

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

На правах рукопису

УДК 621.314.21



Авдєєва Олена Андріївна

ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ В ОБМЕЖЕНІ
ОБ'ЄМИ ОБ'ЄКТІВ ПІДВОДНОЇ ТЕХНІКИ

05.09.01. Електричні машини й апарати

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Блінцов Володимир Степанович

Миколаїв 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
Розділ 1. СТАН РОЗВИТКУ І ЗАДАЧІ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО – ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ РОЗПОДІЛЬНИХ І СПЕЦІАЛЬНИХ КОМПАКТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ МАЛОЇ І СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	12
1.1. Технічні об’єкти і системи з трансформаторами, що встановлені в об’єми та оболонки обмеженого діаметру.....	12
1.2. Особливості традиційних структур, конфігурацій і технологій виробництва елементів статичних електромагнітних систем.....	18
1.3. Постановка основної цілі дослідження.....	36
1.4. Висновки до розділу 1.....	38
Розділ 2. ПОДАЛЬШИЙ РОЗВИТОК КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДУ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СТАТИЧНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ.....	41
2.1. Перетворення структур і конфігурацій утворюючих контурів елементів електромагнітних систем з метою удосконалення індукційних статичних пристроїв.....	41
2.2. Цільові функції та показники технічного рівня порівняльного аналізу варіантів електромагнітних систем.....	53
2.3. Розширення можливостей універсального методу порівняльного аналізу електромагнітних систем.....	62
2.4. Базові рівняння та особливості порівняльного аналізу статичних електромагнітних систем	65
2.5. Висновки до розділу 2	75
Розділ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З ПРЯМОКУТНИМИ ПЕРЕРІЗАМИ СТРИЖНІВ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ.....	77

3.1. Масовартісні показники базової планарної системи зі стрижневим магнітопроводом.....	77
3.2. Показник втрат активної потужності базової планарної системи з стрижневим магнітопроводом.....	81
3.3. Масовартісні показники просторової радіальної системи з двоконтурними фазними елементами і ромбічними обмотковими вікнами магнітопроводу.....	87
3.4. Показник втрат активної потужності просторової радіальної системи з двоконтурними фазними елементами і ромбічними обмотковими вікнами	92
3.5. Висновки до розділу 3	96
Розділ 4. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНИХ ПРОСТОРОВИХ АКСИАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З ДВОКОНТУРНИМИ ФАЗНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ВИТИХ МАГНІТОПРОВОДІВ	97
4.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими контурами.....	97
4.2. Показник втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами.....	104
4.3. Масовартісні показники системи з шестигранними утворюючими контурами.....	110
4.4. Показник втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами.....	117
4.5. Висновки до розділу 4	120
Розділ 5. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ ПРОСТОРОВОЇ РАДІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ДВОКОНТУРНИМИ ФАЗНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ВИТИХ МАГНІТОПРОВОДІВ.....	122
5.1. Масовартісні показники системи з прямокутними перерізами стрижнів	122
5.2. Показник втрат активної потужності системи з прямокутними перерізами стрижнів.....	127

5.3. Масовартісні показники системи з шестигранними перерізами стрижнів.....	130
5.4. Показник втрат активної потужності системи з шестигранними перерізами стрижнів.....	134
5.5. Висновки до розділу 5	138
Розділ 6. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ ПРОСТОРОВОЇ АКСИАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З СУМІЩЕНИМИ ФАЗНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ, ЗВЕДЕНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ТА МОЖЛИВІСТЬ ОТРИМАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ.....	139
6.1. Показники маси, вартості і втрат активної потужності базової системи з витим стиковим магнітопроводом.....	139
6.2. Масовартісні показники системи з шестигранними утворюючими контурами комбінованого стикового магнітопроводу.....	144
6.3. Показники втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами комбінованого стикового магнітопроводу.....	152
6.4. Рівняння оптимізації електромагнітних систем за загальним критерієм та результати порівняльного аналізу їх варіантів за окремими критеріями.....	156
6.5. Висновки до розділу 6.....	158
ВИСНОВКИ.....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	166
ДОДАТКИ.....	182
Додаток А. Обґрунтування ідентичності відносних складових показників технічного рівня трансформатора і реактора, що є функціями універсальних геометричних керованих змінних.....	182
Додаток Б. Методика розрахунку варіантів активної частини трифазного трансформатора з використанням цільових функцій відносних показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними (на прикладі трансформатора ТСЗМ – 40 – 74. ОМ5).....	186
Додаток В. Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи....	193

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ТТ – трифазний трансформатор
ЕМС – електромагнітна система
ММ – математична модель
ЦФ – цільова функція
КЗ – керована змінна
УК – утворюючий контур
ПТР – показник технічного рівня
ЕТС – електротехнічна сталь
ВНР – втрати неробочого руху
ПМ – провідниковий матеріал
ВКЗ – втрати короткого замикання
ЗМП – зовнішнє магнітне поле
ВММ – векторний магнітний момент
ЕМН – електромагнітні навантаження

ВСТУП

Головним напрямом розвитку електромеханіки у ХХІ сторіччі є комплексне збереження енергетичних і матеріальних ресурсів при виробництві електромеханічних пристроїв [1 – 3]. Найбільш вагомий внесок в розвиток трансформаторобудування внесли такі вчені як М.О. Доліво-Добровольський, Р. Ріхтер, М. Відмар, В. Роговський, Г.М. Петров, П.М. Тихомиров, І.М. Постніков, С.Б. Васютинський, Л.В. Лейтес, В.К. Лебедєв, І.В. Пентегов, Г.В. Пуйло, А.М. Кравченко, Ю.Б. Бородулін, Р.Х. Бальян, С.Є. Зірка та інші.

Відповідно до [4] основою трансформатора є дві головні компоненти – магнітна система (магнітопровід) та система обмоток. Вказані компоненти можна об'єднати поняттям електромагнітна система (ЕМС).

В активні елементи ЕМС, конструктивні і ізоляційні складові будови одиниць трансформаторного обладнання вкладається значна кількість електротехнічних і конструкційних матеріалів високої вартості. У зв'язку з цим задачі подальшого зниження витрат електроенергії, витрат матеріалів, трудомісткості і енергоємності виробництва, а також підвищення електродинамічної стійкості та надійності трансформаторів є дуже важливими.

Актуальність теми. «Традиційними» способами рішення задач підвищення технічного рівня рухомих і статичних електричних машин є використання удосконалених електротехнічних матеріалів, методик оптимізаційних розрахунків та систем охолодження [5 – 14]. Однак можливості подальшого розвитку електромеханічних пристроїв, зокрема спеціального призначення, вказаними способами в рамках традиційних («класичних») структур і конструкцій ЕМС є обмеженими. Згідно [5 – 7, 13 – 19], необхідні нові нетрадиційні підходи до удосконалення електричних машин на основі системного підходу, структурних перетворень і структурної оптимізації їх ЕМС при використанні математичних моделей (ММ) з цільовими функціями (ЦФ), що містять універсальні та відносні керовані змінні (КЗ) [15, 16].

Крім виробництва ефективних розподільчих ТТ існує необхідність розробки і вдосконалення спеціальних компактних, маломагнітних та віброударостійких ТТ,

які призначені для вбудовування в циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметру [17 – 19]. Подальше удосконалення ТТ широкого призначення можливо сумісно з використанням сучасних досягнень електроматеріалознавства і автоматизованого проектного синтезу [8 – 11], на основі нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень ЕМС.

На основі викладеного, пошук нових структур і утворюючих контурів (УК) елементів магнітопроводів, виткових фазних котушок та обмоткових вікон, що забезпечують зниження втрат, матеріаломісткості і трудомісткості виробництва, а також підвищення компактності і надійності ТТ різного призначення, має особливу актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота входить до комплексу науково-дослідних робіт у напрямку енергоресурсозбереження, зокрема на водному транспорті, а також пошукових підводно-технічних робіт, що проводяться у національному університеті кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова. Вказані роботи виконуються у відповідності зі сукупністю документів, зокрема Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»; комплексною програмою «Наукові основи електроенергетики» Національної академії наук України; державною науково-технічною програмою «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології». Автор брала участь у виконанні комплексної науково-дослідної роботи за темою №1814 «Розробка теоретичних основ створення «інтелектуальних» підводних апаратів-роботів» (№ державної реєстрації 0111U002314) в частині трансформаторного обладнання.

Мета і задачі дослідження. Робота направлена на вирішення питань створення теоретичної основи вдосконалення ТТ на основі розробки конструктивно-технологічних пропозицій і ММ ЕМС, що забезпечують покращення компактності та інших ПТР при використанні варіантів магнітопроводів, обмоткових котушок і вікон з нетрадиційною структурою, або конфігурацією елементів. Основною метою є дослідження впливу конструктивного забезпечення підвищеної компактності та зручності вбудовування ТТ в об'єми обмеженого діаметру на показники маси і вартості просторових ЕМС, а також втрати активної потужності.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі визначені і вирішені такі задачі:

- аналіз особливостей використання трансформаторного обладнання в об'єктах спеціальної техніки;
- аналіз тенденцій удосконалення та створення компактних ЕМС ТТ на основі перетворення структур магнітопроводів і УК стрижнів, обмоткових катушок та вікон;
- подальший розвиток методу оптимізації і порівняльного аналізу ЕМС на основі ММ з узагальненими ЦФ, що містять безрозмірні показники технічного рівня (ПТР) та універсальні відносні геометричні КЗ;
- розробка на основі методу ПТР і універсальних відносних КЗ ММ двох варіантів традиційних структур ЕМС, а саме планарної з суміщеними фазними елементами, прямокутними УК та прямокутним зовнішнім контуром шихтованого магнітопроводу, а також просторової аксіальної з двоконтурними фазними елементами, круговими УК та витим магнітопроводом;
- розробка ММ варіантів просторових ЕМС з двоконтурними фазними елементами, що відрізняються розташуванням у просторі і конфігураціями обмоткових вікон та стрижнів шихтованого і витих магнітопроводів;
- розробка ММ просторової аксіальної ЕМС з суміщеними фазними елементами, шестигранними УК та комбінованим стрічково-пластинчастим стиковим магнітопроводом, а також уточнення ММ просторової аксіальної ЕМС з секторними УК і суміщеними фазними елементами витого стикового магнітопроводу.

Об'єкт дослідження – просторові ЕМС ТТ для встановлення в обмежені циліндричні та сферичні об'єми.

Предмет дослідження – ПТР варіантів ЕМС ТТ з традиційними і перетвореними структурами і конфігураціями активних елементів.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач були використані теорія електромагнітних перетворювачів, метод експертної оцінки, метод побудови ММ з узагальненими ЦФ, що містять безрозмірні ПТР та універсальні відносні геометричні КЗ.

Наукова новизна одержаних результатів:

- дістав подальший розвиток метод ММ з безрозмірними складовими узагальнених ЦФ та універсальними відносними геометричними КЗ доповненням сукупності вказаних складових – ПТР ЕМС показником контурного об'єму та визначенням, на основі вказаного методу, вигляду ЦФ капіталізованої вартості ТТ;

- вперше на умовах ідентичності електромагнітної потужності виконано порівняння оптимізованих ПТР різновидів ЕМС – базової планарної та варіантів просторових аксіальних і радіальних ЕМС, які відрізняються конструкціями та технологіями виготовлення, що надало можливість узагальненого аналітичного визначення переваг нетрадиційних просторових ЕМС;

- вперше розроблено ММ просторової радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, ромбічними обмотковими вікнами та прямокутними перерізами стрижнів, що створює основу проектування компактних ТТ з шихтованими «вперепліт» магнітопроводами;

- вперше розроблено ММ просторової аксіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, шестигранными УК та витим магнітопроводом, що забезпечує основу розробки компактних маломагнітних ТТ з анізотропними магнітопроводами, у яких відсутні ділянки змін напрямку магнітного потоку відносно текстури ЕТС;

- вперше розроблено варіанти ММ просторової радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, секторними обмотковими вікнами та з прямокутними і шестигранными перерізами стрижнів витих магнітопроводів, що надає можливість розробки компактних ТТ з анізотропними магнітопроводами, які характеризуються відсутністю ділянок змін напрямку магнітного потоку відносно текстури ЕТС та технологією виготовлення, як у витих планарних магнітопроводів;

- вперше розроблено ММ просторової аксіальної ЕМС з суміщеними фазними елементами і шестигранными УК, що створює основу розробки компактних маломагнітних ТТ при використанні максимально спрощеної технології побудови комбінованих стикових магнітопроводів та магнітопроводів з комбінацією ізотропної і анізотропної ЕТС.

Практичне значення отриманих результатів:

- запропоновані і запатентовані нові конструкції ЕМС на основі нетрадиційних УК, що забезпечують підвищення компактності, інших ПТР та знижують трудомісткість виготовлення;
- запропоновано ряд технологічних операцій та запатентовані способи виготовлення магнітопроводів статичних ЕМС з покращеними ПТР;
- запропоновані варіанти комплектації систем електрообладнання підводних апаратів відкритого рамного та корпусного (обтічного, циліндричного, сферичного) різновидів компактними трифазними трансформаторами групового виконання та з трифазними магнітопроводами;
- розроблено методику визначення оптимальних геометричних співвідношень елементів варіантів трифазних ЕМС за основними універсальними геометричними КЗ та ПТР ТТ.

Результати досліджень використані у Державному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» Державного концерну «Укроборонпром» при виконанні Державного оборонного замовлення зі створення перспективного корабля класу «корвет» проекту 58250, у розробках конструкторського відділу публічного акціонерного товариства «Інгул» (Миколаївський трансформаторний завод), а також при виконанні планових робіт в НДІ підводної техніки і технологій та у навчальному процесі і дипломному проектуванні бакалаврів, спеціалістів і магістрів електромеханіки НУК імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, розробки та результати дослідження, які виносяться на захист, одержані особисто автором. З загальної кількості публікацій за темою досліджень 5 статей у фахових та науковометричних журналах і збірниках та 8 статей в матеріалах наукових конференцій виконано автором особисто. У спільних роботах [39, 48, 91 – 95, 100 – 102, 116, 119, 120, 122, 130, 131, 132] автору належать аналіз, удосконалення технічних рішень, а також розробка ММ, методик та виконання розрахунків ПТР варіантів ЕМС.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи виставлялися, доповідалися та були схвалені на: Всеукраїнських науково-технічних

конференціях з міжнародною участю «Проблеми автоматики і електрообладнання транспортних засобів» (2011 – 2014, Миколаїв); Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика – (SIEMA)» (2011, Харків); Всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (2012 – 2014, Миколаїв); Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці (2013, 2014, Миколаїв); Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (2013, Севастополь); Секції семінару Національної академії наук України «Проектний синтез і дослідження електромагнітних процесів електричних машин і трансформаторів» (2015, Одеса).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображений у 24 наукових статтях, зокрема 14 – у фахових і науковометричних журналах та спеціалізованих збірниках наукових праць, в тому числі трьох зарубіжних, 10 – в матеріалах доповідей наукових конференцій. Також отримано 2 патенти та 4 рішення про видачу патентів України на винахід і корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить: перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, 38 рисунків, 29 таблиць, перелік використаних літературних джерел з 136 найменувань, 3 додатки. Викладена на 200 сторінках, у тому числі 151 сторінка основного тексту, 14 окремих сторінок рисунків та таблиць, 16 сторінок літературних джерел, 19 сторінок додатків.

РОЗДІЛ I

СТАН РОЗВИТКУ І ЗАДАЧІ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО –
ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ РОЗПОДІЛЬНИХ І СПЕЦІАЛЬНИХ КОМПАКТНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ МАЛОЇ І СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Технічні об'єкти і системи з трансформаторами, що встановлені в об'єми та оболонки обмеженого діаметру

Сучасний стан технічного прогресу характеризується інтенсифікацією робіт по підводним дослідженням, розвідці та засвоєнню шельфу, а також розширенням досліджень позаземного простору. Важливими стратегічними цілями, що пов'язані з можливостями подальшого розвитку і існування людства, є майбутнє засвоєння, на додаток до шельфу, значних глибин земного океану, сонячної системи і дальнього космосу. Інтенсифікується також вживання наземних і підземних ресурсів, зокрема рідинно-газових паливно-енергетичних та водних. У зв'язку з цим, в розвинутих державах світу приділяється суттєва увага розробці джерел енергії, що відтворюються, у тому числі енергії морських хвиль, приливів і відливів. Рішення названих складних сучасних завдань потребує безперервного удосконалення і розвитку відповідних технічних засобів. Ці засоби включають системи електрообладнання і автоматики зі спеціальними електромеханічними, електронно-мікропроцесорними і приборними комплексами. Вказані комплекси містять габаритні і металоемні компоненти – вбудовані і занурені трансформатори. Важливими показниками подібних трансформаторів є компактність, конструктивна відповідність блокам електрообладнання і зручність вбудовування. У теперішній час в Україні експлуатуються, а спеціалізованими заводами виготовляються ТТ з традиційними рішеннями планарних ЕМС [20 – 28]. Вказані планарні ТТ з прямокутними конфігураціями елементів активної частини та зовнішнього корпусу не відповідають умовам компактного розміщення у циліндричних та сферичних об'ємах обмеженого діаметру об'єктів спеціальної техніки [17 – 19].

Апарати і комплекси підводного пошукового, підводно-технічного і авіаційно-космічного призначень, а також суднові навесні камери («дзвони») занурення акванавтів (водолазів) та насосно-бурового обладнання [29 – 44], згідно виконаному в [38, 39] аналізу, відрізняються типами зовнішнього корпусу і оболонки розміщення елементів технічних систем. Підводно-технічні апарати поділяються на обтічні (рис. 1.1, а, б) і рамні (рис. 1.1, в), а також на такі, що містять міцні сферичні (рис. 1.1 а) та циліндричні трубчаті (рис. 1.1 , б, в) оболонки обмеженого діаметру.

Розробленими в Миколаївському кораблебудівному інституті (НУК імені адмірала Макарова) підводними технічними об'єктами [31] з електрообладнанням, що розташоване в циліндричних трубчатих оболонках, є саморухомі апарати «Атлеш» і «The North Star», а також опускні рамні апарати «Агент – 1» (рис. 1.2) та «Софокл». Підводними технічними об'єктами [33, 35] з внутрикорпусними і зовнішніми сферичними оболонками комплектуючого обладнання є самохідні апарати «Скарус» (рис. 1.3) та «МТК – 200» (рис. 1.4).

Прикладами підводних технічних об'єктів, що містять «навесні» ТТ, є опускні водолазні камери глибоководних комплексів «ГВК» [19, 33]. Такі комплекси базуються на суднах-носіях і забезпечують занурення акванавтів на глибини до 500 м при морському підводному виконанні і на глибини до 1000 м при герметичному виконанні електромеханічних пристроїв. Електропостачання системи електрообладнання (рис. 1.5, а) водолазної камери, що містить електродвигуни з лінійною напругою 27 В, здійснюється за допомогою ТТ через кабель-шланг-трос з вхідною напругою 1000 В на судні-носії. Занурений понижуючий ТТ з вторинною напругою 27 В розміщений у окремому корпусі у верхній частині камери (рис. 1.5, б). Знижена напруга використовується для живлення електродвигунів агрегатів електричного підігріву і очищення дихально-газової суміші та кіл внутрішнього електричного освітлення водолазної камери.

Відомі також розробки хвильових і приливних електростанцій [30], які можуть комплектуватися «підвісними» і «обтічними» ТТ. Приливні електростанції містять турбіни з генераторами в тунельних циліндричних корпусах, що з'єднують наповнювані басейни з морем.

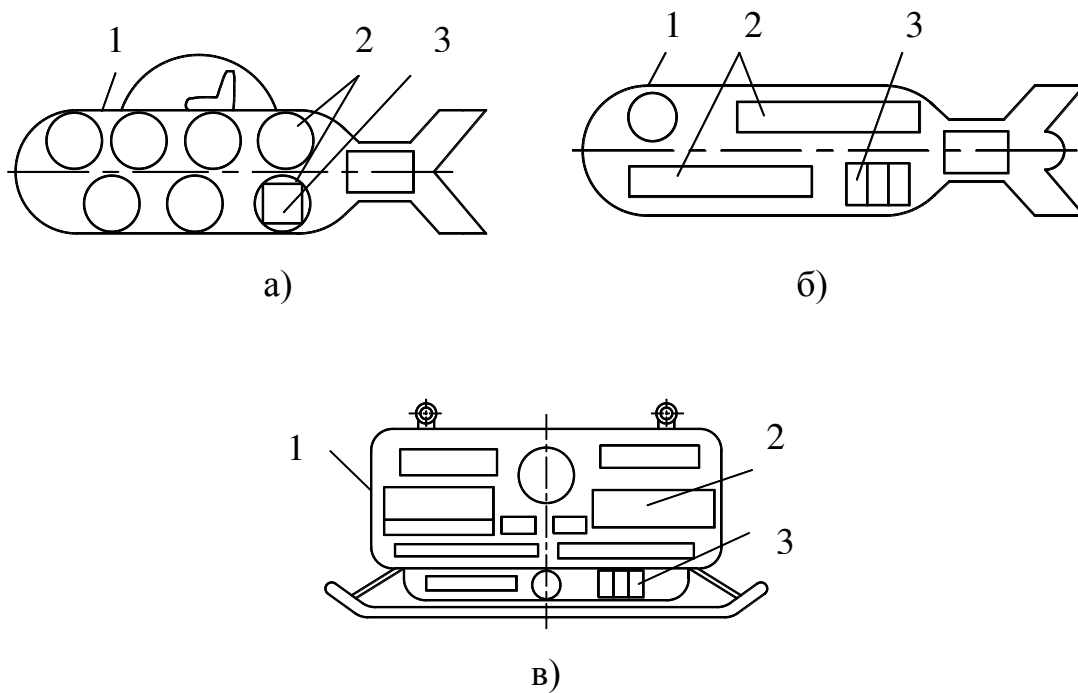


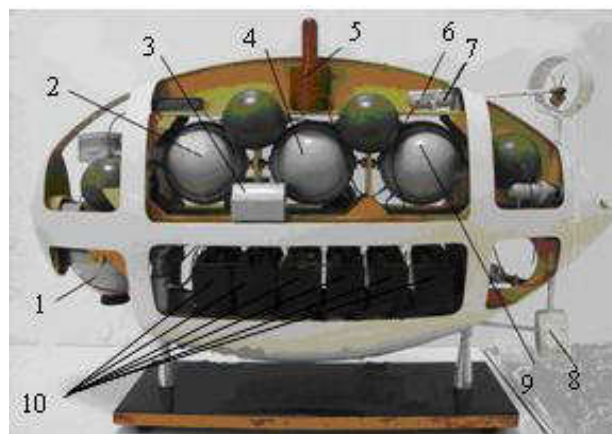
Рисунок 1.1– Конструктивні схеми саморухомих обтічних людного (а) та безлюдного (б), а також опускного (в) підводних апаратів:
 1 – корпус; 2 – оболонка системних блоків і елементів; 3 – трансформатор.



Рисунок 1.2 – Опускний підводний апарат рамного виконання «Агент – 1»



а)



б)

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд (а) та розташування обладнання (б) безлюдного автономного саморухомого опускного апарату «Скарус – 1»:

- 1 – корисний вантаж; 2 – навігаційна і інформаційно-керуюча системи;
 3 – крено-диферентна система; 4 – блок трансформатора; 5 – система зв'язку;
 6 – гребний електродвигун; 7 – редуктор; 8 – гребний гвинт;
 9 – регульований перетворювач; 10 – акумуляторна батарея.



Рисунок 1.4 – Самохідний (в зануреному і донному положеннях) опускний підводний апарат «МТК – 200»

Масовартісні і енергетичні характеристики генеруючого гідроагрегату можуть бути покращені на основі зовнішнього природного примусового водяного охолодження. Це досягається вбудовуванням в циліндричний корпус турбіни герметизованих та занурених генератора і ТТ. У процесі чергування приливів і відливів ротор генератора і робочі колеса турбіни обертаються протилежно (рис. 1.6). Конструкція зануреного ТТ з просторовою ЕМС в циліндричному корпусі відповідає направленому вздовж вісі агрегату потоку водяного охолодження. Також занурене виконання ТТ та генератора забезпечать максимальні питомі показники електромеханічної системи генерування електроенергії [5]. Використання просторової аксіальної ЕМС ТТ з порожнім простором в зоні максимально нагрітих внутрішніх контурів магнітопроводу і фазних обмоткових котушок, надає можливість створення у зоні центральної вісі ТТ каналу охолодження [7]. Цей канал може бути використаний для проходження валу другого робочого колеса (рис. 1.6). Подвійні робочі колеса гідротурбіни (рис. 1.6) забезпечують симетричний енергетичний стан електромеханічних складових генеруючого гідроагрегату при протилежних напрямках течій приливу і відливу.

Трифазні групи з однофазними тороїдними трансформаторами, що розташовані в трубчатих оболонках, використані у деяких обтічних підводних апаратах, наприклад «Атлеш» [31] та в рамних апаратах (рис. 1.2) [39]. Також трифазні тороїдні групи, які вбудовані, сумісно з двигунами обмеженого діаметру, у кінцеві трубчаті елементи, є важливими складовими систем електроприводу свердловинних насосів і бурового обладнання. Згідно [44], в насосах видобутку нафти і електричних бурах використовуються спеціальні занурені асинхронні двигуни з конструктивним обмеженням діаметру корпусу і відповідно з малими діаметрами та підвищеними активними довжинами статорів десяти типорозмірів ПЕД 20 ... ПЕД 125 потужністю 20 – 125 кВт з різними робочими напругами від 700 до 2000 В. Всі двигуни ПЕД отримують енергію від живлячих кабелів з робочою напругою 3300 В і зовнішніх ТТ відповідної потужності [44]. Комплектація електромеханічних блоків зануреними трансформаторами забезпечує надійний пуск ПЕД при проходженні електроенергії крізь довгий кабель.

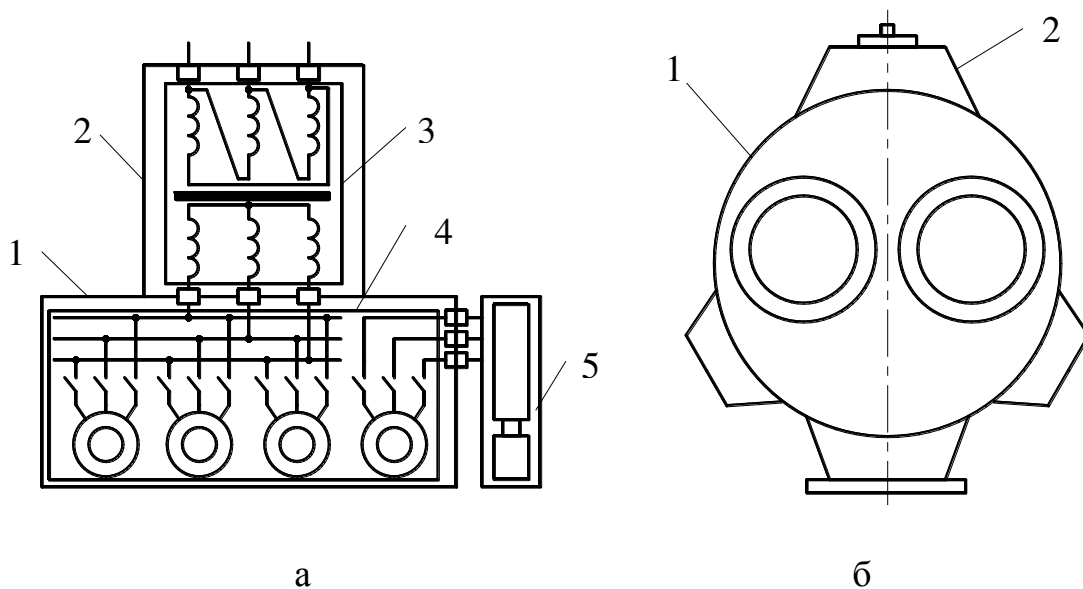


Рисунок 1.5 – Спрощена електрична схема

складу силового електрообладнання (а) водолазного дзвона (б):

- 1 – корпус дзвона; 2 – корпус трансформатора; 3 – трансформатор;
 4 – система електроприводу агрегатів підігріву і очищення дихально-газової суміші;
 5 – блок напівпровідникового перетворювача та акумуляторної батареї.

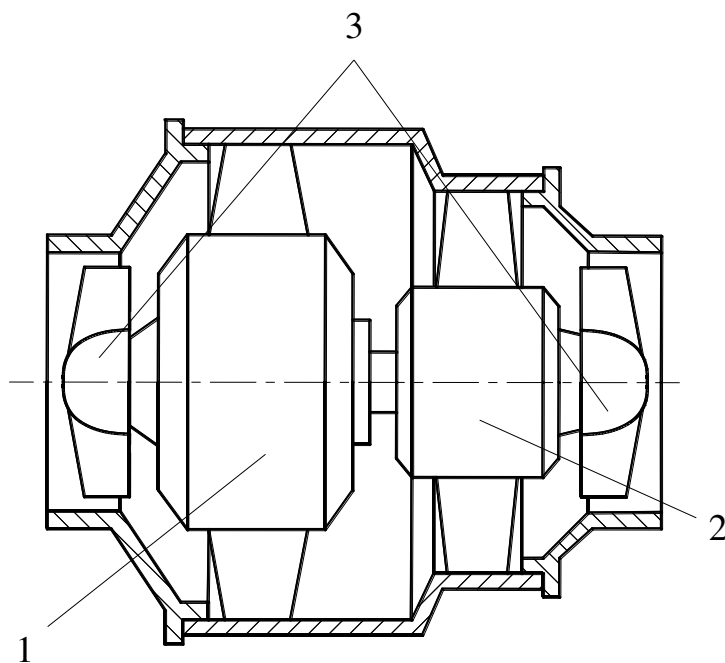


Рисунок 1.6 – Принципова конструктивна схема генеруючого турбоагрегату приливної електростанції:

- 1 – генератор; 2 – трансформатор; 3 – робоче колесо.

З викладеного випливає, що різновиди ТТ, які встановлюються в міцних циліндричних, сферичних і трубчатих корпусах об'єктів підводної, авіаційно-космічної і зануреної насосно-бурової техніки [18, 19, 29 – 44], суттєво впливають на масогабаритні і енергетичні показники, а також на надійність цих об'єктів. Найбільше застосовані в традиційному виробництві трансформаторів планарні ЕМС не задовольняють умовам компактного вбудовування у вказані корпуси і характеризуються масогабаритними показниками, які не задовольняють об'єктам спеціальної техніки [33, 38, 39]. Конструктивно пристосовані для розміщення в обмежених циліндричних і сферичних об'ємах три- та однофазні симетричні просторові ЕМС, вихідними варіантами яких є аксіальні, радіальні і тороїдні ЕМС з традиційними УК [20 – 26].

1.2. Особливості традиційних структур, конфігурацій і технологій виробництва елементів статичних електромагнітних систем

Стан справ у трансформаторобудуванні розглянуто в [8, 45]. Аналіз історичного розвитку існуючих структур і особливостей однофазних (рис. 1.7) і трифазних (рис. 1.8, рис. 1.9) ЕМС, а також можливостей їх подальшого удосконалення на основі нових структур (рис. 1.10) та нетрадиційних УК виконано в [6, 15 – 17, 46, 47] і також в [48]. ЕМС структурних схем (рис. 1.7 – рис. 1.9) характеризуються прямокутними (рис. 1.11, а) і криволінійними круговими (рис. 1.11, б) та інколи еліптичними УК перерізів стрижнів магнітопроводу і витків котушок обмоток [8, 20 – 28]. З варіантів (рис. 1.7 – рис. 1.9) найбільш застосованими та розповсюдженими є планарні структури (рис. 1.7, а, б, рис. 1.8, г, рис. 1.9, а). ЕМС вказаних структур з УК (рис. 1.11) є основними і традиційними («класичними») та практично незмінними на протязі більш сторіччя, а також близькими до межі конструктивно-структурного удосконалення [6, 15 – 17, 46 – 48].

Конструктивну міцність активної частини трансформаторів забезпечують магнітопроводи. Магнітопроводи виготовляються способами штамповки, навивки, розділення на стрічки (смуги) і вигину та крім того, навивки та сплющення витих заготовок і гофрування прокату електротехнічної сталі (ЕТС) [8, 20 – 28, 45 – 58].

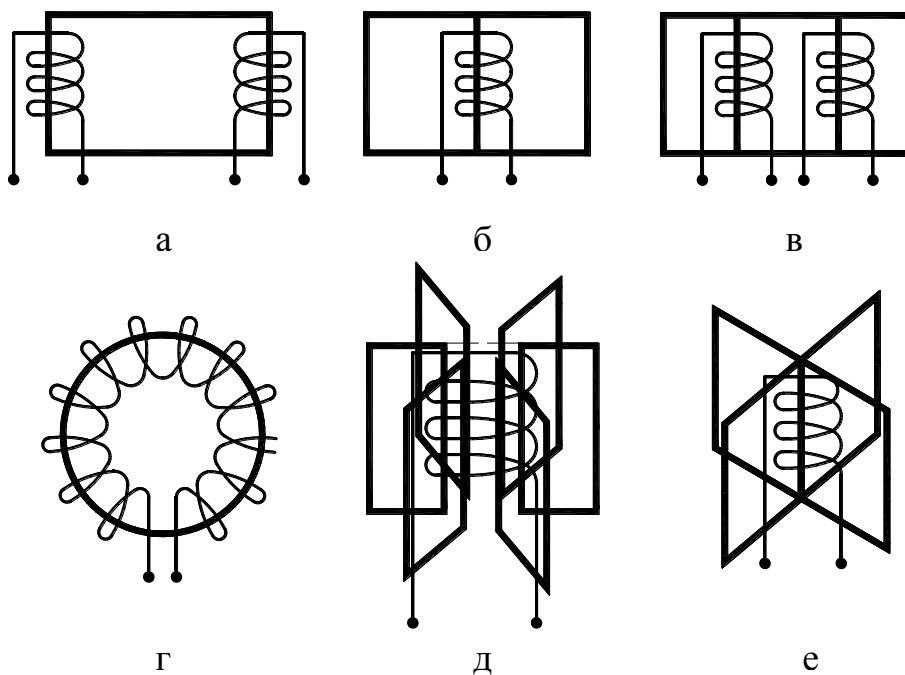


Рисунок 1.7 – Структурні схеми симетричних планарних (а, б, в) і просторових (г, д, е) однофазних електромагнітних систем

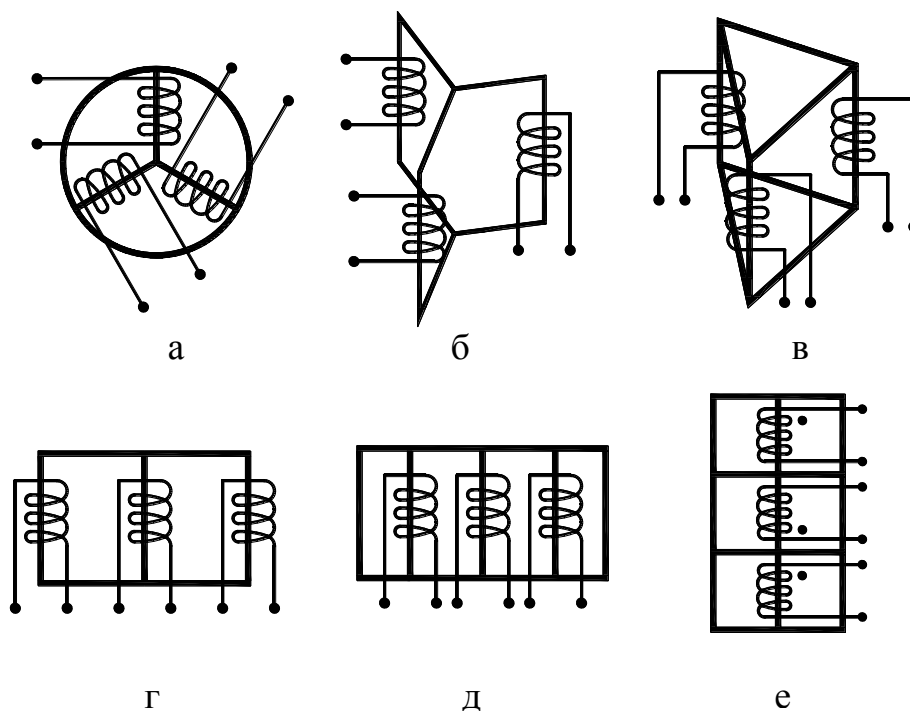


Рисунок 1.8 – Структурні схеми просторових (а – в) і планарних (г – е) трифазних електромагнітних систем з трифазними магнітопроводами

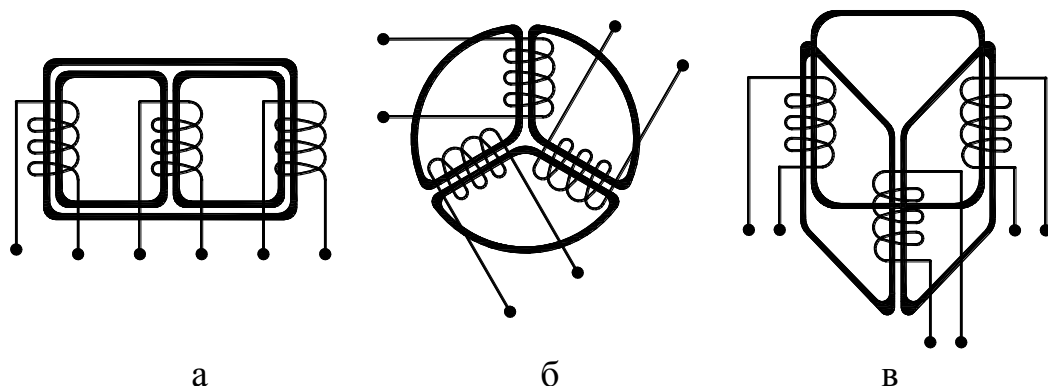


Рисунок 1.9 – Структурні схеми планарної (а) і просторових (б, в) трифазних електромагнітних систем з двоконтурними фазними елементами трифазних магнітопроводів

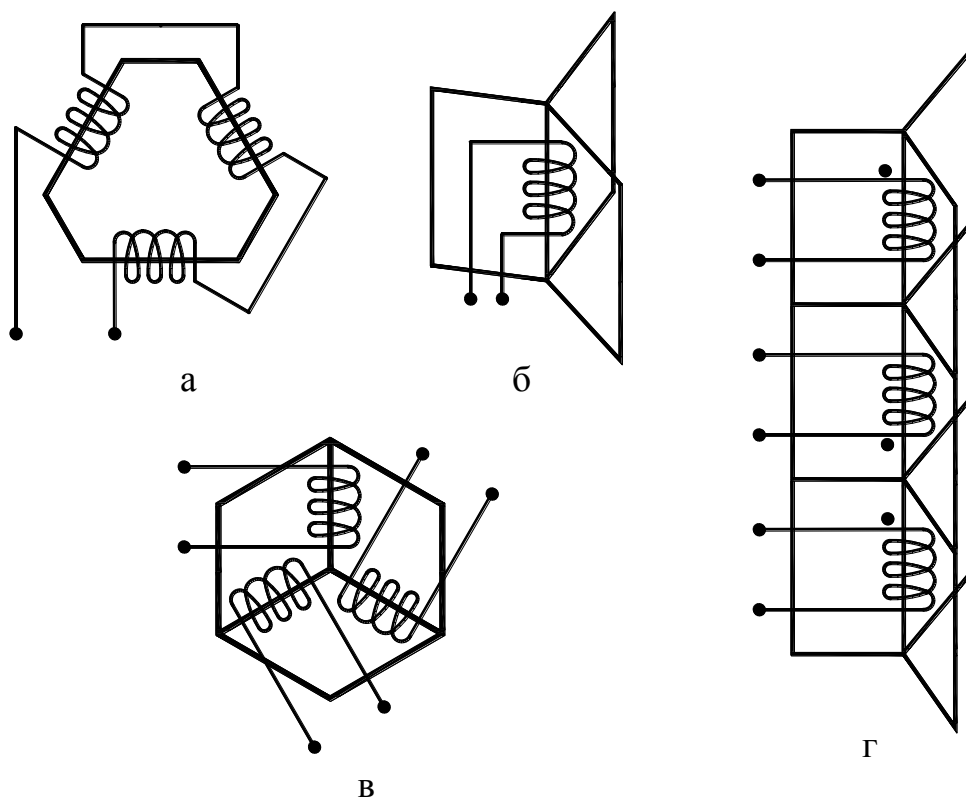


Рисунок 1.10 – Нетрадиційні структурні схеми просторових однофазних (а, б) і трифазних (в, г) електромагнітних систем

Також відомі способи виготовлення магнітопроводів методами порошкової металургії з феромагнітного композиційного матеріалу (магнітодіелектрика) [52]. Використання останніх обмежено їх високою вартістю, малим сортаментом, підвищеними втратами і низькою індукцією насичення [59, 60].

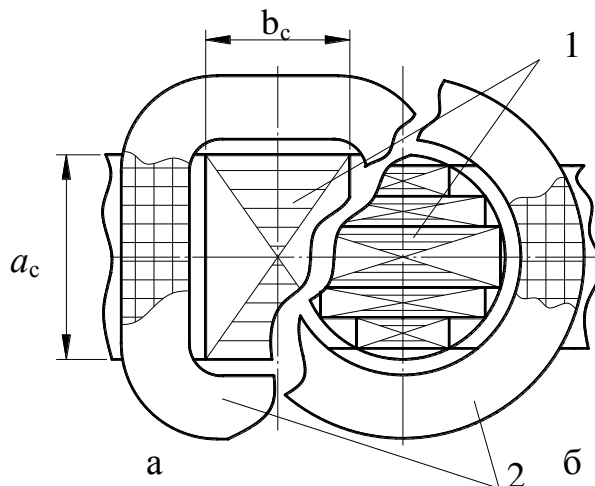


Рисунок 1.11 – Традиційні конфігурації стрижнів (1) і обмоткових котушок (2) електромагнітних систем з прямокутними (а) і круговими (б) утворюючими контурами

Промислове засвоєння у другій половині минулого сторіччя, на додаток до листової ізотропної, рулонної анізотропної ЕТС, забезпечило деяке зниження матеріаломісткості і втрат неробочого руху (ВНР) ЕМС з планарними магнітопроводами. Також засвоєно виробництво ЕМС з симетричними просторовими структурами (рис. 1.8, в, рис. 1.9, в) та комбінованими стиковими стрічково (рулонно) – листовими (рис. 1.12, а) і витими (рис. 1.12, б) магнітопроводами [23 – 26]. Згідно [26], найменшою матеріаломісткістю та ВНР у межах потужності ТТ 25 ... 630 кВ·А відрізняється стикова ЕМС (рис. 1.12, а), яка характеризується підвищеним струмом неробочого руху. Однак цей недолік у значній мірі усувається шліфуванням стикових поверхонь та окупається високою технологічністю ЕМС, яка виключає розкладання верхнього ярма при встановленні обмоткових котушок на стрижні [24]. В ЕМС (рис. 1.12, б) структури (рис. 1.9, в) з двоконтурними фазними елементами витого безперервного (без стиків) анізотропного магнітопроводу з трьох секцій (рис. 1.12, в) значно знижуються намагнічувальний струм та основні втрати у ЕТС. Однак в ЕМС

структур (рис. 1.9, а – рис. 1.9, в) виникають значні додаткові втрати магнітопроводу від третіх гармонік контурних магнітних потоків [26, 45]. Вмотування обмоткових котушок на суміщені стрижневі частини окремих безперервних секцій (рис. 1.12, б, в) за допомогою «човночних» верстатів значно знижує коефіцієнт заповнення обмоткового вікна K_{30} провідниковим матеріалом (ПМ) виткових котушок та негативно впливає на матеріаломісткість ЕМС. В трансформаторах з роз'ємним (шихтованим «вперепліт» або витим стиковим) магнітопроводом величина коефіцієнту K_{30} залежить виключно від класу напруги [20 – 28].

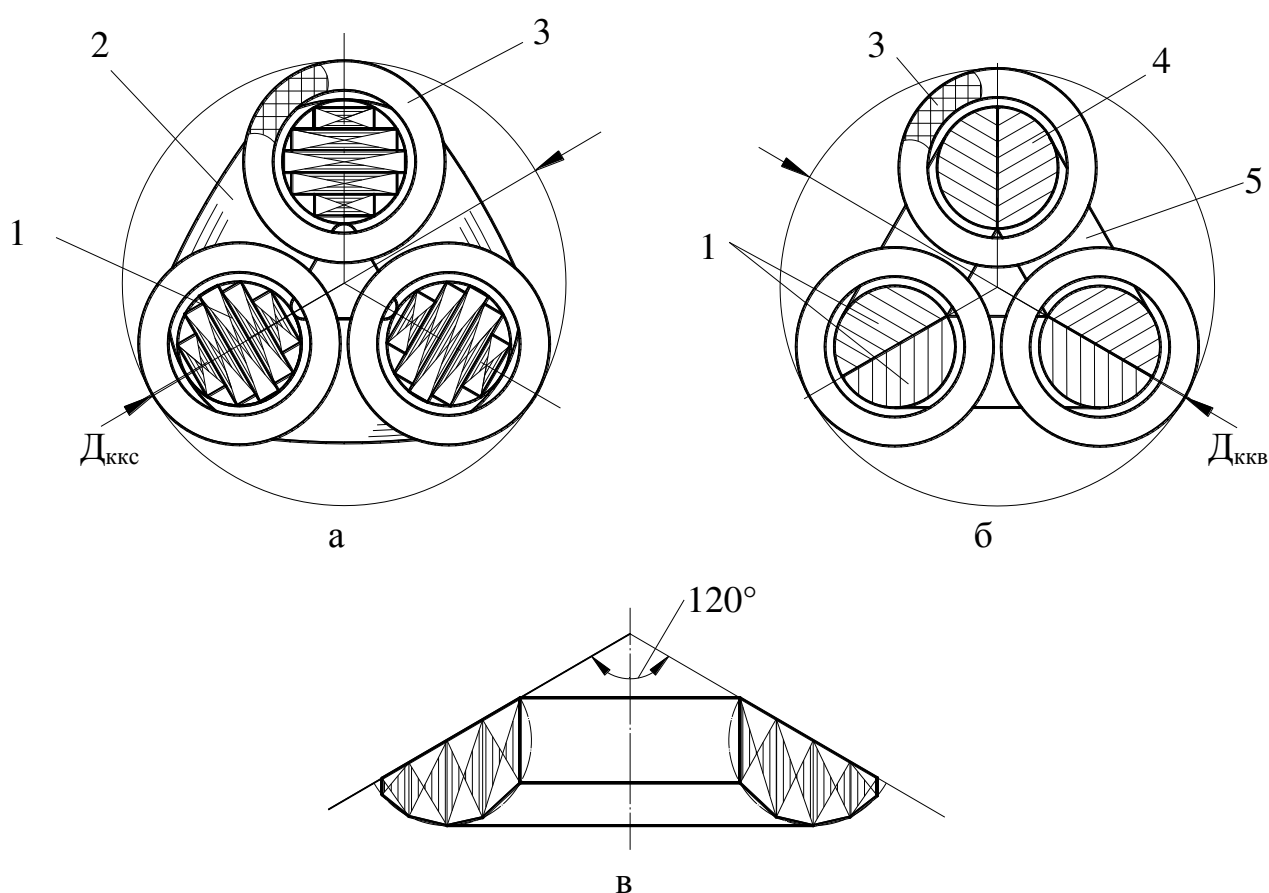


Рисунок 1.12 – Конструктивні схеми (в поперечному перерізі) трифазних просторових електромагнітних систем з комбінованим (а) і витим (б) магнітопроводами, а також схема секції (в) витого просторового магнітопроводу з двоконтурними фазними елементами:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки; 4 – стрижнева ділянка секції магнітопроводу; 5 – ярмна ділянка секції магнітопроводу.

Недоліками використання традиційних кругових УК в просторових ЕМС (рис. 1.12, а, б) є зниження їх компактності (збільшення $D_{\text{ккс(в)}}$) та збільшення електроємності по ЕТС. Це пов'язано з наявністю порожнин в обмоткових вікнах між циліндричними зовнішніми контурами обмоткових котушок, що призводить до певного «баластного» об'єму ярем магнітопроводу.

