни її конструкції. Одношарову обмотку перетворимо в одно-двошарову.

В обмотці при $2p_1 = 8$ й числі паралельних гілок $a = 3$ сумарні ЕРС паралельних гілок не рівні по амплітуді й не збігаються по фазі. Розглянемо, наприклад, такі векторні діаграми для 2-го варіанта ППО в табл. 3.8. Гілки фази А при $2p_1 = 8$ містять АКС із наступними номерами:

- 1-я гілка -а-а: +1,+2, -44+54,+55,-63,-64,-65;
- 2-я гілка – в: -28,-27,-46,-47,+36,+37,+38,+57;
- 3-я гілка – з: -8,-10,-11,+18,+19,+21,+29,+72.

На рис. 3.13 показані три векторні діаграми ЕРС гілок $a-A$, $a-B$, $a-C$.



ЕРС гілки $a-A$

ЕРС гілки $a-C$

ЕРС гілки $a-B$

Рис. 3.13. Векторна діаграма ЕРС паралельних гілок фази А при

$2p_1 = 8$ ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, вар. 2

По програмі «ДЕЕ» розраховані коефіцієнти розподілу гілок і їхнє положення в просторі

$$k_{R(a-A)} = k_{R(a-B)} = 0,944, \quad k_{R(a-C)} = 0,911,$$

тобто вектор ЕРС паралельної гілки $a-C$ є симетрируючим, а вектора ЕРС двох інших гілок зрушені стосовно нього в різні сторони на кут γ .

Для зменшення різницевої ЕРС паралельних гілок необхідно:

- зменшити величину кута γ ;
- зблизити по величині амплітуди результируючих ЕРС паралельних гілок або вирівняти коефіцієнти розподілу паралельних гілок.

У табл. 3.8 наведені номери АКС для повного числа пазів.

Таблица 3.8

Симетрування ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$

$2p_1 = 8$									$2p_2 = 6$												
«a»		70	71	72	1	2	3	4													
		16	17	18	19	20	21	22													
		33	34	35	36	37	38	39	40												
		52	53	54	55	56	57	58													
		-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13													
		-25	-26	-27	-28	-29	-30	-31													
		-43	-44	-45	-46	-47	-48	-49													
		-61	-62	-63	-64	-65	-66	-67	-68												
									1	2	3	4	5	6	7	8					
									25	26	27	28	29	30	31	32					
									49	50	51	52	53	54	55	56	A				
									-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20					
									-37	-38	-39	-40	-41	-42	-43	-44					
									-61	-62	-63	-64	-65	-66	-67	-68					
									9	10	11	12	13	14	15	16					
									33	34	35	36	37	38	39	40					
									57	58	59	60	61	62	63	64	B				
									-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28					
									-45	-46	-47	-48	-49	-50	-51	-52					
									-69	-70	-71	-72	-1	-2	-3	-4					
									17	18	19	20	21	22	23	24					
									41	42	43	44	45	46	47	48					
									65	66	67	68	69	70	71	72	C				
									-29	-30	-31	-32	-33	-34	-35	-36					
									-53	-54	-55	-56	-57	-58	-59	-60					
									-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12					

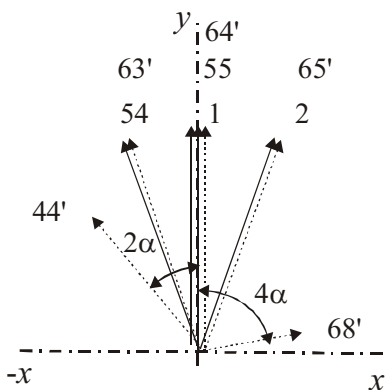


Рис. 3.14. Векторна діаграма ЕРС гілки $a-A$

Для зменшення величини кута γ до нуля необхідно повернути на цей кут результуючі вектори ЕРС гілок $a-A$ й $a-B$, перший по вартувий, другий проти вартувий стрілки. Для цього досить зробити обмотку однодвошаровою, що складається з котушок з різним числом витків.

На векторній діаграмі в паралельній гілці $a-A$ повинен перебувати 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 $2p_2 = 6$ не повинний змінитися.

Для того, щоб розподіл активних котушкових сторін (АКС) при $2p_2 = 6$ не змінювався, додаткова АКС у гілці $a-A$ може бути тільки з номером «-68», а в гілці $a-B$ тільки з номером «33».

Це можна побачити в табл. 3.8, у якій наведені АКС для повного числа пазів трьох фаз при $2p_2=6$ і однієї фази при $2p_1=8$.

Котушки, що лежать у пазах **68** і **33**, повинні мати число витків менше, ніж повна котушка. Причому сума витків у пазах **44** і **68**, а також у пазах **33** і **57** повинні дорівнювати числу витків повної котушки.

Зобразимо на рис. 3.14 векторну діаграму гілки $a-A$ й визначимо відносне число витків у пазах **68** і **44**, що належать цієї гілці.

Визначити відносне число витків w_1^* можна з умови рівності кута $\gamma = 0$.

Для цього припустимо, що в **44** пазу лежить котушка з відносним числом витків w_1^* , а в **68** пазу лежить котушка з відносним числом витків $-(1 - w_1^*)$.

Сполучимо вісь симетрії гілки $a-C$ із віссю y і перпендикулярно цієї осі проведемо вісь x . Щоб кут $\gamma = 0$, необхідно, щоб суми проєкцій векторів ЕРС гілок $a-A$ на вісь x і $-x$ рівнялися б по величині.

Складемо рівняння, виходячи з рис. 3.14:

$$2w^* \cdot \sin \alpha + w_1^* \cdot \sin 2\alpha = 2w^* \cdot \sin \alpha + (w^* - w_1^*) \sin 4\alpha;$$

$$w_1^* \sin 2\alpha + w_1^* \sin 4\alpha = w^* \sin 4\alpha;$$

$$w_1^* (\sin 2\alpha + \sin 4\alpha) = w^* \sin 4\alpha;$$

$$w_1^* = \frac{1 \cdot \sin 80^\circ}{\sin 40^\circ + \sin 80^\circ} = 0,61.$$

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

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

- $\alpha = 20^\circ$.

Таким чином, в **44** пазу повинна лежати додаткова АКС із відносним числом витків $w_1^* = 0,61$, а в **68** пазу повинна лежати додаткова АКС із відносним числом витків $w_2^* = 0,39$.

Аналогічно в гілку $a-B$ повинні бути додані АКС із числом $w_1^* = 0,61$ у **57** пазу та $w_2^* = 0,39$ у **33** пазу.

Таке симетрування дало позитивний результат і дозволило практично знищити зрівняльні ЕРС при $2p_1 = 8$.

Для визначення величини ΔE по програмі «ДЕЕ» у вхідні дані необхідно занести номери АКС трьох гілок фази «а» при $2p_1 = 8$ (табл. 3.9) з урахуванням відносного числа витків у котушках, що належать гілкам $a-A$, $a-B$, $a-C$:

Таблиця 3.9

Число витків у секціях після симетрування

$a-A$	+1	+2	+54	+55	-63	-64	-65	-44	-68
w^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,61	0,39
$a-B$	+36	+37	+38	-27	-28	-46	-47	+57	+33
w^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,61	0,39
$a-C$	+72	+18	+19	+21	-8	-10	-11	-29	
w^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	

Результати розрахунків

$$k_{R(a-A)} = 0,91175, \quad k_{R(a-B)} = 0,91175, \quad k_{R(a-C)} = 0,91137,$$

$$\Delta E^*_1 = 0,001, \quad \Delta E^*_2 = 0,001, \quad \Delta E^* = 0,001.$$

Були визначені додаткові АКС тільки в гілках фази «а». Теж необхідно зробити й для фаз «в» і «с» при $2p_1 = 8$.

Для цього зобразимо на рис. 3.15 торцеву схему ППО для кожної третини пазів одну під іншою. Обведемо товстими лініями АКС трьох гілок тільки фази А з урахуванням відносного числа витків у кожній котушці.

Розподіляємо АКС, що залишилися по двох інших фазах. При цьому враховуємо, що при $2p_2 = 6$ в кожній третині пазів розподіл повторюється, а при $2p_1 = 8$ в кожній наступній третині пазів розподіл відрізняється на 120° та 240° , що еквівалентно додаванню чисел 2 та 4.

Після одержання торцевої схеми в повнім числі пазів, можна скласти схему одно-двошарової обмотки, що складається з концентричних котушок [56].

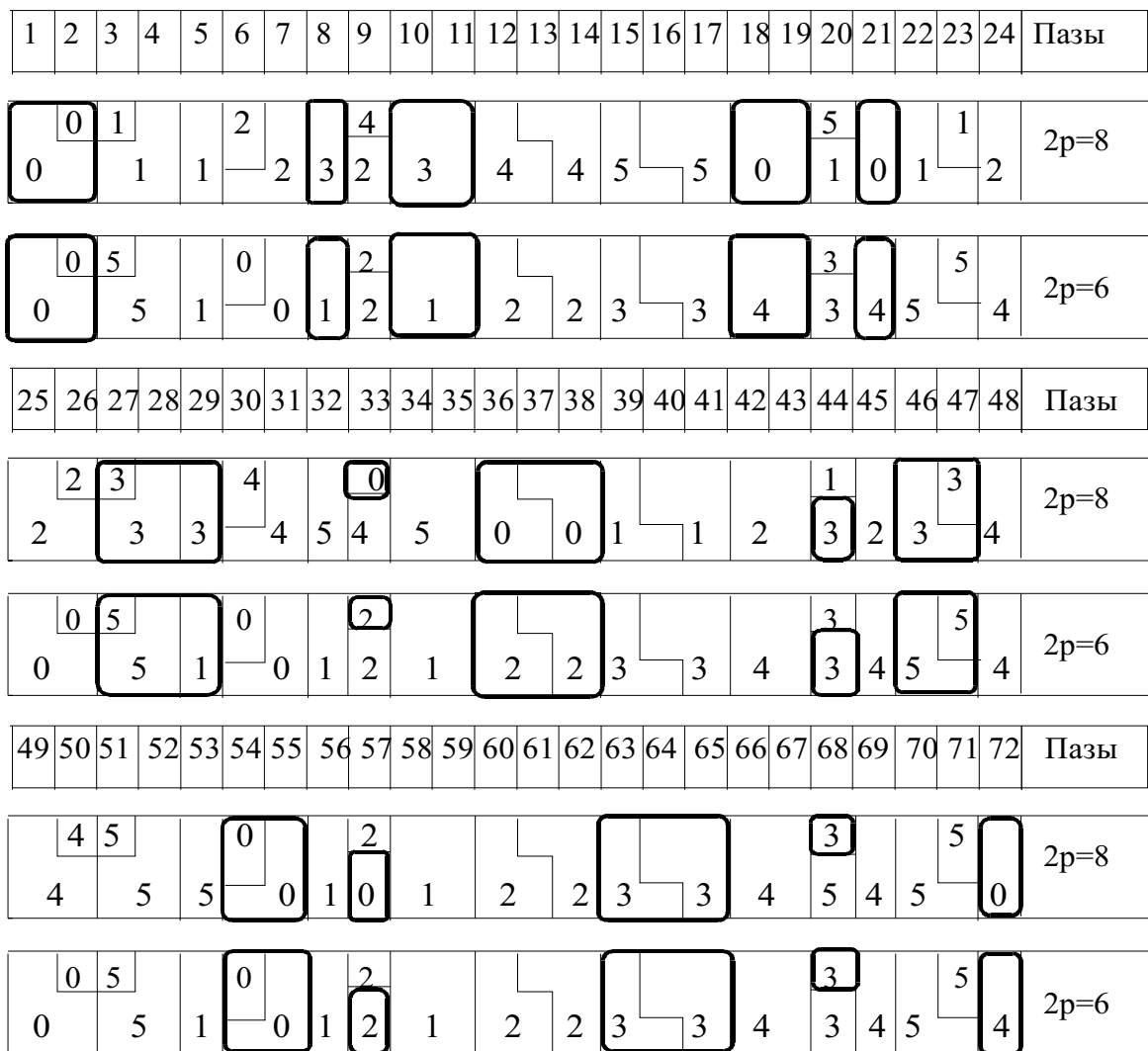


Рис. 3.15. Торцева схема одно-двошарової ППО $2p_1:2p_2 = 8:6$,
УУУ/УУУ

Схема з'єднання котушкових груп одно-двошарової ППО зі схемою комутації УУУ/УУУ наведена на рис. 3.16.

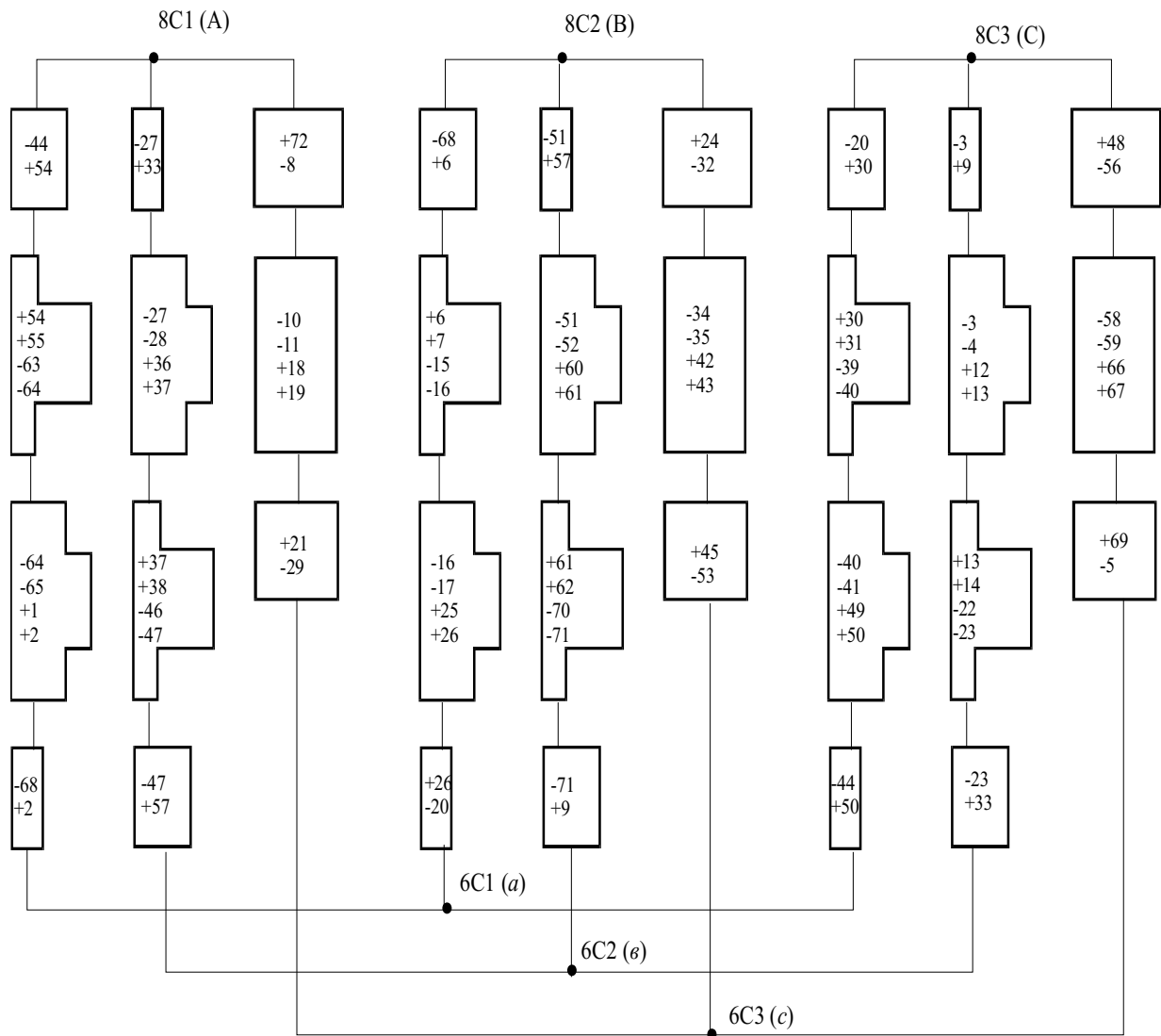


Рис. 3.16. Схема з'єднання котушкових груп одно-двошарової
 ППО $2p_1 : 2p_2 = 8 : 6$, УУУ / УУУ

Таке симетрування ППО при зміні розподілу при $2p_1 = 8$ за рахунок додаткових АКС без зміни розподілу на $2p_2 = 6$ дозволяє значно знизити різниці ЕРС.

Обмотка при цьому стає одно-двошаровою.

3.4. Виникнення синхронних моментів у АД з полюсоперемикальними обмотками

Характерною рисою ППО є підвищений зміст гармонік у спектрі їх МРС. Розширення порядкового складу гармонік прямого й зворотного обертання в спектрах МРС асинхронних машин створює передумови для виникнення синхронних моментів як при нерухомому роторі, так і при обертанні машини [62].

Синхронні моменти виникають у результаті взаємодії гармонік магнітного поля статора й ротора, що мають однаковий порядок, але створених незалежно друг від друга.

Порядок роторних гармонік магнітного поля μ_a визначається рівністю

$$\mu_a = k_a \cdot Z_2 + \nu_a, \quad (1)$$

де k_a - будь-яке ціле число $\pm 1, \pm 2, \dots$ не рівне нулю;

ν_a - порядок статорної гармоніки.

У вираз (1) порядок статорної гармоніки необхідно підставляти з урахуванням напрямку її обертання:

$+\nu_a$, при обертанні убік основної хвилі порядку p ;

$-\nu_a$, при обертанні у зворотну сторону.

Якщо в полі статорної обмотки є гармоніка ν_b , порядок якої збігається з роторною гармонікою μ_a , тобто $\mu_a = \pm \nu_b$, то з'являються умови для виникнення синхронного моменту.

Гармоніки μ_a й ν_b знаходяться у синхронізмі при рівності їхніх частот обертання щодо статора, тобто $\omega_{1\nu_b} = \omega_{1\mu_a}$. (2)

Гармоніка магнітного поля ν_b обертається щодо статора з кутовою частотою

$$\omega_{1\nu_b} = \frac{2\pi f_1}{\nu_b}. \quad (3)$$

Гармоніка μ_a обертається щодо ротора з кутовою частотою

$$\omega_{2\mu_a} = \frac{2\pi f_1 \cdot s_{\nu_a}}{\mu_a}, \quad (4)$$

де s_{ν_a} - ковзання ротора щодо гармоніки порядку ν_a

$$s_{\nu_a} = 1 - \frac{\nu_a}{p}(1 - s). \quad (5)$$

Щодо статора роторна гармоніка μ_a обертається з кутовою частотою

$$\omega_{1\mu_a} = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s) + \omega_{2\mu_a}, \quad (6)$$

s - ковзання ротора щодо робочої гармоніки порядку p .

Підставляючи в (2) значення відповідних частот обертання з (3) і (6), одержимо

$$\frac{2\pi f_1}{\nu_b} = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s) + \frac{2\pi f_1}{\mu_a} \cdot \left[1 - \frac{\nu_a}{p}(1 - s)\right]$$

або

$$\frac{1}{\nu_b} = \frac{\mu_a - \nu_a}{\mu_a \cdot p}(1 - s) + \frac{1}{\mu_a}. \quad (7)$$

При $\mu_a = \nu_b$ рівняння (7) запишеться у вигляді

$$1 = \frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s) + 1 \quad (8)$$

і задовольняється при $s = 1$, тобто при нерухомому роторі.

При $\mu_a = -v_b$ рівняння (7) приме вигляд

$$-1 \stackrel{\equiv}{=} \frac{\mu_a - v_a}{p} (1 - s) + 1. \quad (9)$$

$$3 (1) \quad \mu_a - v_a = k_a \cdot Z_2. \quad (10)$$

Підставивши (10) в (9) і зробивши перетворення, одержимо

$$1 - s \stackrel{\equiv}{=} -\frac{2p}{k_a \cdot Z_2} = \frac{n}{n_1}, \quad (11)$$

де n - частота обертання ротора;

n_1 - частота обертання робочої гармоніки p поля статора.

Таким чином, синхронізм для гармонік $\mu_a = -v_b$ наступить при частоті обертання ротора

$$n = -\frac{2p \cdot n_1}{k_a \cdot Z_2} = -\frac{6000}{k_a \cdot Z_2} \text{ (об / хвил)}, \quad (12)$$

тому що при частоті мережі $f_1 = 50$ Гц величина

$$2p \cdot n_1 = 2 \cdot 60 \cdot f_1 = 6000 \text{ об / хвил.}$$

При негативних значеннях k_a синхронізм наступає при позитивній частоті обертання ротора, тобто в руховому режимі, а для позитивних значень k_a - при негативній частоті обертання ротора, тобто в гальмовому режимі.

Найбільшу шкоду приносять синхронні моменти, що виникають при нерухомому роторі, тому що вони перешкоджають пуску двигунів. Синхронні моменти, що виникають при обертанні ротора, не завжди приводять до негативних наслідків, тому що в більшості випадків ротор проходить по інерції через точки синхронізму взаємодіючих гармонік, не затримуючись на цій частоті обертання.

Таким чином, найбільш важливо обмежити синхронні моменти при нерухомому роторі. Це може бути здійснено шляхом правильного вибору числа пазів ротора Z_2 при відомому числі пазів статора Z_1 .

