

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Аль-хасун Хуссейн Гені Абдулкарім



УДК 621.313.3.045

**СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ НЕСИМЕТРИЧНИХ ОБМОТОК
МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Якімець Андрій Миронович,
Одеський національний політехнічний університет,
доцент кафедри електричних машин

Офіційні опоненти доктор технічних наук, професор
Ставинський Андрій Андрійович,
Національний університет кораблебудування
ім. адм. Макарова, м. Миколаїв,
завідуючий кафедри суднових електроенергетичних
систем

кандидат технічних наук, доцент
Попович Олександр Миколайович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України, м. Київ,
старший науковий співробітник відділу
електромеханічних систем

Захист дисертації відбудеться 6 липня 2015 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, адм. корпус, ауд. 400-а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету (м. Одеса, пр. Шевченка, 1).

Автореферат розіслано _____ травня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



О.М. Бесараб

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У процесі електромеханічного перетворення енергії в обертових електричних машинах змінного струму важливу роль відіграють трьох- і двофазні обмотки. Експлуатаційні та масо-вартісні показники електричних машин у великій мірі залежать як від електромагнітних властивостей обмоток, так і від їх конструктивних особливостей.

Останнім часом, крім завдання поліпшення технічних показників самих електричних машин, намітилася тенденція розробки і виробництва двигунів і генераторів, орієнтованих на технологічні можливості підприємств-виробників. При цьому мається на увазі максимально можлива уніфікація частин і комплектуючих, що використовуються при виробництві електричних машин. Така «технологічна оптимізація» дозволяє скоротити витрати при виробництві та ремонті електричних машин. Відчутний ефект може бути досягнутий у разі розширення номенклатури виробів, наприклад при дрібносерійному випуску окремих спеціальних модифікацій електричних машин.

Для успішного розв'язання завдань проектування таких модифікацій електричних машин, в деяких випадках необхідно використовувати нетрадиційні типи обмоток, що дозволить практично не міняти технологічну оснастку виробничого обладнання. Такі обмотки можуть істотно відрізнятись від звичайних своїми електромагнітними і конструктивними властивостями, але технологічно вони близькі до серійних.

Необхідність застосування нетрадиційних обмоток ілюструється простим перерахуванням напрямів вдосконалення електричних двигунів і генераторів:

- уніфікація виробництва електричних машин;
- підвищення ресурсу електричної машини;
- розширення можливостей при ремонті електричних машин;
- симетричність споживання енергії;
- непряме енерго- та ресурсозбереження за рахунок відмови від спеціального технологічного оснащення та використання обладнання для виробництва великих серій електромашин.

Існуючі методи проектування трифазних обмоток з дробовим числом пазів на полюс і фазу q електричних машин не можуть забезпечити ефективного вирішення завдань синтезу обмоток з необхідними властивостями.

Розв'язувані таким чином завдання поліпшення використання технологічних потужностей при виробництві та ремонті електричних машин, оперативне забезпечення вимог споживача при випуску дрібних серій в умовах ринкової економіки мають велике значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Теоретичні питання дисертації, пов'язані з розробкою несиметричних обмоток зі слабким рівнем несиметрії обертового магнітного поля, відображені у звіті про науково-дослідницьку роботу «Розробка методики та структурне проектування багатofазних обмоток на базі узагальненої математичної моделі», номер державної реєстрації 0193U035066, що виконана на кафедрі електричних машин Одеського державного політехнічного університету в рамках національної енергетичної програми України,

пріоритетного напрямку науки і техніки «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології».

Структурні та математичні моделі і, синтезовані на їх основі багатофазні обмотки, знаходять своє відображення в науково-дослідних роботах кафедри електричних машин Одеського національного політехнічного університету:

– №446-51 «Розробка ресурсо- та енергозберігаючих електромеханічних і електромеханотронних перетворювачів», номер державної реєстрації 0104U002404;

– №625-51 «Розробка засобів автоматизованого синтезу високоефективних електромагнітних та електромеханотронних пристроїв на основі інноваційних технічних рішень», номер державної реєстрації 0106U013174.

– №56-51 «Розробка математичних моделей та дослідження процесів в електричних машинах і трансформаторах», номер державної реєстрації 0111U010457.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є подальший розвиток методів синтезу несиметричних багатофазних обмоток електричних машин з мінімальним рівнем несиметрії.

Задачі дослідження:

– проектування нових модифікацій несиметричних обмоток, синтез і дослідження їх властивостей;

– створення нових модифікацій двошарових рівновиткових несиметричних обмоток;

– синтез слабонесиметричних обмоток, дослідження їх властивостей і проектування на їх основі нових модифікацій двошарових нерівновиткових обмоток;

– аналіз можливості застосування розроблених обмоток при ремонті електричних машин;

– порівняльний аналіз властивостей розроблених і серійних обмоток, а також експериментальні дослідження електричних машин з розробленими обмотками.

Об'єктом дослідження є багатофазні статорні обмотки обертових електричних машин змінного струму.

Предметом дослідження є синтез спеціальних несиметричних багатофазних обмоток електричних машин.

Методи досліджень. Вирішення поставлених у роботі завдань забезпечено коректним використанням класичної теорії електричних машин, застосуванням методів синтезу багатофазних обмоток, гармонійного аналізу і методу симетричних складових.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації особисто здобувачем отримані наступні наукові результати, які виносяться на захист:

– вдосконалено методику аналізу властивостей несиметричних обмоток, що дозволила розробити більш адекватну математичну модель критерію симетричності;

– вперше запропоновано комплексний метод симетрування обмоток, заснований на направленому синтезі їх структури та змінні параметрів окремих котушок, що мінімізує несиметрію магнітного поля та ЕРС обмоток в умовах технологічних обмежень;

– вперше синтезовано математичну модель несиметричної трифазної рівновиткової багатополюсної обмотки, з мінімальним рівнем несиметрії за робочою гармонікою;

– вперше синтезовано математичну модель нетрадиційної трифазної нерівновиткової багатополюсної обмотки, що характеризується повною симетрією за робочою гармонікою;

– отримала подальший розвиток методика аналізу вирівнювальних ЕРС в паралельних колах обмоток, що може бути застосована для несиметричних рівновиткових обмоток.

Наукове значення отриманих результатів полягає в подальшому розвитку методики синтезу багатозазних обмоток, за рахунок чого спроектовані оригінальні модифікації несиметричних трифазних обмоток з мінімальним рівнем несиметрії.

Практичне значення виконаної роботи полягає в розробці оригінальних модифікацій несиметричних трифазних статорних обмоток електричних машин, що дозволяють в ряді випадків зберегти їх споживчі властивості і конкурентоспроможність, що особливо важливо при ремонті електричних машин.

Персональний внесок здобувача. Всі результати і висновки, що становлять основну частину дисертації, належать дисертанту. Робота [1] опублікована здобувачем персонально – дослідження можливості застосування несиметричних обмоток в асинхронних двигунах. У друкованих працях, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належать: [2] – участь у розробці алгоритму гармонійного аналізу багатозазних несиметричних обмоток; [3] – методика симетрування несиметричних обмоток електричних машин з малим рівнем несиметрії; [4] – програмна реалізація автоматизованого синтезу несиметричних багатозазних обмоток; [5, 6] – методика визначення різницевого електрорухомих сил довільних обмоток.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на Науково-технічних семінарах Національної академії наук України «Електромагнітні процеси та проектний синтез електричних машин та трансформаторів» (Одеса, 2012, 2013, 2014 р.р.), Науково-прикладному семінарі Одеського обласного відділення Всеукраїнської асоціації інженерів-електриків (м. Одеса, 2012 р.), Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA'2012» (м. Харків, 2012 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю (Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв, 2013 р.), Міжнародній україно-японській конференції з питань науково-виробничого співробітництва, (Україна, м. Одеса, 2013 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових і спеціалізованих виданнях і збірниках наукових праць, 4 доповіді в матеріалах конференцій, 1 теза доповідей. Без співавторів опублікована 1 наукова робота.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота загальним обсягом 168 сторінок складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 71 найменування, 6 додатків, містить 107 сторінок основного тексту, 82 рисунків, 44 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність. Наведено структуру роботи та основні положення, які виносяться на захист.

У першому розділі виконано огляд літератури, присвяченої проблемі проектування та використання дво- і трифазних обмоток в електричних машинах. Встановлено, що більшість методів синтезу нетрадиційних несиметричних обмоток направлено на проектування обмоток для машин спеціального, а не загальнопромислового призначення. Це дозволило сформулювати мету дослідження – створення нових модифікацій несиметричних багатофазних обмоток обертових електричних машин з покращеними властивостями. В основу дослідження покладено методику синтезу обмоток, що ґрунтується на методі симетричних складових.