Додатково до основних традиційних однофазних ЕМС структур (рис. 1.7, а, б) також поширеними є тороїдні ЕМС схем (рис. 1.7, г, рис. 1.13), які складають трифазні групи трансформаторів деяких об'ємних та рамних (рис. 1.1, в) підводних апаратів [31, 34]. Тороїдні трансформатори [20, 21, 23, 25] містять одну з початкових однофазних ЕМС [61] з конфігурацією зовнішнього контуру, яка відповідає колу (рис. 1.13). Їх особливістю є нещільне укладання виткових провідників над торцевими поверхнями кільцевого магнітопроводу. Наявність порожніх просторів між витками (рис. 1.13, а) обумовлена різницею величин діаметрів D_n і D_b кільцевого шихтованого або витого магнітопроводу. Це враховується при розрахунках трансформаторів збільшеними на 8 ... 15 % значеннями коефіцієнту укладання обмотки [20, 21, 23]. Вказана нещільність, а також зсув на кут α_t протилежних торцевих ділянок витка (рис. 1.13, а), підвищують середню довжину витка, втрати і матеріаломісткість обмотки. Погіршення тепловідводу, яке викликане ділянками полого простору, а також малий радіус вигину на 90° кутових зон внутрішніх витків, знижує надійність тороїдних трансформаторів (рис. 1.13).

Матеріаломісткість обмоток та втрати короткого замикання (ВКЗ) трансформаторів залежать від середніх довжин і щільності струму J витків обмоткових котушок. Традиційні УК з конфігураціями елементів ЕМС (рис. 1.11, рис. 1.13) обумовлюють відомі недоліки планарних і просторових ЕМС [20 – 26]. Прямокутна форма витків обмотки (рис. 1.11, а, рис. 1.13, б) підвищує середню довжину витка відносно кругової форми і знижує міцність електричної ізоляції при малому радіусі округлення кутової частини прямокутно вигнутого провідника. Кругова кільцева форма котушок (рис. 1.11, б) забезпечує мінімальну середню довжину витка при умові повного заповнення ЕТС кругового УК перерізу стрижня. Однак структури магнітопроводів з повним заповненням криволінійних УК відсутні. Відомі магнітопроводи з

плоскопаралельним, радіальним, коаксіальним і евольвентним шихтуванням листів та шарів ЕТС в стрижнях [20 – 28]. Максимальне заповнення кругових УК досягається найбільш поширеним традиційним плоскопаралельним шихтуванням (рис. 1.11, б, рис. 1.12, а) [26]. При цьому відносно високий коефіцієнт заповнення кругового УК перерізу стрижня $K_{\text{кк}} = 0,927 \dots 0,931$ досягається укладанням у контурне коло 28-32 пакетів пластин (листів) або рулонів ЕТС, що відрізняються шириною. Це призводить до значного ускладнення технології [26].

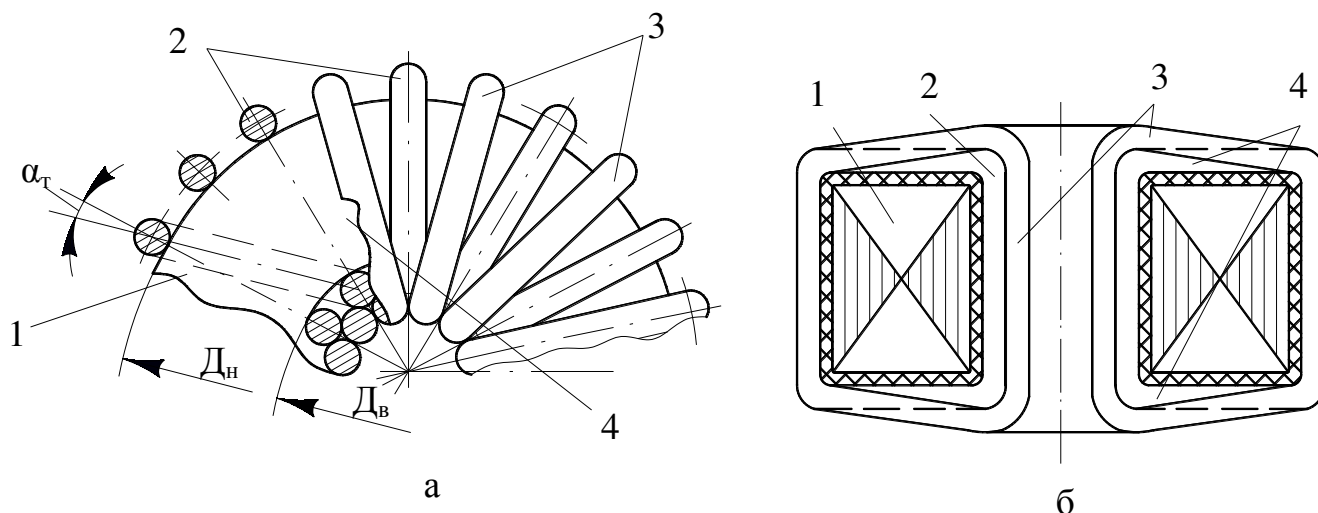


Рисунок 1.13 – Конструктивно-технологічні особливості на фрагменті виду зверху (а) і схема поперечного перерізу (б) тороїдної електромагнітної системи:

- 1 – магнітопровід; 2 – витки першого (внутрішнього) шару;
3 – витки другого шару; 4 – порожній простір.

В останній чверті минулого сторіччя і початку нового, питання енергоресурсозбереження при розробці трансформаторів та реакторів традиційно вирішувалось на основі удосконалення електротехнічних матеріалів і ускладнення технології виготовлення елементів ЕМС [8, 28, 45, 49 – 58, 62 – 75]. Наприклад, замість традиційних використовуються транспоновані обмоткові провідники [28]. В передових західноєвропейських фірмах додатково до шихтування з прямокутних суміжних шарів вперепліт (рис. 1.14, а, б) втілено відомий ще з [24] спосіб розкроєння зі зсувом шарів ЕТС і складання «step-lap» планарних шихтованих магнітопроводів з усіма «косими» стиками (рис. 1.14, в) [28, 45, 52, 53]. Однак цей спосіб є занадто витратним.

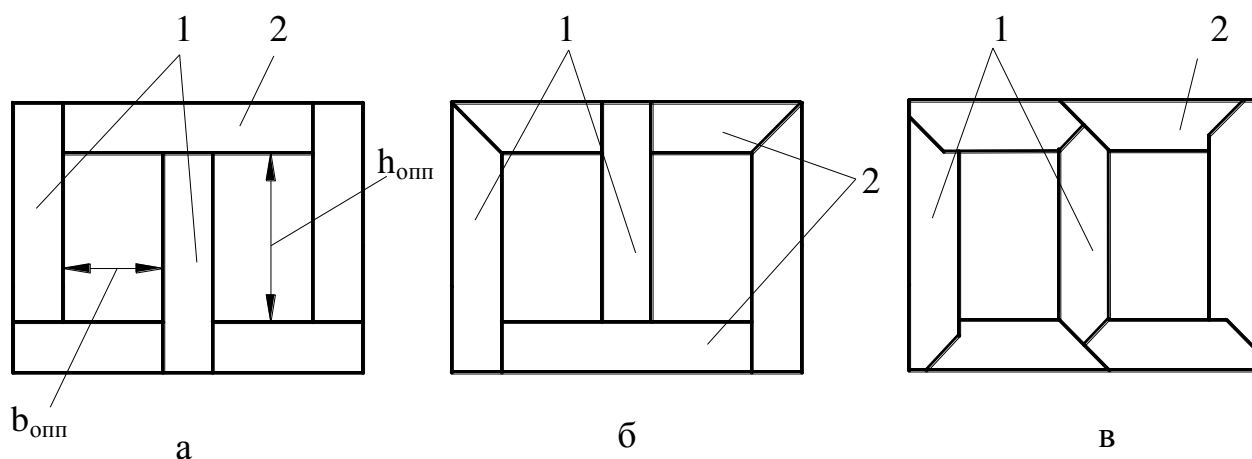


Рисунок 1.14 – Варіанти шихтування шарів планарного магнітопроводу з прямими стиками (а), з комбінуванням прямих і косих стиків (б), з усіма косими стиками (в):

1 – стрижень; 2 – ярмо.

В останні десятиріччя підвищується потужність ТТ з прямокутним перерізом стрижнів витих і шихтованих магнітопроводів. Такі магнітопроводи (рис. 1.11, а) використані замість «східчастих» (рис. 1.11, б) в серіях Tumetic (ФРГ) і ОСМ (Японія). Це дозволило на 3 ... 6 і 25 ... 30 % знизити відповідно їх масу і трудомісткість виробництва [45]. В ТТ серії ОСМ встановлюються виті розрізні магнітопроводи з травленням і поліруванням зон стиків. При виготовленні, по типу витих розрізних, роз'ємних магнітопроводів компанія АЕМ Cores (Австралія) застосовує відому ще з [20] технологію набору і вигину смуг ЕТС різної довжини. Однак технологічне обладнання «Unicore» цієї компанії забезпечує косі утворюючі лінії усіх стиків [50]. Розширюється використання аморфної ЕТС при виробництві ТТ потужністю до 2500 кВ·А [28, 45, 65 – 67]. Однак з причини низької механічної міцності магнітопроводи з аморфного «скляного металу» не можуть виконувати функції конструктивної основи ЕМС і кріпляться до опорно-ізоляційної бази обмоток [67]. Також в [65] вказано, що застосування аморфної ЕТС передбачає зміну форми обмоток і загальної конструкції ЕМС. Відомі проблеми прямокутних УК (рис. 1.11, а) обмоткових витків вирішуються застосуванням стрічкових провідників. При цьому електродинамічна стійкість обмоток з котушками прямокутної форми забезпечується клеючим покриттям міжшарової ізоляції або капсулюванням. Використовуються технології

обмоткових робіт «CAST RESIN» і «RESIBLOC» [45, 66].

У ближньому майбутньому удосконалення ТТ планується досягнути також традиційним використанням нових розробок електроматеріалознавства, зокрема високотемпературних надпровідникових обмоток, елегазової, «кабельної» і гібридної ізоляції, а також нових ізотропних, анізотропних та аморфних ЕТС [11, 12, 68 – 74]. Однак можливості енергоресурсозбереження шляхом розвитку металургії, ізоляційно-кабельної техніки і нанотехнологій обмежені фізичними властивостями матеріалів та високим коефіцієнтом корисної дії трансформаторів.

Важливою характеристикою трансформатора є ВНР, які визначаються структурною схемою ЕМС, матеріалом, конфігурацією елементів, а також кількістю стиків і структурою шарів ЕТС магнітопроводу. У теперішній час найбільш масово при виготовленні силових ТТ різної потужності використовуються шихтовані магнітопроводи з варіантами виконання одного шару ЕТС (рис. 1.14) [24, 26, 28, 45, 52]. В традиційному магнітопроводі з «прямими» стиками шари ЕТС утворюються з прямокутних пластин трьох розмірів, що відрізняються довжиною (рис. 1.14, а). Виготовлення такого магнітопроводу з анізотропної ЕТС з низькими питомими втратами призводить до значного підвищення втрат в зонах кутів і стиків. Тому для зниження ВНР кожен шар формується з пластин чотирьох конфігурацій (рис. 1.14, б) з чергуванням прямих і косих стиків у суміжних шарах [24]. Також косі стики збільшують площі сопряження елементів магнітопроводу, що знижує магнітний опір і намагнічувальний струм. Максимальне зниження ВНР ТТ великої потужності досягається використанням складної технології формування магнітопроводу з усіма косими стиками з значної кількості типорозмірів пластин та з обрізанням при їх укладанні так званих «вусів» [24, 52, 53]. Застосування подібних технологій STEP-LAP і MULTI-STEP-LAP обумовлює наявність 4 ... 8 % відходів ЕТС і 6 ... 8 % збільшення вартості магнітопроводу [52 – 58].

В [45] вказано, що при косих кутах стикування пластин 45° , значне зниження питомих втрат різних марок анізотропної ЕТС не дає очікуваних результатів по зниженню ВНР ТТ з планарними ЕМС. Коефіцієнт додаткових ВНР таких ТТ з шихтованими магнітопроводами складає $K_{\text{дп}} = 1,37 \dots 1,58$ [45].

Згідно [73], при розрізанні – штампуванні ЕТС утворюється місцевий наклеп, що призводить до зниження магнітної проникливості та збільшення питомих втрат. При прямому розрізанні смуг ЕТС з утворенням прямокутних пластин (рис. 1.14, а), зменшення проникливості та збільшення втрат в об'ємі деформованої ЕТС розподіляється рівномірно. При розрізанні смуг ЕТС під кутом, який у планарному магнітопроводі складає 45° (рис. 1.14, б, в), втрати збільшуються і концентруються відповідно у напрямку та зоні гострого кута [52]. Загальне збільшення втрат залежить від ширини пластин ЕТС і потужності ТТ. На основі виготовлення та випробувань зразків встановлено, що при заміні традиційного на MALTI-STEP-LAP шихтування, питомі ВНР двох ТТ потужністю $75 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і $300 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ збільшуються відповідно на 50 % і 15 %. В [52] стверджується, що використання косих стиків магнітопроводів в ТТ малої і середньої потужності, у тому числі з нормалізаційним зниженням наклепу відновлювальним відпалюванням, є недоцільним.

З [45, 52] можна зробити висновок, що величина кута косоного стику для досягнення мінімальних втрат кутових зон може бути визначена експериментально для певних ширин пластин ЕТС та геометричних співвідношень магнітопроводів.

Особливості традиційних структур магнітопроводів ТТ малої і середньої потужності розглянуті в [48, 76, 77]. Використання анізотропної рулонної ЕТС в витих магнітопроводах надає можливість підвищення середнього значення амплітуди магнітної індукції стрижня B_c до $1,7 \dots 1,75 \text{ Тл}$, а в ТТ з шихтованими магнітопроводами з вказаною ЕТС значення B_c не перевищує $1,63 \dots 1,65 \text{ Тл}$ [23 – 28, 45, 49]. Технологія навивки стрічки (рулону) ЕТС характеризується перевагами відносної простоти комплексної автоматизації і зниження трудомісткості виробництва, а також можливості використання мінімальних шарів ЕТС [20 – 25, 49]. Витий стиковий (розрізний) трифазний магнітопровід традиційної конструкції (рис. 1.15, а) формується з трьох заготовок двох варіантів геометрії з прямокутними внутрішніми контурами. Особливістю структур (рис. 1.9, а – в) є двоконтурність фазних елементів і відсутність магнітного зв'язку між витими секціями – контурами. Двоконтурність є причиною зсуву фаз магнітних потоків у суміжних секціях. Внаслідок індивідуальності властивостей контурів замикання секційних магнітних потоків індукція у перерізі

кожної секції повинна бути підвищеною в $2/\sqrt{3}$ відносно середнього двоконтурного значення [26, 49]. Однак фактично амплітуди потоків секцій і стрижнів практично не відрізняються, так як треті гармоніки потоків знижують середні значення амплітуд індукції кожної секції B_c' до середніх значень B_c . Тому при розрахунках основних втрат у сталі ЕМС структур (рис. 1.9, а – в) приймається $B_c = B_c'$ [26, 45]. Додаткові втрати, що обумовлені несинусоїдальністю контурних потоків, враховуються відповідним коефіцієнтом $K_{\text{днз}} = 1,33 \dots 1,35$ [26, 45].

Планарна ЕМС з витим магнітопроводом (рис. 1.15, а) відрізняється максимальними несиметрією елементів магнітного кола і додатковими складовими ВНР. Вказані недоліки, згідно [49], суттєво знижують показники ЕМС з магнітопроводом (рис. 1.15, а). В [49] наведено варіанти покращення показників ЕМС структури (рис. 1.9, а) утворенням магнітного зв'язку окремих секційних контурів. Цей зв'язок досягається введенням в конструкцію магнітопроводу (рис. 1.15, а) двох або чотирьох накладних елементів. Ці елементи мають вигляд стрічкових витих О-подібних сплюснутих осердь однакових геометричних розмірів, що розміщені посередині бокових поверхонь яремних ділянок (рис. 1.15, б). Можливими є також інші варіанти удосконалення магнітопроводу (рис. 1.15, а) з боковим відхиленням або зигзагоподібним замиканням частини магнітного потоку [49]. Фактично конструкції [49] є несиметричними просторовими, однак мають відносно існуючих планарних традиційних, підвищену масу, розміри, а також кількість стиків та складових елементів, що відрізняються формою і розмірами. Для зниження магнітних опорів між елементами, що сполучаються, традиційно використовуються скошені розрізи витих заготовок [25]. В [49] пропонується заповнювати стики магнітодіелектричним компаундом. В [23] вказано, що магнітопроводи з заповненням стикового зазору магнітодіелектричним компаундом, забезпечують кращі показники ЕМС ніж шихтовані вперепліт. На думку автора, більш простим і доцільним забезпеченням магнітного зв'язку витих секцій є заповнення магнітодіелектричним компаундом стикових зазорів між стрижневими частинами трьох симетричних секцій просторової аксіальної стикової структури (рис. 1.9, в).

Іншим варіантом удосконалення, згідно [51], трифазного витого планарного

магнітопроводу (рис. 1.15, а) є конструкція (рис. 1.15, в), яка позбавлена недоліків двоконтурності. При виготовленні конструкції (рис. 1.15, в) також вводяться додаткові операції сплющення (опресування) витих заготівок. Стрижневі і кутові ділянки магнітопроводу формуються з трьох ідентичних кільцевих заготівок більшого діаметру, що сплющені. Чотири яремні ділянки виконуються поперечним розрізанням двох кільцевих ідентичних заготівок меншого діаметру, що також сплющені [51]. Утворюються стикові зазори, які потребують шліфування, або заклеювання поверхонь сопряжіння магнітодіелектричним клеєм. Таким чином, магнітне коло ЕМС з магнітопроводом [51] характеризується наявністю восьми стикових зазорів та підвищеною складністю виробництва. Крім того, у значній мірі втрачається головна перевага планарного витого магнітопроводу, яка полягає у співпадінні напрямку магнітного потоку і текстури ЕТС. В кутових зонах магнітопроводу [51] з сплюснених елементів (рис. 1.15) магнітний потік змінює напрям з повздовжнього на ортогональний, а в ярмах силові лінії поля є повністю ортогональні напрямку текстури ЕТС.

Підвищена кількість стиків в магнітопроводах (рис. 1.15, б, в) при відсутності їх зсуву у суміжних шарах ЕТС призводить до значного підвищення додаткових втрат та струму неробочого руху ТТ. Однак забезпечення вмотування котушок в розширені, з технологічних міркувань, обмоткові вікна безперервних безстиківих магнітопроводів вигляду (рис. 1.12, б, рис. 1.15, а), також не відповідає сучасним вимогам енергоресурсозбереження.

Перспективним напрямом рішення задач нових розробок ТТ потужністю 25 ... 630 кВ·А в [45] визначено створення просторових ЕМС з роз'ємними витими магнітопроводами, у яких досягаються ремонтпридатність та найбільший ефект використання нових високопроникливих анізотропних і аморфних ЕТС.

Відомим недоліком трифазних планарних стрижневих (рис. 1.8, г, д) і броньової (рис. 1.8, е) структур трифазних ЕМС є пофазна магнітна несиметрія [20 – 26]. Така несиметрія максимально виражена при використанні витого трисекційного магнітопроводу (рис. 1.15, а) і зводиться до мінімуму в броньових ЕМС зустрічним напрямленням намотки або зустрічним включенням середньої (за розташуванням) фази відносно двох інших фаз (рис. 1.8, е, рис. 1.10, г) [22].

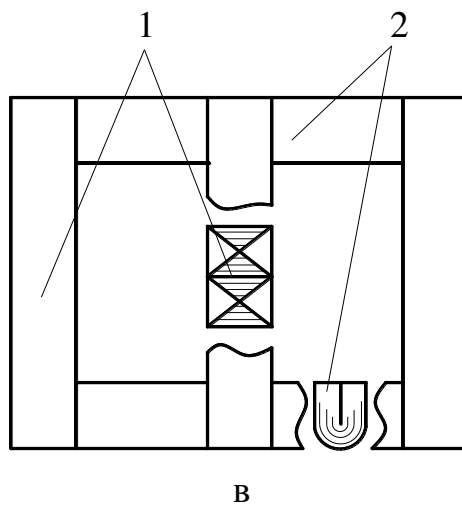
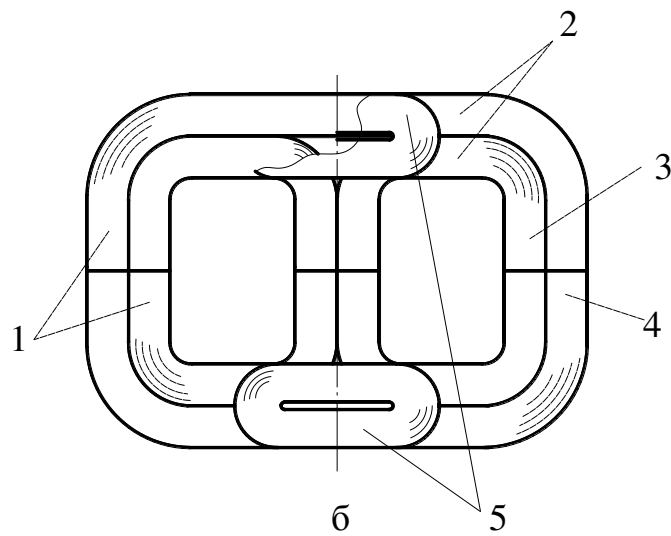
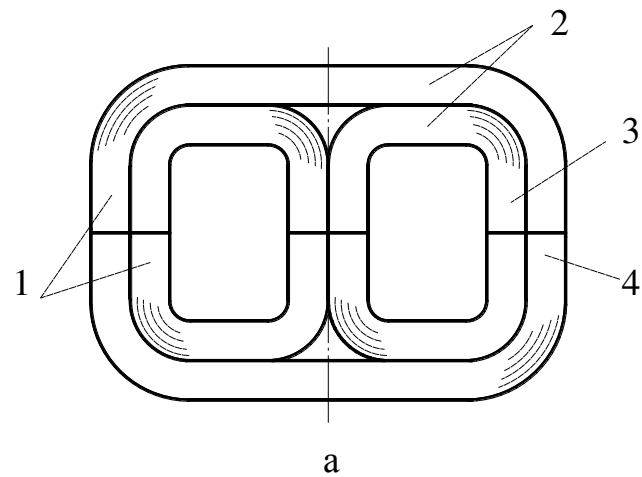


Рисунок 1.15 – Варіанти витих трифазних магнітопроводів з двоконтурними фазними секційними елементами (а), з частковим магнітним зв'язком секцій боковими накладними елементами (б) та з суміщеними фазними елементами (в):

- 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – внутрішня секція;
4 – зовнішня секція; 5 – накладний елемент.

У зв'язку з незначним струмом та ВНР сучасних планарних ЕМС вказаний недолік практично не відображається на експлуатаційних характеристиках розподільних ТТ. Однак цей недолік суттєво впливає на спеціальні показники, зокрема показник електромагнітної сумісності у частині «маломагнітності» [17, 18, 78].

В останній час основні ПТР (якості) електричних машин [15, 79] доповнені показником електромагнітної сумісності – рівнем зовнішнього магнітного поля (ЗМП). При цьому вимоги нормування ЗМП почали пред'являтися не тільки до електрообладнання спеціального [80, 81], але і загальнопромислового призначення [82].

Для характеристики елемента електрообладнання як джерела електромагнітного випромінювання використовується поняття векторного магнітного моменту (ВММ). Для відсутності ЗМП результуючий ВММ повинен дорівнювати нулю [78, 83]. Основними методами досягнення практичної маломагнітності електричних машин є зниження електромагнітних навантажень (ЕМН) і підвищення компактності ЕМС, структурування джерел ЗМП, розмагнічування та екранування [78, 80 – 83]. Вимоги зниження ЕМН і зменшення масогабаритних показників суперечливі, а засоби розмагнічування і екранування застосовують при відсутності досягнення заданого мінімуму ЗМП конструктивним структуруванням. При цьому метод структурування ЗМП реалізується способами симетрування і компенсації [78, 83]. Перший спосіб полягає в забезпеченні симетричної топології джерел ЗМП з використанням жорсткої системи припусків просторового положення і виконання їх компонент. Другий спосіб передбачає застосування додаткових обмоток магнітної компенсації. Перший спосіб вимагає розташування елементів ЕМС з просторовим (аксіальним, радіальним, тангенціальним) симетруванням джерел ЗМП, а також суттєвого ускладнення технології виробництва.

Аналіз можливості розробки маломагнітного ТТ виконано в [84].

Результуючий ВММ ТТ складається з обмоткової, стрижневої і яремної компонент. При умові практичної симетрії трифазного джерела живлення і фазних катушок, обмотки кожного з планарного і просторових варіантів ЕМС (рис. 1.16) утворюють на комплексній площині симетричну зірку фазних ВММ з результуючим нульовим значенням [83]. Однак положення фазних ВММ у просторі залежить від

просторової симетрії розташування фазних елементів однакового призначення в магнітопроводі [84]. В ЕМС (рис. 1.16, а) складова ВММ, що обумовлена намагнічуванням зовнішнього ярма $M'_я$ не урівноважена складовою намагнічування внутрішнього ярма $M''_я \neq M'_я$. Тому розробка маломагнітного ТТ з радіальною структурою ЕМС без компенсаційних обмоток неможлива. У зв'язку з відмінами контурів і довжин замикання силових ліній магнітного поля відомих варіантів планарних ЕМС, зокрема зі стрижневим магнітопроводом (рис. 1.16, б), намагнічування і ВММ ярем $M'_{мяв}$, $M''_{мяв}$ і $M'_{мян}$, $M''_{мян}$ при максимумі потоків одного з бокових стрижнів відрізняються від їх значень при максимумі магнітного потоку середнього стрижня. Тому виникає різницевий ВММ, який визначається, у відповідності з позначеннями (рис. 1.16, б), виразом

$$\Delta \bar{M}_M = I_{фм} w_{ф} \bar{S}_B (K_{умА(С)} - K_{умВ}), \quad (1.1)$$

де $I_{фм}$ і $w_{ф}$ – амплітуда струму і кількість витків фази обмотки;

\bar{S}_B – вектор, чисельно рівний середній площі в площині, що перпендикулярна вісі стрижня;

$K_{ума}$, $K_{умв}$, $K_{умс}$ – коефіцієнти підсилення магнітного поля системи обмоток фазними і контурними феромагнітними ділянками магнітного кола $K_{ума} = K_{умс} \neq K_{умв}$ [83].

Різниця (1.1) досягає значних величин навіть при малій відміні $K_{умА(С)}$ і $K_{умВ}$ при фактичних значних $I_{ф}$ і $w_{ф}$, і розробка маломагнітного ТТ на основі схеми ЕМС (рис. 1.16, б) також є неможливою [83].

У відповідності з (1.1) рішенням задачі забезпечення маломагнітності ТТ є використання варіантів симетричної аксіальної просторової ЕМС (рис. 1.16, в, г). Згідно з [83], спроба розробки маломагнітного ТТ структурної схеми (рис. 1.9, в) з круговими УК і вмотаними обмотками показала близьку до нуля компоненту ЗМП у напрямку вісі yy' (рис. 1.16, в). Однак радіальні компоненти ВММ і ЗПМ у напрямку вісі xx' досягли суттєвих значень. Аналіз дослідних зразків вказаного ТТ показав, що традиційна конструкція ЕМС (рис. 1.12, б) в значній мірі підлягає впливу різних

технологічних відхилень від ідеальної симетрії [83]. В ідеальному випадку технологічні відхилення від симетричних положень трьох секцій витого магнітопроводу і фазних котушок обмоток в просторі мають бути відсутні, а конфігурації і маси секцій і відповідно перерізів і елементів стрижнів та ярем повинні бути ідентичними.

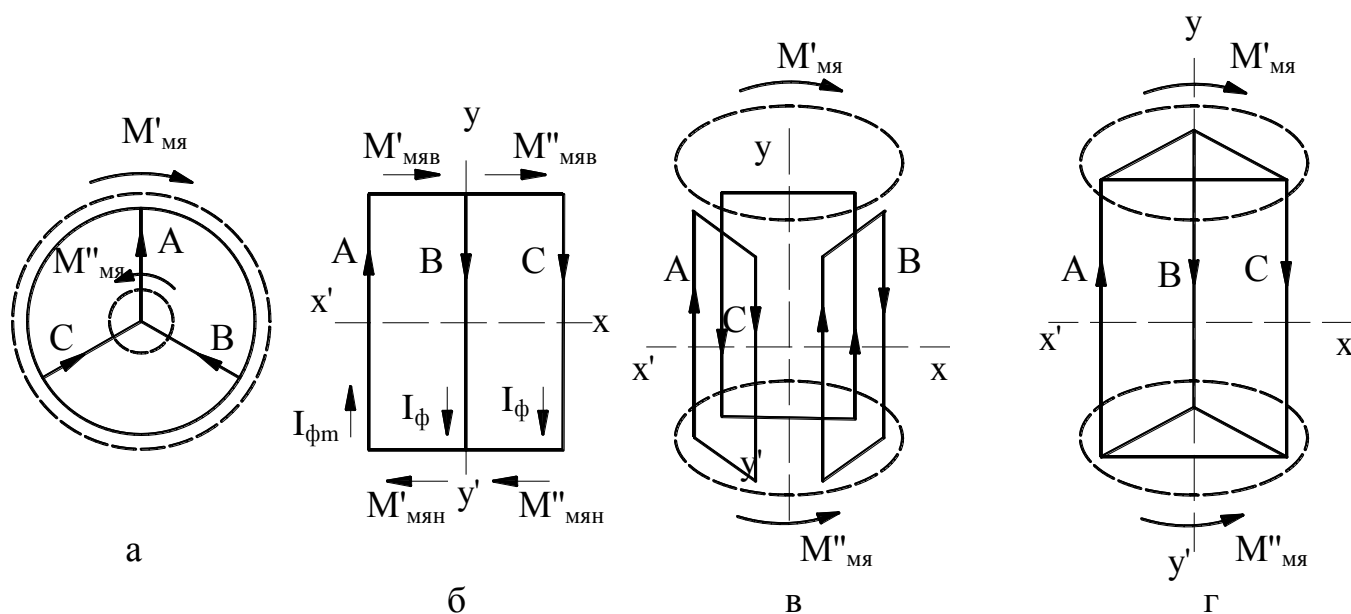


Рисунок 1.16 – Напрямки векторних магнітних моментів ярем у варіантах структурних схем статичних електромагнітних систем: радіальної просторової (а), планарної стрижневої (б) і аксіальних просторових з двоконтурними (в) та суміщеними (г) фазними елементами.

Практичну симетричність і ідентичність фазних елементів магнітного кола ЕМС з традиційними УК зі складною східчастою конфігурацією перерізів стрижнів та конфігурацій розгортки ЕТС секцій (рис. 1.12, в) забезпечити практично неможливо [84]. Заміна вказаних складних на більш прості нетрадиційні конфігурації з секторними (рис. 1.17, а) і шестигранними (рис. 1.17, б) УК [15 – 17, 46 – 48] утворюють передумови рішення задачі забезпечення заданого рівня польового показника електромагнітної сумісності ТТ. Крім того, на (15 ... 20) % підвищується компактність (знижується діаметр $D_{\text{кк(ш)}}$) контурного кола ЕМС (рис. 1.17) відносно аналогічних діаметрів $D_{\text{кк(в)}}$ еквівалентних аналогів (рис. 1.12) [46 – 48].

Іншими особливостями ТТ є нерівномірності розподілу теплового і магнітного

полів відповідно в активному об'ємі ЕМС та елементах магнітопроводу. Наслідком структурної несиметрії планарної ЕМС є її теплова несиметрія (котушки центрального стрижня охолоджуються значно гірше, ніж котушки крайніх стрижнів [49]). Така несиметрія зростає при «сухому» виконанні ТТ та в ЕМС з прямокутними УК (рис. 1.11, а) у яких довжини внутрішніх частин витків (в обмоткових вікнах) більш довгі відносно зовнішніх частин у відповідності до раціонального співвідношення боків перерізу стрижня [20, 21, 85, 86]. В просторових ЕМС середня температура симетрично розташованих фазних котушок однакова. З причини відміни площ поверхонь охолодження виникає деяка різниця температур шарів обмоток в зонах зовнішнього та внутрішнього контурів активного об'єму [87 – 89].

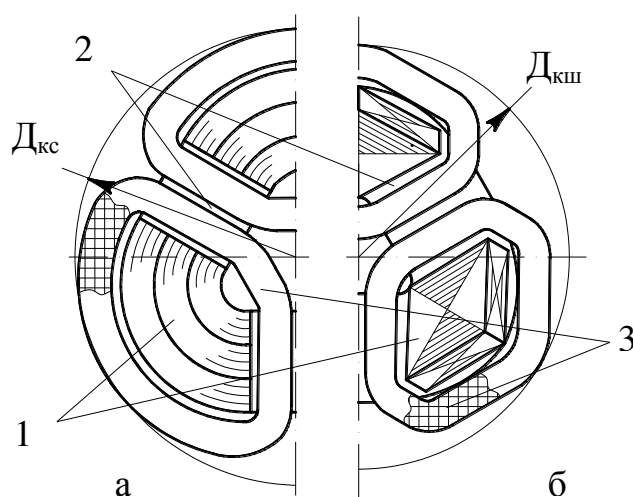


Рисунок 1.17 – Конфігурації елементів варіантів аксіальної компактної електромагнітної системи зі стиковими витим (а) і комбінованим (б) магнітопроводами:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Просторові структури ЕМС (рис. 1.8, в, рис. 1.9, в) дозволяють утворити симетричні у аксіальному і радіальному напрямках структури активної і конструктивної частин ТТ (рис. 1.16, в, г). Конструкції, що відповідають схемам (рис. 1.17, а, б) відрізняються наявністю вільного простору в зонах внутрішніх контурів ярем. Вказані особливості надають можливість застосувати додаткові засоби інтенсифікації охолодження, наприклад встановлювати у вільний простір осьові теплопровідні стрижні, термосифони або електровентильатори і масляні насоси (рис. 1.18) [87 – 89].

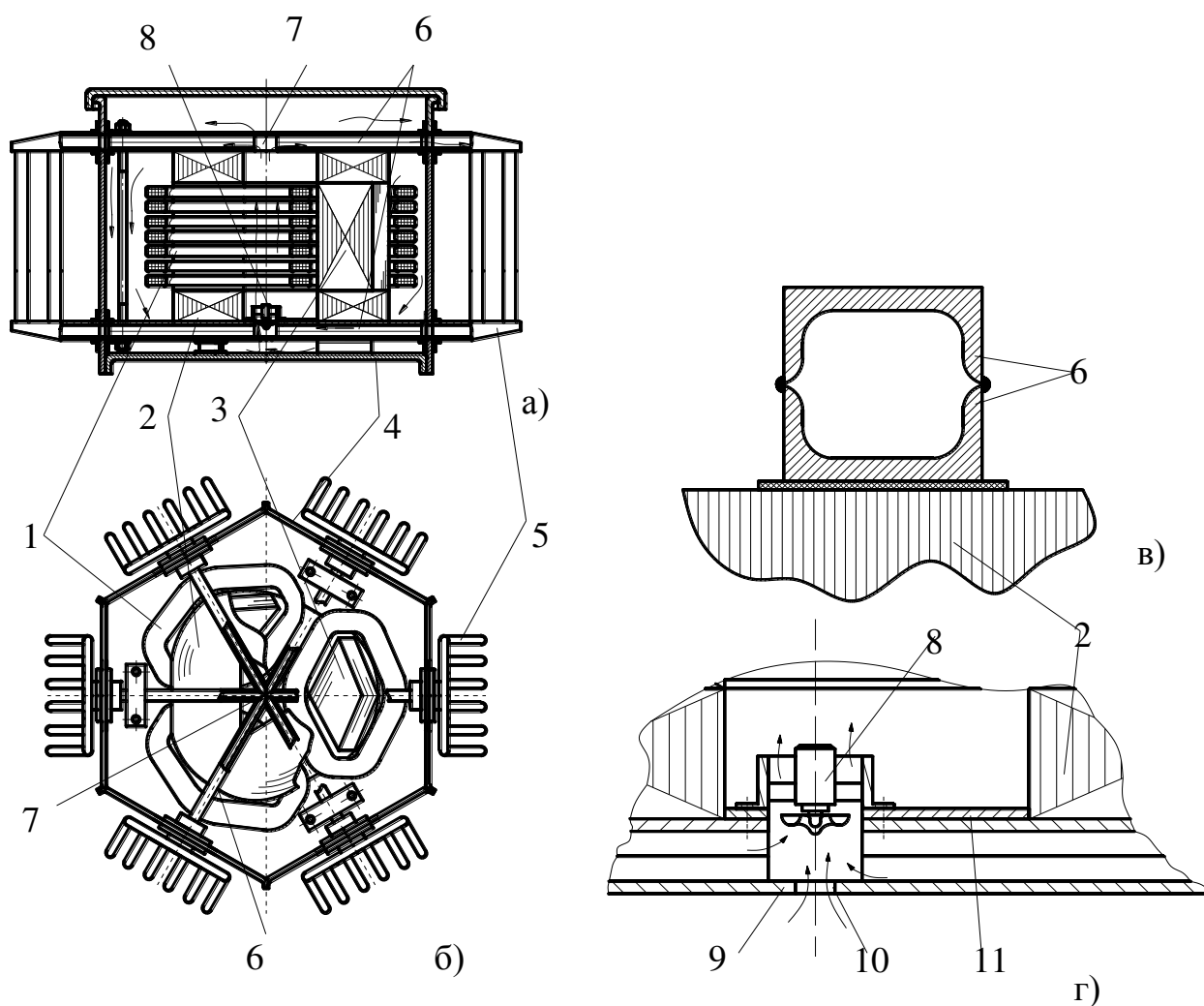


Рисунок 1.18 – Конструктивна схема трифазного трансформатора з обладнанням примусового охолодження – загальний вигляд в повздовжньому і поперечному перерізах (а, б), фрагмент магнітопроводу з яремною балкою (в), фрагмент нижнього ярма зі з'єднанням яремних балок (г):

- 1 – обмотка; 2 – ярмо; 3 – стрижень; 4 – бак; 5 – радіатор;
 6 – яремна балка – холодоагентопровід; 7 – верхній колектор маслопроводу;
 8 – електронасос; 9 – нижній колектор холодоагенту;
 10 – отвір входу холодоагенту; 11 – перегортка.

Інтенсифікація охолодження потужних ТТ здійснюється примусовою циркуляцією трансформаторного масла з комплектацією маслопроводу кожного радіатора електронасосом [22]. При цьому планарна структура ЕМС обумовлює збільшення кількості радіаторів зі зниженням одиничної потужності і продуктивності насосів та

зниженням енергетичної ефективності електроприводу системи охолодження ТТ. Просторова аксіальна ЕМС (рис. 1.17, б) дозволяє розташовувати обладнання примусової циркуляції трансформаторного масла в порожнинах зон внутрішніх контурів ярем (рис. 1.18, а, б).

У відповідності до принципу системного проектування [5], з метою підвищення компактності і енергоресурсозбереження, обладнання охолодження інтегрується в єдиний занурений електронасос з трубопроводами і масляними колекторами з конструктивних елементів, які пресують магнітопровід (рис. 1.18, в, г) [7].

Нерівномірність розподілу магнітного поля в елементах шихтованих і витих магнітопроводів обумовлена відмінностями довжин замикання силових ліній магнітного поля та об'ємів феромагнітних елементів в зонах зовнішнього і внутрішнього контурів, а також нелінійністю намагнічування ЕТС [26, 88, 89]. У витих магнітопроводах нерівномірність розподілу індукції в поперечних перерізах стрижнів та ярем підвищується коаксіальним розташуванням та ізолюванням суміжних витків ЕТС. При цьому є можливість впливу на розподіл індукції в елементах магнітного кола і зниження ВНР застосуванням комбінованих (шихтовано-витих) ярем або змінною ширини стрічки (рулону) в процесі розкroeння ЕТС та збільшення висоти ярма в напрямку його зовнішнього контуру при виготовленні магнітопроводу [88 – 90].

1.3. Постановка основної цілі дослідження

Специфічними показниками елементів технічних комплексів спеціального призначення є компактність, надійність та конструктивно-функціональна відповідність взаємопов'язаних складових блочного електрообладнання [5, 7, 18, 39], а також електромагнітна сумісність [17, 18, 78, 82].

Сучасний розвиток трансформаторобудування здійснюється традиційно на основі застосування нових досягнень електроматеріалознавства, інших галузей енергетики, зокрема криогенної техніки, а також ускладнення технологічних способів і обладнання виготовлення магнітопроводів [7, 8, 11, 12, 28, 45, 50, 52, 65 – 74]. При цьому складні технології, в тому числі STEP-LAP і MULTI-STEP-LAP не завжди

забезпечують позитивні результати [45, 52]. В [52] вказано, що конструктивно обумовлений кут косоного стику 45° планарного магнітопроводу для ТТ малої і середньої потужності є недостатнім. Вважається, що цей кут для мінімізації погіршення питомих показників зони наклепу ЕТС, потребує збільшення орієнтовано до $55 \dots 70^\circ$.

Необхідність рішення завдань удосконалення елементів спеціальних електротехнічних комплексів, зокрема трансформаторів, викликає постановку задачі структурної перебудови статичних ЕМС. Подібна перебудова передбачає пошук таких конфігурацій та сполучень активних елементів, які забезпечать максимальне заповнення об'єму, що обмежений циліндром або сферою.

З виконаного огляду і аналізу літератури випливає, що додатково до наведених в роботах [88, 89] традиційних конструкторсько-технологічних рішень, запропоновані нові варіанти вдосконалення ЕМС на основі секторних і шестигранних УК (рис. 1.17) [46 – 48, 84, 91, 92]. Вказані пропозиції, зокрема (рис. 1.17), підвищують компактність ЕМС частковим або повним усуненням порожнин в обмоткових вікнах ЕМС (рис. 1.12) і спрощують технологію виробництва магнітопроводів. Крім зменшення габаритних розмірів утворюються передумови зниження матеріаломісткості та підвищення надійності однофазних і трифазних трансформаторів [15, 16, 46 – 48].

Подальший прогрес у розробці ЕМС ТТ з покращеними показниками компактності, надійності та зручності вбудовування у циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметру є можливим при попередньому проектному обґрунтуванні впливу структурного перетворення ЕМС на ПТР та визначенні наявності можливих переваг або недоліків у порівнянні з існуючими аналогами. Подібний порівняльний аналіз пов'язаний з побудовою адекватних ММ розрахунку оптимальних геометричних співвідношень варіантів ЕМС, що визначають масовартісні показники та втрати активної потужності індукційних статичних пристроїв загального розподільного та спеціального призначень з використанням ідентичних КЗ.

В [89] на основі порівняльного аналізу методом [15] найкращою серед існуючих просторових варіантів, на стан виконання вказаної роботи, визначена ЕМС (рис. 1.17, а). Однак до теперішнього часу не виконано аналітичне порівняння цієї або інших варіантів просторових ЕМС з планарними аналогами на відомих умовах

ідентичності електромагнітної потужності [15, 16, 92].

Виходячи з викладеного та актуальності досягнення мети забезпечення подальших успіхів розвитку конструкцій і удосконалення спеціальних ТТ, виникає необхідність зіставлення нових різновидів компактних просторових ЕМС з базовими планарним і просторовим прототипами. Вказане зіставлення можливо виконати за допомогою об'єктивного аналітичного порівняльного аналізу варіантів ЕМС ТТ, що відрізняються структурою, конфігурацією УК та технологією виготовлення елементів. Такий аналіз є можливим на основі розробки ММ, що дозволяють визначити і зіставити ПТР вказаних варіантів та є основною метою дисертаційних досліджень. В даній роботі розглядаються ЕМС, варіанти структур та класифікаційні ознаки яких наведено в табл. 1.1.

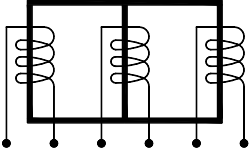
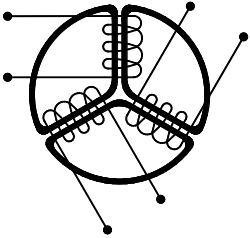
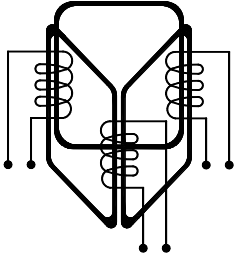
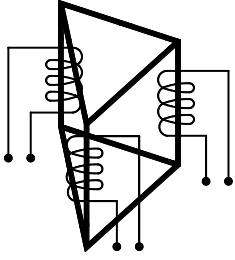
1.4. Висновки до розділу 1

1.4.1. Структури і геометричні співвідношення ЕМС традиційних конструкцій однофазних і трифазних трансформаторів, що встановлені в циліндричні і сферичні об'єми та оболонки обмеженого діаметру блочного обладнання електроенергетичних систем підводних апаратів і комплексів, не відповідають в достатній мірі вимогам компактності і надійності.

1.4.2. Основні конфігурації з прямокутними і круговими УК перерізів стрижнів магнітопроводів і витків котушок обмоток традиційних конструкцій планарних і просторових ЕМС, що використовуються при виробництві трансформаторів, характеризуються відомими недоліками та обмеженим потенціалом подальшого конструктивно-структурного розвитку.

1.4.3. Удосконалення традиційних ЕМС відбувається шляхом суттєвого ускладнення технології виготовлення, зокрема забезпеченням усіх косих стиків шихтовки зі зміною розмірів і зсувом суміжних шарів ЕТС. Однак таке ускладнення не є виправданим при виготовленні трансформаторів малої та середньої потужності. Це обумовлено зростанням додаткових втрат в кутових стикових ділянках магнітопроводів та трудомісткості виробництва.

Таблиця 1.1– Варіанти структур статичних електромагнітних систем, що розглядаються в роботі

Структурна схема електромагнітної системи	Класифікаційні ознаки електромагнітної системи
	<p>Планарна з суміщеними фазними елементами магнітопроводу</p>
	<p>Просторова радіальна з двоконтурними фазними елементами магнітопроводу</p>
	<p>Просторова аксіальна з двоконтурними фазними елементами магнітопроводу</p>
	<p>Просторова аксіальна з суміщеними фазними елементами магнітопроводу</p>

1.4.4. Традиційні можливості енергоресурсозбереження при виробництві і експлуатації трансформаторного обладнання на основі досягнень електроматеріалознавства обмежені фізичними властивостями матеріалів. Застосування додаткових і нетрадиційних засобів охолодження ЕМС потребує комплектації трансформуючих агрегатів допоміжним складним обладнанням, що не завжди можливо та прийнятно.

1.4.5. Окрім можливостей покращення властивостей матеріалів, що використовуються в електротехнічній промисловості, важливим резервом подальшого удосконалення трансформаторів уявляється перетворення структур і конфігурацій елементів планарних, а також аксіальних і радіальних просторових структур ЕМС на основі нетрадиційних УК.

1.4.6. Удосконалення і підвищення компактності трансформаторів морського, підводного та іншого спеціального призначення, може бути досягнуто шляхом рішення задач розробки ЕМС з нетрадиційною структурною будовою.

1.4.7. Для визначення доцільності застосування нетрадиційних розробок активної частини спеціальних трансформаторів необхідна побудова ММ, які надають можливість зіставлення компактних ЕМС. Подібні ММ повинні містити КЗ, що відповідають відомим і нетрадиційним УК елементів магнітопроводів і обмоток та забезпечують об'єктивний порівняльний аналіз вказаних ЕМС з класичними аналогами.

РОЗДІЛ 2

ПОДАЛЬШИЙ РОЗВИТОК КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОД ПОРІВНЯЛЬНОГО
АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ СТАТИЧНИХ ІНДУКЦІЙНИХ
ПРИСТРОЇВ

2.1. Перетворення структур і конфігурацій утворюючих контурів елементів електромагнітних систем з метою удосконалення індукційних статичних пристроїв

Конкурентоспроможність нетрадиційних конструкцій і конфігурацій ЕМС відносно їх класичних аналогів (рис. 1.11 – рис. 1.15, а) забезпечується вилученням погіршення технічних і екологічних показників виробництва нових ТТ, що розробляються. При цьому повинно бути забезпечено досягнення хоча б одного з можливих результатів перетворення ЕМС: зниження питомої матеріаломісткості, маси і габаритних розмірів, зниження основних і додаткових втрат, зниження трудомісткості та технологічної енерго і матеріаломісткості виробництва ТТ.