З (1) отримуємо

$$Z_2 = \frac{\mu_a - \nu_a}{k_a}. \quad (13)$$

Синхронізм при нерухомому роторі має місце при $\mu_a = \nu_b$.

Отже, число пазів ротора, з умови відсутності синхронних моментів при пуску, бути дорівнювати

$$Z_2 = \frac{\nu_b - \nu_a}{k_a}, \quad (14)$$

де ν_a й ν_b гармоніки в розподілі МРС застосовуваної обмотки статора.

Найбільші по амплітуді синхронні моменти будуть мати місце при $\nu_a = p$ й $k_a = 1$ або $k_a = 2$. Підставивши ці значення в (14) одержимо вирази для несприятливих чисел пазів ротора

$$\begin{cases} Z_2 = |\nu_b - p|; \\ Z_2 = \left| \frac{\nu_b - p}{2} \right|. \end{cases} \quad (15)$$

Синхронізм при обертанні ротора настає при $\mu_a = -\nu_b$, тобто коли має місце рівність

$$-\nu_b - \nu_a = k_a \cdot Z_2,$$

звідки

$$Z_2 = -\frac{\nu_b + \nu_a}{k_a}. \quad (16)$$

При $\nu_a = p$ й $k_a = 1$ або $k_a = 2$, отримаємо вирази для несприятливих пазів ротора при обертанні ротора

$$\begin{cases} Z_2 = |v_b + p|; \\ Z_2 = \left| \frac{v_b + p}{2} \right|. \end{cases} \quad (17)$$

Знаючи гармонійний склад МРС застосовуваної обмотки статора, можна користуючись рівняннями (15) і (16), визначити ряд пазів ротора у двигуні з умови відсутності синхронних моментів як при пуску, так і при обертанні.

Як приклад, розглянемо двошвидкісну несиметричну обмотку зі співвідношенням чисел полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, виконану в 48 пазах статора [4, 62].

Гармоніки МРС із номерами до $v = 2Z_1$ й знаками обертання стосовно робочої гармоніки при $p_1 = 3$ й $p_2 = 2$ зведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Номери найбільш вагомих гармонік двошвидкісної ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$

$v_a = p_1 = 3$	$v_a = p_2 = 2$
$v_b = -7, -13, 19, -29, 35, 41, 51, -55, -61$	$v_b = -8, 14, -34, 40, -46, 50, -56, 62$

Використовуючи формули (15) і (17), одержимо числа пазів ротора, при яких виникають синхронні моменти при пуску й при обертанні, залишивши номери пазів у діапазоні

$$Z_1 - 20 \leq Z_2 \leq Z_1 + 20.$$

Номери пазів визначені тільки при $k_a = 1$. Результати розрахунків зведені в табл. 3.11.

Таким чином, щоб уникнути значних синхронних моментів як при нульовій швидкості, так і при розгоні двигуна, число пазів ротора повинне бути обране з наступного ряду

$$Z_2 = 30, 40, 56, 62, 66.$$

Таблиця 3.11

Несприятливі числа пазів ротора для ППО з $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$

$p_2 = 2$		$p_1 = 3$	
При $s = 1$	$Z_2 = 36, \mathbf{38}, 48, 58, 60$	При $s = 1$	$Z_2 = 32, \mathbf{38}, 48, 58, 64$
При $s \neq 1$	$Z_2 = 32, 42, 44, 52, 54, 64$	При $s \neq 1$	$Z_2 = \mathbf{38}, 42, 44, 52, 54, 58$

Число пазів ротора $Z_2 = 38$ виділено жирним, так як у серійному двигуні 4A225M6, у якому передбачалося застосування розглянутої ППО, на роторі 38 пазів.

Із чисел пазів ротору, що рекомендуються, перевагу варто віддати $Z_2 = 30$ числу або $Z_2 = 40$, тобто числам, які менше числа пазів $Z_1 = 48$ статора. У цьому випадку зменшуються амплітуди можливих асинхронних моментів.

Аналіз наведених даних дозволяє припустити, що у двошвидкісному двигуні з розглянутою обмоткою й ротором, що має 38 пазів, можуть виникнути синхронні моменти при включенні на $2p_2 = 4$ при нерухомому роторі, а при включенні на $2p_1 = 6$, як при нерухомому роторі, так і при частоті обертання $n = 157,9$ об/хвил.

Визначимо, при взаємодії яких пар статорних і роторних гармонік та на якій частоті обертання ротора можуть виникнути синхронні моменти у двигуні із ППО при $Z_1 = 48$ й $Z_2 = 38$.

Дані таких розрахунків зведені в табл. 3.12 при $2p_1 = 6$ й табл. 3.13 при $2p_2 = 4$. З таблиць видно, що для розглянутої схеми ППО у двигуні зі співвідношенням чисел пазів статора й ротора 48/38 з'являється багато пар гармонік $\mu_a = \pm v_b$, здатних створювати синхронні моменти при нерухомому роторі й при частоті обертання 157,9 об/хвил.

Таблиця 3.12

Визначення пар гармонік, що створюють синхронні моменти при $2p_1 = 6$

$k_a = 1$	v_a	+3	-7	-13	+19	-29	+35	+41	+51
+1	$\mu_a = 38 + v_a$	+41	+31	+25	+57	+9	+73	+79	+89
	v_b	+41	-	-	-	-	-	-	-
	$n, \text{ об/мин}$	0,0	-	-	-	-	-	-	-
-1	$\mu_a = -38 + v_a$	-35	-45	-51	-19	-67	-3	+3	+13
	v_b	+35	-	+51	+19	+67	+3	+3	-13
	$n, \text{ об/мин}$	157,9	-	157,9	157,9	157,9	157,9	0,0	157,9

Таблиця 3.13

Визначення пар гармонік, що створюють синхронні моменти при $2p_2 = 4$

$k_a = 1$	v_a	+2	-8	+14	-34	+40	-46	+50
+1	$\mu_a = 38 + v_a$	+40	+30	+52	+4	+78	-8	88
	v_b	+40	-	-	-	-	-8	-
	$n, \text{ об/хвил}$	0,0	-	-	-	-	0,0	
-1	$\mu_a = -38 + v_a$	-36	-46	-24	-72	+2	-84	12
	v_b	-	-46	-	-	+2	-	-
	$n, \text{ об/хвил}$	-	0,0	-	-	0,0	-	-

Необхідно змінити число пазів ротора, при якому буде зменшення або до повне знищення синхронних моментів у двигуні з розглянутою двошвидкісною обмоткою.

Для підтвердження наведених розрахунків були виготовлені макетні зразки двошвидкісного двигуна на базі 4А225 М4 з 48 пазами на статорі та різними числами пазів на роторі - з $Z_2 = 38$, як у базовій машині та з $Z_2 = 30$, що рекомендовано за результатами досліджень. Механічні характеристики випробуваних двигунів показані на рис. 3.17.

У двигуні із числом пазів 38 на роторі були зафіксовані синхронні моменти при пуску при $2p_1 = 6$ й $2p_2 = 4$ і синхронний момент при обертанні на $2p_1 = 6$. У двигуні із числом пазів 30 на роторі синхронних моментів не було зафіксовано [4].

На підставі наведених результатів можна затверджувати, що для двошвидкісних двигунів зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ рекомендованим співвідношенням чисел пазів на статорі й роторі є $Z_1 / Z_2 = 48 / 30$.

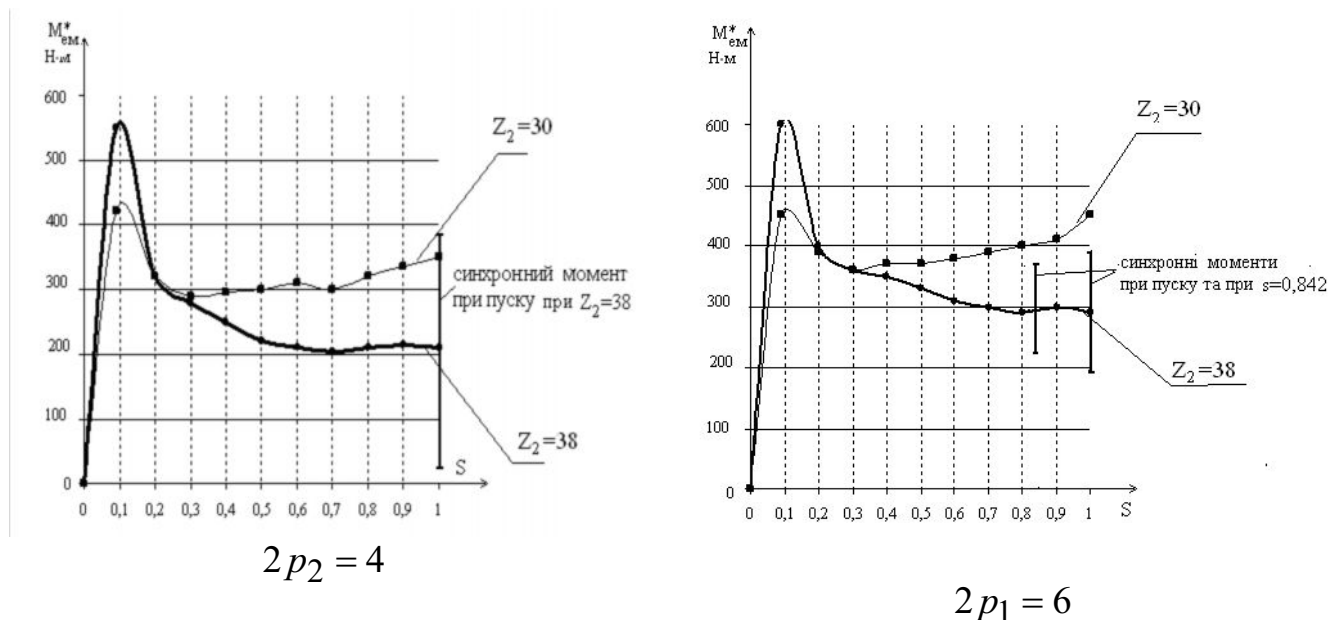


Рис. 3.17. Експериментальні характеристики 4А 225 М6/4 з двошвидкісною обмоткою та різними числами пазів на роторі

4. ДВОФАЗНІ ОБМОТКИ

4.1. Двофазні одношвидкісні обмотки

У статорах однофазних двигунів укладають дві однофазні обмотки. Одна з них - головна або робоча, друга - допоміжна або пускова. Обмотки розташовують у пазах статора так, що їхні осі зрушені в просторі на електричний кут 90° .

В однофазних конденсаторних двигунах обидві обмотки займають по половині пазів і по своєму розподілі еквівалентні двофазним обмоткам із чергуванням фаз у сусідніх фазних зонах А, В, А', В' [60].

Число пазів на полюс і фазу двофазної обмотки визначають по виразу:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{Z_1}{4p},$$

де $m = 2$ - число фаз двофазної обмотки.

Формування схем двофазних обмоток можна здійснювати за допомогою числових рядів.

Розглянемо приклад:

Число пазів статора $Z_1 = 12$, число полюсів $2p = 2$, $m = 2$.

Визначаємо:

- число пазів на полюс і фазу: $q = Z_1 / 4p = 12 / (4 \cdot 1) = 3$;
- числовий ряд обмотки: 3, 3, 3, 3;
- чергування фаз: А,В,А',В'.

Розподіл активних котушкових сторін (АКС) обмотки по пазах і фазних зонах наведений в табл. 4.1.

Розподіл пазів по фазних зонах ($Z_1 = 12, 2p = 2, m = 2$)

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ФЗ	А			В			А'			В		

За даними табл. 4.1 створена схема з'єднання АКС двофазної обмотки при підключенні її в однофазну мережу (рис. 4.1). Обмотка має чотири вивідних кінці: фаза А - С1, С2; фаза В - В1, В2.

У допоміжну фазу включений конденсатор - C_p для зрушення струмів обмоток у часі й створення в машині обертового магнітного поля.

По своєму конструктивному виконанню двофазні обмотки можуть бути як одношаровими (концентричними або шаблоновими), так і двошаровими або одно-двошаровими.

Дана обмотка виконана одношаровою концентричною й складається з котушок із кроками: $y_1 = 8, y_2 = 6$ і $y_3 = 4$.

Середній крок:

$$y_{cp} = \tau = 6.$$

Кожна фаза обмотки містить по одній котушковій групі із трьох котушок.

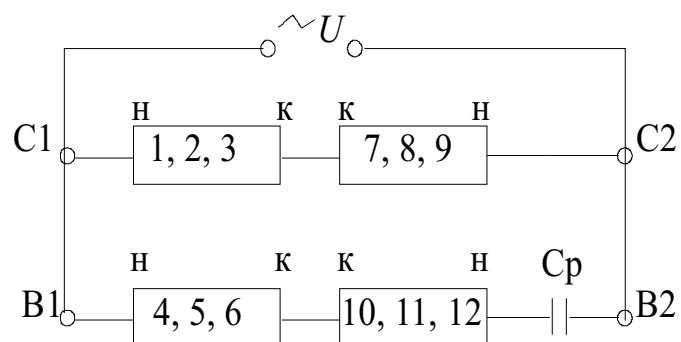


Рис. 4.1. Схема з'єднання АКС двофазної обмотки

$$(Z_1 = 12, 2p = 2, m = 2)$$

Для зменшення вильоту лобових частин котушок одношарові обмотки часто виконують «врозвал».

Якщо число пазів на полюс і фазу парне, то обмотки «врозвал» не відрізняються від таких же обмоток трифазних машин.

При непарному q зовнішні котушки в групах роблять «розчесаними», тобто відгинають лобові частини половини витків в одну сторону, а другої половини - в іншу.

Кожна фаза розглянутої обмотки ($q=3$) буде містити по дві котушкові групи із кроками $y_1 = 6$ й $y_2 = 4$.

Середній крок обмотки при цьому зменшується

$$y_{cp} = (6 + 4) / 2 = 5.$$

В електромагнітному відношенні обмотка «врозвал» еквівалентна обмотці з діаметральним кроком. Схема-розгортка одношарової концентричної обмотки «врозвал» показана на рис. 4.2, а.

На рис. 4.2, б побудована векторна діаграма ЕРС фаз цієї ж обмотки. Обидві фази займають однакові зони, а осі фаз зрушені в просторі на електричний кут 90° .

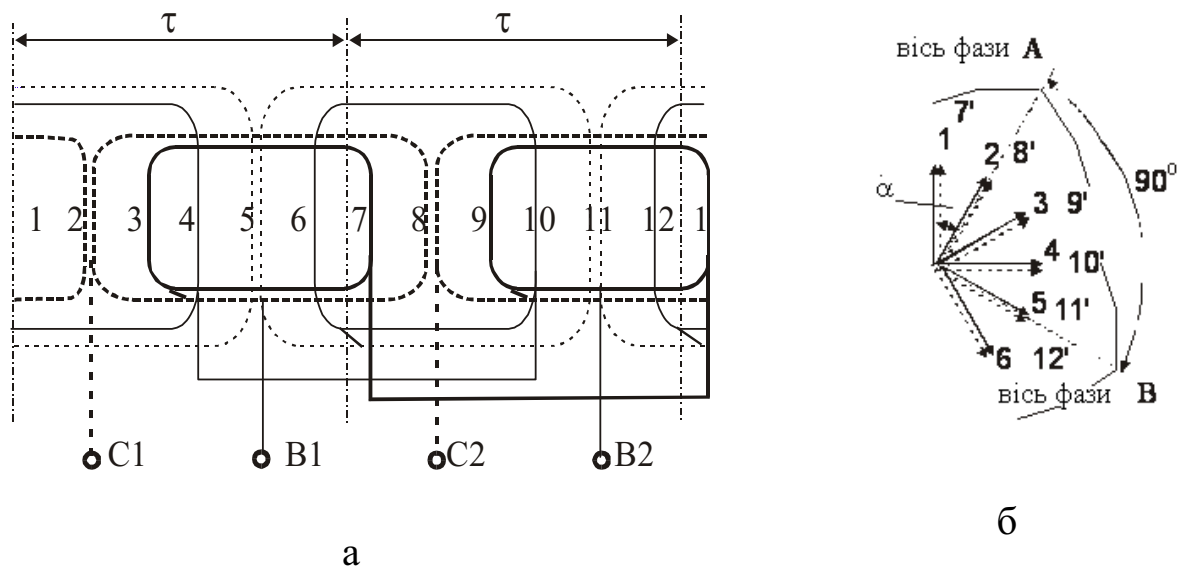


Рис. 4.2. Схема-розгортка (а) і зірка ЕРС фаз (б) двофазної обмотки ($Z_1 = 12, 2p = 2, m = 2$)

Використовуючи дані цього приклада, покажемо одно-двошарове виконання обмотки. У табл. 4.2 наведений розподіл пазів по фазах у двошаровому виконанні обмотки із кроком $y = 8$.

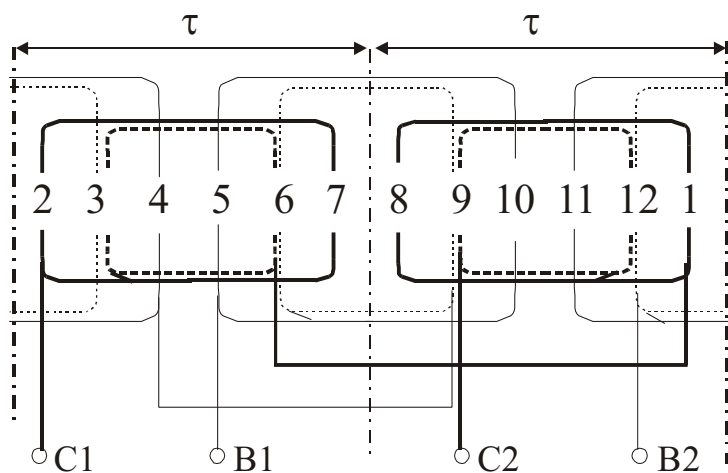
Таблиця 4.2

Розподіл пазів по фазних зонах ($Z_1 = 12, 2p = 2, m = 2$)

Z1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1
Верхн. шар	А		В			А'			В'			А
Нижн. шар	А	В			А'			В'			А	

За даними табл. 4.2 створена схема-розгортка (рис. 4.3) одно-двошарової обмотки. Кожна фаза цієї обмотки складається із двох концентричних котушкових груп «врозвал».

Зовнішня одношарова котушка виконується із кроком $y_1 = 5$, внутрішня двошарова з половинним числом витків - із кроком $y_2 = 3$.



Котушки з половинним числом витків позначені пунктирними лініями.

Середній крок:

$$y_{cp} = (5+3)/2 = 4.$$

Рис. 4.3. Схема-розгортка одно-двошарової двофазної обмотки

На рис. 4.4 наведена схема включення двофазної обмотки в однофазну мережу. Робоча обмотка С1-С2 вмикається безпосередньо в однофазну мережу. Допоміжна або пускова обмотка В1-В2 підмиється до однофазної мережі через фазозрушуючий елемент. У цьому випадку це конденсатор.

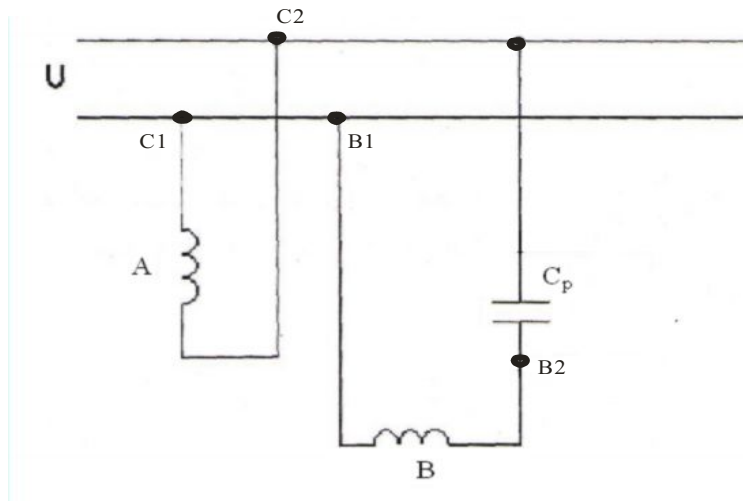


Рис. 4.4. Схема включення двофазної обмотки в однофазну мережу

4.2. Двофазні двошвидкісні полюсоперемикальні обмотки

4.2.1. Синтез симетричних двофазних двошвидкісних полюсоперемикальних обмоток (ППО) методом фазової модуляції

Метод фазової модуляції підходить для синтезу двофазних ППО [46]. Замість числа фаз $m = 3$ необхідно у формули 1-17...1-19 підставляти число фаз $m = 2$.

Розглянемо приклад: $Z_1 = 24$, $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$.

Розраховуємо:

- число пар полюсів хвилі модуляції p_m :

$$p_m = \frac{p_1 \pm p_2}{m} = \frac{3 - 2}{2} = \frac{1}{2};$$

- число пар полюсів базової обмотки P_{δ} :

$$P_{\delta} = p_1 - p_m = 3 - \frac{1}{2} = 2\frac{1}{2};$$

- число пазів на полюс і фазу базової обмотки q_{δ} :

$$q_{\delta} = \frac{Z_1}{2m \cdot p_{\delta}} = \frac{24 \cdot 2}{4 \cdot 5} = \frac{12}{5} = 2\frac{2}{5};$$

- число пазів на полюс і фазу хвилі модуляції q_m :

$$q_m = \frac{Z_1}{2m \cdot p_m} = \frac{24 \cdot 2}{4 \cdot 1} = 12.$$

Числа q_{δ} й q_m можуть бути як цілими, так і дробовими, позитивними й негативними.

