

ВМИКАННЯ ШЕСТИФАЗНОЇ ОБМОТКИ В ТРИФАЗНУ МЕРЕЖУ

Л. Я. Белікова, В. П. Чайковський

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Останнім часом з'явилося багато публікацій в інтернеті про «сполучену» обмотку для трифазного двигуна з $2p=2$ у 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.

Ключові слова: число пазів статора, схема обмотки, паралельні гілки, число фаз.

Вступ

Поліпшення техніко-економічних і експлуатаційних властивостей асинхронних двигунів може бути досягнуте за рахунок застосування в них сполучених обмоток. Застосування таких обмоток дозволить поліпшити їх масогабаритні й енергетичні показники.

1. Постановка задач дослідження

На рис. 1 показані «сполучені» обмотки з паралельним і послідовним з'єднанням фаз.

Паралельне з'єднання вважається неприйнятним, тому що там утворюються паралельні контури й можлива поява більших зрівняльних ЕРС і струмів.

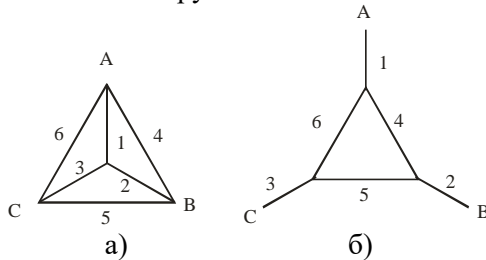


Рис. 1. Схеми включення «сполученої» обмотки а) паралельне; б) послідовне

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 у 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

$$q_{\Delta} = q_Y / 1,73$$

© Белікова Л. Я., Чайковський В. П., 2024

Котушки шестифазної обмотки [1] можуть бути перемкнуті в так звану «сполучену» обмотку.

На рис. 2 показана векторна діаграма пазових ЕРС обмотки $2p=2$, $Z_1=24$.

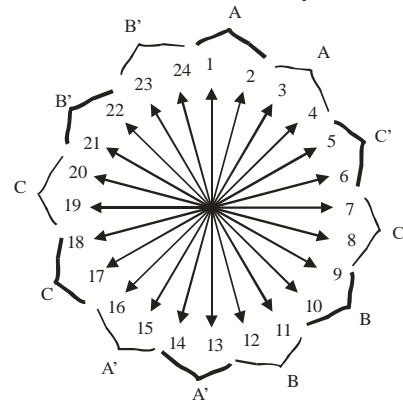


Рис. 1. Векторна діаграма пазових ЕРС «сполученої» обмотки

Зсув в часі між осями ЕРС основної й другої (сполученої) обмотками становить 30 ел. град.

На векторній діаграмі (рис. 2) активні котушкові сторони (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

$$3,4,7,8,11,12,15,16,19,20,23,24 (\Delta).$$

Кут зрушення між пазовими ЕРС

$$\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 1}{24} = 15 \text{ ел.град.}$$

На рис. 3 показана схема з'єднання котушок шестифазної обмотки в схему з послідовним з'єднанням фаз «сполученої» обмотки.

Таку обмотку можна виконати як в одношаровому (котушкові групи або концентричні котушки), так і у двошаровому виконаннях.

На рис. 4 показана схема-розгортка котушкової одношарової «сполученої» обмотки у відповідності зі схемою комутації на рис. 3.

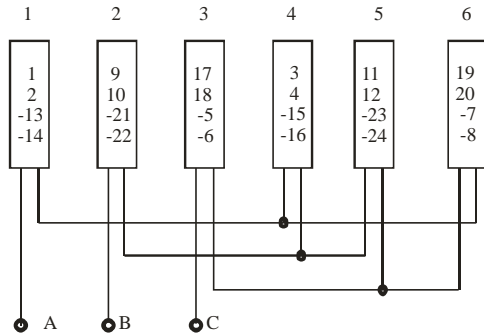


Рис. 3. Схема-розгортка котушкової одношарової «сполученої» обмотки $2p = 2$, $Z_1 = 24$