Запропоновані нетрадиційні варіанти просторових аксіальних і радіальних ЕМС однофазних і трифазних індукційних статичних пристроїв, які відрізняються зручністю вбудовування у циліндричні і сферичні об'єми і оболонки обмеженого діаметру. Вони розроблені на основі секторних, $n \geq 6$ -гранних і ромбічних УК перерізів стрижнів, обмоткових котушок і обмоткових вікон шихтованих, витих і комбінованих магнітопроводів [15, 16, 46 – 48, 91, 92].

Відмічені у розділі 1.2 недоліки тороїдної ЕМС (рис. 1.13) усуваються в однофазних конструкціях з шестигранним зовнішнім контуром шихтованого вперепліт (рис. 2.1, а) і вписаного у шестигранник витого стикового (рис. 2.1, б) тристрижневих магнітопроводів [93, 94]. Структури трисекційних (секція на стрижні) первинних (вторинних) обмоток (рис. 2.1) аналогічні обмоткам традиційних планарних ЕМС [20 – 23]. Тому вони є більш технологічними та позбавлені недоліків тороїдного намотування, що відмічені у підрозділі 1.2. Варіант ЕМС (рис. 2.1, б) може бути виконаний з шестигранними УК стрижнів і витків обмоткових котушок на основі

конструкції [95]. Варіанти ЕМС (рис. 2.1) пропонуються для розробки групових ТТ, які призначені для вбудовування у трубчаті оболонки [38, 39].

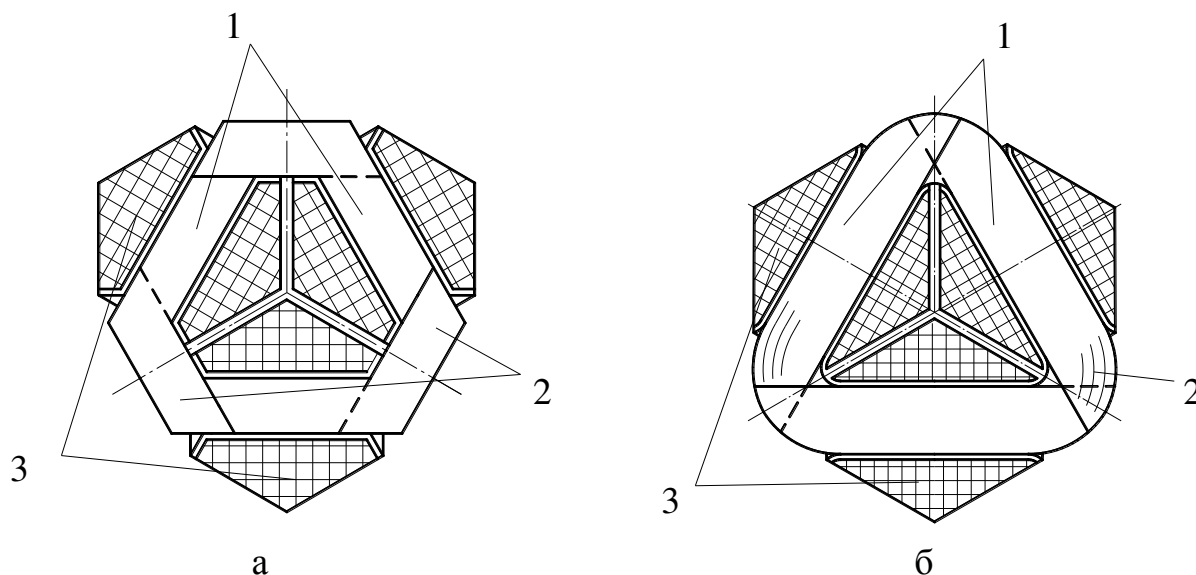


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологічні особливості однофазних тристрижневих електромагнітних систем з шихтованим (а) і витим (б) магнітопроводами:

1 - стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Аналогами удосконалення компактних трифазних ЕМС, що призначені для встановлення в циліндричні і сферичні оболонки [38, 39], є запропоновані М.О. Долово-Добровольським вихідні просторові структури ЕМС (рис. 1.8, а – в) [61]. Таким структурам відповідають конструкції – традиційні аксіальні з комбінованим та витим магнітопроводами (рис. 1.12, а, б) та радіальна з шихтованим магнітопроводом (рис. 2.2). Також з [20] відома конструкція групового ТТ з трьох встановлених радіально та вписаних у коло однофазних броньових ЕМС з трикутними внутрішніми УК витих роз'ємних осердь. При заміні в контурному колі шести осердь на три утворюється структура ЕМС (рис. 1.9, б). Заповнення кругових УК перерізами стрижнів в ЕМС (рис. 1.12 а, б) потужністю до 1000 кВ·А характеризується контурним коефіцієнтом $K_{\text{кк}} \leq 0,9$ [26]. Згідно [46], виробництво ТТ з комбінованим (рис. 1.12, а) і витим (рис. 1.12, б) магнітопроводами було засвоєне відповідно на Армелектро заводі (Вірменія) і Мінському електротехнічному заводі (Білорусь). На основі ЕМС (рис. 1.12, б) ОАО «Электрозавод» (Москва, Російська федерація) виробляє

ТТ ТСЗМ і ТСЗМВ морського призначення потужністю 40 ... 100 кВ·А (фото рис. 2.3) з покращеними, згідно [96], масогабаритними показниками.

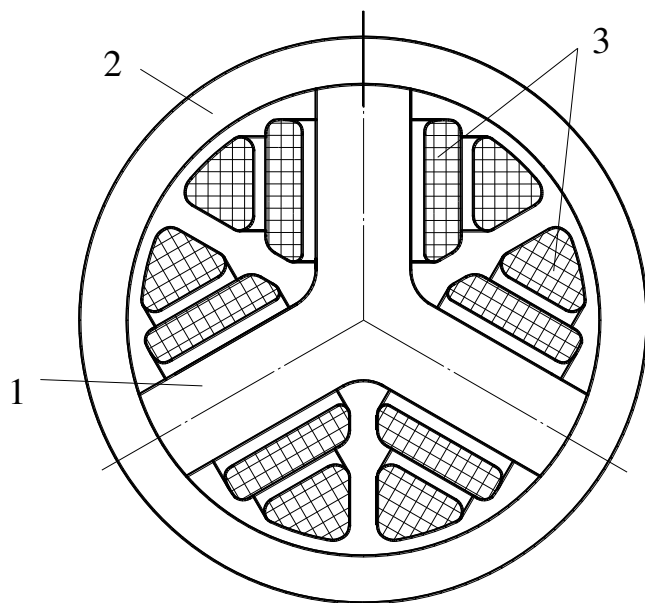


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема (в поперечному перерізі) трифазної радіальної електромагнітної системи підвищеної компактності :

1 - стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Конструктивно-структурні перетворення названих вище просторових аналогів створюють можливості розробки варіантів ЕМС ТТ підвищеної компактності. Різновидами таких перетворень є заміна в аксіальній ЕМС кругових УК стрижнів і обмоткових колушок (рис. 1.12, а) на секторні (рис. 1.17, а) і шестигранні (рис. 1.17, б) УК [15, 16, 46 – 49].

В ЕМС з секторними УК (рис. 1.17, а) [47, 88, 89] стрижні виконуються розрізанням коаксіальних витих заготівок, що обумовлює паралельність стінок обмоткових вікон. Також досягається еквідистантність шарів ЕТС та суміщення периферійних контурів стрижнів з кутовими ділянками ярем з трикутними УК. Цим досягається зниження на 15 ... 20 % габаритних розмірів ЕМС (рис. 1.17, а) відносно традиційних просторових аналогів (рис. 1.12, а, б) і зручність вбудовування у сферичний контурний об'єм діаметру $D_{\text{кв}}$. Також досягається деяке зниження втрат активної потужності і зниження на 6 ... 8 % масовартісних показників ЕМС (рис. 1.17, а) відносно еквівалентної за електромагнітною потужністю ЕМС (рис. 1.12, а) напругою до 1000 В ($K_{30} = 0,3$) з мідними і алюмінієвими обмотками та магнітопроводом з рулонної ізотропної ЕТС 2412 [89]. Однак конструктивні особливості магнітопроводу (рис. 1.17, а) обумовлюють, крім ЕМС малої потужності, ортогональність магнітного потоку стрижнів напряму прокату ЕТС.



а



б

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд (а) та вигляд зверху зі знятою кришкою (б) трифазного трансформатора ТСЗМ-40-74.ОМ5 морського виконання потужністю 40 кВ·А

Якщо неможливо застосування поперечного розкриття рулону ЕТС на окремі стрічки, необхідно використання для навивки заготовок стрижнів тільки ізотропної ЕТС або нової і поки кошовної ізотропної аморфної ЕТС. Також на зовнішньому контурі стрижнів витки котушок обмоток ЕМС (рис. 1.17, а), як і в планарній ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів (рис. 1.11, а), вигнуті під прямим кутом, що знижує надійність.

Аналіз особливостей структур ЕМС з витими елементами магнітопроводів виконаний в [99]. Використання шестигранних УК [46 – 48] (рис. 1.17, б рис. 2.4, а) декілька знижує деформацію кутових зон і знижує (при умові ідентичності площ перерізів стрижнів) середню довжину витків котушок обмоток відносно ЕМС (рис. 1.17, а) і традиційної ЕМС з прямокутними УК (рис. 1.11, а). Утворюється можливість формування стрижнів або стрижневих ділянок секцій ЕМС зі стиковими комбінованими (рис. 1.17, б) та витими трисекційними (рис. 2.4) магнітопроводами з контурним коефіцієнтом заповнення УК $K_{\text{кш}} \approx 1$ [48].

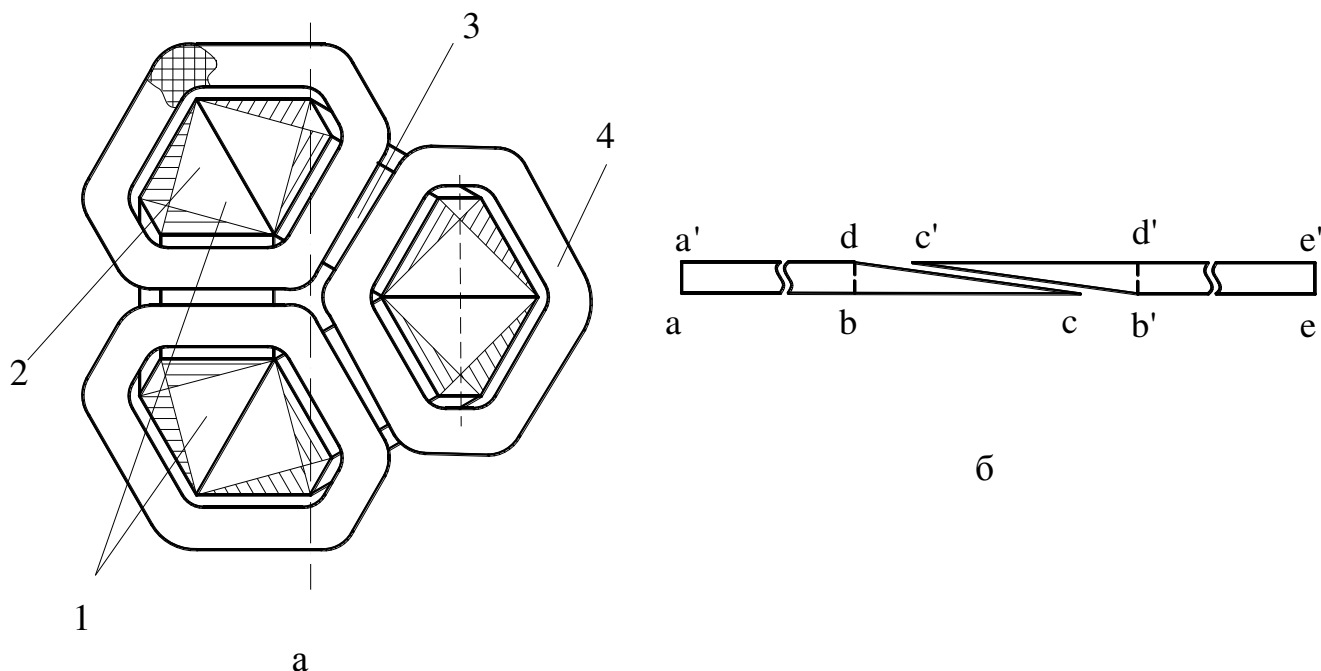


Рисунок 2.4 – Конструктивна схема аксіальної компактної електромагнітної системи з трисекційним магнітопроводом (а) і схема розділення стрічки електротехнічної сталі для навивки двох секцій (б): 1 – стрижень; 2 – стрижнева ділянка секції; 3 – яремна ділянка секції; 4 – котушка обмотки.

Стрижні і стрижневі частини секцій ЕМС (рис. 1.17, б, рис. 2.4,а) складаються відповідно з ідентичних прямокутних пластин і секційних заготовок (рис. 2.4, б) більш простих, відносно стрижнів з пакетів пластин (рис. 1.12, а) або стрічок (рис. 1.12, в) ширини, що змінюється, форм з текстурою ЕТС вздовж напрямку потоку. В процесі навивки секцій, що складають магнітопровід ЕМС (рис. 2.4, а), кожний наступний виток ЕТС з товщиною δ_c зсувається на постійну величину $\delta_c \text{tg}30^\circ$.

Згідно способу виготовлення [100], секційні заготовки (рис. 2.4, б) виконуються розділенням прямокутної смуги ЕТС $aee'a'$ на дві ідентичні частини з прямокутними $abda'$ і $b'ee'd$, а також трикутними bcd і $b'c'd'$ ділянками. Це утворює шестигранний переріз стрижня і аналогічно конструкції (рис. 1.17, б) знижує на 15 ... 20 % діаметр контурного кола ЕМС (рис. 2.4, а) та значно спрощує виготовлення заготовок (рис. 2.4, б) відносно аналогів (рис. 1.12, б, в).

Прикладом ЕМС компактного виконання (рис.1.17, а) є активна частина ТТ (фото на рис. 2.5) системи електрообладнання підводного апарату «МТК-200» [39].



Рисунок 2.5 – Трифазний трансформатор з просторовим стиковим магнітопроводом потужністю 6,3 кВ·А

Крім забезпечення певного рівня загальних ПТР, елементи та системи спеціального електрообладнання повинні відповідати вимогам електромагнітної сумісності [78, 82]. Як вказано в розділі 1.2, на основі несиметричних планарних і симетричних просторових радіальних ЕМС задовольнити вказані вимоги неможливо. Теоретично маломагнітні ТТ можуть бути розроблені з використанням структур просторових аксіальних ЕМС (рис. 1.8, в і рис. 1.9, в). Однак створення маломагнітних ТТ на основі вказаних структур супроводжується значними труднощами у вигляді технологічних відхилень [83], які пов'язані з заповненням традиційних УК елементами, що відрізняються розмірами або конфігураціями (рис. 1.12). В [84] зроблений аналіз і висновок про можливість розробки подібних ТТ на основі технічних рішень ЕМС (рис. 1.17, рис. 2.4, а), що забезпечують максимальне наближення до певної практичної технологічної електромагнітної симетрії ЕМС.

Підвищеним заповненням сферичного об'єму відрізняється вихідна конструкція ТТ [61] в трифазному магнітопроводі (рис. 2.2). В ЕМС конструкції [61] стрижні з обмотковими котушками розташовані під кутами 120° , з'єднані в центрі і зістиковані з кільцевим зовнішнім ярмом шихтованого магнітопроводу. Така ЕМС практично не використовувалась і не отримала розвитку у зв'язку зі значними відходами ЕТС при виготовленні магнітопроводу і наступної розробки М.О. Доліво-Добровольським просторових аксіальних і планарної ЕМС [61].

Практичну відсутність відходів при розкроєнні прямокутної смуги ЕТС на паралелограмні елементи і деяке зниження втрат кутових зон забезпечує радіальна ЕМС [101] з ромбічними обмотковими вікнами шихтованого вперепліт магнітопроводу (рис. 2.6, а, б). Зберігається зручність вбудовування ЕМС [101] у сферичний об'єм контурного діаметру $D_{кр}$ (рис. 2.6, б). На відміну від планарних ЕМС з магнітопроводами (рис. 1.14, б, в), косі стики шарів ЕТС магнітопроводів (рис. 2.6, а, в) з двоконтурними фазними елементами утворюються усього двома паралелограмними конфігураціями пластин ЕТС довжин, що відрізняються. При цьому кут косих стиків збільшений з 45° до 60° , що знижує налип ЕТС і втрати зони гострого кута [52]. Складання магнітопроводу з трьох типорозмірів пластин, що чергуються – двох паралелограмних (рис. 2.6, в) і третьої шевронної (рис. 2.6, г) суміщує фазні елементи

при шихтуванні шарів ЕТС вперепліт і виключає додаткові втрати від третьої гармонічної складової викривлення магнітного потоку, що виникають в ЕМС з двоконтурними фазними елементами.

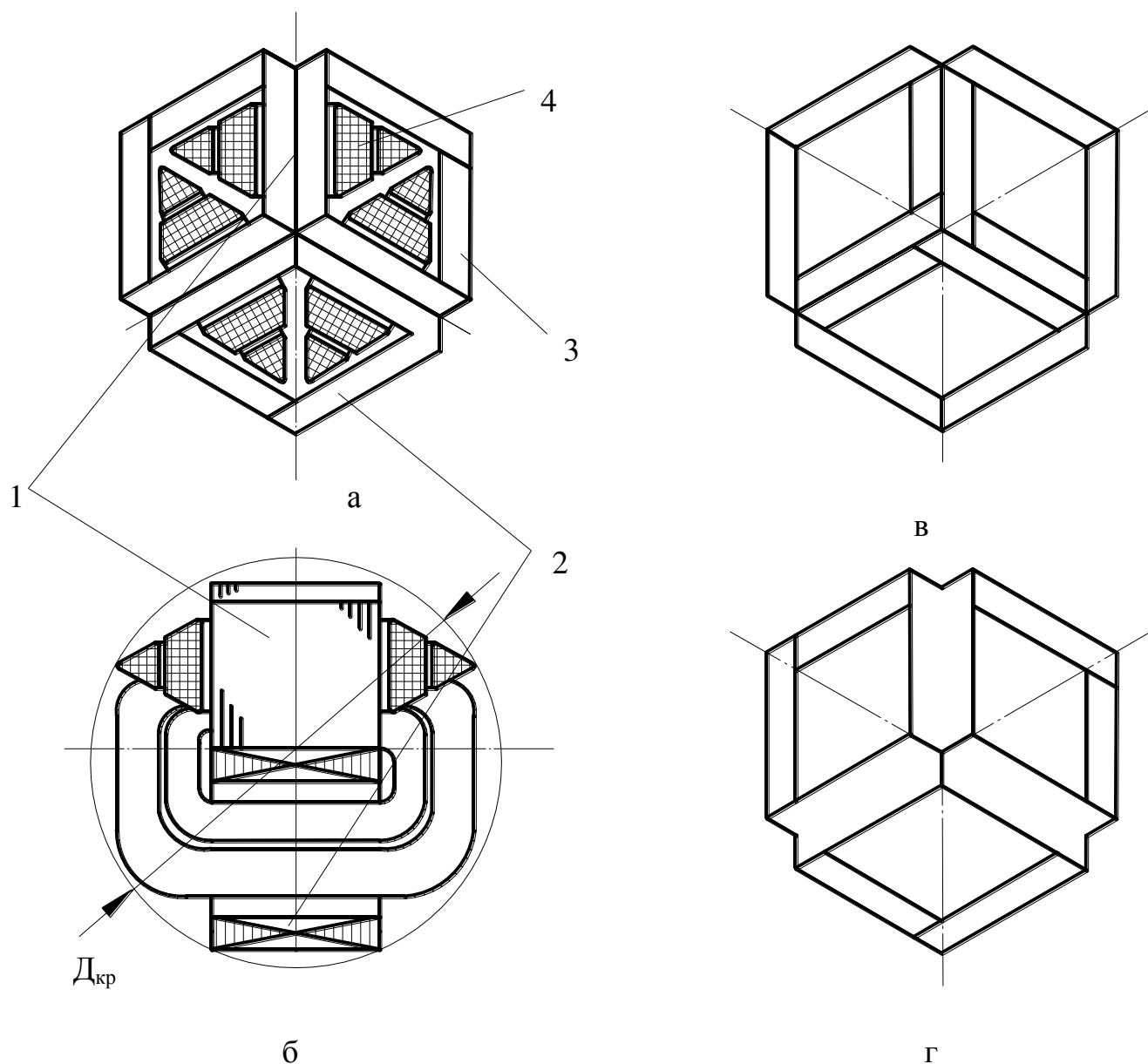


Рисунок 2.6 – Конфігурації перерізів стрижнів просторової радіальної електромагнітної системи (а, б) і елементарних шарів (в, г) трифазного радіального шихтованого магнітопроводу:

1 – стрижень; 2 – зовнішнє ярмо; 3 – внутрішнє ярмо; 4 – котушка обмотки.

Аналогом ЕМС (рис. 2.6, а, б) з двоконтурними фазними елементами є радіальна конструкція (рис. 2.7, а) з витим трисекційним магнітопроводом і секторними обмотковими вікнами, що запропонована в [48, 94]. Для спрощення виготовлення і

мінімізації технологічного зазору у роз'ємному магнітопроводі ЕМС (рис. 2.7, а), площина першого стику співпадає з площиною внутрішньої поверхні стрижневої частини секції, а другий стик виконується паралельно першому при повертанні секції на 180° без перестановки ріжучого інструменту. Для зменшення магнітного опору стиків та збільшення межі потужності ТТ з ЕМС (рис. 2.7, а), яка обмежена шириною ріжучого інструменту (абразивний диск), магнітопровід по аксіальній довжині поділяється на окремі частини. У суміжних частинах одна частина повертається відносно другої на 180° , що створює зсув стиків на 60° та можливість замикання силових ліній магнітного поля через суміжні торцеві поверхні секцій (рис. 2.7, б) [94].

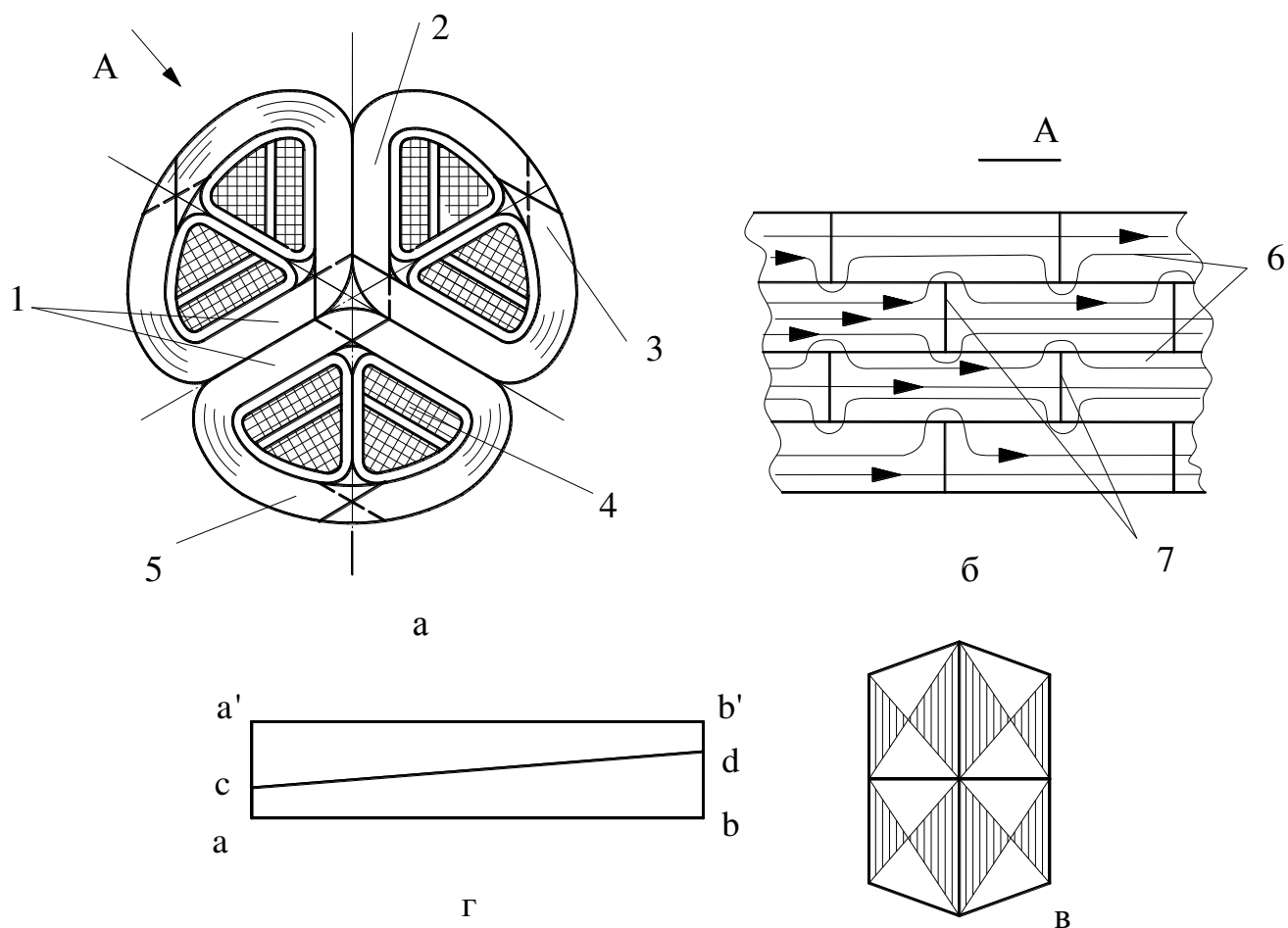


Рисунок 2.7 – Конструктивна схема радіальної електромагнітної системи (а) з зсунутими стиками (б) і шестигранними конфігураціями стрижнів (в) та схема заготовки стрічки для навивки елементів секції (г): 1 – стрижень;

2 – стрижнева ділянка секції; 3 – яремна ділянка секції; 4 – котушка обмотки;

5 – секція магнітопроводу; 6 – аксіальні частини магнітопроводу; 7 – секційні стики.

Використання замість традиційної прямокутної (рис. 1.11, а) трапецевидної (рис. 2.7, в) форми поперечного перерізу кожної секції [95] формує шестигранні УК і декілька знижує механічну деформацію кутових зон обмоткових витків і матеріаломісткість ЕМС (рис. 2.7, а) [47, 48].

Поряд з суттєвою перевагою $K_{\text{кш}} \approx 1$, що знижує матеріаломісткість [48], особливістю структур ЕМС (рис. 1.17, б, рис. 2.4, а, рис. 2.7, а, в, рис. 2.8) з шестигранними перерізами стрижнів є наявність ділянок витків і котушок обмоток, що сформовані прямими лініями, які перетинаються в УК під кутами 120° . В цих ділянках є неможливими деформації та внутрішні остаточні напруги вигину, які виникають по всій довжині витків котушок з криволінійними УК. Вказані напруги значно знижують електродинамічну стійкість ТТ [46].

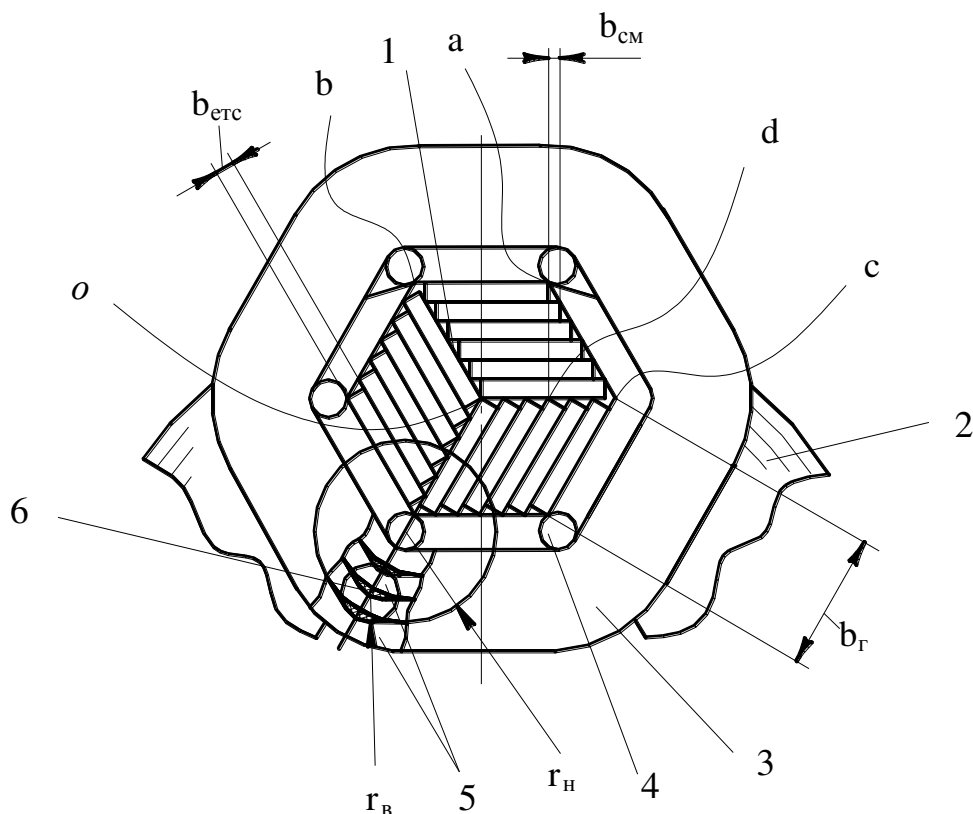


Рисунок 2.8 – Особливості конструкції електромагнітної системи з шестигранними конфігураціями стрижнів і обмоткових котушок: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки; 4 – опорний ізоляційний елемент; 5 – витковий елемент котушки; 6 – вертикальна ізоляційна прокладка.

Можливі пошкодження ізоляції, зони деформації і механічні напруги витків котушок (рис. 2.8) концентруються у місцях вигину провідників на вісях вершин шестигранника. Однак у цих місцях електрична і механічна міцність котушок обмотки підсилюється додатковою ізоляцією і опорно-ізоляційними елементами (прошивними рійками) [46, 48]. Для підвищення надійності обмоток прошивні рійки і вертикальні опорно-ізоляційні прокладки повинні виконуватися з формою поперечного перерізу, яка відповідає внутрішньому r_v і зовнішньому r_z радіусам округлень витків. Таким чином, уявляється можливим суттєве підвищення електродинамічної стійкості обмоток [46].

Знизити масу, основні і додаткові втрати ЕМС з традиційними шихтованими і витими магнітопроводами (рис. 1.14, рис. 1.15, а), а також значно спростити технологію виготовлення відносно нетрадиційних магнітопроводів (рис. 1.15, б, в), на думку автора, дозволяють варіанти магнітопроводу ЕМС (рис. 2.9, а). Конструкції комбінованого (рис. 2.9, б) і витого (рис. 2.9, в) магнітопроводів вказаної ЕМС запропоновані в [102]. Такі магнітопроводи містять симетричні бокові елементи і середній елемент. При прямокутному ($\alpha_c < 90^\circ$, рис. 2.9, а, б) і квадратному ($\alpha_c = 90^\circ$, рис. 2.9, в) перерізах стрижнів середній елемент відповідно набирається з ідентичних пластин ЕТС або становить частину витої заготовки. Ідентичні пластини середнього елемента (рис. 2.9, б) виконуються поперечним розділенням смуги ізотропної або аморфної ЕТС і забезпечують косі та повернуті у суміжних секціях на заданий кут стикові зазори. Квадратні перерізи стрижнів дозволяють скласти два практично ідентичних магнітопровода (рис. 2.9, в) з елементів, що отримані розрізанням двох витих заготовок однакової висоти h_m з різними довжинами l_1 і l_2 прямокутних внутрішніх контурів (рис. 2.9, г, д):

$$l_1 = h_m + 2b_o + 2b_p; \quad l_2 = 2b_o + b_p,$$

де b_o – ширина обмоткового вікна;

b_p – ширина ріжучого інструменту.

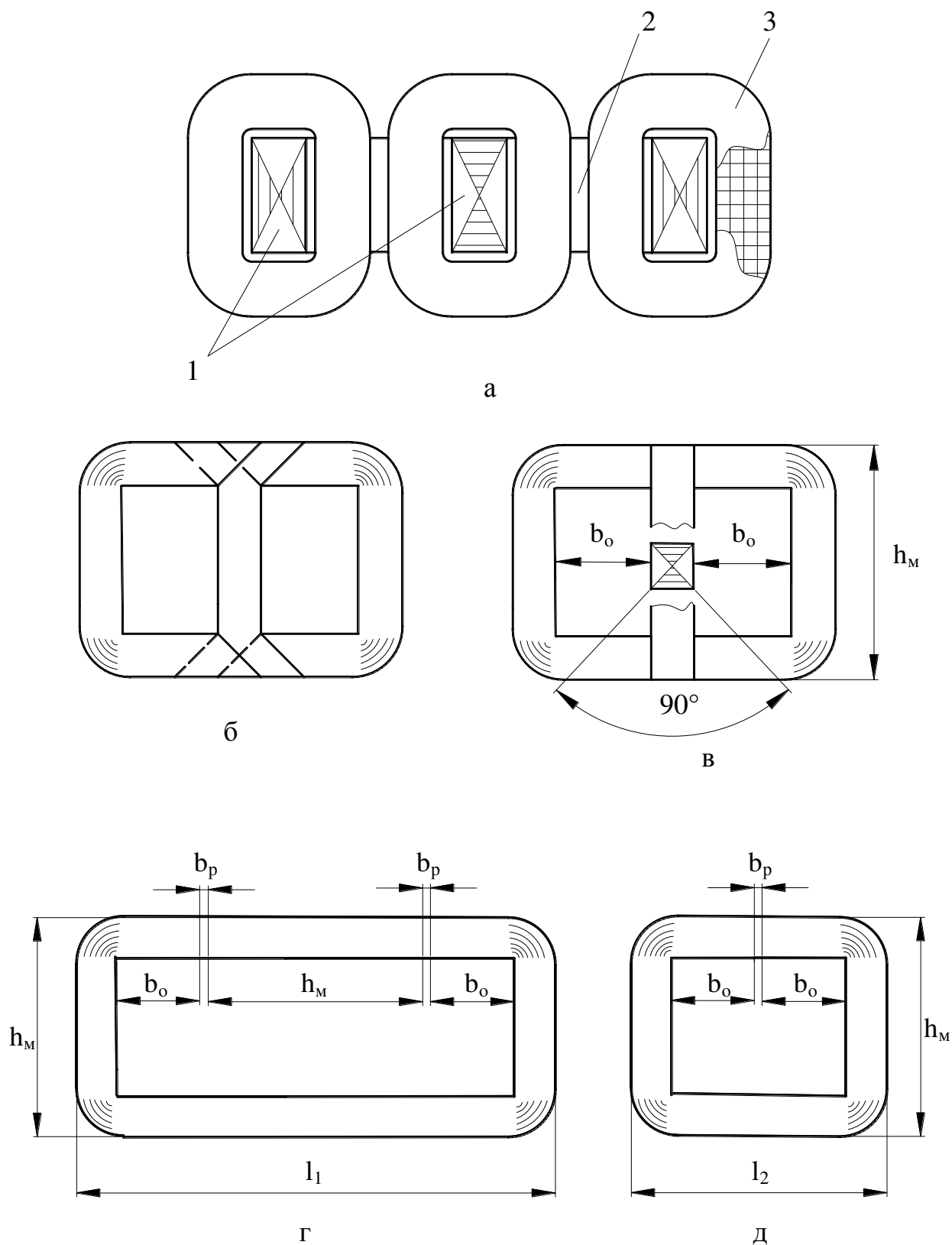


Рисунок 2.9 – Поперечна структура (а), конструктивні схеми комбінованого (б) і витого (в) варіантів та виті заготовки для виготовлення планарного стикового трифазного магнітопроводу зі зниженою металомісткістю:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

При мінімальній товщині стрічки (різновиди аморфної ЕТС) технологічні відхилення розмірів заготовок (рис. 2.9, г, д) мінімальні. Обмоткові котушки ЕМС (рис. 2.9, а) намотуються на ізоляційні каркаси, що охоплюють середні стрижневі ділянки елементів магнітопроводу.

Згідно [65, 67] ізоляційні обмоткові каркаси повинні скласти несучу базу ЕМС з аморфною ЕТС. Стикові з'єднання бокових і середнього елементів конструкцій (рис. 2.9, б, в) характеризуються взаємною перпендикулярністю площин шарів ЕТС і повинні мати надійну ізоляцію. Проблему ізоляції стиків магнітопроводів необхідно вирішувати використанням тонких міцних термостійких покриттів, що застосовуються для ізоляції прокату ЕТС [48]. Згідно оптимізаційним розрахункам [91], що виконані методом [15, 16], використання варіантів конструкції ЕМС (рис. 2.9, а) з магнітопроводами (рис. 2.9, б, в) забезпечує 6,6 ... 7 % зниження маси і вартості відносно еквівалентного (за електромагнітною потужністю) планарного традиційного аналога ЕМС ТТ з прямокутним зовнішнім контуром та перерізами стрижнів (рис. 1.11, а).

2.2. Цільові функції та показники технічного рівня порівняльного аналізу електромагнітних систем

Виходячи з необхідності вибору з сукупності конструкторсько–технологічних рішень певних варіантів, що є раціональними для конкретних розробок ТТ, наприклад з активною частиною, що вписується в контурний діаметр $D_{к(ш)}$ (рис. 1.17), виникає питання визначення переваг або недоліків таких варіантів відносно інших. Подібне визначення, згідно [79], здійснюється порівнянням ПТР нової розробки електромеханічного пристрою з показниками базового аналогу. Відповідно виникає необхідність визначення методу об'єктивного порівняльного аналізу вказаних та традиційних (рис. 1.12, а, б, рис. 2.10) ЕМС. Аналітичний порівняльний аналіз варіантів ЕМС є можливим на основі розрахунків їх оптимальних геометричних співвідношень за певними критеріями, що відповідають заданим ПТР.

Оптимізація індукційних статичних пристроїв виконується на основі ММ з частковими або інтегральними критеріями оптимізації і сукупності незалежних та

залежних КЗ. Оптимізаційні КЗ включають елементи геометрії та ЕМН, а також інколи деякі співвідношення, зокрема ВКЗ і ВНР [9, 10, 28, 85, 86, 103 – 108]. Однак геометричні параметри або співвідношення і рівні ЕМН визначаються відповідно певними конфігураціями перерізів стрижнів і обмоткових котушок та конкретним виконанням ТТ. Крім того, співвідношення ЕМН та вказаних втрат є залежними від потужності і частоти струму f , а також типу охолодження та умов експлуатації ТТ [20 – 26, 64 – 72].

Наприклад, одними із взаємно неприйнятних геометричних КЗ оптимізації традиційних ЕМС з індивідуальними геометричними особливостями, є співвідношення боків a_c і b_c (рис. 1.11, а) прямокутного перерізу стрижня [85, 86] і діаметр кругового УК секціонованого «східчастого» перерізу стрижня (рис. 1.11, б) [9, 107].

Питомі показники, наприклад маси і об'єму, що використовуються при аналізі конструкцій і проектуванні ЕМС [107] залежать від потужності, призначення і способу охолодження ТТ. Крім того, визначені вище геометричні КЗ, що відображають індивідуальні структурні особливості, ускладнюють об'єктивне порівняння варіантів ЕМС і сумісно з питомими показниками і КЗ у вигляді ЕМН [9, 104, 105] не задовольняють умові універсальності використання при порівняльному аналізі.

Конфігурація УК перерізу стрижня певної площі впливає на величину його периметру і матеріаломісткість обмоток. При заданій площі перерізу периметр шестигранного УК стрижня (з $K_{\text{кш}} \approx 1$) зменшується відносно периметру квадратного і кругового (з $K_{\text{кк}} < 0,922$) УК відповідно на 6,85 ... 6,93 % та 4,49 ... 7 % [48].

Задача порівняльного аналізу ЕМС ТТ, що відрізняються певними особливостями структур та призначень, потребує розробки ММ з ЦФ, що відображають ПТР за допомогою спеціальних КЗ. Такі КЗ і відповідно ПТР повинні буди незалежними від конфігурацій УК і положень елементів ЕМС у просторі та особливостей замикання магнітного поля і технологічних способів виготовлення магнітопроводів. Також вказані КЗ і ПТР повинні бути незалежними від виконання ТТ («сухий», «масляний», «елегазовий», з примусовою вентиляцією, ...) і потужності.

В роботі розглядається задача визначення впливу структурного перетворення активних елементів ЕМС на ПТР ТТ. Метою подібного перетворення є наближення

зовнішньої форми активної частини до циліндру або сфери. Пошук варіантів ЕМС для забезпечення вказаного виконання ТТ, тобто структурного синтезу, досягається евристичними прийомами перетворення конфігурацій, структур, положень в просторі [109] при розробці нетрадиційних технічних рішень. Вибір певної структури ЕМС з наявних варіантів відноситься до задач структурного синтезу [110]. Для рішення подібних задач необхідна оцінка якості варіантів структур, яка може бути отримана на основі параметричного синтезу об'єкту оптимізації. Однак параметричний синтез є можливим тільки при заданій структурі такого об'єкту. Тому вказані різновиди синтезу повинні розглядатися у єдиному обчислювальному процесі об'єднання двох оптимізаційних задач [110]. При евристичному пошуку нових структур об'єднання структурного і параметричного синтезу досягається методом експертної оцінки на основі призначення коефіцієнтів вагомості [79] або коефіцієнтів переваг [110].

Згідно [79] оцінка якості нової розробки електричної машини у відповідності до експертного методу [109, 110] досягається порівнянням ПТР (табл. 2.1). Також може бути визначений комплексний відносний ПТР

$$Q_K = \sum_{i=1}^n q_{ki} m_{ki},$$

де q_{ki} – відносний ПТР, який визначається співвідношенням однотипних i -х величин, що характеризують технічний рівень нової розробки і умовного базового аналогу;

m_{ki} – коефіцієнт вагомості i -го показника.

Якщо всі показники q_{ki} нової розробки ТТ є кращими відносно аналогу, m_{ki} можна не визначати.

Головна мета даної роботи, а саме порівняльний аналіз обраних варіантів структур (табл. 1.1) і конструкцій (рис. 1.12, б, рис. 1.17, рис. 2.4, а, рис. 2.6, а, б, рис. 2.7) ЕМС, виконується при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності [111] або ідентичності електромагнітної потужності [112, 113].

Електромагнітна потужність трансформатора визначається [20]

$$S' = mEI = 4,44mfK_{3c}K_{3o}S_{\text{пс}}S_oJB_c n_w,$$

де m – число фаз;

E і I – електрорушійна сила і приведений вторинний струм;

K_{3c} – коефіцієнт заповнення перерізу стрижня ЕТС;

$S_{\text{пс}}$ і S_o – площі перерізу стрижня і обмоткового вікна;

n_w – коефіцієнт, який визначає частину площі обмоткового вікна, що займає вторинна обмотка.

Задача порівняльного аналізу ЕМС вирішується на основі визначення і зіставлення екстремумів «унімодальних» ЦФ, які відповідають основним ПТР (табл. 2.1) і універсальним КЗ. Універсальними КЗ є такі, які прийнятні і ідентичні як для варіантів, що порівнюються, так і для будь-яких з різноманітних існуючих та майбутніх нетрадиційних пропозицій конструкцій ЕМС. Крім того, для усунення залежності від потужності і способу охолодження та відповідності коефіцієнтам вагомості (переваг) [79, 110], основні ПТР ТТ і основні КЗ повинні бути виставлені у безрозмірних та відносних одиницях. Викладеним умовам електромагнітної еквівалентності і універсальності відповідає метод оптимізації [15, 16, 92]. Згідно вказаному методу будь-яка структура будь-якого варіанту однофазної або багатофазної ЕМС з певним ii -м позначенням, зокрема ТТ, може бути подана сукупністю ЦФ, що містять безрозмірні ПТР

$$F_{ii} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K_{\text{ці}} \Pi_{iii}^*, \quad (2.1)$$

де $\Pi_{\text{ТТ}}$ – показник вихідних даних і ЕМН ТТ;

$K_{\text{ці}}$ – складова питомих характеристик (маси, вартості або втрат) використаної ЕТС, що відповідає F_{ii} ;

Π_{iii}^* – складова повної ЦФ одного з трьох основних ПТР ЕМС у вигляді безрозмірних коефіцієнтів – показників відповідно маси Π_{1ii}^* , вартості Π_{2ii}^* і втрат активної потужності Π_{3ii}^* [15, 16, 92].

Ідентичним електромагнітним потужностям S ЕМС, що порівнюються, відповідають ідентичні показники $\Pi_{\text{ТТ}}$.

Показник $\Pi_{\text{ТТ}}$ [м⁴] ЦФ (2.1), наприклад для двохобмоткового ТТ визначається даними технічного завдання на розробку і ЕМН, до яких, крім індукції B_c [Тл], входять щільності фазних струмів $J_{1(2)}$ [А/(10⁻⁴ м²)] первинної (вторинної) обмотки та інші відомі величини [20 – 23, 26 – 28]

$$\Pi_{\text{ТТ}} = \frac{S_{\text{н}} \cdot 10^3}{6,66 B_c f_1} \left(\frac{K_{\text{U}1} \cos \varphi_2}{J_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{K_{\text{U}2}}{J_2} \right), \quad (2.2)$$

де $S_{\text{н}}$ – номінальна потужність [кВ·А];

f_1 і $\cos \varphi_2$ – частота мережі [Гц] та енергетичний коефіцієнт навантаження;

η і $\cos \varphi_1$ – коефіцієнт корисної дії і енергетичний коефіцієнт ТТ;

$K_{\text{U}1(2)}$ – коефіцієнти номінальної зміни напруги під навантаженням $\Delta U_{\%}$ [21],

$$K_{\text{U}1} = 1 - \Delta U_{\%} / 200 ; \quad K_{\text{U}2} = 1 + \Delta U_{\%} / 200 .$$

Вираз показника вихідних даних однофазного трансформатора визначено в [114].

Показники Π_{iii}^* визначаються без обрахування маси (вартості) конструкційних елементів, яка знижується при підвищенні компактності варіантів ТТ. Також не обраховується головна ізоляція обмоток, яка незначно підвищує загальну масу (вартість) ЕМС відносно активних електротехнічних матеріалів, що входять до неї і приблизно однакова у варіантах, які порівнюються. Вказані показники, крім коефіцієнту K_{30} , є функціями двох основних універсальних відносних геометричних КЗ a_m і λ_o , а також третьої додаткової геометричної КЗ α_c (рис. 2.10). Показник Π_{3ii}^* також є функцією K_{30} , a_m і λ_o , але додатково залежить від коефіцієнту K_{yii} співвідношення ЕМН і питомих характеристик електротехнічних матеріалів, що визначають втрати в заданому діапазоні зміни співвідношень ЕМН ТТ з певним варіантом ЕМС:

$$\Pi_{1(2)ii}^* = f(K_{30}, a_M, \lambda_0, \alpha_c); \quad (2.3)$$

$$\Pi_{3ii}^* \equiv f(K_{30}, a_M, \lambda_0, \alpha_c, K_{yii}). \quad (2.4)$$

Крім того, Π_{iii}^* залежать від співвідношень питомих характеристик електротехнічних матеріалів. Π_{1ii}^* залежить від співвідношення щільностей ПМ і ЕТС γ_o/γ_c , Π_{2ii}^* залежить від добутку співвідношень вказаних щільностей і вартостей C_o/C_c ПМ і ЕТС магнітопроводу, а Π_{3ii}^* сумісно з K_{yii} є залежними від щільностей струму і індукцій стрижнів та питомих втрат обмоток і ЕТС магнітопроводів, а також відомих коефіцієнтів додаткових складових ВНР і ВКЗ кожного ii -го варіанту ЕМС, що порівнюється [20 – 24, 26 – 28, 45].

Геометричні КЗ a_M і λ_0 визначаються відношенням зовнішнього D_{nii} і внутрішнього D_{vii} розрахункових діаметрів та, крім того, відношенням висоти h_{oii} і ширини b_{oii} обмоткового вікна магнітопроводу, наприклад вікна (рис. 1.14, а) і діаметрів планарної ЕМС (рис. 2.10), що мають певні позначення кожного з ii -х відомих та нових можливих варіантів ЕМС:

$$a_M = D_{nii} / D_{vii}; \quad (2.5)$$

$$\lambda_0 = h_{oii} / b_{oii}. \quad (2.6)$$

Необхідність введення значення центрального кута стрижня α_c виникає, наприклад при рішенні задач аналізу і оптимізації планарних і просторових ЕМС відповідно з прямокутними і шестигранными перерізами стрижнів. Такі задачі вирішувались в [76, 77, 91, 115 – 118].