Другий розділ присвячений дослідженню та розробці методики гармонічного аналізу несиметричних обмоток.

Відомо, що виходячи з умови кратності числа фаз m знаменника дробності d , виконати обмотку двигуна симетричною неможливо. Подібні несиметричні обмотки не знайшли застосування в серійному виробництві електричних машин через різке погіршення таких технічних показників як номінальна потужність, коефіцієнт корисної дії і значні перегріву обмоток. При використанні таких несиметричних обмоток різко погіршується гармонічний склад магніторушійних сил (МРС) обмотки, виникають, як прямо, так і зворотнообертові гармоніки, створюючи в робочому повітряному зазорі еліптичні магнітні поля. В результаті в кривій моменту двигуна виникають провали, зростає несинусоїдальність електрорухомих сил (ЕРС) на затискачах генераторів, знижуються енергетичні та вібро-акустичні показники, що призводить до зменшення потужності в порівнянні з серійними машинами.

У деяких видах електричних машин спеціального призначення знаходять застосування несиметричні багатофазні обмотки. При цьому проектуються вони таким чином, щоб мінімізувати або взагалі виключити несиметрію, хоча б відносно робочої гармоніки. Розв'язується зазначена задача одним із способів симетрування, наприклад, перетворенням числового ряду обмотки за допомогою циклічних перестановок його повторюваної частини, в тому числі і з використанням неравновиткових котушок.

Як показала практика, система струмів в таких симетрованих обмотках характеризується настільки незначною несиметрією, що цим можна знехтувати. Гармонічний аналіз, як ЕРС, так і МРС таких обмоток може виконуватися за допомогою векторних діаграм. Це справедливо і щодо різко несиметричних обмоток, якщо взяти припущення, що амплітуди струмів у фазах рівні між собою.

Результатів гармонічного аналізу, що включають лише значення обмоточних коефіцієнтів k_{Wvj} кожної j -ої фази за гармоніками довільних v -их порядків, виявляється недостатньо для розрахунку електричних машин з подібними обмотками. У зв'язку з цим удосконалено методику гармонічного аналізу таких обмоток із застосуванням методу симетричних складових (МСС). Розроблено універсальний алгоритм гармонічного аналізу довільних багатофазних обмоток з використанням поняття симетричних складових обмоточного коефіцієнта. Досліджено особливості гармонічного

аналізу багатофазних несиметричних обмоток стосовно до двигунів змінного струму та наведено приклади його використання.

При використанні несиметричних обмоток частина гармонічних складових МРС, в числі яких може виявитися і робоча гармоніка, створюють вже не одне, а два зустрічно обертових магнітних поля різної інтенсивності, що істотно ускладнює гармонійний спектр результуючого поля. В обох випадках метою гармонійного аналізу є отримання такого обсягу інформації, який забезпечує в наступних електромагнітних розрахунках конкретних електричних машин урахування проявів корисних і шкідливих ефектів.

У разі застосування несиметричних обмоток сукупність коефіцієнтів k_{Wvj} кожної з m фаз в їх традиційному розумінні не дозволяють визначити навіть співвідношення амплітуд основного і зворотнообертового полів, створюваних цими ЕРС. Отримати подібну інформацію можна, лише розклавши ЕРС фаз на симетричні складові. Для цього спочатку необхідно визначити модулі \dot{E}_{vj}^* та аргументи φ_{vj} відповідних векторів на полярній векторній діаграмі, а потім розрахувати симетричні складові ЕРС прямої \dot{E}_{dv}^* , зворотної \dot{E}_{rv}^* та нульової \dot{E}_{0v}^* послідовностей.

Однак, як і при традиційному гармонічному аналізі, де спочатку також визначаються результуючі вектори ЕРС, отриману інформацію слід перетворити до виду, зручного для подальших розрахунків. Це призводить до необхідності введення поняття симетричних складових обмотувальних коефіцієнтів і, в першу чергу, складових прямої k_{Ddv} , зворотної k_{Drv} та нульової k_{D0v} послідовностей коефіцієнтів розподілу.

У загальному випадку, коли m -фазна обмотка може бути виконана нерівновитковою, тобто довільна k -та активна котушкова сторона (АКС) містить w_k^* провідників, симетричні складові коефіцієнта розподілу прямої k_{Ddv} , зворотної k_{Drv} та нульової k_{D0v} послідовностей обмотки, виконаної в числі пазів Z можна визначити за виразом

$$k_{D(d,r,0)v} = \frac{m \cdot |\dot{E}_{(d,r,0)v}|}{\sum_{i=1}^Z |w_k^*|}; \quad w_k^* = \frac{w_k}{w_{\max}}$$

де w_{\max} – максимальна кількість провідників в пази.

Розглянутий підхід дозволяє розробити універсальний алгоритм гармонічного аналізу довільних багатофазних обмоток. Блок-схема пропонованого алгоритму і програми представлено на рис.1.

До складу блоку вхідних даних (1) включено (рис.1):

- кількість фаз – m ;
- кількість пар полюсів – p ;
- крок обмотки по пазам u ;
- кількість n_j АКС у кожній з фаз;
- m масивів $\{N_j\}$ номерів пазів, в яких розташовуються АКС кожної з фаз.

Відповідні $\{N_j\}$ масиви $\{w_j\}$ відносних чисел витків попередньо задано за умови $w_j=1$. Число пазів Z визначається за виразом $Z = \sum_{j=1}^m n_j$.

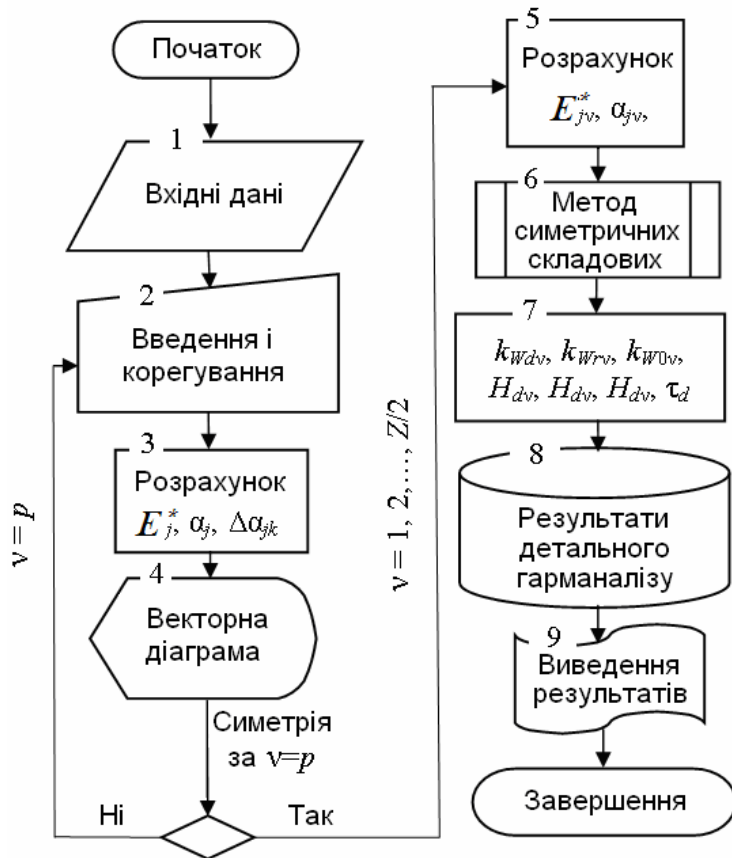


Рисунок 1 – Блок-схема програми

Введення вхідних даних (блок 2) виконується вручну заміщенням початкових значень в осередках спливаючій панелі.

Блок 3 здійснює розрахунок відносних величин результуючих ЕРС \dot{E}_j^* кожної з фаз, відповідних кутових координат α_j і кутових зсувів $\Delta\alpha_{jk}$ векторів \dot{E}_j^* один щодо одного.

Блок 4 виводить ці дані і візуалізує векторну діаграму ЕРС, що дозволяє на підставі аналізу поточного рівня несиметрії виконати симетрування обмотки шляхом коригування чисел витків котушок (блок 2).

Після завершення симетрування включається розрахунковий модуль (блоки 5-9), використовуючий алгоритм гармонійного аналізу. Спочатку блоком 5 здійснюється розрахунок амплітуд E_{jv}

і кутових координат α_{jv} кожної з фаз. Потім в блоці 6 ці дані обробляються із застосуванням методу симетричних складових.

