

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

На правах рукопису



Циганов Олександр Миколайович

УДК 621.314.21

**СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ І ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ
ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА РЕАКТОРІВ З ШИХТОВАНИМИ
МАГНІТОПРОВОДАМИ**

Спеціальність 05.09.01 – «Електричні машини й апарати»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Миколаївського національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ставинський Андрій Андрійович,
Миколаївський національний аграрний університет,
завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший
науковий співробітник
Римар Сергій Володимирович
завідувач лабораторії
інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України (м. Київ)

кандидат технічних наук, доцент
Чайковський Володимир Павлович
доцент кафедри електричних машин
Державного університету «Одеська політехніка»

Захист дисертації відбудеться 20 вересня 2021 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради К 41.052.05 в Державному університеті «Одеська політехніка» за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, адміністративний корпус, ауд. 400 а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Державного університету "Одеська політехніка" за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1 і на електронному інтернет-ресурсі: <https://op.edu.ua/science/dissertation>

Автореферат розіслано 30 липня 2021 р.

Секретар спеціалізованої
Вченої ради К 41.052.05,
канд. техн. наук, доцент



А.М. Якімець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Головними та енергометалоємними елементами систем електропостачання є трансформатори і реактори різної потужності. Втрати в силових розподільчих трансформаторах складають 1/3 від загальних втрат енергосистем. Основна частина цих втрат приходить на трансформатори I-III габаритів, особливо потужністю до 630 кВ·А. Тому зниження втрат таких трансформаторів уявляє важливу актуальну задачу. Також актуальним є зниження матеріалоємності і трудоємності виготовлення та вартості, а також забезпечення надійної електродинамічної стійкості кожної нової розробки трансформаторно-реакторного обладнання різної потужності. Подальше удосконалення трансформаторів і реакторів можливе, на додаток до сучасних досягнень електроматеріалознавства та автоматизованого проектного синтезу, на основі нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень активної частини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота входить до комплексу науково-дослідних робіт у галузі енергоресурсозбереження. Такі роботи відповідають закону України "Про енергозбереження". Виконані дослідження відповідають тематичному плану Міністерства освіти і науки України за науковим напрямком "Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології". Результати та положення дисертаційної роботи складають суттєву частину науково-дослідних робіт за темами "Удосконалення, структурний і параметричний синтез трансформаторів" №ДР0117U005255 та "Удосконалення, структурний та параметричний синтез електромагнітних статичних пристроїв" №0120U105761, де автором створені проектні математичні моделі удосконалених, на основі інноваційних структурно-геометричних перетворень, електромагнітних систем однофазних і трифазних трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами. Конструктивними ознаками геометричних особливостей електромагнітних систем є утворюючі контури обмоткових котушок та перерізів стрижнів і ярем.

Мета і задачі дослідження. Узагальнене порівняння показників відомих і перспективних конструкцій електромагнітних систем однофазних і трифазних трансформаторів та реакторів з шихтованими магнітопроводами на основі цільових функцій структурного синтезу.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Аналіз традиційних та інноваційних конструкторсько-технологічних рішень елементів електромагнітних систем однофазних і трифазних електромагнітних статичних пристроїв.
2. Аналіз оптимізаційних методик та обрання методу проектного синтезу електромагнітних статичних пристроїв, що відрізняються структурно-геометричними особливостями електромагнітних систем.
3. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів однофазної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів шихтованих магнітопроводів.
4. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи зі східчастими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів.
5. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з плоскими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів.
6. Визначення залежностей показників технічного рівня від конструктивно-технологічних особливостей варіантів однофазних і трифазних електромагнітних систем з шихтованими магнітопроводами.

Об'єкт дослідження – структури електромагнітних систем однофазних і трифазних електромагнітних статичних пристроїв з шихтованими магнітопроводами.

Предмет дослідження – математичні моделі активних частин однофазних і трифазних трансформаторів та реакторів з шихтованими магнітопроводами.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач використані теорія електромагнітних перетворювачів, метод експертної оцінки та метод складання цільових функцій з виділенням безрозмірних складових оптимізації показників технічного рівня електромагнітних систем, що містять універсальні відносні геометричні і електромагнітну керовані змінні.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримали подальший розвиток оптимізаційні моделі однофазних планарних стрижневої і броньової електромагнітних систем з прямокутними утворюючими контурами, а також варіантів трифазної електромагнітної системи з круговими УК, що надало можливість порівняльного аналізу традиційних і нових конструктивних варіантів на основі узагальнених цільових функцій показників технічного рівня.

2. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня радіальної тристрижневої електромагнітної системи, які дозволяють оцінити ефективність структурних перетворень при проектуванні однофазних трансформаторів і реакторів.

3. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними восьмигранними утворюючими контурами, що забезпечує науково-практичне обґрунтування перспективних геометричних конфігурацій активних елементів.

4. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними шестигранними утворюючими контурами, на основі яких визначена доцільність спрощення виготовлення реакторів формуванням стрижнів з ідентичних прямокутних листів електротехнічної сталі.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих у проектних математичних моделях припущень і підтверджується збігом результатів аналітичних розрахунків з показниками зразків реальних трансформаторів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновані і запатентовані нові конструкції електромагнітних систем на основі нетрадиційних утворюючих контурів, що забезпечують покращення основних показників технічного рівня, зниження трудомісткості виготовлення та підвищення електродинамічної стійкості електромагнітних статичних пристроїв.

2. Запропоновані і запатентовані технологічні способи виготовлення магнітопроводів статичних електромагнітних систем з покращеними показниками технічного рівня.

3. На основі розроблених узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності створено методику визначення оптимальних геометричних співвідношень електромагнітних систем однофазних і трифазних трансформаторів і реакторів.

4. Доведено доцільність змін конфігурацій і структур активних елементів для покращення характеристик електромагнітних статичних пристроїв.

5. Результати досліджень використані у розробках конструкторського відділу публічного акціонерного товариства "Інгул" (Миколаївський трансформаторний завод).

6. Результати досліджень та конструкторсько-технологічні рішення використані при модернізації електрообладнання системи автоматичного керування суднових кондиціонерів та машин термічного різання на ТОВ ВКП "Респект Бізнес".

7. Теоретичні положення і практичні результати роботи використовуються здобувачами вищої освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" Миколаївського національного аграрного університету при викладанні фахових дисциплін, курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно сформулював мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особисто виконав розділи роботи. У наукових роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належить: аналіз конструктивно-технологічних особливостей, пропозиції структурно-геометричних перетворень, розробка математичних моделей та розрахунки узагальнених числових значень показників технічного рівня варіантів електромагнітних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Міжнародному симпозіумі "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, SIEMA" (2008, Харків); Всеукраїнських конференціях з міжнародною участю "Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів" (2008, 2011, Миколаїв); Міжнародної конференції "Проблеми повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах" (2010, Севастополь); International conference on "Modern electrical and energy systems" (2017, 2019, Кременчук); Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки" (2018, 2020, Миколаїв).

Публікації. Основний зміст дисертації відображений у 23 наукових роботах, зокрема 2 статті у матеріалах міжнародної конференції, що занесені до міжнародної наукометричної бази Scopus; 1 стаття у фаховому виданні України категорії А-журналі Електротехніка і електромеханіка (2020), що занесений до міжнародної наукометричної бази Web of science; 8 статей у фахових виданнях України, що занесені до інших наукометричних баз даних; 5 статей та тез доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій, 1 стаття у збірнику, який не є фаховим для матеріалів роботи. Також отримано 6 патентів України на винаходи і корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 204 сторінки та містить 188 сторінок основної частини, 4 окремі сторінки таблиць, анотацію, перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, висновки, перелік використаних літературних джерел з 114 найменувань на 14 сторінках, два додатки на 12 сторінках, 35 рисунків, 37 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, сформульовані мета і задачі та визначені наукова новизна і практична цінність досліджень, їх зв'язок з науковими програмами і планами. Наведено інформацію про апробацію, публікації і структуру дисертації.

В першому розділі розглянуто стан розвитку трансформаторобудування. Визначено, що зростання дефіциту енергетичних і матеріальних ресурсів викликає необхідність пошуку шляхів удосконалення електромагнітних статичних пристроїв, в першу чергу силових розподільчих трансформаторів I-III габаритів, як головних елементів розподілення енергетичних потоків та електромеханічних об'єктів масового випуску. Освоєння в другій половині XX віку трансформаторної анізотропної електротехнічної сталі призвело до покращення масогабаритних і енергетичних показників електромагнітних статичних пристроїв. Однак виникла проблема значного підвищення втрат кутових зон шихтованих текстурованих магнітопроводів незалежно від форм стиків. Задача суттєвого зниження цих

втрат є вельми актуальною. Традиційні способи удосконалення трансформаторів і реакторів на основі інновацій електроматеріалознавства задіяні при незмінності традиційних структур електромагнітних систем і обмежені техніко-економічною доцільністю (складні та витратні технології виготовлення і особливості аморфної сталі та створення і використання явища "високотемпературної" надпровідності) і фізичними властивостями матеріалів.