Таким чином, «сполучені» обмотки відповідають розподілу шестифазної 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

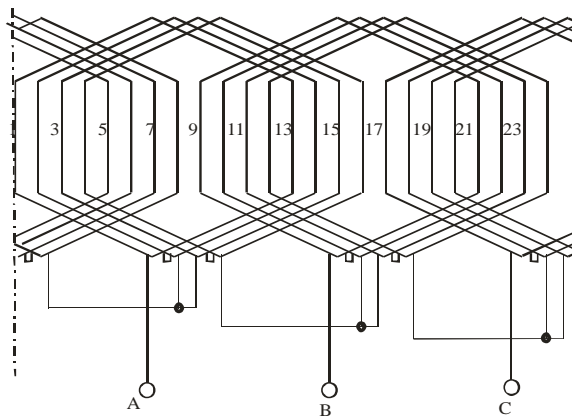
$$k_w = k_r = 0,991.$$


Рис. 4. Схема-розгортка котушкової одношарової «сполученої» обмотки $2p = 2$, $Z_1 = 24$

Коефіцієнти розподілу для 5-й і 7-й гармонік магнітного поля

$$k_{r_{v=5}} = \frac{\sin\left(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \cdot 2 \cdot \frac{15}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(5 \cdot 7,5^\circ\right)} = \frac{0,966}{1,217} = 0,793,$$

$$k_{r_{v=7}} = \frac{\sin\left(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \cdot 2 \cdot \frac{15}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(7 \cdot 7,5^\circ\right)} = \frac{0,966}{1,587} = 0,609.$$

Коефіцієнти розподілу для 5-й і 7-й гармонік магнітного поля збільшилися в порівнянні зі звичайною трифазною обмоткою з $q = 4$

$$k_{r_{v=5}} = \frac{\sin\left(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{v \cdot q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(5 \cdot 4 \cdot 7,5\right)}{5 \cdot 4 \cdot \sin 7,5^\circ} = \frac{0,5}{2,6} = 0,192 ;$$

$$k_{r_{v=7}} = \frac{\sin\left(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{v \cdot q \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(7 \cdot 4 \cdot 7,5\right)}{7 \cdot 4 \cdot \sin 7,5^\circ} = \frac{0,5}{3,64} = 0,137.$$

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.

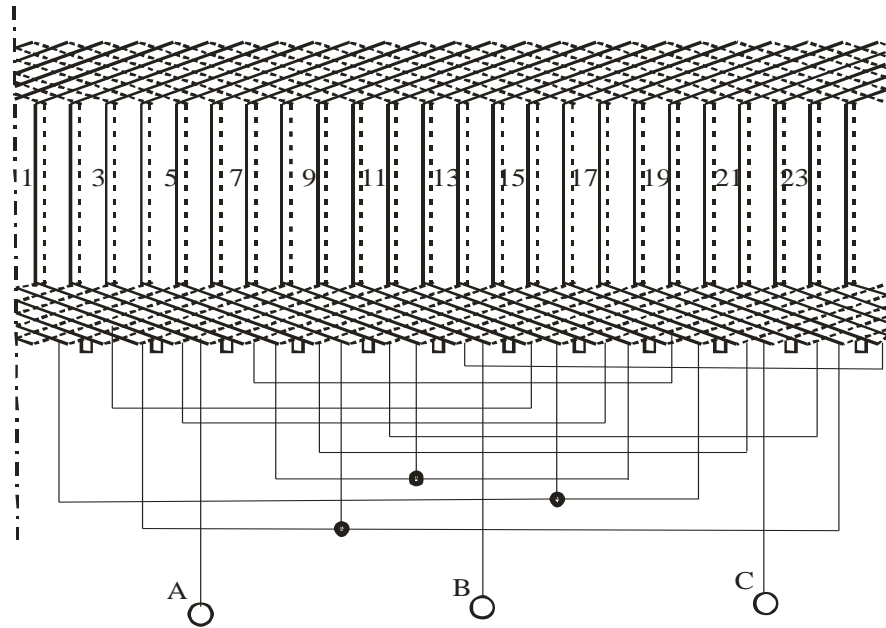


Рис. 5. Схема-розгортка двошарової «сполученої» обмотки с $y=10$, $2p=2$, $Z_1=24$