В результаті визначаються симетричні складові обмоточного коефіцієнта k_{Wv} : k_{Wdv} , k_{Wrv} і k_{W0v} . Розрахунки виконуються в блоці 7 при зміні порядків v гармонік в діапазоні від 1 до $Z/2$.

Результати запам'ятовуються в блоці 8 і за необхідності виводяться на друк (блок 9).

Матеріал третього розділу присвячений розв'язанню задачі зниження несиметрії обмоток до припустимого рівня. На практиці зустрічаються ситуації, коли при виконанні ремонту електричної машини можливе використання тільки несиметричних обмоток.

Симетрування обмоток складається з двох етапів. Перший етап симетрування полягає у виконанні циклічних перестановок в кожній із наступних частинах, що повторюються, числового ряду обмотки і забезпечує рівність чисел АКС у кожній з фаз обмотки. В силу своєї відносної простоти цей етап можна виконувати вручну ще на стадії підготовки вихідних даних.

Другий етап симетрування полягає у використанні методу перебору варіантів співвідношення чисел витків в котушках. Це зумовлює необхідність використання інтерактивної технології. Такий програмний модуль повинен включати в себе, як мінімум, два пов'язані між собою блоки: блок оцінки рівня несиметрії і блок оперативного корегування вхідних даних. У першому з них, крім чисельної інформації

про величини амплітуд і кутових координат результуючих ЕРС кожної з фаз, необхідна візуалізація повної векторної діаграми.

Після вдалого завершення інтерактивного симетрування стає можливим коректне використання методики гармонійного аналізу, заснованого на методі симетричних складових, тобто включення розрахункового модуля.

Візуалізація процесу симетрування обмоток пов'язана з багаторазовими графічними побудовами векторних діаграм, а виконання гармонійного аналізу – із великим обсягом розрахунків. Тому в ході роботи над дисертацією було створено спеціальне програмне забезпечення **Symmetry-23**, що автоматизує ці процеси.

Роботу цієї програми розглянемо на практичному прикладі симетрування і гармонійного аналізу шестиполусної ($2p = 6$) обмотки, яку необхідно виконати в 24 пазах статора, тобто при $q = 4/3$.

Формальне визначення числового ряду (ЧР) для такої обмотки призводить до такого результату – {**2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1**}.

Однак, при цьому число АКС в кожній з фаз виявляється неоднаковим (12 – в першій фазі і по 6 – в інших), що викличе неприпустимо високий рівень несиметрії. Тому виконаємо симетрування ЧР, для чого використовуємо циклічні перестановки в повторюваній частини вихідного. Тоді отримаємо

2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2.

В результаті кожна з фаз тепер містить по 8 АКС. Симетрованому ЧР відповідає розподіл АКС, що наведений у табл.1.

Таблиця 1 – Розподіл активних котушкових сторін

№ пазу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Фазні зони	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y	A	z	B	x	C	y

Вхідні дані трьох масивів $\{N_j\}$ номерів пазів:

$$\{N_1\} = 1, 2, -5, 9, -13, -14, 17, -2;$$

$$\{N_2\} = 4, -8, 11, 12, -16, 20, -23, -24;$$

$$\{N_3\} = -3, 6, 7, -10, 15, -18, -19, 22.$$

Занесення вхідних даних ілюструє панель програми, що наведена на рис.2.

Числа АКС n_j в кожній з фаз, масиви номерів пазів $\{N_j\}$ і відносних чисел витків $\{w_j^*\}$ можуть бути підготовлені заздалегідь в табличному редакторі і введені натисканням кнопки «Завантажити дані». Осередки масивів $\{w_j^*\}$ відносних чисел витків в цьому випадку автоматично заповнюються значеннями, рівними 1.

У нижній частині панелі вибираємо режим «Налагодження» і натисканням кнопки «Вивести результат» активуємо появу вікна налагодження (рис.3) із векторною діаграмою і координатами результуючих векторів ЕРС кожної з фаз. На рис.3 результуючі вектори ЕРС навмисно відображаються підсистемою з дуже великою різницею амплітуд, хоча реально вона складає всього 2,1% (E_C^* менше ніж E_A^* і E_B^*). Це зроблено для того, аби привернути увагу проектувальника на наявний дисбаланс. Чисельні значення амплітуд і фаз результуючих векторів ЕРС наводяться на тій же панелі під векторною діаграмою. При різниці, що складає менше 1% вектори ЕРС відображаються з однаковою амплітудою.

IEEE

Введите исходные данные:

Число фаз обмотки 2 фазы 3 фазы

Число пар полюсов

Шаг обмотки по пазам

Установить проверочные значения: Да Нет

АКС для 1-ой фазы	АКС для 2-ой фазы	АКС для 3-ей фазы
8	8	8

для 1-ой фазы: Z0=24

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
1	2	9	-5	-13	-14	-21	17
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

для 2-ой фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
4	11	12	-8	-16	-23	-24	20
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

для 3-ей фазы:

1n/w	2n/w	3n/w	4n/w	5n/w	6n/w	7n/w	8n/w
6	7	-3	-10	-18	-19	15	22
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Выбор режима: Отладка Расчет

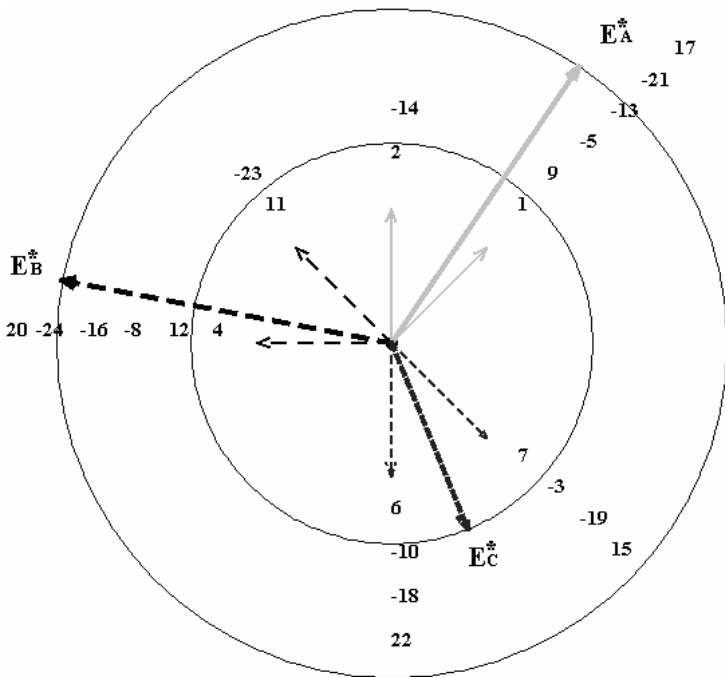
Рисунок 2 – Панель вводу даних

Виконаємо аналіз отриманих результатів. З діаграми і даних, що наведені у таблиці на рис.3 випливає, що результуючі вектори E_A^* і E_B^* рівні за амплітудою і розташовуються симетрично відносно вектора E_C^* , що має меншу амплітуду. Крім того, табличні дані свідчать про те, що $\Delta\varphi_{13} = \Delta\varphi_{23} = 123,3^\circ$, а $\Delta\varphi_{12} = 113,4^\circ$, тобто відрізняються від необхідних для виконання кутовий симетрії 120° .

Для усунення вказаної кутової неузгодженості необхідно вектори E_A^* і E_B^* повернути на $3,3^\circ$ в напрямку вектора E_C^* . Виконати такий поворот можна, зменшивши величину одиничних векторів з номерами 2, 14, 11 і 23. Реалізація такого перетворення здійснюється шляхом зменшення відносного числа витків $w^* = w_k / w_{\max}$ в АКС із відповідними номерами.