Здійснюється підвищення межі потужності трансформаторів з прямокутними утворюючими контурами з 200 до 1000 кВ·А, також відомо про побудову електромагнітних статичних пристроїв з плоскими внутрішніми поверхнями ярем при складанні магнітопроводу з пакетів різних розмірів в стрижнях і ярмах.

З аналізу інформаційних джерел впливає відсутність числового визначення впливу топології структур варіантів однофазних електромагнітних систем та варіантів конфігурацій активних елементів трифазних планарних електромагнітних систем на основні показники електромагнітних статичних пристроїв з шихтованими магнітопроводами.

Традиційні прямокутні і кругові утворюючі контури стрижнів магнітопроводів і обмоткових котушок підвищують матеріалоємність і втрати, та знижують надійність електромагнітних статичних пристроїв. Удосконалення трансформаторів і реакторів додатково до застосування покращених електротехнічних матеріалів можливе зміною структури і геометрії утворюючих контурів електромагнітних систем. Однак узагальнене аналітичне дослідження впливу названих змін на показники трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами не виконане. Загальновідомі методи оптимізації електромагнітних статичних пристроїв відповідають традиційним структурам електромагнітних систем з прямокутними і круговими утворюючими контурами, є взаємоне прийнятними методами параметричного синтезу і не відповідають умовам інваріантності оптимізаційного зіставлення. Визначення впливу топології і конфігурації активних елементів на показники технічного рівня трансформаторів і реакторів та обґрунтування доцільності застосування нетрадиційних структурно-геометричних перетворень і нових конструктивно-технологічних розробок електромагнітних систем потребує створення цільових функцій узагальненого структурного синтезу, тобто об'єктивного оптимізаційного зіставлення традиційних і інноваційних варіантів рішення задачі на основі безрозмірних показників і універсальних відносних керованих змінних.

На основі наведеного у першому розділі аналізу сформульовані мета і задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглянуто конструктивно-структурні особливості і можливості перетворення структур і утворюючих контурів елементів та аналітичного зіставлення варіантів однофазної і трифазної електромагнітних систем. Визначено, що використання в електромагнітних системах багатограних утворюючих контурів (рис. 1, а–г), знижує середню довжину витків обмоток відносно аналогів з ідентичною площею активного перерізу стрижня та з прямокутними утворюючими контурами (рис. 1, д) і аналогів з круговими утворюючими контурами (рис. 2, а), які мають контурний коефіцієнт заповнення електротехнічною сталлю $K_{\text{кк}} \leq 0,9$, що надає можливість зниження втрат та матеріалоємності електромагнітних статичних пристроїв. При цьому при трьох сходинках (пакетах) в половині симетричного восьмигранного контуру (рис. 1, а) контурний коефіцієнт заповнення складає $K_{\text{кв}} = 0,9$, а при чотирьох пакетах такий коефіцієнт дорівнює $K_{\text{кв}} = 0,931$. Аналогічний коефіцієнт $K_{\text{кк}} = 0,931$ досягається в трансформаторах великої потужності при 16 пакетах в половині кола при суттєвому ускладненні виробництва традиційних магнітопроводів.

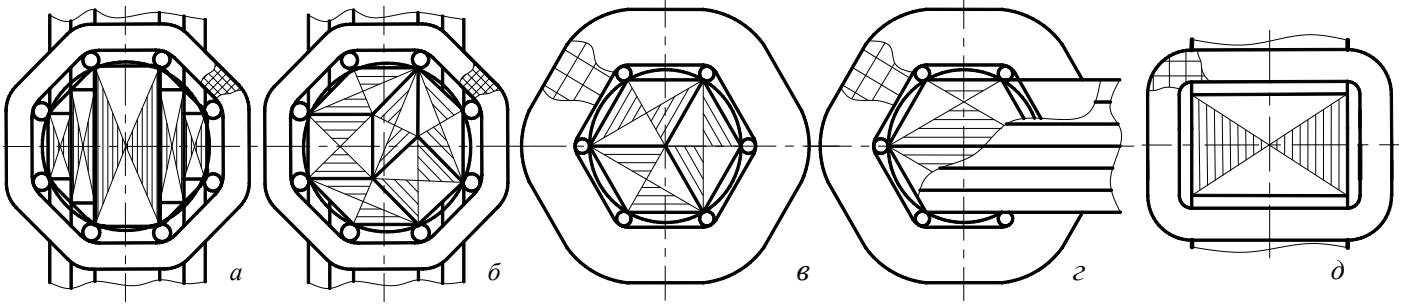


Рисунок 1 – Фрагменти схем планарних електромагнітних систем з восьмигранними (а, б) і шестигранними (в, г) та прямокутними (д) утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

В процесі намотування кругових або еліптичних витків обмоткових котушок виникають деформації початкового вигину ϵ_B з максимумом $\epsilon_{B\max}$ на зовнішньому контурі (рис. 2, а), які створюють в провіднику механічні напруги початкового вигину σ_B . При короткому замиканні електромагнітних статичних пристроїв деформації ϵ_B складаються з деформаціями від електромагнітних сил, зокрема з деформаціями ϵ_{EMF} від радіальної складової сили, що стискає провідник. Накладання деформацій технологічного і електромагнітного чинників призводить до зростання напружень за всією довжиною ділянок криволінійного контуру витка, що стискаються. В ВАТ "ВІТ" (Запоріжжя) встановлено, що вказані чинники суттєво знижують електродинамічну стійкість трансформаторів і реакторів. З викладеного випливає потенціальна можливість підвищення вказаної стійкості виключенням механічних напружень вигину на більшій частині контурів витків при застосуванні багатограних утворюючих контурів обмоткових котушок. Для максимального підвищення електричної міцності і стійкості обмоток, в кутових зонах граней утворюючих контурів між витками повинні бути встановлені додаткові вертикальні опорні елементи. Такі елементи (рис. 2, б), а також отвори і виїмки під них в горизонтальних прокладках, можуть виконуватися за формою, яка відповідає внутрішньому r_B і зовнішньому r_3 радіусам округлення кутів обмоткових витків.

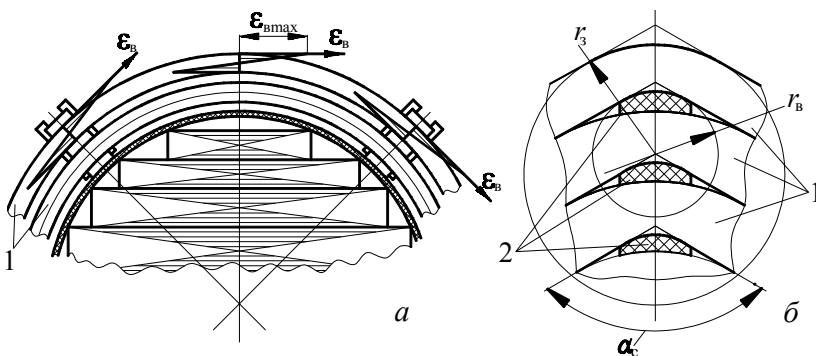


Рисунок 2 – Схема вигину і деформації провідника по круговому контуру (а) і особливості будови обмотки з багатограними контурами витків і обмоткових котушок:
1 – провідник (виток);
2 – опорний елемент.

Запропоновані варіанти шихтованої (рис. 1, а), стикової (рис. 1, б – г) і комбінованої стико-шихтованої вперепліт (рис. 3, а) конструкцій планарних магнітопроводів з восьми і шестигранними утворюючими контурами перерізів стрижнів, які відрізняються наявністю та відсутністю сходинок при підвищеному та практично повному заповненні контурів перерізів стрижнів.

Перетворення варіантів планарних магнітопроводів однофазних електромагнітних систем в просторовий радіальний тристрижневий магнітопровід з шестигранним зовнішнім контуром (рис. 4, а) створює передумови енергоресурсозбереження при виробництві однофазних електромагнітних статичних пристроїв. Додаткове енергоресурсозбереження при створенні електромагнітних статичних пристроїв шляхом зниження значних додаткових втрат текстурованого шихтованого магнітопроводу можливе при комбінації

марок електротехнічної сталі та розташуванні в яремно-стрижневих і кутових ділянках фрагментів з анізотропної і ізотропної електротехнічних сталей (рис. 4).