Одношарову котушкову шестифазну обмотку $2p=2$, $Z_1=24$ [1] з скороченим кроком $y=10$ можна теж з'єднати в «сполучену» обмотку. Векторна діаграма пазових ЕРС і розподіл по фазах наведені на рис. 6.

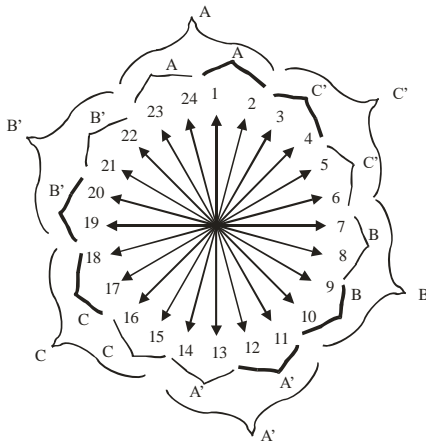


Рис. 6. Векторна діаграма пазових ЕРС обмотки з $2p=2$, $Z_1=24$

Ця обмотка по своїх властивостях еквівалентна двошаровій обмотці із кроком $y=10$. Але значно спрощена технологія виготовлення.

Схема комутації котушкових груп показана на рис. 7.

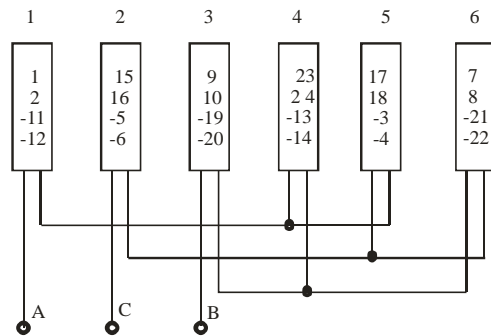


Рис. 7. Схеми комутації «сполученої» одношарової обмотки $2p=2$, $Z_1=24$

Принципова схема комутації показана на рис. 8.

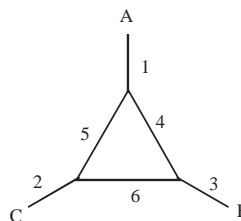


Рис. 8. Принципова схема комутації «сполученої» одношарової обмотки $2p=2$, $Z_1=24$

Схема-розгортка «сполученої» одношарової обмотки $2p = 2$, $Z_1 = 24$ приведена на рис. 9.