В планарній ЕМС (рис. 1.11, а, рис. 2.10) при зменшенні кута α_c відносно значення, що відповідає квадрату, підвищується середня довжина витка і маса обмоткових котушок, але знижується маса магнітопроводу. Габаритні розміри просторової аксіальної ЕМС з комбінованим стиковим магнітопроводом зменшуються заміною УК у вигляді кола (рис. 1.12, а) або рівнобічного шестигранника (рис. 2.8) на симетричні шестигранні контури [48, 91]. При цьому зі зростанням α_c також підвищується

маса обмоткових котушок і знижується маса магнітопроводу.

Площини структурного положення геометричних параметрів D_{nii} , D_{vii} , і h_{oii} , b_{oii} , що мають певні позначення ii -х варіантів, та параметру α_c , при розробці ММ будь-якого з існуючих, наприклад (рис. 2.10) з $D_{n(v)пп}$, $b_{опп}$, і можливих інших ЕМС обираються виходячи з забезпечення унімодальності ЦФ (2.1), тобто можливості розрахункового визначення явного екстремуму (мінімуму) Π_{iii}^* безрозмірної складової Π_{iii}^* ii -го варіанту ЕМС.

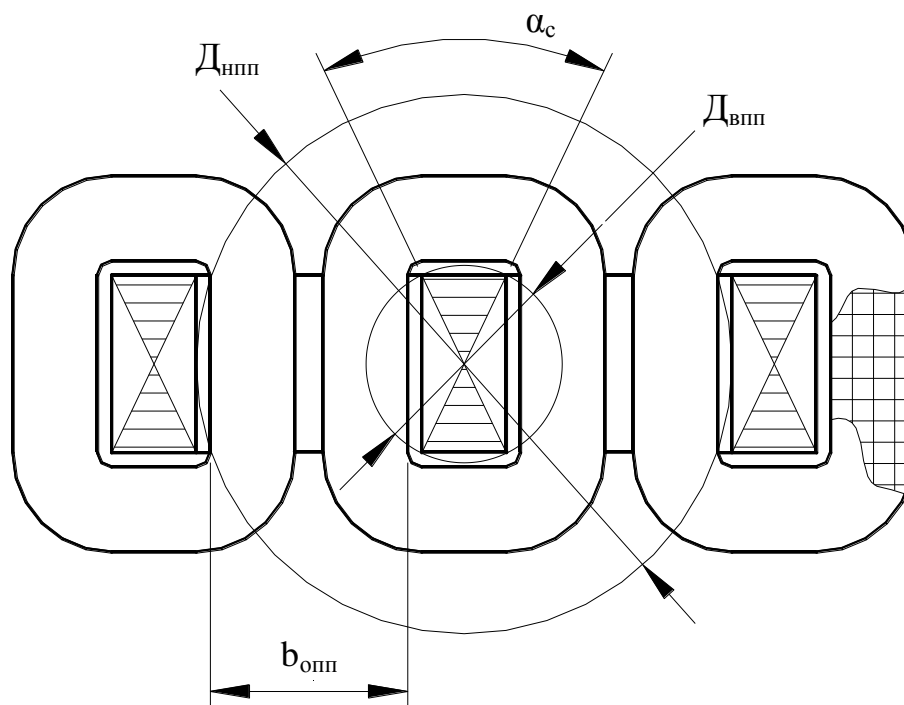


Рисунок 2.10 – Поперечний переріз і геометричні параметри планарної електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами та шихтованим магнітопроводом

Оптимальні значення показників Π_{iii}^* і екстремальні значення КЗ a_{me} , λ_{oe} , α_{ce} визначаються чисельними рішеннями нелінійних рівнянь (2.3), (2.4), наприклад методом покоординатного спуску за алгоритмом (рис. 2.11), або рішенням системи трьох нелінійних рівнянь, тобто методами дослідження функцій з аналітичними виразами [110]:

$$\frac{d\Pi_{iii}^*}{da_M} = 0; \quad \frac{d\Pi_{iii}^*}{d\lambda_o} = 0; \quad \frac{d\Pi_{iii}^*}{d\alpha_c} = 0.$$

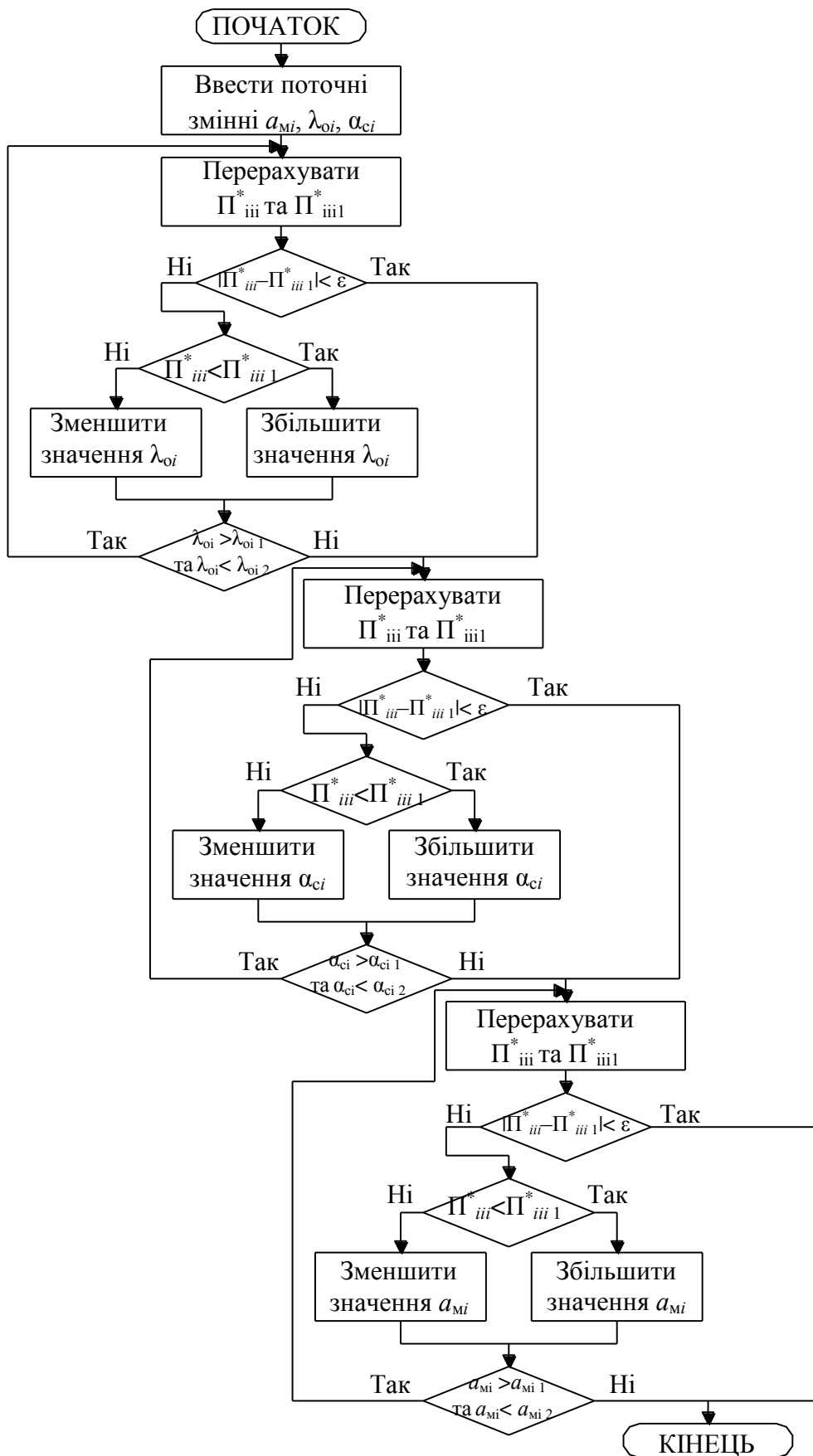


Рисунок 2.11 – Блок-схема алгоритму визначення екстремуму цільової функції трьох керованих змінних a_m , λ_o , α_c методом покоординатного спуску

Рішення задачі оптимального проектування ТТ заданої потужності і конкретного виконання методом [15, 16, 92] може бути здійснено поетапними розрахунками [9, 85, 103, 121]. Першим етапом визначаються оптимальні геометричні співвідношення за частковим критерієм. Такі співвідношення, що отримані за критеріями мінімумів маси і вартості з використанням безрозмірних ПТР та універсальних геометричних КЗ, є незалежними від ЕМН. На другому і третьому етапах визначаються ЕМН при заданих геометричних співвідношеннях і проектних обмеженнях (перевищення температури, напруга короткого замикання, ...), а також виконується перевірочний розрахунок з використанням відомих методик [20 – 23, 26, 104, 105].

Для усіх варіантів статичних ЕМС, що розглянуті в [89, 97, 98, 114] та даній роботі, основною КЗ, що визначає ПТР згаданим вище методом, є координата a_m , (рис. 2.11). Тому корегування λ_0 з метою забезпечення заданого U_k не викликає значної зміни Π_{iii}^* відносно Π_{iiie}^* .

Порівняльний аналіз варіантів ЕМС методом безрозмірних ПТР [15, 16, 92] здійснюється визначенням і зіставленням, незалежно від складових Π_{TT} , екстремумів (мінімумів) Π_{iiie}^* складових Π_{iii}^* ЦФ (2.1). Показник Π_{TT} у визначенні оптимальних геометричних співвідношень при порівнянні варіантів ЕМС не використовується і приймається у відповідності з принципом еквівалентності електромагнітної потужності ідентичним для вказаних варіантів однакового призначення і використання. ЦФ (2.1) у цілому може використовуватись в поетапній параметричній оптимізації [9, 103, 104] конкретної розробки ТТ за одним з Π_{iii}^* з варіюванням в показнику Π_{TT} ЕМН у послідуєчих етапах та ітераціях, при заданих проектних обмеженнях (перевищення температури обмоток, напруга короткого замикання, співвідношення ВКЗ і ВНР, ...). Також на основі сукупності F_{iii} (2.1) при $K_{ц1}$, $K_{ц2} = \gamma_c C_c$ і $K_{ц3}$ може бути складена ЦФ інтегрального ПТР, наприклад ЦФ капіталізованої вартості ТТ, що враховує вартості ЕМС, ВНР і ВКЗ [28], або узагальнена функція багатокритеріального ПТР ТТ з узагальненим «ваговим» коефіцієнтом, складові якого визначаються у відносних одиницях [108]. Зокрема оптимізацію ТТ з ii -м варіантом ЕМС за критерієм повної капіталізованої вартості можна виконати на основі рівняння вказаного критерію [28].

2.3. Розширення можливостей універсального методу порівняльного аналізу електромагнітних систем

Для більшості об'єктів підводної, авіаційно-космічної, бронетанкової та іншої спеціальної техніки [18, 19, 30 – 34, 78, 80, 81] найбільш важливими є масогабаритні показники [18, 33, 34]. Для підводних апаратів першим основним показником є об'єм і другим маса, а для об'єктів авіаційно-космічної техніки відповідно маса і об'єм. Тому при проектному забезпеченні показника маси (об'єму), що наближається до мінімального значення, дуже актуальним завданням є виключення суттєвого зростання показника об'єму (маси) і навпаки.

Габаритні розміри і діаметр контурного кола $D_{кс}$, $D_{кш}$, або $D_{кр}$ різноманітних варіантів ЕМС (рис. 1.17, рис. 2.6) залежать від певної сукупності геометричних КЗ a_m , λ_o і α_c . У зв'язку з цим в [119] сукупність (2.1) доповнена вельми важливою для трансформаторів спеціального зануреного і вбудованого виконань ЦФ контурного об'єму $[м^3]$ (табл. 2.1)

$$F_{4ii} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}}\right)^3 \Pi_{4ii}^* \quad (2.7)$$

де Π_{4ii}^* – відносний показник діаметру описаного кола сферичного або циліндричного об'єму, що обіймає ii -й варіант ЕМС, наприклад кола $D_{кас(ш)}$ варіантів компактної аксіальної ЕМС (рис. 1.17, а, б),

$$\Pi_{4ii}^* = f(K_{зо}, a_m, \lambda_o, \alpha_c). \quad (2.8)$$

Практичним наслідком використання показника (2.7) є можливість визначення $F'_{4(1)ii}$ в межах змін a_m , λ_o (рис. 2.12) і α_c поблизу їх екстремальних значень a_{me} , λ_{oe} , α_{ce} , що задовольняє умові:

$$\Delta a_m = a_m'' - a_m'; \quad \left(\Pi_{4(1)ii}^*\right)' \approx \text{const} \approx \Pi_{4(1)ii}^* \min \cdot$$

Визначення (2.8) і F'_{4ii} при проектуванні забезпечують максимальну компактність при практичному заданому максимальному наблизенні до мінімуму одного з показників Π^*_{iii} , наприклад показника маси ЕМС спеціального ТТ. Це також сприяє підвищенню технічного рівня об'єкту його встановлення – підводного (космічного) апарату у цілому [119].

На основі ММ [76] за допомогою послідовних наближень і графоаналітичним шляхом визначені геометричні співвідношення ЕМС (рис. 1.17, а), які відповідають мінімуму ЦФ (2.7). При цьому встановлено [120], що вказані геометричні співвідношення викликають незначне збільшення маси в межах 1 % відносно геометричних співвідношень [76], що відповідають критерію мінімуму маси.

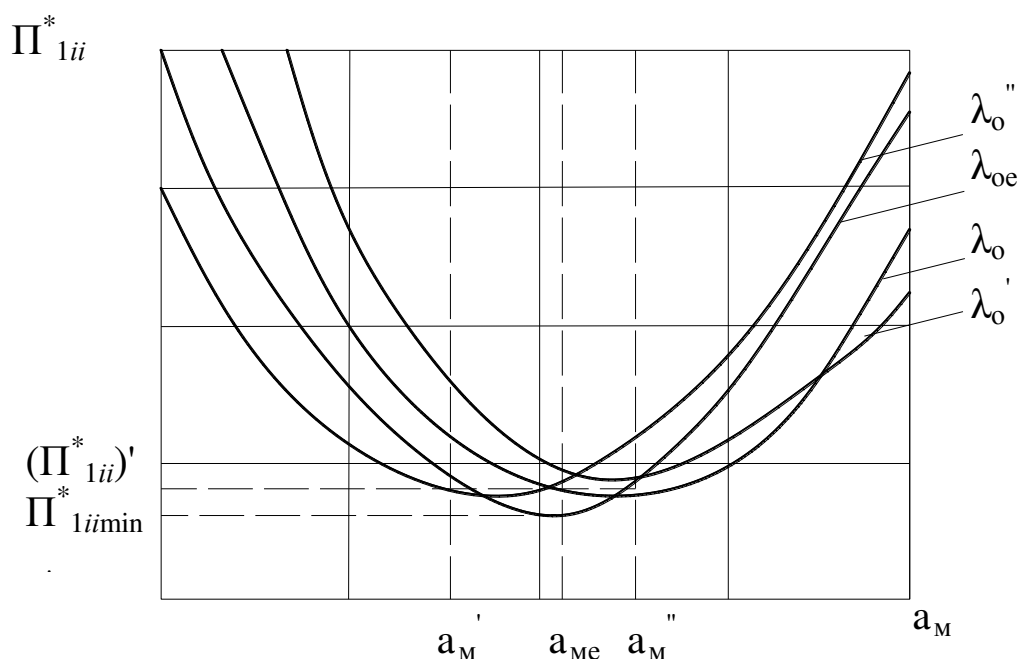


Рисунок 2.12 – Унімодальні залежності показника маси від геометричних співвідношень активної частини трансформатора

Відміни структур обмоток, що використовуються в трансформаторобудуванні [20 – 23, 25 – 28], ускладнюють процес аналізу варіантів ЕМС. Тому для спрощення рішення задачі порівняльного аналізу ЕМС реальні обмотки замінюються на еквівалентні. В магнітопроводах варіантів ЕМС з прямокутними обмотковими вікнами (рис. 1.11, рис. 1.12, а, б, рис. 2.10) концентричні обмотки замінюються еквівалентними галетними (такими, що чергуються) з однаковою середньою довжиною витка

l_{wii} і однаковою щільністю струму $J_1=J_2=J_0$ котушок високої і низької напруг [15]. Однак виникає необхідність заміни реальних обмоток ТТ в обмоткових вікнах нетрадиційної конфігурації еквівалентною (за площею обмоткового вікна, що займає активний матеріал витків, потужністю, а також втратам) обмоткою [121] з щільністю струму J_0 . Прикладом подібної конфігурації є секторні обмоткові вікна магнітопроводу радіальної ЕМС (рис. 2.7, а).

В [92, 122] і в додатку А показано, що при виразі геометричних параметрів ii -го варіанту ЕМС через КЗ a_m , λ_o і α_c , розрахункові рівняння визначення усередненої довжини витка l_{wii} еквівалентної обмотки, площі обмоткового вікна S_{oii} та активної площі поперечного перерізу стрижня S_{cii} мають однаковий вигляд для трансформаторів і реакторів. Також рівняння об'єму, маси та втрат ідентичних структур, УК і конструкцій магнітопроводів і обмоток, що визначені у безрозмірних одиницях, мають однаковий вигляд для вказаних електромеханічних пристроїв. У зв'язку з цим ЦФ ПТР трифазного реактора (дроселя) F_{pii} мають вигляд, аналогічний рівнянню (2.1) для ЕМС ТТ аналогічної структури і конструкції. Вказані рівняння відрізняються лише показником вихідних даних і ЕМН, тобто показник ТТ $\Pi_{ТТ}$ замінюється на показник трифазного реактора $\Pi_{Тр}$ [122]:

$$F_{pii} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{Тр}} \right)^3 K_{цв} \Pi_{iii}^*;$$

$$\Pi_{Тр} = Q_H / (6,66 B_c f_1 J_p),$$

де Q_H і J_p – номінальна потужність і щільність фазного струму реактора.

У зв'язку з цим величину усередненої довжини l_{wii} і масу m_{wii} еквівалентної обмотки можна визначити на основі заміни системи обмоток високої і низької напруг трансформатора розрахунковою обмоткою, що відповідає структурно еквівалентному реактору з замкненим магнітопроводом.

Запропонований в [15, 16, 114] та доповнений в [92, 119, 122] метод є універсальним, тому що може бути використаний для дослідження інших типів статичних та рухомих електричних машин. Зокрема ЦФ вигляду (2.1) може бути використана

для оптимізації і порівняльного аналізу радіальних і аксіальних ЕМС трансформаторів і трансформаторних перетворювачів числа фаз з обертовим магнітним полем [123]. Крім того, можуть бути визначені ЦФ, що призначені для оптимізації та порівняльного аналізу масовартісних і енергетичних показників варіантів структур обертючих електричних машин. А саме асинхронних двигунів з внутрішнім (традиційного виконання) і зовнішнім ротором, а також асинхронних двигунів традиційного і контрроторного обертючих та палубного і зануреного виконань [124 – 126]. Вказані ЦФ також мають вигляд, який є аналогічним (2.1)

$$F_{ADi} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{AD}} \right)^3 K_{ADi} \Pi_{ADi}^*,$$

де Π_{AD} – показник вихідних даних (технічного завдання) проектування;

K_{ADi} – коефіцієнт властивостей електротехнічних матеріалів, що використовуються в статорі і роторі;

Π_{ADi}^* – безрозмірний показник маси ($i = 1$), вартості ($i = 2$) і втрат активної потужності ($i = 3$) ЕМС асинхронного двигуна, який є функцією геометричних КЗ – відносною активної довжини λ_s і відносного розрахункового параметру a_d [124],

$$\Pi_{AD1(2)}^* = f(K_{зп}, a_d, \lambda_o); \quad \Pi_{AD3}^* = f(K_{зп}, a_d, \lambda_o, K_{ySi}, K_{yRi}),$$

де $K_{зп}$ – коефіцієнт заповнення паза провідниковим матеріалом,

$K_{yS(R)i}$ – коефіцієнт співвідношення ЕМН і питомих характеристик електротехнічних матеріалів статора (ротора).

2.4. Базові рівняння та особливості порівняльного аналізу статичних електромагнітних систем

Крім рівнянь (2.1) і (2.2) розробка ММ і визначення ПТР індукційних статичних пристроїв прийнятим у роботі методом [15, 16, 88, 89, 92, 97, 98, 114, 122]

здійснюється за допомогою двох базових рівнянь. Це рівняння зв'язку геометричних параметрів магнітопроводу – площ ЕТС перерізу стрижня і обмоткового вікна відповідно S_{cii} і S_{oii} та зв'язку маси еквівалентної обмотки m_{wii} з S_{oii} [92, 122] ii -го варіанту ЕМС:

$$S_{cii} = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{30} S_{oii}); \quad (2.9)$$

$$m_{wii} = 1,5\gamma_0 K_{30} l_{wii} S_{oii}. \quad (2.10)$$

Значення коефіцієнту корисної дії трансформатора визначається сумою $P_{\Sigma ii}$ ВНР P_{nii} і ВКЗ P_{kii} [20 – 23, 26 – 28] і залежать від коефіцієнтів $K_{ц1} = \gamma_c$ і $K_{ц3}$ та співвідношення K_{yii} [98] ii -го варіанту ЕМС, що входять в (2.1) і (2.4)

$$P_{\Sigma ii} = P_{nii} + P_{kii} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}}\right)^3 K_{ц3} \Pi_{3ii}^*. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт $K_{ц3}$ визначається добутком

$$K_{ц3} = K_{ц(i=3)} = \gamma_c P_{\text{ПМ}},$$

де γ_c і $P_{\text{ПМ}}$ – питома маса [кг/м³] і питомі втрати ЕТС [Вт/кг] магнітопроводу.

Співвідношення коефіцієнтів додаткових втрат і питомих характеристик матеріалів при заданих ЕМН ii -го варіанту ЕМС K_{yii} визначається [98]

$$K_{yii} = \frac{K_{\text{ДК}} \gamma_0 \Pi_{\text{ПО}}}{K_{\text{ДНII}} K_{ц3}} = \frac{K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ПО}} J_0^2}{K_{\text{ДНII}} \gamma_c P_{\text{ПМ}}}, \quad (2.12)$$

де $K_{\text{ДК}}$, $K_{\text{ДНII}}$ – коефіцієнти додаткових ВНР і ВКЗ;

$\Pi_{\text{ПО}}$ [Вт/кг] – питомі втрати обмотки, які є добутком показника питомих втрат ПМ $K_{\text{ПО}}$ і J_0^2 [26],

$$\Pi_{\text{по}} = K_{\text{по}} J_0^2.$$

Аналітична оцінка ВНР трансформаторів виконується приблизно по інтегральному значенню магнітного потоку [20 – 23, 26]. На реальні втрати ЕМС впливають особливості та нерівномірність розподілу індукції в стрижнях і ярмах, кутові зони та стики магнітопроводів, а також магнітне розсіяння та поверхневий ефект обмоткових провідників. Ці фактори обраховуються коефіцієнтами додаткових втрат [20 – 24, 26 – 28, 45, 52, 73]. Рівняння розрахунку $P_{\text{нii}}$ є індивідуальними для кожного ii -го варіанту ЕМС, їх вигляд і значення $K_{\text{днii}}$ залежать від структури та особливостей магнітопроводу. Величини $P_{\text{кii}}$ визначаються на основі поняття еквівалентної обмотки [10, 15, 48, 121, 122] універсальним рівнянням [98]

$$P_{\text{кii}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 \Pi_{\text{по}} K_{\text{зо}} S_{\text{oit}} l_{\text{wii}}. \quad (2.13)$$

Побудова ii -го варіанту ЕМС методом відносних ПТР і універсальних геометричних КЗ виконується застосуванням рівнянь і співвідношень (2.1) – (2.13) за схемою (рис. 2.13).

Згідно [28, 73], в сучасних ТТ використовуються анізотропні ЕТС марок 3406 – 3409 з $K_{\text{зс}} = 0,96 – 0,97$ при товщині стрічки (рулону) $\delta_c = 0,27 – 0,35$ мм. Для розрахунків K_{yii} (2.13) і Π_{zii}^* приймаються значення $B_c = 1,45 – 1,7$ Тл і $K_{\text{зс}} = 0,97$ ($\delta_c = 0,35$ мм) [21 – 24, 26, 28] і дві марки рулонної ЕТС – ізотропної 2412 та анізотропної 3407, у яких при $f_1 = 50$ Гц питомі втрати при $B_c = 1,45$ Тл і $B_c = 1,7$ Тл відповідно складають для ЕТС 2412 $P_{1,45/50} = 2,4$ Вт/кг і $P_{1,7/50} = 3,3$ Вт/кг та для ЕТС 3407 $P_{1,45/50} = 0,988$ Вт/кг і $P_{1,7/50} = 1,36$ Вт/кг. Густина цих ЕТС $\gamma_c = 7650$ кг/м³. В розрахунках «сухих» і «масляних» ТТ потужністю до 10 ... 160 кВ·А, а також 160 ... 630 кВ·А використовуються значення $K_{\text{дк}} \leq 1,04$ і $K_{\text{дк}} \leq 1,075$ [26]. Приймається $K_{\text{дк}} = 1,04$. Для мідного ПМ з $\gamma_0 = 8900$ кг/м³, $K_{\text{по}} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ Вт·м⁴ / (А²·кг) і при $f_1 = 50$ Гц, у діапазонах $S_{\text{н}} = 0,3 – 1$ кВ·А і $S_{\text{н}} = 1 – 2,5$ кВ·А відповідно $J_0 = 2,4 – 1,7$ А/мм² і $J_0 = 1,7 – 1,4$ А/мм² [20 – 23]. Також при $f_1 = 50$ Гц для мідного ПМ в масляних ТТ при $S_{\text{н}} = 2,5 – 63$ кВ·А, $J_0 = 1,8 – 2,2$ А/мм² і при $S_{\text{н}} = 63 – 630$ кВ·А, $J_0 = 2,2 – 3,5$ А/мм², а в

«сухих» ТТ з $S_n = 10 - 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ напівсумма щільностей струму первинної і вторинної концентричних обмоток складає $J_0 = 1,7 - 2,4 \text{ А/мм}^2$ [26].

Додатково до визначених у підрозділі 2.2, приймаються наступні положення та припущення порівняльного аналізу ЕМС [76, 77, 91, 127 – 133]. У відповідності з принципом еквівалентності електромагнітної потужності вважається, що величини індукції B_c , а також коефіцієнти K_{zc} [20 – 26] всіх ЕМС ідентичні. Також середні значення амплітуд індукцій стрижнів і ярем приймаються однаковими. Зневажається радіусом вигину внутрішнього витка ЕТС кожної секції трисекційних стрічкових (рулонних) магнітопроводів. Елементи та секції магнітопроводу піддані відновлювальному відпалюванню, а стикові роз'єми шліфовані та ізольовані. При вживанні подібних заходів наявність стиків практично не впливає на рівень загальних втрат в ЕТС витого магнітопроводу [45]. Радіуси кільцевих вигинів кутових зон середніх витків фазних котушок еквівалентних галетних обмоток трансформаторів і обмоток структурно еквівалентних реакторів визначаються відповідно чвертю ширин прямокутного обмоткового вікна та координатою «центру ваги» половини площі обмоткового вікна нетрадиційної більш складної конфігурації [122].

З причин відсутності аналітичного порівняльного аналізу просторових і планарних ЕМС на умовах еквівалентності електромагнітної потужності (електромагнітної еквівалентності), базовим аналогом для такого аналізу обрана традиційна планарна ЕМС (рис. 2.10) з шихтованим «вперепліт» магнітопроводом загальнопромислового застосування з конфігураціями елементів шарів ЕТС (рис. 1.14). Також, як вказано у підрозділі 1.3, другою базовою визначена просторова аксіальна ЕМС ТТ з суміщеними фазними елементами і секторними УК стрижнів витого стикового магнітопроводу (рис. 1.17, а).

У зв'язку зі специфікою призначення предмету дисертаційного дослідження співвідношення K_{yii} та відносні складові Π_{iii}^* визначаються тільки для мідних обмоток, $f_1 = 50 \text{ Гц}$ і холоднокатаних ЕТС (обмотковий алюміній та частота струму, що відрізняється від $f_1 = 50 \text{ Гц}$, згідно правилам Регістру судноплавства, в силовому судновому та корабельному електрообладнанні не використовуються, а аморфна ЕТС не задовольняє морським вимогам віброударостійкості).

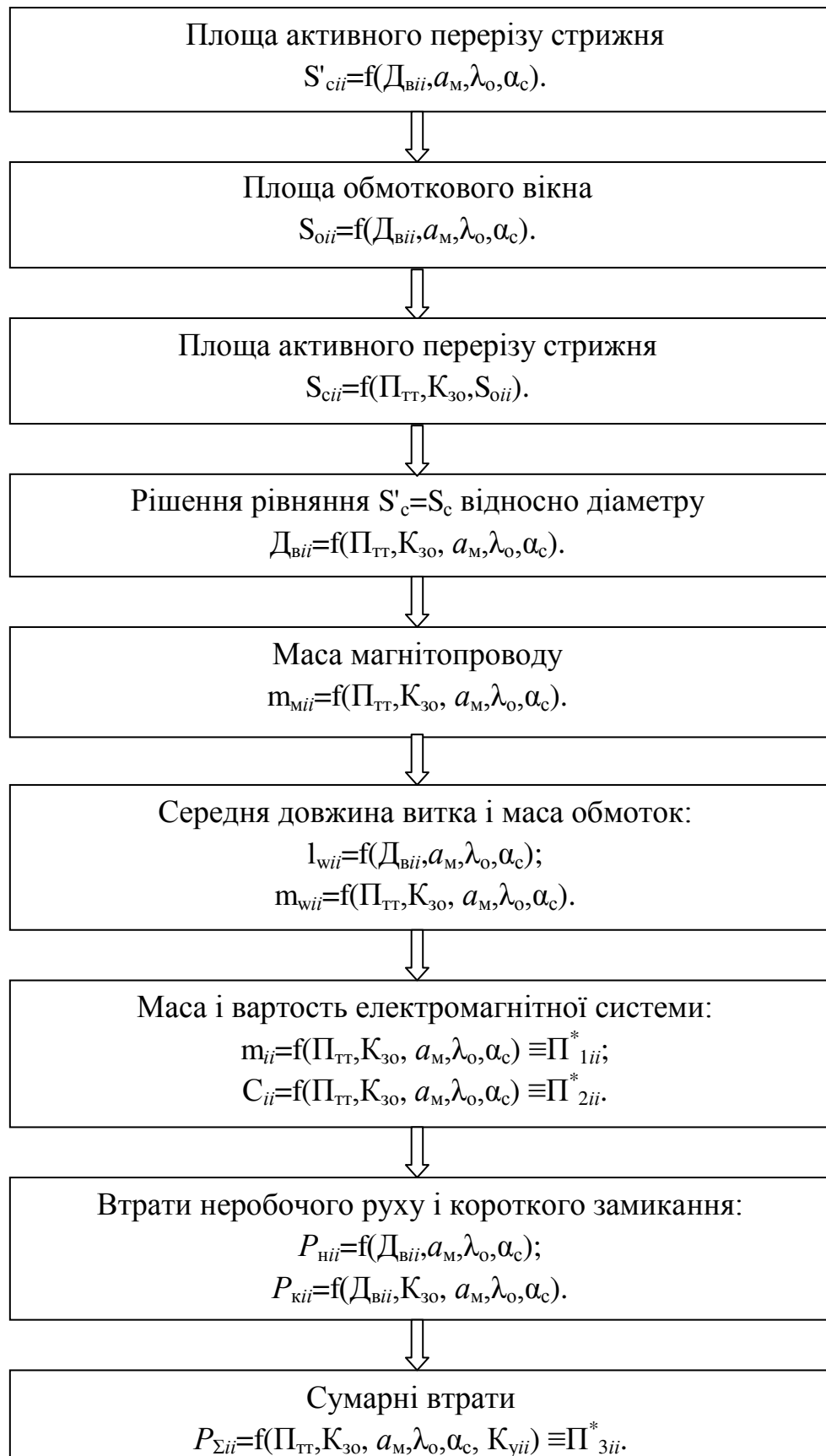


Рисунок 2.13 – Складові та послідовність розробки математичної моделі електромагнітної системи на основі показників технічного рівня та геометричних керованих змінних

Також з причин нормативного обмеження об'єму кандидатської дисертації ММ визначення показників Π_{4ii}^* варіантів ЕМС у даній роботі не розглядаються. Дослідження з визначення ММ, що містять ЦФ F_{4ii} і порівняння Π_{4ii}^* варіантів ЕМС є темою окремої наукової роботи.

При виконанні оптимізаційних розрахунків варіантів ЕМС екстремуми відносних складових ЦФ (2.1) з $K_{ци}$ ($i = 1 - 3$) визначаються для трьох значень $K_{зо}$, тобто різних класів напруг ТТ, $K_{зо} = 0,3; 0,25; 0,2$. Показники вартості Π_{3ii}^* визначаються при співвідношеннях $C_o/C_c = 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5$ (зростають при зменшенні діаметру елементарного обмоткового провідника та підвищенні класу виткової ізоляції).

Відносним складовим ПТР ЦФ (2.1) варіантів ЕМС, що порівнюються, надаються, при послідовній заміні другого та третього індексів i , наступні позначення (табл. 2.1). Показники базової планарної ЕМС конфігурацій (рис. 1.11, а, рис. 1.14, рис. 2.10) позначені: маси $\Pi_{1пп}^*$, вартості $\Pi_{2пп}^*$, втрат $\Pi_{3ппi}^*$. Показники радіальної ЕМС з ромбічними обмотковими вікнами шихтованого магнітопроводу (рис. 2.6, а, б) позначені: маси $\Pi_{1рр}^*$, вартості $\Pi_{2рр}^*$, втрат $\Pi_{3ррi}^*$. Показники аксіальної ЕМС з круговими УК витого трисекційного магнітопроводу (рис. 1.12, б) позначені: маси $\Pi_{1вк}^*$, вартості $\Pi_{2вк}^*$, втрат $\Pi_{3вкi}^*$. Показники аксіальної ЕМС з шестигранними УК витого трисекційного магнітопроводу (рис. 2.4, а) позначені: маси $\Pi_{1вш}^*$, вартості $\Pi_{2вш}^*$, втрат $\Pi_{3вшi}^*$. Показники радіальної ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів витого трисекційного магнітопроводу (рис. 2.7, а) позначені: маси $\Pi_{1рп}^*$, вартості $\Pi_{2рп}^*$, втрат $\Pi_{3рпi}^*$. Показники радіальної ЕМС з шестигранними перерізами стрижнів (рис. 2.7, а, в) витого трисекційного магнітопроводу позначені: маси $\Pi_{1рш}^*$, вартості $\Pi_{2рш}^*$, втрат $\Pi_{3ршi}^*$. Показники базової аксіальної ЕМС (рис. 1.17, а) позначені: маси $\Pi_{1ас}^*$, вартості $\Pi_{2ас}^*$, втрат $\Pi_{3асi}^*$. Показники аксіальної ЕМС з комбінованим магнітопроводом (рис. 1.17, б) позначені: маси $\Pi_{1аш}^*$, вартості $\Pi_{2аш}^*$, втрат $\Pi_{3ашi}^*$. У перелічених показниках втрат Π_{3iii} четвертий індекс $i = 1(2)$ означає ізотропну (анізотропну) ЕТС магнітопроводу.

Згідно [26] додаткові ВНР ТТ з магнітопроводами, що виконані із ізотропної ЕТС, залежать від потужності. Для діаметрів стрижня до 0,2 м вони визначаються $K_{днii} \leq 1,01$, а при діаметрах стрижня 0,2 – 0,5 м, $K_{днii} = 1,02 - 1,1$.

Таблиця 2.1– Показники технічного рівня варіантів електромагнітних систем, що розглядаються в роботі

Варіант електромагнітної системи	Показники, б.о.			
	Маси	Вартості	Втрат активної потужності	Контурного об'єму
Планарна з шихтованим магнітопроводом (рис. 2.10)	$P_{1пп}^*$	$P_{2пп}^*$	$P_{3пп1(2)}^*$	$P_{4пп}^*$
Радіальна з трисекційним шихтованим магнітопроводом (рис. 2.6, а)	$P_{1рр}^*$	$P_{2рр}^*$	$P_{3рр1(2)}^*$	$P_{4рр}^*$
Аксіальна з трисекційним витим магнітопроводом і круговою конфігурацією стрижнів (рис. 1.12, б)	$P_{1вк}^*$	$P_{2вк}^*$	$P_{3вк1(2)}^*$	$P_{4вк}^*$
Аксіальна з трисекційним витим магнітопроводом і шестигранною конфігурацією стрижнів (рис. 2.4, а)	$P_{1вш}^*$	$P_{2вш}^*$	$P_{3вш1(2)}^*$	$P_{4вш}^*$
Радіальна з трисекційним витим магнітопроводом і прямокутною конфігурацією стрижнів (рис. 2.7, а)	$P_{1рп}^*$	$P_{2рп}^*$	$P_{3рп1(2)}^*$	$P_{4рп}^*$
Радіальна з трисекційним витим магнітопроводом і шестигранною конфігурацією стрижнів (рис. 2.7, б)	$P_{1рш}^*$	$P_{2рш}^*$	$P_{3рш1(2)}^*$	$P_{4рш}^*$
Аксіальна з секторною конфігурацією стрижнів витого стикового магнітопроводу (рис. 1.17, а)	$P_{1ас}^*$	$P_{2ас}^*$	$P_{3ас1}^*$	$P_{4ас}^*$
Аксіальна з шестигранною конфігурацією стрижнів комбінованого стикового магнітопроводу (рис. 1.17, б)	$P_{1аш}^*$	$P_{2аш}^*$	$P_{3аш1}^*$	$P_{4аш}^*$

Підвищення втрат в готовому планарному магнітопроводі відносно втрат анізотропної ЕТС залежить від сукупності фізичних та конструктивно-технологічних чинників [26]. Також відповідно до [26, 45], підвищення втрат в готових просторових витих трисекційних магнітопроводах структур (рис. 1.9, б, в) не залежить від характеристик застосованої ЕТС і визначається $K_{днii} = K_{днз} = 1,33 - 1,35$. Додаткові ВКЗ ТТ є залежними від потужності і, згідно [26], при $S_n < 100$ кВ·А, $K_{дк} = 1,031$, а при $S_n = 160 - 630$ кВ·А, $K_{дк} = 1,04 - 1,075$.

На основі викладеного приймаються наступні значення коефіцієнтів додаткових втрат варіантів ЕМС, що розглядаються у роботі.

Для структур аксіальних просторових і планарної ЕМС (рис. 1.8, в, г) з суміщеними фазними елементами при використанні в магнітопроводах ізотропної ЕТС приймаються $K_{днii} = K_{днa1} = K_{днп1} = 1,04$. Для радіальної ЕМС (рис. 2.6, а, б) з магнітопроводом з ізотропної ЕТС додаткові втрати, що визначаються стиками, також приймаються $K'_{днр1} = 1,04$.

В планарній ЕМС з суміщеними фазними елементами і усіма косими стиками магнітопроводу (рис. 1.14, в) силові лінії головного магнітного поля проходять крізь 8 стиків та 16 феромагнітних ділянок магнітного кола, що межують з вказаними стиками та містять технологічні наклипи. В просторовій радіальній ЕМС (рис. 2.6, а, б) з двоконтурними фазними елементами усі силові лінії поля в кожній секції проходять крізь чотири стики і вісім ділянок. При цьому у трьох ділянках кожної секції відбувається кутове повертання магнітного потоку, що підвищує втрати в анізотропній ЕТС. Однак кут косоного стику збільшений з 45° (у планарній ЕМС) до 60° , що згідно [26, 52] знижує втрати в анізотропній ЕТС. Співвідношення загальної кількості стикових зон планарної і радіальної просторової ЕМС з усіма косими стиками магнітопроводів (рис. 1.14, в, рис. 2.6, в) складає 16/24. Однак є відомим, як вказано у підрозділі 1.2, загальне підвищення питомих втрат в готовому планарному магнітопроводі з усіма косими стиками відносно питомих втрат ЕТС, яке складає 1,37 ... 1,58 [45]. Також в [52] зроблено висновок, що використання в планарних магнітопроводах ТТ малої і середньої потужності усіх косих стиків (рис. 1.14, в) призводить до підвищення на 15 ... 20 % ВНР відносно ТТ з магнітопроводами, що містять

прямі стики (рис. 1.14, а). Це обумовлено тим, що в структурах ЕТС (рис. 1.14, а), що шихтовані «вперепліт», та структурах ЕТС з суміжними стиками, що зсунуті на певний крок (технологія step-lap) магнітні потоки, які проходять упоперек площин шарів, складають відповідно 20 ... 25 % та більш 50 % [52]. На відміну від планарного, у просторового радіального шихтованого магнітопроводу з усіма косими стиками пластини суміжних шарів ЕТС (рис. 2.6, в) замість взаємного зсуву шихтуються «вперепліт». Це дозволяє припустити про приблизно однакові значення коефіцієнтів додаткових втрат від наявності подібних стиків в планарному та радіальному магнітопроводах з анізотропною ЕТС. У зв'язку з цим та з припущенням застосування відновлювального відпалювання ЕТС приймається середнє значення $K_{днii} = K_{днп2} = K'_{днр2} = 1,475$. У перелічених коефіцієнтах, що відносяться до трисекційних магнітопроводів, четвертий індекс $i = 1(2)$ означає застосування ізотропної (анізотропної) ЕТС.

Загальні коефіцієнти додаткових втрат радіальної ЕМС (рис. 2.6, а, в) з шарами ізотропної і анізотропної ЕТС визначаються:

$$K_{днii} = K_{днр1} = K'_{днр1} K_{дн3} = 1,04 \cdot 1,34 = 1,394;$$

$$K_{днii} = K_{днр2} = K'_{днр2} K_{дн3} = 1,475 \cdot 1,34 = 1,9765.$$

Для варіантів просторових ЕМС структур (рис. 2.7, а, в) з двоконтурними фазними елементами і витими магнітопроводами приймається $K_{днi} = K_{днв} = K_{дн3} = 1,34$.

Для варіантів просторової структури (рис. 1.8, в) з секторними і шестигранними УК (рис. 1.17, а, б), що характеризуються значними об'ємами кутових зон, тобто зон зміни напрямку магнітного потоку в витому ярмі, величини $K_{днii}$ при використанні анізотропної ЕТС є невідомими. Тому $\Pi_{засi}^*$ і $\Pi_{зашii}^*$ при використанні анізотропної ЕТС не визначаються.

Для варіантів ЕМС, відповідно до діапазону потужності та конструктивних виконань ТТ, що розглядаються в роботі, приймається $K_{дк} = 1,04$, а позначення $K_{днii}$ та K_{yii} наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти і позначення співвідношення розрахунку втрат активної потужності варіантів електромагнітних систем, що розглядаються в роботі

Варіант електромагнітної системи	Коефіцієнт додаткових втрат неробочого руху	Позначення співвідношення електромагнітних навантажень і питомих характеристик матеріалів
Планарна з шихтованим магнітопроводом	$K_{днп1(2)}=1,04(1,475)$	$K_{yp1(2)}$
Радіальна з трисекційним шихтованим магнітопроводом	$K_{днр1(2)}=1,394(1,9765)$	$K_{yp1(2)}$
Аксіальна з трисекційним витим магнітопроводом і круговою конфігурацією стрижнів	$K_{дн3}=1,34$	$K_{yb1(2)}$
Аксіальна з трисекційним витим магнітопроводом і шестигранною конфігурацією стрижнів	$K_{дн3}=1,34$	$K_{yb1(2)}$
Радіальна з трисекційним витим магнітопроводом і прямокутною конфігурацією стрижнів	$K_{дн3}=1,34$	$K_{yb1(2)}$
Радіальна з трисекційним витим магнітопроводом і шестигранною конфігурацією стрижнів	$K_{дн3}=1,34$	$K_{yb1(2)}$
Аксіальна з секторною конфігурацією стрижнів витого стикового магнітопроводу	$K_{дна1}=1,04$	K_{ya1}
Аксіальна з шестигранною конфігурацією стрижнів комбінованого стикового магнітопроводу	$K_{дна1}=1,04$	K_{ya1}

При параметричній оптимізації трансформатору виконується, з використанням відомих методик [20, 21, 23, 26], перевірка проектного обмеження за перевищенням температури обмотки $\Delta\tau_w$. Наприклад, для теплових розрахунків трансформаторів малої потужності використовується рівняння [20]

$$\Delta\tau = \frac{P_{\text{фк}}(1 + P_{\text{фн}}/P_{\text{фк}})}{\alpha_{\text{к}}\Pi_{\text{ow}}\left[1 + (\Pi_{\text{ом}}/\Pi_{\text{ow}})\sqrt{P_{\text{фн}}/P_{\text{фк}}}\right]}, \quad (2.14)$$

де $P_{\text{фк}}$ і $P_{\text{фн}}$ – ВКЗ та ВНР ЕМС на фазу;

$\alpha_{\text{к}}$ – питомий коефіцієнт тепловіддачі;

$\Pi_{\text{ow(м)}}$ – «відкрита» поверхня охолодження обмоткових котушок (магнітопроводу).

При дотриманні принципу еквівалентності електромагнітної потужності можливо виконати порівняльний аналіз площ поверхонь охолодження обмоток варіантів ЕМС [134]. Також фазні втрати $P_{\text{фк(н)ii}}$ та вказані площі $\Pi_{\text{ow(м)ii}}$ *ii*-го варіанту ЕМС можуть бути визначені як функції від $\Pi_{\text{тт}}$ та $a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}$. Тому при заданому K_{30} і критерію оптимізації ТТ можливо визначити, дослідити та зіставити ЦФ перевищення температури обмоток *ii*-х варіантів ЕМС

$$\Delta\tau_{\text{wii}} = f(K_{30}, a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}).$$

Однак подібне дослідження, як і визначення Π_{4ii}^* , є темою окремої наукової роботи.

2.5. Висновки до розділу 2

2.5.1. Заміна традиційних прямокутних і кругових УК стрижнів, обмоткових котушок і вікон на шестигранні і секторні УК, надає можливість зниження на 15 ... 20 % діаметру окружності контурного об'єму ЕМС та забезпечення більш високої надійності однофазних і трифазних просторових ЕМС.

2.5.2. Формування аксіальних просторових ЕМС на основі шестигранних УК підвищує контурний коефіцієнт стрижня до $K_{\text{кш}} \approx 1$ і дозволяє суттєво знизити трудомісткість виробництва стикових та витих трисекційних магнітопроводів.

2.5.3. Використання шестигранної та ромбічних конфігурацій зовнішнього контуру і обмоткових вікон, а також квадратних конфігурацій перерізів стрижнів відповідно шихтованого вперепліт і витого стикового магнітопроводів утворює можливість удосконалення і спрощення виробництва просторової радіальної і планарної трифазних ЕМС.

2.5.4. Рішення задач використання технічних пропозицій компактних ЕМС для розробки трансформаторів, що застосовуються у системах електрообладнання об'єктів спеціальної техніки, а також наявність декількох варіантів конструктивно-структурних перетворень їх активної частини, вимагає визначення впливу вказаних перетворень на основні ПТР та порівняльного аналізу традиційних і запропонованих різновидів ЕМС.

2.5.5. Відомі оптимізаційні ММ ТТ, у яких як КЗ використовуються ЕМН та геометричні параметри, що відображають конкретні традиційні УК, не задовольняють умовам еквівалентності електромагнітної потужності і порівняльного аналізу ЕМС, що відрізняються структурою, конфігурацією УК і технологією виготовлення елементів.

2.5.6. Умовам об'єктивного узагальненого порівняльного аналізу ЕМС, які відрізняються структурою і конфігурацією елементів, максимально задовольняє, на думку автора, узагальнені ЦФ з безрозмірними ПТР та відносними геометричними КЗ, що запропоновані в [15, 16, 114] та розвинені в [92, 119, 122] та які є універсальними [123 – 126].

2.5.7. Запропонована додаткова ЦФ F_{4ii} з ПТР Π_{4ii}^* контурного об'єму ЕМС спеціального ТТ та визначена доцільність розрахунку геометричних співвідношень ЕМС і геометричних КЗ a_m, λ_o, α_c за критерієм мінімуму $\Pi_{1(4)ii}^*$ з урахуванням мінімуму $\Pi_{4(1)ii}^*$ показника об'єму (маси).