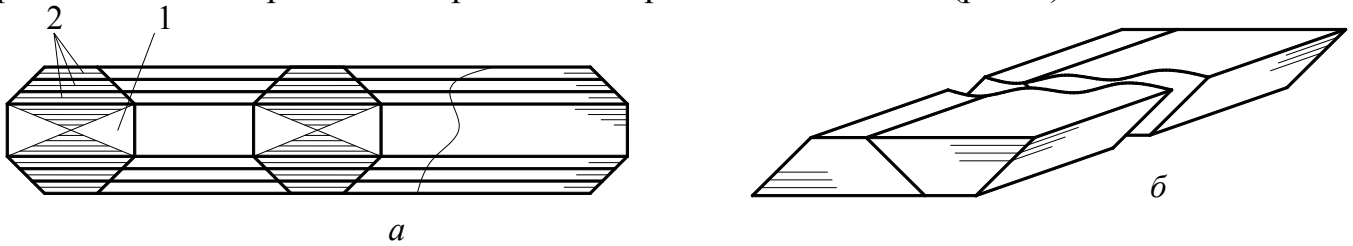


Рисунок 3 – Схема (вид зверху) трифазного планарного магнітопроводу (а) з "переплетенням" 1 і боковими стиковими елементами 2 і заготовки елементів магнітопроводу (б)

Нероз'ємне з'єднання паралелограмних стрижневих і яремно-кутових ділянок утворює шевронні елементи магнітопроводу (рис. 4, а) і знижує число технологічних зазорів з шести до трьох. Таке з'єднання, а також з'єднання кутових шевронних ізотропних та інших анізотропних ділянок магнітопроводів (рис. 4, б, в), може бути виконано зварюванням. Для рішення задач практичного застосування варіантів конструкцій (рис. 4) доцільно проведення досліджень можливостей використання відомих способів, зокрема лазерного та електронно-променевого зварювання, або розробки спеціальних способів зварювання електротехнічної сталі в стиках.

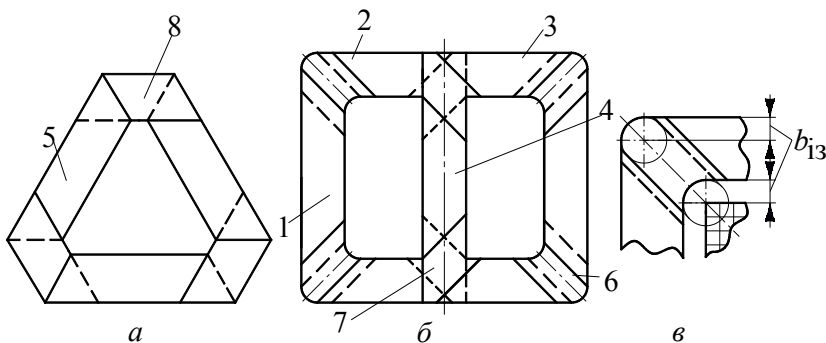


Рисунок 4 – Схеми однофазного тристрижневого (а) і трифазного стрижневого (б) з заокругленими верхівками кутів (в) магнітопроводів з пластинами 1-5 анізотропної і пластинами 6-8 ізотропної електротехнічних сталей

Запобігання значного ускладнення виробництва магнітопроводів з з'єднанням стиків ізотропної і анізотропної електротехнічних сталей можливе інтегральним зварюванням і поперечним розділенням заготовок. Заготовки комбінації електротехнічної сталі для поперечного розділення на комбіновані пластини магнітопроводів (рис. 5) утворюються суміщенням і з'єднанням по лініям стиків фрагментів смуг анізотропної (рис. 5, а) і ізотропної (рис. 5, б) електротехнічних сталей. До фрагменту (фрагментів) смуги анізотропної електротехнічної сталі можна приєднати один, два або декілька фрагментів смуги ізотропної електротехнічної сталі. Перед з'єднанням фрагментів анізотропні компоненти розташовуються з напрямком текстури, який є паралельним лініям розділення (рис. 5, в). Розділенні ділянки фрагментів з двома або декількома швами розрізаються під заданими кутами на пластини (рис. 5, г, д) з комбінацією електротехнічних сталей.

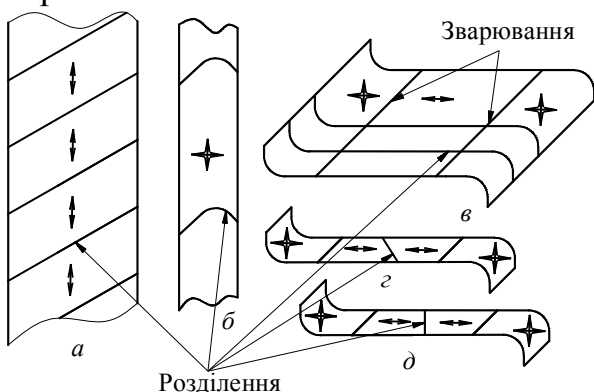


Рисунок 5 – Принципові схеми розкрою і з'єднання компонент комбінованого магнітопроводу: поперечне розділення (а, б) прокату анізотропної (\leftrightarrow) і ізотропної (∇) електротехнічних сталей на фрагменти; зварювання фрагментів по лініям стиків в заготовку та її поперечний поділ на ділянки (в); розділення ділянок фрагментів на комбіновані пластини (г, д).

Визначено, що рішення поставлених задач структурного синтезу, тобто оптимізаційного зіставлення показників технічного рівня заданих варіантів електромагнітних систем трансформаторів і реакторів максимально відповідає узагальнений метод цільових функцій з безрозмірними показниками технічного рівня та універсальними відносними керованими змінними. Застосовуються $k \geq 3$ цільових функцій окремих критеріїв оптимізації. Основними є критерії мінімумів маси ($k=1$), вартості ($k=2$) і втрат активної потужності ($k=3$), які використовуються в даній роботі для дослідження електромагнітних систем як з мідними так і з алюмінієвими обмотками. Вказані цільові функції $F^{(k)}_{kijcu(al)}$ містять загальні складові з показниками вихідних даних і електромагнітних навантажень Π_{ij} однофазного (трифазного) трансформатора або реактора з мідними (алюмінієвими) обмотками, а також оптимізаційні безрозмірні складові-показники цільових функцій $\Pi^*_{kijcu(al)}$, де латинські літери ij приймають певні позначення кирилицею, які відповідають варіантам електромагнітних систем, що розглядаються в роботі

$$F^{(k)}_{kijcu(al)} = \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} K_k \Pi^*_{kijcu(al)},$$

де Π_{ij} – показник вихідних даних проектування; K_k – складова питомих характеристик застосованої електротехнічної сталі, що відповідає i -показнику.

Літери ij та показники цільових функцій однофазного трансформатора, трифазного трансформатора і трифазного реактора приймають позначення відповідно ОТ, ТТ і ТР, а показники вихідних даних, які відповідають електромагнітній потужності електромагнітних статичних пристроїв, визначаються виразами:

$$\Pi_{от(тт)} = \frac{S_n}{4,44(6,66)B_c f_1 J_0} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{\eta \cos \varphi_1} + K_{U2} \right); \quad \Pi_{тр} = Q_n / (6,66 B_c f_1 J_0),$$

де S_n і Q_n – номінальні потужності трансформатора і реактора; B_c – середнє значення амплітуди індукції стрижня; f_1 – частота струму; K_{U1} , K_{U2} і $\cos \varphi_{2(1)}$ – коефіцієнти номінальної зміни напруги трансформатора під навантаженням і енергетичний коефіцієнт навантаження (трансформатора).

Чисельними розрахунками визначаються екстремуми (мінімуми) Π^*_{kijcuc} і Π^*_{kijale} вказаних показників за окремими критеріями оптимізації. Такі безрозмірні екстремуми є показниками технічного рівня певного варіанту електромагнітної системи, які у сукупності з іншими співмножниками визначають фактичні розрахункові кількісні значення окремих техніко-економічних характеристик (мас і вартостей електромагнітних систем та втрат активної потужності, наприклад трифазних трансформаторів).