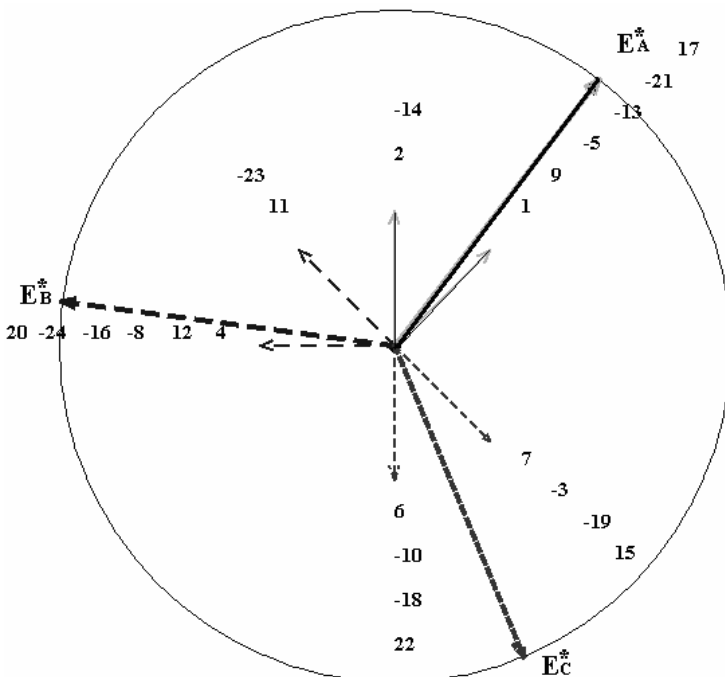
Необхідні значення відносних чисел витків зазначених АКС визначаються методом послідовних наближень в інтерактивному режимі аж до досягнення необхідної точності. Після декількох циклів послідовних наближень при $w^* = 0,642$ отримуємо практично однакові кути $\Delta\varphi_{ij} \approx 120^\circ$ між результуючими векторами E_C , значення яких наведені в таблиці на рис.2.

З таблиці на рис.3 видно, що амплітуда E_C третьої симетруючої фази становить 7,391 і перевищує величини E_C інших двох фаз на 0,422.



E1	E2	E3	a1	a2	a3	Δa12	Δa23	Δa31
7,548	7,548	7,391	55,806	169,208	-67,494	-113,4	236,7	-123,3

Рисунок 3 – Векторна діаграма побудована підсистемою в режимі налагодження



E1	E2	E3	a1	a2	a3	Δa12	Δa23	Δa31
6,967	6,967	6,97	52,495	172,518	-67,494	-120,02	240,01	-119,99

Рисунок 4 – Вигляд вікна програми після завершення симетрування

Перейдемо до амплітудного симетрування, яке, очевидно, має полягати у зменшенні ЕРС E_C^* . Таке зменшення можна виконати різними способами, але при дотриманні однієї важливої умови – збереження кутової симетрії.

Найпростіше забезпечити цю умову при одночасному зменшенні величин всіх одиничних векторів ЕРС зазначеної фази. Ступінь такого зменшення визначається як відношення амплітуд ЕРС:

$$w^* = E_{A(B)}^* / E_C^* = 6,97 / 7,391 = 0,943.$$

Після занесення цих значень отримуємо вікно програми, наведене на рис.4, з якого видно, що отримані результати свідчать про досягнення практично повної симетрії відносно робочої гармоніки і завершення процесу симетрування обмотки.

Далі, за допомогою активації кнопки «Розрахунок» програма виконує детальний гармонійний аналіз відсиметрованої обмотки, результати якого можуть бути переглянуті та проаналізовані у відповідному вікні програми або збережені на диску у вигляді файлу у форматі *.xls, після чого можуть бути роздруковані. Результати повного гармонічного аналізу початкової та відсиметрованої обмоток наведені нижче в табл.2 і 3 відповідно. У вказаних таблицях жирним шрифтом виділено дві строки, що відбивають найважливіші показники обмоток, що порівнюються між собою. По перше, це складові обмоточних коефіцієнтів k_{Y3} , k_{D03} , k_{Dd3} , k_{Dr3} , k_{W03} , k_{Wd3} , k_{Wr3} і їх відносних амплітуд H_{03} , H_{d3} , H_{r3} за робочою гармонікою $\nu = p = 3$.

Зіставлення цих рядків наочно демонструє перевагу відсиметрованої обмотки порівняно з початковою. Дійсно, величина обмотувального коефіцієнта k_{Wd3} збільшилася з 0,936 до 0,945, а симетричні складові k_{W03} і k_{Wr3} відсутні, що гарантує ство-

рення практично кругового обертового поля в зазорі електричної машини і краще використання її активної частини. Крім розглянутого вище варіанту обмотки ($2p = 6, z = 24$), в якості прикладу в роботі також детально були розглянуті ще кілька варіантів симетрування трифазних несиметричних обмоток із $2p = 6$, виконаних в 30, 42 і в 48 пазах.

Таблиця 2 – Результати гармонічного аналізу початкової обмотки

ν	$k_{Y\nu}$	$k_{D0\nu}$	k_{Ddv}	$k_{Dr\nu}$	$k_{W0\nu}$	$H_{0\nu}$	k_{Wdv}	H_{dv}	$k_{Wr\nu}$	$H_{r\nu}$
1	0,5	0,128	0,102	0,165	0,064	0,204	0,051	0,163	0,083	0,265
3	1,0	0,034	0,936	0,025	0,037	0,040	0,936	1,000	0,025	0,027
5	0,5	0,308	0,132	0,022	0,154	0,099	0,066	0,042	0,011	0,007
7	0,5	0,128	0,165	0,102	0,064	0,029	0,083	0,038	0,051	0,023
9	1,0	0,526	0,104	0,039	0,526	0,187	0,104	0,037	0,039	0,014
11	0,5	0,308	0,022	0,132	0,154	0,045	0,011	0,003	0,066	0,019
$S_D=0,10986$		$S_R=1,06067$		$S_0=0,07276$		$\tau_d=0.24330$		$\tau_{da}=0,17054$		

Таблиця 3 – Результати гармонічного аналізу відсиметрованої обмотки

ν	$k_{Y\nu}$	$k_{D0\nu}$	$k_{Dr\nu}$	k_{Ddv}	$k_{W0\nu}$	$H_{0\nu}$	k_{Wdv}	H_{dv}	$k_{Wr\nu}$	$H_{r\nu}$
1	0,5	0,110	0,136	0,050	0,068	0,216	0,025	0,079	0,055	0,174
3	1,0	0,000	0,000	0,945	0,000	0,000	0,945	1,000	0,000	0,000
5	0,5	0,265	0,065	0,142	0,033	0,021	0,071	0,045	0,132	0,084
7	0,5	0,110	0,050	0,136	0,025	0,011	0,068	0,031	0,055	0,025
9	1,0	0,588	0,011	0,185	0,011	0,004	0,185	0,065	0,588	0,207
11	0,5	0,265	0,142	0,065	0,071	0,021	0,033	0,009	0,132	0,038
$S_D=0,103849$		$S_R=1,04444$		$S_0=0,048106$		$\tau_d=0,19640$		$\tau_{da}=0,1482$		

Зіставлення цих рядків наочно демонструє перевагу відсиметрованої обмотки порівняно з початковою. Дійсно, величина обмотувального коефіцієнта k_{wd3} збільшилася з 0,936 до 0,945, а симетричні складові k_{w03} і k_{wr3} відсутні, що гарантує створення практично кругового обертового поля в зазорі електричної машини і краще використання її активної частини. Крім розглянутого вище варіанту обмотки ($2p = 6, z = 24$), в якості прикладу в роботі також детально були розглянуті ще кілька варіантів симетрування трифазних несиметричних обмоток із $2p = 6$, виконаних в 30, 42 і в 48 пазах.

Останній приклад ($2p = 6, z = 48, q = 8/3$), що часто зустрічається в практиці модернізації електродвигунів в процесі ремонту, розглянуто нижче. Ця обмотка несиметрична і має як кутову, так і амплітудну несиметрію. Процес симетрування виконується аналогічно попередньому випадку. Після виконання симетрування числовий ряд приймає вигляд: 3, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 3 і маємо наступний розподіл АКС по пазах і фазам:

Фаза А: 1, 2, 3, -9, -10, -11, 17, 18, -25, -26, -27, 33, 34, 35, -41, -42;

Фаза В: 7, 8, -14, -15, -16, 22, 23, 24, -31, -32, 38, 39, 40, -46, -47, -48;

Фаза С: -4, -5, -6, 12, 13, -19, -20, -21, 28, 29, 30, -36, -37, 43, 44, 45.

Графічна інтерпретація такого розподілу АКС представлена на рис.5,а і на рис.5,б зображена схема-розгортка обмотки $z = 48$, $2p = 6$, $y = 8$. Векторна діаграма результуючих амплітуд при рівних кількостях витків в котушках, побудована підсистемою зображена на рис.6. Векторну діаграму ЕРС даної обмотки з реальними амплітудами векторів (різниця 1,1%) представлено на рис.7.