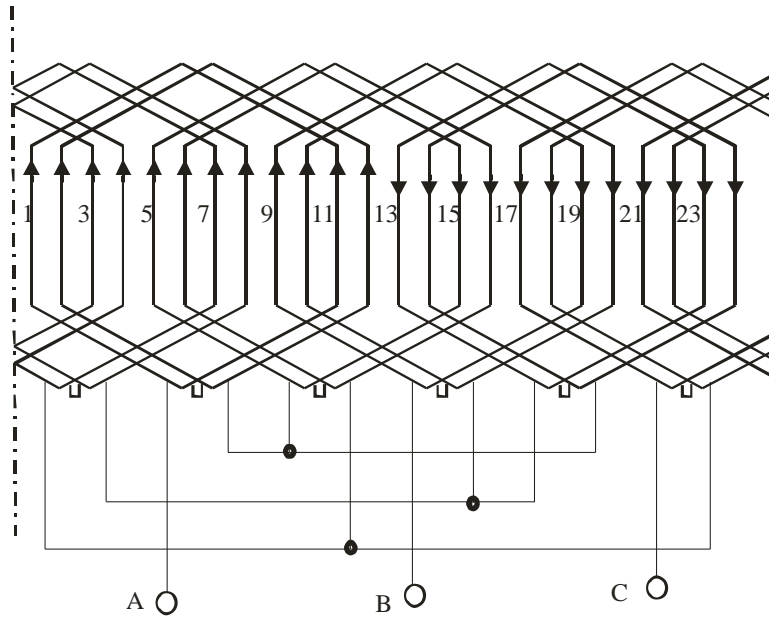


Рис. 9. Схема-розгортка «сполученої» одношарової котушкової обмотки з скороченим кроком $y=10$, $2p = 2$, $Z_1 = 24$

Повний гармонійний аналіз, виконаний за допомогою ПЕОМ, «сполученої» обмотки із кроком $y=10$ наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Гармонійний аналіз «сполученої обмотки», $y=10$, $2p = 2$, $Z_1 = 24$

V	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

Аналогічно «сполучені» обмотки можливо отримувати також із числом полюсів $2p=4$ у різних числах пазів статора.

Розглянемо «сполучену» обмотку з $2p = 4$ в 36 пазах статора.

Число пазів на полюс і фазу 30° шестифазної обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 6} = \frac{3}{2} = 1 \frac{1}{2}.$$

Повторювальна частина числового ряду: 2, 1.

У цьому випадку в обмотках, з'єднаних у зірку й трикутник, буде втримуватися 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 фазах такої обмотки наведений на рис. 10. Тут також наведений можливий алгоритм укладання концентричних котушкових груп обмотки без перетинання в лобових частинах.

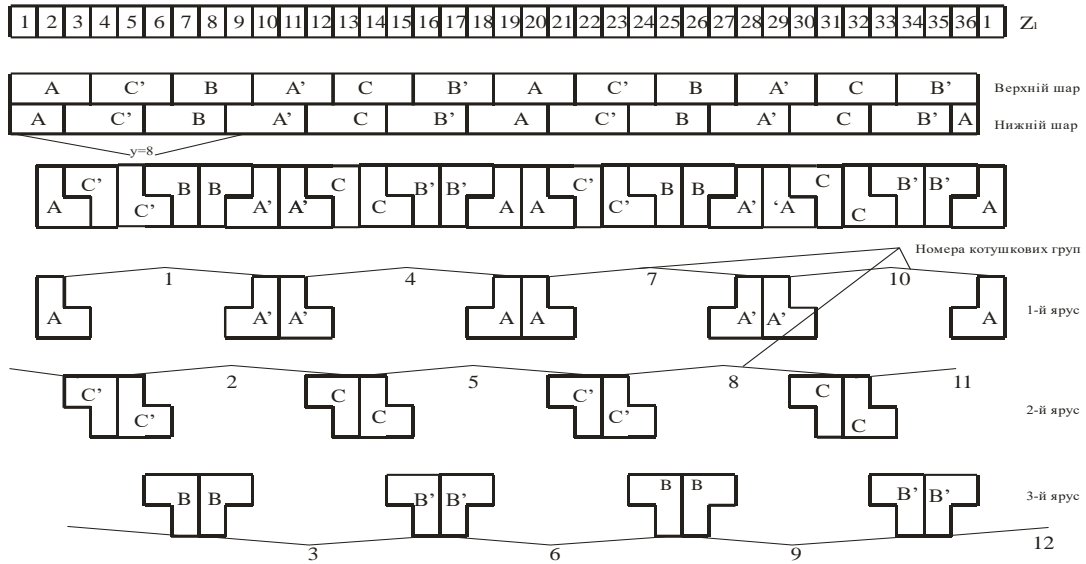


Рис. 10. Торцева схема одно-двошарової обмотки з $2p = 4$ в $Z_1 = 36$ і порядок укладання котушкових груп обмотки

Зірка пазових ЕРС і принципова схема комутації «сполученої» обмотки наведені на рис. 11 та рис. 12.