Основними геометричними керованими змінними при заданому коефіцієнті заповнення обмоткового вікна K_{30} (класу напруги) є відношення його висоти h_{ij} і ширини b_{ij} (рис. 6, а, в, е), а також відношення зовнішнього і внутрішнього діаметрів розрахункових окружностей варіанту магнітопроводу D_{1ij} і D_{2ij} (рис. 6, б, г, е). Додатково відносною керованою змінною, що застосовується при побудові математичних моделей деяких електромагнітних систем, наприклад (рис. 6, б, г), є тригонометрична функція $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c :

$$\Pi^*_{1(2)ijcu(al)} = f_{1(2)ijcu(al)} \left[K_{30}, \lambda_B, a_M, t(\alpha_c) \right]; \quad \lambda_B = h_{Bij} / b_{Bij}; \quad a_M = D_{1ij} / D_{2ij}.$$

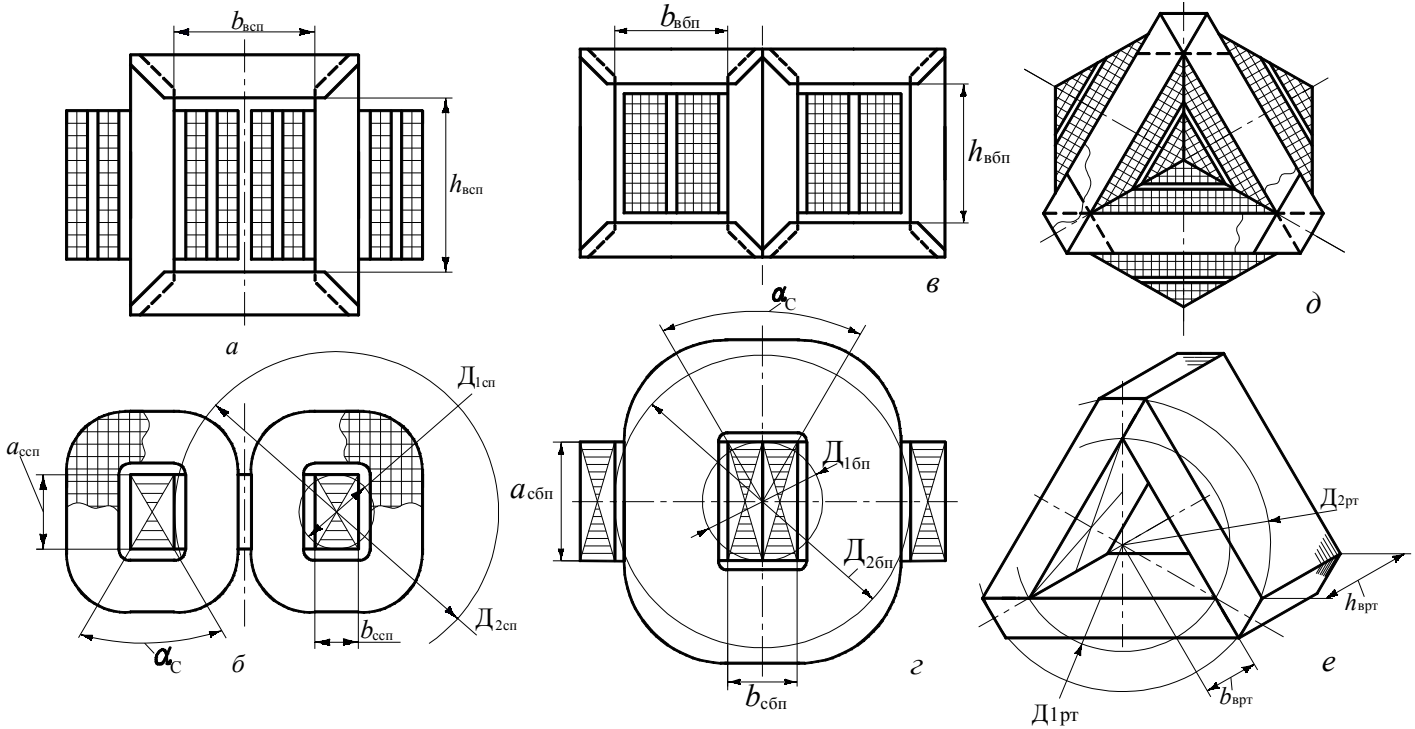


Рисунок 6 – Конструктивні схеми в повздовжньому і поперечному перерізах планарних стрижневої (а, б), броньової (в, г) та радіальної тристрижневої (д, е) однофазних електромагнітних систем

Для адекватного зіставлення варіантів електромагнітних систем з різновидами утворюючих контурів, що розглядаються в роботі, приймаються ідентичними електромагнітні потужності, і відповідно показники $\Pi_{от}$, $\Pi_{тт}$ і $\Pi_{тр}$ з рівними електромагнітних навантажень, що залежать від призначення та виконання і типу охолодження однофазного (трифазного) трансформатора або реактора. Також, відповідно, приймаються однаковими електротехнічні матеріали, значення коефіцієнту K_{30} і коефіцієнту заповнення магнітопроводу електротехнічною сталлю $K_{3с}$ та середні значення амплітуди індукції, які є однаковими в поперечних перерізах стрижнів і ярів. Для спрощення математичних моделей реальні обмотки кожної електромагнітної системи замінюються еквівалентними розрахунковими обмотками структурно-еквівалентних реакторів. Застосування поняття еквівалентної розрахункової обмотки надає можливість створення математичних моделей електромагнітних систем при складності визначення координат середніх витків обмоток в вікнах магнітопроводів нетрадиційних форм. Розрахунки вартості виконуються з врахуванням співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників, що складає у середньому 0,85 та при відношенні цін вказаних провідників C_{al} , C_{cu} до ціни електротехнічної сталі C_{st} в реальних діапазонах ($C_{al}/C_{st}=3-4,7$; $C_{cu}/C_{st}=3,5-5,5$).

Для узагальненого порівняння втрат активної потужності варіантів технічних рішень однофазних (трифазних) електромагнітних систем застосовуються оптимізаційні безрозмірні складові $\Pi^*_{3ijcu(al)}$ цільових функцій вказаних втрат $F^{(n)*}_{3ijcu(al)}$

$$F^{(n)*}_{3ijcu(al)} = \gamma_{st} P_{st} (\Pi_{ij})^{3/4} \Pi^*_{3ijcu(al)},$$

де P_{st} – питомі втрати електротехнічної сталі при заданому значенні амплітуди магнітної індукції стрижня B_c електромагнітного статичного пристрою.

Оптимізаційні складові цільових функцій $\Pi^*_{3ijcu(al)}$, як і показники маси і вартості, є залежними від основних відносних геометричних керованих змінних λ_b і a_m та є залежними, в деяких електромагнітних системах, від додаткової відносної тригонометричної керованої змінної $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c (рис. 6, б, г).

Крім того, оптимізаційна складова, тобто показник втрат активної потужності $\Pi_{3ijcu(al)}^*$, є залежною від однієї (двох у випадку наявності в електромагнітній системі як мідної так і алюмінієвої обмоток) відносної електромагнітної (електромагнітних) керованої змінної втрат $K_{pcu(al)}$

$$\Pi_{3ijcu(al)}^* = f_{3ijcu(al)} \left[K_{30}, \lambda_B, a_M, t(\alpha_c), K_{pcu(al)} \right].$$

Електромагнітна керована змінна безрозмірної складової цільової функції втрат є залежною від співвідношень коефіцієнтів додаткових втрат короткого замикання $K_{дк}$ і неробочого руху $K_{дн}$ та значень питомих мас активних матеріалів $\gamma_{cu(al)}$ і γ_{st} , а також від відношень значень питомих втрат обмотки (залежить від показника питомих втрат міді (алюмінію) $K_{pcu(al)}$ і густини струму розрахункової обмотки $J_{ocu(al)}$) та величини питомих втрат P_{st} електротехнічної сталі магнітопроводу при заданій індукції

$$K_{pcu(al)} = \frac{K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{pcu(al)} J_{ocu(al)}^2}{K_{дн} \gamma_{st} P_{st}}.$$

Третім основним показником технічного рівня, тобто показником енергетичної ефективності варіантів електромагнітних систем, є екстремальне (мінімальне) значення $\Pi_{3ijcu(al)e}^*$, яке визначається в проєктному діапазоні змін електромагнітних навантажень сухих і масляних однофазних (трифазних) трансформаторів, або однофазних (трифазних) реакторів.

Визначення глобального екстремуму $F_{1(2)ijcu(al)}^{(n)}$, тобто фактично її оптимізаційної складової $\Pi_{kijcu(al)}^*$, забезпечується певним (правильним) розташуванням на заданій принциповій схемі, зокрема (рис. 6), розрахункових діаметрів D_{1ij} , D_{2ij} . Ознакою правильності вказаного розташування є положення КЗ рівняння ПТР в ступенях різних знаків, що забезпечує унімодалність кожного з критеріїв оптимізації.