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ
З ПРЯМОКУТНИМИ ПЕРЕРІЗАМИ СТРИЖНІВ ШИХТОВАНИХ
МАГНІТОПРОВОДІВ

3.1. Масовартісні показники базової планарної системи з стрижневим магнітопроводом

Для планарної (радіальної) ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів і прямокутними (рис. 1.14) та ромбічними (рис. 2.6) обмотковими вікнами магнітопроводів КЗ a_m і λ_o ЦФ (2.1) визначаються співвідношеннями геометричних параметрів, аналогічними співвідношеннями (2.5) і (2.6):

$$a_m = D_{\text{нпп}}(pp) / D_{\text{впп}}(pp); \quad (3.1)$$

$$\lambda_o = h_{\text{опп}}(pp) / b_{\text{опп}}(pp), \quad (3.2)$$

де $D_{\text{нпп}}$, $D_{\text{впп}}$, $h_{\text{опп}}$, $b_{\text{опп}}$ і $D_{\text{нрр}}$, $D_{\text{врр}}$, $h_{\text{орр}}$, $b_{\text{орр}}$ – розрахункові діаметри і відповідні відношення висот та ширин обмоткових вікон магнітопроводів аксіальної і радіальної ЕМС (рис.1.14, а, рис. 2.10) і (рис. 3.1, а, б).

Для розробки методом [15, 16, 92] ММ ЕМС традиційної планарної структури з суміщеними фазними елементами стрижневого магнітопроводу [76, 77], боки a_c і b_c прямокутного перерізу стрижня (рис. 1.11, а) визначаються через $D_{\text{впп}}$ і α_c виразами:

$$a_c = D_{\text{впп}} \cos(\alpha_c/2); \quad (3.3)$$

$$b_c = D_{\text{впп}} \sin(\alpha_c/2). \quad (3.4)$$

Площина ЕТС поперечного перерізу стрижня (рис. 1.11, а) визначається з

використанням (3.3), (3.4)

$$S_{\text{СПП}} = K_{\text{ЗС}} a_c b_c = K_{\text{ЗС}} \left(\frac{D_{\text{ВПП}}^2}{2} \right) \sin \alpha_c. \quad (3.5)$$

Ширина обмоткового вікна визначається у відповідності з рис. 2.10 і з використанням (3.1) та (3.4)

$$\begin{aligned} b_{\text{ОПП}} &= \left(\frac{D_{\text{НПП}}}{2} \right) - (b_c / 2) = a_M \left(\frac{D_{\text{ВПП}}}{2} \right) - \frac{D_{\text{ВПП}} \sin(\alpha_c / 2)}{2} = \\ &= \frac{D_{\text{ВПП}}}{2} \left[a_M - \sin(\alpha_c / 2) \right]. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 2.10) визначається, з використанням (2.9), (3.2) і (3.4) – (3.6), рівнянням

$$\begin{aligned} m_{\text{МПП}} &= K_{\text{ЗС}} \gamma_c \left[3h_{\text{ОПП}} S_{\text{СПП}} + 2S_{\text{СПП}} (3b_c + 2b_{\text{ОПП}}) \right] = K_{\text{ЗС}} \gamma_c \times \\ &\times \left[\frac{3}{4} \lambda_o D_{\text{ВПП}} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) D_{\text{ВПП}}^2 \sin \alpha_c + D_{\text{ВПП}}^2 \sin \alpha_c \left[3D_{\text{ВПП}} \sin \frac{\alpha_c}{2} + D_{\text{ВПП}} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right] = \\ &= K_{\text{ЗС}} \gamma_c D_{\text{ВПП}}^3 \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) a_M + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o \right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c. \end{aligned} \quad (3.7)$$

На основі (2.9), (3.2) і (3.6) можливо отримати залежність між геометричними параметрами планарного магнітопроводу $S_{\text{СПП}}$ і $b_{\text{ОПП}}$

$$\begin{aligned} S_{\text{СПП}} &= \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{\text{ЗО}} S_{\text{ОПП}}) = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{\text{ЗО}} \lambda_o b_{\text{ОПП}}^2) = \\ &= 4\Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{\text{ЗО}} \lambda_o D_{\text{ВПП}}^2 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.8)$$

де $S_{\text{ОПП}}$ – площа обмоткового вікна,

$$S_{\text{ОПП}} = h_{\text{ОПП}} b_{\text{ОПП}} = \lambda_o b_{\text{ОПП}}^2.$$

З рівності лівих частин виразів (3.5) і (3.8) слід:

$$K_{3c} \left(D_{\text{ВПП}}^2 / 2 \right) \sin \alpha_c = 4 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{30} \lambda_o D_{\text{ВПП}}^2 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \right];$$

$$D_{\text{ВПП}} = \sqrt[4]{8 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin (\alpha_c / 2) \right)^2 \sin \alpha_c \right]}. \quad (3.9)$$

Підстановкою (3.9) в (3.7) рівняння маси магнітопроводу ЕМС (рис. 2.10) перетворюється до вигляду

$$m_{\text{МПП}} = K_{3c} \gamma_c \left(\sqrt[4]{8 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin (\alpha_c / 2) \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times$$

$$= \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) a_M + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o \right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{1\text{МПП}}^*, \quad (3.10)$$

де $\Pi_{1\text{МПП}}^*$ – показник маси магнітопроводу (рис. 1.14),

$$\Pi_{1\text{МПП}}^* = K_{3c} \left(\sqrt[4]{8 / \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin (\alpha_c / 2) \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times$$

$$\times \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) a_M + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o \right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c. \quad (3.11)$$

Середня довжина витка котушок обмоток ЕМС (рис. 2.10) визначається на основі (3.3), (3.4) і (3.6)

$$l_{\text{ВПП}} = 2(a_c + b_c) + 2\pi b_{\text{ОПП}} / 4 = 2[D_{\text{ВПП}} \cos(\alpha_c / 2) + D_{\text{ВПП}} \sin(\alpha_c / 2)] +$$

$$+ \pi D_{\text{ВПП}} [a_M - \sin(\alpha_c / 2)] = 2D_{\text{ВПП}} [\sin(\alpha_c / 2) + \cos(\alpha_c / 2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c / 2)) / 8]. \quad (3.12)$$

На основі (3.6) і (3.12) загальне рівняння маси ПМ (2.10) для ЕМС (рис. 2.10) перетворюється до вигляду

$$\begin{aligned}
m_{\text{впш}} &= 1,5\gamma_0 K_{30}\lambda_0 D_{\text{впш}} \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/8 \right] \times \\
&\times D_{\text{впш}}^2 (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 / 2 = 0,75 K_{30}\gamma_0\lambda_0 D_{\text{впш}}^3 (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \times \\
&\times \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/8 \right]. \quad (3.13)
\end{aligned}$$

Підстановка (3.9) перетворює (3.13)

$$\begin{aligned}
m_{\text{впш}} &= 0,75 K_{30}\gamma_0\lambda_0 \left(4\sqrt{8\Pi_{\text{т}} / \left[K_{3c} K_{30}\lambda_0 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \\
&\times \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/8 \right] = \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{впш}}^*, \quad (3.14)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{впш}}^*$ – показник маси ПМ обмотки планарної ЕМС з прямокутними УК котушок (рис. 2.10),

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{впш}}^* &= 0,75 K_{30}\lambda_0 \left(4\sqrt{8 / \left[K_{3c} K_{30}\lambda_0 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \\
&\times \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))/8 \right]. \quad (3.15)
\end{aligned}$$

Маса $m_{\text{пш}}$ і вартість $C_{\text{пш}}$ активних матеріалів ЕМС (рис. 2.10) з варіантами традиційних структур магнітопроводів (рис. 1.14) визначаються на основі (3.10), (3.11) і (3.14), (3.15) рівняннями:

$$\begin{aligned}
m_{\text{пш}} &= m_{\text{мпш}} + m_{\text{впш}} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{мпш}}^* + \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{впш}}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{пш}}^* ; \\
C_{\text{пш}} &= C_{\text{мпш}} + C_{\text{впш}} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{мпш}}^* + \gamma_0 C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{1\text{впш}}^* = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{т}}} \right)^3 \Pi_{2\text{пш}}^* ,
\end{aligned}$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 2.10) уявляються функціональними залежностями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{III}}^* &= \left(\sqrt[4]{8 / \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ K_{3c} \left[(1 + 0,75 \lambda_o) a_M + (2 - 0,75 \lambda_o) \sin(\alpha_c/2) \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_o K_{30} \lambda_o \times \right. \\ &\times \left. (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + 0,3927 (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right] / \gamma_c \right\}; \quad (3.16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2\text{III}}^* &= \left(\sqrt[4]{8 / \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ K_{3c} \left[(1 + 0,75 \lambda_o) a_M + (2 - 0,75 \lambda_o) \sin(\alpha_c/2) \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_o K_{30} \lambda_o \times \right. \\ &\times \left. (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + 0,3927 (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right] / (C_c \gamma_c) \right\}. \quad (3.17) \end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1\text{III}}^*$ показника (3.16), що отримані для трьох значень K_{30} , наведені в табл. 3.1.

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{2\text{III}}^*$ показника (3.17), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень співвідношення C_o/C_c , наведені в табл. 3.2.

3.2. Показник втрат активної потужності базової планарної системи з стрижневим магнітопроводом

Об'єми стрижнів $V_{\text{СПП}}$, ярем $V_{\text{ЯПП}}$ і кутових ділянок $V_{\text{КПП}}$ планарного магнітопроводу з прямокутними УК та шарами ЕТС (рис. 1.14) визначаються виразами:

$$V_{\text{СПП}} = 3h_{\text{ОПП}} S'_{\text{СПП}}; \quad (3.18)$$

$$V_{\text{ЯПП}} = 4b_{\text{ОПП}} S'_{\text{СПП}}; \quad (3.19)$$

$$V_{\text{КПП}} = 6b_c S'_{\text{СПП}}, \quad (3.20)$$

де $S'_{\text{СПП}}$ – площа прямокутного перерізу стрижня,

$$S'_{\text{СПП}} = S_{\text{СПП}} / K_{\text{ЗС}}.$$

Таблиця 3.1 – Екстремуми показників маси планарної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів шихтованого магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1\text{ппе}}^*$ (рис. 2.2)	27,8	29,3	31,4

Таблиця 3.2 – Екстремуми показників вартості планарної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів шихтованого магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартостей обмоткової міді і електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2\text{ппе}}^*$ (рис. 2.2)	0,3	51,7	55,5	59,2	62,7	66,2
	0,25	53,8	57,7	61,5	65,1	68,6
	0,2	56,7	60,7	64,5	68,2	71,8

Підстановкою (3.4), (3.5), (3.6) та з урахуванням (3.2) вирази (3.18) – (3.20) перетворюються:

$$\begin{aligned} V_{\text{СПП}} &= 3\lambda_o D_{\text{ВПП}} [a_M - \sin(\alpha_c/2)] K_{\text{ЗС}} (D_{\text{ВПП}}^2/2) (\sin \alpha_c)/2 = \\ &= 0,75\lambda_o D_{\text{ВПП}}^3 [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \sin \alpha_c; \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{ЯПП}} &= 2D_{\text{ВПП}} [a_M - \sin(\alpha_c/2)] K_{\text{ЗС}} (D_{\text{ВПП}}^2/2) \sin \alpha_c = \\ &= D_{\text{ВПП}}^3 [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \sin \alpha_c; \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{КПП}} &= 6D_{\text{ВПП}} \sin(\alpha_c/2) K_{\text{ЗС}} \left(\frac{D_{\text{ВПП}}^2}{2} \right) \sin \alpha_c = \\
 &= 3D_{\text{ВПП}}^3 \sin(\alpha_c/2) \sin \alpha_c.
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

ВНР традиційної трифазної планарної ЕМС з суміщеними фазними елементами та стрижневим шихтованим магнітопроводом з анізотропної ЕТС визначаються рівнянням, що містить загальні коефіцієнти додаткових втрат стрижнів $K_{\text{ПДС}}$ і ярем $K_{\text{ПДА}}$ та коефіцієнт додаткових втрат кутових зон $K_{\text{ПДУ}}$. Вказані коефіцієнти є залежними від виду та інших відомих особливостей стиків, способів пресовки, величин індукції та додаткових технологічних чинників [26]. Рівняння ВНР при використанні коефіцієнту $K_{\text{ЦЗ}}$ ЦФ (2.1) та позначень виразів (3.2) – (3.23) приймає вигляд

$$P_{\text{НП}} = K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЦЗ}} \left[K_{\text{ПДС}} (V_c + 0,5K_{\text{ПДУ}} V_y) + K_{\text{ПДА}} (V_y - 6V_y + 0,5K_{\text{ПДУ}} V_y) \right].$$

При проведенні узагальнених розрахунків та розв'язанні завдання порівняльного аналізу варіантів ЕМС, визначення коефіцієнту $K_{\text{ПДУ}}$ вказаного рівняння має певні труднощі. При цьому є відомими загальне підвищення питомих втрат в готовому планарному магнітопроводі з усіма косими стиками відносно питомих втрат використаної ЕТС [45]. Також є відомими висновки, які стосуються співвідношень ВНР ТТ малої і середньої потужності з прямими і косими стиками [52]. У зв'язку з цим, та міркуваннями, що наведені у підрозділі 2.1, у даній роботі ВНР варіантів планарної ЕМС з прямими або косими стиками та ізотропною і анізотропною ЕТС магнітопроводу, при умові рівності середніх значень амплітуд індукції стрижнів і ярем, визначаються рівнянням із загальним коефіцієнтом додаткових втрат $K_{\text{ДНП1(2)}}$, який прийнятий у підрозділі 2.4

$$P_{\text{НПП1(2)}} = K_{\text{ДНП1(2)}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЦЗ}}^{(\prime)} (V_{\text{СПП}} + V_{\text{ЯПП}} + V_{\text{КПП}}),
 \tag{3.24}$$

де $K_{\text{ЦЗ}}^{(\prime)}$ – коефіцієнт $K_{\text{ЦЗ}}$, що визначається питомими втратами ізотропної (анізотропної) ЕТС.

На основі (3.21) – (3.23) рівняння (3.24) приймає вигляд

$$P_{\text{нпн1(2)}} = K_{\text{днп1(2)}} K_{\text{ц3}}^{(\prime\prime)} K_{\text{зс}} \left\{ 0,75\lambda_o D_{\text{впн}}^3 [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \sin \alpha_c + \right. \\ \left. + D_{\text{впн}}^3 [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \sin \alpha_c + 3D_{\text{впн}}^3 \sin(\alpha_c/2) \sin \alpha_c \right\} = K_{\text{днп1(2)}} K_{\text{ц3}}^{(\prime\prime)} K_{\text{зс}} D_{\text{впн}}^3 \sin \alpha_c \times \\ \times \{3 \sin(\alpha_c/2) + (1 + 0,75\lambda_o)[a_M - \sin(\alpha_c/2)]\}. \quad (3.25)$$

Рівняння (2.13) при підстановці (3.2), (3.6) і (3.12) для ЕМС (рис. 2.10) перетворюється до вигляду:

$$P_{\text{кпн}} = 1,5K_{\text{дк}}\gamma_o K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_o^2 \lambda_o b_{\text{опн}}^2 l_{\text{впн}} = 1,5K_{\text{дк}}\gamma_o K_{\text{по}} J_o^2 K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{впн}}^2 [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \times \\ \times D_{\text{впн}} \{ \sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi[a_M - \sin(\alpha_c/2)]/8 \} / 2 = 0,75K_{\text{дк}}\gamma_o K_{\text{по}} J_o^2 K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{впн}}^3 \times \\ \times [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \{ \sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi[a_M - \sin(\alpha_c/2)]/8 \}. \quad (3.26)$$

Сумарні втрати ЕМС ТТ (рис. 2.10) визначаються на основі (2.11), (3.25) і (3.26)

$$P_{\Sigma\text{пн1(2)}} = P_{\text{нпн1(2)}} + P_{\text{кпн}} = K_{\text{днп1(2)}} K_{\text{ц3}}^{(\prime\prime)} K_{\text{зс}} D_{\text{впн}}^3 \sin \alpha_c \{3 \sin(\alpha_c/2) + (1 + 0,75\lambda_o) \times \\ \times [a_M - \sin(\alpha_c/2)]\} + 0,75K_{\text{дк}}\gamma_o K_{\text{по}} J_o^2 K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{впн}}^2 [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \{ \sin(\alpha_c/2) + \\ + \cos(\alpha_c/2) + \pi[a_M - \sin(\alpha_c/2)]/8 \} = K_{\text{ц3}}^{(\prime\prime)} K_{\text{днп1(2)}} K_{\text{зс}} D_{\text{впн}}^3 \{ K_{\text{зс}} \sin \alpha_c [3 \sin(\alpha_c/2) + \\ + (1 + 0,75\lambda_o)(a_M - \sin(\alpha_c/2))] + 0,75K_{\text{упл(2)}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \times \\ \times [\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_M - \sin(\alpha_c/2))] \}, \quad (3.27)$$

де $K_{\text{упл(2)}}$ – співвідношення (2.12) при $K_{\text{днп}} = K_{\text{днп1(2)}}$, що відповідає ЕМС (рис. 2.10) при використанні ізотропної (анізотропної) ЕТС магнітопроводу

$$K_{\text{упл(2)}} = K_{\text{дк}}\gamma_o K_{\text{по}} J_o^2 / (K_{\text{днп1(2)}} K_{\text{ц3}}^{(\prime\prime)}). \quad (3.28)$$

Після підстановки (3.9) сумарні втрати (3.27) базової планарної ЕМС визначаються

$$P_{\Sigma_{\text{пл}(2)}} = K_{\text{ц3}}^{(')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K_{\text{днп1}(2)} \left(\sqrt[4]{8 \left[K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2))^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{\text{зс}} \sin \alpha_c \left[3 \sin(\alpha_c/2) + (1 + 0,75 \lambda_o) (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2)) \right] + 0,75 K_{\text{уп1}(2)} K_{\text{зо}} \lambda_o \times \right. \\ \left. \times (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2))^2 \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2)) \right] \right\} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K_{\text{ц3}}^{(')} \Pi_{\text{зпн1}(2)}^*,$$

де $\Pi_{\text{зпн1}(2)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 2.10) при використанні ізотропної (анізотропної) ЕТС магнітопроводу, який визначається функціональною залежністю

$$\Pi_{\text{зпн1}(2)}^* = K_{\text{днп1}(2)} \left(\sqrt[4]{8 \left[K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2))^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{\text{зс}} \sin \alpha_c \left[3 \sin(\alpha_c/2) + (1 + 0,75 \lambda_o) (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2)) \right] + 0,75 K_{\text{уп1}(2)} K_{\text{зо}} \lambda_o \times \right. \\ \left. \times (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2))^2 \left[\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \frac{\pi}{8} (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_c/2)) \right] \right\}. \quad (3.29)$$

У відповідності до прийнятих у підрозділі 2.1 значень ЕМН, питомих характеристик матеріалів і $K_{\text{днп}i} = K_{\text{днп1}} = 1,04$ розраховуються наступні значення співвідношення (3.28) для ЕМС (рис. 2.10) з магнітопроводом, що виконаний з використанням ізотропної ЕТС:

$$K_{\text{уп1}} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,04 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 1,658;$$

$$K'_{\text{уп1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,04 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 4,874;$$

$$K''_{\text{уп1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,04 \cdot 7650 \cdot 2,4} = 14,25.$$

Приймаються мінімальні $K_{уп1min}$ і максимальні $K_{уп1max}$ значення співвідношення (3.28) для планарної ЕМС (рис. 2.10) з магнітопроводом (рис. 1.14, а), що виконаний з ізотропної ЕТС

$$1,7 \leq K_{уп1} \leq 5(14). \quad (3.30)$$

При використанні в магнітопроводі ЕМС (рис. 2.10) анізотропної ЕТС додаткові втрати обраховуються коефіцієнтом $K_{днп1} = K_{днп2} = 1,475$ і співвідношення (3.28) приймає значення:

$$K_{уп2} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 2,837;$$

$$K'_{уп2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 8,338;$$

$$K''_{уп2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} = 24,41.$$

Приймаються мінімальне $K_{уп2min}$ і максимальне $K_{уп2max}$ значення співвідношення (3.28) для планарної ЕМС (рис. 2.10) з магнітопроводом (рис. 1.14, б, в) з анізотропної ЕТС

$$3 \leq K_{уп2} \leq 8(24). \quad (3.31)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{зпн1(2)e}^*$ показника втрат активної потужності (3.29) базової планарної ЕМС при прийнятих значеннях $K_{зс}$, $K_{зо}$ і співвідношеннях електромагнітних навантажень і питомих характеристик матеріалів (3.30) і (3.31) наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Екстремуми показників втрат активної потужності планарної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів шихтованого стрижневого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi_{3\text{пн1e}}^*$ (рис. 2.2)			$\Pi_{3\text{пн2e}}^*$ (рис. 2.2)		
	1,7	5	14	3	8	24
0,3	34,5	60,0	108,7	64,9	110,8	215,1
0,25	36,3	62,4	111,7	67,8	114,5	220,0
0,2	38,7	65,5	115,8	71,7	119,6	226,6

3.3. Масовартісні показники просторової радіальної системи з двоконтурними фазними елементами і ромбічними обмотковими вікнами магнітопроводу

При визначенні ММ ЕМС (рис. 2.6, а, б) з двоконтурними фазними елементами, що розроблена в [127,128], використовуються геометричні параметри магнітопроводу (рис. 3.1).

Ширина обмоткового вікна в горизонтальному напрямку $b_{\text{орр}}$ і допоміжний розмір Δb (рис. 3.1, а), а також площа прямокутного перерізу ЕТС стрижня $S_{\text{срр}}$ магнітопроводу ЕМС (рис. 2.6, а, б) визначаються з використанням (3.1), (3.2) і параметру $D_{\text{врр}}$ (рис. 3.1, б):

$$b_{\text{орр}} = (D_{\text{нрр}} - D_{\text{врр}})/2 = D_{\text{врр}}(a_{\text{м}} - 1)/2; \quad (3.32)$$

$$\Delta b = D_{\text{врр}} \left(\text{tg} \frac{\pi}{6} \right) / 2 = D_{\text{врр}} / (2\sqrt{3}); \quad (3.33)$$

$$S_{\text{срр}} = K_{\text{зс}} h_{\text{опп}} D_{\text{врр}} = K_{\text{зс}} \lambda_0 b_{\text{орр}} D_{\text{врр}} = K_{\text{зс}} \lambda_0 D_{\text{врр}}^2 (a_{\text{м}} - 1)/2, \quad (3.34)$$

де $h_{\text{орр}}$ – аксіальна висота обмоткового вікна, що визначається на основі (3.2) і (3.33),

$$h_{\text{орр}} = \lambda_o b_{\text{орр}} = \lambda_o D_{\text{впр}} (a_M - 1) / 2. \quad (3.35)$$

Висота стрижня $h_{\text{срр}}$ визначається по рис. 3.1 і за допомогою (3.31)

$$h_{\text{срр}} = 2b_{\text{опш}} \text{tg}(\pi/6) = D_{\text{впр}} (a_M - 1) / \sqrt{3}. \quad (3.36)$$

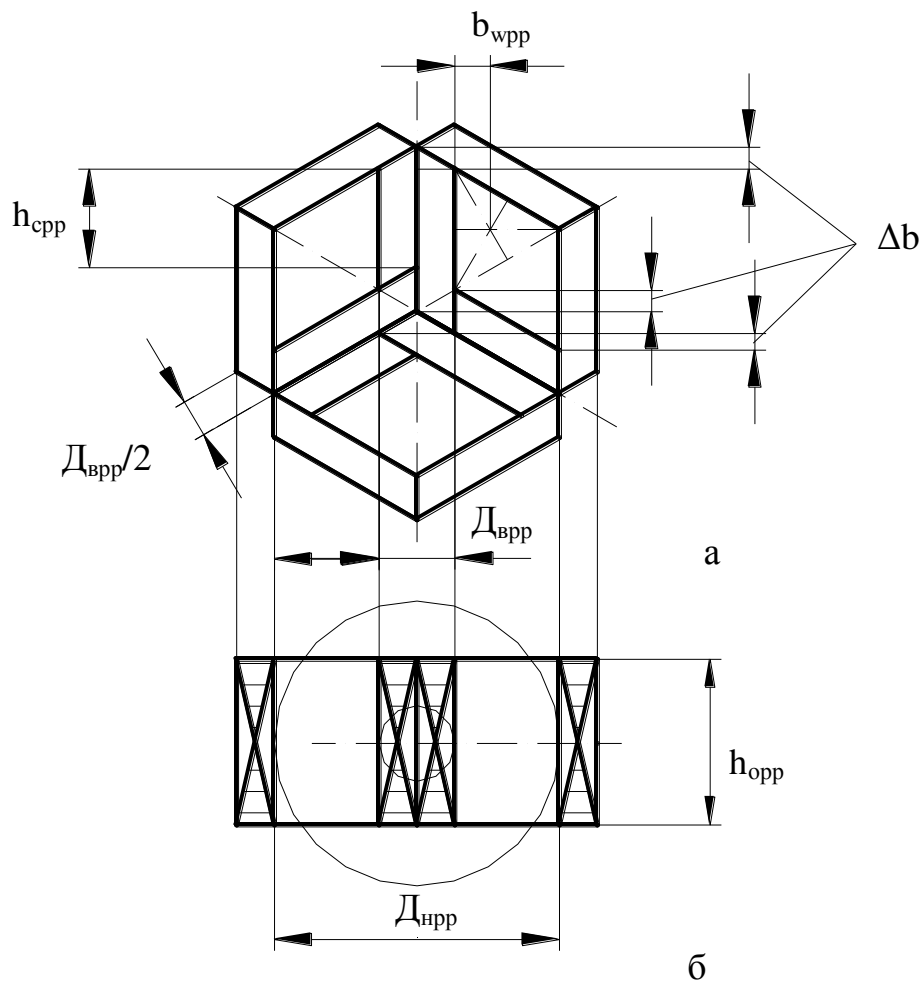


Рисунок 3.1 – Конфігурації поперечного (а) і повздовжнього (б) перерізів шихтованого магнітопроводу радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами

Площина ромбічного обмоткового вікна $S_{\text{орр}}$ магнітопроводу (рис. 3.1) визначається з використанням (3.32) і (3.36)

$$S_{\text{орр}} = b_{\text{орр}} h_{\text{срр}} = D_{\text{впр}}^2 (a_M - 1)^2 / (2\sqrt{3}). \quad (3.37)$$

Підстановкою (3.34) і (3.37) в (2.9) визначається залежність $D_{\text{вpp}}$ від $\Pi_{\text{тг}}$ та КЗ:

$$\begin{aligned} S_{\text{сpp}} &= \Pi_{\text{тг}} / (K_{30} S_{\text{opp}}); \\ K_{3c} \lambda_o D_{\text{вpp}}^2 (a_M - 1) / 2 &= 2\sqrt{3} \Pi_{\text{тг}} / [D_{\text{вpp}}^2 (a_M - 1)^2]; \\ D_{\text{вpp}} &= \sqrt[4]{6,9282 \Pi_{\text{тг}} / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Маса ЕТС магнітопроводу (рис. 3.1) визначається з використанням (3.34), (3.35) і (3.36)

$$\begin{aligned} m_{\text{мpp}} &= K_{3c} \gamma_c h_{\text{opp}} [3h_{\text{сpp}} D_{\text{вpp}} \Delta b + 3(h_{\text{сpp}} + \Delta b) D_{\text{вpp}}] = K_{3c} \gamma_c \lambda_o D_{\text{вpp}} (a_M - 1) \times \\ &\times \left\{ \sqrt{3} D_{\text{вpp}} (a_M - 1) 0,5 \sqrt{3} D_{\text{вpp}}^2 + 3 \left[D_{\text{вpp}} (a_M - 1) \frac{1}{\sqrt{3}} + D_{\text{вpp}} \frac{1}{\sqrt{3}} \right] D_{\text{вpp}} \right\} / 2 = \\ &= \sqrt{3} K_{3c} \gamma_c \lambda_o D_{\text{вpp}}^3 (a_M - 1) (a_M - 0,25). \end{aligned} \quad (3.39)$$

З використанням (3.38), рівняння (3.39) перетворюється

$$\begin{aligned} m_{\text{мpp}} &= \sqrt{3} K_{3c} \gamma_c \lambda_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 \times \\ &\times (a_M - 1) (a_M - 0,25) = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{1\text{ммр}}^* \end{aligned} \quad (3.40)$$

де $\Pi_{1\text{ммр}}^*$ – показник маси магнітопроводу ЕМС (рис. 2.6, а, б) з двоконтурними фазними елементами,

$$\Pi_{1\text{ммр}}^* = \sqrt{3} K_{3c} \lambda_o \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) (a_M - 0,25). \quad (3.41)$$

Відстань від центру усередненого витка фазних котушок еквівалентної обмотки до стрижня визначається з використанням рис. 3.1, а і (3.36)

$$b_{\text{wpp}} = h_{\text{cpp}} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi}{6} \right) / 2 = D_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1) / 6. \quad (3.42)$$

Довжина усередненого витка фазних котушок еквівалентної обмотки ЕМС (рис. 2.6, а, б) визначається на основі (3.35) і (3.42)

$$\begin{aligned} l_{\text{wpp}} &= 2D_{\text{вpp}} + 2h_{\text{орр}} + 2\pi b_{\text{wpp}} = 2D_{\text{вpp}} + \lambda_{\text{о}} D_{\text{вpp}} (a_{\text{м}} - 1) + \pi D_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1) / 3 = \\ &= D_{\text{вpp}} [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + \pi/3)]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

На основі (3.37) і (3.43) рівняння маси ПМ обмотки (2.10) перетворюється до вигляду, що відповідає ЕМС (рис. 2.6, а, б)

$$\begin{aligned} m_{\text{wpp}} &= 1,5\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} l_{\text{wpp}} S_{\text{орр}} = 1,5\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} D_{\text{вpp}} [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + \pi/3)] D_{\text{вpp}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 (1/2\sqrt{3}) = \\ &= 0,433\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} D_{\text{вpp}}^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,0472)]. \end{aligned} \quad (3.44)$$

При підстановці (3.3), (3.44) приймає вигляд

$$\begin{aligned} m_{\text{wpp}} &= 0,433\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{6,9282 \Pi_{\text{тт}} / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{о}} (a_{\text{м}} - 1)^3]} \right)^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 \times \\ &\times [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,0472)] = \gamma_{\text{о}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{wpp}}^*, \end{aligned} \quad (3.45)$$

де $\Pi_{1\text{wpp}}^*$ – показник маси обмотки з прямокутними УК ЕМС (рис. 2.6, а, б),

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{wpp}}^* &= 0,433 K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{о}} (a_{\text{м}} - 1)^3]} \right)^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 \times \\ &\times [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,0472)]. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Маса m_{pp} і вартість C_{pp} активних матеріалів радіальної ЕМС з шестигранним

зовнішнім контуром шихтованого магнітопроводу визначаються на основі (3.40), (3.41) і (3.45), (3.46) рівняннями:

$$m_{pp} = m_{mpp} + m_{wpp} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1mpp}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1wpp}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1pp}^*;$$

$$C_{pp} = C_{mpp} + C_{wpp} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1mpp}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1wpp}^* = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{2pp}^*,$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 2.6, а, б) визначаються функціональними залежностями:

$$\Pi_{1pp}^* = 1,732 \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{3c} K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 \{ K_{3c} \lambda_o (a_M - 1)(a_M - 0,25) + 0,25 K_{3o} (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,0472)] \gamma_o / \gamma_c \}; \quad (3.47)$$

$$\Pi_{2pp}^* = 1,732 \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{3c} K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 \{ K_{3c} \lambda_o (a_M - 1)(a_M - 0,25) + 0,25 K_{3o} (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,0472)] \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}. \quad (3.48)$$

Екстремальні значення (мінімуми) Π_{1ppe}^* показника (3.47), які отримані для трьох значень K_{3o} наведені в табл. 3.4, а екстремальні значення (мінімуми) Π_{2ppe}^* показника (3.48), що розраховані для трьох значень K_{3o} і відповідно для п'яти значень співвідношення C_o/C_c , наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.4 – Екстремуми показників маси просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами шихтованого магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
Π_{1ppe}^* (рис. 1.22, а, б)	26,9	28,6	30,9

Таблиця 3.5

Екстремуми показників вартості просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами шихтованого магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартостей обмоткової міді і електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
Π_{2ppe}^*	0,3	47,9	51,3	54,4	57,5	60,4
(рис. 2.6, а, б)	0,25	50,2	53,6	56,9	60,0	63,0
	0,2	53,3	56,9	60,2	63,4	66,5

Результати розрахунків (табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 3.4, табл. 3.5) визначають наступні співвідношення масовартісних показників відповідно до прийнятих діапазонів змін $K_{30} = 0,3 \dots 0,2$ і $C_0/C_c = 3,5 \dots 5,5$:

$$\Pi_{1ppe}^*/\Pi_{1ppe}^* = (27,7/26,9)..(31,4/30,9) = 1,03...1,02;$$

$$\left(\Pi_{2ppe}^*/\Pi_{2ppe}^*\right)' = (51,7/47,9)..(56,7/53,3) = 1,08...1,06;$$

$$\left(\Pi_{2ppe}^*/\Pi_{2ppe}^*\right)'' = (66,2/60,4)..(71,8/66,8) = 1,1...1,08.$$

3.4. Показник втрат активної потужності просторової радіальної системи з двоконтурними фазними елементами і ромбічними обмотковими вікнами

В магнітопроводах структур (рис. 1.9, б, в) у будь-якому поперечному перерізі кожної з трьох секцій середнє значення амплітуди індукції, при нехтуванні зрівнювальними магнітними потоками, є незмінним. Тому рівняння ВНР для ЕМС з двоконтурними фазними елементами і шихтованим магнітопроводом (рис. 3.1) при використанні ізотропної (анізотропної) ЕТС, з урахуванням (3.40) та $K_{днii} = K_{днр1(2)}$, має вигляд, який відповідає [26]

$$P_{\text{нрр1(2)}} = K_{\text{днр1(2)}} K_{\text{цз}}^{(')} m_{\text{мрр}} = \sqrt{3} K_{\text{днр1(2)}} K_{\text{цз}} K_{\text{зс}} D_{\text{врр}}^2 (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,25). \quad (3.49)$$

ВКЗ (2.13) для ЕМС (рис. 2.6, а, б) при підстановці (3.37) і (3.42) перетворюється

$$\begin{aligned} P_{\text{крр}} &= 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 S_{\text{орр}} l_{\text{врр}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 D_{\text{врр}}^2 \left[(a_{\text{м}} - 1)^2 / (2\sqrt{3}) \right] \times \\ &\times D_{\text{врр}} \left[2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + \pi/3) \right] = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 D_{\text{врр}}^3 \times \\ &\times \left[(a_{\text{м}} - 1)^2 / (2\sqrt{3}) \right] \left[2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + \pi/3) \right]. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Сумарні втрати ЕМС ТТ (рис. 2.6, а, б) визначаються на основі (2.11), (3.49) і (3.50) рівнянням

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{рр1(2)}} &= P_{\text{нрр1(2)}} + P_{\text{крр}} = \sqrt{3} K_{\text{днр1(2)}} K_{\text{цз}}^{(')} K_{\text{зс}} D_{\text{врр}}^3 \lambda_{\text{o}} (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,25) + 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} \times \\ &\times K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 D_{\text{врр}}^3 \times \left[(a_{\text{м}} - 1)^2 / 2\sqrt{3} \right] \left[2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + \pi/3) \right] = \sqrt{3} K_{\text{днр1(2)}} K_{\text{цз}}^{(')} D_{\text{врр}}^3 \{ K_{\text{зс}} \lambda_{\text{o}} (a_{\text{м}} - 1) \times \\ &\times (a_{\text{м}} - 0,25) + 0,25 K_{\text{урі}} K_{\text{зо}} (a_{\text{м}} - 1)^2 \left[2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + \pi/3) \right] \}. \end{aligned} \quad (3.51)$$

де $K_{\text{ур1(2)}}$ – співвідношення (2.12), що відповідає ЕМС (рис. 2.6, а, б) при $K_{\text{дні}} = K_{\text{днрі}}$,

$$K_{\text{ур1(2)}} = K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 / \left(K_{\text{днр1(2)}} K_{\text{цз}}^{(')} \right). \quad (3.52)$$

При підстановці (3.38), (3.51) перетворюється

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{рр1(2)}} &= \sqrt{3} K_{\text{цз}}^{(')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right) K_{\text{днрі}} \left(\sqrt[4]{6,9282 / \left[K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{o}} (a_{\text{м}} - 1)^3 \right]} \right)^3 \{ K_{\text{зс}} \lambda_{\text{o}} (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,25) + \\ &+ 0,25 K_{\text{зо}} (a_{\text{м}} - 1)^2 \left[2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + 1,0472) \right] \} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K_{\text{цз}}^{(')} \Pi_{\Sigma\text{рр1(2)}}^*, \end{aligned}$$

де $\Pi_{\Sigma\text{рр1(2)}}^*$ – показник втрат ЕМС (рис. 2.6, а, б) при використанні ізотропної

(анізотропної) ЕТС магнітопроводу, що визначається функціональною залежністю,

$$\begin{aligned} \Pi_{3pp1(2)}^* = \sqrt{3}K_{днр1(2)} \left(\sqrt[4]{6,9282 / [K_{3c}K_{3o}\lambda_o(a_M - 1)^3]} \right)^3 \{ K_{3c}\lambda_o(a_M - 1)(a_M - 0,25) + \\ + 0,25K_{yp1(2)}K_{3o}(a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,0472)] \}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

При використанні в магнітопроводі (рис. 3.1) ізотропної ЕТС додаткові втрати обраховуються коефіцієнтом $K_{днрi} = K_{днр1} = 1,394$, при цьому співвідношення (3.52) визначаються:

$$\begin{aligned} K_{yp1} &\geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,394 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 1,237; \\ K'_{yp1} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,394 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 3,636; \\ K''_{yp1} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,394 \cdot 7650 \cdot 2,4} = 10,632. \end{aligned}$$

Приймаються мінімальне K_{yp1min} і максимальне K_{yp1max} значення співвідношення (3.52) для ЕМС (рис. 2.6, а, б) з ізотропною ЕТС магнітопроводу

$$1,2 \leq K_{yp1} \leq 4(11). \quad (3.54)$$

При використанні в магнітопроводі (рис. 3.1) анізотропної ЕТС додаткові втрати обраховуються коефіцієнтом $K_{днрi} = K_{днр2} = 1,9765$ і співвідношення (3.52) визначаються:

$$K_{yp2} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,9765 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 2,117;$$

$$K'_{yp2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,9765 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 6,222;$$

$$K''_{yp2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,9765 \cdot 7650 \cdot 0,988} = 18,216.$$

Приймаються мінімальне K_{yp2min} і максимальне K_{yp2max} значення співвідношення (3.52) для ЕМС (рис. 2.6, а, б) з анізотропною ЕТС магнітопроводу

$$2 \leq K_{yp2} \leq 6(18). \quad (3.55)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{3pp1(2)e}^*$ показника (3.51) при прийнятих значеннях $K_{зс}$, $K_{зо}$, $K_{днр1(2)}$ і співвідношеннях (3.54) і (3.55) наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами шихтованого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	Π_{3pp1e}^* (рис. 1.22, а, б)			Π_{3pp2e}^* (рис. 1.22, а, б)		
	1,2	4	11	2	6	14
0,3	38,0	66,2	113,1	67,5	115,5	212,7
0,25	40,4	69,4	117,2	71,3	120,5	219,3
0,2	43,6	73,7	122,8	76,5	127,3	228,2

Результати розрахунків (табл. 3.3, табл. 3.6) визначають наступні співвідношення показників втрат активної потужності відповідно до прийнятих змін $K_{зо} = 0,3 \dots 0,2$ і значень $K_{yp1(2)}$ і $K_{yp1(2)}$, що відповідають використанню ізотропної (анізотропної) ЕТС:

$$\left(\Pi_{3\text{m}1\text{e}}^*/\Pi_{3\text{pp}1\text{e}}^*\right)' = (34,5/38,0)..(38,7/43,6) = 0,91...0,89;$$

$$\left(\Pi_{3\text{m}1\text{e}}^*/\Pi_{3\text{pp}1\text{e}}^*\right)'' = (108,7/113,1)..(115,8/122,8) = 0,96...0,94;$$

$$\left(\Pi_{3\text{m}2\text{e}}^*/\Pi_{3\text{pp}2\text{e}}^*\right)' = (64,9/67,5)..(71,7/76,5) = 0,96...0,94;$$

$$\left(\Pi_{3\text{m}2\text{e}}^*/\Pi_{3\text{pp}2\text{e}}^*\right)'' = (215,1/212,7)..(226,6/228,2) = 1,01...0,99.$$

3.5. Висновки до розділу 3

3.5.1. Встановлено, що перетворення базової планарної структури ЕМС на нетрадиційну радіальну з ромбічними конфігураціями обмоткових вікон, не призводить до погіршення масовартісних показників. Однак вплив подібного перетворення на втрати активної потужності є залежним від типу структури використаної ЕТС, співвідношення ЕМН та рівня додаткових втрат.

3.5.2. Визначено, що в залежності від класу напруги ($K_{30} = 0,2 \dots 0,3$) і співвідношення вартостей ПМ та ЕТС, оптимізовані показники маси і вартості радіальної ЕМС покращуються відносно базової відповідно на (1,8 ... 3,1) % та (6,2 ... 9,5) %.

3.5.3. Визначено, що відповідно до K_{30} , використаних матеріалів і прийнятих діапазонів зміни ЕМН, що впливають на співвідношення ВНР і ВКЗ, при застосуванні ізотропної ЕТС розрахунковий показник втрат радіальної ЕМС погіршується на (4 ... 12,7) %. При використанні анізотропної ЕТС такий показник погіршується до 0,7 %, або покращується до 1,14 % відносно базової планарної ЕМС.

3.5.4. Суттєве збільшення (до ≈ 13 %) показника втрат радіальної ЕМС з шихтованим магнітопроводом відносно базової планарної при зниженні до ≈ 3 % показника маси, обумовлено підвищенням розрахункових ВНР радіальної ЕМС на 34 % у відповідності до впливу третьої гармоніки магнітного потоку ($K_{\text{днз}} = 1,34$).

3.5.5. Невідповідність змін втрат планарної і радіальної ЕМС з шихтованими магнітопроводами при застосуванні ізотропної і анізотропної ЕТС обумовлена впливом виникнення додаткових втрат кутових зон магнітопроводів, які спричиняють зміну екстремальних значень КЗ та співвідношень ВНР і ВКЗ.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТРИФАЗНИХ ПРОСТОРОВИХ АКСІАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З ДВОКОНТУРНИМИ ФАЗНИМИ
ЕЛЕМЕНТАМИ ВИТИХ МАГНІТОПРОВІДІВ

4.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими контурами

Відомий [24, 26] та запропонований в [47, 48] нетрадиційний магнітопровід ЕМС структури (рис. 1.9, в) з варіантами конфігурацій (рис. 1.12, б, рис. 2.4, а) складаються з трьох секцій та мають УК поперечних перерізів у вигляді напівкола та трапеції (рис. 4.1, а) і прямокутними внутрішніми контурами (рис. 4.1, б).

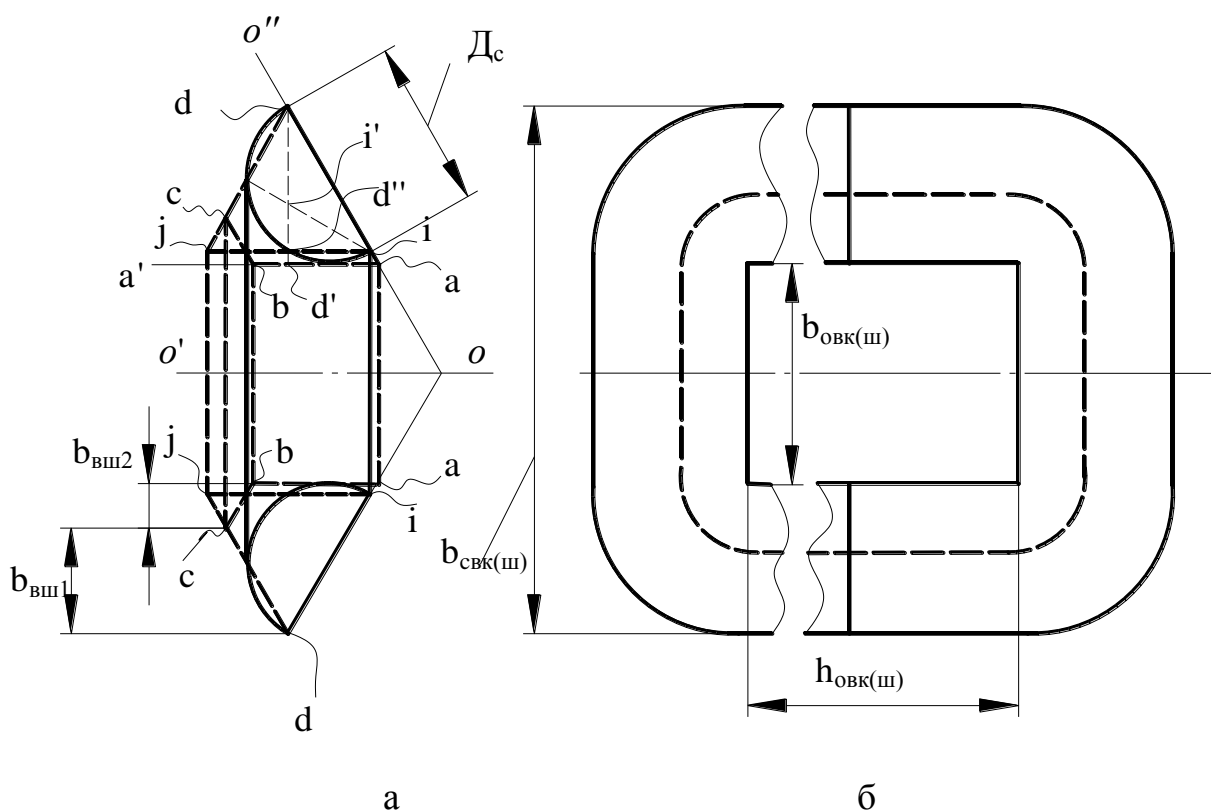


Рисунок 4.1 – Варіанти конфігурації утворюючих контурів (у накладеному вигляді) поперечного перерізу (а) і вигляду збоку (б) секції аксіального магнітопроводу з двоконтурними фазними елементами

Вказані магнітопроводи складаються суміщенням аксіальних площин відрізків ід (рис. 4.1, а), що відповідають діаметру та основі відповідно утворюючих напівкіл та трапецій. В напівколо кожної секції магнітопроводу ЕМС (рис. 1.12, б) вписані декілька чотирикутних ділянок, а заповнення трапецій секцій магнітопроводу ЕМС (рис. 2.4, а) шарами ЕТС визначається зсувом суміжних витків на частину товщини стрічки (рулону) ЕТС. Тому, як вказано в підрозділах 1.2 і 2.1, заповнення перерізами стрижнів кругових і шестигранних УК характеризується контурними коефіцієнтами відповідно $K_{\text{кк}} \leq 0,904$ [26] та $K_{\text{кш}} \approx 1$ [48]. Секції (рис. 4.1, а, б) навиваються з розгортки (стрічкових заготовок) умовні схеми яких наведено на рис. 4.2. Реальна конфігурація і технологічні труднощі виготовлення та забезпечення заданого заповнення шарами ЕТС кругового УК (в розрахунках прийнято $K_{\text{кк}} = 0,904$) кожного стрижня магнітопроводу ЕМС (рис. 1.12, б) визначаються кількістю та співвідношенням розмірів боків вказаних вище ділянок (рис. 1.12, в). Значно менша складність виготовлення магнітопроводу ЕМС (рис. 2.4, а) не залежить від співвідношення боків технологічних розгортки секцій (рис. 2.4, б), методика розрахунків яких розроблена в [129]. Вказані розгортки двох секцій виконуються безвідходно з рулонної прямокутної заготовки, що симетрично розділяється косим розрізанням.