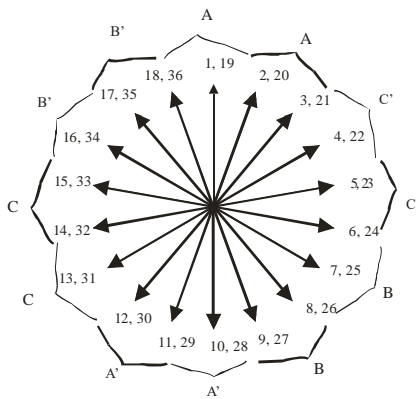


Рис. 11. Зірка пазових ЕРС обмотки з $2p = 4$ в $Z_1 = 36$

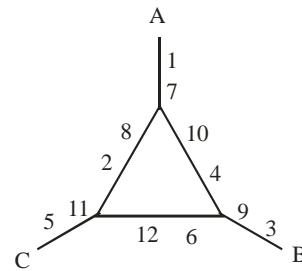


Рис. 12. Принципова схема комутації «сполученої» обмотки з $2p = 4$ в $Z_1 = 36$

Схема комутації котушкових груп одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p = 4$ в $Z_1 = 36$ показана на рис. 13.

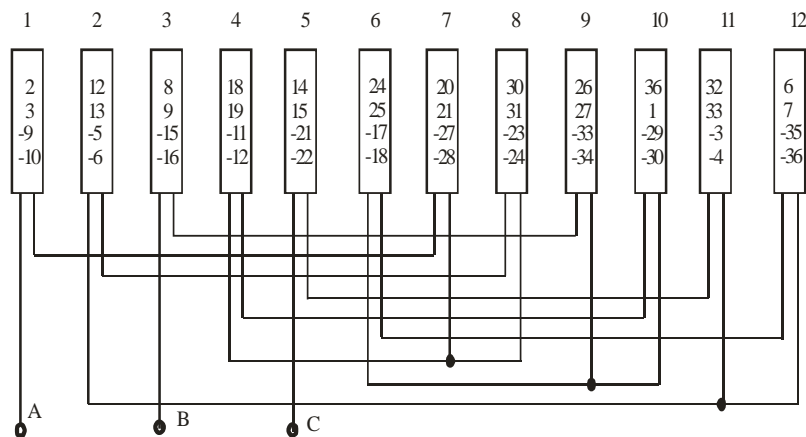


Рис. 13. Схема комутації котушкових груп одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p=4$, $Z_1=36$

Схема-розгортка «сполученої» одно-двошарової обмотки наведена на рис. 14.