При оптимізаційному зіставленні варіантів електромагнітної системи однофазного трансформатора за базову прийнята традиційна конструкція з прямокутними УК та стрижневим шихтованим магнітопроводом структури (рис. 6, а). При оптимізаційному зіставленні варіантів ЕМС трифазних трансформатора і реактора за базові прийняті традиційні конструкції з прямокутними і круговими УК обмоткових котушок та перерізів стрижнів і ярем стрижневих шихтованих магнітопроводів (рис. 1, д, рис. 2, а).

Важливою додатковою характеристикою технічного рівня трансформатора (реактора), що відповідає температурному проєктному обмеженню, є тепловий стан обмоток. На додаток до визначення $F_{kijcu(al)}^{(n)}$, на основі застосування складових рівнянь $\Pi_{kijcu(al)}^*$, можливо визначення та співставлення теплового стану обмоток. Застосовується рівняння середнього теплового навантаження $P_{wijcu(al)}$ обмоток

$$P_{wijcu(al)} = P_{kijcu(al)}^{(n)} / S_{wijcu(al)},$$

де $P_{kijcu(al)}$ – втрати короткого замикання (обмоткові); $S_{wijcu(al)}$ – площа ефективної поверхні охолодження еквівалентної обмотки:

$$P_{kijcu(al)} = f_k \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_c), K_{pcu(al)} \right); S_{wijcu(al)} = f_w \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_c) \right).$$

У третьому розділі розроблено проєктні математичні моделі показників технічного рівня стрижневого $\Pi_{кспcu(al)}^*$, броньового $\Pi_{кбпcu(al)}^*$ та радіального тристрижневого $\Pi_{кртcu(al)}^*$ варіантів однофазної електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів і витків обмоткових котушок, що відрізняються мідними і алюмінієвими провідниками.

Показники маси $\Pi_{1спcu(al)}^*$, $\Pi_{1бпcu(al)}^*$, $\Pi_{1ртcu(al)}^*$ (табл. 1) і втрат активної потужності $\Pi_{3спcu(al)}^*$, $\Pi_{3бпcu(al)}^*$, $\Pi_{3ртcu(al)}^*$, визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{сп}cu(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + K_{30} \lambda_B \times \right. \\
&\quad \left. \times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \\
\Pi_{1\text{бп}cu(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{от}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \lambda_B + \right. \\
&\quad \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + K_{30} \lambda_B \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \times \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \times \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \\
\Pi_{1\text{пт}cu(al)}^* &= \Pi_{\text{арт}cu(al)}^* + \gamma_{cu(al)} \Pi_{\text{орт}cu(al)}^* / \gamma_{st} = 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \times \\
&\quad \times \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + 0,75 K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \times \right. \\
&\quad \left. \times (\lambda_B + 2a - 0,953) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} = 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) \times \right. \\
&\quad \left. \times (a_M + 0,5) + 0,75 K_{30} (\lambda_B + 2a - 0,953) \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \\
\Pi_{3\text{сп}cu(al)}^* &= K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[\left[0,25 \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \lambda_B \sin \alpha_c + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left(\left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + K_{30} K_{\text{п}cu(al)} \lambda_B 0,5 \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 \times \right. \\
&\quad \left. \times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{3\text{Б}pcu(al)}^* &= K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[\left[0,25(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \lambda_B \sin \alpha_c + \right. \right. \\ &+ \frac{\sin \alpha_c}{2} \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \left. \right] + K_{30} K_{pcu(al)} \lambda_B 0,5 \left[a_M - \sin(\alpha_c/2) \right]^2 \times \\ &\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]; \\ \Pi_{3\text{РТ}cu(al)}^* &= 2,394 K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{3c} (a_M - 1) \lambda_B (a_M + 0,5) + \right. \\ &+ 0,75 K_{30} K_{pcu(al)} (\lambda_B + 2a_M - 0,953) \left. \right]. \end{aligned}$$

Таблиця 1 – Екстремуми показників маси однофазних планарних стрижневої, броньової та радіальної тристрижневої електромагнітних систем з прямокутними утворюючими контурами, що відрізняються мідними та алюмінієвими провідниками обмоток

Екстремуми показника маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,15
$\Pi_{1\text{СП}(cu)e}^*$	17,84	18,81	22,04
$\Pi_{1\text{СП}(al)e}^*$	10,65	11,37	13,76
$\Pi_{1\text{БП}(cu)e}^*$	18,53	19,68	23,53
$\Pi_{1\text{БП}(al)e}^*$	11,57	12,42	15,26
$\Pi_{1\text{РТ}(cu)e}^*$	17,58	18,55	21,79
$\Pi_{1\text{РТ}(al)e}^*$	10,56	11,28	13,68

Покращення показників маси і матеріалоемності радіальної системи (табл. 1) обумовлено збільшенням і зменшенням числа, відповідно, стрижнів і кутових зон магнітопроводу до трьох відносно планарних аналогів.

У четвертому розділі розроблені проектні математичні моделі показників технічного рівня варіантів трифазної стрижневої електромагнітної систем $\Pi_{\text{ККК}cu(al)}^*$ і $\Pi_{\text{КВВ}cu(al)}^*$ відповідно з круговими і рівнобічними восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і перерізів стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів (рис. 8, а, в).

Показники маси $\Pi_{1\text{КК}cu(al)}^*$, $\Pi_{1\text{ВВ}cu(al)}^*$ (табл. 2) і втрат активної потужності $\Pi_{3\text{КК}cu(al)}^*$, $\Pi_{3\text{ВВ}cu(al)}^*$, визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{КК}cu(al)}^* &= 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{КК}} \left[(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215 \right] + \right. \\ &+ 1,178 K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2 \left[1 + (a_M - 1)/4 \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \left. \right]; \\ \Pi_{1\text{ВВ}cu(al)}^* &= \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{\text{КВ}} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \left[K_{3c} K_{\text{КВ}} \left[(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + \right. \right. \\ &+ 4,028 \left. \right] + \frac{\gamma_{cu(al)} \lambda_B K_{30}}{\gamma_{st}} 1,148 K_{30} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 \left[1 + 0,256(a_M - 0,924) \right] \left. \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{3\text{KKCu}(al)}^* &= K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{5,093 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{3\text{C}} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \right]} \right)^3 \left[\left[K_{3\text{C}} K_{\text{KK}} \left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \right. \right. \\ &+ \left. \frac{\pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right) + 0,168 \right] + 1,178 K_{\text{PCu}(al)} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \left[1 + (a_{\text{М}} - 1)/4 \right] \right]; \\ \Pi_{3\text{ВВCu}(al)}^* &= K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3\text{C}} K_{30} K_{\text{KB}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3\text{C}} K_{\text{KB}} \left[(a_{\text{М}} - 0,924) \times \right. \right. \\ &\times (1,413 + 1,059 \lambda_{\text{В}}) 4,028 \left. \right] + K_{30} K_{\text{PCu}(al)} \lambda_{\text{В}} 1,148 \times \\ &\left. \times (a_{\text{М}} - 0,924)^2 \left[1 + 0,256 (a_{\text{М}} - 0,924) \right] \right]. \end{aligned}$$

Таблиця 2 – Екстремуми показників маси варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи при чотирьох пакетах в половиних кругових і рівнобічних восьмигранних утворюючих контурах перерізів стрижнів і ярем та котушок мідної і алюмінієвої обмоток ($K_{\text{KK}}=0,861$, $K_{\text{ВВ}}=0,931$)

Екстремум показника маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,15
$\Pi_{1\text{KK}(cu)e}^*$	28,99	30,57	35,82
$\Pi_{1\text{KK}(al)e}^*$	17,31	18,47	22,34
$\Pi_{1\text{ВВ}(cu)e}^*$	28,57	30,17	35,41
$\Pi_{1\text{ВВ}(al)e}^*$	17,13	18,29	22,16

Відмінності мас варіантів систем з чотирма пакетами сталі в перерізах магнітопроводів (табл. 2) обумовлені зменшенням периметру восьмигранного контуру відносно кругового при заданій електромагнітній потужності трансформатора.

У п'ятому розділі розроблено математичні моделі варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи $\Pi_{\text{KKK}(\Pi)\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{\text{KBВ}(\Pi)\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{\text{КШП}\text{Cu}(al)}^*$, відповідно з круговими, рівнобічними восьмигранними та рівнобічними шестигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і перерізів стрижнів та з плоскими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів східчастих перерізів (рис. 8, б, г, д).