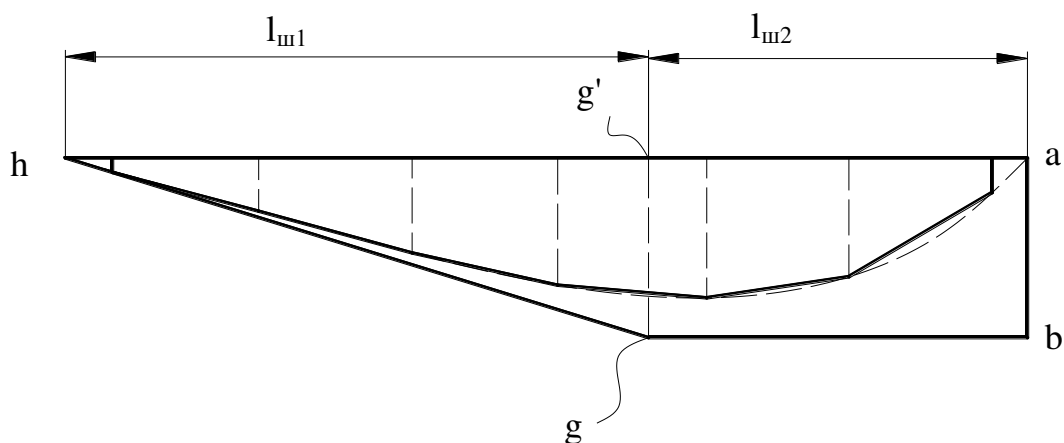


Рисунок 4.2 – Умовні конфігурації розгортки електротехнічної сталі (у накладеному вигляді) для навивки варіантів секції аксіального магнітопроводу з двоконтурними фазними елементами

Відносні КЗ ММ варіантів ЕМС структури (рис. 1.9, в) з ЦФ, що отримані за участю автора в [130, 131], визначаються співвідношеннями їх геометричних параметрів (рис. 4.3, рис. 4.4):

$$a_M = D_{\text{НВК(Ш)}} / D_{\text{ВВК(Ш)}} ; \quad (4.1)$$

$$\lambda_0 = h_{\text{ОВК(Ш)}} / b_{\text{ОВК(Ш)}} , \quad (4.2)$$

де $D_{\text{НВК(Ш)}}$ і $D_{\text{ВВК(Ш)}}$ – зовнішній та внутрішній розрахункові діаметри;

$h_{\text{ОВК}}$ і $b_{\text{ОВК}}$ – висота ширина обмоткового вікна.

Обґрунтування вигляду рівнянь (2.1) і (2.3), що відповідають традиційній ЕМС (рис. 4.3), здійснюється з використанням (4.1) і виразу утворюючого діаметру D_c , а також площі ЕТС поперечного перерізу стрижня $S_{\text{СВК}}$ з круговим УК:

$$D_c = (D_{\text{НВК}} - D_{\text{ВВК}}) / 2 = D_{\text{ВВК}} (a_M - 1) / 2 ; \quad (4.3)$$

$$S_{\text{СВК}} = \pi K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} D_c^2 / 4 = \pi K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} D_{\text{ВВК}}^2 (a_M - 1)^2 / 16 . \quad (4.4)$$

Мінімальна ширина обмоткового вікна $b_{\text{ОВК}}$ магнітопроводу ЕМС (рис. 4.3) визначається через $D_{\text{ВК}}$ і a_M з використанням (4.1), (4.3) і рівняння:

$$\begin{aligned} (b_{\text{ОВК}} + D_c) / 2 &= (D_{\text{НВК}} - D_{\text{К}}) \sin(\pi/3) / 2 = [a_M D_{\text{ВВК}} - D_{\text{ВВК}} (a_M - 1) / 2] \sin(\pi/3) / 2 ; \\ b_{\text{ОВК}} &= 0,933 D_{\text{ВВК}} (1 - 0,0718 a_M) . \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ширина секції (рис. 4.1, б) магнітопроводу ЕМС (рис. 4.3) виражається через $D_{\text{ВК}}$ і (4.1) співвідношенням

$$b_{\text{СВК}} = D_{\text{НВК}} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} a_M D_{\text{ВВК}} / 2 . \quad (4.6)$$

Маса магнітопроводу ЕМС з круговими УК пропорційна сумі об'ємів стрижневих, яремних і кутових ділянок секції, що показана на рис. 4.1, а суцільними

лініями. Сумарний об'єм стрижневих і яремних ділянок секції відповідає об'єму двох циліндрів з діаметром D_c і висотами $h_{ок}$ і $b_{ок}$ (рис. 4.1, б). Сумарний об'єм чотирьох кутових ділянок такої секції утворений обертанням половини кола діаметром D_c відносно дотичної прямої oa' (рис. 4.1, а). В ідеалізованому варіанті з $K_{кк} = 1$ об'єм і маса ЕТС вказаної секції з напівкруговим перерізом визначається площею заготовки ЕТС для її навивання, яка обмежена суцільною прямою і перериваною кривою лініями. Площина ЕТС реальної подібної заготовки секції магнітопроводу з $K_{кк} < 1$ утворена сумарною площею згаданих вище чотирикутних ділянок, що обмежені суцільними прямими лініями (рис. 4.2).

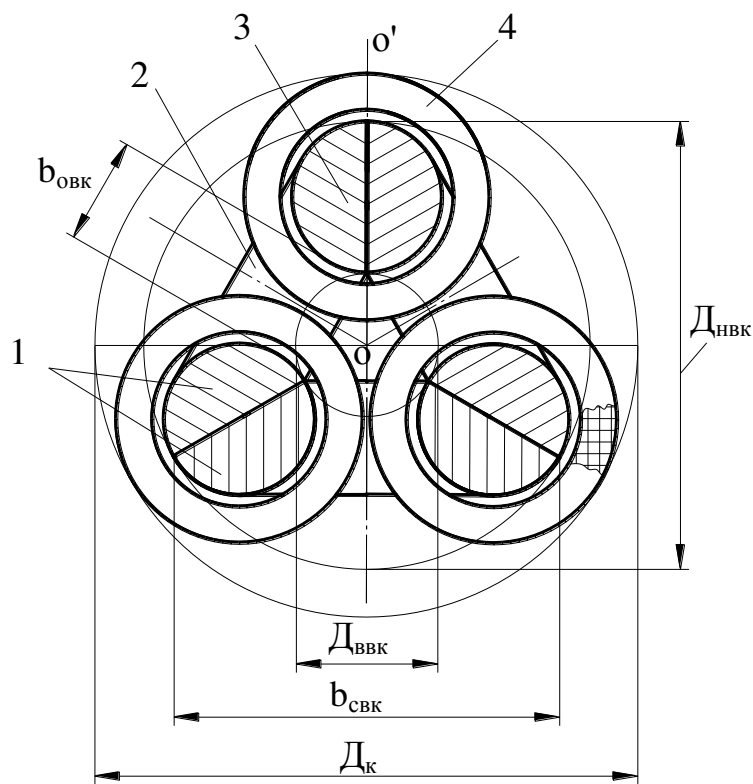


Рисунок 4.3 – Схема поперечного перерізу аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами витого трисекційного магнітопроводу:

- 1 – стрижень; 2 – яремна ділянка секції; 3 – стрижнева ділянка секції;
4 – котушка обмотки.

На основі геометричного моделювання, встановлена практична ідентичність об'ємів тіл, що утворені обертанням напівкола діаметру D_c і трикутника idj з боками, які дорівнюють D_c , відносно прямої aa' при умові суміщення id з D_c , а також

положень aa' і id під кутом $\pi/3$ до вісі oo'' (рис. 4.1, а) [130].

Відстань від вершини d трикутника idj до прямої ac' визначається на основі (4.5) і (4.6)

$$\begin{aligned} dd' &= \frac{(b_{\text{СВК}} - b_{\text{ОВК}})}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{3}a_M D_{\text{ВВК}}}{2} - 0,933D_{\text{ВВК}} - 0,933D_{\text{ВВК}}(1 - 0,0718a_M) \right] = \\ &= 0,4665 D_{\text{ВВК}}(a_M - 1). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Радіус обертання $d'd''$ боку ij відносно лінії aa' , центр ваги $i'd''$ і площа S_{idj} трикутника idj визначаються з використанням (4.3) і (4.7):

$$\begin{aligned} d'd'' &= dd' - D_c \sin(\pi/3) = 0,4665D_{\text{ВВК}}(a_M - 1) - 0,5D_{\text{ВВК}}(a_M - 1)\sqrt{3}/2 = \\ &= 0,03249 D_{\text{ВВК}}(a_M - 1); \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$i'd'' = D_c \operatorname{tg}(\pi/6)/2 = D_{\text{ВВК}}(a_M - 1)/(4\sqrt{3}); \quad (4.9)$$

$$S_{idj} = D_c^2 \sqrt{3}/4 = 0,108253D_{\text{ВВК}}^2(a_M - 1)^2. \quad (4.10)$$

Об'єм кутових зон секції магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2) визначається на основі (4.8) – (4.10)

$$\begin{aligned} V_{\text{УК}} &\approx 2\pi(d'd'' + i'd'')S_{idj} = 2\pi[0,03249D_{\text{ВВК}}(a_M - 1) + 0,14431D_{\text{ВВК}}(a_M - 1)] \times \\ &\times 0,108253D_{\text{ВВК}}^2(a_M - 1)^2 = 0,12028D_{\text{ВВК}}^3(a_M - 1)^3. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Маса магнітопроводу (рис. 4.3) визначається, з урахуванням (4.2) і при підставці (4.3), (4.5) і (4.11), рівнянням

$$\begin{aligned} m_{\text{МВК}} &\approx 3\gamma_c K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} \left[\pi D_c^2 (h_{\text{ОК}}/4) + \pi D_c^2 (b_{\text{ОК}}/4) + V_{\text{УК}} \right] = \\ &= 3\gamma_c K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} \left[\pi D_{\text{ВВК}}^2 (a_M - 1)^2 0,933D_{\text{ВВК}}(1 - 0,0718a_M)((\lambda_o + 1)/16) + 0,120275D_{\text{ВВК}}^2(a_M - 1)^3 \right] = \end{aligned}$$

$$= 0,5496\gamma_c K_{3c} K_{kk} D_{BVK}^3 [(\lambda_o + 1)(1 - 0,0718a_M)(a_M - 1)^2 + 0,656544(a_M - 1)^3]. \quad (4.12)$$

Рівняння (2.9) зв'язку площ S_{cb} і S_{ob} відповідно стрижня та обмоткового вікна ЕМС (рис. 4.3) на основі (4.2) перетворюється

$$S_{CBK} = \Pi_{TT} / (K_{3o} S_{OBK}) = \Pi_{TT} / (K_{3o} \lambda_o b_{OBK}^2). \quad (4.13)$$

З рівності (4.4) і (4.13), з урахуванням (4.5), слід:

$$\frac{\Pi_{TT}}{K_{3o} \lambda_o b_{OBK}^2} = \left[\frac{\Pi_{TT}}{0,87 K_{3o} \lambda_o D_{BVK}^2 (1 - 0,0718 a_M)^2} \right] = \pi K_{3c} K_{kk} D_{BVK}^2 (a_M - 1) / 16;$$

$$D_{BVK} = 1,555 \sqrt[4]{\Pi_{TT} / [K_{3c} K_{3o} K_{kk} f_{BK}(a_M, \lambda_o)]}, \quad (4.14)$$

де $f_{BK}(a_M, \lambda_o)$ – складова скорочення запису виразу (4.14) у вигляді добутку,

$$f_{BK}(a_M, \lambda_o) = \lambda_o (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 1)^2. \quad (4.15)$$

Підстановка (4.15) перетворює (4.12) до вигляду

$$m_{MBK} \approx 0,5496 (1,555)^3 \gamma_c K_{3c} K_{kk} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT} / [K_{3c} K_{3o} K_{kk} f_{BK}(a_M, \lambda_o)]} \right)^3 \times$$

$$\times [(\lambda_o + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,656544(a_M - 1)^3] = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1MBK}^*, \quad (4.16)$$

де Π_{1MBK}^* – показник маси магнітопроводу ЕМС (рис. 4.3),

$$\Pi_{1MBK}^* = 2,0665 K_{3c} K_{kk} \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3c} K_{3o} K_{kk} f_{BK}(a_M, \lambda_o)]} \right)^3 \times$$

$$\times [(\lambda_o + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,656544(a_M - 1)^3]. \quad (4.17)$$

Середня довжина витка кожної з фазних котушок ЕМС (рис. 4.3) визначається на основі (4.3) і (4.5)

$$\begin{aligned} l_{\text{WBK}} &= \pi(D_c + b_{\text{OK}}/2) = \pi[0,5D_{\text{BBK}}(a_M - 1) + 0,933D_{\text{BBK}}(1 - 0,0718a_M)] = \\ &= 1,46555D_{\text{BBK}}(a_M - 0,07181). \end{aligned} \quad (4.18)$$

З використанням (4.2) і (4.5) та підстановки (4.18) рівняння (2.10) для ЕМС (рис. 4.3) зображується у вигляді

$$\begin{aligned} m_{\text{WBK}} &= 1,5\gamma_o K_{30}\lambda_o b_{\text{OK}}^2 l_{\text{WBK}} = 1,5\gamma_o K_{30}\lambda_o [0,933D_{\text{BBK}}(1 - 0,0718)]^2 \times \\ &\times 1,46555D_{\text{BBK}}(a_M - 0,07181) = 1,91362\gamma_o K_{30}\lambda_o D_{\text{BBK}}^3 (1 - 0,0718a_M)^2 (a_M - 0,07181). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Підстановкою (4.14), (4.19) перетворюється

$$\begin{aligned} m_{\text{WBK}} &= 1,91362\gamma_o K_{30}\lambda_o \left\{ 1,555\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}/[K_{3c}K_{30}K_{\text{KK}}f_{\text{BK}}(a_M, \lambda_o)]} \right\}^3 \times \\ &\times (1 - 0,0718a_M)^2 (a_M - 0,07181) = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{WBK}}^*, \end{aligned} \quad (4.20)$$

де $\Pi_{1\text{WBK}}^*$ – показник маси АПМ обмоток з круговими УК ЕМС (рис. 4.3),

$$\Pi_{1\text{WBK}}^* = 7,1953K_{30}\lambda_o \left(\sqrt[4]{1/[K_{3c}K_{30}K_{\text{KK}}f_{\text{BK}}(a_M, \lambda_o)]} \right)^3 (1 - 0,0718a_M)^2 (a_M - 0,07181). \quad (4.21)$$

Маса m_{BK} і вартість C_{BK} активних матеріалів ЕМС з традиційними круговими УК (рис. 4.3) визначаються на основі (4.16), (4.17) та (4.20), (4.21) рівняннями вигляду (2.7)

$$\begin{aligned} m_{\text{BK}} &= m_{\text{MBK}} + m_{\text{WBK}} \approx \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{MBK}}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{WBK}}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{BK}}^*; \\ C_{\text{BK}} &= C_{\text{MBK}} + C_{\text{WBK}} \approx \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{MBK}}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{WBK}}^* = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{2\text{BK}}^*, \end{aligned}$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 4.3) визначаються функціональними залежностями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{ВК}}^* \approx & 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/[K_{3\text{C}} K_{30} K_{\text{КК}} f_{\text{ВК}}(a_{\text{М}}, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_{\text{М}})(a_{\text{М}} - 1)^2 + \\ & + 0,65654(a_{\text{М}} - 1)^3] + 3,48188 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_{\text{М}})^2 (a_{\text{М}} - 0,07181) \gamma_0 / \gamma_{\text{C}} \}; \quad (4.22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2\text{ВК}}^* \approx & 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/K_{3\text{C}} K_{30} K_{\text{КК}} [f_{\text{ВК}}(a_{\text{М}}, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_{\text{М}})(a_{\text{М}} - 1)^2 + \\ & + 0,65654(a_{\text{М}} - 1)^3] + 3,4819 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_{\text{М}})^2 (a_{\text{М}} - 0,07181) C_0 \gamma_0 / (C_{\text{C}} \gamma_{\text{C}}) \}. \quad (4.23) \end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1\text{ВК}}^{*(n)}$ і $\Pi_{2\text{ВК}}^{*(n)}$ показників (4.22) і (4.23), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень співвідношення C_0/C_{C} , а також двох – ідеалізованому (') та реальному (") значеннях $K_{\text{КК}}$ наведені в табл. 4.1 і табл. 4.2.

Результати розрахунків (табл. 4.1, табл. 4.2) визначають вплив неповного заповнення шарами ЕТС кругових УК стрижнів на масовартісні показники традиційних ЕМС (рис. 4.3) в прийнятих діапазонах змін $K_{30} = 0,3 \dots 0,2$ і $C_0/C_{\text{C}} = 3,5 \dots 5,5$:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{ВК}}^{*''} / \Pi_{1\text{ВК}}^{*' } &= (25,8 / 25,3 \dots 29,2 / 28,7) = 1,02 \dots 1,018; \\ \left(\Pi_{2\text{ВК}}^{*''} / \Pi_{2\text{ВК}}^{*' } \right)' &= (47,8 / 46,5 \dots 61,2 / 59,4) = 1,03 \dots 1,03; \\ \left(\Pi_{2\text{ВК}}^{*''} / \Pi_{2\text{ВК}}^{*' } \right)'' &= (52,6 / 51,2 \dots 66,5 / 64,6) = 1,03 \dots 1,029. \end{aligned}$$

4.2. Показник втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами

Загальні ВНР $P_{\text{НВК1}(2)}$ і $P_{\text{НВШ1}(2)}$ варіантів аксіальної ЕМС (рис. 4.3, рис. 4.4) з різновидами витих магнітопроводів, що відрізняються формою перерізів стрижнів та використанням ізотропної (анізотропної) ЕТС, є пропорційними масі $m_{\text{МВК(Ш)}}$ трьох

симетричних секцій відповідно з круговими і шестигранними УК

$$P_{\text{МВК(III)1(2)}} = K_{\text{ДНЗ}} K'_{\text{ЦЗ}} m_{\text{МВК(III)}} / \gamma_c \cdot \quad (4.24)$$

Таблиця 4.1 – Екстремуми показників маси варіантів просторової аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами витих магнітопроводів

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1\text{ВКЕ}}^{*(n)}$, $K_{\text{КК}} = 1$ (рис. 4.2)	25,3	26,7	28,7
$\Pi_{1\text{ВКЕ}}^{*(n)}$, $K_{\text{КК}} = 0,904$ (рис. 4.2)	25,8	27,3	29,2

Таблиця 4.2

Екстремуми показників вартості варіантів просторової аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами витих магнітопроводів

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2\text{ВКЕ}}^*$, $K_{\text{КК}} = 1$ (рис. 4.3)	0,3	46,5	49,9	53,2	56,3	59,4
	0,25	48,5	52,0	55,3	58,5	61,6
	0,2	51,2	54,8	58,2	61,5	64,6
$\Pi_{2\text{ВКЕ}}^*$, $K_{\text{КК}} = 0,904$ (рис. 4.3)	0,3	47,9	51,4	54,8	58,1	61,2
	0,25	49,8	53,5	56,9	60,2	63,5
	0,2	52,6	56,3	59,8	63,2	66,5

При використанні (4.16), (4.24) перетворюється до вигляду, що відповідає круговим УК ЕМС (рис. 4.3)

$$P_{\text{НВК1(2)}} = K_{\text{ДНЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K'_{\text{ЦЗ}} \Pi_{\text{1МВК}}^* \quad (4.25)$$

Рівняння (2.13) для ЕМС (рис. 4.3) при застосуванні (4.2), (4.5) і (4.18) приймає вигляд

$$\begin{aligned} P_{\text{КВК}} &= 1,5 K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \lambda_0 b_{\text{ОВК}}^2 l_{\text{ВВК}} = 1,5 K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ПО}} J_0^2 K_{\text{ЗО}} \lambda_0 \times \\ &\times [0,933 D_{\text{ВВК}} (1 - 0,0718 a_M)]^2 1,46555 D_{\text{ВВК}} (a_M - 0,07181) = \\ &= 1,9136 K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \lambda_0 D_{\text{ВВК}}^3 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181). \end{aligned} \quad (4.26)$$

При підстановці (4.14) ВКЗ (4.26), з урахуванням (4.21), визначаються

$$\begin{aligned} P_{\text{КВК}} &= 1,9136 K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \lambda_0 \left\{ 1,555 \sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} / [K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} K_{\text{КК}} f_{\text{ВК}}(a_M, \lambda_0)] \right\}^3 \times \\ &\times (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181) = K_{\text{ДК}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1ВВК}}^*. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Рівняння (2.11) для ЕМС (рис. 4.3) на основі (4.25) і (4.27) та з урахуванням (2.12) і (2.13) приймає вигляд

$$\begin{aligned} P_{\Sigma \text{ВК1(2)}} &= P_{\text{НВК1(2)}} + P_{\text{КВК}} = K_{\text{ДНЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K'_{\text{ЦЗ}} \Pi_{\text{1МВК}}^* + K_{\text{ДК}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1ВВК}}^* = \\ &= K'_{\text{ЦЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K_{\text{ДНЗ}} \left(\Pi_{\text{1МВК}}^* + K_{\text{УВ1(2)}} \Pi_{\text{1ВВК}}^* \right), \end{aligned} \quad (4.28)$$

де $K_{\text{УВ1(2)}}$ – співвідношення (2.12), що відповідає структурам ЕМС (рис. 1.9, б, в) з витими магнітопроводами,

$$K_{yB1(2)} = K_{дк} \gamma_0 K_{по} J_0^2 / (K_{дн3} K'_{цз}). \quad (4.29)$$

Після підстановки (4.17) і (4.21), сумарні втрати (4.28) визначаються рівнянням, що відповідає (2.11)

$$\begin{aligned} P_{\Sigma BK1(2)} = & K'_{цз} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тг}} \right)^3 K_{дн3} \left\{ 2,0665 K_{зс} K_{кк} \left(\sqrt[4]{1/[K_{зс} K_{зо} K_{кк} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times \right. \\ & \times \left[(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3 \right] + 7,1953 K_{yB1(2)} K_{зо} \lambda_0 \times \\ & \left. \times \left(\sqrt[4]{1/[K_{зс} K_{зо} K_{кк} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,0718) \right\} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{тг}} \right)^3 K'_{цз} \Pi_{3BK1(2)}^*, \end{aligned}$$

де Π_{3BK}^* – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 4.3), з варіантами магнітопроводу, що відрізняються використанням ізотропної (анізотропної) ЕТС,

$$\begin{aligned} \Pi_{3BK1(2)}^* = & 2,0665 K_{дн3} \left(\sqrt[4]{1/[K_{зс} K_{зо} K_{кк} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times \\ & \times \left\{ K_{зс} K_{кк} \left[(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3 \right] + \right. \\ & \left. + 3,482 K_{yB1(2)} K_{зо} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,0718) \right\}. \quad (4.30) \end{aligned}$$

Згідно визначенням у підрозділі 2.1 значенням ЕМН, питомих характеристик матеріалів і $K_{днii} = K_{дн3}$, розрахункові співвідношення (4.29) при використанні ізотропної ЕТС ($K_{yvi} = K_{yB1}$) та анізотропної ЕТС ($K_{yvi} = K_{yB2}$) відповідно складають:

$$\begin{aligned} K_{yB1} & \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 1,3; \\ K'_{yB1} & \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 3,3} = 3,8; \\ K''_{yB1} & \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 2,4} = 11,1; \end{aligned}$$

$$K_{yB2} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 3,1;$$

$$K'_{yB2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 9,2;$$

$$K''_{yB2} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,988} = 26,9.$$

Приймаються мінімальні $K_{yB1(2)\min}$ і максимальні $K_{yB1(2)\max}$ значення співвідношення (4.29), що відповідають трисекційному витому магнітопроводу ЕМС (рис. 4.3) з ізотропною (анізотропною) ЕТС:

$$1,3 \leq K_{yB1} \leq 4(11); \quad (4.31)$$

$$3 \leq K_{yB2} \leq 9(27). \quad (4.32)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{3BK1(2)e}^{*(\prime\prime)}$ показника (4.30) ЕМС (рис. 4.3) при прийнятих значеннях $K_{зс}$, $K_{зо}$, $K_{днз}$ і співвідношеннях (4.31), (4.32), а також двох – ідеалізованому (\prime) та реальному ($\prime\prime$) значеннях $K_{кк}$ наведено у табл. 4.3 та табл. 3.4.

Результати розрахунків (табл. 4.3, табл. 4.4) визначають вплив неповного заповнення шарами ЕТС кругових УК стрижнів на показники втрат активної потужності традиційної ЕМС (рис. 4.3).

$$\left(\Pi_{3BK1e}^{*(\prime\prime)} / \Pi_{3BK1e}^{*(\prime)} \right)' = (36,4/35,6 \dots 41,1/40,3) = 1,02 \dots 1,019;$$

$$\left(\Pi_{3BK1e}^{*(\prime\prime)} / \Pi_{3BK1e}^{*(\prime)} \right)'' = (112/108,2 \dots 120,1/116,3) = 1,04 \dots 1,03;$$

$$\left(\Pi_{3BK2e}^{*(\prime\prime)} / \Pi_{3BK2e}^{*(\prime)} \right)' = (54,7/53,3 \dots 60,5/59,1) = 1,03 \dots 1,02;$$

$$\left(\Pi_{3BK2e}^{*(\prime\prime)} / \Pi_{3BK2e}^{*(\prime)} \right)'' = (194/186,6 \dots 204,1/196,8) = 1,04 \dots 1,037.$$

Таблиця 4.3 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів просторової аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами та ізотропною електротехнічною сталлю витих магнітопроводів

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi^{*(r)}_{3BK1e}, K_{KK} = 1$ (рис. 4.3)			$\Pi^{*(n)}_{3BK1e}, K_{KK} = 0,904$ (рис. 4.3)		
	1,3	4	11	1,3	4	11
0,3	35,6	61,8	108,2	36,4	63,5	112,0
0,25	37,6	64,48	111,7	38,4	66,2	115,4
0,2	40,3	68,0	116,3	41,1	69,8	120,1

Таблиця 4.4 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів просторової аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами та анізотропною електротехнічною сталлю витих магнітопроводів

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi^{*(r)}_{3BK2e}, K_{KK} = 1$ (рис. 4.3)			$\Pi^{*(n)}_{3BK2e}, K_{KK} = 0,904$ (рис. 4.3)		
	3	9	27	3	9	27
0,3	53,3	96,4	186,6	54,7	99,6	193,9
0,25	55,7	99,6	190,9	57,2	102,9	198,3
0,2	59,1	104,1	196,8	60,5	107,3	204,1

4.3. Масовартісні показники системи з шестигранними утворюючими контурами

Обґрунтування вигляду рівнянь (2.1), (2.3) і (2.4), що відповідають ЕМС (рис. 4.4) виконується з наведенням у вигляді функцій від (4.1), (4.2) і α_c геометричних параметрів поперечного перерізу магнітопроводу.

Радіальна ширина стрижня a_{c1} визначається з використанням (4.1)

$$a_{c1} = (D_{\text{нввш}} - D_{\text{вввш}})/2 = D_{\text{вввш}} (a_M - 1)/2. \quad (4.33)$$

Кутова ширина стрижня a_{c2} пов'язана з (4.33) виразом

$$\begin{aligned} a_{c2} &= 2 \left(\frac{D_{\text{вввш}}}{2} + \frac{a_{c1}}{2} \right) \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} = [D_{\text{вввш}} + D_{\text{вввш}} (a_M - 1)/2] \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} = \\ &= D_{\text{вввш}} f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c)/2, \end{aligned} \quad (4.34)$$

де $f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c)$ – складова скорочення запису виразу a_{c2} у вигляді добутку,

$$f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) = (a_M + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c/2). \quad (4.35)$$

Перший бік половини шестигранного УК стрижня виражається через (4.34) і (4.35)

$$b_{c1} = a_{c2}/[2 \sin(\pi/3)] = D_{\text{вввш}} f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c)/(2\sqrt{3}). \quad (4.36)$$

Другий бік половини шестигранного УК стрижня виражається через (4.33) і (4.36)

$$b_{c2} = a_{c1} - 2b_{c1} \sin \frac{\pi}{6} = D_{\text{вввш}} \frac{a_M - 1}{2} - \frac{D_{\text{вввш}}}{\sqrt{3}} f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) \times$$

$$\times \sin \frac{\pi}{6} = D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) / 2, \quad (4.37)$$

де $f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)$ – складова скорочення запису виразу b_{c2} у вигляді суми

$$f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) = a_M - 1 - f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) / \sqrt{3}. \quad (4.38)$$

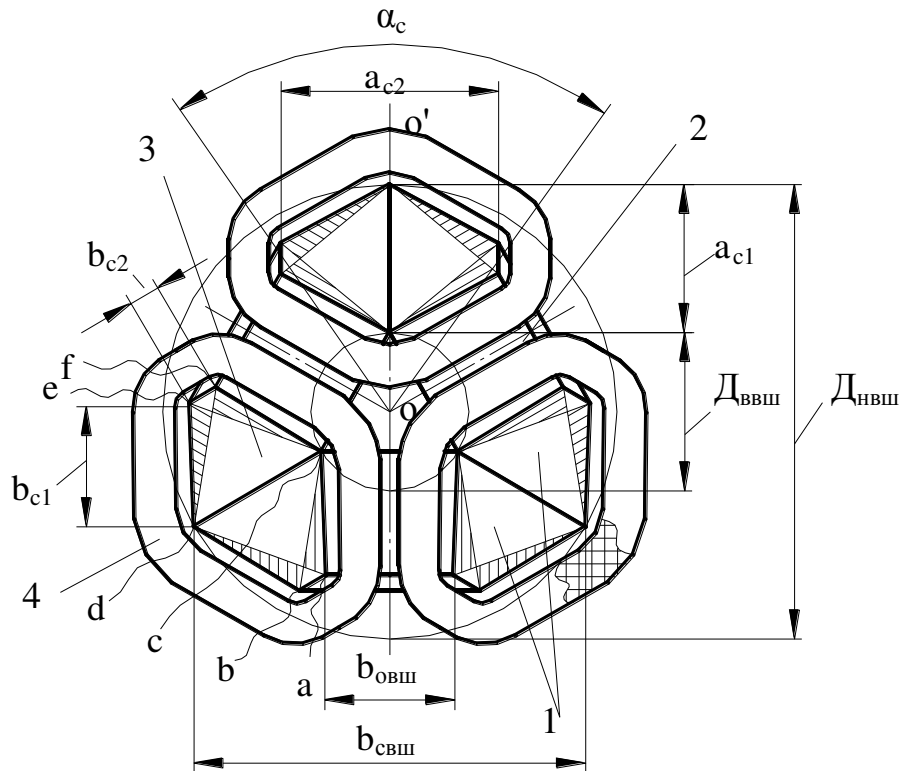


Рисунок 4.4 – Схема поперечного перерізу аксіальної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами витого трисекційного магнітопроводу:

1 – стрижень; 2 – ярма ділянка секції; 3 – стрижнева ділянка секції;

4 – котушка обмотки.

Площа ЕТС в перерізі $abcdef$ стрижня магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4) визначається, з урахуванням (4.34) – (4.38), рівнянням

$$S_{\text{свШ}} = K_{\text{зс}} [a_{c2} b_{c1} \sin(\pi/6) + a_{c2} b_{c2}] = K_{\text{зс}} \left[D_{\text{ВВШ}} \frac{f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c)}{2} D_{\text{ВВШ}} \frac{f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c)}{2\sqrt{3}} \sin \frac{\pi}{6} + \right.$$

$$+ \left. \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} \frac{f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c)}{2} \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} \frac{f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)}{2} \right] = K_{3c} \mathcal{D}_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c) / 4, \quad (4.39)$$

де $f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c)$ – складова скорочення запису виразу $S_{\text{свШ}}$ у вигляді суми,

$$f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c) = a_M - 1 - f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) / (2\sqrt{3}). \quad (4.40)$$

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4)

$$b_{\text{ОВШ}} = \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} / 2. \quad (4.41)$$

Допоміжні розрахункові геометричні параметри бокового вигляду (пунктирні лінії на рис. 4.1, а) секції магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4), згідно рис. 4.1, а та на основі (4.36) і (4.37), визначаються:

$$\begin{aligned} b_{\text{ВШ1}} &= b_{c1} \sin(\pi/3) = \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} \sin(\pi/3) f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) / (2\sqrt{3}) = \\ &= \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) / 4; \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} b_{\text{ВШ2}} &= b_{c2} \sin(\pi/3) = \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} \sin(\pi/3) f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) / 2 = \\ &= \sqrt{3} \mathcal{D}_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) / 4. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Число витків ЕТС товщиною δ_c в ділянках секції (пунктирні лінії на рис. 4.1, а) шириною $b_{\text{ВШ1(2)}}$ (рис. 4.1, а)

$$n_{\text{ВШ1(2)}} = b_{\text{ВШ1(2)}} / \delta_c. \quad (4.44)$$

Середні довжини витків ЕТС секції магнітопроводу $l_{\text{ВШ1(2)}}$ ЕМС (рис. 4.4) на ділянках $b_{\text{ВШ1(2)}}$ знаходяться виходячи з (4.2) і (4.41) – (4.44):

$$l_{\text{ВШ1}} = 2(h_{\text{ОВШ}} + b_{\text{ОВШ}}) + 2\pi(b_{\text{ВШ2}} + b_{\text{ВШ1}}/2) = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}(\lambda_0 + 1) + 2\pi \times \\ \times \left[\left(\sqrt{3}D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)/4 \right) + \left(D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c)/4 \right) \right] = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c); \quad (4.45)$$

$$l_{\text{ВШ2}} = 2(h_{\text{ОВШ}} + b_{\text{ОВШ}}) + \pi b_{\text{ВШ2}} = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}(\lambda_0 + 1) + \\ + \pi\sqrt{3}D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)/4 = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c), \quad (4.46)$$

де $F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)$ і $F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)$ – співмножники скорочення запису виразів визначення $l_{\text{ВШ1(2)}}$ у вигляді складових:

$$F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c)/2; \quad (4.47)$$

$$F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)/4. \quad (4.48)$$

Довжини трикутного $l_{\text{Ш1}}$ і прямокутного $l_{\text{Ш2}}$ ділянок заготовки ЕТС (рис. 4.1, в) для навивки секцій магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4) визначаються на основі (4.44) – (4.48) виразами:

$$l_{\text{Ш1}} = n_{\text{ВШ1}}l_{\text{ВШ1}} = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c)F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)/(4\delta_c); \quad (4.49)$$

$$l_{\text{Ш2}} = n_{\text{ВШ2}}l_{\text{ВШ2}} = \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c)F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)/(4\delta_c). \quad (4.50)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4) визначається з використанням (4.36), (4.49) і (4.50)

$$m_{\text{МВШ}} = 3\gamma_c K_{3c} \delta_c (b_{c1}l_{\text{Ш2}} + b_{c1}l_{\text{Ш1}}/2) = 3\gamma_c K_{3c} \delta_c \times \\ \times \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) 3D_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) \frac{1}{4\delta_c} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2\sqrt{3}} D_{\text{ВВШ}} f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) \sqrt{3}D_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) \frac{1}{4\delta_c} \right] = \\ = 0,1875\gamma_c K_{3c} D_{\text{ВВШ}}^3 \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) + \right.$$

$$+ 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ2}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) F_{\text{Ш2}}(a_{\text{М}}, \lambda_{\text{О}}, \alpha_{\text{С}})]. \quad (4.51)$$

Рівняння (2.9) зв'язку площ стрижня $S_{\text{СВ(Ш)}}$ і обмоткового вікна $S_{\text{ОВ(Ш)}}$ ЕМС (рис. 4.4) перетворюються

$$S_{\text{СВШ}} = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{30} S_{\text{ОВШ}}) = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{30} \lambda_{\text{О}} b_{\text{ОВШ}}^2). \quad (4.52)$$

З рівності (4.39) і (4.52) та з урахуванням (4.41) слід

$$\begin{aligned} 4\Pi_{\text{ТТ}} / (3K_{30} \lambda_{\text{О}} D_{\text{ВВШ}}) &= K_{3\text{С}} D_{\text{ВВШ}}^2 f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ3}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) / 4; \\ D_{\text{ВВШ}} &= 2\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}} / [3K_{3\text{С}} K_{30} \lambda_{\text{О}} f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ3}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}})]}. \end{aligned} \quad (4.53)$$

Підстановка (4.53) перетворює (4.51) до вигляду

$$\begin{aligned} m_{\text{МВШ}} &= 0,1875 \gamma_{\text{С}} K_{3\text{С}} \left(2\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}} / [3K_{3\text{С}} K_{30} \lambda_{\text{О}} f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ3}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}})]} \right)^3 \times \\ &\times \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) F_{\text{Ш1}}(a_{\text{М}}, \lambda_{\text{О}}, \alpha_{\text{С}}) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ2}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) \times \right. \\ &\quad \left. \times F_{\text{Ш2}}(a_{\text{М}}, \lambda_{\text{О}}, \alpha_{\text{С}}) \right] = \gamma_{\text{С}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{1\text{МВШ}}^*, \end{aligned} \quad (4.54)$$

де $\Pi_{1\text{МВШ}}^*$ – показник маси магнітопроводу ЕМС (рис. 4.4),

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{МВШ}}^* &= 1,5 \left(\sqrt[4]{1 / [3K_{3\text{С}} K_{30} \lambda_{\text{О}} f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ3}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}})]} \right)^3 K_{3\text{С}} \times \\ &\times \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) F_{\text{Ш1}}(a_{\text{М}}, \lambda_{\text{О}}, \alpha_{\text{С}}) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) f_{\text{ВШ2}}(a_{\text{М}}, \alpha_{\text{С}}) F_{\text{Ш2}}(a_{\text{М}}, \lambda_{\text{О}}, \alpha_{\text{С}}) \right]. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Середня довжина витка фазної котушки ЕМС (рис. 4.4) зображується виходячи з (4.36), (4.37) і (4.4) виразом

$$\begin{aligned}
I_{\text{WBШ}} &= 4b_{c1} + 2b_{c2} + \pi b_{\text{OBШ}}/2 = \frac{2}{\sqrt{3}} D_{\text{BBШ}} f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + D_{\text{BBШ}} f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + \pi\sqrt{3} D_{\text{BBШ}}/4 = \\
&= 1,1547 D_{\text{BBШ}} [f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781]. \quad (4.56)
\end{aligned}$$

Після підстановки, з урахуванням (4.2), виразів (4.41) і (4.56), рівняння (2.10) для ЕМС (рис. 4.4) зображується

$$\begin{aligned}
m_{\text{WBШ}} &= 1,5\gamma_o K_{30} \lambda_o b_{\text{OBШ}}^2 I_{\text{WBШ}} = 1,5\gamma_o K_{30} \lambda_o \left(\sqrt{3} D_{\text{BBШ}}/2\right)^2 \times \\
&\times 1,1547 D_{\text{BBШ}} [f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] = \\
&= 1,299\gamma_o K_{30} \lambda_o D_{\text{BBШ}}^3 [f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781]. \quad (4.57)
\end{aligned}$$

При підстановці (4.53), (4.57) перетворюється

$$\begin{aligned}
m_{\text{WBШ}} &= 1,299\gamma_o K_{30} \lambda_o \left(2^4 \sqrt{\Pi_{\text{TT}}} / [3K_{3c} K_{30} \lambda_o f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{BШ3}}(a_M, \alpha_c)]\right)^3 \times \\
&\times [f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{WBШ}}^*, \quad (4.58)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{WBШ}}^*$ – показник маси АПМ ЕМС (рис. 4.4),

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{WBШ}}^* &= 10,392K_{30} \lambda_o \left(\sqrt[4]{1/[3K_{3c} K_{30} \lambda_o f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{BШ3}}(a_M, \alpha_c)]}\right)^3 \times \\
&\times [f_{\text{BШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{BШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781]. \quad (4.59)
\end{aligned}$$

Маса $m_{\text{BШ}}$ і вартість $C_{\text{BШ}}$ активних матеріалів ЕМС (рис. 4.4) визначаються на основі (4.54), (4.55) та (4.58), (4.59) рівнянням вигляду (2.7):

$$\begin{aligned}
m_{\text{BШ}} &= m_{\text{MBШ}} + m_{\text{WBШ}} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{MBШ}}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{WBШ}}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{BШ}}^*; \\
C_{\text{BШ}} &= C_{\text{MBШ}} + C_{\text{WBШ}} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{MBШ}}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{1\text{WBШ}}^* = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}}\right)^3 \Pi_{2\text{BШ}}^*,
\end{aligned}$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 4.4) визначаються функціями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{ВШ}}^* &= 1,5 \left(\sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{30}\lambda_o f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ &\left\{ K_{3c} \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш1}}(a_M, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 6,928 K_{30}\lambda_o \left[f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781 \right] \gamma_o/\gamma_c \right\}; \quad (4.60) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2\text{ВШ}}^* &= 1,5 \left(\sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{30}\lambda_o f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ &\left\{ K_{3c} \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш1}}(a_M, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 6,928 K_{30}\lambda_o \left[f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781 \right] \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \right\}; \quad (4.61) \end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1\text{ВШЕ}}^*$ і $\Pi_{2\text{ВШЕ}}^*$ показників (4.60) і (4.61), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень C_o/C_c наведені в табл. 4.5 і табл. 4.6.

Результати розрахунків (табл. 4.1, табл. 4.2, табл. 4.5, табл. 4.6) визначають наступні співвідношення масовартісних показників відповідно до прийнятих діапазонів змін $K_{30} = 0,3 \dots 0,2$ і $C_o/C_c = 3,5 \dots 5,5$:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{ВКЕ}}^{*(')} / \Pi_{1\text{ВШЕ}}^* &= (25,8/25,6 \dots 29,2/29) = 1,01 \dots 1,009; \\ \left(\Pi_{2\text{ВКЕ}}^{*(')} / \Pi_{2\text{ВШЕ}}^* \right)' &= (47,8/47,3 \dots 52,5/51,9) = 1,03 \dots 1,031; \\ \left(\Pi_{2\text{ВКЕ}}^{*(')} / \Pi_{2\text{ВШЕ}}^* \right)'' &= (62,2/60,4 \dots 66,5/65,7) = 1,013 \dots 1,012. \end{aligned}$$

Таблиця 4.5 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1\text{ВШЕ}}^*$ (рис. 4.4)	25,6	27,0	29,0

Таблиця 4.6

Екстремуми показників вартості просторової аксіальної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
П* _{2вше} (рис. 4.3)	0,3	47,3	50,7	54,1	57,3	60,4
	0,25	49,3	52,8	56,2	59,5	62,7
	0,2	51,9	55,6	59,1	62,4	65,7

4.4. Показник втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами

Рівняння ВНР (4.24) при підстановці (4.54) приймає загальний вигляд, що відповідає шестигранним УК ЕМС (рис. 4.4)

$$P_{\text{нвш1(2)}} = K_{\text{днз}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K'_{\text{цз}} \Pi_{\text{1мвш}}^* \quad (4.62)$$

Рівняння (2.13) при підстановці (4.2), (4.11) і (4.56) визначає ВКЗ ЕМС (4.4) з шестигранними УК

$$\begin{aligned} P_{\text{квш}} &= 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_0 b_{\text{овш}}^2 l_{\text{ввш}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 P_{\text{уо}} K_{\text{зо}} J_0^2 \lambda_0 \left(\sqrt{3} D_{\text{ввш}} / 2 \right)^2 \times \\ &\times 1,1547 D_{\text{ввш}} \left[f_{\text{вш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 0,866 f_{\text{вш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 1,1781 \right] = \\ &= 1,3 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_0 D_{\text{ввш}}^3 \left[f_{\text{вш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 0,866 f_{\text{вш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 1,1781 \right]. \quad (4.63) \end{aligned}$$

З використанням (4.53), (4.63) перетворюється

$$P_{\text{КВШ}} = 10,392 K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_0^2 \lambda_0 \left(\sqrt[4]{\frac{\Pi_{\text{ТТ}}}{[3K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_C)]}} \right)^3 \times \\ \times [f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) + 0,866 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_C) + 1,1781] = K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ПО}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1ВВШ}}^*. \quad (4.64)$$

Рівняння (2.11) для ЕМС (рис. 4.4) на основі (4.62) і (4.64) та з урахуванням (2.13) і (4.29) приймає вигляд

$$P_{\Sigma_{\text{ВШ1(2)}}} = P_{\text{НВШ1(2)}} + P_{\text{КВШ}} = K_{\text{ДНЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K'_{\text{ЦЗ}} \Pi_{\text{1МВШ}}^* + K_{\text{ДК}} \gamma_0 K_{\text{ПО}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1ВВШ}}^* = \\ = K_{\text{ДНЗ}} K'_{\text{ЦЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{1МВШ}}^* + K_{\text{УВ1(2)}} \Pi_{\text{1ВВШ}}^* \right). \quad (4.65)$$

При підстановці (4.55) і (4.59) сумарні втрати (4.65) визначаються рівнянням вигляду (2.11)

$$P_{\Sigma_{\text{ВШ1(2)}}} = K_{\text{ДНЗ}} K'_{\text{ЦЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \left\{ 1,5 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{[3K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_C)]}} \right)^3 \times \right. \\ \times K_{\text{ЗС}} \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_M, \alpha_C) F_{\text{Ш1}}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_C) F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) \right] + \\ \left. + 10,392 K_{\text{УВ1(2)}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{[3K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_C)]}} \right)^3 \times \right. \\ \left. \times [f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) + 0,866 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_C) + 1,1781] \right\} = K'_{\text{ЦЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{3ВШ1(2)}}^*,$$

де $\Pi_{\text{3ВШ1(2)}}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 4.3) з варіантами магнітопроводу, що відрізняються використанням ізотропної (анізотропної) ЕТС,

$$\Pi_{\text{3ВШ1(2)}}^* = 1,5 K_{\text{ДНЗ}} \left(\sqrt[4]{\frac{1}{[3K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ3}}(a_M, \alpha_C)]}} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{\text{ЗС}} \left[f_{\text{ВШ1}}^2(a_M, \alpha_C) F_{\text{Ш1}}(a_M, \alpha_C) + 3,4641 f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_C) F_{\text{Ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_C) + \right. \right. \\ \left. \left. + 6,928 K_{\text{УВ1(2)}} K_{\text{ЗО}} \lambda_0 [f_{\text{ВШ1}}(a_M, \alpha_C) + 0,866 f_{\text{ВШ2}}(a_M, \alpha_C) + 1,1781] \right\}; \quad (4.66)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{\text{3ВШЕ}}^*$ показника (4.66) при прийнятих

значеннях $K_{зс}$, $K_{зо}$, $K_{днз}$ і співвідношеннях (4.31), (4.32) наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової аксіальної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами і двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi_{3вш1e}^*$ (рис. 4.4)			$\Pi_{3вш2e}^*$ (рис. 4.4)		
	1,3	4	11	3	9	27
0,3	36,0	62,8	110,4	54,0	98,2	191,0
0,25	38,0	65,4	113,8	56,5	101,5	195,3
0,2	40,7	69,0	118,5	59,9	105,9	201,1

Результати розрахунків (табл. 4.3, табл. 4.4, табл. 4.7) визначають наступні співвідношення показників втрат активної потужності відповідно до змін $K_{зо} = 0,3 \dots 0,2$ і значень $K_{уб1(2)}$, що відповідають використанню ізотропної (анізотропної) ЕТС:

$$\left(\Pi_{3вк1e}^{*(')} / \Pi_{3вш1e}^* \right)' = (36,4/36 \dots 41,1/40,7) = 1,01 \dots 1,009;$$

$$\left(\Pi_{3вк1e}^{*(')} / \Pi_{3вш1e}^* \right)'' = (112/110,4 \dots 120/118,5) = 1,014 \dots 1,013;$$

$$\left(\Pi_{3вк2e}^{*(')} / \Pi_{3вш2e}^* \right)' = (54,7/54 \dots 60,5/59,9) = 1,012 \dots 1,011;$$

$$\left(\Pi_{3вк2e}^{*(')} / \Pi_{3вш2e}^* \right)'' = (193,9/191 \dots 204,1/201,1) = 1,016 \dots 1,015.$$

Порівнянням результатів розрахунків (табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 3.3, табл. 4.5, табл. 4.6, табл. 4.7) визначаються співвідношення ПТР базової ЕМС (рис. 2.10) і не-традиційної ЕМС (рис. 4.4):

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{пне}}^*/\Pi_{1\text{вше}}^* &= (27,8/25,6)..(31,4/29) = 1,09...1,086; \\ \left(\Pi_{2\text{пне}}^*/\Pi_{2\text{вше}}^*\right)' &= (51,7/47,3)..(56,6/52) = 1,1...1,09; \\ \left(\Pi_{2\text{пне}}^*/\Pi_{2\text{вше}}^*\right)'' &= (66,2/60,4)..(71,8/65,7) = 1,1...1,09; \\ \left(\Pi_{3\text{пн1е}}^*/\Pi_{3\text{вш1е}}^*\right)' &= (34,5/36)..(38,7/40,7) = 0,96...0,94; \\ \left(\Pi_{3\text{пн1е}}^*/\Pi_{3\text{вш1е}}^*\right)'' &= (108,7/110,4)..(115,8/118,5) = 0,98...0,97; \\ \left(\Pi_{3\text{пн2е}}^*/\Pi_{3\text{вш2е}}^*\right)' &= (64,9/54)..(71,7/59,9) = 1,21...1,2; \\ \left(\Pi_{3\text{пн2е}}^*/\Pi_{3\text{вш2е}}^*\right)'' &= (215,1/191)..(226,6/201,1) = 1,126...1,127. \end{aligned}$$

4.5. Висновки до розділу 4

4.5.1. Встановлено, що конструктивно-технологічне обмеження повного заповнення ЕТС кругових УК стрижнів аксіальної традиційної ЕМС з двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу, що визначається $K_{\text{кк}} = 0,904$, призводить до погіршення показників маси і вартості активної частини відповідно на (1,8 ... 2,1) % і (2,6 ... 3,1) %.