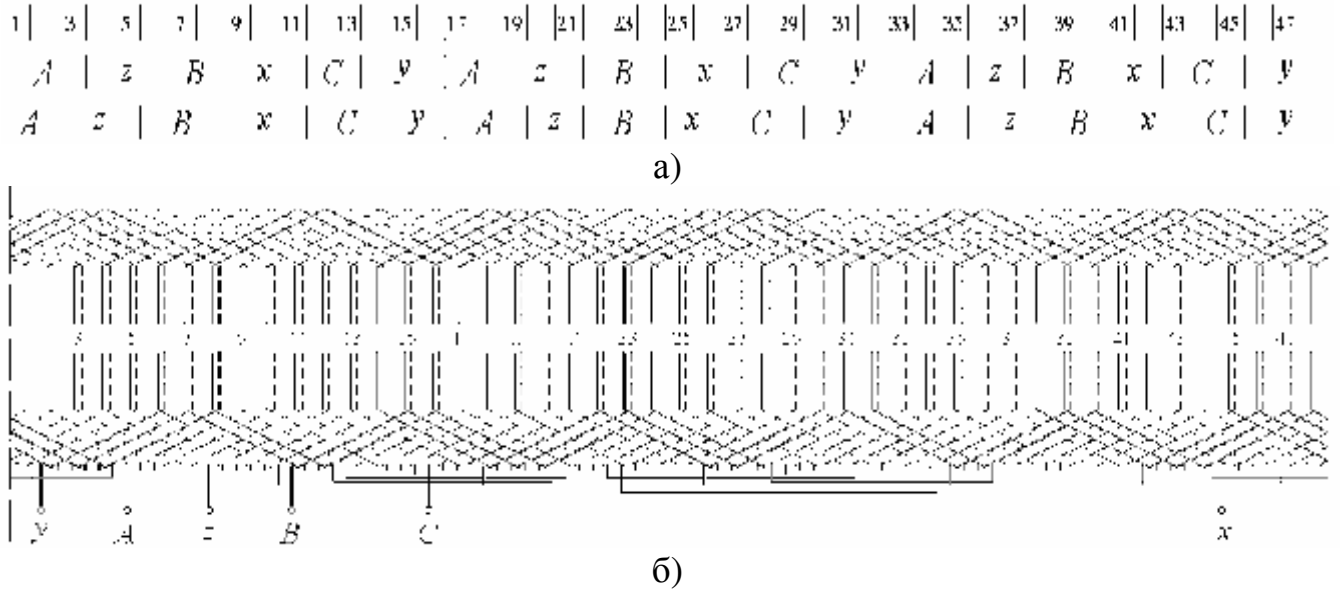


Рисунок 5 – Розподіл АКС обмотки $z = 48$, $2p = 6$, $y = 8$ по фазним зонам (а) та її схема-розгортка (б)

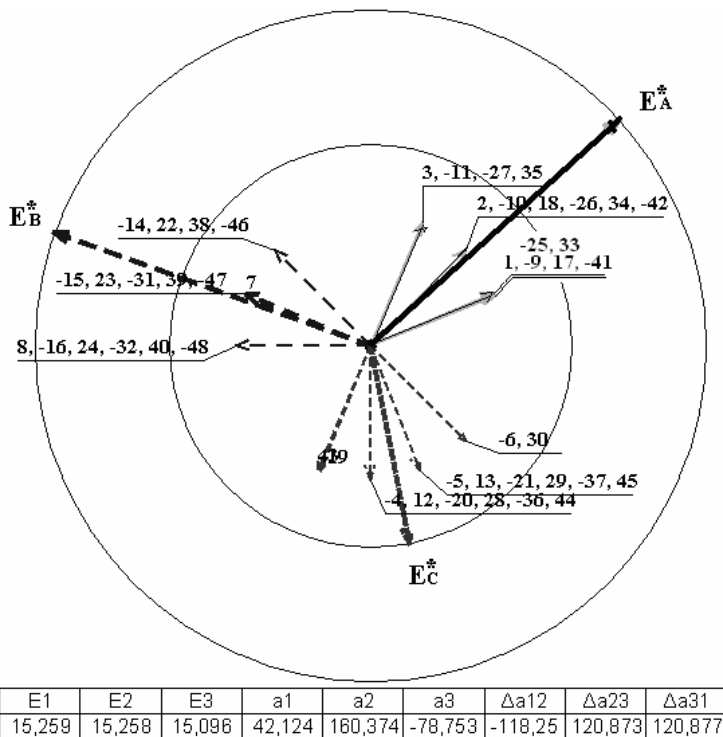


Рисунок 6 – Векторна діаграма після завершення симетрування обмотки із $z = 48$, $2p = 6$ без зміни чисел витків котушок

Після введення вхідних даних в програму отримуємо кутові координати і амплітуди векторів фаз. Результати розрахунку яких для робочої гармоніки представлені в табл.5.

Відносні зсуви кутових координат відповідних векторів фаз тепер складають: $\Delta\varphi_{23} = \Delta\varphi_{31} = 120,87^\circ$; $\Delta\varphi_{12} = 118,25^\circ$. Таким чином кутову несиметрію після симетрування числового ряду практично повністю усунено. Амплітуди результуючих векторів ЕРС набули значень: $E_A^* = E_B^* = 15,258$; $E_C^* = 15,0953$.

Відносна різниця між амплітудами ЕРС фаз $A(B)$ і C за робочою гармонікою складає 1,07%.

Таким чином синтезована обмотка є практично симетричною за робочою гармонікою. В даному випадку немає потреби застосовувати нерівновиткові котушки, тобто

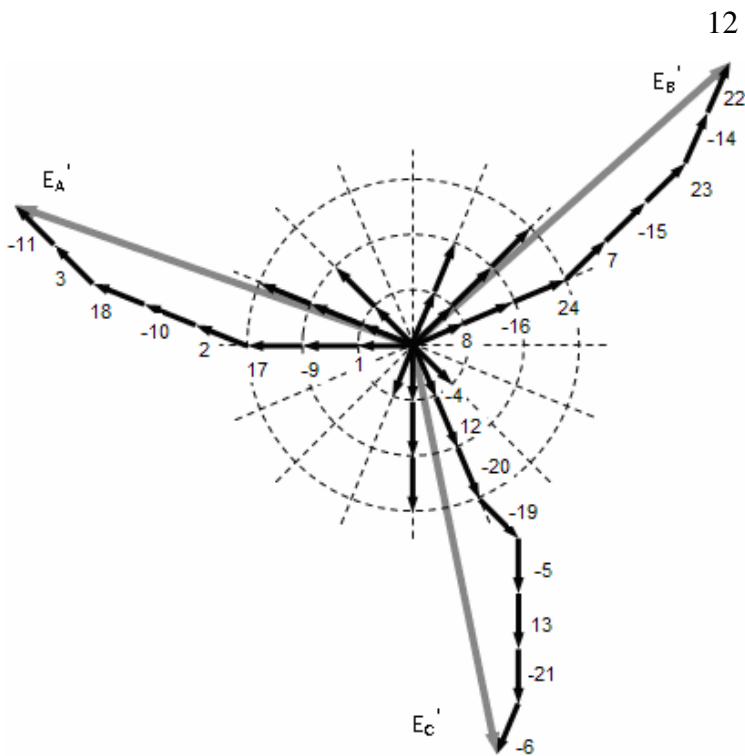


Рисунок 7 – Векторна діаграма з реальними амплітудами векторів ЕРС обмотки із $z = 48$, $2p = 6$ після завершення симетрування без зміни чисел витків

трудомісткість виготовлення і укладання даної обмотки на порядок нижче розглянутої в попередньому випадку ($z = 24$).

Після введення вхідних даних в програму отримуємо кутові координати і амплітуди векторів фаз. Результати розрахунку яких для робочої гармоніки представлені в табл.5.

Відносні зсуви кутових координат відповідних векторів фаз тепер складають: $\Delta\varphi_{23} = \Delta\varphi_{31} = 120,87^\circ$; $\Delta\varphi_{12} = 118,25^\circ$. Таким чином кутову несиметрію після симетрування числового ряду практично повністю усунуто. Амплітуди результуючих векторів ЕРС набули значень: $E_A^* = E_B^* = 15,258$; $E_C^* = 15,0953$. Відносна різниця між амплітудами ЕРС фаз $A(B)$ і C за робочою гармонікою складає 1,07%.

Таким чином синтезована обмотка є практично симетричною за робочою гармонікою. В даному випадку немає потреби застосовувати нерівновиткові котушки, тобто трудомісткість виготовлення і укладання даної обмотки на порядок нижче розглянутої в попередньому випадку ($z = 24$).

Подальшим розвитком цієї обмотки є її повністю симетричний варіант. Цього можна досягти застосуванням другого методу симетрування, змінюючи числа витків котушок. На рис.8 представлені масиви **mm** (розподіл АКС по пазах) і **ww** (відносні числа витків у відповідних пазах).