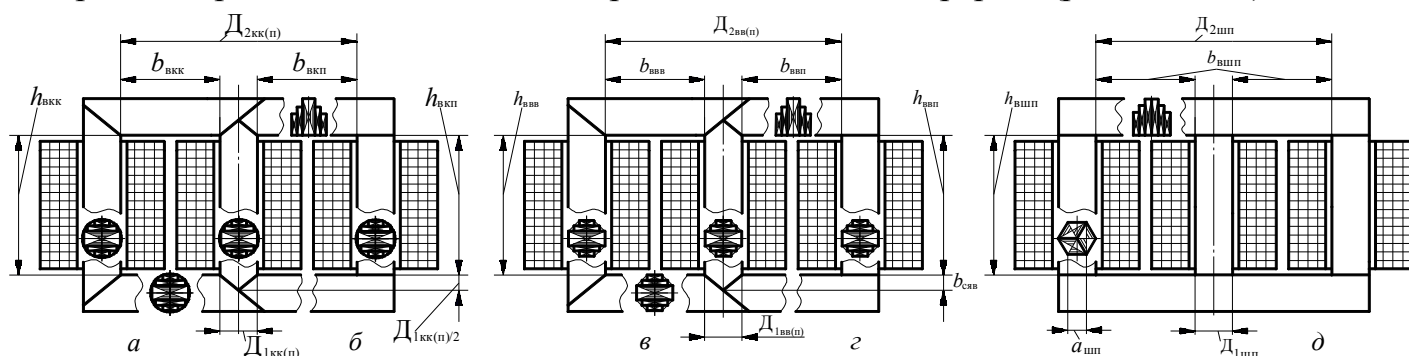


Рисунок 8 – Варіанти конструктивної схеми трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з круговими (а, б) і багатограними (в-д) утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів, що відрізняються ярмами східчастого перерізу, які мають східчасті (а, б) та плоскі (б, г, д) внутрішні поверхні

Показники маси $\Pi_{1\text{КП}\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{1\text{ВП}\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{1\text{ШП}\text{Cu}(al)}^*$ (табл. 3) і втрат активної потужності $\Pi_{3\text{КП}\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{3\text{ВП}\text{Cu}(al)}^*$, $\Pi_{3\text{ВП}\text{Cu}(al)}^*$ визначаються рівняннями:

$$\Pi_{1\text{кп}3\text{cu}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3\text{c}}K_{\text{кк}}K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2}} \right)^3 \left[K_{3\text{c}}K_{\text{ки}} \left[\left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \lambda_{\text{B}} 2,356 + 3,734 \right] + 1,178K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2 \left[1 + (a_{\text{M}}-1)/4 \right] \gamma_{\text{cu}(al)}/\gamma_{\text{c}} \right];$$

$$\Pi_{1\text{вп}3\text{cu}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3\text{c}}K_{30}K_{\text{кб}}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3\text{c}}K_{\text{кб}} \left[2,121 \left(\frac{a_{\text{M}}-0,924}{2} \right) \lambda_{\text{B}} + \left(4 \left(\frac{a_{\text{M}}-0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right] + \right.$$

$$\left. + K_{30}\lambda_{\text{B}} 1,148(a_{\text{M}}-0,924)^2 \left[1 + 0,256(a_{\text{M}}-0,924) \right] \gamma_{\text{cu}(al)}/\gamma_{\text{st}} \right];$$

$$\Pi_{1\text{шп}3\text{cu}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3\text{c}}K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2}} \right)^3 \times \left[K_{3\text{c}} \left[\frac{6\sqrt{3}}{8}(a_{\text{M}}-1) + \frac{9\sqrt{3}}{16}(a_{\text{M}}-1)\lambda_{\text{B}} + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] + 1,5K_{30}\lambda_{\text{B}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{(a_{\text{M}}-1)^2}{4} \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_{\text{M}}-1) \right] \gamma_{\text{cu}(al)}/\gamma_{\text{st}} \right];$$

$$\Pi_{3\text{кп}3\text{cu}(al)}^* = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093\Pi_{\text{тг}}}{K_{3\text{c}}K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2}} \right)^3 \left[\left[K_{3\text{c}} \left(3 \left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \lambda_{\text{B}} \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times \left(4 \left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) + 1,879 \right) + 2,262 \right] + 1,178K_{\text{pcu}(al)}K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2 \left[1 + (a_{\text{M}}-1)/4 \right] \right];$$

$$\Pi_{3\text{вп}3\text{cu}(al)}^* = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3\text{c}}K_{30}K_{\text{кб}}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3\text{c}}K_{\text{кб}} \left[\frac{a_{\text{M}}-0,924}{2} \times \right. \right.$$

$$\left. \times \lambda_{\text{B}} 2,121 \right] + \left[\left(4 \frac{a_{\text{M}}-0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right] + 4,593K_{\text{yp}}K_{30}\lambda_{\text{B}} \left(\frac{a_{\text{M}}-0,924}{2} \right) \times$$

$$\left. \times \left[1 + 0,256(a_{\text{M}}-0,924) \right] \right];$$

$$\Pi_{3\text{шп}3\text{cu}(al)}^* = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3\text{c}}K_{30}\lambda_{\text{B}}(a_{\text{M}}-1)^2}} \right)^3 \left[K_{3\text{c}} \left[\left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \lambda_{\text{B}} \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \right.$$

$$\left. + \left[\left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right] + 1,5K_{\text{дк}}K_{30}K_{\text{pcu}(al)}\lambda_{\text{B}} \left(\frac{a_{\text{M}}-1}{2} \right)^2 \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_{\text{M}}-1) \right] \right].$$

Таблиця 3 – Екстремуми показників маси варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи при чотирьох пакетах в половиних кругових і рівнобічних восьмигранних утворюючих контурах стрижнів та з рівнобічними шестигранними утворюючими контурами стрижнів при плоских внутрішніх поверхнях ярем східчастих перерізів і з мідними та алюмінієвими обмотками

Екстремуми показника маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,15
$\Pi_{1КП(cu)e}^*$	28,85	30,42	35,67
$\Pi_{1КП(al)e}^*$	17,24	18,41	22,28
$\Pi_{1ВП(cu)e}^*$	28,44	30,01	35,26
$\Pi_{1ВП(al)e}^*$	17,08	18,24	22,11
$\Pi_{1ШП(cu)e}^*$	28,39	29,96	35,20
$\Pi_{1ШП(al)e}^*$	17,05	18,21	22,08

Деяке покращення показників маси систем з плоскими внутрішніми поверхнями ярем (табл. 3) відносно аналогів з східчастими поверхнями (табл. 2) обумовлене зниженням об'ємів сталі кутових зон магнітопроводу, а також практичною рівністю площ шестигранного контуру і перерізу стрижня.

У шостому розділі представлені графічні відображення отриманих результатів структурного синтезу електромагнітних систем. Приклади значень відмінностей показників технічного рівня порівнювальних електромагнітних систем наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Значення покращення показників технічного рівня варіантів електромагнітних систем відносно базових аналогів в діапазоні $K_{30}=0,3-0,15$

Матеріал обмотки, cu/al	Позначення показників	Діапазон змін значень показників, %		
		Зміна показників маси	Зміна показників вартості при відношенні цін: $C_{cu}/C_{st}=3,5' \dots 5,5''$; $C_{al}/C_{st}=3' \dots 4,7''$	Зміна показників втрат в діапазоні електромагнітної керованої змінної $K_{p(cu(al))}=8' \dots 24''$
1	2	3	4	5
Однофазні трансформатори та реактори				
cu	$\Pi_{кспе}^*$; $\Pi_{крте}^*$	1,46...1,13	(2,08...1,75)' (2,31...1,97)''	(1,95...1,57)' (2,79...2,56)''
al	$\Pi_{кспе}^*$; $\Pi_{крте}^*$	0,84...0,58	(1,35...1,04)' (0,85...0,58)''	
Трифазні трансформатори та реактори при $K_{кк}=0,931$, $K_{кв(п)(ш)}=1$				
cu	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{квве}^*$	1,19...1,02	(1,52...1,38)' (1,66...1,44)''	(1,44...1,27)' (1,89...1,77)''
al	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{квве}^*$	0,87...0,72	(1,17...1,01)' (1,27...1,11)''	
cu	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{квпе}^*$	1,72...1,41	(2,33...2,01)' (2,56...2,21)''	(2,17...1,85)' (1,89...2,87)''
al	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{квпе}^*$	1,23...0,94	(1,68...1,38)' (1,91...1,58)''	
cu	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{кшпе}^*$	0,42...0,39	(0,47...0,44)' (0,48...0,46)''	(0,46...0,44)' (0,49...0,43)''
al	$\Pi_{ккке}^*$; $\Pi_{кшпе}^*$	0,35...0,27	(0,41...0,38)' (0,45...0,41)''	

1	2	3	4	5
<i>cu</i>	$\Pi_{кккк}^*$; $\Pi_{кппе}^*$	2,49...2,37	(2,86...2,76)'	(2,67...2,49)'
			(2,97...2,89)''	
<i>al</i>	$\Pi_{кккк}^*$; $\Pi_{кппе}^*$	1,81...1,53	(2,38...2,09)'	(2,82...2,81)''
			(2,44...2,49)''	

Також в шостому розділі на основі розроблених в роботі математичних моделей виконано порівняння розрахункових і фактичних характеристик трифазних трансформаторів ТМ40/10У1 та ТМН 2500/35У1 серійного випуску, які практично співпадають, а також визначено розрахункові характеристики їх інноваційних аналогів. Значення вказаних характеристик та їх зміни представлені в табл. 5.