Числові ряди для базової обмотки й хвилі модуляції:

- для базової обмотки: 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2;
A, B, A', B', A, B, A', B', A, B;

- для хвилі модуляції: 12, 12;
A, B.

Синтез двофазних двошвидкісних ФМ обмоток виконують розрахунково-графічним способом. Для цього чергування фаз у зонах базової обмотки й модуляційного розподілів:

- A, B, A', B' замінюють на цифрові індекси
- 0, 1, 2, 3, які показують кратність 90° фази струмів.

Послідовність розподілу фазних зон обмотки для даного приклада представлена в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Синтез методом ФМ двофазної ППО $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 24$

Z1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Z1
1	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_b = 2\frac{1}{2}$
ΔZ	0											1											$p_m = \frac{1}{2}$		
=0	0	1	2	3	0	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	$p_1 = 3$
	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0	0	1	2	3	$p_2 = 2$

У першому рядку зверху табл. 4.2 показана нумерація пазів Z_1 або номера активних котушкових сторін (АКС) обмотки.

У другому рядку, відповідно до числового ряду, розташовані фазні зони базової обмотки із числом пар полюсів P_b . При цьому максимальне значення індексу зони обмежується цифрою 3.

В третьому рядку представлені зони модуляційного розподілу із числом пар полюсів P_m . Отримані у результаті такої побудови в тому самому числі пазів два розподіли – базове і модуляційне – дозволяють перейти до результуючого розподілу із заданим числом пар полюсів $p_1 = 3$. Приналежність секцій цієї обмотки до фаз визначається алгебраїчним підсумовуванням чисел базового й модуляційного розподілів по всіх секціях Z_1 .

У четвертому рядку розташовані фазні зони робочого розподілу із числом пар полюсів $p_1 = 3$, які отримані підсумовуванням індексів базового й модуляційного розподілів для всіх АКС. Таким чином, у результаті модуляції початкового розподілу із числом полюсів P_b просторовою модуляційною хвилею із числом пар полюсів P_m утворюється результуюча обмотка із числом полюсів P_1 .

Для перемикування обмотки із заданого числа пар полюсів $p_1 = 3$ на число пар полюсів $p_2 = 2$ варто змінити фазу струму на 180° у секціях, що попадають під непарні зони хвилі модуляції.

У п'ятому рядку наведений розподіл обмотки для другого числа пар полюсів $p_2 = 2$.

Для визначення індексів другого модуляційного розподілу із числом пар полюсів $p_2 = 2$ досить змінити індекси фаз АКС першого робочого розподілу на дві одиниці, якщо вони попадають під непарні зони хвилі модуляції.

Інші індекси залишаються без зміни.

На рис. 4.5 показане з'єднання секцій двошвидкісної ППО, що перемикається за схемою U/UU.

При таких перемикуванні змінюється фаза струму на 180° у половині секцій обмотки.

У лівій частині кожної фази обмотки включені секції, у яких фаза струму не змінюється при перемикуванні числа полюсів, а в правій частині включені секції, у яких змінюється напрямок струму.

На схемі секції об'єднані в котушкові групи, зображені прямокутниками із вказівкою їх початків (н) і кінців (к).

Для роботи обмотки із числом полюсів $2p_1 = 6$ однофазне живлення подається на з'єднанні разом затискачі 6С1, 6С2 і затискач 0 (рис. 4.5, а).

Для перемикування на другу частоту обертання з $2p_2 = 4$ однофазне живлення подається на з'єднанні разом затискачі 4С1, 4С2 і з'єднанні разом затискачі 6С1, 6С2, 0. У кожній фазі утворюється по дві паралельні гілки (рис.4.5, б).

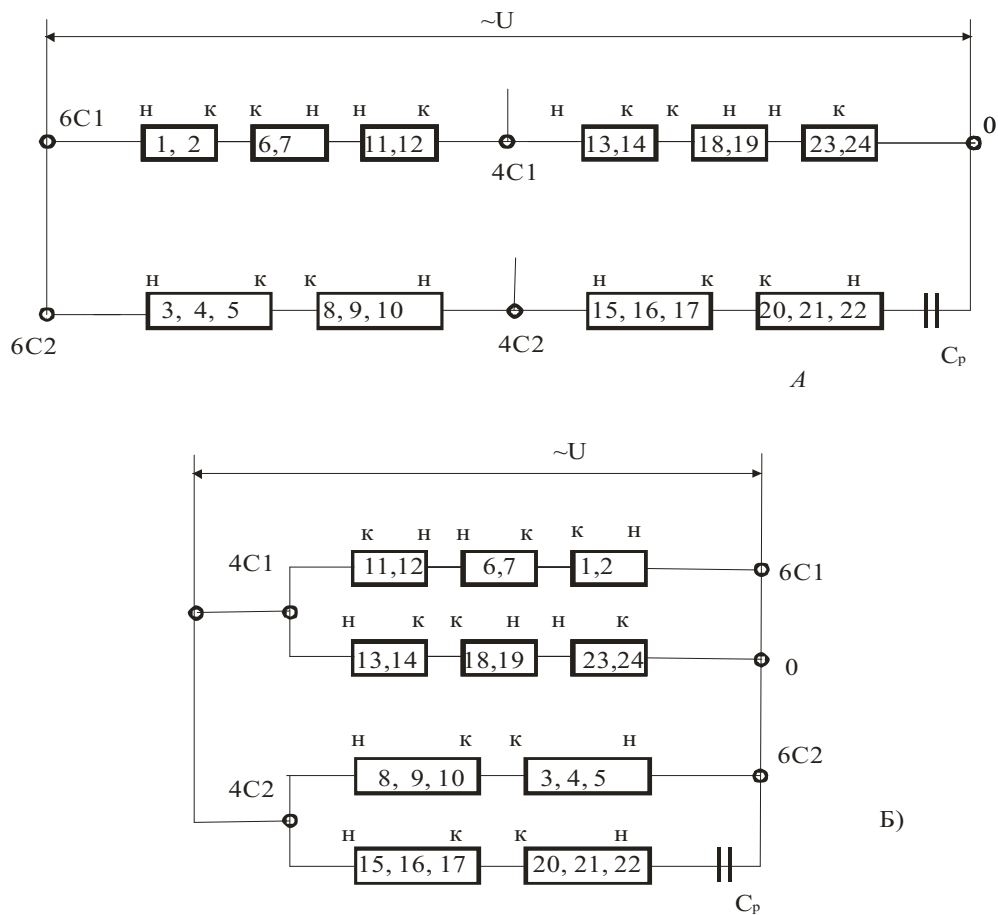


Рис. 4.5. Схема з'єднання котушкових груп двошвидкісної обмотки

з співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 24$

Для одержання нових варіантів двошвидкісних обмоток зробимо зрушення модуляційного розподілу у табл. 4.4.

Зрушення модуляційного розподілу здійснюється в будь-якому обраному напрямку. Найбільше число кроків зрушення виходить за умови:

$$D = \frac{Z_1}{4} = \frac{24}{4} = 6.$$

Величина мінімального зсуву, достатня для визначення всіх можливих оригінальних варіантів, дорівнює:

$$\Delta Z_{\min} \quad N_{\text{дон}} = \text{entier}\left(\frac{D}{2}\right) \neq \text{entier}\left(\frac{6}{2}\right) = 3.$$

При цьому число додаткових варіантів:

$$N_{don} \rightarrow \frac{Z_1}{8} = \frac{24}{8} = 3.$$

Таблиця 4.4

Синтез методом ФМ варіантів двошвидкісної двофазної обмотки із

$$2p_1 : 2p_2 = 6 : 4 \text{ при різних } \Delta Z$$

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Z_1
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_\phi = 2\frac{1}{2}$
ΔZ =4	0			1						2						$p_m = \frac{1}{2}$									
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_1 = 3$
	0	1	0	1	2	3	0	1	0	1	2	3	0	1	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	$p_2 = 2$
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_\phi = 2\frac{1}{2}$
ΔZ =6	0			1						2						$p_m = \frac{1}{2}$									
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_1 = 3$
	0	1	2	1	2	3	0	1	2	1	2	3	0	1	2	1	2	3	0	1	2	1	2	3	$p_2 = 2$
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_\phi = 2\frac{1}{2}$
ΔZ =8	0			1						2						$p_m = \frac{1}{2}$									
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	$p_1 = 3$
	0	1	2	3	2	3	0	1	2	3	2	3	0	1	2	3	2	3	0	1	2	3	2	3	$p_2 = 2$

Тому що в роботі розглядаються тільки обмотки, що мають котушки з рівними числами витків у межах фази й однакової ширини (крок обмотки), то коефіцієнт розподілу фази таких обмоток перебуває по виразу:

$$k_{rv} = \frac{\sqrt{\left\{ \left[\sum_N \sin(\alpha_v \times N_i) \right]^2 + \left[\sum_N \cos(\alpha_v \times N_i) \right]^2 \right\}}}{N},$$

де ν - порядок гармоніки, для якої розраховується коефіцієнт розподілу;

$\alpha_\nu = \alpha_1 \cdot \nu \frac{360 \times p}{Z} \times \nu$ - кут зрушення між ЕРС у котушках сусідніх пазів по

ν - й гармоніці;

N_i - номер паза, зайнятого котушкою розглянутої фази;

Z_1 - число пазів статора;

N - число котушок фази.

Номер паза N_i береться зі знаком «+» при згодному й «-» при зустрічному включенні відповідної котушки розглянутої фази щодо першої.

Просторове положення гармонік МРС уздовж окружності статора можна визначити по сумах синусних і косінусних складових:

$$\gamma_\nu = \text{Atn}2 \left[\frac{\sum_N \text{Sin}(\alpha_\nu \times N_i)}{\sum_N \text{Cos}(\alpha_\nu \times N_i)} \right].$$

Відлік кутів робиться від осі, що проходить через середину першого пазу. У ряді випадків двошвидкісні обмотки несиметричні по робочим і ν - м гармонікам МРС.

У цьому випадку необхідно розраховувати прямі й зворотні складові коефіцієнта розподілу по виразах відповідно до рис. 4.6:

$$k_{rpr\nu} = 0,5 \times (k_{rA_\nu} - jk_{rB_\nu});$$

$$k_{robr\nu} = 0,5 \times (k_{rA_\nu} + jk_{rB_\nu}).$$

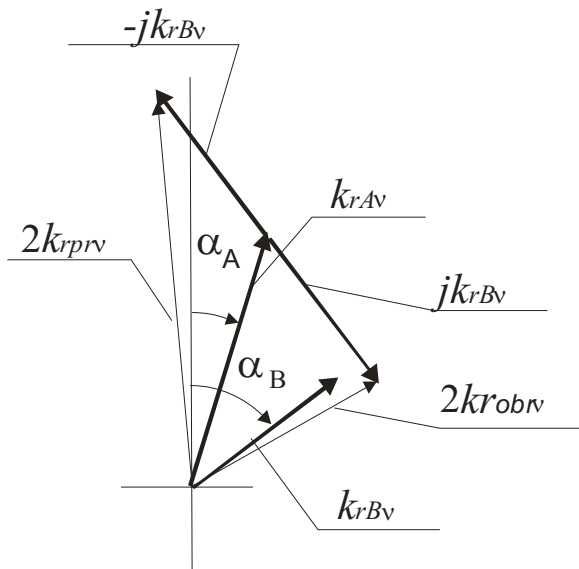


Рис. 4.6. Розкладання на прямі і зворотні складові коефіцієнтів розподілу фаз двофазної обмотки

Проводиться аналіз впливу кроку двошвидкісної обмотки на величину обмотувальних коефіцієнтів і співвідношення індукцій у повітряному зазорі:

$$\frac{B_{\delta_1}}{B_{\delta_2}} = \frac{k_{w2} \times p_1 \times a_1}{k_{w1} \times p_2 \times a_2},$$

де B_{δ_1} , B_{δ_2} - індукції в повітряному зазорі при p_1 й p_2 ;

k_{w2} , k_{w1} - обмотувальні коефіцієнти при p_2 й p_1 ;

a_1 , a_2 - число паралельних гілок обмотки при p_1 й p_2 .

У розглянутому прикладі синтезу ППО без зрушення хвилі модуляції

$$p_1 = 3, \quad p_2 = 2, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = 2,$$

$$\frac{B_{\delta_3}}{B_{\delta_2}} = \frac{k_{w2} \cdot 3}{k_{w3} \cdot 4} = \frac{0,88 \cdot 3}{0,742 \cdot 4} \approx 1,8.$$

Цей варіант ППО вийшов симетричним по робочих гармоніках магнітного поля (табл. 4.5).

Результати розрахунків варіантів ППО зі зрушенням хвилі модуляції показали, що вони виходять несиметричними по робочій гармоніці хоча б на одному із чисел полюсів (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Результати розрахунків коефіцієнтів розподілу двофазних ППО

ΔZ	$2p_1 = 6$		$2p_2 = 4$		$2p_1 = 6$	$2p_2 = 4$
	k_{rpr}	k_{robr}	k_{rpr}	k_{robr}	$k_{wpr}, y = 5$	
$\Delta Z=0$	0,743	0,0	0,88	0,0	0,687	0,85
$\Delta Z=4$	0,862	0,0	0,771	0,114	0,796	0,736
$\Delta Z=6$	0,839	0,083	0,789	0,0	0,77	0,762
$\Delta Z=8$	0,862	0,0	0,771	0,059	0,796	0,711

Тому, надалі для синтезу двофазних ППО методом ФМ зі зрушенням хвилі модуляції користуватися не будемо.

Перейдемо до таблично-векторному способу.

4.2.2. Синтез двофазних ППО таблично-векторним способом

Як відомо, в основі таблично-векторного способу (ТВС) лежить перетворення векторних діаграм пазових ЕРС, що мають вид окружності, у векторну діаграму на площині.

Простіше всього це пояснити на прикладі векторної діаграми для двофазної обмотки з $2p = 6$ у $Z_1 = 24$. Для побудови векторної діаграми пазових ЕРС обчислюється кут зрушення між векторами ЕРС

$$\alpha = \frac{360 \times p}{Z_1} = \frac{360 \times 3}{24} = \frac{360}{8} = 45 \text{ ел. град.}$$

Таким чином для побудови такої діаграми необхідно поділити окружність на 8 рівних частин. Для половини пазів статора ця векторна діаграма показана на рис. 4.7, а.

Номер біля вектора ЕРС - це номер паза або номер активної котушкової сторони (АКС) обмотки, що лежить у цьому пазу. На цій діаграмі виділені фазові зони А, В, А',В', що займають по 90 ел. град. Осі фазових зон ділять окружність на чотири частини.

Якщо цю діаграму розрізати по вертикальній осі, що збігається з номером першого паза, і розгорнути на площину, ми одержимо запис номерів АКС, але тільки на площині (рис. 4.7, б).

Цифри означають ті ж номери АКС, а вертикальні лінії ділять діаграму на фазові зони А, В, А',В', рівні 90 ел. град.

ЕРС, що наводяться у котушках сусідніх пазів, як і раніше зрушені на кут $\alpha = 45$ ел. град.

Для сполучення зон фаз А з А' і зон В з В' другу половину плоскої діаграми перемістимо під першу.

Це аналогічно зміні напрямку векторів ЕРС на 180° або поворот діаграми навколо осі 1-5. Тому номери АКС зон А' і В' будемо записувати зі знаком "-": -5, -6, -7, -8.

Цифри, що перебувають в одній колонці, означають, що ЕРС, що наводяться у пазах із цими номерами, збігаються по фазі (+) або перебувають у протифазі (-).

Наступне перетворення пов'язане зі спрощенням запису при формуванні таблиці АКС.

Для цього колонки з номерами АКС фази В перенесемо під колонки з номерами АКС фази А. Одержимо наступний табличний запис номерів пазів фазових зон А та В двофазної обмотки (табл. 4.6).

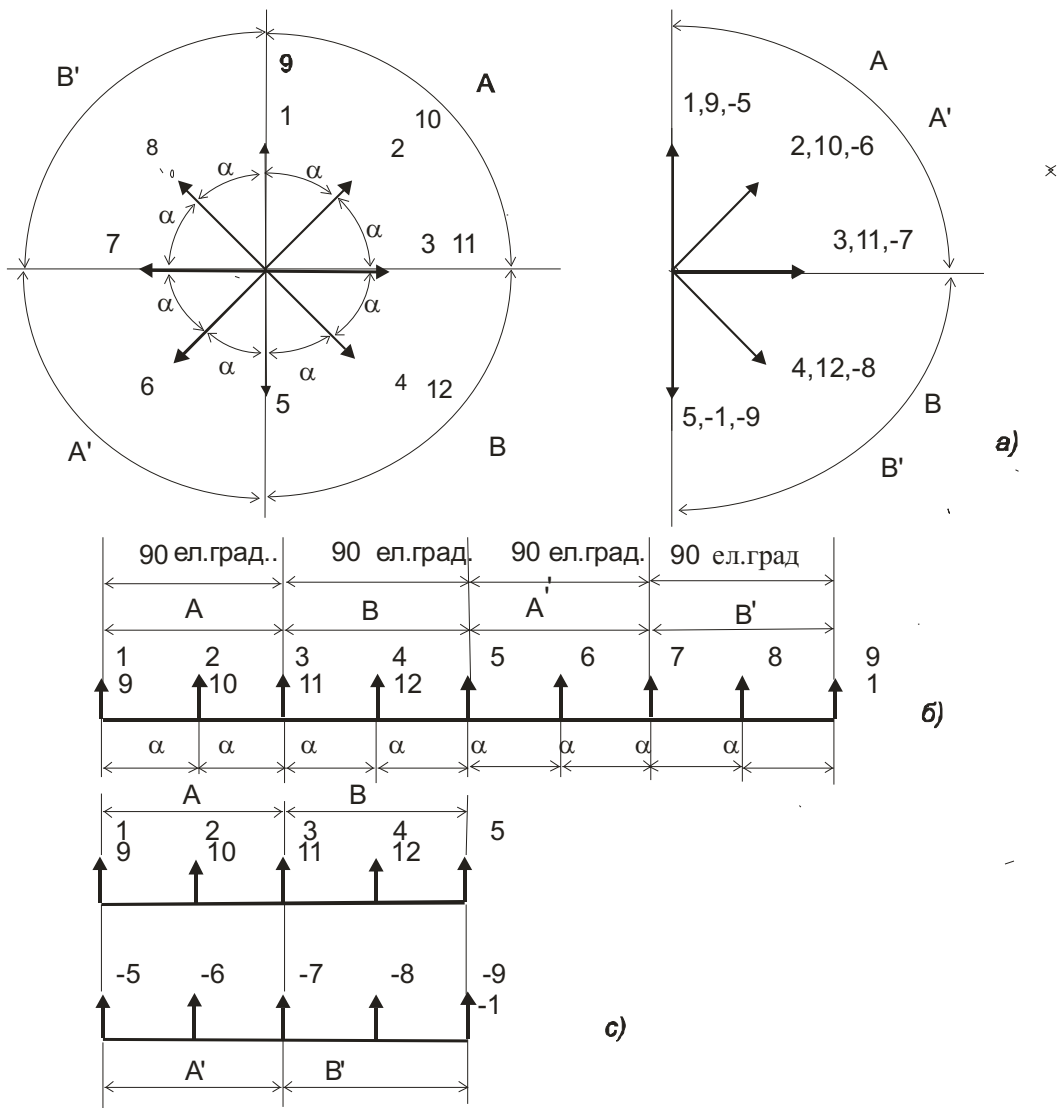


Рис. 4.7. Векторні діаграми пазових ЕРС для двофазної обмотки $p = 3$, $Z_1 = 24$

Таблиця 4.6

Розташування АКС двофазної обмотки із $2p = 6$ для $Z_1 / 2 = 12$

А	1	2	
	9	10	
	-5	-6	
В	3	4	
	11	12	
	-7	-8	

У даному прикладі номера АКС у таблиці відповідають розподілу двофазної обмотки із $q = 2$ для числа пазів статора $Z_1/2 = 12$. Для повного числа пазів розподіл по фазах наведений у табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Розподіл двофазної обмотки $2p = 6$, $Z_1 = 24$, вар.1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
фази	А		В		А'		В'		А		В	
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
фази	А'		В'		А		В		А'		В'	

За допомогою таблиць АКС можна одержувати обмотки з розширеною фазною зоною, тобто зоною більше 90° (табл. 4.8).

При складанні розподілу двофазної обмотки з розширеною фазовою зоною за допомогою таблиці АКС у першій колонці табл. 5.3 (і у фазі А, і у фазі В) було обрано по одній цифрі, у другій колонці - по трьох, у третьої - по двох. Виділені в таблиці номери АКС у фазах А та В не повторюються й відповідають розподілу симетричної двофазної обмотки з розширеною фазовою зоною для $Z_1/2$.

Таблиця 4.8

Таблиця АКС для двофазної обмотки з $2p = 6$, $Z_1/2 = 12$

А	1	2	3
	9	10	11
	-5	-6	-7
В	3	4	5
	11	12	-1
	-7	-8	-9

У табл. 4.9 показаний розподіл цієї обмотки по фазах і пазам для повного числа пазів $Z_1 = 24$.

Обмотка симетрична, коефіцієнти розподілу по фазах рівні $k_{rA} = k_{rB} = 0,8$, а осі фаз зрушені на 90 ел. град.