	«А»	«В»	«С»
1	1	7	-4
2	2	8	-5
3	3	-14	-6
4	-9	-15	12
5	-10	-16	13
6	-11	22	-19
7	17	23	-20
8	18	24	-21
9	-25	-31	28
10	-26	-32	29
11	-27	38	30
12	33	39	-36
13	34	40	-37
14	35	-46	43
15	-41	-47	44
16	-42	-48	45

	w_A^*	w_B^*	w_C^*
1	1	1	0,9793
2	1	1	0,9793
3	0,8682	0,8682	0,9793
4	1	1	0,9793
5	1	1	0,9793
6	0,8682	0,8682	0,9793
7	1	1	0,9793
8	1	1	0,9793
9	1	1	0,9793
10	1	1	0,9793
11	0,8682	0,8682	0,9793
12	1	1	0,9793
13	1	1	0,9793
14	0,8682	0,8682	0,9793
15	1	1	0,9793
16	1	1	0,9793

Рисунок 8 – Фрагмент введення даних при амплітудному симетруванні

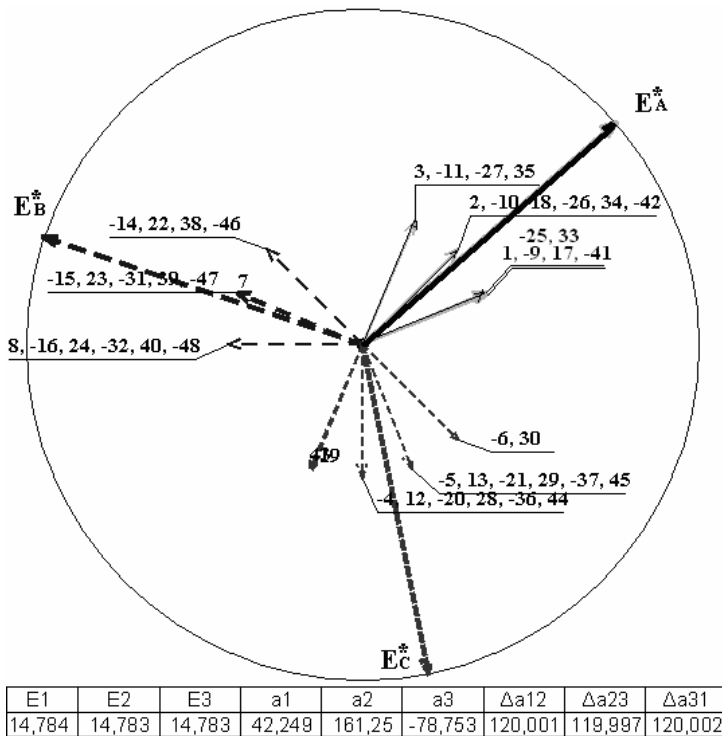


Рисунок 9 – Векторна діаграма після завершення симетрування обмотки із $z = 48$, $2p = 6$, зі зміною числа витків

Результуюча векторна діаграма після завершення симетрування разом із амплітудно-фазовими показниками ЕРС обмотки $2p = 6$, $z = 48$ наведені на рис.9. Як видно з результатів повного гармонічного аналізу (табл.5) синтезована обмотка має переважний обмоточний коефіцієнт за робочою гармонікою $k_{wd} = 0,9514$ та незначне потокозчеплення з полями гармонік непарних порядків. Повністю відсутні парні гармоніки. Робоча гармоніка практично повністю симетрична, за іншими гармоніками симетрія відсутня, але це, зважаючи на амплітуди цих гармонік, не має великого впливу на роботу двигуна з такою обмоткою.

Таким чином, цю обмотку можна рекомендувати для промислового виробництва дрібних серій шести-

полюсних машин з використанням штампів пакета статора з $z = 48$ від восьмиполюсних двигунів.

Таке рішення підвищить рівень уніфікації електродвигунів при розширенні номенклатури виробів, що позитивно позначиться на їх вартості. Тому таку обмотку переважніше використовувати при ремонті двигунів у разі потреби зміни числа полюсів.

Таблиця 4 – Повний гармонічний аналіз обмотки із ЧР = 3, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 3 ($z = 48$, $2p = 6$) із рівновитковими котушками

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0,0549	0,0409	0,0134	0,0735	0,029	0,0423
3	0,0118	0,9502	0,0051	0,0124	1	0,0053
5	0,0369	0,0416	0,0231	0,0233	0,0263	0,0146
7	0,0789	0,0081	0,0313	0,0356	0,0037	0,0141
9	0,0921	0,0129	0,0205	0,0134	0,0045	0,0072
11	0,0832	0,0184	0,0231	0,0239	0,0053	0,0066
13	0,0055	0,0346	0,0374	0,0013	0,0084	0,0091
15	0,0360	0,0398	0,1677	0,0076	0,0084	0,0353
17	0,0268	0,0275	0,0409	0,0050	0,0051	0,0076

Таблиця 5 – Повний гармонічний аналіз обмотки із ЧР = 3, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 3
($z = 48, 2p = 6$) після зміни числа витків окремих котушок

ν	k_{w0}	k_{wd}	k_{wr}	$H_{\nu 0}$	$H_{\nu d}$	$H_{\nu r}$
1	0,0523	0,0397	0,0088	0,0649	0,0253	0,0278
3	0	0,9514	0	0	1	0
5	0,0351	0,0393	0,0186	0,0221	0,0248	0,0117
7	0,0751	0,0118	0,0325	0,0336	0,0053	0,1466
9	0,0821	0,0344	0,0037	0,2164	0,0121	0,0134
11	0,0791	0,0212	0,0255	0,0226	0,0061	0,0073
13	0,0052	0,0307	0,0337	0,0012	0,0075	0,0082
15	0,0605	0,0471	0,1863	0,0127	0,0114	0,0452
17	0,0255	0,0230	0,0381	0,0047	0,0056	0,0093

Матеріал четвертого розділу присвячений розгляду можливості визначення різницевої ЕРС при будь-яких варіантах освіти паралельних гілок довільних багатофазних обмоток і можливість виникнення різницевої ЕРС при традиційних умовах з урахуванням особливостей їх прояву в машинах змінного струму з урахуванням додаткових гармонік магнітного поля.

Зі зростанням величини струму в обмотках виникає необхідність вдаватися до паралельного з'єднання котушкових груп. Однією з причиною зростання струму обмотки може бути необхідність виконання двигуна на низьку (безпечну) напругу, наприклад 42 В або 36 В. У цьому випадку будь-яка нерівність результуючих ЕРС паралельних кіл, як за величиною, так і за фазою, є небезпечним через можливість виникнення вирівнювальних струмів.

Відомо, що в обмотках асинхронних двигунів серійного виробництва необхідно дотримуватися умови симетрії, що пов'язує числа полюсів $2p$ і паралельних кіл a , співвідношенням: $2p/a =$ ціле число. У машинах спеціального призначення, а також в деяких випадках модернізації в процесі ремонту, доводиться йти на порушення даної умови. У цих ситуаціях може виникнути небаланс ЕРС паралельних кіл і вирівнювальні струми, що призводять до додаткових втрат, появи шумів і вібрації. Досить часто подібний небаланс виникає в процесі ремонту електричних машин.

Для усунення вирівнювальних струмів, ЕРС паралельних кіл обмотки повинні бути однакові як за амплітудою, так за фазою. Ця умова особливо актуально для несиметричних обмоток. Для цього паралельні кола мають складатися з одного і того ж числа котушок, еквівалентно розподілених по розточці статора машини. В ідеальному випадку лобові частини всіх котушкових груп теж повинні бути однаковими, оскільки у разі невиконання цієї умови вони володітимуть різними повними опорами. У випадку двошарових і одно-двошарових обмоток однаковим повинен бути і розподіл активних сторін котушок кожного з паралельних кіл по шарах.

Однак навіть у самому ідеальному випадку, при повній ідентичності всіх паралельних кіл, можливе виникнення зрівняльних струмів. Так, наприклад, поле джерела магнітного поля може бути не однаковим на різних полюсних розподілах.

Оскільки в обмотках деяких машинах спеціального призначення уникнути небалансу ЕРС паралельних гілок не вдається, то необхідно визначати як величини різницьових ЕРС, так і їх фази.

П'ятий розділ присвячений експериментальним дослідженням запропонованих обмоток. Для практичної реалізації був обраний двигун АІР112МА8 з числом пазів $z = 48$. У даній машині була замінена обмотка з $2p = 8$ на $2p = 6$. Дана обмотка була розглянута вище. Її перевага полягає в можливості симетрування із використанням рівновиткових котушок. Двигун був виготовлений в Китаї і поставлений в Україну фірмою «Магнум».