Таблиця 5. – Порівняння реальних і розрахункових характеристик варіантів серійних трансформаторів та їх аналогів

Позначення варіанту трансформатора	Маса, кг.	Зниження маси, %/кг	Загальні втрати активної потужності, Вт	Зниження втрат, %/Вт	ККД	Підвищення ККД, %
ТМ40/10У1	154	1,6/2,47	1030	2,5/26	0,975	0,20
Аналог з магнітопроводом, (рис. 3)	151,52		1004		0,977	
ТМН 2500/35У1	3675	1,55/57,0	23980	3,16/759	0,99	0,20
Аналог з магнітопроводом, (рис. 3)	3618		23221		0,992	

В додатку А на основі методу цільових функцій з безрозмірними показниками технічного рівня виконано порівняння середнього теплового навантаження еквівалентних обмоток з $K_{зо}=0,3$ однофазних електромагнітних систем (рис. 6, а-е). Визначено, що стрижнева електромагнітна система має покращене значення вказаного навантаження відносно броньової електромагнітної системи при мідних та алюмінієвих обмотках на 36,63% та на 32,17%, а радіальна тристрижнева електромагнітна система має покращене значення такого навантаження відносно стрижневої електромагнітної системи при мідних та алюмінієвих обмотках на 28,19% та на 31,93%, що обумовлено суттєвими відмінностями "відкритих" поверхонь охолодження обмоток.

У додатку Б наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та навчальний процес.

ВИСНОВКИ

1. В дисертаційній роботі вирішено наукове завдання узагальненого оптимізаційного обґрунтування перспективних інноваційних конструктивно-технологічних виконань статичних електромагнітних систем, що може бути використано при проектному синтезі та удосконаленні однофазних і трифазних трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами.

2. Відсутність потенціалу подальшого конструктивно-структурного розвитку електромагнітних систем з прямокутними і круговими утворюючими контурами спонукає до застосування нетрадиційних структурно-геометричних перетворень електромагнітних систем, зокрема застосування багатограних утворюючих контурів.

3. Числове зіставлення неоднакових структурно-геометричних і технологічних виконань електромагнітних систем можливе універсальним методом структурного і структурно-параметричного синтезу електромеханічних пристроїв на основі цільових функцій з безрозмірними оптимізаційними складовими, що визначають основні показники технічного рівня за допомогою універсальних відносних геометричних і електромагнітних керованих змінних.

4. Встановлено ідентичність проектних діапазонів змін електромагнітної керованої змінної при оптимізаційному зіставленні втрат активної потужності при застосуванні в обмотках як міді, так і алюмінію.

5. Створені математичні моделі основних показників технічного рівня відповідно планарних стрижневої і броньової та просторової радіальної тристрижневої однофазних електромагнітних систем та отримані значення відмінностей цих структур і показані переваги тристрижневої структури. Зокрема при $K_{30}=0,3$ та мідних обмотках радіальна тристрижнева електромагнітна система має покращені значення показників технічного рівня відносно стрижневої системи, а саме: маси на 1,46% і вартості на 2,2% при $C_{cu}/C_{st}=4,5$ та втрат активної потужності на 2,4% при $K_{pcu(al)}=8$. Покращення обумовлено зменшенням об'єму сталі кутових зон та середніх довжин витків при секціонуванні і розташуванні обмоткових катушок на трьох стрижнях.

6. Застосування в трифазних планарних електромагнітних системах замість кругових прямокутних утворюючих контурів призводить до покращення (зниження) екстремумів показників. Відносно системи з мідними обмотками та 16 пакетами сталі в половині кругового контуру і при $K_{30}=0,3$ показники маси, вартості та втрат при прямокутних контурах знижуються відповідно на 2,5% і 2,7% при $C_{cu}/C_{st}=4,5$ та 2,8% при $K_{pcu(al)}=8$. Вказане покращення обумовлене зменшенням об'єму ярем при паралельних поверхнях обмоткових вікон. Це вказує на доцільність підвищення межі потужності електромагнітного статичного пристрою з прямокутними утворюючими контурами при застосуванні відомих засобів підвищення надійності обмоток.

7. При використанні базового методу отримало подальший розвиток оптимізаційне моделювання різновидів трифазних планарних стрижневих електромагнітних систем з круговими утворюючими контурами обмоткових катушок і стрижнів, які відрізняються круговими утворюючими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з пакетів електротехнічної сталі різних розмірів. Зокрема плоскі внутрішні поверхні ярем забезпечують покращення значень показників технічного рівня: маси на 0,48% і вартості на 0,64% при $C_{al}/C_{st}=4,5$ та втрат на 0,67% при $K_{pcu(al)}=8$ електромагнітних систем, що зформовані з трьох пакетів листів електротехнічної сталі в половині кругового перерізу стрижня та при $K_{30}=0,3$. Також вперше створені математичні моделі основних показників технічного рівня різновидів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними восьмигранними утворюючими контурами обмоткових катушок і стрижнів, які відрізняються восьмигранними утворюючими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з пакетів електротехнічної сталі різних розмірів. Наприклад застосуванням рівнобічних восьмигранних утворюючих контурів в системах з мідними обмотками і з $K_{кв}=0,9$ (три пакети в половині контуру) досягається покращення значень показників технічного рівня: маси на 0,89% і вартості на 1,16% при $C_{cu}/C_{st}=4,5$ та втрат на 1,2% при $K_{pcu(al)}=8$ відносно систем, магнітопроводи яких зформовані з трьох пакетів листів електротехнічної сталі в половині кругового контуру та при $K_{30}=0,3$. Показано, що при зниженні трудомісткості виробництва та підвищенні електродинамічної стійкості електромагнітних систем з рівнобічними восьмигранними утворюючими контурами ($K_{кв(п)}=0,931$) відносно електромагнітних систем з круговими утворюючими контурами та $K_{кв} \leq 0,9$ досягається деяке покращення основних показників технічного рівня, а при $K_{квп}=1$ досягається деяке покращення також і відносно системи з $K_{кв} \geq 0,93$, що обумовлено меншими середніми довжинами витків обмоток.

8. Створені математичні моделі основних показників технічного рівня трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними шестигранними утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок та плоскими внутрішніми поверхнями ярем східчастого перерізу. Завдяки практично повному заповненню електротехнічною сталлю шестигранних утворюючих контурів стрижнів ідентичними прямокутними пластинами електротехнічної сталі та при суттєвому зниженні трудомісткості виготовлення забезпечується певне покращення основних показників технічного рівня. Наприклад, відносно планарного аналога з мідними обмотками і круговими утворюючими контурами при трьох пакетах листів електротехнічної сталі в половині перерізу стрижня та із значенням $K_{30}=0,3$, показники маси і вартості при $C_{cu}/C_{st}=4,5$ та втрат при $K_{pcu(al)}=8$ і шестигранних контурах знижуються, відповідно, на 1,8%, 2,5%, 2,72%.

9. На основі базового методу вперше визначені рівняння середнього теплового навантаження обмоток варіантів однофазних електромагнітних систем та визначена можливість покращення теплового стану симетричної радіальної тристрижневої системи відносно планарних аналогів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в виданнях, занесених до міжнародної наукометричної бази Scopus і фахових виданнях України категорії "А".

1. Stavinskiy A. Possibilities of improving the transformers and reactors on the basis of multiple counters of the rods / A. Stavinskiy, O. Parhtyr, A. Tsyganov, R. Stavinskiy // IEEE «International Conference on modern electrical and energy systems»: – 2017. – pp. 176-179 (*Scopus, Web of Science Core Coliection*).

2. Stavinskiy A. Dependence of the Indicators of Three-phase Transformers with Planar Plate Magnetic Wires from Variants of Rod Configuration / A. Stavinskiy, V. Shebanin, E. Avdieieva, A. Tsyganov, R. Stavinskiy, O. Sadovoy, // Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES. – 2019. September. – № 8896451. – pp. 102-105. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896451. (*Scopus, Web of Science Core Coliection*).