Таблиця 4.9

Розподіл двофазної обмотки $2p = 6$, $Z_1 = 24$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
фази	А			В			А'			В'		
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
фази	А'			В'			А			В		

Табличний запис АКС фазних зон обмотки особливо зручний при синтезі двошвидкісних обмоток, коли зони фаз А і В можуть бути більше 90° , і необхідно розширити ці зони додаванням сусідніх колонок з номерами АКС.

Складання таблиці номерів АКС для синтезу двошвидкісних обмоток полягає в об'єднанні таблиць АКС одношвидкісних обмоток для різних чисел пар полюсів в одну загальну.

Наприклад, для двошвидкісної двофазної обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ у числі пазів статора $Z_1 = 24$ необхідно приєднати до таблиці АКС при $p_1 = 3$, що ми побудували в попередньому параграфі, таблицю АКС для другого числа пар полюсів $p_2 = 2$.

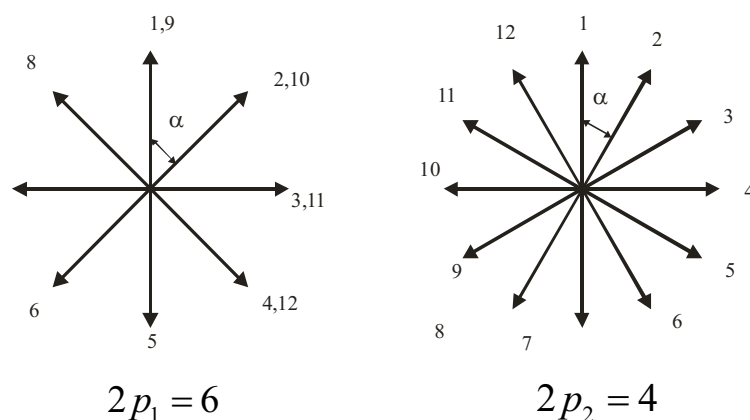


Рис. 4.8. Векторні діаграми пазових ЕРС

Табличний запис номерів АКС для двошвидкісної обмотки зі співвідношенням чисел пара полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ представлений в табл. 4.10. Ця таблиця отримана на основі векторних діаграм пазових ЕРС (рис. 4.8).

Таблиця 4.10

Таблиця номерів АКС двошвидкісної двофазної ППО зі співвідношенням чисел пар полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ для $Z_1/2=12$, вар.1

$2p_1 = 6$						$2p_2 = 4$				
А		1	2	3		1	2	3	4	а
	8	9	10	11		-7	-8	-9	-10	
		-5	-6	-7						
В		3	4	5		4	5	6	7	в
		11	12	-1		-10	-11	-12	-1	
	-6	-7	-8	-9						

Для формування двошвидкісної обмотки необхідно виділити загальні номери АКС у фазах А та В для двох чисел пар полюсів без обліку знака АКС. Ці номери АКС у табл. 4.10 позначені для фази А та фази В різними відтінками сірого кольору.

У розглянутому вище прикладі у фазу А включені АКС із номерами 1, 2, 3, 8, 9, 10, а у фазу В - з номерами 4, 5, 11, 12, 6, 7.

Розподіл АКС для повного числа пазів наведений в табл. 4.11. Виділені сірими кольорами АКС, які міняють фазу при перемиканні числа полюсів обмотки.

Отримана схема двошвидкісної обмотки, вар.1 за допомогою ТВС по своїх електромагнітних властивостях еквівалентна схемі ППО, отриманої методом ФМ без зрушення хвилі модуляції (рис. 4.9).

Таблиця 4.11

Розподіл двофазної обмотки $2p_1:2p_2=6:4$ для $Z_1=24$, вар.1

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2p_1=6$	A			B		B'		A			B	
$2p_2=4$	A			B		B		A'			B'	
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$2p_1=6$	A'			B'		B		A'			B'	
$2p_2=4$	A			B		B		A'			B'	

У табл. 4.12 наведений синтез ще одного варіанта двошвидкісної ППО $2p_1:2p_2=6:4$, вар. 2.

Таблиця 4.12

Таблиця номерів АКС двошвидкісної двофазної ППО зі співвідношенням чисел пар полюсів $2p_1:2p_2=6:4$ для $Z_1/2=12$, вар.2

$2p_1=6$						$2p_2=4$					
A	1	2	3	-6	1	2	3	4	5		
	9	10	11		-7	-8	-9	-10			
	-5	-6	-7								
B	3	4	5	3	4	5	6	7	8		
	11	12	-1	-10	-11	-12	-1				
	-7	-8	-9								

Розподіл ППО для повного числа пазів наведений в табл. 4.13, де сірими кольорами виділені номери АКС, які міняють напрямок при перемиканні полюсів обмотки.

Таблиця 4.13

Розподіл двофазної обмотки $2p_1:2p_2=6:4$ для $Z_1=24$, вар.2

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2p_1=6$	A		B		A'	A'	B'		A		B	
$2p_2=4$	A		B		A	A'	B		A'		B'	
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$2p_1=6$	A'		B'		A	A	B		A'		B'	
$2p_2=4$	A		B		A	A'	B		A'		B'	

Схема комутації цієї ППО, вар. 2 наведена на рис. 4.9.

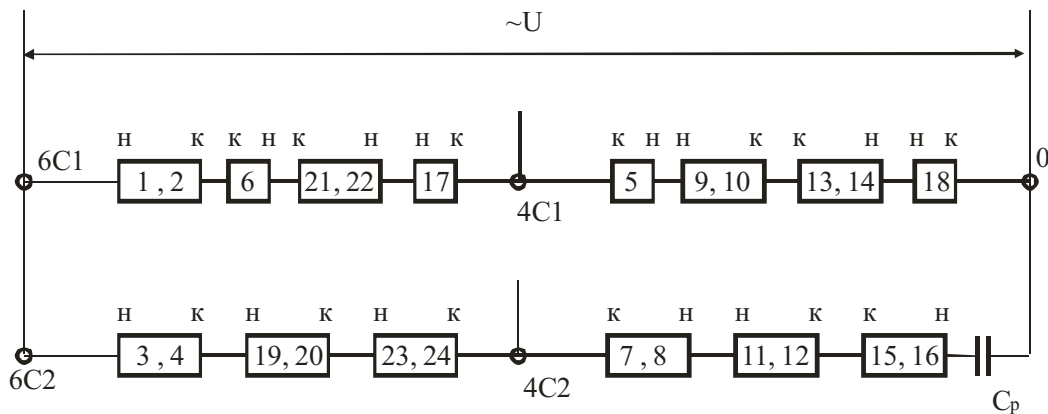


Рис. 4.9. Схема комутації двошвидкісної ППО $2p_1:2p_2 = 6:4$ для $Z_1 = 24$, вар.2

4.2.3. Синтез одно-двошарової двофазної ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1:2p_2 = 6:4$

Таблично-векторний спосіб (ТВС) дозволяє синтезувати одно-двошарові ППО [50]. Як приклад приводимо синтез двошвидкісної двофазної одно-двошарової обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1:2p_2 = 6:4$ у числі пазів статора $Z_1 = 24$.

Табличний запис номерів активних котушкових сторін (АКС) для двошвидкісної обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів $2p_1:2p_2 = 6:4$ у половині пазів статора $Z_1/2=12$, представлений у табл. 4.14.

Загальні номери АКС у фазах А та В для двох чисел пар полюсів виділені в табл. 4.14 різними відтінками сірих кольорів. Темним тоном виділені АКС, що не повторюються у фазах А та В, більш світлим - АКС, загальні для двох фаз.

Синтез одно-двошарової ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$,

вар.3

Фаза	$2p_1 = 6$	$2p_2 = 4$																				
A	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>-5</td><td>-6</td><td>-7</td><td>-8</td></tr> <tr><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td></tr> </table>	1	2	3	4	-5	-6	-7	-8	9	10	11	12	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td></tr> </table>	1	2	3	4	-7	-8	-9	-10
1	2	3	4																			
-5	-6	-7	-8																			
9	10	11	12																			
1	2	3	4																			
-7	-8	-9	-10																			
B	<table border="1"> <tr><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>-7</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-10</td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table>	3	4	5	6	-7	-8	-9	-10	11	12	-1	-2	<table border="1"> <tr><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>-10</td><td>-11</td><td>-12</td><td>-1</td></tr> </table>	4	5	6	7	-10	-11	-12	-1
3	4	5	6																			
-7	-8	-9	-10																			
11	12	-1	-2																			
4	5	6	7																			
-10	-11	-12	-1																			

На рис. 4.10, а, б показана торцева схема двох шарів обмотки в повнім числі пазів для обох чисел полюсів, складена за даними табл. 4.14.

Ця схема дозволяє сформуванати 8 одно-двошарових концентричних котушкових груп [55].

Фаза А складається із чотирьох однакових концентричних котушкових груп із кроками $y_1 = 3$ й $y_2 = 5$. Причому зовнішня котушка займає весь паз із числом витків w , а внутрішня - половину паза із числом витків $0,5w$.

Фаза В складається з різних котушкових груп. Дві котушкові групи містять по трьох котушки із кроками $y_1 = 3$, $y_2 = 5$ і $y_3 = 7$. Зовнішні котушки виконують із числом витків w , а внутрішню - з $0,5w$

Ще дві котушки із кроком $y_4 = 9$ виконуються з половинним числом витків $0,5w$.

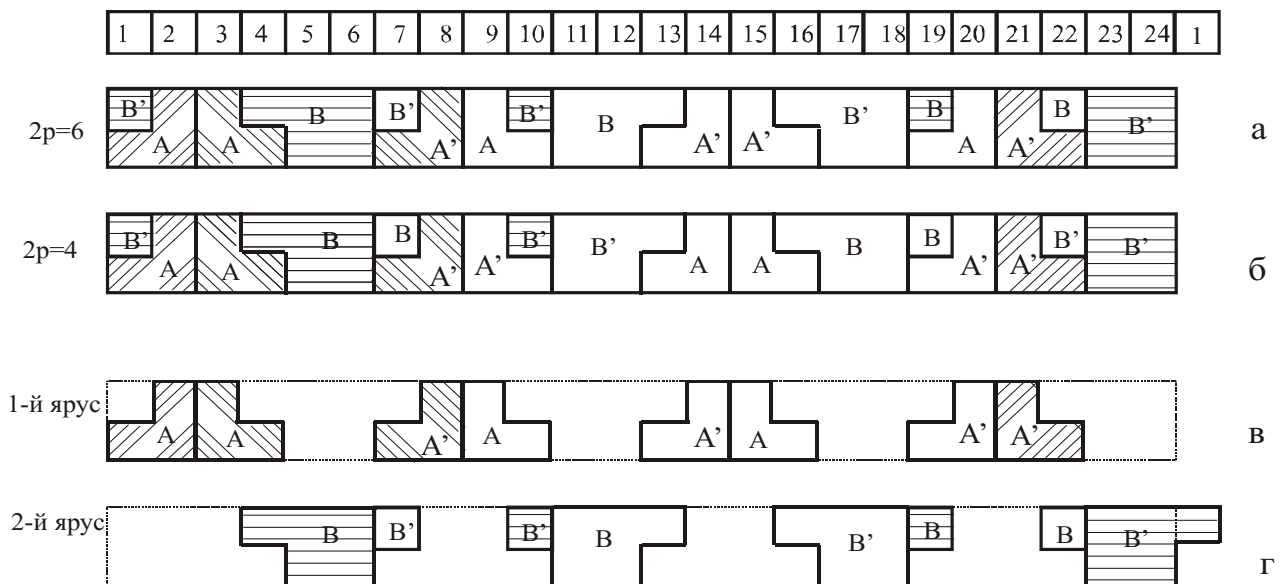


Рис. 4.10. Торцева схема ППО (вар.3) з розподілами по фазах при $2p_1 = 6$ (а) і $2p_2 = 4$ (б) і ярусами укладання (в, г)

Одно-двошарова конструкція ППО дає можливість укласти котушкові групи без перетинання в лобових частинах у два етапи й механізувати процес укладання обмотки.

На рис. 4.10, в, г показані два яруси укладання котушкових груп обмотки.

У двох котушкових групах кожної фази при перемиканні обмотки на друге число полюсів фаза струму змінюється на 180° , а у двох інші зберігається, що дозволяє скласти схему комутації двофазної обмотки, засновану на зміні числа паралельних гілок у фазах обмотки при перемиканні числа полюсів.

На торцевій схемі обмотки заштриховані котушкові групи, у яких фаза струму не міняється при перемиканні числа полюсів. Ці котушкові групи включені в ліву частину схеми комутації, представленої на рис. 4.11.

З'єднання котушкових груп двофазної ППО показано при включенні на $2p_1 = 6$. Прямокутниками з номерами АКС позначені котушкові групи.

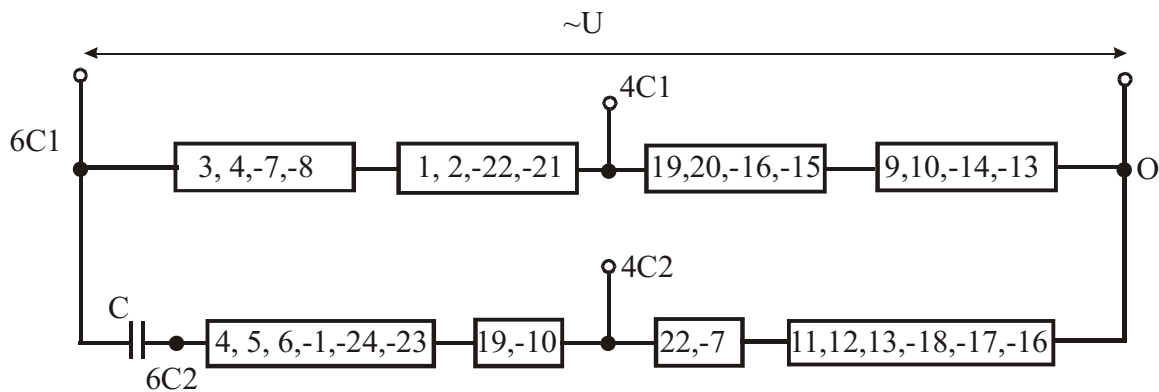


Рис. 4.11. Схема комутації одно-двошарової ППО зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ для $Z_1 = 24$, вар. 3

Схема комутації обмотки має п'ять вивідних кінців. Конденсатор включається між затискачами 6C1 і 6C2. При $2p_1 = 6$ однофазне живлення подається на затискачі 6C1 і затискач 0. Обмотка має по одній паралельній гілці у фазі.

Рекомендується виконання котушок фази А та В проводом різного перетину й з різним числом витків для зменшення величини конденсатора, включеного у фазу В [52, 53].

Бажано, щоб співвідношення витків фаз перебувало в наступних межах

$$w_B / w_A = 1,3 \div 1,8 \text{ .}$$

Схема-розгортка одно-двошарової обмотки з розглянутими типами котушкових груп наведена на рис. 4.12. Пунктиром позначені котушки з половинним числом витків.

Гармонійний аналіз двофазних обмоток проводиться по програмі «РОАКД», що захищена авторським посвідченням [59].

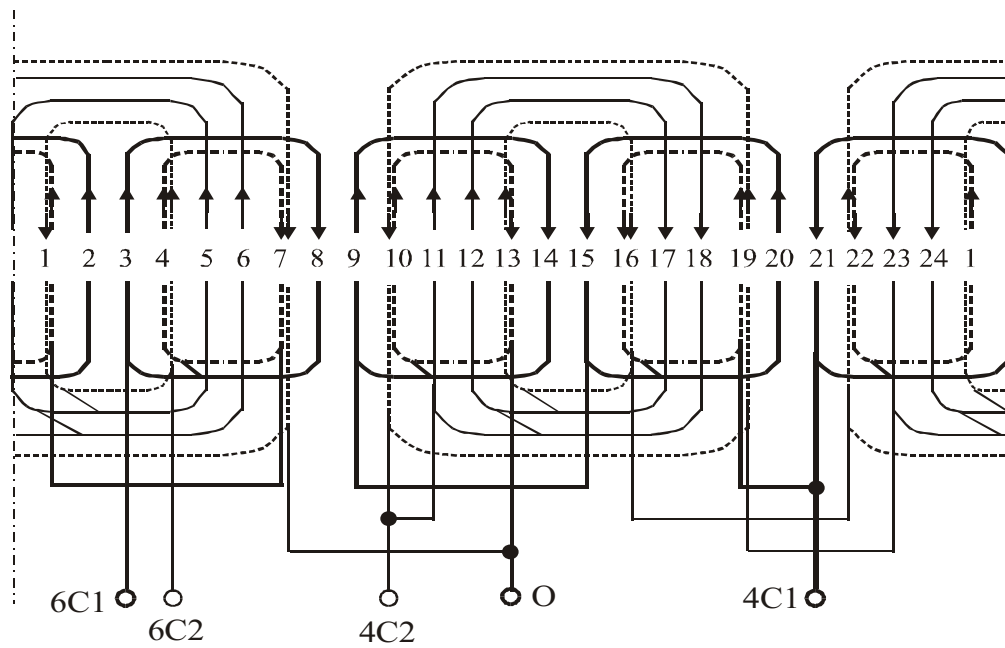


Рис. 4.12. Схема-розгортка одно-двошарової двофазної ППО із $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$ для $Z_1 = 24$, вар. 3

Результати розрахунку трьох варіантів ППО представлені в табл. 4.15.

Таблиця 4.15

Результати розрахунку коефіцієнтів розподілу двофазних ППО

№ вар.	$2p_1 = 6$		$2p_2 = 4$		$2p_1 = 6$	$2p_2 = 4$	В	$B_{\delta_{p=3}} / B_{\delta_{p=2}}$
	$k_{r_{pr}}$	$k_{r_{obr}}$	$k_{r_{pr}}$	$k_{r_{obr}}$	$k_{w_{pr}}$			
1 вар.	0,743	0,0	0,88	0,0	0,687	0,85	5	1,855
2 вар.	0,924	0,0	0,644	0,0	0,854	0,622	5	1,09
3 вар.	0,653	0,0	0,88	0,0	0,656	0,88	Одн.	2,012

Запропонований таблично-векторний спосіб для синтезу двофазних двошвидкісних обмоток дозволяє не тільки проектувати нові обмотки з гарними електромагнітними властивостями, але й одержувати одно-двошарові варіанти таких обмоток, що дає можливість механізувати їхній процес укладання.

4.2.4. Двофазні двошвидкісні обмотки с непарними числами пар полюсів

Двошвидкісні обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів (такими як $p_1:p_2=3:1, 5:1$ і т.д.) не можуть бути синтезовані по алгоритму, представленому в попередніх параграфах.

Це пов'язане з тим, що в застосовуваній схемі комутації на одній із частот обертання полюсоперемикальна обмотка обов'язково з'єднується у дві паралельні гілки, а ЕРС паралельних гілок повинні бути рівні по величині й збігатися по фазі. У протилежному випадку під дією різницевої ЕРС по гілках обмотки будуть протікати зрівняльні струми, що погіршують роботу двигуна.

При синтезі двошвидкісних обмоток з непарними числами пар полюсів у половині пазів статора, без обліку кількості котушок, що змінюють і зберігають свою фазу струму при перемиканні числа пар полюсів, можлива розбіжність цього числа. У паралельних гілках будуть включені різні числа котушок обмотки, що приведе до виникнення різницевої ЕРС.

У таких схемах ППО розподіл по фазах і пазах другої половини обмотки повинний повторювати першу, щоб уникнути появи парних гармонік.

Розглянемо приклад синтезу двофазної обмотки **зі** співвідношенням чисел **пар** полюсів $2p_1:2p_2=6:2$ у $Z_1=24$ **Номери АКС** для синтезу обмотки у $Z_1/2$ зведені в табл. 4.16.

Отже, при синтезі ППО $p_1:p_2=3:1$ необхідно, щоб для половини пазів статора збігалася кількість АКС, що міняють і зберігають свій знак при перемиканні числа пар полюсів.

Таблиця 4.16

Формування ППО зі співвідношенням пар полюсів $p_1 : p_2 = 3 : 1$

Фаза	$p_1 = 3$				$p_2 = 1$							
А		1	2	3							а	
		9	10	11	1	2	3	4	5	6		
		-4	-5	-6	-7							
В		3	4	5							б	
		10	11	12	-1	7	8	9	10	11		12
			-7	-8	-9							

Номери АКС - 1, 2, 3 у фазі А та 10, 11, 12 у фазі В зберігають фазу при перемиканні обмотки.

Номери АКС - 4, -5, -6 у фазі А та -7, -8, -9 у фазі В міняють фазу струму при перемиканні обмотки. Розподіл по фазах АКС цього варіанта обмотки для повного числа пазів показаний в табл. 4.17.

Таблиця 4.17

Розподіл двофазної обмотки $2p_1 : 2p_2 = 6 : 2$ для $Z_1 = 24$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$2p_1 = 6$	А			А'			В'			В		
$2p_2 = 2$	А			А			В			В		
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$2p_1 = 6$	А			А'			В'			В		
$2p_2 = 2$	А			А			В			В		

Схема комутації наведена на рис. 4.13.