Випробування експериментального зразка були проведені в лабораторії «Відділення науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту вибухозахищеного та рудникового електрообладнання» (м Нова Каховка).

У табл.6 наведено порівняння розрахункових та експериментальних показників двигуна з запропонованої несиметричною обмоткою з $2p = 6$, виготовленого на базі геометрії машини АІР112МА8 з числом пазів $z = 48$. Новому двигуну присвоєно позначення АІР112МА6Н (несиметричний). У тій же таблиці, для порівняння, наведені довідкові параметри серійно випускається двигуна-аналога АІР112МА6 з традиційною геометрією і обмоткою ($z = 54, q = 3$). На рис.10 та 11 наведено експериментальні та розрахункові робочі характеристики двигуна АІР112МА6Н.

Таблиця 6 – Порівняння розрахункових показників серійного двигуна та двигуна із новою несиметричною обмоткою

Двигун	z_1	q	$P_{2н}$, кВт	$I_{1ф}$, А	η , %	$\cos\phi$, в.о.	$n_{н}$, об/хв	k_M , в.о.	k_{II} , в.о.
АІР112МА6Н (розр.)	48	$2 \frac{2}{3}$	3,0	7,95	80,5	0,71	930	3,33	2,9
АІР112МА6Н (експ.)	48	$2 \frac{2}{3}$	3,0	8,11	78,6	0,71	947	3,5	3,1
АІР112МА6 (серійн.)	54	3	3,0	7,25	81,0	0,76	950	2,2	2
Різниця (серійн.- розр.)	-	-	-	+9,7%	-0,6%	-7%	-0,3%	+59%	+55%

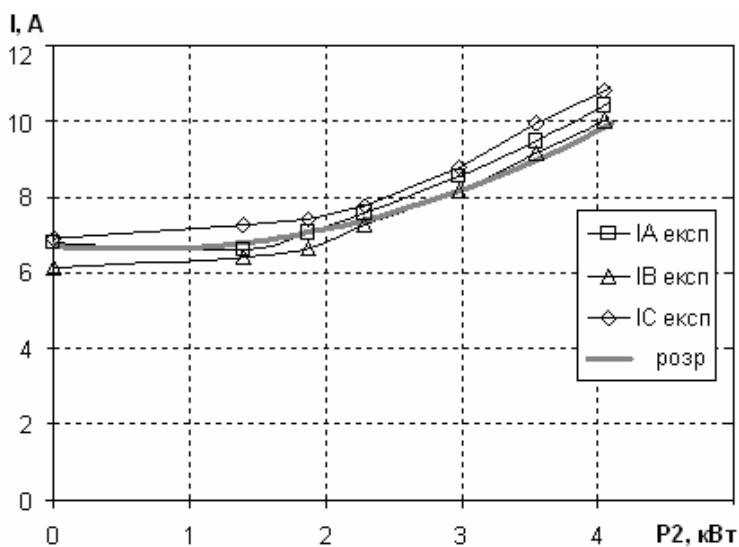


Рисунок 10 – Експериментальна і розрахункова робоча характеристика струму статора двигуна АІР112МА6Н

Істотна різниця між розрахунковими і експериментальними показниками двигуна АІР112МА6Н (табл.6), особливо за ККД, пояснюється завищеними (на 65%) втратами холостого ходу вихідного двигуна АІР112МА8 в порівнянні з довідковими даними. Після заміни обмотки цей факт негативно відбився на енергетичних показниках вже нової машини. Тому в табл.6 з даними серійно випускається двигуна-аналога порівнюються розрахункові дані машини з новою обмоткою.

На рис.10, 11 наведено експериментальні та розрахункові робочі характеристики струму статора двигуна АИР112МА6Н. Максимальна різниця між струмами різних фаз становить 7% в режимі часткового навантаження і близько 4% при номінальній потужності, що є допустимою величиною. Таким чином нова відсиметрована обмотка забезпечує прийнятну симетрію по струмам статора, що споживаються з мережі. Далі на рис. 11 і 12 наведені експериментальні та розрахункові робочі характеристики $\cos\phi$ і ККД. Розрахункова та експериментальна характеристики коефіцієнта потужності мають хорошу збіжність (рис.11), в той час різниця в ККД пояснюється підвищеними втратами холостого ходу експериментального зразка (рис.12).

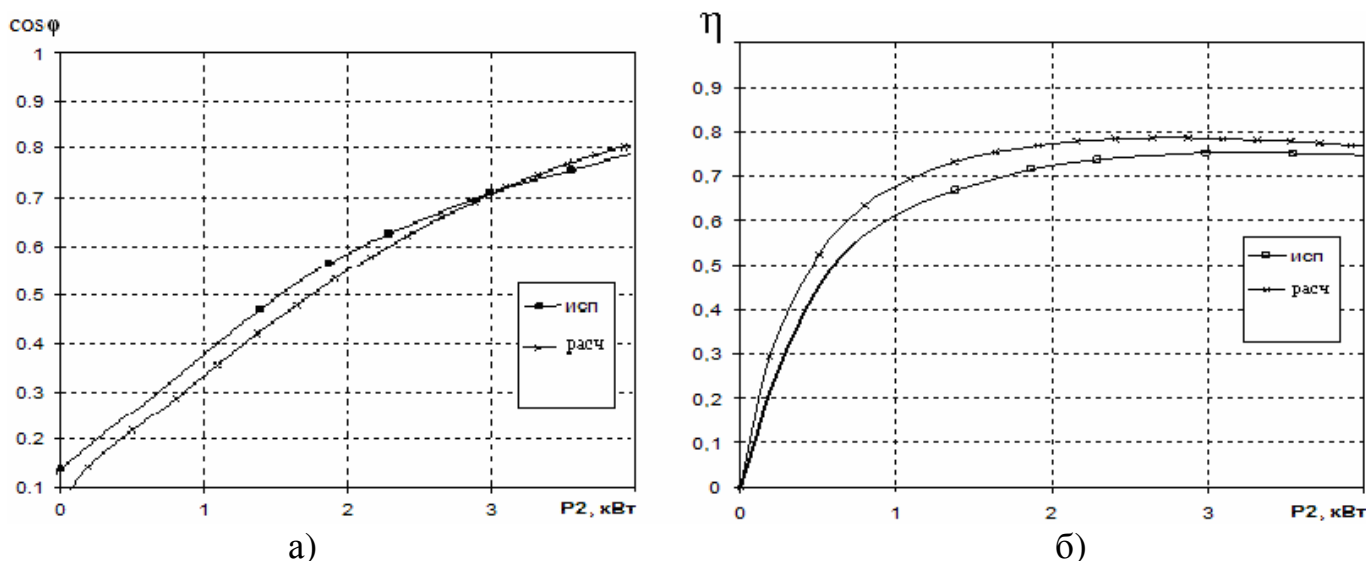


Рисунок 11 – Експериментальні і розрахункові робочі характеристики двигуна АИР112МА6Н коефіцієнта потужності $\cos\phi$ (а) та ККД η (б)

Висновки. До числа найбільш важливих нових наукових результатів слід віднести наступне.

1. Запропонований у роботі підхід до визначення симетричних складових відносних величин ЕРС (МРС) покладено в основу універсальної методики гармонійного аналізу, який дозволяє аналізувати дво- і трифазні обмотки з будь-яким рівнем несиметрії і довільним числом витків в котушках.

2. Величина зворотного симетричної складової обмоточного коефіцієнта по робочій гармоніці використана як критерій допустимості рівня несиметрії при синтезі нових обмоток.

3. Застосовано метод циклічної перестановки активних котушкових сторін, що дозволяє в окремих випадках провести симетрування обмотки до прийнятного рівня.

4. Для повного симетрування використано комплекс методів циклічної перестановки і зміни числа витків в котушках. Поєднання цих методів, або їх незалежне використання дозволяє враховувати технологічні особливості виробництва (ремонт) електричних машин.

5. Розроблено підсистема автоматизованого синтезу несиметричних багатofазних обмоток, заснована на методі симетричних складових, яка характеризується високим рівнем наочності, простотою використання і глибиною аналізу основних електромагнітних властивостей, що проектується обмоток.

6. Запропоновано методику аналізу внутрішньої несиметрії, яка дозволяє зробити висновок про можливість виконання пропонованих слабонесиметричних обмоток з декількома паралельними колами.

7. Проведені експериментальні дослідження асинхронного двигуна із запропонованою несиметричною обмоткою показали практичну симетрію струмів в робочому режимі і підтвердило розрахункові технічні показники.