4.5.2. Зниження заповнення кругового УК стрижня перерізами шарів ЕТС від віртуально-ідеального до технологічно обґрунтованого значення $K_{\text{кк}} = 0,904$, підвищує втрати активної потужності ТТ з аксіальною ЕМС та двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу з ізотропної та анізотропної ЕТС відповідно на (1,9 ... 3,5) % і (2,4 ... 3,9) %.

4.5.3. Встановлено, що підвищення компактності заміною кругових УК стрижнів і обмоткових котушок на шестигранні, додатково покращує показники маси і вартості аксіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу на (0,87 ... 0,97) % і (1,2 ... 1,3) %.

4.5.4. Заміна кругових УК на шестигранні знижує втрати активної потужності ТТ з двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу з ізотропної та анізотропної ЕТС відповідно на (0,9 ... 1,4) % і (1,1 ... 1,7) %.

4.5.5. Визначено, що в заданих діапазонах змін класу напруги і співвідношення вартостей ПМ і ЕТС, аксіальна ЕМС з шестигранними УК стрижнів та котушок обмоток і двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу відрізняється від базової планарної ЕМС покращеними на (8,5...8,7)% і (9,1...9,5)% оптимізованими показниками відповідно маси і вартості.

4.5.6. Встановлено, що співвідношення оптимізованих показників втрат активної потужності ТТ з базовою планарною ЕМС і аксіальною просторовою ЕМС з двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу, суттєво залежать від типу текстури та питомих втрат ЕТС, а також від співвідношення ЕМН.

4.5.7. Визначено, що при використанні ізотропної ЕТС, показник втрат аксіальної ЕМС з витим магнітопроводом, що відрізняється шестигранними перерізами стрижнів і двоконтурними фазними елементами, погіршується відносно еквівалентної базової планарної ЕМС на 1,6...5,4 %. При використанні анізотропної ЕТС цей показник покращується на (12,6...20) % відносно еквівалентної базової планарної ЕМС. Більш значне покращення досягається при зниженні щільності струму обмоток до 1,4 А/мм² та підвищенні індукції в анізотропної ЕТС до $B_c = 1,65...1,7$ Тл.

4.5.8. Невідповідність співвідношень втрат планарної базової ЕМС і просторової аксіальної ЕМС з витим магнітопроводом при використанні ізотропної та анізотропної ЕТС пов'язана зі зміною питомих втрат ЕТС та зміною додаткових втрат планарного шихтованого магнітопроводу в кутових зонах при відсутності та наявності текстури.

РОЗДІЛ 5

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ ПРОСТОРОВОЇ
РАДІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ДВОКОНТУРНИМИ
ФАЗНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ВИТИХ МАГНІТОПРОВОДІВ

5.1. Масовартісні показники системи з прямокутними перерізами стрижнів

При визначенні ЦФ [132, 133, 135] вигляду (2.1) варіантів запропонованої в [94] радіальної ЕМС (рис. 5.1, а) розрахункові геометричні параметри – зовнішній $D_{\text{нрп(ш)}}$ і внутрішній $D_{\text{врп(ш)}}$ діаметри, а також висота $h_{\text{орп(ш)}}$ і радіальний розмір (ширина) $b_{\text{орп(ш)}}$ обмоткового вікна позначені у відповідності до традиційних прямокутних (рис. 5.1, б) і нетрадиційних шестигранних (рис. 5.1, в) перерізів стрижнів витих магнітопроводів та прийнятих у підрозділі 2.3 індексів ПТР:

$$a_M = D_{\text{нрп(ш)}} / D_{\text{врп(ш)}}; \quad (5.1)$$

$$\lambda_0 = h_{\text{орп(ш)}} / b_{\text{орп(ш)}}. \quad (5.2)$$

Згідно з [92, 122] система фазних котушок обмоток ТТ замінюється еквівалентною розрахунковою обмоткою структурно еквівалентного реактора з середньою довжиною витка $l_{\text{врп(ш)}}$. Боки такого витка відстоять від площин поверхонь стрижнів на відстань $b_{\text{вп(ш)}}$ і розташовані в геометричному центрі площі сектора половини обмоткового вікна. Цей центр співпадає з центром еквівалентного за площею рівнобічного трикутника cde (рис. 5.1, а). Площа трикутника cde відповідає площі сектора половини обмоткового вікна.

Обґрунтування рівнянь ММ варіантів ЕМС (рис. 2.7, а, рис. 5.1, а) здійснюється при визначенні зв'язку радіального розміру $b_{\text{орп(ш)}}$, висоти стрижня $h_{\text{сп(ш)}}$ і площі $S_{\text{орп(ш)}}$ обмоткового вікна кожного з магнітопроводів (рис. 5.1, б, рис. 5.1, в) з розрахунковими параметрами $D_{\text{врп(ш)}}$ і a_M :

$$b_{\text{орп(ш)}} = (D_{\text{нрп(ш)}} - D_{\text{врп(ш)}})/2 = D_{\text{врп(ш)}}(a_{\text{м}} - 1)/2; \quad (5.3)$$

$$h_{\text{сп(ш)}} = 2b_{\text{орп(ш)}} \operatorname{tg} \frac{\pi}{6} = D_{\text{врп(ш)}}(a_{\text{м}} - 1)/\sqrt{3}; \quad (5.4)$$

$$S_{\text{орп(ш)}} = \pi h_{\text{сп(ш)}}^2 / 3 = \pi D_{\text{врп(ш)}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 / 9. \quad (5.5)$$

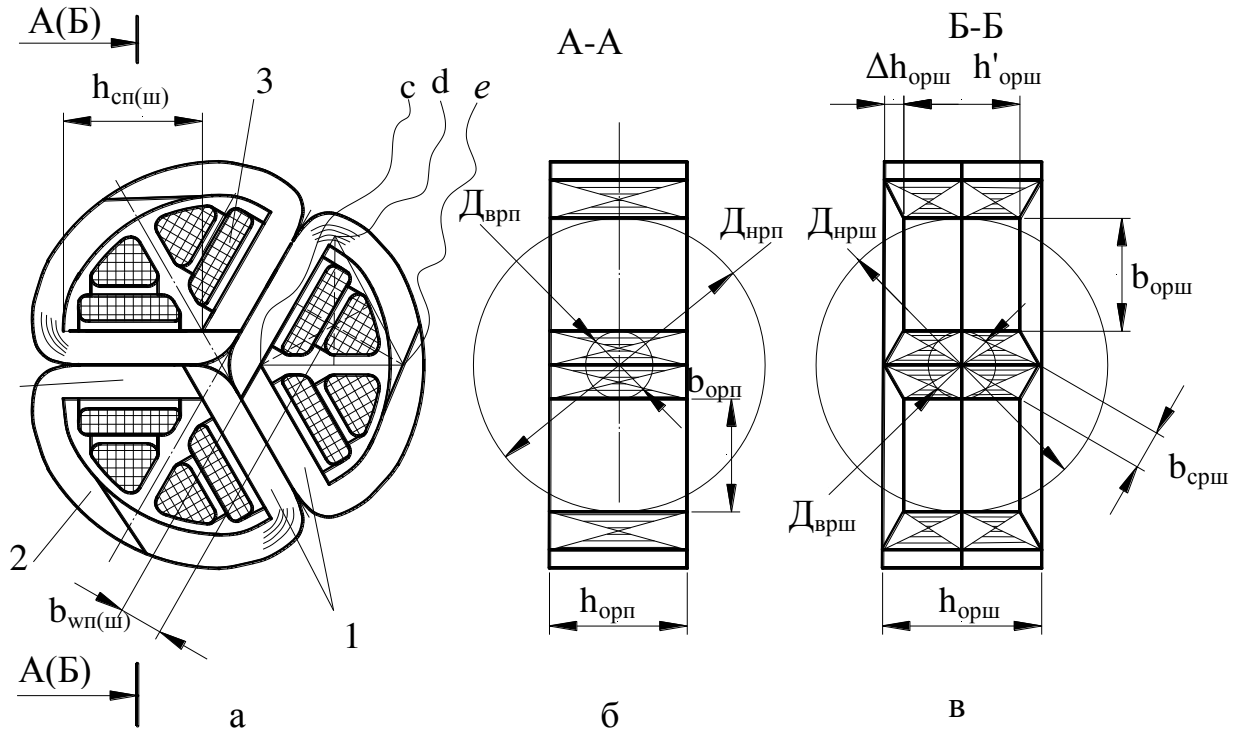


Рисунок 5.1 – Поперечна структура (а) просторової радіальної електромагнітної системи з прямокутними (б) і шестигранними (в) перерізами стрижнів:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Маса магнітопроводу (рис. 5.1, б) визначається, з урахуванням (5.1), (5.2) і (5.4)

$$\begin{aligned} m_{\text{мрп}} &= K_{\text{зс}} \gamma_{\text{с}} \left[3h_{\text{сп}} D_{\text{врп}} + \pi \left(h_{\text{сп}} + D_{\text{врп}}/4 \right) D_{\text{врп}} + 2\pi \left(D_{\text{врп}}/2 \right)^2 \right] h_{\text{орп}} = \\ &= K_{\text{зс}} \gamma_{\text{с}} \left\{ \left[3D_{\text{врп}}^2 (a_{\text{м}} - 1) + 2\pi \left[\frac{1}{\sqrt{3}} D_{\text{врп}} (a_{\text{м}} - 1) + \frac{1}{4} D_{\text{врп}} \right] \frac{D_{\text{врп}}}{2} \right] + 2\pi \left(\frac{D_{\text{врп}}}{2} \right)^2 \right\} \times \\ &\quad \times \lambda_{\text{о}} D_{\text{врп}} (a_{\text{м}} - 1)/2 = 1,773 \gamma_{\text{с}} K_{\text{зс}} \lambda_{\text{о}} D_{\text{врп}}^3 (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,3357). \quad (5.6) \end{aligned}$$

Площа прямокутного перерізу стрижня $S_{\text{срп}}$ магнітопроводу (рис. 5.1, б) пов'язана з $D_{\text{вп}}$, (5.2) і (5.3) виразом

$$S_{\text{срп}} = K_{\text{зс}} D_{\text{вп}} h_{\text{орп}} = K_{\text{зс}} D_{\text{вп}} \lambda_0 b_{\text{орп}} = K_{\text{зс}} \lambda_0 D_{\text{врп}}^2 (a_{\text{м}} - 1)/2. \quad (5.7)$$

Рівняння (2.9) для ЕМС (рис. 5.1, а) з варіантами магнітопроводу (рис. 5.1, б, рис. 5.1, в) перетворюється до вигляду

$$S_{\text{срп(ш)}} = \Pi_{\text{тт}} / (K_{\text{зо}} S_{\text{орп(ш)}}). \quad (5.8)$$

З рівності (5.7) і (5.8) та підстановки (5.5) отримується залежність $D_{\text{врп}}$ від $\Pi_{\text{тт}}$, $a_{\text{м}}$ і λ_0 :

$$\begin{aligned} K_{\text{зс}} \lambda_0 D_{\text{врп}}^2 (a_{\text{м}} - 1)/2 &= 9 \Pi_{\text{тт}} / [K_{\text{зо}} \pi D_{\text{врп}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2]; \\ D_{\text{врп}} &= \sqrt[4]{5,73 \Pi_{\text{тт}} / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_0 (a_{\text{м}} - 1)^3]}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Підстановка (5.9) перетворює (5.6) до вигляду

$$\begin{aligned} m_{\text{мрп}} &= 1,773 \gamma_{\text{с}} K_{\text{зс}} \lambda_0 \left(\sqrt[4]{5,73 \Pi_{\text{тт}} / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_0 (a_{\text{м}} - 1)^3]} \right)^3 (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,3357) = \\ &= \gamma_{\text{с}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{\text{1мрп}}^* \end{aligned} \quad (5.10)$$

де $\Pi_{\text{1мрп}}^*$ – показник маси магнітопроводу (рис. 5.1, б),

$$\Pi_{\text{1мрп}}^* = 1,773 K_{\text{зс}} \lambda_0 \left(\sqrt[4]{5,73 / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_0 (a_{\text{м}} - 1)^3]} \right)^3 (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} - 0,3357). \quad (5.11)$$

Площа $S_{\text{сде}}$ і бік $h'_{\text{п}}$ рівнобічного трикутника сде (рис. 5.1, а) визначаються, з

урахуванням (5.5):

$$S_{cde} = (h'_{сп(ш)})^2 \sin(\pi/6) = \sqrt{3} (h'_{сп(ш)})^2 / 4;$$

$$h'_{сп(ш)} = \sqrt{4 S_{cde} / \sqrt{3}} = \sqrt{2 S_{орп(ш)} / \sqrt{3}} = 0,635 D_{врп(ш)} (a_M - 1). \quad (5.12)$$

Відстань положення середнього витка еквівалентної обмотки ЕМС (рис. 5.1, а) від стрижня пропорційна $h'_{сп(ш)}$

$$b_{вп(ш)} = h'_{сп(ш)} (\operatorname{tg}(\pi/6)) / 2 = 0,1833 D_{врп(ш)} (a_M - 1). \quad (5.13)$$

Довжина середнього витка еквівалентної обмотки ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) визначається з використанням (5.2), (5.3) і (5.13)

$$l_{врп} = 2(D_{врп} + \pi b_w + h_{орп}) = 2[D_{врп} + 0,1833\pi D_{врп(ш)}(a_M - 1) + \lambda_o D_{врп} (a_M - 1) / 2] =$$

$$= D_{врп} [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515)]. \quad (5.14)$$

Маса обмотки ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) визначається на основі (2.10), (5.5) і (5.14)

$$m_{врп} = 1,5\gamma_o K_{зо} S_{орп} l_{врп} = 1,5\gamma_o K_{зо} \pi D_{врп}^2 (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515)] D_{врп} / 9 =$$

$$= 0,5236\gamma_o K_{зо} D_{врп}^3 (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515)]. \quad (5.15)$$

Підстановка (5.9) перетворює (5.15) до вигляду

$$m_{врп} = 0,5236\gamma_o K_{зо} \left(\sqrt[4]{5,73\Pi_{тт} / [K_{зс} K_{зо} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times$$

$$\times [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515)] = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1врп}^*, \quad (5.16)$$

де $\Pi_{1\text{wpp}}^*$ – показник маси ПМ ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б)

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{wpp}}^* &= 0,5236 K_{30} \left(\sqrt[4]{5,73 / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515)]. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Маса $m_{\text{рп}}$ і вартість $C_{\text{рп}}$ активних матеріалів просторової радіальної ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) визначаються складовими рівнянь (5.10), (5.11) і (5.16), (5.17):

$$\begin{aligned} m_{\text{рп}} &= m_{\text{мрп}} + m_{\text{wрп}} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{мрп}}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{wрп}}^* = \\ &= \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{рп}}^*; \\ C_{\text{рп}} &= C_{\text{мрп}} + C_{\text{wрп}} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{мрп}}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{wрп}}^* = \\ &= \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{2\text{рп}}^*, \end{aligned}$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) визначаються функціональними залежностями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{рп}}^* &= 6,5656 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) \{ K_{3c} \lambda_o (a_M - 0,3357) + \\ &+ 0,29534 K_{30} (a_M - 1) [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1514)] \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2\text{рп}}^* &= 6,5656 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) \{ K_{3c} \lambda_o (a_M - 0,3357) + \\ &+ 0,29534 K_{30} (a_M - 1) [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1514)] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1\text{рп}}^*$ показника (5.18), що отримані для трьох значень K_{30} , наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Екстремуми показників маси просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та прямокутними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1рпе}^*$ (рис. 5.1, а, б)	25,8	27,3	29,5

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{2рпе}^*$ показника (5.19), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень співвідношення C_o/C_c , наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Екстремуми показників вартості просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та прямокутними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2рпе}^*$ (рис. 5.1, а, б)	0,3	46,1	49,3	52,4	55,3	58,2
	0,25	49,3	51,6	54,7	57,7	60,5
	0,2	51,2	54,6	57,8	61,0	63,9

5.2. Показник втрат активної потужності системи з прямокутними перерізами стрижнів

Загальні ВНР $P_{нрп1(2)}$ і $P_{нрш1(2)}$ варіантів ЕМС (рис. 5.1, а), що відрізняються формою перерізів стрижнів (рис. 5.1, б, в) та використанням ізотропної (анізотропної) ЕТС визначаються аналогічно (4.24) рівнянням [135]

$$P_{\text{нрп(ш)1(2)}} = K_{\text{днз}} K_{\text{цз}}^{('')} m_{\text{мрп(ш)}} / \gamma_{\text{с}}. \quad (5.20)$$

При підстановці (5.10), (5.20) приймає вигляд такий, що відповідає прямокутним УК та магнітопроводом (рис. 5.1, б)

$$P_{\text{нрп1(2)}} = K_{\text{днз}} K_{\text{цз}}^{('')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{\text{1мрп}}^*. \quad (5.21)$$

Рівняння (2.13) при підстановці (5.5) і (5.14) визначає ВКЗ ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б)

$$\begin{aligned} P_{\text{крп}} &= 1,5 K_{\text{дк}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} S_{\text{орп}} l_{\text{врп}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 \pi D_{\text{врп}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 D_{\text{врп}} \times \\ &\times [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + 1,1515)] / 9 = 0,5236 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 D_{\text{врп}}^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 \times \\ &\times [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + 1,1515)]. \end{aligned} \quad (5.22)$$

При підстановці (5.9) та з урахуванням вигляду (5.17), (5.22) приймає вигляд

$$\begin{aligned} P_{\text{крп}} &= 0,5236 K_{\text{дк}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{5,73 \Pi_{\text{тт}} / \left[K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{o}} (a_{\text{м}} - 1)^3 \right]} \right)^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 \times \\ &\times [2 + (a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{o}} + 1,1515)] = K_{\text{дк}} K_{\text{оп}} J_{\text{o}}^2 \gamma_{\text{o}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right) \Pi_{\text{1врп}}^*. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Рівняння (2.11) для ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) на основі (5.21) і (5.23) перетворюється

$$\begin{aligned} P_{\Sigma \text{рп1(2)}} &= P_{\text{нрп}} + P_{\text{крп}} = K_{\text{цз}}^{('')} K_{\text{днз}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{\text{1мрп}}^* + K_{\text{дк}} \gamma_{\text{o}} K_{\text{по}} J_{\text{o}}^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{\text{1врп}}^* = \\ &= K_{\text{цз}}^{('')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K_{\text{днз}} \left(\Pi_{\text{1мрп}}^* + K_{\text{увл(2)}} \Pi_{\text{1врп}}^* \right), \end{aligned} \quad (5.24)$$

При підстановці (5.11) і (5.17) сумарні втрати (5.24) визначаються рівнянням

$$P_{\Sigma_{\text{рп1}(2)}} = K_{\text{днз}} K_{\text{цз}}'(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}})^3 \left\{ 1,773 K_{\text{зс}} \lambda_o \left(\sqrt[4]{5,73 / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) \times \right. \\ \left. \times (a_M - 0,3357) + 0,5236 K_{\text{убл}(2)} K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{5,73 / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 \times \right. \\ \left. \times (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1514)] \right\} = K_{\text{цз}}'(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}})^3 \Pi_{\Sigma_{\text{рп1}(2)}}^*$$

де $\Pi_{\Sigma_{\text{рп1}(2)}}^*$ – показник втрат активної потужності варіанту ЕМС (рис. 5.1, а) з різновидом магнітопроводу (рис. 5.1, б) при використанні ізотропної (анізотропної) ЕТС,

$$\Pi_{\Sigma_{\text{рп1}(2)}}^* = 6,5656 K_{\text{днз}} \left(\sqrt[4]{1 / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) \{ K_{\text{зс}} \lambda_o (a_M - 0,3357) + \\ + 0,29534 K_{\text{убл}(2)} K_{\text{зо}} (a_M - 1) [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1514)] \}. \quad (5.25)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{\Sigma_{\text{рп1}(2)e}}^*$ показника (5.25) ЕМС (рис. 5.1, а, б) при прийнятих значеннях $K_{\text{зс}}$, $K_{\text{зо}}$, $K_{\text{днз}}$ і співвідношеннях (4.31), (4.32) наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та прямокутними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi_{\Sigma_{\text{рп1e}}}^*$ (рис. 5.1, а, б)			$\Pi_{\Sigma_{\text{рп2e}}}^*$ (рис. 5.1, а, б)		
	1,3	4	11	3	9	27
0,3	36,2	61,2	104,9	53,1	93,8	177,8
0,25	38,4	64,1	108,6	55,8	97,4	182,5
0,2	41,4	68,0	113,7	59,5	102,2	188,9

5.3. Масовартісні показники системи з шестигранними перерізами стрижнів

Маса магнітопроводу (рис. 5.1, в) визначається при використанні допоміжних геометричних параметрів та довжини розгортки стрічки (рулону) ЕТС секції.

Складова $\Delta h_{орш}$ перерізу стрижня (рис. 5.1, в)

$$\Delta h_{орш} = D_{врш} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi}{6} \right) / 2 = D_{врш} / (2\sqrt{3}). \quad (5.26)$$

Внутрішня висота $h'_{орш}$ і площа перерізу стрижня $S_{срш}$ витого магнітопроводу (рис. 5.1, в) визначаються на основі (5.2), (5.3) і (5.26)

$$\begin{aligned} h'_{орш} &= h_{орш} - 2\Delta h_{орш} = \lambda_o b_{орш} - 2\Delta h_{орш} = \\ &= 0,5\lambda_o D_{врш} (a_M - 1) - D_{врш} / \sqrt{3} = D_{врш} [\lambda_o (a_M - 1) - 2\sqrt{3}] / 2. \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\begin{aligned} S_{срш} &= K_{зс} (h_{орш} - \Delta h_{орш}) D_{врш} = K_{зс} (\lambda_o b_{орш} - \Delta h_{орш}) D_{врш} = \\ &= K_{зс} [0,5\lambda_o D_{врш} (a_M - 1) - D_{врш} / (2\sqrt{3})] = K_{зс} D_{врш} [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774] / 2. \end{aligned} \quad (5.28)$$

Довжина середнього витка стрічки (рулону) ЕТС секції магнітопроводу (рис. 5.1, в) визначається з використанням (5.4)

$$\begin{aligned} l_{срш} &= 2h_{сш} + [2\pi (h_{сш} + D_{врш}/4)/3] + (\pi D_{врш}/4) + \pi D_{врш}/12 = [2 D_{врш} (a_M - 1) / \sqrt{3}] + \\ &+ \{2\pi [D_{врш} (a_M - 1) / \sqrt{3} + D_{врш}/4] / 3\} + (\pi D_{врш}/4) + D_{врш}/12 = \\ &= 2,364 D_{врш} (a_M - 0,3355). \end{aligned} \quad (5.29)$$

Число витків в секції магнітопроводу (рис. 5.1, в)

$$n_{врш} = D_{врш} / (2\delta_c). \quad (5.30)$$

Маса магнітопроводу (рис. 5.1, в) визначається на основі (5.1) – (5.3), (5.27),

(5.29), (5.30)

$$\begin{aligned}
m_{\text{мрш}} &= 3\gamma_c K_{3c} n_{\text{врш}} \delta_c l_{\text{срш}} (h_{\text{орш}} - h'_{\text{орш}}) / 2 = 3\gamma_c K_{3c} n_{\text{врш}} \delta_c 2,364 D_{\text{врш}} (a_M - 0,3355) \times \\
&\times \left\{ \lambda_o [D_{\text{врш}} (a_M - 1) / 2] - D_{\text{врш}} [\lambda_o (a_M - 1) - 2\sqrt{3}] / 2 \right\} / 2 = \\
&= 1,773 \gamma_c K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774] D_{\text{врш}}^3. \tag{5.31}
\end{aligned}$$

З рівності (5.8) і (5.28) та підстановки (5.5) відповідно до рівняння (2.9) знаходиться залежність $D_{\text{врш}}$ від $\Pi_{\text{тг}}$, a_M і λ_o :

$$\begin{aligned}
\Pi_{\text{тг}} / (K_{3o} S_{\text{орш}}) &= \Pi_{\text{тг}} / [K_{3o} \pi D_{\text{врш}}^2 (a_M - 1)^2 / 9] = K_{3c} D_{\text{врш}} [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774] / 2; \\
D_{\text{врш}} &= \sqrt[4]{5,73 \Pi_{\text{тг}} / \{K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774]\}}. \tag{5.32}
\end{aligned}$$

Підстановкою (5.32), (5.31) перетворюється

$$\begin{aligned}
m_{\text{мрш}} &= 1,773 \gamma_c K_{3c} \left(\sqrt[4]{5,73 \Pi_{\text{тг}} / \{K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774]\}} \right)^3 \times \\
&\times (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774] = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{1\text{мрш}}^*, \tag{5.33}
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{мрш}}^*$ – показник маси магнітопроводу (рис. 5.1, в),

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{мрш}}^* &= 1,773 K_{3c} \left(\sqrt[4]{5,73 / \{K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774]\}} \right)^3 \times \\
&\times (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774]. \tag{5.34}
\end{aligned}$$

Бік шестигранника $b_{\text{срш}}$ виражається співвідношенням

$$b_{\text{срш}} = D_{\text{врш}} / [2 \sin(\pi/3)] = D_{\text{в}} / \sqrt{3}. \tag{5.35}$$

Довжина середнього витка еквівалентної обмотки ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в) визначається з використанням (5.13), (5.27) і (5.35)

$$l_{\text{врш}} = 2\pi b_{\text{врш}} + 2h'_{\text{орш}} + 4b_{\text{срш}} = 2\pi \cdot 0,1833 D_{\text{врш}} (a_{\text{м}} - 1) + \left\{ D_{\text{врш}} [\lambda_{\text{о}} (a_{\text{м}} - 1) - 2\sqrt{3}] / 2 \right\} + 4D_{\text{в}} / \sqrt{3} = D_{\text{в}} [(a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,1515) + 1,1547]. \quad (5.36)$$

Маса обмотки ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в) визначається за допомогою рівняння (2.10) та виразів (5.5) і (5.36)

$$m_{\text{врш}} = 1,5\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} S_{\text{орш}} l_{\text{врш}} = 1,5\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} \pi D_{\text{врш}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 D_{\text{в}} [(a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,1515) + 1,1547] / 9 = 0,5236\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}}^3 D_{\text{врш}}^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 [(a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,1515) + 1,1547]. \quad (5.37)$$

При підстановці (5.33), (5.37) перетворюється

$$m_{\text{врш}} = 0,5236\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{5,73 / \left\{ K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} (a_{\text{м}} - 1)^2 [\lambda_{\text{о}} (a_{\text{м}} - 1) - 0,5774] \right\}} \right)^3 \times (a_{\text{м}} - 1)^2 [(a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,1515) + 1,1547] = \gamma_{\text{о}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{\text{1врш}}^*, \quad (5.38)$$

де $\Pi_{\text{1врш}}^*$ – показник маси ПМ ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в)

$$\Pi_{\text{1врш}}^* = 0,5236 K_{\text{зо}} \left(\sqrt[4]{5,73 / \left\{ K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} (a_{\text{м}} - 1)^2 [\lambda_{\text{о}} (a_{\text{м}} - 1) - 0,5774] \right\}} \right)^3 \times (a_{\text{м}} - 1)^2 [(a_{\text{м}} - 1)(\lambda_{\text{о}} + 1,1515) + 1,1547]. \quad (5.39)$$

Маса $m_{\text{рш}}$ і вартість $C_{\text{рш}}$ активних матеріалів ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б) визначаються на основі (5.33), (5.34) і (5.38), (5.39) ЦФ вигляду (2.7)

$$m_{\text{рш}} = m_{\text{мрш}} + m_{\text{врш}} = \gamma_{\text{с}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{\text{1мрш}}^* + \gamma_{\text{о}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{\text{1врш}}^* = \gamma_{\text{с}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi_{\text{1рш}}^* ;$$

$$C_{pш} = C_{mpш} + C_{wpш} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1mpш}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1wpш}^* =$$

$$= \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{2pш}^*,$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в) визначаються функціями:

$$\Pi_{1pш}^* = 6,5656 \left(\sqrt[4]{1 / \left\{ K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] \right\}} \right)^3 \times$$

$$\times \left\{ K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{3o} (a_M - 1)^2 \times \right.$$

$$\left. \times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] \gamma_o / \gamma_c \right\}; \quad (5.40)$$

$$\Pi_{2pш}^* = 6,5656 \left(\sqrt[4]{1 / \left\{ K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] \right\}} \right)^3 \times$$

$$\times \left\{ K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{3o} (a_M - 1)^2 \times \right.$$

$$\left. \times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \right\}. \quad (5.41)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1pш}^*$ показника(5.40), що отримані для трьох значень K_{3o} наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Екстремуми показників маси варіантів просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та шестигранними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1pш}^*$ (рис. 5.1, а, в)	25,5	27,1	29,2

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{2рше}^*$ показника (5.41) ЕМС (рис. 5.1, а, в), що отримані для трьох та п'яти значень відповідно K_{30} і C_0/C_c наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Екстремуми показників вартості просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та шестигранними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2рше}^*$ (рис. 5.1, а, в)	0,3	45,3	48,5	51,5	54,3	57,1
	0,25	47,5	50,7	53,8	56,7	59,5
	0,2	50,4	53,8	56,9	59,9	62,9

Результати розрахунків (табл. 5.1, табл. 5.2, табл. 5.4, табл. 5.5) визначають наступні співвідношення масовартісних показників варіантів ЕМС (рис. 5.1, а), що відрізняються перерізами секцій, відповідно до прийнятих діапазонів змін $K_{30} = 0,3 \dots 0,2$ с $C_0/C_c = 3,5 \dots 5,5$ складають:

$$\Pi_{1рше}^*/\Pi_{1рше}^* = (25,78/25,5) \dots (29,5/29,2) = 1,012 \dots 1,01;$$

$$\left(\Pi_{2рше}^*/\Pi_{2рше}^*\right)' = (46,1/45,3) \dots (51,2/50,4) = 1,017 \dots 1,016;$$

$$\left(\Pi_{2рше}^*/\Pi_{2рше}^*\right)'' = (58,2/57,1) \dots (63,9/62,9) = 1,02 \dots 1,017.$$

5.4. Показник втрат активної потужності системи з шестигранними перерізами стрижнів

Рівняння ВНР (5.20) підстановкою (5.34) перетворюється до вигляду, що відповідає шестигранним УК та магнітопроводу (рис. 5.1, в)

$$P_{\text{нрш1(2)}} = K_{\text{днЗ}} K_{\text{цЗ}}^{(')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right) \Pi_{\text{1мрш}}^* \quad (5.42)$$

Рівняння (2.13) при підстановці (5.5) і (5.36) визначає ВКЗ ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, б)

$$\begin{aligned} P_{\text{крш}} &= 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 S_{\text{орш}} l_{\text{врш}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \pi D_{\text{врш}}^2 (a_m - 1)^2 \times \\ &\times D_{\text{врш}} \left[(a_m - 1)(\lambda_0 + 1,1515) + 1,1547 \right] / 9 = 0,5236 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 D_{\text{врш}}^3 (a_m - 1)^2 \times \\ &\times \left[(a_m - 1)(\lambda_0 + 1,1515) + 1,1547 \right]. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Підстановкою (5.33) з урахуванням вигляду (5.39), (5.43) приймає вигляд

$$\begin{aligned} P_{\text{крш}} &= 0,5236 K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{5,73 / \left\{ K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} (a_m - 1)^2 [\lambda_0 (a_m - 1) - 0,5774] \right\}} \right)^3 \times \\ &\times (a_m - 1)^2 \left[(a_m - 1)(\lambda_0 + 1,1515) + 1,1547 \right] = K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{по}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1врш}}^*. \end{aligned} \quad (5.44)$$

Рівняння (2.11) для ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в) на основі (5.42) і (5.44) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{рш1(2)}} &= P_{\text{нрш1(2)}} + P_{\text{крш}} = K_{\text{днЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right)^3 K_{\text{цЗ}} \Pi_{\text{1мрш}}^* + K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{по}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{1врш}}^* = \\ &= K_{\text{цЗ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right)^3 K_{\text{днЗ}} \left(\Pi_{\text{1мрш}}^* + K_{\text{увл(2)}} \Pi_{\text{1врш}}^* \right), \end{aligned} \quad (5.45)$$

З використанням (5.35) і (5.39), (5.45) перетворюється до кінцевого вигляду

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{рш1(2)}} &= K_{\text{цЗ}}^{(')} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тТ}}} \right)^3 K_{\text{днЗ}} \left\{ 1,773 K_{\text{зс}} \left(\sqrt[4]{5,73 / \left\{ K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} (a_m - 1)^2 [\lambda_0 (a_m - 1) - 0,5774] \right\}} \right)^3 \times \right. \\ &\times (a_m - 0,3355) [\lambda_0 (a_m - 1) - 0,5774] + 0,5236 K_{\text{увл(2)}} K_{\text{зо}} \times \end{aligned}$$

$$\times \left(\sqrt[4]{5,73 / \left\{ K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,5774] \right\}} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times \\ \times \left[(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547 \right] = K_{цз}^{(c)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тг}} \right)^3 \Pi_{3рш1(2)}^*,$$

де $\Pi_{3рш}^*$ – показник втрат ЕМС (рис. 5.1, а) з варіантом магнітопроводу (рис. 5.1, в), що відрізняється використанням ізотропної (анізотропної) ЕТС

$$\Pi_{3рш1(2)}^* = 6,5656 K_{днз} \left(\sqrt[4]{1 / \left\{ K_{3c} K_{3o} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] \right\}} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{yв1(2)} K_{3o} (a_M - 1)^2 \times \right. \\ \left. \times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] \right\}; \quad (5.46)$$

Розрахункові екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{3рш1(2)e}^*$ показника (5.46) ЕМС (рис. 5.1, а) з магнітопроводом (рис. 5.1, в) при прийнятих значеннях K_{3c} , K_{3o} , $K_{днз}$ і співвідношеннях (4.31), (4.32) наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами та шестигранними перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.					
	$\Pi_{3рш1e}^*$ (рис. 5.1, а, в)			$\Pi_{3рш2e}^*$ (рис. 5.1, а, в)		
	1,3	4	11	3	9	27
0,3	35,8	60,2	102,7	52,3	91,9	173,5
0,25	38,0	63,1	106,4	55,0	95,5	178,2
0,2	41,0	67,0	111,5	58,7	100,3	184,5

Результати розрахунків (табл. 5.3, табл. 5.6) визначають наступні співвідношення показників втрат активної потужності варіантів ЕМС (рис. 5.1, а) відповідно до прийнятих змін $K_{30} = 0,3 \dots 0,2$ і значень $K_{ув1(2)}$, що відповідають використанню ізотропної (анізотропної) ЕТС

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{3рп1е}^* / \Pi_{3рш1е}^* \right)' &= (36,2 / 35,8 \dots 41,4 / 41) = 1,012 \dots 1,01; \\ \left(\Pi_{3рп1е}^* / \Pi_{3рш1е}^* \right)'' &= (104,9 / 102,7 \dots 113,7 / 111,5) = 1,021 \dots 1,02; \\ \left(\Pi_{3рп2е}^* / \Pi_{3рш2е}^* \right)' &= (53,1 / 52,3 \dots 59,5 / 58,7) = 1,016 \dots 1,014; \\ \left(\Pi_{3рп2е}^* / \Pi_{3рш2е}^* \right)'' &= (177,8 / 173,5 \dots 188,9 / 184,5) = 1,03 \dots 1,02. \end{aligned}$$

Дані розрахунків (табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 3.3, табл. 5.4, табл. 5.5 і табл. 5.6) показують наступні співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності просторової радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами та шестигранними перерізами стрижнів витого магнітопроводу і базової планарної ЕМС:

$$\begin{aligned} \Pi_{1пшe}^* / \Pi_{1ршe}^* &= (27,8 / 25,5 \dots 31,4 / 29,2) = 1,09 \dots 1,08; \\ \left(\Pi_{2пшe}^* / \Pi_{2ршe}^* \right)' &= (51,7 / 45,3 \dots 56,7 / 40,4) = 1,14 \dots 1,12; \\ \left(\Pi_{2пшe}^* / \Pi_{2ршe}^* \right)'' &= (66,2 / 57,1 \dots 71,8 / 62,9) = 1,16 \dots 1,14; \\ \left(\Pi_{3рпш1е}^* / \Pi_{3рш1е}^* \right)' &= (34,5 / 35,8 \dots 38,7 / 41) = 0,96 \dots 0,94; \\ \left(\Pi_{3рпш1е}^* / \Pi_{3рш1е}^* \right)'' &= (108,7 / 102,7 \dots 115,8 / 111,5) = 1,06 \dots 1,04; \\ \left(\Pi_{3рпш2е}^* / \Pi_{3рш2е}^* \right)' &= (64,9 / 52,3 \dots 71,7 / 58,7) = 1,24 \dots 1,22; \\ \left(\Pi_{3рпш2е}^* / \Pi_{3рш2е}^* \right)'' &= (215,1 / 173,5 \dots 226,6 / 184,5) = 1,24 \dots 1,23. \end{aligned}$$

5.5. Висновки до розділу 5

5.5.1. Встановлено, що перетворення прямокутних перерізів стрижнів на шестигранні, призводить до деякого покращення масовартісних і енергетичних показників просторової радіальної ЕМС ТТ з двоконтурними фазними елементами та секторними конфігураціями обмоткових вікон витого магнітопроводу.

5.5.2. Визначено, що у залежності від K_{30} і співвідношення вартостей ПМ і ЕТС, оптимізовані показники маси, вартості та втрат активної потужності радіальної ЕМС з витим магнітопроводом при заміні прямокутних УК стрижнів і обмоткових котушок на шестигранні покращуються, відповідно на (1,01 ... 1,17) % і (1,6 ... 1,9) % та, у залежності від особливостей ЕТС і співвідношень ЕМН, на (1,04 ... 2,5) %.

5.5.3. Визначено, що в заданих діапазонах змін класу напруги і співвідношення вартостей ПМ і ЕТС, радіальна ЕМС з шестигранними УК стрижнів і обмоткових котушок трисекційного витого магнітопроводу, відрізняється відносно базової планарної ЕМС покращеними оптимізованими показниками маси і вартості відповідно на (7,5... 9) % і (12,3 ... 15,9) %.

5.5.4. У залежності від особливостей ЕТС і співвідношень ЕМН при застосуванні радіальної ЕМС з шестигранними перерізами стрижневих частин трисекційного витого магнітопроводу можливо погіршення відносно базової планарної ЕМС показників втрат активної потужності до 5,92 % або їх покращення до 5,84 % при використанні ізотропної ЕТС. При використанні анізотропної ЕТС досягається покращення до (22,8...23,9) % вказаних показників.

5.5.5. Підвищення або зниження втрат просторової радіальної ЕМС з витим магнітопроводом відносно базової планарної ЕМС залежить від співвідношень ВНР і ВКЗ, які обумовлені обранням співвідношень ЕМН при проектуванні.

5.5.6. Невідповідність співвідношень втрат базової планарної ЕМС і просторової радіальної ЕМС з витим магнітопроводом при використанні ізотропної та анізотропної ЕТС пов'язана, аналогічно аксіальному аналогу, зі зміною питомих втрат ЕТС та зміною додаткових втрат планарного шихтованого магнітопроводу в кутових зонах при відсутності та наявності текстури.

РОЗДІЛ 6

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ ПРОСТОРОВОЇ
АКСИАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З СУМІЩЕНИМИ
ФАЗНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ, ЗВЕДЕНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ТА МОЖЛИВІСТЬ
ОТРИМАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ

6.1. Показники маси, вартості і втрат активної потужності базової системи з витим стиковим магнітопроводом

Варіанти (рис. 1.17, а, б) ЕМС структури (рис. 1.8, в) і загальної конструктивної схеми (рис. 6.1, а) з витими ярами та двома технологічними стиками магнітопроводів відрізняються, як вказано у підрозділах 1.2 і 2.1, підвищеною компактністю. Також структури шарів стрижневих частин таких магнітопроводів відрізняються відносно традиційного аналогу (рис. 1.12, а) значно спрощеними технологіями виготовлення відповідно навивкою коаксіальних та складанням ідентичних плоских шарів стрижневих частин. Крім того, забезпечуються максимальні коефіцієнти заповнення ЕТС секторного і шестигранного УК стрижнів (відповідно $K_{\text{КС}} = 1$ і $K_{\text{КШ}} \approx 1$) [48]. Однак, як вже згадувалось в підрозділі 2.1, у магнітопроводах ЕМС (рис. 6.1, б, рис. 6.2) є доцільним застосування ізотропної або аморфної ЕТС.

Вказані ЕМС характеризуються розрахунковими діаметрами $D_{\text{нас(ш)}}$, $D_{\text{вас(ш)}}$ та геометричними параметрами (рис. 6.1, рис. 6.2) і КЗ:

$$a_{\text{М}} = D_{\text{нас(ш)}}/D_{\text{вас(ш)}}; \quad (6.1)$$

$$\lambda_{\text{О}} = h_{\text{оад(ш)}}/b_{\text{оад(ш)}}. \quad (6.2)$$

В ММ базової ЕМС (рис. 1.17, а, рис. 6.1, б), що розроблена та наведена в [89, 97, 98, 113], величина K_{30} входить у показник вихідних даних ЦФ (2.1) і у відносних показниках відсутня. Крім того, ПТР визначені тільки при $K_{30} = 0,3$ та такими, що не зовсім відповідають загальним припущенням розділу 2. Тому ММ ЕМС (рис. 6.1, б)

перероблена в [76, 77] у відповідності з (2.3), (2.4) та вказаними вище положенням та припущеннями.

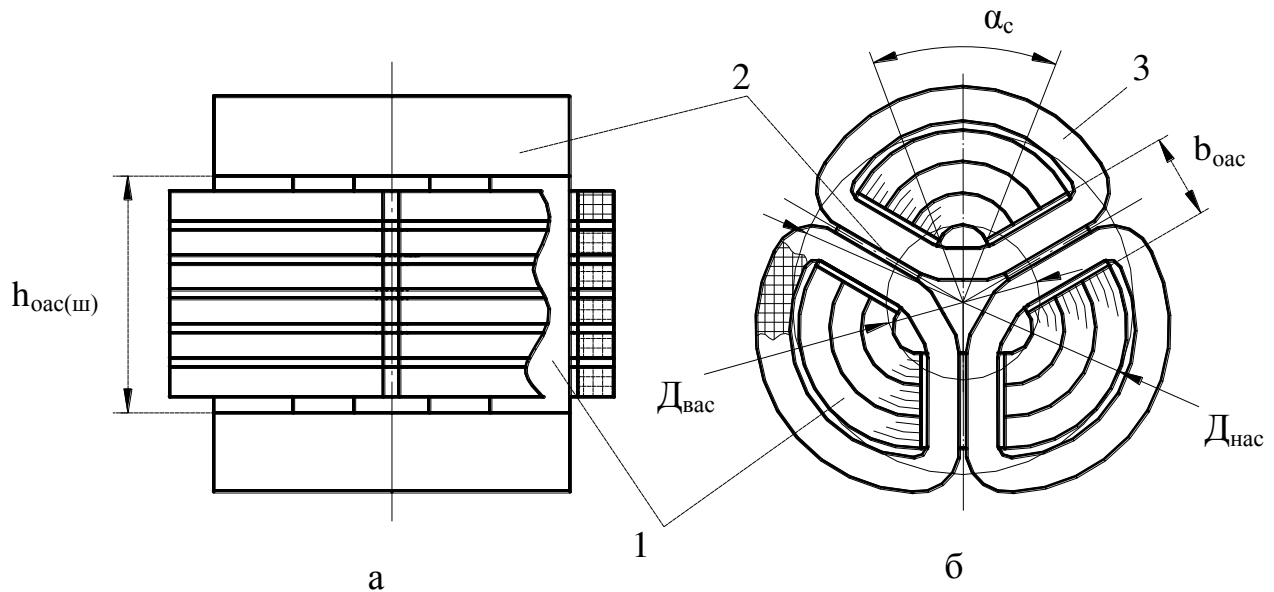


Рисунок 6.1 – Схематичний загальний вигляд (а) і варіант поперечної структури (б) аксіальної електромагнітної системи з витими елементами стикового магнітопроводу: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Маса m_{ac} і вартість C_{ac} активних матеріалів ЕМС (рис. 6.1, б) визначаються рівняннями [76] :

$$m_{ac} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1ac}^* ;$$

$$C_{ac} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{2ac}^* ,$$

де показникам маси і вартості ЕМС (рис. 6.1, б) відповідають функціям:

$$\begin{aligned} \Pi_{1ac}^* = & \pi \left(\sqrt[4]{3 / \left\{ \pi K_{3c} K_{30} \lambda_o \left[0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1) \right] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right\}} \right)^3 \left\{ K_{3c} (a_M - 1) \times \right. \\ & \times \left[0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1) \right] \left\{ K_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,1547) + 2,4184 \left[0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1) \right] \right\} + \\ & \left. + 0,4775 K_{30} \lambda_o \left[2,0472(a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2} \right] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o / \gamma_c \right\}; \quad (6.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2ac}^* = & \pi \left(\sqrt[4]{3} / \left\{ \pi K_{3c} K_{30} \lambda_o [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right\} \right)^3 \{ K_{3c} (a_M - 1) \times \\ & \times [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] \{ K_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,1547) + 2,4184 [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] \} + \\ & + 0,4775 K_{30} \lambda_o [2,0472(a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}; \quad (6.4) \end{aligned}$$

де $K_{\alpha 1}$ і $K_{\alpha 2}$ – коефіцієнти кута α_c (рис. 6.1, б) [89]:

$$\begin{aligned} K_{\alpha 1} &= \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right]; \\ K_{\alpha 2} &= \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right]. \end{aligned}$$

В ЕМС (рис. 6.1, б) кут α_c не є КЗ, а визначається мінімальним у відповідності з магнітним і технологічним обмеженнями відповідно насичення стрижнів в зоні $D_{вас}$ та навивання стрічки ЕТС на оправку з трикутним УК, $\alpha_c \geq 5 \dots 15^\circ$ (більше значення відноситься до ТТ малої потужності).

Результати розрахунку екстремальних значень (мінімумів) Π_{1ace}^* , Π_{2ace}^* показників (6.3), (6.4), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень C_o/C_c наведено в табл. 6.1 і табл. 6.2.

Таблиця 6.1– Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з секторними утворюючими контурами і суміщеними фазними елементами витого стикового магнітопроводу

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
Π_{1ace}^* (рис. 6.1, б)	26,45	28,0	30,0

Таблиця 6.2 – Екстремуми показників вартості просторової аксіальної електромагнітної системи з секторними утворюючими контурами і суміщеними фазними елементами витого стикового магнітопроводу

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2асе}^*$	0,3	48,7	52,2	55,7	58,9	62,1
(рис. 6.1, б)	0,25	50,7	54,4	57,9	61,2	64,4
	0,2	53,6	57,3	60,9	64,3	67,6

Для ЕМС структури (рис. 1.8, в), якій відповідають конструкції (рис. 1.12, а, рис. 1.17, а, б), при прийнятих умовах рівності середніх значень амплітуд індукцій стрижнів і ярем та використання ізотропної ЕТС, а також додаткової умови з'єднання обмоток за схемою Δ/Y , що виключає додаткові втрати в ярах від третьої гармоніки магнітного потоку [26], ВНР визначаються рівнянням [89, 98]

$$P_{нас(ш)} = K_{дна1} K'_{зс} K_{цз} (V_{сac(ш)} + V_{яac(ш)} + 0,757V_{кас(ш)}), \quad (6.5)$$

де $V_{са(ш)}$, $V_{яс(ш)}$ і $V_{кc(ш)}$ – відповідно об'єми стрижнів, прямих і кутових ділянок ярем варіантів магнітопроводу ЕМС (рис. 6.1, б, рис. 6.2).