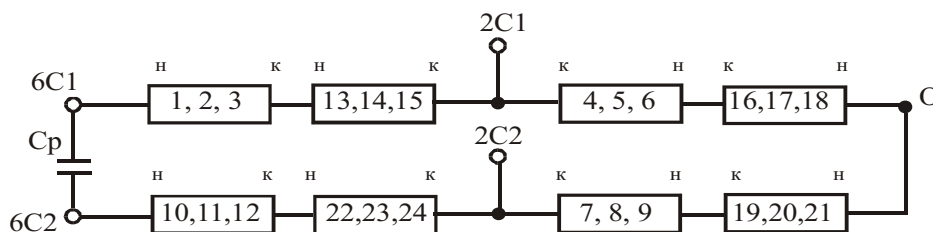


Рис. 4.13. Схема комутації двошвидкісної двофазної обмотки $2p_1 : 2p_2 = 6 : 2$

У представленій на рис. 4.13 схемі при $2p_2 = 2$ ЕРС двох паралельних гілок збігаються по фазі та величині, отже, зрівняльні ЕРС відсутні.

4.3. Нова схема комутації для двошвидкісних двофазних обмоток

Дотепер для перемикання полюсів двошвидкісних двофазних обмоток застосовувалася схема комутації U/UU зі зміною напрямку струму в половині котушок кожної з фаз обмотки. Ця схема має незаперечне достоїнство, маючи п'ять вивідних кінців.

Однак, для деяких співвідношень чисел пар полюсів схема не дозволяє одержувати двошвидкісні обмотки з високими коефіцієнтами розподілу для обох полюсів.

До таких обмоток, наприклад, відносяться обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів $p_1 : p_2 = 3:1, 2:1$ і т.д.

Тут на рис. 4.14 приводиться нова схема комутації з десятьма вивідними кінцями, що дозволяє перемикати обмотку шляхом зміни числа паралельних гілок у фазах, і при цьому одержувати високі коефіцієнти розподілу для p_1 та p_2 [52].

Схема має вісім гілок перемикання. Номери гілок перемикання позначені цифрами й внесені в прямокутники.

Для роботи обмотки на меншій частоті обертання із числом полюсів $2p_1$ однофазне живлення подається на затискачі p_1C_1 та p_1C_2 .

У кожній фазі котушкові групи з'єднуються послідовно. Затискачі С3 і С4 замкнуті.

Між затискачами С5 і С6 вмикається конденсатор Ср.

Затискачі p_2C_1 , $p_2C'_1$ і p_2C_2 , $p_2C'_2$ розімкнуті. Стрілками на схемі показаний напрямок струму у фазах при вмиканні обмотки на $2p_1$.

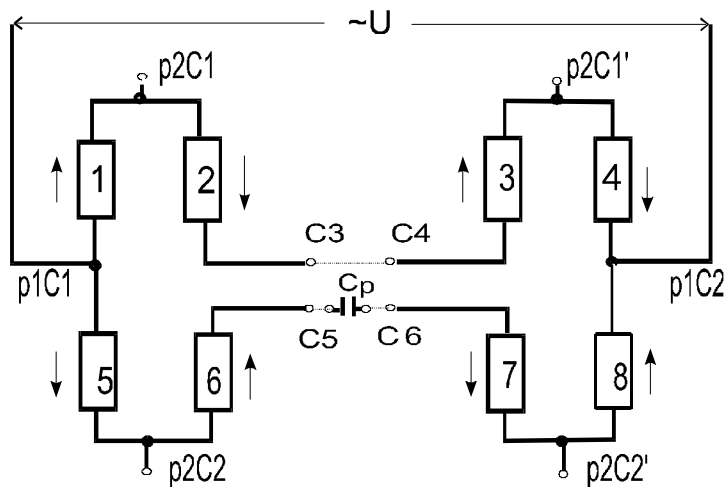


Рис. 4.14. Схема комутації двофазної двошвидкісної обмотки зі співвідношенням полюсів $2p_1 : 2p_2$ при подачі живлення на $2p_1$

Для роботи обмотки на другій частоті обертання із числом полюсів $2p_2$ однофазне **живлення** подається на з'єднані разом **затискачі** $p_2C_1 - p_2C'_1$ і $p_2C_2 - p_2C'_2$ (рис. 4.15).

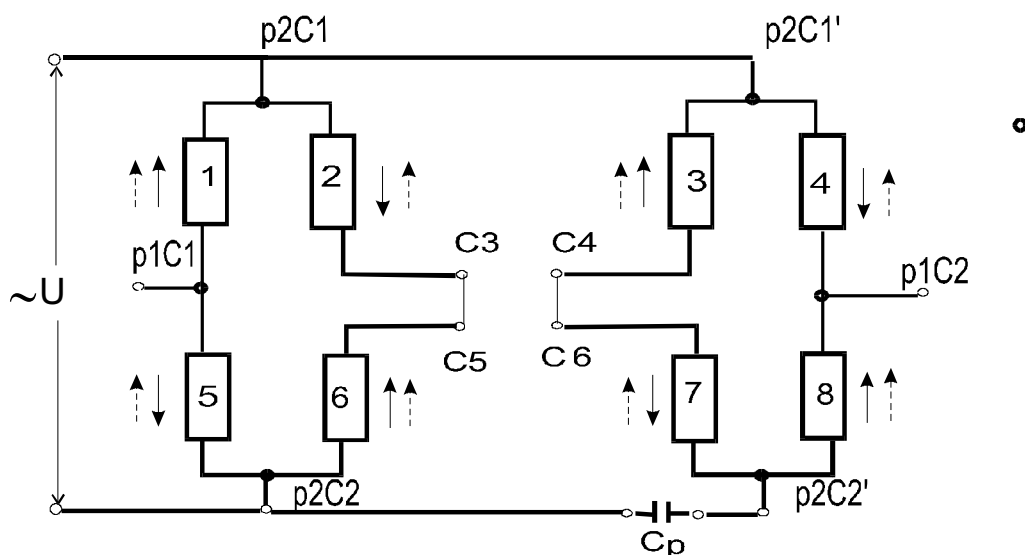


Рис. 4.15. Вмикання обмотки на $2p_2$

При цьому замикаються затискачі С3 із С5 та С4 із С6. Затискачі p_1C_1 й p_1C_2 вільні. Кожна фаза включається у дві паралельні гілки. Напрямок струму для цього випадку зображений пунктирними стрілками.

Відповідно до цього рисунку приведемо в табл. 4.18 закон зміни струму в гілках перемикання. Як видно з таблиці при зміні числа пар полюсів у гілках перемикання міняється напрямок струму й фаза струму.

Таблиця 4.18

Закон зміни струму в гілках перемикання схеми комутації на рис. 4.15

№ гілки	1	2	3	4	5	6	7	8
Фаза при $2p_1$	A	A	A	A	B	B	B	B
Фаза при $2p_2$	A	A'	B	B'	A'	A	B'	B

Відповідно до цього закону сформована обмотка зі співвідношенням чисел пар полюсів $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$ в 24 пазах статора, схема якої наведена на рис. 4.16. Живлення подане для роботи на $2p_1 = 4$.

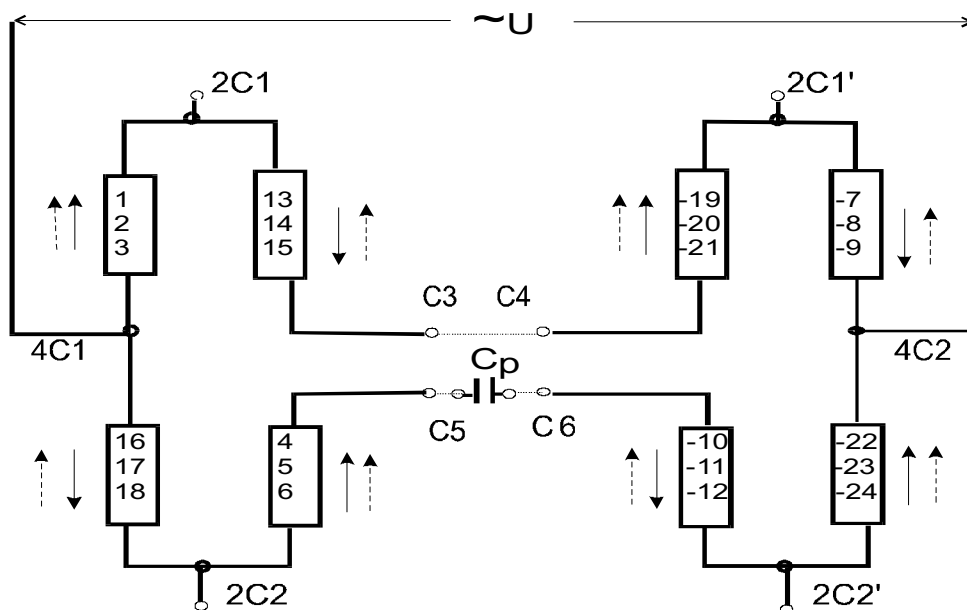


Рис. 4.16. Схема комутації двошвидкісної обмотки $2p_1 : 2p_2 = 4 : 2$

для $Z_1 = 24$

Розподіл АКС по фазах і пазам двошвидкісної обмотки, наведеної на рис. 4.16 показаний в табл. 4.19. Він відповідає на кожному із чисел полюсів стандартному розподілу одношвидкісних двофазних обмоток із цілим q . Коефіцієнти розподілу при цьому відповідно рівні:

$$k_{r_2} = 0,924, \quad k_{r_1} = 0,903.$$

Таблиця 4.19

Розподіл по фазах і пазам двошвидкісної двофазної обмотки

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$p_1 = 2$	А		В			А'			В'			А			В			А'			В'			
$p_2 = 1$	А		А			В			В			А'			А'			В'			В'			
№ гілки	1		6			4			7			2			5			3			8			

Слід зазначити, що ЕРС паралельних гілок фаз при включенні обмотки на вищу частоту обертання рівні по величині й збігаються по фазі, тобто зрівняльних струмів не буде.

Схеми комутації, які наведені на рис. 4.14 і 4.15, дозволяють одержувати двошвидкісні обмотки зі стандартними розподілами одношвидкісних обмоток на обох числах пар полюсів не тільки для співвідношення чисел пар полюсів 2:1, але й для інших, таких як 3:2, 4:3.

Синтез таких обмоток дуже простий. Розраховують числа пазів на полюс і фазу q_1 й q_2 для заданого числа пазів статора Z_1 й співвідношення чисел пар полюсів $p_1 : p_2$:

$$q_1 = \frac{Z_1}{4p_1}, \quad q_2 = \frac{Z_1}{4p_2}.$$

За отриманим значенням q (дробовому або цілому) визначається числовий ряд і записується під номерами пазів розподіли обмотки для двох чисел пар полюсів. Потім відповідно до закону формування гілок по табл. 4.18 визначаються номери АКС, що входять у відповідні гілки перемикання.

Розглянемо приклад синтезу двошвидкісної обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів $p_1 : p_2 = 3 : 2$ для $Z_1 = 24$.

Розраховуємо q_1 й q_2 :

$$q_1 = \frac{Z_1}{4p_1} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2, \quad q_2 = \frac{Z_1}{4p_2} = \frac{24}{4 \cdot 2} = 3.$$

Синтез обмотки показаний у табл. 4.20.

Таблиця 4.20

Розподіл по фазах і пазах двошвидкісної двофазної обмотки
с співвідношенням чисел пар полюсів $p_1 : p_2 = 3 : 2$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$p_1 = 3$	А	В	В	А'		В'	А	А	В		А'	В'	В'	А	В	А'	А'	В'						
$p_2 = 2$	А	А	В	В	А'	А'	В'	В'	А	А	В	В	А'	А'	В'	В'								
№ гілки	1	6	8	4	6	2	4	7	2	5	7	3	5	1	3	8								

У першому рядку записані номери пазів від 1 до 24, у другому рядку записаний розподіл обмотки для $p_1 = 3$ з $q_1 = 2$ і чергування фаз у сусідніх фазних зонах А, В, А', В'.

У третьому рядку $\tilde{}$ розподіл обмотки для $p_2 = 2$ з $q_2 = 3$ і те ж саме чергування фаз. У четвертому рядку наведені номери гілок.

Гілки перемикання схеми комутації будуть містити наступні номери АКС зі знаками при $p_1 = 3$:

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1-я гілка - 1, 2, -21; | 5-я гілка - -15, 19, 20; |
| 2-я гілка - 9, -13, -14; | 6-я гілка - 3, -7, -8; |
| 3-я гілка - 17, 18, -22; | 7-я гілка - 11, 12, -16; |
| 4-я гілка - -5, -6, 10; | 8-я гілка - 4, -23, -24. |

Схема комутації двошвидкісної двофазної обмотки показана на рис. 4.17 з подачею живлення для роботи на $2p_1 = 6$.

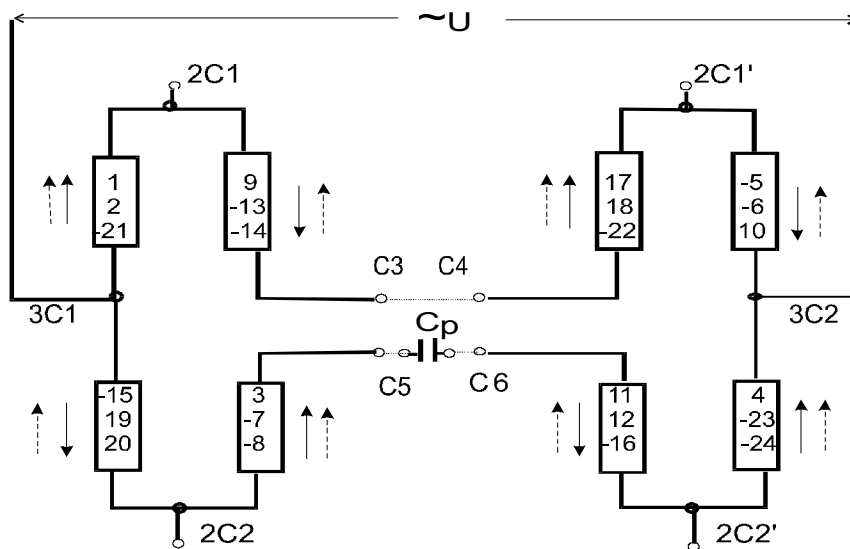


Рис.4.17. Схема комутації двошвидкісної двофазної обмотки с співвідношенням чисел полюсів $2p_1 : 2p_2 = 6 : 4$, $Z_1 = 24$

Коефіцієнти розподілу отриманої двошвидкісної обмотки на кожному із чисел пар полюсів відповідають коефіцієнтам розподілу одношвидкісних обмоток: $k_{r3} = 0,924$, $k_{r2} = 0,911$.

Обмотувальні коефіцієнти й співвідношення індукцій у повітряному зазорі при кроці двошвидкісної обмотки (y) відповідно дорівнюють:

- при $y=5$ $k_{w3} = 0,853$, $k_{w2} = 0,88$, $B_{\delta3}/B_{\delta2} = 0,77$;

- при $y=6$ $k_{w3} = 0,653$, $k_{w2} = 0,91$, $B_{\delta3}/B_{\delta2} = 1,05$.

ЕРС паралельних гілок при $2p_2 = 4$ збігаються по величині й по фазі. Зрівняльні струми в цій схемі відсутні. приведем

Наведемо тут ще один приклад синтезу двошвидкісної обмотки, коли одне із чисел пазів на полюс і фазу (q) дробове.

Число пазів обмотки статора $Z_1 = 24$, співвідношення чисел пар полюсів $p_1 : p_2 = 2 : 1$.

Число пазів на полюс і фазу при $p_1 = 2$ дробове:

$$q_1 = \frac{Z_1}{4p_1} = \frac{24}{4 \cdot 2} = 1\frac{1}{2}.$$

Повторювана частина числового ряду – 2, 1.

Повний ряд: 2,1, 1,2, 2,1, 1,2.

Число пазів на полюс і фазу при $p_2 = 1$: $q_2 = 3$.

Синтез розглянутого варіанта обмотки наведений в табл. 4.21, а схема комутації - на рис. 4.18.

Таблиця 4.21

Синтез двошвидкісної двофазної обмотки зі співвідношенням чисел пар полюсів $p_1 : p_2 = 2 : 1$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$p_1 = 2$	А		В	А'	В'		А		В	А'	В'	
$p_2 = 1$	А		А	В	В		А'		А'	В'	В'	
№ гілки	1		6	4	7		2		5	3	8	

Слід зазначити, що в гілці перемикавання входить різне число АКС. Однак, при перемиканні обмотки на вищу частоту обертання ЕРС паралельних гілок у фазах як і раніше рівні по величині й збігаються по фазі.

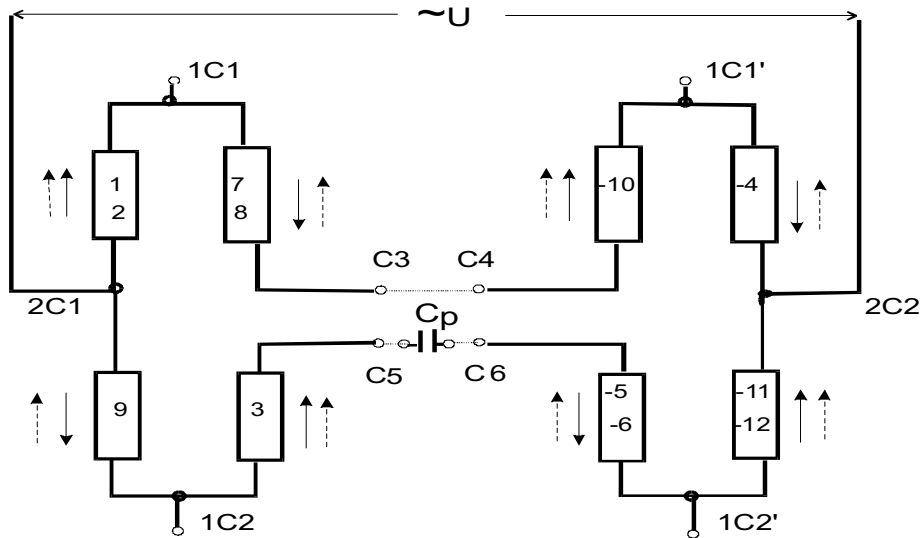


Рис. 4.18. Схема комутації двофазної двошвидкісної обмотки

$$p_1 : p_2 = 2 : 1, Z_1 = 12$$

У першу паралельну гілку у фазі А включаються АКС 1-ї і 5-ї гілок перемикавання, у другу паралельну гілку - АКС 3-ї і 6-ї гілок перемикавання, причому напрямок струму в котушках 2-ї і 5-ї міняють знак при зміні числа пар полюсів. Векторні діаграми ЕРС паралельних гілок фази А показані на рис. 4.19. Аналогічні векторні діаграми будуть і для фази В.



Рис. 4.19. Векторні діаграми ЕРС паралельних гілок фази А при $p_2 = 1$

Пропонована схема комутації дозволяє одержувати двофазні двошвидкісні симетричні обмотки з коефіцієнтами розподілу одношвидкісних обмоток на обох числах пар полюсів.

Збільшене число вивідних кінців не применшує достоїнства схеми перемикавання, тому що живильні затискачі мають незалежні входи.

Однак розглянута схема комутації може бути реалізована тільки для двошвидкісних обмоток, у яких співвідношення чисел пар полюсів складається з парних і непарних чисел, таких як 3:2, 2:1, 4:3 і т.д.

Аналіз схем обмоток з непарними числами пар полюсів у двошвидкісної комбінації (3:1, 5:1, 5:3) показав, що ЕРС паралельних гілок при перемиканні обмотки на вищу частоту обертання не збігаються по фазі. Тому не доцільно проектувати такі обмотки з використанням нової схеми комутації.

Технічні дані деяких обмоток, що перемикають за новою схемою комутації, наведені в табл. 4.22.

Таблиця 4.22

Технічні показники двошвидкісних двофазних обмоток з новою схемою комутації

Z_1	$p_1 : p_2$	k_{r1}	k_{r2}	y	k_{w1}	k_{w2}	$B_{\delta 1} / B_{\delta 2}$
16	2:1	0,92	0,91	6	0,65	0,84	1,28
16	3:2	0,91	0,92	4	0,641	0,924	1,08
24	2:1	0,91	0,903	8	0,789	0,782	0,99
24	3:2	0,92	0,91	5	0,854	0,88	0,77
32	2:1	0,91	0,903	10	0,837	0,75	0,92
32	3:2	0,902	0,906	8	0,638	0,906	1,07

Як видно з табл. 4.22 коефіцієнти розподілу для обох чисел пар полюсів всіх варіантів двошвидкісних обмоток відповідають по величині одношвидкісним обмоткам.

5. ШОСТИФАЗНІ ОБМОТКИ

5.1. Одношарові шостифазні обмотки

Одним зі шляхів поліпшення експлуатаційних характеристик регульованих асинхронних двигунів (РАД) є збільшення числа фаз обмотки статора із трьох до шістьох [61].

Струм, споживаний однією фазою обмотки статора шостифазного АД, приблизно вдвічі менше споживаного фазного струму його трифазного аналога. Завдяки цьому в приводах середньої й великої потужності є можливість зменшити струмове навантаження на фазу інвертора при одночасному збільшенні їхньої кількості.

Виявлено значне зниження віброшвидкостей і магнітних шумів шостифазних АД в порівнянні з аналогічними показниками трифазних АД в аналізованому діапазоні регулювання, що сприяє зниженню пульсацій моменту й швидкості на валу двигуна й підвищенню його надійності [61].

Вважалось, що шостифазна обмотка може бути отримана із трифазної шляхом заміни шістьох фазних зон (ФЗ) А, С', В, А', С, В' на шість фаз А, В, С, D, Е, F з 60 градусною фазною зоною.