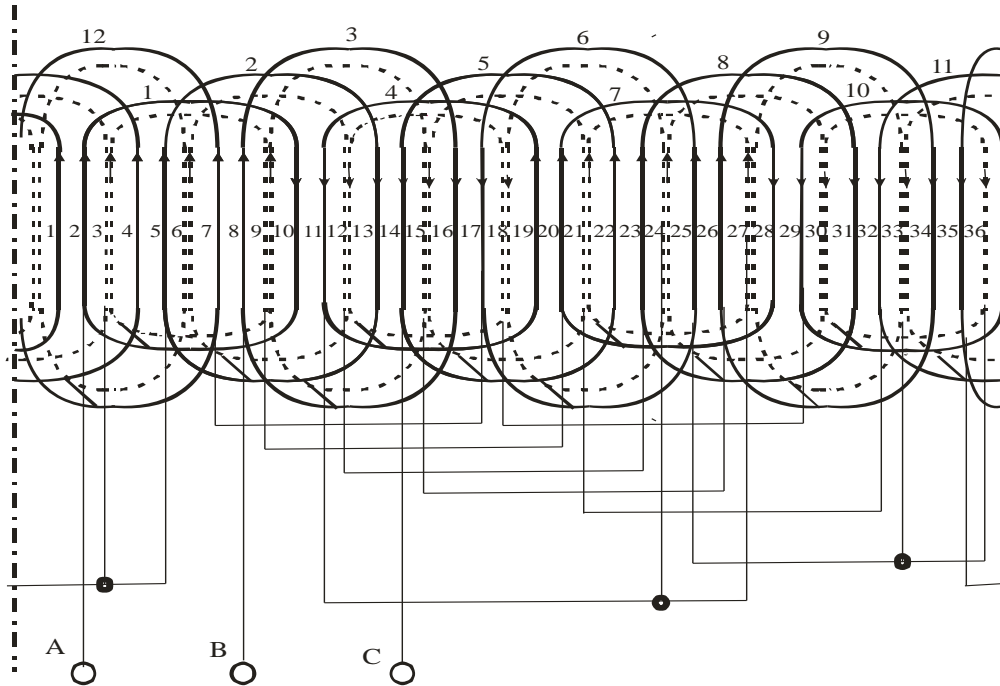


Рис. 14. Схема-розгортка одно-двошарової «сполученої» обмотки при $2p = 4$ в $Z_1 = 36$

Гармонійний аналіз «сполученої» обмотки при $2p = 4$ в $Z_1 = 36$ із кроком $y=8$ наведений у табл. 2.

У табл. 1 і табл. 2 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 $\nu_{obr} = 10$:

$$H_{OBR} = \frac{k_{wOBR\nu} \cdot p}{k_{w\nu=p} \cdot \nu_{obr}} = \frac{0,09 \cdot 2}{0,931 \cdot 10} = 0,0193.$$

Таблиця 2

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

Висновки

В основі «сполучених» обмоток лежать розподіли шестифазних обмоток. Тому дуже просто скласти «сполучену» обмотку у будь-якому числі пазів статора з любим числом полюсів.

Список використаної літератури

1. Бєлікова Л.Я., Петрушин В. С., Якимец А.М. Шестифазные обмотки статора асинхронных двигателей. Научно-технический журнал “Электрические и компьютерные системы” №29(105), 2018.

2. Петрушин В.С., Бєлікова Л.Я., Еноктаєв Р.Н., Плоткин Ю.Р. Сравнение эксплуатационных характеристик многофазных регулируемых асинхронных

двигателей [Текст] / В.С. Петрушин., Л.Я. Бєлікова // Электротехника и электромеханика №1, 2016,– с. 38 – 41

References

1. Bielikova L. Ya., Petrushin V. S, Yakymets A.M. Six-phase stator windings of asynchronous motors. Scientific and technical journal "Electrical and computer systems" No. 29(105), 2018.

2. Petrushin V. S, Bielikova L.J., Enoktaev R. N, Plotkin JU.R. Comparison characteristics multiphase regulated the asynchronous engines [Text] / Century V. Petrushin., L. Bielikova // the Electrical engineer and electromechanics №1, 2016, –с. 38 – 41.

INCLUDING A SIX-PHASE WINDING IN A THREE-PHASE NETWORK

L. Ya. Bielikova, V. P. Chaikovsky

Odesa Polytechnic National University

Annotation. Recently, many publications have appeared on the Internet about a “combined” winding for a three-phase motor with 24 stator slots. The winding design is two-layer or single-layer. It is proposed to connect two star and delta circuits in one winding. Connected windings with parallel and series connection of phases were considered.

Key words: number of stator slots, winding diagram, parallel branches, number of phases.

Отримано 12.03.2024



Бєлікова Людмила Яківна, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна, E-mail: conda@ukr.net, тел. +380666993342.

Bielikova Liudmyla, Odesa Polytechnic National University, Ph.D, Associate Professor of the Department of electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine, E-mail: conda@ukr.net, ph.: +380666993342.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5999-8205>



Чайковський Володимир Павлович, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна, E-mail: v.p.chaikovskyi@op.edu.ua, тел. +380996002983.

Vladimir Chaikovskiy, Odesa Polytechnic National University, Ph.D, Associate Professor of the Department of electromechanical engineering, Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine, E-mail: v.p.chaikovskyi@op.edu.ua, ph.: +380996002983.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6057-7483>