3. Ставинский А.А., Цыганов А.Н. Конструктивно-технологические предложения усовершенствования однофазного трансформатора с шихтованным магнитопроводом / А.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Електротехніка і електромеханіка. – 2020. – №6. с. 11-17. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.6.02. (*Фахове видання категорії "А", Web of Science Core Coliection Emerging Sources, Ulrich`s periodicals directory та інші*).

Статті в фахових і провідних виданнях України, занесених до інших міжнародних наукометричних баз даних:

4. Ставинский А.А. Направление усовершенствования индукционных статических устройств на основе электромагнитных систем с многоплоскостными образующими поверхностями и метод их структурной оптимизации / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, О.О. Плахтырь, А.Н. Цыганов // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №40. – с.115-124.

5. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массостоймых показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 5 (81). – с. 106-112. (*Ulrich`s periodicals directory та інші*).

6. Ставинский А. А. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов //

Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №7(77). – с. 47-52. (*Ulrich's periodicals directory та інші*).

7. Ставинский А.А. Технические решения трехфазного маломощного компактного трансформатора / А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Вісник НТУ "ХПІ" : Зб. наук. праць. Сер: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ "ХПІ". 2018. – № 5 (1281). – с. 116-122. (*Фахове видання категорії "Б", Ulrich's periodicals directory, Google Scholar та інші*).

8. Ставинський А.А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (масовартістні показники) / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Циганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 4 (1329). – с. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295.2019.4.05 (*Фахове видання категорії "Б", Ulrich's periodicals directory, Google Scholar та інші*).

9. Ставинський А.А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів шихтованих магнітопроводів (втрати активної потужності) / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Циганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", – 2019 – №4 (1329) – с. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295. 2019. 4.06. (*Фахове видання категорії "Б", Ulrich's periodicals directory, Google Scholar та інші*).

10. Циганов О.М. Залежність показників трифазних трансформаторів і реакторів від заповнення сталлю кругових і восьмигранних контурів стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів / О.М. Циганов // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: – Харків : НТУ "ХПІ". – 2020. – №3(1357). – с. 15-23. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.03 (*Фахове видання категорії "Б", Ulrich's periodicals directory, Google Scholar та інші*).

11. Циганов О.М. Удосконалення трифазних реакторів з планарними шихтованими магнітопроводами на основі шестигранних контурів стрижнів / О.М. Циганов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2020. – Вип. 1(120) – с. 160-165. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.1.160-165 (*Фахове видання категорії "Б", Ulrich's periodicals directory, Google Scholar та інші*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Ставинський Р.А. Підсилення електродинамічної стійкості обмотки та зниження матеріаломісткості статичних індукційних пристроїв. / Р.А. Ставинський, О.М. Циганов // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2008. с. 126-132.

13. Ставинский Р.А. Варианты структур индукционных статических устройств с многогранными образующими контурами электромагнитных систем / Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов, // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф., Севастополь: Сев НТУ. – 2010. – с. 30-31.

14. Ставинський Р.А. Дослідження осьових зусиль в обмотках трансформаторів при короткому замиканні. / Р.А. Ставинський, О.М. Циганов // Вісник аграрної науки причорномор'я. Випуск 2(53). 2010. с. 305-310.

15. Ставинский А.А. Проблема и способ повышения электродинамической устойчивости индукционных статических устройств. / А.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв: НУК, 2011. с. 43-48.

16. Ставинский А.А. Анализ целевых функций и управляемых переменных оптимизационных расчетов трансформаторов и реакторов / А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский, А.С. Садовый, А.Н. Цыганов // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК. – 2018. с. 45-49.

17. Цыганов О.М. Напрямок удосконалення трансформаторів на основі секціонування та комбінації марок сталі шихтованих магнітопроводів / О.М. Цыганов // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки. Національний університет кораблебудування. Миколаїв: НУК. – 2020. – с. 28-30.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. Обмотка статичного індукційного пристрою: Пат. №39631 UA, МПК НО1F 27/28, НО1F 27/30, НО1F 27/32 / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Цыганов. (Україна) – Заявл. 18.07.2008; Опубл. 10.03.2009, Бюл. №5. – 3 с.

19. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою: Пат. 91755 UA, МПК НО1F3/00, НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, Цыганов О.М. (Україна) – Заявл. 25.08.2010; Опубл. 25.08.2010. Бюл. №16. – 3с.

20. Магнітопровід індукційного статичного пристрою: Пат. №100077, МПК НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.С. Садовый, О.М. Цыганов (Україна) – Заявл. 20.04.2011; Опубл. 12.11.2012, Бюл. №21. – 8с.

21. Планарний магнітопровід індукційного статичного пристрою: Пат. 121405 UA, МПК НО1F3/00, НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Цыганов, О.С. Цыганова, (Україна) – Заявл. 19.04.2017; Опубл. 11.12.2017. Бюл. №23. – 8с.

22. Магнітопровід трансформатора: Пат. №136570 UA, МПК НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Цыганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовый, Л.В. Вахоніна. (Україна) – Заявл. 04.03.2019; Опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. – 6с.

23. Спосіб виготовлення магнітопроводу індукційного статичного пристрою: Пат. №136320 UA, МПК НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Цыганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовый, Л.В. Вахоніна. (Україна) – Заявл. 13.03.2019, Бюл. 15. – 9с.

АНОТАЦІЯ

Цыганов О.М. "Структурний синтез і параметрична оптимізація трансформаторів та реакторів з шихтованими магнітопроводами". – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.01 "Електричні машини й апарати" (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). Державний університет "Одеська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2021.

В дисертаційній роботі отримали подальший розвиток оптимізаційні моделі однофазних планарних стрижневої і броньової електромагнітних систем з прямокутними утворюючими контурами, а також варіантів трифазної планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами, що надало можливість порівняльного аналізу традиційних і нових конструктивних варіантів на основі узагальнених цільових функцій показників технічного рівня та обґрунтування

доцільності підвищення межі потужності трифазних електромагнітних пристроїв з прямокутними утворюючими контурами. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня радіальної тристрижневої електромагнітної системи, які дозволяють оцінити ефективність структурних перетворень при проектуванні однофазних трансформаторів і реакторів. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними восьмигранними утворюючими контурами, що забезпечує науково-практичне обґрунтування перспективних геометричних конфігурацій активних елементів. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації показників технічного рівня варіантів трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з рівнобічними шестигранними утворюючими контурами, на основі яких визначена доцільність спрощення виготовлення реакторів формуванням стрижнів з ідентичних прямокутних листів електротехнічної сталі.

Ключові слова: однофазні і трифазні трансформатори і реактори, прямокутні, кругові, рівнобічні восьмигранні і шестигранні контури, шихтований магнітопровід, цільові функції, оптимізація, порівняльний аналіз.

ABSTRACT

Tsyganov O. M. "Structural synthesis and parametric optimization of transformers and reactors with laminated magnetic circuits". - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.09.01 "Electric Machines and Apparatuses" (141-Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics). Odessa polytechnic state university of of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2021.

In the dissertation work, optimization models of a single-phase planar rod and armored electromagnetic system with rectangular generatrix contours, as well as variants of a three-phase electromagnetic system with circular generatrix circuits, as well as variants of a three-phase electromagnetic system with circular generatrix circuits were further developed, which allowed comparative analysis of traditional and new constructive options based on generalized target functions of technical level indicators and justification of the feasibility of increasing the power limit of three-phase ESPs with rectangular generating circuits.

First, generalized models of optimization indicators of the technical level of a radial tristryzhnev electromagnetic system are obtained, which make it possible to evaluate the effectiveness of structural transformations in the design of single-phase transformers and reactors. First, generalized models of optimization of indicators of the technical level of variants of a three-phase planar rod electromagnetic system with equilateral octahedral generatrix contours are obtained, provides a scientific and practical substantiation of promising geometric configurations of active elements.

First, generalized models of optimization of indicators of the technical level of variants of a three-phase planar rod electromagnetic system with equilateral hexagonal generating contours were obtained, on the basis of which the expediency of simplifying the manufacture of reactors by forming rods from identical rectangular sheets of electrical steel was determined.

Keywords: single-phase and three-phase transformers and reactors, rectangular, circular, hexagonal and octagonal circuits, shunt magnetic conductor, objective functions, optimization, comparative analysis, heat load.

Підписано до друку 28.07.2021 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.
Ум.-друк. арк. 1,25.
Наклад 100 прим. Зам. № 8243

Надруковано в КП "Миколаївська обласна друкарня"
54010, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 3.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 1339 від 24.04.2003 р.