У цьому випадку шостифазна обмотка виходить двошаровою. Тут наводиться аналіз можливих схем одношарових шостифазних обмоток у 36 і 24 пазів статора із числом полюсів $2p=4$ і $2p=2$ [63].

Розглянемо шостифазну ($m=6$) обмотку статора асинхронної машини в числі пазів статора $Z_1=36$ й числом полюсів $2p=4$.

Обмотка повинна бути симетричною, а осі фаз зрушені на 60 ел. градусів.

Визначаємо:

- число пазів на полюс і фазу:

$$q = \frac{Z_1}{p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 6} = 3;$$

- числовий ряд для періоду повторення

3, 3, 3, 3, 3, 3;

- чергування шістьох фаз:

A, B, C, D, E, F.

Розподіл активних котушкових сторін (АКС) обмотки по пазах і фазних зонах представлений у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Розподіл АКС шостифазної обмотки в 36 пазах статора при $2p = 4$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ФЗ	A			B			C			D			E			F		
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ФЗ	A			B			C			D			E			F		

Векторна діаграма пазових ЕРС показана на рис. 5.1.

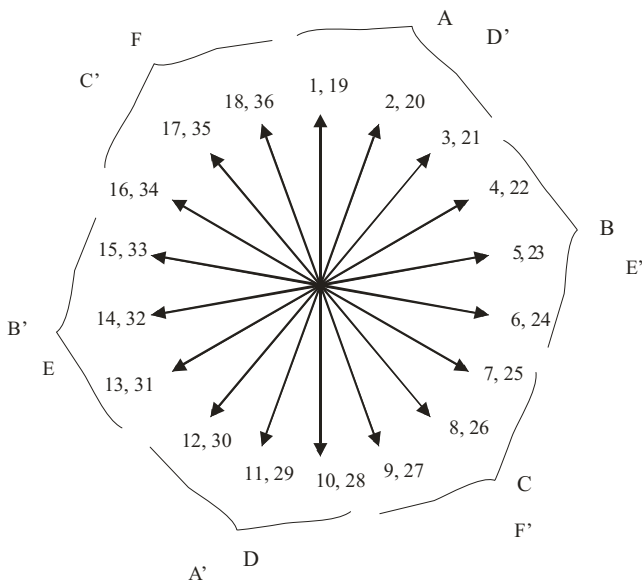


Рис. 5.1. Зірка пазових ЕРС

шостифазної обмотки статора при

$$2p = 4$$

Кут зрушення між пазовими

ЕРС визначається з виразу

$$\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ.$$

Коефіцієнт розподілу обмотки

$$k_r = \frac{0,5}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin 10^\circ} = 0,959.$$

Шостифазна обмотка із чергуванням фаз А, В, С, D, E, F може бути тільки двошаровою, наприклад, із кроком

$$y = (0,8 \div 0,86) \cdot \tau = (0,8 \div 0,86) \cdot 9 = 8.$$

Обмотувальний коефіцієнт

$$k_w = k_r \cdot k_y = 0,959 \cdot 0,985 = 0,945.$$

У шостифазних обмотках з парним числом пар полюсів можна поміняти чергування фаз і зробити шостифазну обмотку одношарової.

Чергування фаз для всієї обмотки:

$$A, B, C, A', B', C', D', E', F', D, E, F.$$

Розподіл активних котушкових сторін (АКС) обмотки по пазах і фазних зонах представлений в табл. 5.2

Таблиця 5.2

Розподіл АКС шостифазної одношарової обмотки в $Z_1 = 36$

при $2p = 4$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ФЗ	А			В			С			А'			В'			С'		
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ФЗ	D'			E'			F'			D			E			F		

Схема-розгортка шостифазної обмотки може бути виконана з котушкових груп із кроком $y=9$ в одношаровому виконанні. Її схема-розгортка представлено на рис. 5.2.

Обмотувальний коефіцієнт дорівнює коефіцієнту розподілу обмотки

$$k_w = k_r = 0,959.$$

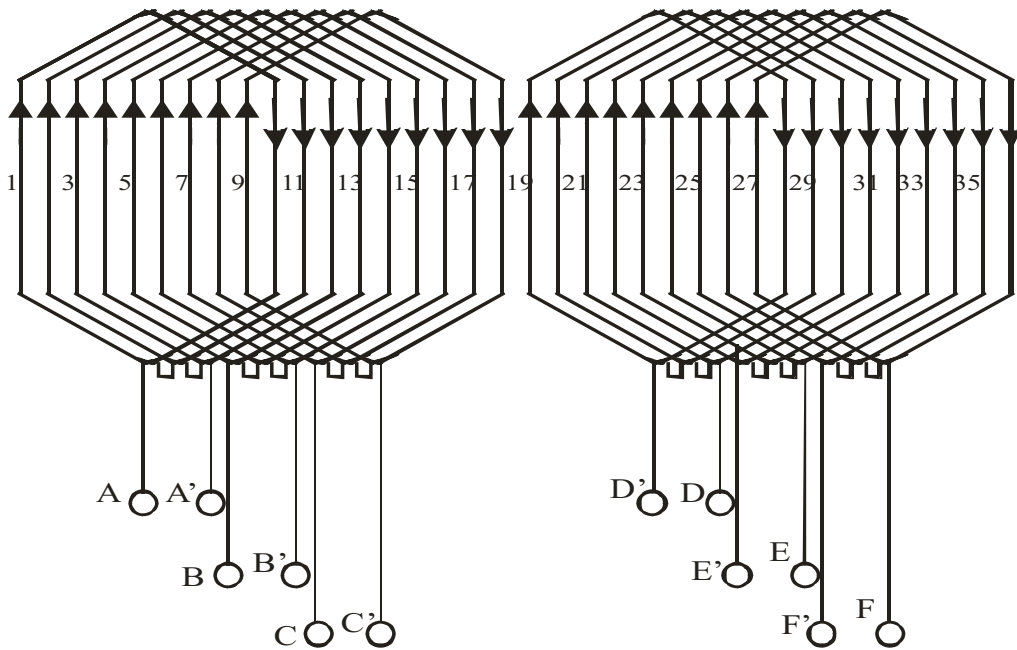


Рис. 5.2. Схема-розгортка одношарової котушкової шостифазної обмотки
с числом полюсів $2p=4$ і кроком $y=9$

Якщо поміняти чергування фаз обмотки, то можна побудувати одношарову концентричну двоплоскісну шостифазну обмотку.

Розподіл для такої обмотки наведений у табл. 5.3.

Замість фази B' буде фаза E, а замість фази E буде фаза B'.

Схема-розгортка цієї обмотки показана на рис. 5.3

Таблиця 5.3

Розподіл АКС шостифазної одношарової двоплоскісної
обмотки в 36 пазах статора з $2p=4$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ФЗ	A			B			C			A'			E			C'		
Z_1	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
ФЗ	D'			E'			F'			D			B'			F		

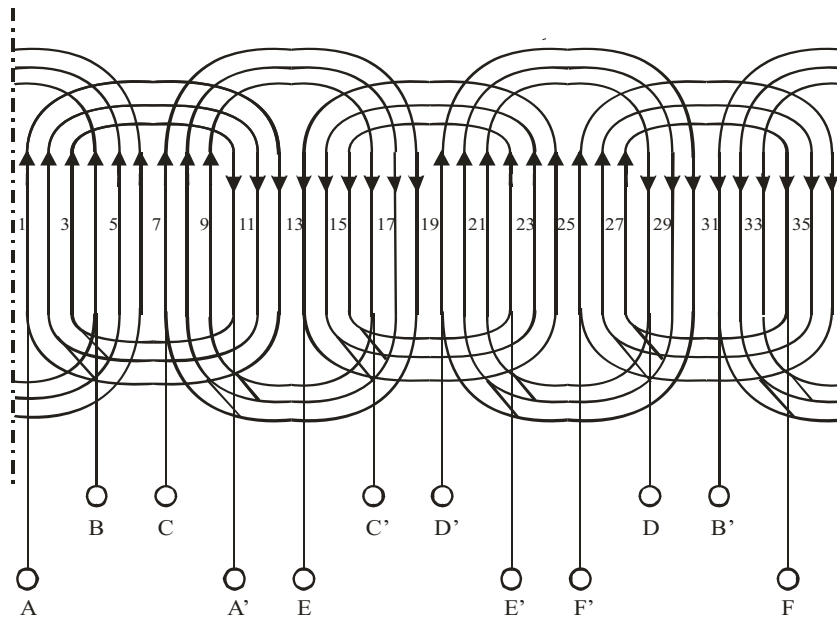


Рис. 5.3. Схема-розгортка одношарової концентричної двоплоскісної шостифазної обмотки з $2p=4$

Аналогічно розглянемо можливі схеми шостифазних обмоток з непарним числом пар полюсів $p=1$ у числі пазів статора $Z_1=24$.

Обмотка повинна бути симетричною й осі фаз зрушені на 60° ел. градусів.

Для 60° фазну зону визначаємо:

- число пазів на полюс і фазу:

$$q = \frac{Z_1}{p \cdot m} = \frac{24}{1 \cdot 6} = 4;$$

- числовий ряд для всієї обмотки:

4, 4, 4, 4, 4, 4;

- чергування шости фаз:

A, B, C, D, E, F.

Розподіл активних котушкових сторін (АКС) обмотки с $2p=2$ по пазах і фазних зонах представлений в табл. 5.4.

Розподіл АКС шостифазної обмотки в 24 пазах статора при $2p=2$

Z_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Phi 3$	A				B				C			
Z_1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\Phi 3$	D				E				F			

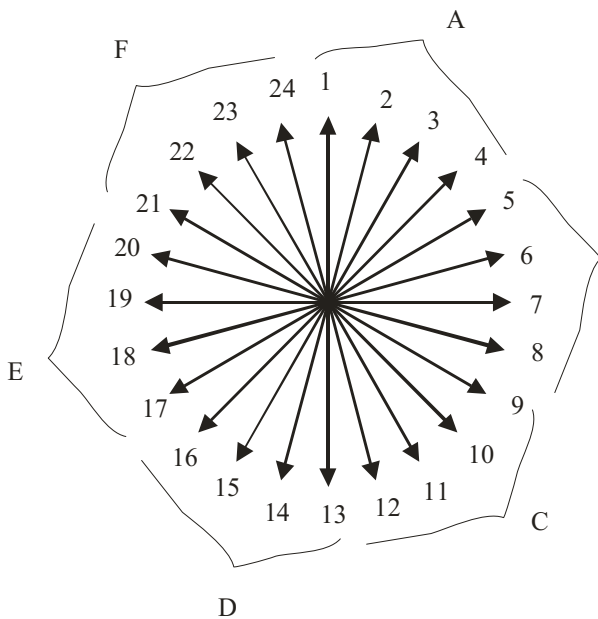
Векторна діаграма пазових ЕРС показана на рис. 5.4.

Кут зрушення між пазовими ЕРС визначається по виразу

$$\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 1}{24} = 15 \text{ º}.$$

Коефіцієнт розподілу обмотки

$$k_r = \frac{0,5}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin 7,5^\circ} = 0,9576.$$



Шостифазна обмотка з таким чергуванням фаз може бути тільки двошаровою із кроком

$$y = (0,8 \div 0,86) \cdot \tau = (0,8 \div 0,86) \cdot 12 = 10.$$

Коефіцієнт скорочення

$$k_y = \sin\left(90 \cdot \frac{y}{\tau}\right) = \sin\left(90 \cdot \frac{10}{12}\right) = 0,966.$$

Обмотувальний коефіцієнт

$$k_w = k_r \cdot k_y = 0,9576 \cdot 0,966 = 0,925.$$

Рис. 5.4. Зірка пазових ЕРС шостифазної обмотки статора при $p=1$

Схема-розгортка шостифазної двошарової обмотки із кроком $y=8$ показана на рис. 5.5.

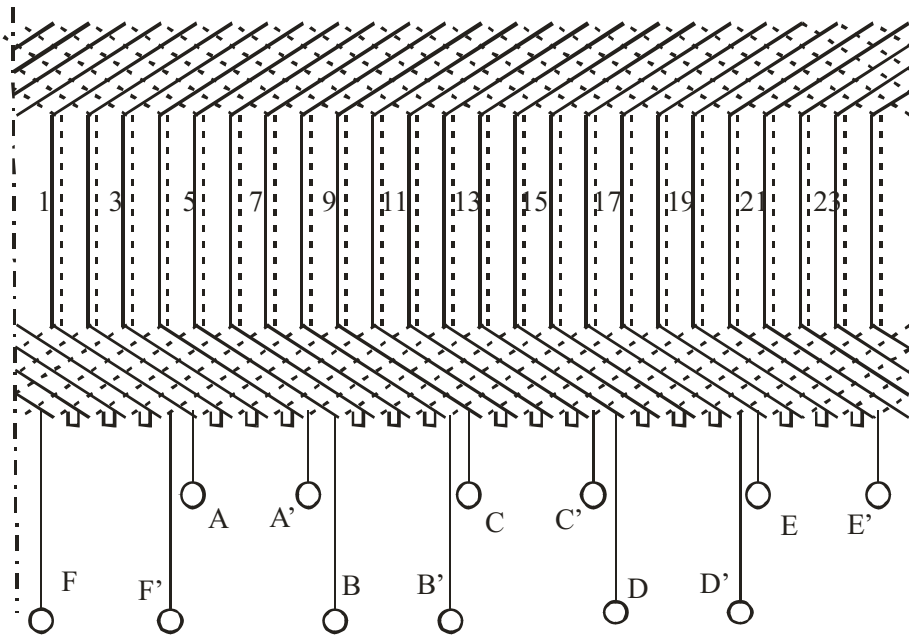


Рис. 5.5. Схема-розгортка двошарової шостифазної обмотки з числом пар полюсів $p=1$

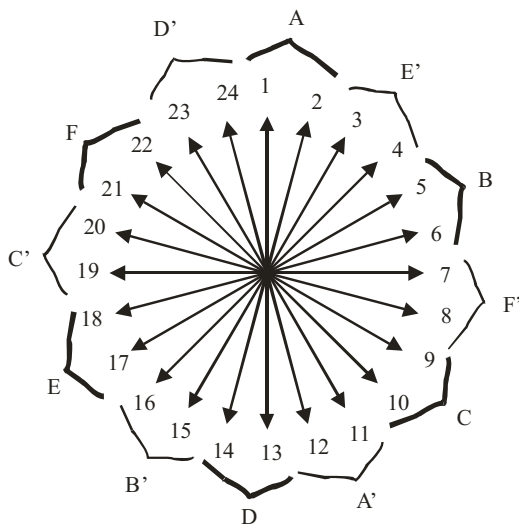


Рис. 5.6. Векторна діаграма пазових ЕРС шостифазної одношарової обмотки при $p=1$

Можливе проектування дво-полюсної одношарової шостифазної обмотки, але тільки з іншим числовим рядом і іншим чергуванням фаз:

- числовий ряд для всієї обмотки:
2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2;
- чергування фаз:

A, E' B, F', C, A', D, B', E, C', F, D'.

Векторна діаграма пазових ЕРС показана на рис. 5.6.

Незважаючи на зміну числового ряду, отримана обмотка еквівалентна обмотці із $q=4$ із кроком $y=10$. Обмотувальний коефіцієнт дорівнює $k_w = k_r \cdot k_y = 0,9576 \cdot 0,966 = 0,925$.

У розглянутих числах пазів статора $Z_1 = 24$ шостифазні обмотки з непарним числом пар полюсів $p = 1$ можуть бути тільки двошаровими. Зміна числового ряду й чергування фаз дає можливість одержання одношарової обмотки.

При парних числах полюсів, наприклад $p = 2$, конструкції шостифазних обмоток можуть бути одношаровими при зміні чергування фаз обмотки. Всі фази шостифазної обмотки A, B, C, D, E, F зрушені на кут 60 ел. град.

Розглянувши представлені схеми шостифазних обмоток, можна зробити висновок, що, незважаючи на те, що шостифазні обмотки не можна проектувати з 30° фазною зоною, є можливість конструювання їх в одношаровому виконанні.

Схема-розгортка одношарової котушкової обмотки із кроком $y = 10$ наведена на рис. 5.7.

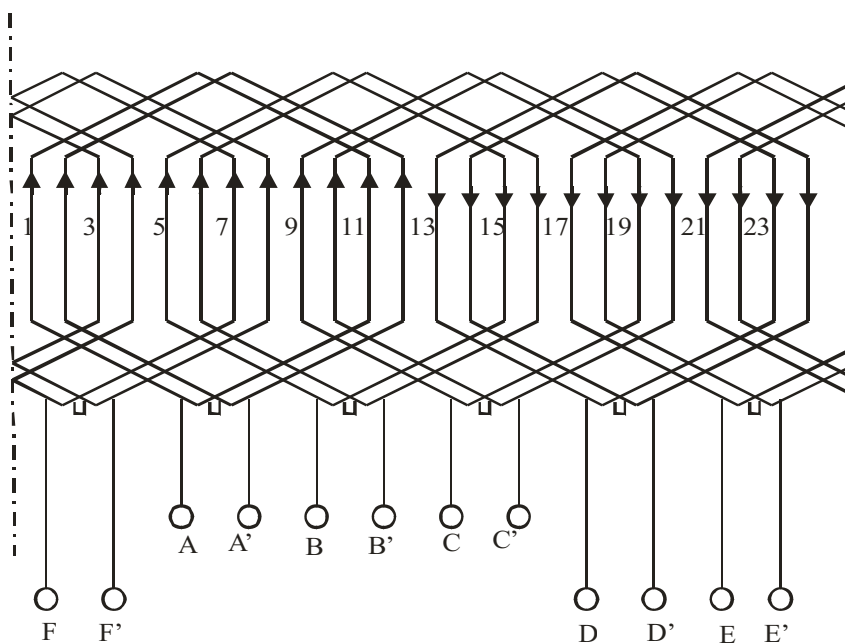


Рис. 5.7. Схема-розгортка одношарової котушкової 6-ти фазної обмотки при $p = 1$ й $y = 10$

Ця обмотка може бути виконана й з концентричних котушкових груп, рис. 5.8.

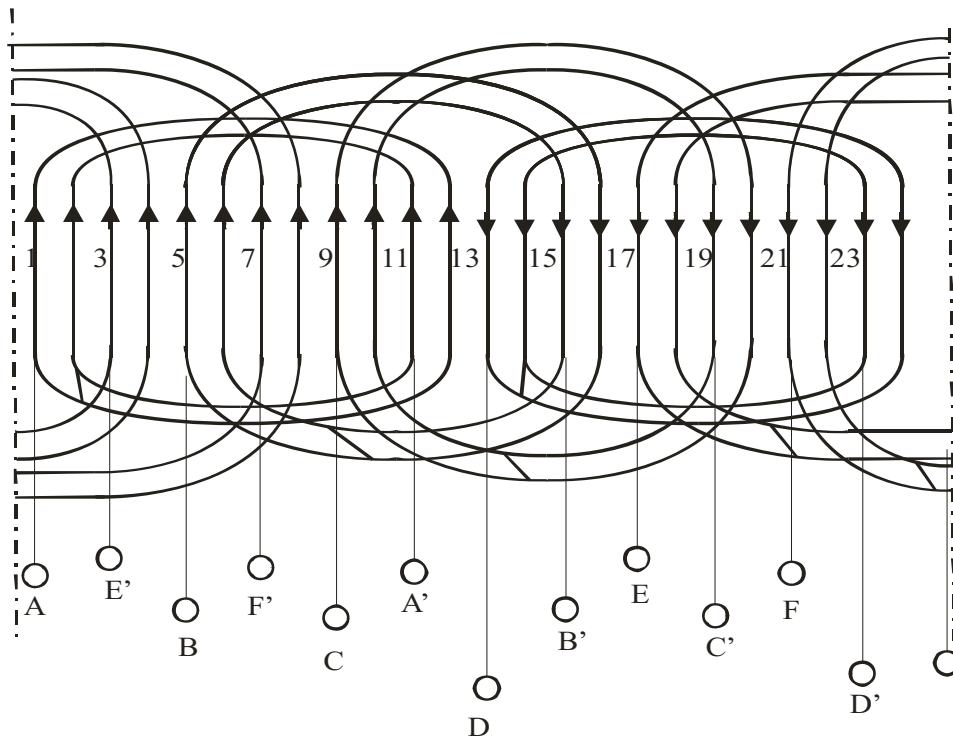


Рис. 5.8. Схема-розгортка одношарової концентричної шостифазної обмотки при $p = 1$

5.2. Включення шостифазної обмотки в трифазну мережу

5.2.1. Сполучена обмотка при $2p = 2$, $Z_1 = 24$

Останнім часом з'явилося багато публікацій про так звану «сполучену» обмотку для трифазного двигуна з $2p = 2$ в 24 пазах статора. Конструкція обмотки - двошарова або одношарова.

Пропонується з'єднання двох схем «зірки» і «трикутника» в одній обмотці. Розглядалися «сполучені» обмотки з паралельним і послідовним з'єднанням фаз (рис. 5.9).