8. Надано рекомендації з використання нових несиметричних обмоток при виробництві та ремонті двигунів малої та середньої потужності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Абдулкарим Х.Г. Исследование возможности применения несимметричных обмоток в асинхронных двигателях / Х.Г. Абдулкарим // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – № 3(42). – С.117 – 122.

2. Дёгтев В.Г. Особенности гармонического анализа многофазных несимметричных обмоток / В.Г. Дёгтев, Х.Г. Абдулкарим, М.П. Бучацкая // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 4. – С.31 – 35.

3. Дёгтев В.Г. Методика симметрирования обмоток электрических машин / В.Г. Дёгтев, Х.Г. Абдулкарим, М.П. Бучацкая // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 5(81). – С.101 – 105.

4. Дёгтев В.Г. Автоматизированный синтез несимметричных многофазных обмоток / В.Г. Дёгтев, Х.Г. Абдулкарим, С.Ю. Марулин // Холодильная техника и технология. – 2014. – №3 (149). – С.77 – 81.

5. Якимец А.М, Методика определения разностных ЭДС произвольных обмоток / А.М. Якимец, Х.Г. Абдулкарим // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 5(151). – С.51 – 54.

6. Абдулкарим Х.Г. Методика определения разностных ЭДС произвольных обмоток / Х.Г. Абдулкарим // Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю, (Миколаїв, 20 –21 лист. 2013 р.) / М-во освіти і науки, Нац. ун-т кораблебуд. ім. адм. Макарова. – Миколаїв: Нац. ун-т кораблебуд. ім. адм. Макарова, 2013. – 212 с.

АНОТАЦІЯ

Аль-хасун Хуссейн Гені Абдулкарім. Синтез і аналіз несиметричних обмоток машин змінного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 Електричні машини і апарати. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015.

Роботу присвячено синтезу низки дво- та трифазних несиметричних обмоток зі слабким рівнем несиметрії та дослідженню їхніх електромагнітних властивостей з метою забезпечення можливості проектування асинхронних двигунів із покращеними технічними та технологічними показниками. Стан теорії несиметричних обмоток електричних машин змінного струму не відповідає сучасному рівню вимог електромашинобудування, що потребує вискоєфективних інструментів проектування таких обмоток для електричних машин.

Використовуюючи методику, що ґрунтується на поданні обмоточних коефіцієнтів за кожною гармонікою у вигляді симетричних складових, було проведено дослідження несиметричних обмоток. Досліджено векторні діаграми ЕРС несиметричних обмоток, що забезпечило виключення помилок при визначенні обмоточних коефіцієнтів.

Розглянуто методики симетрування несиметричних обмоток. Визначено критерії припустимості при синтезі обмоток методом перетворення числового ряду обмотки. Отримали подальший розвиток методи синтезу багатофазних несиметричних обмоток шляхом варіювання чисел витків у котушках при їх симетруванні. Це дозволило забезпечити практично симетричну систему струмів в процесі експлуатації асинхронних двигунів з такими обмотками.

Синтезовано моделі оцінки внутрішньої (внутрішньофазної) несиметрії двох- та трьохфазних несиметричних обмоток, що дозволило зробити висновок про припустимість виконання обмотки із декількома паралельними колами.

Застосування методу симетричних складових при виконанні гармонічного аналізу ЕРС симетрованих багатофазних обмоток, дозволило із високим ступенем адекватності моделювати асинхронні машини із такими обмотками. Адекватність математичних моделей було підтверджено в ході експериментальної перевірки можливості використання запропонованої рівновиткової обмотки зі слабким рівнем несиметрії для двигунів, що випускаються серійно.

Проведені випробування двигуна із запропонованою обмоткою показали незначне зниження технічних показників експериментальної машини у порівнянні із аналогами, що випускаються серійно. Використання запропонованих обмоток при модернізації під час ремонту і при випуску нових двигунів дозволить розширити сферу застосування стандартних вузлів і деталей електричних машин.

Ключові слова: багатофазна несиметрична обмотка, рівновиткові котушки, нерівновиткові котушки, математична модель, чисельний ряд обмотки, гармонічний склад, обмотковий коефіцієнт, симетричні складові, векторні діаграми, симетрування.

АННОТАЦИЯ

Аль-хасун Хуссейн Гені Абдулкарим. Синтез и анализ несимметричных обмоток машин переменного тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.09.01 Электрические машины и аппараты. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2015.

Работа посвящена синтезу ряда двух- и трехфазных несимметричных обмоток со слабым уровнем несимметрии и исследованию их электромагнитных свойств с целью обеспечения возможности проектирования асинхронных двигателей с улучшенными техническими и технологическими показателями. Состояние теории несимметричных обмоток электрических машин переменного тока не соответствует современному уровню требований электромашиностроения, которое нуждается в высокоэффективных инструментах проектирования таких обмоток для электрических машин.

Используя методику, основанную на представлении обмоточных коэффициентов по каждой гармонике в виде симметричных составляющих, были проведены исследования электромагнитных свойств несимметричных обмоток. Исследованы векторные диаграммы ЭДС несимметричных обмоток, что обеспечило исключение ошибок при определении обмоточных коэффициентов.

Рассмотрены методики симметрирования несимметричных обмоток. Определены критерии допустимости при синтезе обмоток методом преобразования числового ряда обмотки. Получили дальнейшее развитие методы синтеза многофазных несимметричных обмоток путем варьирования чисел витков в катушках при их симметрировании. Это позволило обеспечивать практически симметричную систему токов в процессе эксплуатации асинхронных двигателей с такими обмотками.

Синтезированы модели оценки внутренней (внутрифазной) несимметрии двух- и трехфазных несимметричных обмоток, позволившие сделать вывод о допустимости выполнения обмотки с несколькими параллельными ветвями.

Применение метода симметричных составляющих при выполнении гармонического анализа ЭДС симметрированных многофазных обмоток, позволило с высокой степенью адекватности моделировать асинхронные машины с такими обмотками. Адекватность математических моделей была подтверждена в ходе экспериментальной проверки возможности использования предлагаемой равновитковой обмотки со слабым уровнем несимметрии для серийно выпускаемых двигателей.

Проведенные испытания двигателя с предлагаемой обмоткой показали незначительное снижение технических показателей экспериментальной машины по сравнению с серийно выпускаемыми аналогами. Использование предлагаемых обмоток при модернизации в ходе ремонта и при выпуске новых двигателей позволит расширить сферу применения стандартных узлов и деталей электрических машин.

Ключевые слова: многофазная несимметричная обмотка, равновитковые катушки, неравновитковые катушки, математическая модель, числовой ряд обмотки, гармонический состав, обмоточный коэффициент, симметричные составляющие, векторные диаграммы, симметрирование.

ABSTRACT

Al-hasoon Abdulkareem H.G. Synthesis and analysis of nonsymmetric windings of AC machines. – the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.09.01 Electric machines and devices.–Odessa national polytechnical university, Odessa, 2015.

The work is devoted to the synthesis of a number of two- and three-phase asymmetrical coils with weak asymmetry and the study of their electromagnetic properties in order to enable the design of asynchronous motors with improved technical and technological parameters. State of the theory of asymmetric windings of electrical machines AC does not meet the requirements of the current level of electrical engineering, which needs high-performance design tools such coils for electrical machines.

Using a method based on the notion of winding coefficient for each harmonic in the form of symmetrical components, studies have been conducted electromagnetic properties

of unsymmetrical windings. Investigated the vector diagrams EMF asymmetrical coils, which provided an exception error in the determination of the coefficients of winding.

The techniques of balancing asymmetrical coils. Defined eligibility criteria for the synthesis of windings by converting numerical series winding. Further developed methods for the synthesis of unsymmetrical multiphase windings by varying the number of turns in the coils when balancing. This allowed the system to provide almost symmetrical currents during operation of asynchronous motors with such windings.

Synthesized internal valuation models (intrapphase) asymmetry two- and three-phase windings of asymmetric, led to the conclusion on the admissibility of performing winding with several parallel branches.

Application of the method of symmetrical components when performing harmonic analysis EMF symmetrized multi-phase windings, allowed a high degree of adequacy simulate asynchronous machines with such windings. Adequacy of mathematical models was confirmed by the experimental verification of the possibility of using the proposed equal-windings with weak asymmetry for mass-produced motors.

The tests of the engine with the proposed winding showed more reduction of technical indicators experimental machine compared to the commercially available analogs. Using the proposed windings at modernization in the repair and with the release of the new engines will expand the scope of the standard units and details of electrical machines.

Key words: multi-phase asymmetrical windings, equal-windings coil, unequal-windings coil, mathematical model, numerical series winding, harmonic structure, winding factor, symmetrical components, vector diagrams, symmetry.