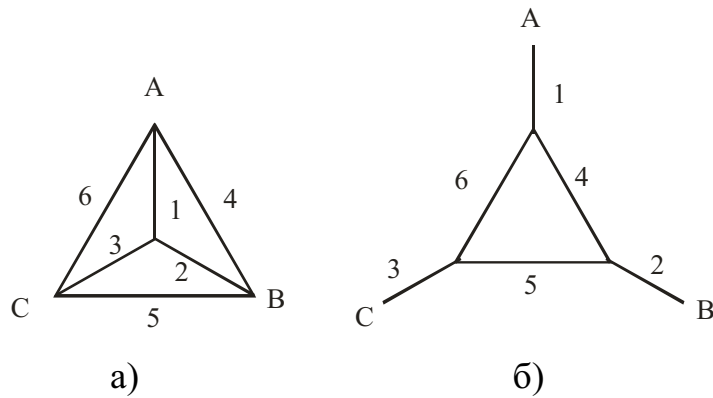


Рис. 5.9. Схеми вмикання «сполученої» обмотки

а) паралельне; б) послідовне

Паралельне з'єднання вважається неприйнятним, тому що там утворюються паралельні контури й можлива поява більших зрівняльних ЕРС і струмів.

При послідовному з'єднанні відсутня можливість появи зрівняльних ЕРС і струмів. Але, якщо котушки будуть виконані з однакового проводу, струми в котушках зірки й у котушках трикутника будуть різними.

Для вирівнювання струмів число витків у котушках трикутника повинне в 1,73 рази бути більше, ніж у котушках зірки

$$u_{n_{\Delta}} = u_{n_Y} \cdot 1,73,$$

а перетин проводу в 1,73 менший $q_{\Delta} = q_Y / 1,73$.

Котушки шостифазної обмотки можуть бути переключені в так звану «сполучену» обмотку.

На рис. 5.10 показана векторна діаграма пазових ЕРС обмотки $2p=2$, $Z_1=24$. Зсув в часі між осями ЕРС основної й другої (сполученої) обмотками становить 30 ел. град.

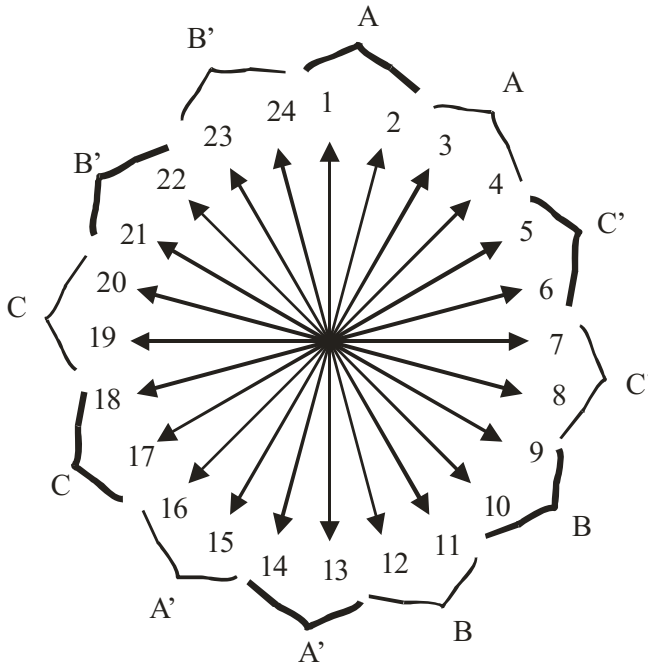
На векторній діаграмі (рис. 5.10) АКС, що належать основній і другій обмоткам, виділені лініями різної товщини.

Основна обмотка займає пази

1,2,5,6,9,10,13,14,17,18,21,22 (Y),

а друга обмотка (сполучена) займає пази

3,4,7,8,11,12,15,16,19,20,23,24 (Δ).



Кут зрушення між пазовими

ЕРС

$$\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 1}{24} = 15 \text{ degrees}$$

Рис. 5.10. Векторна діаграма пазових ЕРС «сполученої» обмотки

На рис. 5.11 показана схема з'єднання котушок шестифазної обмотки в схему з послідовним з'єднанням фаз «сполученої» обмотки.

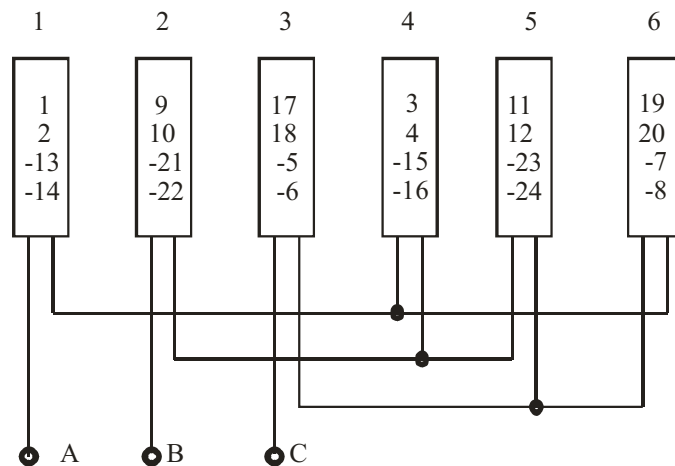


Рис. 5.11. Схема комутації котушок «сполученої» обмотки

с послідовним з'єднанням Y / Δ , $2p=2$, $Z_1=24$

Таку обмотку можна виконати як в одношаровому (катушкові групи або концентричні катушки), так і у двошаровому виконаннях.

На рис. 5.12 показана схема-розгортка катушкової одношарової «сполученої» обмотки у відповідності зі схемою комутації на рис. 5.11.

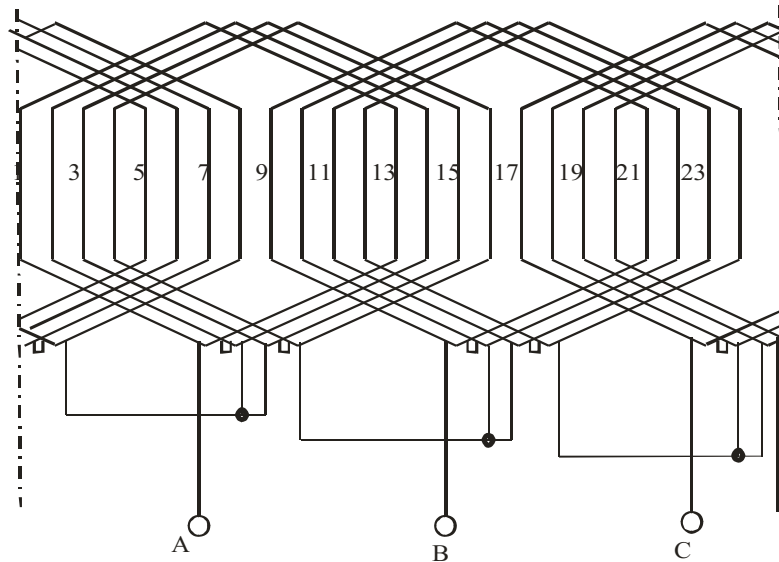


Рис. 5.12. Схема-розгортка катушкової одношарової «сполученої» обмотки $2p=2$, $Z_1=24$

Таким чином, «сполучені» обмотки, відповідають розподілу шостифазної обмотки з 30° фазною зоною, але включені в трифазну мережу.

Число пазів на полюс і фазу

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 6} = 2.$$

Коефіцієнт розподілу

$$k_r = \frac{\sin\left(q \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(15)}{2 \cdot \sin 7,5^\circ} = \frac{0,0259}{0,261} = 0,991.$$

При одношаровому виконанні обмотувальний коефіцієнт

$$k_w = k_r = 0,991.$$

Коефіцієнти розподілу для 5-й і 7-й гармонік магнітного поля

$$k_{r_{v=5}} = \frac{\sin(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2})}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(5 \cdot 2 \cdot \frac{15}{2})}{2 \cdot \sin(5 \cdot 7,5^\circ)} = \frac{0,966}{1,217} = 0,793,$$

$$k_{r_{v=7}} = \frac{\sin(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2})}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(7 \cdot 2 \cdot \frac{15}{2})}{2 \cdot \sin(7 \cdot 7,5^\circ)} = \frac{0,966}{1,587} = 0,609.$$

Коефіцієнти розподілу для 5-й і 7-й гармонік магнітного поля збільшилися в порівнянні зі звичайною трифазною обмоткою з $q = 4$

$$k_{r_{v=5}} = \frac{\sin(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2})}{v \cdot q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(5 \cdot 4 \cdot 7,5)}{5 \cdot 4 \cdot \sin 7,5^\circ} = \frac{0,5}{2,6} = 0,192;$$

$$k_{r_{v=7}} = \frac{\sin(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2})}{v \cdot q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin(7 \cdot 4 \cdot 7,5)}{7 \cdot 4 \cdot \sin 7,5^\circ} = \frac{0,5}{3,64} = 0,137.$$

Тому дану «сполучену» обмотку краще використати у двошаровому виконанні із кроком $y=10$. Коефіцієнти скорочення й обмотувальні

$$k_{y_{v=1}} = \sin\left(90 \cdot \frac{y}{\tau}\right) = \sin\left(90 \cdot \frac{10}{12}\right) = 0,966,$$

$$k_{y_{v=5}} = \sin\left(5 \cdot 90 \cdot \frac{y}{\tau}\right) = \sin\left(5 \cdot 90 \cdot \frac{10}{12}\right) = 0,258,$$

$$k_{y_{v=7}} = \sin\left(7 \cdot 90 \cdot \frac{y}{\tau}\right) = \sin\left(7 \cdot 90 \cdot \frac{10}{12}\right) = 0,258,$$

$$k_{w_{v=1}} = k_{r_{v=1}} \cdot k_{y_{v=1}} = 0,991 \cdot 0,966 = 0,958,$$

$$k_{w_{v=5}} = k_{r_{v=5}} \cdot k_{y_{v=5}} = 0,793 \cdot 0,258 = 0,204,$$

$$k_{w_{v=7}} = k_{r_{v=7}} \cdot k_{y_{v=7}} = 0,609 \cdot 0,258 = 0,157.$$

При двошаровому виконанні значно зменшуються МРС від вищих гармонік магнітного поля. Схема-розгортка «сполученої» обмотки з $y=10$ наведена на рис. 5.13.

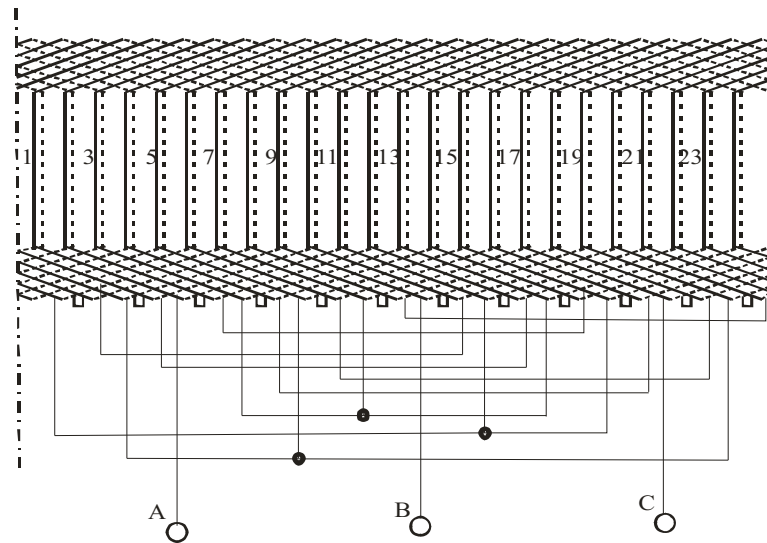
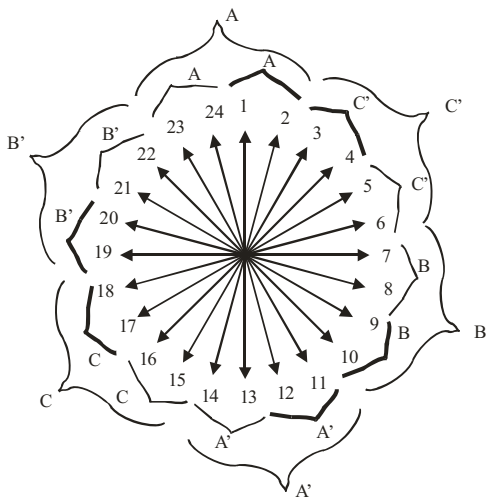


Рис. 5.13. Схема-розгортка двошарової «сполученої» обмотки
 $c\ y=10, 2p=2, Z_1=24$

Одношарову катушкову шестифазну обмотку (рис. 5.8) $2p=2, Z_1=24$ із скороченим кроком можна теж з'єднати в «сполучену» обмотку. Векторна діаграма пазових ЕРС і розподіл по фазах наведені на рис. 5.14.



Ця обмотка по своїх властивостях еквівалентна двошаровій обмотці із кроком $y=10$.

Але значно спрощена технологія виготовлення.

Рис. 5.14. Векторна діаграма пазових ЕРС обмотки з $2p=2, Z_1=24$

Схема комутації показана на рис. 5.15, а схема-розгортка – на рис. 5.16.

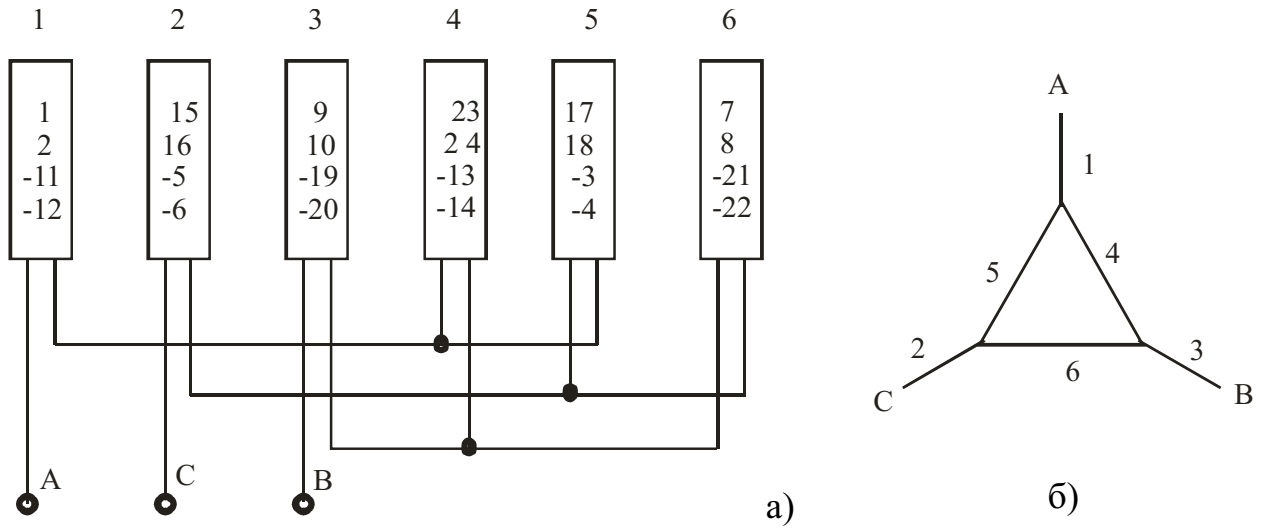


Рис. 5.15. Схеми комутації «сполученої» одношарової обмотки
 $2p=2, Z_1=24$

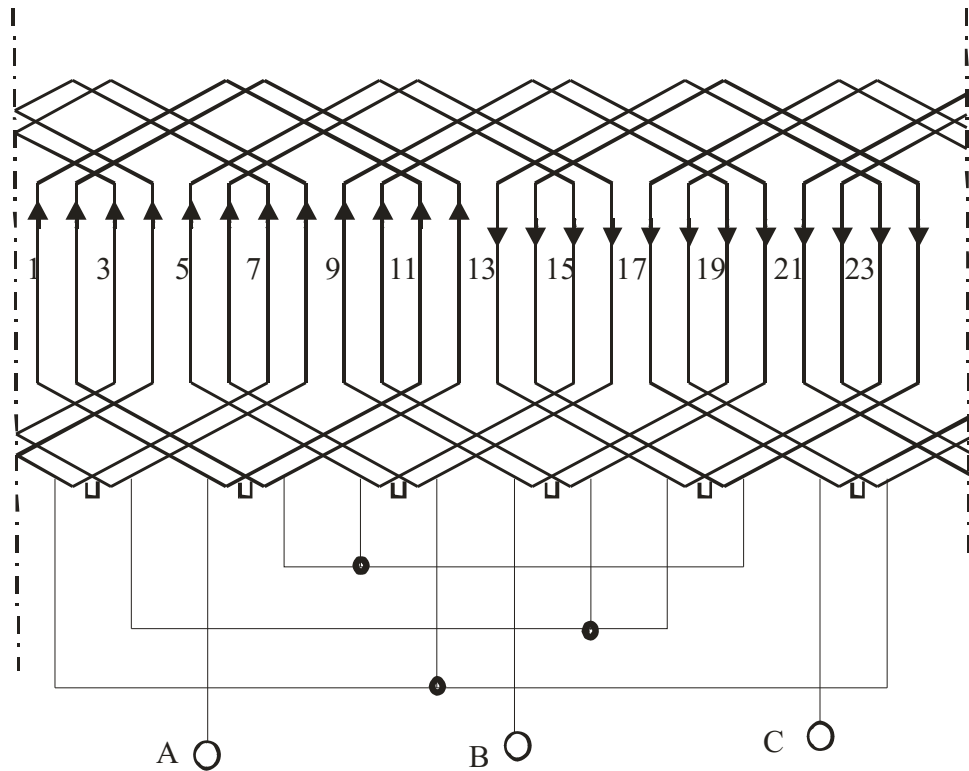


Рис. 5.16. Схема-розгортка «сполученої» одношарової котушкової
 обмотки із скороченим кроком $y=10, 2p=2, Z_1=24$

Повний гармонійний аналіз, виконаний за допомогою ПЕОМ, «сполученої» обмотки із кроком $y=10$ наведений у табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Гармонійний аналіз «сполученої обмотки», $y=10$, $2p=2$, $Z_1=24$

ν	k_y	k_{rA}	k_{rB}	k_{rC}	k_{wOBR}	k_{wPR}	H_{OBR}	H_{PR}
1	0.966	0.991	0.991	0.991	0.000	0.958	0.000	1.000
5	0.259	0.793	0.793	0.793	0.205	0.000	0.043	0.000
7	0.259	0.609	0.609	0.609	0.000	0.158	0.000	0.024
11	0.966	0.131	0.131	0.131	0.126	0.000	0.012	0.000
13	0.966	0.131	0.131	0.131	0.000	0.126	0.000	0.010
17	0.259	0.609	0.609	0.609	0.158	0.000	0.010	0.000
19	0.259	0.793	0.793	0.793	0.000	0.205	0.000	0.011
23	0.966	0.991	0.991	0.991	0.958	0.000	0.043	0.000
25	0.966	0.991	0.991	0.991	0.000	0.958	0.000	0.040

5.2.2. Сполучена обмотка при $2p=4$, $Z_1=36$

Розглянемо «сполучену» обмотку з $2p=4$ в 36 пазах статора.

Число пазів на полюс і фазу 30° шестифазної обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = \frac{3}{2} = 1 \frac{1}{2}.$$

Повторювана частина числового ряду: 2, 1.

У цьому випадку в обмотках, з'єднаних у зірку й трикутник, буде міститися різне число котушок і не буде кута зрушення, рівного 30° між векторами ЕРС обмоток. Обмотку варто зробити двошаровою із кроком $y=8$ з подальшим перетворенням в одно-двошарову з концентричними котушками врозвал. Кількість котушок у зірці й трикутнику буде однаково й між векторами ЕРС обмоток буде кут 30° .

Розподіл по пазах і фазам такої обмотки наведений на рис. 5.17. Тут також наведений можливий алгоритм укладання концентричних котушкових груп обмотки без перетинання в лобових частинах.

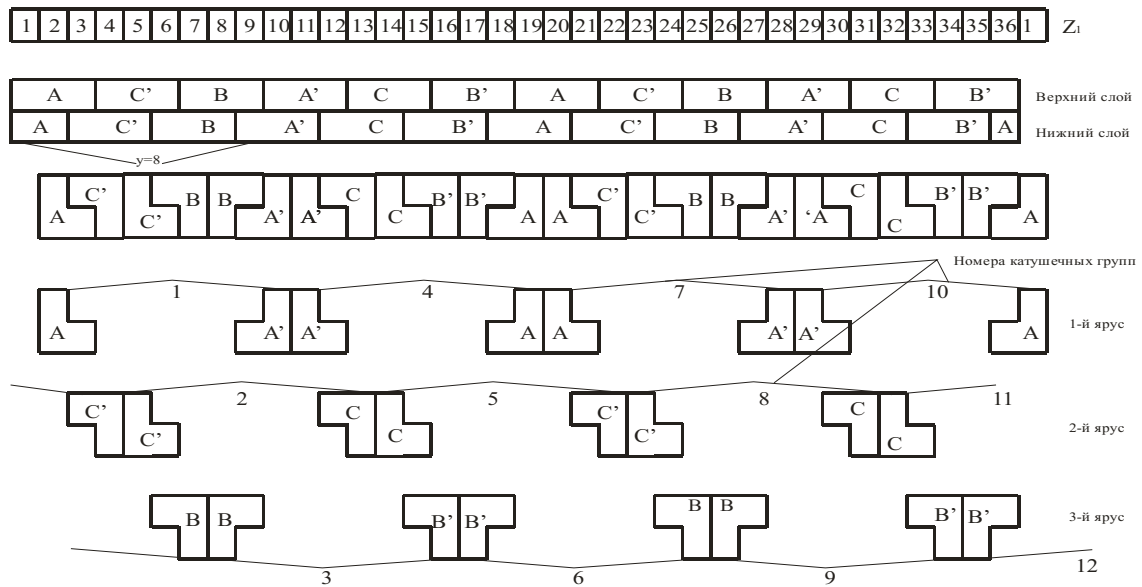


Рис. 5.17. Торцева схема одно-двошарової обмотки з $2p=4$ в $Z_1=36$

і порядок укладання котушкових груп обмотки

Зірка пазових ЕРС і принципова схема комутації «сполученої» обмотки наведені на рис. 5.18 і рис. 5.19.

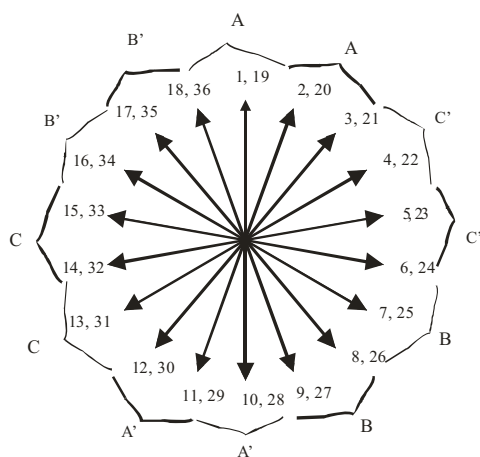


Рис. 5.18. Зірка пазових ЕРС обмотки з $2p=4$ в $Z_1=36$

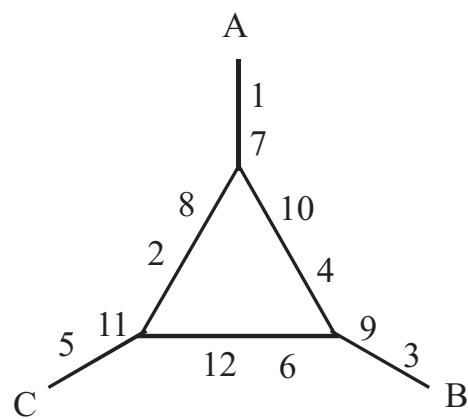


Рис. 5.19. Принципова схема комутації «сполученої» обмотки з $2p=4$ в $Z_1=36$

Схема комутації котушкових груп одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p=4$ в $Z_1=36$ показана на рис. 5.20.

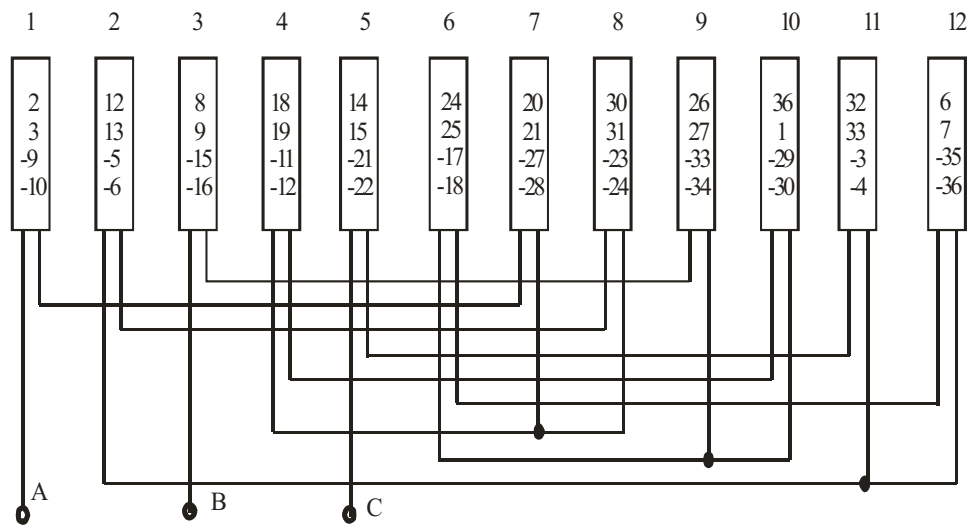


Рис. 5.20. Схема комутації котушкових груп одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p=4$, $Z_1=36$

Схема-розгортка «сполученої» одно-двошарової обмотки наведена на рис. 5.21.

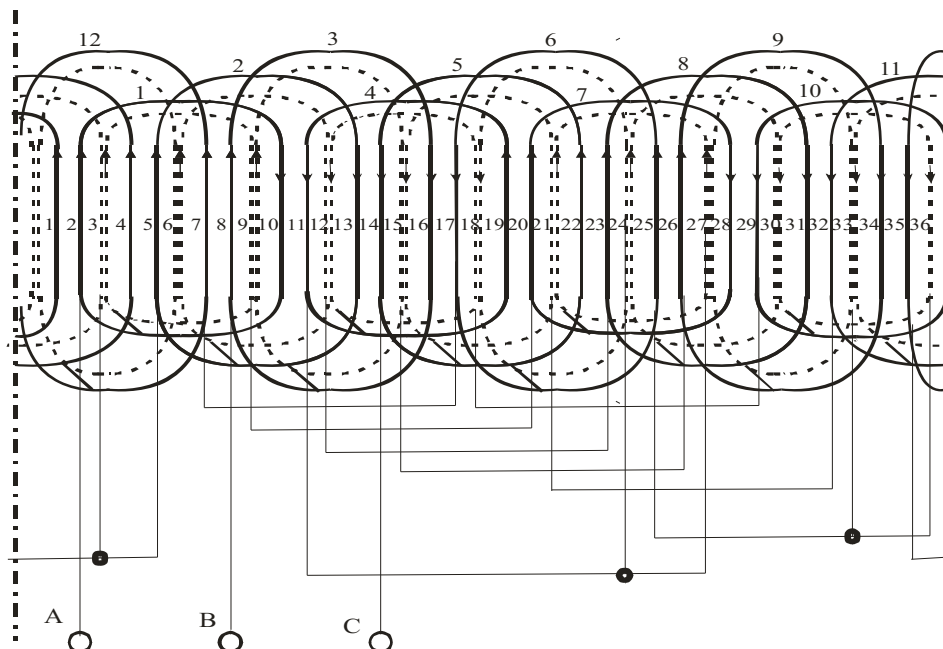


Рис. 5.21. Схема-розгортка одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p=4$ в $Z_1=36$

Гармонійний аналіз «сполученої» обмотки при $2p=4$ в $Z_1=36$ із кроком $y=8$ наведений у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Гармонійний аналіз «сполученої обмотки», $y=8$, $p=2$, $Z_1=36$

ν	k_y	k_{rA}	k_{rB}	k_{rC}	k_{wOBR}	k_{wPR}	H_{OBR}	H_{PR}
2	0.985	0.945	0.945	0.945	0.000	0.931	0.000	1.000
10	0.643	0.140	0.140	0.140	0.090	0.000	0.019	0.000
14	0.342	0.061	0.061	0.061	0.000	0.021	0.000	0.003
22	0.342	0.061	0.061	0.061	0.021	0.000	0.002	0.000
26	0.643	0.140	0.140	0.140	0.000	0.090	0.000	0.007
34	0.985	0.945	0.945	0.945	0.931	0.000	0.059	0.000
38	0.985	0.945	0.945	0.945	0.000	0.931	0.000	0.053

У табл. 5.5 і табл. 5.6 прийняті наступні позначення:

ν – абсолютний номер гармоніки магнітного поля;

k_y – коефіцієнт скорочення;

k_{rA} , k_{rB} , k_{rC} – коефіцієнти розподілу фаз;

k_{wPR} – обмотувальний коефіцієнт прямої послідовності;

k_{wOBR} – обмотувальний коефіцієнт зворотної послідовності

H_{PR} – амплітудне значення обмотувального коефіцієнта прямої послідовності, наприклад, для $\nu_{pr} = 14$

$$H_{PR} = \frac{k_{wPR\nu} \cdot p}{k_{w\nu=p} \cdot \nu_{pr}} = \frac{0,021 \cdot 2}{0,931 \cdot 14} = 0,0032,$$

H_{OBR} – амплітудне значення обмотувального коефіцієнта зворотної послідовності, наприклад, для $\nu_{obr} = 10$:

$$H_{OBR} = \frac{k_{wOBR\nu} \cdot p}{k_{w\nu=p} \cdot \nu_{obr}} = \frac{0,09 \cdot 2}{0,931 \cdot 10} = 0,0193.$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Двухскоростной асинхронный двигатель с обмоткой, переключаемой по схеме УУУ/УУУ// *Электромашиностроение и электро-оборудование: Респ. межвед. науч. техн. сб., Киев: Техника, 1974, вып. 18. – с. 55-62.*
2. Беликова Л. Я., Захаров М. К., Дегтев В. Г. К образованию многоскоростных обмоток с ограниченной несимметрией // *Электромашиностроение и электрооборудование: Респ. межвед. науч. техн. сб., 1974, вып. 19. – с. 118-125.*
3. 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.*
4. Беликова Л. Я. Теоретические и экспериментальные исследования многоскоростных асинхронных машин с несимметричными обмотками, построенными методами электромагнитной модуляции: *дис. канд. тех. наук. – Одесса, 1978. – 216 с.*
5. Беликова Л. Я., Захаров М. К., Дегтев В. Г., Кравчик А. Э. Модернизация отрезка серии двухскоростных асинхронных двигателей// *Тезисы докладов V Всесоюзной научно- технической конференции «Состояние и перспективы развития производства асинхронных электродвигателей». Владимир, 1980.*
6. Bielikova. L., Degtev V. G., Zakharov M. K., Radimov I. N. Polomkopplingsbar, tvaskiktig trefeslindning for en elektrisk motor med tva rotations hastigheter// *Utlaggningskrift Sverige № 7 903 407-0, 1980. – 5s.*

7. Беликова Л.Я., Дегтев В. Г., Захаров М. К., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. А.С. № 749336, 1980.
8. Bielikova. L., Polomkopplingsbar, tvaskiktig trefeslindning for en elektrisk motor med tva rotations astigheter// Utlaggningskrift Sverige № 7 903 408-0, 1980. – 4s.
9. Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. Патент Швеции № 7905606, 1980. – 14 с.
10. Bielikova. L., Degtev V. G., Radimov I. N. Tvaskiktig, polomkopplingsbar, trefeslindning for en elektriska motorer med tva rotation shastigheter. Utlaggningskrift Sverige № 7 905 606-5, 1980. – 9s.
11. Беликова Л. Я., Захаров М. К., Яковлев М. М. Трехфазная двухслойная полюсопереключаемая обмотка. А.С. № 749337, 1980.
12. Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №749338, 1980.
13. Беликова Л.Я., Антоненко А.И., Войтех А. А., Дегтев В. Г. Трехфазная обмотка с переключением полюсов без перерыва цепи питания. А.С. №758392, 1980.
14. Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. А.С № 782046, 1980.
15. Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка (ее варианты). А.С. № 900369, 1980.

- 16.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. Патент Франции № 2462807, 1981. – 14 с.
- 17.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Трехфазная двухслойная полюсопереключаемая обмотка. А.С. № 813594, 1981.
- 18.Bielikova. L., Djogtev V. G., Radimov I. N. Enroulement tri-phase a deux couches a poles commutables pour moteur electrique a deux vitesses. Brevet d'invention № 7919945, Republique Francaise, 1981. – 11.
- 19.Bielikova. L., Djogtev V. G., Radimov I. N. Polum-schaltbare dreiphasige Zweischichtwicklung fur einen Elektromotor mit zwei Drehzahlstufen. Patentschrift № 2832000 C2, 1981, Bundesrepublik Deut-schland. – 4S.
- 20.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Радимов И. Н. Трехфазная двухслойная полюсопереключаемая обмотка. А.С. № 898558, 1982.
- 21.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Дегтев В. Г., Кравчик А.Э. Двухскоростной однообмоточный двигатель для привода вентилятора. ИНТС "Электротехническая промышленность". Серия "Электрические машины", вып. 5(135), 1982. – с. 5-7.
- 22.Bielikova. L., Enroulement triphase pour moteur electrique a deux vitesses. Brevet d'invention № 7909926, Republique Francaise, 1982.- 5p.
- 23.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Яковлев М. М. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. Патент Швеции №7901137-5, 1982., – 10с.
- 24.Беликова Л. Я., Захаров М.К., Яковлев М.М. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. Патент Франции № 2443759, 1983. – 7с.

- 25.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Дегтев В. Г., Кравчик А.Э. Расчет несимметрии совмещенных полюсопереключаемых обмоток// Тезисы докладов VI Всесоюзной НТК "Перспективы развития производства асинхронных двигателей", М: Информэлектро, 1983. – с. 14-17.
- 26.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Кикоть И. И. Трехфазная полюсопереключаемая обмотка для механизированной укладки. А.С. №1173494, 1985.
- 27.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Дегтев В. Г., Захаров М.К., Трехфазная полюсопереключаемая одно-двухслойная обмотка. А.С. №1246258, 1986.
- 28.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Кузнецов А. В.Трехфазная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1267542, 1986.
- 29.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Кузнецов А. В. Трехфазная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1267592, 1986.
- 30.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Захаров М. К. Трехфазная полюсопереключаемая однослойная обмотка. А.С. №1272411, 1986.
- 31.Беликова Л. Я., Дегтев В. Г., Захаров М. К. Однослойные и одно-двухслойные полюсопереключаемые обмотки двухскоростных асинхронных двигателей// Электромашиностроение и электрооборудование: Респ межвед. науч. техн. сб. Киев: Техника, 1986, №40. – с. 113-117.
- 32.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Дегтев В. Г. Трехфазная полюсопереключаемая однослойная обмотка. А.С. №1257764, 1986.
- 33.Bielikova. L., Zakharov M. K., Yakovlev M. M. Avvogimen-to trifase per la commutazione di poli a due strati per motori elettrici a due velocita

Brevetto per invenzione industrial № 1107379, Repubblica Italiana, 1986.
– 8 p.

- 34.Беликова Л.Я., Захаров М.К., Яковлев М.М. Трехфазная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка. Патент ФРГ №2849761, 1987., – 6с.
- 35.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Билоненко Н.И. Таблично-векторный способ построения полюсопереключаемых и совмещенных обмоток с сопряжением фаз УУУ/УУУ// Тезисы докладов «Регулируемые двигатели переменного тока». – Суздаль, 1987.
- 36.Беликова Л. Я., Сверщевский В.П. Двухскоростные обмотки со схемой коммутации У/УУУ// Тезисы докладов «Регулируемые двигатели переменного тока». Владимир, 1987.
- 37.Беликова Л. Я., Сверщевский В. П. Трехфазная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1287296, 1987.
- 38.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Дегтев В. Г., Кузнецов А. В. Трехфазная полюсопереключаемая однослойная обмотка. А.С. №1297179, 1987.
- 39.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Корнеев А. П., Кузнецов А.В. Трехфазная однослойная полюсопереключаемая обмотка с отношением полюсов 16/4. А.С. №1372508, 1988.
- 40.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Сверщевский В. П., Хитрова Г. Е. Трехфазная двухслойная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1372512, 1988.
- 41.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Корнеев А.П., Кузнецов А.В. Трехфазная однослойная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1385198, 1988.

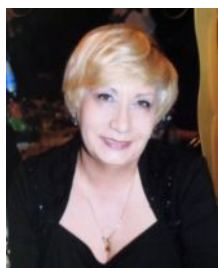
- 42.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Билоненко Н. И. Построение схем однослойных полюсопереключаемых обмоток с сопряжением фаз $Y\bar{Y}\bar{Y}/Y\bar{Y}\bar{Y}$ // Электромеханика. – 1988. – №7. – с. 46-50.
- 43.Беликова Л. Я., Трехфазная полюсопереключаемая обмотка. А.С. №1387118, 1988.
- 44.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Билоненко Н. И. Проектирование полюсопереключаемых и совмещенных обмоток с малыми коэффициентами переключения// Электромашиностроение и электрооборудование: Респ. межвед. науч. техн. сб. Киев: Техника 1989. – №43 – с. 90-99.
- 45.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Дегтев В. Г. и др. Трехфазная обмотка двухскоростного двигателя. А.С., 1990.
- 46.Беликова Л. Я., Диатилу П. К. Построение двухфазных полюсопереключаемых обмоток// Электромашиностроение и электрооборудование: Респ. межвед. науч. техн. сб. Киев: Техника. 1995. –№47. – с. 83-86.
- 47.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Айсами Самир. Трёхскоростные полюсопереключаемые обмотки// Электромашиностроение и электрооборудование: Респ. межвед. науч. техн. сб. Киев: Техника 1995. – №47. – с. 98-101.
- 48.Беликова Л. Я., Айсами Самир. Влияние взаимоиндуктивных связей отдельных обмоток на работу многоскоростного асинхронного электродвигателя// Электромашинобудування та електроустаткування: Респ. межвед. науч. техн. сб. Одеса 1996. – №48. – с. 77-81.
- 49.Беликова Л.Я., Чайковский В.П., Диатилу П.К. Оптимизация обмоточных данных двухскоростных асинхронных конденсаторных

- двигателей// Електромашинобудування та електрообладнання, н/т зб. Київ: Техніка, 1997. Вып. 49/0,3.
- 50.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Диатилу П. К. Автоматизированное формирование двухскоростных двухфазных обмоток с применением EXCEL// Електромашинобудування та електрообладнання, н/т зб. Київ: Техніка, 1998, вип. 50.
- 51.Беликова Л. Я., Захаров М. К., Диатилу П. К. Оптимизационные задачи при проектировании двухскоростных однофазных асинхронных электродвигателей// Електромашинобудування та електрообладнання, н/т зб. Київ: Техніка, 1998р. Вип. 51, 4/0,3.
- 52.Беликова Л. Я., Диатилу П. К. Двухскоростные двухфазные обмотки с новой схемой коммутации// Труды ОППУ. Научный сборник, - Одесса, 1998. – Вып. 1(5). Энергетика. – С. 228-230.
- 53.Беликова Л. Я., Смирнов С. Б. Влияние ёмкости конденсатора на пусковые и рабочие свойства АКД Харьков “Електротехніка і електромеханіка”. 2004’1. – С. 8-11.
- 54.Беликова Л.Я., Смирнов С.Б. Улучшение технико-экономических показателей асинхронного конденсаторного двигателя серии ЭАО-18-2// Труды ОНПУ. – 2004. Вып. 1(21). – С. 75-78.
- 55.Беликова Л. Я., Здельник О. А. Двухфазная одно-двухслойная двухскоростная полюсопереключаемая обмотка// Електромашинобудування та електрообладнання, н/т зб. Київ: Техніка 2005. Вип. 64. –с. 72-75.
- 56.Беликова Л. Я., Билоненко Н. И., Здельник О. А. Полюсопереключаемые обмотки с соотношением чисел полюсов 8:6 и схемой коммутации УУУ/УУУ// Труды ОНПУ 2005. Вып. 1(23). – с. 53-58.

- 57.Беликова Л. Я., Шевченко В.П. “Машины змінного струму”: навчальний посібник для студ. вищ. навч. закладів. – Одеса: ОНПУ, Наука і техніка, 2005. 272 с.
- 58.Беликова Л. Я., Здельник О.А. Застосування двошвидкісного двигуна для приводу вентиляторів // Електромашинобудування та електрообладнання, н/т зб. Київ: Техніка, 2006. Вип. 66. – С. 186-187.
- 59.Беликова Л. Я., Смірнов С. Б. Комп’ютерна програма «Расчетно-оптимизационная программа «РОАКД». Расчет асинхронных конденсаторных двигателей и оптимизация обмоточных данных. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 25526 від 29.08.2009.
- 60.Беликова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини: навчальний посібник для студентів вищ. навч. закладів. Одеса. Наука і техніка, 2012. ISBN 978-966-1552-11-0. 480 с.
- 61.Петрушин В. С., Беликова Л. Я., Еноктаев Р. Н., Плоткин Ю. Р. Сравнение эксплуатационных характеристик многофазных регулируемых асинхронных двигателей// Электротехника и электромеханика 2016. №1. – с. 38-41.
- 62.Беликова Л. Я., Якимец А. М., Алексюк А. И. Синхронные моменты в асинхронных двигателях с нетрадиционными обмотками// “Электрические и компьютерные системы“ 2017, №24(100), – с. 57-60.
- 63.Беликова Л. Я., Петрушин В. С., Якимец А. М. Шестифазные обмотки статора асинхронных двигателей// “Электрические и компьютерные системы“. Научно-технический журнал 2018, №29(105), – с. 40-47.

- 64.Беликова Л. Я., Чайковський В. П. Обмотки статоров шестифазних асинхронних двигателів// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт № 11 (185) ноябрь / 2019.
- 65.Беликова Л. Я., Чайковський В. П. Синтез та симетрування полюсоперемикальних обмоток зі схемою УУУ/УУУ таблично-векторним способом// “Электрические и компьютерные системы“. Науково-технічний журнал 2022, №36(112), – с. 40-47.
- 66.Белікова Л.Я., Чайковський В.П. Вмикання шостифазної обмотки в трифазну мережу.// «Електротехнічні та комп'ютерні системи». Науково-технічний журнал 2024, №40(116), – с. 6-12..

Отримано 28.06.2024



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

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

ORCID ID 0000-0001-5999-8205

Белікова Людмила Яківна - канд. техн. наук, доцент кафедри ЕМІ національного університету «Одеська політехніка».

Читає лекції по дисциплінах «Електричні машини» і «Обмотки електричних машин».

Область наукових інтересів - багатошвидкісні обмотки асинхронних двигунів і оптимізація обмотувальних даних конденсаторних двигунів. Опубліковано більше 100 наукових і науково-методичних робіт. Має більше 40 авторських посвідчень і патентів на винахід.