Втрати активної потужності ЕМС (рис. 6.1, б) визначаються рівнянням [77]

$$P_{\Sigma ac1} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 K'_{цз} \Pi_{3ac1}^*,$$

де показник втрат Π_{3ac1}^* визначається функцією, що визначена в [77]

$$\Pi_{3ac1}^* = \pi K_{дна1} \left(\sqrt[4]{\frac{3}{\pi K_{зс} K_{зо} \lambda_o [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1)}} \right)^3 \{ \pi K_{зс} (a_M - 1) \times$$

$$\begin{aligned} & \times [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] [K_{\alpha 2}(\lambda_o + 1,1547) + 1,83(0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1))] + \\ & + 1,5K_{ya1}K_{zo}K_{\alpha 2}^2\lambda_o [2,0472(a_M - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}], \end{aligned} \quad (6.6)$$

де K_{ya1} – співвідношення (2.12) при використанні ізотропної ЕТС і $K_{днii} = K_{дна1} = K_{днп1}$, що приймає значення, аналогічне (3.30)

$$1,7 \leq K_{ya1} \leq 5(14). \quad (6.7)$$

Результати розрахунків (табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 6.1, табл. 6.2) визначають наступні співвідношення масовартісних показників базових ЕМС відповідно до прийнятих діапазонів змін $K_{zo} = 0,3 \dots 0,2$ і $C_o/C_c = 3,5 \dots 5,5$:

$$\begin{aligned} \Pi_{1ппе}^* / \Pi_{1ace}^* &= (27,8 / 26,5) \dots (31,4 / 30,1) = 1,05 \dots 1,046; \\ \left(\Pi_{2ппе}^* / \Pi_{2ace}^* \right)' &= (51,7 / 48,7) \dots (56,7 / 53,6) = 1,06 \dots 1,058; \\ \left(\Pi_{2ппе}^* / \Pi_{2ace}^* \right)'' &= (66,2 / 62,1) \dots (71,8 / 67,6) = 1,06 \dots 1,062. \end{aligned}$$

Результати розрахунків екстремальних значень (мінімумів) Π_{3ac1e}^* показників енергетичної ефективності (6.5) ЕМС (рис. 6.1, б) при прийнятих значеннях K_{zc} , K_{zo} , α_c і величинах $K_{дна1} = 1,04$ і K_{ya1} (6.6) наведено в табл. 6.3.

Результати розрахунків (табл. 3.3, табл. 6,3) визначають співвідношення показників втрат активної потужності планарної і просторової аксіальної ЕМС з прямокутними та секторними УК відповідно до прийнятих змін $K_{zo} = 0,3 \dots 0,2$ і значень K_{ya1} , що відповідають використанню ізотропної ЕТС:

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{3ппе}^* / \Pi_{3ac1e}^* \right)' &= (34,5 / 31,7) \dots (38,7 / 35,8) = 1,09 \dots 1,08; \\ \left(\Pi_{3ппе}^* / \Pi_{3ac1e}^* \right)'' &= (108,7 / 96,6) \dots (115,8 / 103,5) = 1,13 \dots 1,12. \end{aligned}$$

Таблиця 6.3 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової аксіальної електромагнітної системи з секторними утворюючими контурами і суміщеними фазними елементами витого стикового магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Показник втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.		
	$\Pi_{\text{Зале}}^*$		
	1,7	5	14
0,3	31,7	54,2	96,6
0,25	33,4	56,5	99,5
0,2	35,8	59,5	103,5

6.2. Масовартісні показники системи з шестигранными утворюючими контурами комбінованого стикового магнітопроводу

Радіальна довжина стрижня $l_{\text{ш}}$ і висота обмоткового вікна $h_{\text{оаш}}$ ЕМС (рис. 6.2) визначаються з використанням (6.1) і (6.2):

$$l_{\text{аш}} = (D_{\text{наш}} - D_{\text{ваш}})/2 = D_{\text{ваш}} (a_{\text{м}} - 1)/2; \quad (6.8)$$

$$h_{\text{оаш}} = \lambda_{\text{о}} b_{\text{оаш}} = \sqrt{3} \lambda_{\text{о}} D_{\text{ваш}}/2, \quad (6.9)$$

де $b_{\text{оаш}}$ – ширина обмоткового вікна,

$$b_{\text{оаш}} = D_{\text{ваш}} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{\text{ваш}}/2. \quad (6.10)$$

Ширина стрижня магнітопроводу ЕМС (рис. 6.2) визначається з використанням геометричних параметрів $D_{\text{ваш}}$ и $\alpha_{\text{с}}$, а також (6.8)

$$b_{\text{аш}} = 2(0,5D_{\text{ваш}} + 0,5l_{\text{аш}}) \text{tg}(\alpha_{\text{с}}/2) = 0,5D_{\text{ваш}} (a_{\text{м}} + 1) \text{tg}(\alpha_{\text{с}}/2). \quad (6.11)$$

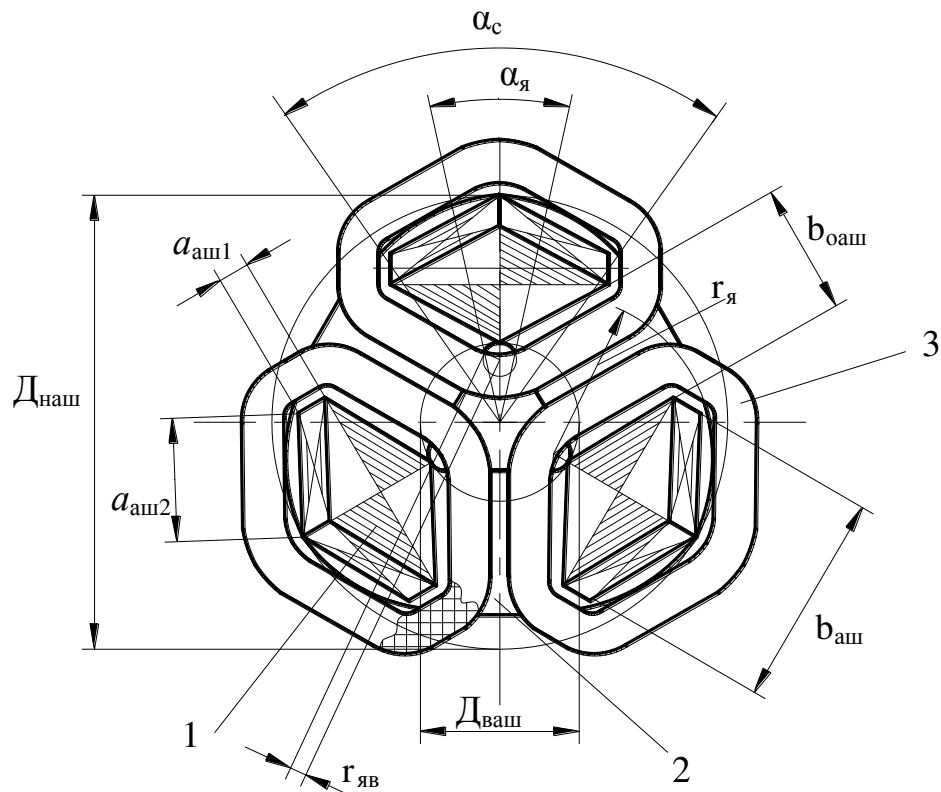


Рисунок 6.2 – Особливості структури аксіальної електромагнітної системи з комбінованим стиковим магнітопроводом: 1 – стрижень; 2 – яромо; 3 – котушка обмотки.

Боки $a_{аш1}$ і $a_{аш2}$ шестигранного УК перерізу стрижня визначаються на основі (6.8) і (6.11):

$$\begin{aligned}
 a_{аш1} &= l_{аш} - b_{аш} \operatorname{tg}(\pi/6) = 0,5 D_{ваш} \frac{a_M - 1}{2} - D_{ваш} \frac{a_M + 1}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \operatorname{tg} \frac{\pi}{6} = \\
 &= 0,5 D_{ваш} \left[a_M \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} - 1 \right]; \quad (6.12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{аш2} &= b_{аш} / \left(2 \sin \frac{\pi}{3} \right) = D_{ваш} \frac{a_M + 1}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} / \left(2 \sin \frac{\pi}{3} \right) = \\
 &= D_{ваш} (a_M + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c/2) / (2\sqrt{3}). \quad (6.13)
 \end{aligned}$$

Площа ЕТС перерізу стрижня ЕМС (рис. 6.2) визначається з використанням (6.11), (6.12) і (6.13)

$$\begin{aligned}
S_{\text{саш}} &= K_{\text{зс}} [a_{\text{аш1}} b_{\text{аш}} + a_{\text{аш2}} b_{\text{аш}} \sin(\pi/6)] = \\
&= K_{\text{зс}} \left\{ \frac{1}{4} D_{\text{ваш}}^2 \left[a_{\text{м}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) - 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right] (a_{\text{м}} + 1) \operatorname{tg}(\alpha_{\text{с}}/2) + \right. \\
&\quad \left. + D_{\text{ваш}}^2 (a_{\text{м}} + 1) \operatorname{tg}^2(\alpha_{\text{с}}/2) \frac{1}{4\sqrt{3}} \right\} = K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}}^2 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/4, \quad (6.14)
\end{aligned}$$

де $f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$ – складова скорочення запису рівняння (2.26) у вигляді виразу

$$f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = (a_{\text{м}} + 1) \left[a_{\text{м}} - 1 - (a_{\text{м}} + 1) \operatorname{tg}(\alpha_{\text{с}}/2) / (2\sqrt{3}) \right] \operatorname{tg}(\alpha_{\text{с}}/2).$$

Радіус кутової зони зовнішнього контуру ярма в ЕМС (рис. 6.2) збільшується зі зростанням радіусу $r_{\text{яв}}$ і величини кута округлення кутової зони внутрішнього контуру ярма $\alpha_{\text{я}} = 1 \dots 8^\circ$ ($\alpha_{\text{я}}$ зменшується при підвищенні потужності ТТ)

$$r_{\text{я}} = r_{\text{яв}} + l_{\text{аш}}. \quad (6.15)$$

Радіус $r_{\text{яв}}$ визначається по рис. 6.2:

$$\begin{aligned}
0,5 D_{\text{ваш}} &= r_{\text{яв}} \sin(\pi/3) \operatorname{ctg}(\alpha_{\text{я}}/2) + r_{\text{яв}} \sin(\pi/6); \\
r_{\text{яв}} &= K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{ваш}}, \quad (6.16)
\end{aligned}$$

де $K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}})$ – коефіцієнт скорочення запису виразу (6.15),

$$K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) = 1 / [1 + \sqrt{3} \operatorname{ctg}(\alpha_{\text{я}}/2)].$$

Після підстановки (6.8) і (6.16), вираз (6.15) перетворюється до вигляду

$$r_{\text{я}} = K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{ваш}} + D_{\text{ваш}} (a_{\text{м}} - 1)/2 = D_{\text{ваш}} [K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + (a_{\text{м}} - 1)/2]. \quad (6.17)$$

Площа ЕТС поперечного перерізу ярма при прийнятій ідентичності середніх значень індукції елементів магнітопроводу структури (рис. 1.8, в) у відповідності з [26] знаходиться з використанням (6.14)

$$\Pi_{\text{я}} = S_{\text{саш}} / \sqrt{3} = K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}}^2 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) / (4\sqrt{3}). \quad (6.18)$$

Висота $h_{\text{я}}$ ярма магнітопроводу ЕМС (рис. 6.2) визначається з використанням (6.8) і (6.18)

$$h_{\text{я}} = \Pi_{\text{я}} / l_{\text{аш}} = \left[K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}}^2 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) / (4\sqrt{3}) \right] \times \\ \times 1 / [D_{\text{ваш}}(a_{\text{м}} - 1)] = K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}} f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) / [2\sqrt{3}(a_{\text{м}} - 1)]. \quad (6.19)$$

Частина ширини обмоткового вікна, що визначається прямою складовою одного боку внутрішнього контуру ярма

$$b'_{\text{оаш}} = b_{\text{оаш}} - 2r_{\text{яв}} \sin(\pi/6). \quad (6.20)$$

Після підстановки (6.10) і (6.16), (6.20) перетворюється

$$b'_{\text{оаш}} = \sqrt{3} D_{\text{ваш}} / 2 - \sqrt{3} K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{ваш}} = \sqrt{3} D_{\text{ваш}} (0,5 - K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}})). \quad (6.21)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 6.2) визначається

$$m_{\text{мш}} = \gamma_{\text{с}} \left[3S_{\text{саш}} h_{\text{оаш}} + 2\pi(r_{\text{я}}^2 - r_{\text{яв}}^2) h_{\text{я}} + 6b'_{\text{оаш}} l_{\text{аш}} h_{\text{я}} \right]. \quad (6.22)$$

На основі (6.2), (6.8), (6.9), (6.14), (6.16), (6.17), (6.19) і (6.21), рівняння (6.22) перетворюється

$$\begin{aligned}
m_{\text{МШ}} = \gamma_c \left\{ \frac{3}{4} K_{3c} D_{\text{Ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) \frac{\sqrt{3}}{2} \lambda_o + \frac{\pi K_{3c}}{\sqrt{3}(a_M - 1)} f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) D_{\text{Ваш}} \times \right. \\
\times \left. \left\{ D_{\text{Ваш}}^2 [K_{\text{ш}}(\alpha_j) + (a_M - 1)/2]^2 - K_{\text{ш}}^2(\alpha_j) D_{\text{Ваш}}^2 \right\} + \frac{6}{4} D_{\text{Ваш}}^3 (a_M - 1) K_{3c} f_{\text{аш1}}(a_M, \lambda_o) \times \right. \\
\times \left. (0,5 - K_{\text{ш}}(\alpha_j)) / (a_M - 1) \right\} = 0,75 \gamma_c K_{3c} D_{\text{Ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \lambda_o) \times \\
\times [1 + 0,866 \lambda_o + 0,4181 K_{\text{ш}}(\alpha_j) + 0,6046 (a_M - 1)]. \quad (6.23)
\end{aligned}$$

Рівняння (2.9) зв'язку площі ЕТС перерізу стрижня і площі обмоткового вікна $S_{\text{оаш}}$ для ЕМС (рис. 6.2) на основі (6.2) і (6.10) перетворюється до такого вигляду

$$S_{\text{саш}} = \Pi_{\text{тт}} / (K_{3o} S_{\text{оаш}}) = \Pi_{\text{тт}} / (K_{3o} \lambda_o b_{\text{оаш}}^2) = 4 \Pi_{\text{тт}} / (3 K_{3o} \lambda_o D_{\text{Ваш}}^2). \quad (6.24)$$

З рівності (6.14) і (6.24) слід:

$$\begin{aligned}
4 \Pi_{\text{тт}} / (3 K_{3o} \lambda_o D_{\text{Ваш}}^2) = K_{3c} D_{\text{Ваш}}^2 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) / 4; \\
D_{\text{Ваш}} = 2 \sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}} / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)]}. \quad (6.25)
\end{aligned}$$

Підстановкою (6.25), (6.23) перетворюється

$$\begin{aligned}
m_{\text{Маш}} = 0,75 \gamma_c K_{3c} \left(2 \sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}} / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) \times \\
\times [1 + 0,866 \lambda_o + 0,4184 K_{\text{ш}}(\alpha_j) + 0,6046 (a_M - 1)] = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{Маш}}^*, \quad (6.26)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{Маш}}^*$ – показник маси магнітопроводу ЕМС (рис. 6.2)

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{Маш}}^* = 6 K_{3c} \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\
\times f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) [1 + 0,866 \lambda_o + 0,4184 K_{\text{ш}}(\alpha_j) + 0,6046 (a_M - 1)]. \quad (6.27)
\end{aligned}$$

Середня довжина витка фазних котушок ЕМС (рис. 6.2) визначається на основі (6.10), (6.12) і (6.13)

$$l_{\text{ваши}} = 2a_{\text{аш1}} + 4a_{\text{аш2}} + \pi b_{\text{оаш}} / 2 = D_{\text{ваши}} \left[a_{\text{м}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} - 1 \right] +$$

$$+ 4D_{\text{ваши}} (a_{\text{м}} + 1) \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \frac{1}{2\sqrt{3}} + \frac{\pi\sqrt{3}}{4} D_{\text{ваши}} = D_{\text{ваши}} f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) / \sqrt{3}, \quad (6.28)$$

де $f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$ – складова скорочення запису рівняння (6.28) у вигляді виразу

$$f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = \left[\sqrt{3}a_{\text{м}} + (a_{\text{м}} + 1) \operatorname{tg}(\alpha_{\text{с}}/2) + 0,6241 \right].$$

З використанням (6.2) і (6.10), а також при підстановці (6.28), рівняння (2.10) подається у вигляді

$$m_{\text{ваши}} = 1,5\gamma_0 K_{30} \lambda_0 b_{\text{оаш}}^2 l_{\text{ваши}} = 1,5\gamma_0 K_{30} \lambda_0 \left(3D_{\text{ваши}}^2 / 4 \right) D_{\text{ваши}} f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) / \sqrt{3} =$$

$$= 0,6495\gamma_0 K_{30} \lambda_0 D_{\text{ваши}}^3 f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}). \quad (6.29)$$

Підстановкою (6.25) рівняння (6.29) перетворюється

$$m_{\text{ваши}} = 0,6495\gamma_0 K_{30} \lambda_0 \left(2^4 \sqrt{\Pi_{\text{тт}}} / [3K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_0 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})] \right)^3 f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) =$$

$$= \gamma_0 \left(4 \sqrt{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{1\text{ваши}}^*, \quad (6.30)$$

де показник маси ПМ обмотки ЕМС (рис. 6.2)

$$\Pi_{1\text{ваши}}^* = 5,196 K_{30} \lambda_0 \left(4 \sqrt{1 / [3K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_0 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})]} \right)^3 \times$$

$$\times f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}). \quad (6.31)$$

Маса $m_{\text{аш}}$ і вартість $C_{\text{аш}}$ активних матеріалів ЕМС структури (рис. 1.8, в) з

шестигранними перерізами стрижнів комбінованого стикового магнітопроводу (рис. 6.2) визначаються на основі (6.26), (6.27) і (6.30), (6.31) рівняннями:

$$m_{аш} = m_{маш} + m_{ваш} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1маш}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1ваш}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1аш}^* ;$$

$$C_{аш} = C_{маш} + C_{ваш} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1маш}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{1ваш}^* = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{2аш}^* ,$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 6.2) визначаються функціями:

$$\Pi_{1аш}^* = 6 \left(\sqrt[4]{1/[3K_{зс}K_{зо}\lambda_o f_{аш1}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{ K_{зс} f_{аш1}(a_M, \alpha_c) \times$$

$$\times [1 + 0,866\lambda_o + 0,4184 K_{ш}(\alpha_{я}) + 0,6046(a_M - 1)] + 0,866 K_{зо}\lambda_o f_{аш2}(a_M, \alpha_c) \gamma_o / \gamma_c \}; \quad (6.32)$$

$$\Pi_{2аш}^* = 6 \left(\sqrt[4]{1/[3K_{зс}K_{зо}\lambda_o f_{аш1}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{ K_{зс} f_{аш1}(a_M, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + 0,4184 K_{ш}(\alpha_{я}) +$$

$$+ 0,6046(a_M - 1)] + 0,866 K_{зо}\lambda_o f_{аш2}(a_M, \alpha_c) \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}. \quad (6.33)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1аше}^*$ показника (6.32), що отримані для трьох значень $K_{зо}$ і відповідно для діапазону потужності ТТ, що відповідає трьом значенням кутів округлення внутрішнього трикутного контуру ярма $\alpha_{я} = 3^\circ$, $\alpha_{я} = 5^\circ$, $\alpha_{я} = 7^\circ$ наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з суміщеними фазними елементами комбінованого магнітопроводу

Показник маси, б.о. (рис. 6.2)	Центральний кут ярма $\alpha_{я}$, градус	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
		0,3	0,25	0,2
$(\Pi_{1аше}^*)'$	3	26,28	27,8	29,83
$\Pi_{1аше}^*$	5	26,3	27,81	29,84
$(\Pi_{1аше}^*)''$	7	26,31	27,82	29,86

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{2аше}^*$ показника (6.33), що отримані для трьох значень K_{30} і відповідно для п'яти значень C_o/C_c ЕМС (рис. 6.2) з кутом $\alpha_{я} = 5^\circ$ наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Екстремуми показників вартості просторової аксіальної електромагнітної системи з суміщеними фазними елементами комбінованого магнітопроводу з центральним кутом ярма $\alpha_{я} = 5^\circ$

Показник вартості, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2аше}^*$ (рис. 6.2)	0,3	48,5	52,0	55,4	58,7	61,9
	0,25	50,5	54,2	57,6	61,0	64,2
	0,2	53,3	57,1	60,6	64,0	67,3

Результати розрахунків (табл. 3.1, табл. 3.2, табл. 6.1, табл. 6.2 і табл. 6.4, табл. 6.5) визначають наступні співвідношення масовартісних показників базових варіантів ЕМС (рис. 2.10. рис. 6.1) та ЕМС (рис. 6.2) з кутом $\alpha_{я} = 5^\circ$:

$$\Pi_{1пше}^* / \Pi_{1аше}^* = (27,8 / 26,3) \dots (31,4 / 29,8) = 1,06 \dots 1,05;$$

$$\Pi_{1асе}^* / \Pi_{1аше}^* = (26,5 / 26,3) \dots (30 / 29,8) = 1,006 \dots 1,007;$$

$$\left(\Pi_{2пше}^* / \Pi_{2аше}^* \right)' = (51,7 / 48,5) \dots (56,7 / 53,3) = 1,066 \dots 1,07;$$

$$\left(\Pi_{2пше}^* / \Pi_{2аше}^* \right)'' = (66,2 / 61,9) \dots (71,8 / 67,4) = 1,07 \dots 1,066;$$

$$\left(\Pi_{2асе}^* / \Pi_{2аше}^* \right)' = (48,7 / 48,5) \dots (53,6 / 53,3) = 1,004 \dots 1,0044;$$

$$\left(\Pi_{2асе}^* / \Pi_{2аше}^* \right)'' = (62,1 / 61,9) \dots (67,6 / 67,3) = 1,0034 \dots 1,0038.$$

6.3. Показники втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами комбінованого стикового магнітопроводу

Об'єм ЕТС стрижнів:

$$V_{\text{саш}} = 3h_{\text{оаш}} S_{\text{саш}} ; \quad (6.34)$$

При підстановці (6.9) і (6.14), (6.34) перетворюється

$$V_{\text{саш}} = 3\sqrt{3}K_{\text{зс}}\lambda_0 D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)/8 = 0,6495K_{\text{зс}}\lambda_0 D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c). \quad (6.35)$$

Об'єм ЕТС стрижневих ділянок ярем

$$\begin{aligned} V_{\text{яаш}} &= 2\pi h_{\text{я}} (r_{\text{я}}^2 - r_{\text{яв}}^2) + 6h_{\text{я}} l_{\text{аш}} b'_{\text{оаш}} - 6h_{\text{я}} S_{\text{саш}} / K_{\text{зс}} = \\ &= 2\pi h_{\text{я}} \left[r_{\text{я}}^2 - r_{\text{яв}}^2 + 0,95493(l_{\text{аш}} b'_{\text{оаш}} - S_{\text{саш}} / K_{\text{зс}}) \right]. \end{aligned} \quad (6.36)$$

На основі (6.8), (6.14), (6.16), (6.17), (6.21) вираз об'єму ярем (6.36) приймає вигляд

$$\begin{aligned} V_{\text{яаш}} &= \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1}{(a_M - 1)} K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}} f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) \left\{ D_{\text{ваш}}^2 [K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + (a_M - 1)/2]^2 - K_{\text{ш}}^2(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{ваш}}^2 + \right. \\ &\quad \left. + 0,95493 \left[D_{\text{ваш}} \frac{a_M - 1}{2} \sqrt{3} D_{\text{ваш}} (0,5 - K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}})) - D_{\text{ваш}}^2 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) / 4 \right] \right\} = \\ &= 0,75K_{\text{зс}} D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) [1 + 0,41838K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_M - 1) - \\ &\quad - 0,57734 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) / (a_M - 1)]. \end{aligned} \quad (6.37)$$

Об'єм ЕТС кутових ділянок ярем

$$V_{\text{каш}} = 6h_{\text{я}} S_{\text{саш}} / K_{\text{зс}} . \quad (6.38)$$

Після підстановки (6.14) і (6.19), (6.38) має вигляд

$$V_{\text{каш}} = \sqrt{3}K_{\text{зс}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}^2(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/[4(a_{\text{м}} - 1)]. \quad (6.39)$$

При використанні (6.35), (6.37) і (6.39) рівняння (6.5) ВНР ЕМС структури (рис. 1.8, в) перетворюється до вигляду, що відповідає конструкції (рис. 6.2)

$$\begin{aligned} P_{\text{наш1}} &= K_{\text{дна1}}K'_{\text{цз}}(V_{\text{саш}} + V_{\text{яаш}} + 0,757V_{\text{каш}}) = K_{\text{дна1}}K'_{\text{цз}} \times \\ &\times \left\{ 0,6495K_{\text{зс}}\lambda_{\text{о}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 0,75K_{\text{зс}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) \times \right. \\ &\times [1 + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_{\text{м}} - 1) - 0,57734 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/(a_{\text{м}} - 1)] + \\ &+ 0,757\sqrt{3}K_{\text{зс}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}^2(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/[4(a_{\text{м}} - 1)] \left. \right\} = 0,75K_{\text{дна1}}K'_{\text{цз}}K_{\text{зс}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) \times \\ &\times [1 + 0,866\lambda_{\text{о}} + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_{\text{м}} - 1) - \\ &- 0,1403 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/(a_{\text{м}} - 1)]. \quad (6.40) \end{aligned}$$

Рівняння (2.13) на основі (6.2), (6.10) і (6.28) для ЕМС (рис. 6.2) приймає вигляд

$$\begin{aligned} P_{\text{каш}} &= 1,5K_{\text{дк}}\gamma_{\text{о}}K_{\text{зо}}K_{\text{по}}J_{\text{о}}^2\lambda_{\text{о}}b_{\text{оаш}}^2l_{\text{ваш}} = 1,5K_{\text{дк}}\gamma_{\text{о}}K_{\text{зо}}K_{\text{по}}J_{\text{о}}^2\lambda_{\text{о}}(\sqrt{3}D_{\text{ваш}}/2)^2 \times \\ &\times D_{\text{ваш}} f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/\sqrt{3} = 0,6495K_{\text{дк}}\gamma_{\text{о}}K_{\text{по}}J_{\text{о}}^2K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}). \quad (6.41) \end{aligned}$$

Сумарні втрати ЕМС ТТ (рис. 6.2) визначаються на основі (6.40) і (6.41)

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{аш1}} &= P_{\text{наш1}} + P_{\text{каш}} = 0,75K_{\text{дна1}}K'_{\text{цз}}K_{\text{зс}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) \times \\ &\times [1 + 0,866\lambda_{\text{о}} + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_{\text{м}} - 1) - 0,1403 f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/(a_{\text{м}} - 1)] + \\ &+ 0,6495K_{\text{дк}}K_{\text{зо}}\gamma_{\text{о}}K_{\text{по}}J_{\text{о}}^2\lambda_{\text{о}}D_{\text{ваш}}^3 f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = 0,75K_{\text{дна1}}K'_{\text{цз}}D_{\text{ваш}}^3 \{K_{\text{зс}} \times \\ &\times f_{\text{аш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})[1 + 0,866\lambda_{\text{о}} + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_{\text{м}} - 1)] + \\ &+ 0,866K_{\text{yal}}K_{\text{зо}}\lambda_{\text{о}} f_{\text{аш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})\}. \quad (6.42) \end{aligned}$$

Після підстановки (6.25), сумарні втрати (6.42) визначаються

$$P_{\Sigma \text{аш1}} = 6K'_{\text{цз}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K_{\text{дна1}} \left(\sqrt[4]{1/[3K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{K_{\text{зс}} f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) \times \\ \times [1 + 0,866\lambda_o + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_M - 1) - 0,1403 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)/(a_M - 1)] + \\ + 0,866K_{\text{ya1}}K_{\text{зо}}\lambda_o f_{\text{аш2}}(a_M, \alpha_c)\} = K'_{\text{цз}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{\text{заш}}^*$$

де $\Pi_{\text{заш}}^*$ – показник втрат ЕМС (рис. 6.2) з магнітопроводом з ізотропною ЕТС, який визначається функціональною залежністю,

$$\Pi_{\text{заш1}}^* = 6K_{\text{дна1}} \left(\sqrt[4]{1/[3K_{\text{зс}}K_{\text{зо}}\lambda_o f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{K_{\text{зс}} f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c) \times \\ \times [1 + 0,866\lambda_o + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046(a_M - 1) - 0,1403 f_{\text{аш1}}(a_M, \alpha_c)/(a_M - 1)] + \\ + 0,866K_{\text{ya1}}K_{\text{зо}}\lambda_o f_{\text{аш2}}(a_M, \alpha_c)\}. \quad (6.43)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{\text{заш1}}^*$ показника (6.43) ЕМС (рис. 6.2) при прийнятих значеннях $K_{\text{зс}}$, $K_{\text{зо}}$, $K_{\text{дна1}}$ і співвідношеннях (6.7) та відповідно для трьох значень кутів $\alpha_{\text{я}} = 3^\circ$, $\alpha_{\text{я}} = 5^\circ$, $\alpha_{\text{я}} = 7^\circ$ наведені в табл. 6.6.

Результати розрахунків (табл. 3.3, табл. 6.3 і табл. 6.6) визначають наступні співвідношення показників базових варіантів ЕМС (рис. 2.10. рис. 6.1) та ЕМС (рис. 6.2) з кутом $\alpha_{\text{я}} = 5^\circ$ відповідно до прийнятих змін $K_{\text{зо}} = 0,3 \dots 0,2$ і значень K_{ya1} , що відповідають використанню ізотропною ЕТС

$$\left(\Pi_{\text{заш1e}}^* / \Pi_{\text{заш1e}}^* \right)' = (34,5/31,83) \dots (38,7/35,88) = 1,084 \dots 1,078;$$

$$\left(\Pi_{\text{заш1e}}^* / \Pi_{\text{заш1e}}^* \right)'' = (108,7/97,67) \dots (115,8/104,53) = 1,11 \dots 1,108;$$

$$\left(\Pi_{\text{заш1e}}^* / \Pi_{\text{заш1e}}^* \right)' = (31,7/31,83) \dots (35,8/35,88) = 0,996 \dots 0,998;$$

$$\left(\Pi_{\text{заш1e}}^* / \Pi_{\text{заш1e}}^* \right)'' = (96,6/97,67) \dots (103,5/104,53) = 0,988 \dots 0,99.$$

Таблиця 6.6 – Екстремуми показників втрат активної потужності просторової аксіальної електромагнітної системи з суміщеними фазними елементами комбінованого магнітопроводу

Показник втрат активної потужності, б.о. (рис. 6.2)	Центральний кут ярма $\alpha_{я}$, градус	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна	Співвідношення коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів і електромагнітних навантажень, б.о.		
			1,7	5	14
$(\Pi_{3аш1}^*)'$	3	0,3	31,81	54,6	97,64
		0,25	33,53	56,85	100,55
		0,2	35,86	59,9	104,5
$\Pi_{3аш1}^*$	5	0,3	31,83	54,62	97,67
		0,25	33,55	56,87	100,58
		0,2	35,88	59,92	104,53
$(\Pi_{3аш1}^*)''$	7	0,3	31,86	56,64	97,67
		0,25	33,57	56,89	100,61
		0,2	35,9	59,95	104,56

З рівнянь (6.32), (6.33) і (6.43) слід залежність ПТР ЕМС структури (рис. 1.8, в) зі стиковим магнітопроводом, суміщеними фазними елементами та витими ярмами, від значення кута $\alpha_{я}$. Величина $\alpha_{я}$ визначається мінімально допустимим радіусом округлення вершин внутрішнього контуру ярма, виходячи з можливості вигину під кутом 60° стрічки (рулону) ЕТС. Кут $\alpha_{я}$ зменшується з підвищенням потужності ТТ і $D_{ваш}$ (рис. 6.2).

Залежність екстремальних значень показників маси (6.31) і втрат (6.42) від $\alpha_{я}$ є зовсім незначною і, наприклад для $K_{30} = 0,3$, визначається співвідношеннями:

$$\left[\frac{(\Pi_{1аше}^*)''}{(\Pi_{1аше}^*)'} \right]_{(K_{30}=0,3)} = 26,31 / 26,28 = 1,001;$$

$$\left[\frac{\left(\Pi_{3аш1e}^* \right)''}{\left(\Pi_{3аш1e}^* \right)'} \right]_{(K_{30}=0,3)} = (31,9/31,81) \dots (97,7/97,64) =$$

$$= 1,001 \dots 1,0006,$$

де $(\Pi_{1ше}^*)'$ і $(\Pi_{1аше}^*)''$ та $(\Pi_{3аш1e}^*)'$ і $(\Pi_{3аш1e}^*)''$ – екстремальні значення показників (6.32) і (6.43) при $\alpha_я=3^\circ$ та $\alpha_я=7^\circ$.

6.4. Рівняння оптимізації електромагнітних систем за загальним критерієм та результати порівняльного аналізу їх варіантів за окремими критеріями

При здійсненні нових розробок розподільних ТТ виникає необхідність їх оптимізації за загальним критерієм.

У цілому, як вже сказано у підрозділі 2.2, узагальнену оптимізацію ТТ з ii -м варіантом ЕМС можна виконати на основі рівняння, що відповідає критерію повної капіталізованої вартості [28]

$$C_{\Sigma ii} = C_{Тii} + K_H P_{Hii} + K_K P_{Kii}, \quad (6.44)$$

де $C_{Тii}$ – вартість ТТ;

K_H і K_K – питомі капіталізовані вартості ВНР і ВКЗ [28], що використовуються при оптимізації трансформаторів в державах з ринковою економікою.

Рівняння (6.44) при використанні (2.1), (2.11), (2.12) перетворюється

$$C_{\Sigma ii} = \gamma_c K_{CT} C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{2ii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) + K_H K_{днii} \gamma_c P_{пм} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \times$$

$$\times \Pi_{Hii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) + K_K K_{дк} \gamma_O K_{по} J_O^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{Kii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) =$$

$$= \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \left[\gamma_c K_{CT} C_c \Pi_{2ii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) + K_H K_{днii} \gamma_c P_{пм} \Pi_{Hii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) + \right.$$

$$\left. K_K K_{дк} \gamma_O K_{по} J_O^2 \Pi_{Kii}^* (K_{30}, a_M, \lambda_O, \alpha_c) \right], \quad (6.45)$$

де $K_{ст}$ – коефіцієнт співвідношення вартості ТТ з урахуванням конструктивної частини та вартості його ЕМС;

$\Pi_{ни}^*(K_{зо}, a_m, \lambda_o, \alpha_c)$ і $\Pi_{кii}^*(K_{зо}, a_m, \lambda_o, \alpha_c)$ – відносні складові ВНР, ВКЗ та Π_{zii}^* , що входять до (2.11) і є функціями КЗ a_m , λ_o і α_c .

Виходячи з (2.2), узагальнена ЦФ, що наведена у скороченій формі (6.45) додатково до геометричних КЗ a_m , λ_o , α_c є залежною від КЗ у вигляді ЕМН B_c , J_o , а також від змін K_{yii} (2.12) у відповідності до варіювання ЕМН, і може бути оптимізована одним з відомих чисельних способів, наприклад [103, 104, 110].

Результати впливу структурних перетворень активної частини на ПТР ТТ, що визначені на основі оптимізації варіантів ЕМС за окремими критеріями маси, вартості і втрат активної потужності наведено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Числові значення покращення (+) або погіршення (–) показників технічного рівня варіантів електромагнітних систем відносно базового аналогу

Співвідношення показників	Діапазон змін значень співвідношень, %			
	Показник маси	Показник вартості	Показник втрат	
			Ізотропна сталь	Анізотропна сталь
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{ippe}^*$	+(1,8...3,1)	+(6,2...9,5)	–(4,0...12,7)	–0,7...+1,1
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{ивке}^*$	+(7,5...7,6)	+(7,8...8,1)	–(3,0...6,3)	+(10,9...18,7)
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{ивше}^*$	+(8,6...8,7)	+(9,1...9,5)	–(1,6...5,4)	+(12,6...20,0)
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{ippe}^*$	+(6,4...7,7)	+(10,6...13,7)	–7,0...+3,6	+(20,6...22,2)
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{ipше}^*$	+(7,5...9,0)	+(12,3...15,9)	–5,9 ...+5,8	+(22,8...23,9)
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{iасе}^*$	+(4,6...5,0)	+(5,8...6,5)	+(8,0...12,6)	–
$\Pi_{иппе}^* / \Pi_{iаше}^*$	+(5,3...5,6)	+(6,5...6,9)	+(7,8...11,3)	–

У табл. 6.7 наведені зміни ПТР, які розраховані на основі визначених у попередніх розділах і підрозділах відповідних оптимізованих відносних складових.

Результати оптимізаційних розрахунків виконаної роботи (табл. 6.7) свідчать про те, що суттєве зменшення габаритних розмірів і контурного об'єму та покращення масовартісних показників просторових ЕМС відносно базової планарної ЕМС, при певному виборі співвідношень ЕМН та різновиду ЕТС не викликає погіршення енергетичної ефективності ТТ. Незважаючи на наявність втрат, які обумовлені фазною двоконтурністю (викривленням контурних потоків), просторові ЕМС з шестигранними УК та витими трисекційними магнітопроводами, що виготовлені з анізотропної ЕТС, надають можливість максимального покращення (серед ЕМС, що розглянуті) коефіцієнту корисної дії ТТ. З табл. 6.7 також випливає, що максимальне покращення ПТР ТТ можна досягти використанням радіальної ЕМС (рис. 2.7, а) з шестигранними УК. Перевагою вказаної ЕМС відносно аксіальних аналогів також є більш прості та технологічні різновиди конструкції витого магнітопроводу (рис. 5.1, б, в). Однак симетричні аксіальні просторові ЕМС відрізняються, як вказано в підрозділі 1.2, від планарних та радіальних ЕМС симетрією топології «векторного магнітного моменту», а їх варіанти (рис. 4.4, рис. 6.1, рис. 6.2) дають можливість забезпечення, без додаткових пристроїв магнітної компенсації, умов електромагнітної сумісності ТТ.

Питання обрання певного варіанту структури та УК просторової ЕМС при проектуванні може бути вирішено з врахуванням застосованої на конкретному виробництві технології та обладнання виготовлення магнітопроводів, а також спеціальних умов технічного завдання, зокрема вимог електромагнітної сумісності ТТ.

6.5. Висновки до розділу 6

6.5.1. Встановлено, що в заданих діапазонах змін класу напруги і співвідношення вартостей ПМ і ЕТС, аксіальна ЕМС з секторними УК стрижнів та котушок обмоток і суміщеними фазними елементами витого магнітопроводу відрізняється від базової планарної ЕМС покращеними на (4,6...5)%, (5,8...6,5)% та (8...12,6)% оптимізованими показниками відповідно маси, вартості і втрат активної потужності при використанні ізотропної ЕТС.

6.5.2. Визначено, що заміна в аксіальній ЕМС з суміщеними фазними елементами секторних УК перерізів стрижнів витого магнітопроводу на шестигранні перерізи стрижнів комбінованого магнітопроводу призводить до незначного покращення показників маси і вартості відповідно на 0,6...0,67 % та 0,34...0,44 % при погіршенні показника втрат на 0,23...1,17 %.

6.5.3. Визначено, що при зміні кута округлення трикутного внутрішнього контуру ярма з $\alpha_{\text{я}} = 3^\circ$ до $\alpha_{\text{я}} = 7^\circ$ відбувається незначні зміни показників маси і втрат активної потужності аксіальної просторової ЕМС з шестигранними перерізами стрижнів комбінованого стикового магнітопроводу. Такі зміни, наприклад при $K_{30} = 0,3$, складають відповідно 0,2 % і 0,06...0,11 %.

6.5.4. Встановлено, що в заданих діапазонах змін класу напруги і співвідношення вартостей ПМ і ЕТС, аксіальна ЕМС з $\alpha_{\text{я}} = 5^\circ$ і шестигранними УК стрижнів та котушок обмоток і суміщеними фазними елементами комбінованого магнітопроводу відрізняється від базової планарної ЕМС покращеними на (5,3...5,56) %, (6,5...6,9) % і (7,8...11,3) % оптимізованими показниками відповідно маси, вартості і втрат активної потужності у випадку використання ізотропної ЕТС.

6.5.5. Показана можливість використання методу безрозмірних ПТР та універсальних геометричних КЗ для оптимізації варіантів ЕМС ТТ по загальному критерію капітальної вартості.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача розвитку теоретичних положень, що забезпечують розробку компактних ТТ спеціального призначення на основі створення нетрадиційних конструктивно-технологічних виконань та ММ ЕМС. Вказані ЕМС відповідають спеціальним вимогам, зокрема зручності встановлення в циліндричні та сферичні об'єми обмеженого діаметру об'єктів морської підводної техніки.

1. З аналізу сучасного стану трансформаторобудування впливає наступне.

1.1. Найбільш поширеними у масовому і серійному виробництві силових ТТ є ЕМС з планарними структурами і прямокутними та круговими УК стрижнів і обмоткових котушок, які мають відомі технологічні та експлуатаційні недоліки.

1.2. В електротехнічних комплексах підводного призначення з елементами, що розташовані в оболонках обмеженого діаметру, та інших спеціальних технічних об'єктах, встановлюються ТТ з аксіальними просторовими ЕМС, наприклад морські і корабельні ТТ ТСЗМ і ТСЗМВ, які також характеризуються круговими УК, та інколи застосовуються трифазні групи з тороїдними ЕМС.

1.3. Додатково до аксіальних структур просторових ЕМС, що перебувають у виробництві, основу одно та трифазних ЕМС компактного виконання можуть скласти симетричні просторові радіальні структури.

1.4. Одним з можливих засобів удосконалення індукційних перетворювачів одно і багатофазного струму, понад досягнень матеріалознавства, є структурне перетворення та використання нетрадиційних УК ЕМС.

1.5. Нетрадиційні, зокрема секторні і багатогранні УК дозволяють до 20 ... 25 % знизити габаритні розміри, або діаметр контурного кола, що описаний навколо зовнішнього контуру варіантів просторових ЕМС та суттєво спростити технологію виготовлення магнітопроводів відносно традиційних аналогів.

2. Виконано аналіз конструктивно-технологічних особливостей однофазних тороїдних і існуючих пропозицій нетрадиційних трифазних планарних та аксіальних просторових ЕМС з якого доцільно зробити такі зауваження і пропозиції.

2.1. Вказано на недоліки тороїдних ЕМС і визначені особливості пропозицій трифазних планарних ЕМС з прямокутними УК та витими двоконтурними і суміщеними фазними елементами магнітопроводів, що містять сплюснуті ділянки.

2.2. В аксіальних просторових ЕМС з суміщеними фазними елементами при використанні для виготовлення магнітопроводів анізотропної ЕТС значно підвищуються втрати в зонах неспівпадіння напряму магнітного потоку з напрямом текстури. Це обмежує використання анізотропних ЕТС або потребує застосування нових коштовних аморфних ЕТС, які на даний час є механічно крихкими.

2.3. Для комплектації групових трифазних перетворювачів блочного складання обмеженого діаметру запропоновані нетрадиційні однофазні симетричні радіальні ЕМС з тристрижневими шихтованим вперепліт і витим стиковим магнітопроводами. Вказані пропозиції надають можливість покращення основних ПТР підвищенням коефіцієнту укладання обмотки до рівня планарних ЕМС та зменшенням середньої довжини витків відносно тороїдних аналогів.

2.4. Запропоновані нетрадиційні варіанти конструкції і способи виготовлення витого або комбінованого стикового магнітопроводу планарної трифазної ЕМС з суміщеними фазними елементами, що відрізняються зниженими матеріаломісткістю та втратами ЕТС. Такі переваги досягаються округленням зовнішніх кутових зон та усуненням третіх гармонік контурних магнітних потоків.

2.5. Запропоновані нетрадиційні варіанти конструкцій симетричної просторової радіальної ЕМС з двоконтурними і суміщеними фазними елементами, що відрізняються ромбічними обмотковими вікнами та усіма косими стиками, а також практичною безвідходністю шихтованого вперепліт магнітопроводу.

2.6. Запропоновано спосіб виготовлення витого магнітопроводу просторової аксіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами та шестигранними УК, що спрощує виробництво та виключає відходи ЕТС при виготовленні секцій.

2.7. Запропонована конструкція трифазної просторової радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, яка спрощує виробництво стикового витого магнітопроводу та покращує показники ТТ на основі розташування стиків секцій в паралельних площинах.

2.8. Запропоновано варіанти витих магнітопроводів трисекційних радіальних однофазної та трифазної ЕМС з шестигранними УК, що зменшують матеріаломісткість та підвищують надійність обмоток.

2.9. З аналізу проблеми розробки «маломагнітного» ТТ випливає, що передумовою досягнення мінімуму рівня зовнішнього магнітного поля ТТ є зниження технологічної несиметрії аксіальної просторової ЕМС заміною кругових УК стрижнів на шестигранні в витих і комбінованих магнітопроводах.

3. Наявність різноманітних варіантів структур і формувань конфігурацій елементів просторових ЕМС з шихтованими, витими і комбінованими магнітопроводами, потребує визначення рекомендацій щодо їх застосування на основі результатів порівняльного аналізу та відповідно вимагає розробки певного методу досліджень.

3.1. Доцільним для вирішення питань порівняльного аналізу є метод оптимізації, у якому використовуються безрозмірні ПТР і узагальнені відносні геометричні КЗ, та якій надає можливість застосування при зіставленні ЕМС принципу еквівалентності електромагнітної потужності.

3.2. Метод ПТР і узагальнених відносних геометричних КЗ, у подальшому базисний метод, є ефективним для рішення завдань порівняльного аналізу. Забезпечується можливість адекватного аналітичного оптимізаційного зіставлення ЕМС будь-яких конфігурацій, складності і технології на основі використання універсальних КЗ та заміни системи обмоток трансформатора обмоткою структурно еквівалентного реактора.

3.3. Базисний метод дозволяє значно спростити рішення задач дослідження та визначення впливу змін K_{30} (класу напруги), використаних матеріалів (кристалеві ізотропна і анізотропна або аморфна ЕТС, мідь, алюміній) та конструктивно-технологічних чинників (коефіцієнтів додаткових втрат) на основні ПТР ТТ.

3.4. Для деяких об'єктів найбільш важливими є як показник маси, так і габаритні розміри ТТ, тому запропонований додатковий ПТР – мінімум діаметру контурного кола сферичного або циліндричного об'єму ЕМС.

3.5. Визначення екстремальних значень КЗ ТТ підводного (аерокосмічного) призначення за критерієм мінімуму маси (контурного об'єму) повинно одночасно

враховувати вимоги мінімуму контурного об'єму (маси).

4. Базисним методом виконано зіставлення варіантів ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів шихтованого магнітопроводу і отримані такі результати.

4.1. Створена ММ базової планарної ЕМС з прямокутними УК, отримані значення КЗ, які відповідають екстремумам (мінімумам) основних ПТР $\Pi_{\text{ипп}}^*$. Встановлена відповідність оптимальних геометричних співвідношень активної частини, що розраховані базисним методом, відомому діапазону раціональних співвідношень вказаної традиційної ЕМС.

4.2. Вперше розроблена ММ просторової радіальної ЕМС з ромбічними обмотковими вікнами та двоконтурними фазними елементами шихтованого вперепліт магнітопроводу.

4.2.1. Встановлено покращення на (1,75 ... 3,1) % і (6,2 ... 9,5) % відповідно оптимізованих показників маси і вартості радіальної ЕМС у порівнянні з базовим планарним аналогом.

4.2.2. Встановлено, що при використанні ізотропної ЕТС, що не створює додаткові втрати кутових зон зміни напрямку потоку в шихтованому магнітопроводі, показник втрат радіальної ЕМС погіршується у діапазоні змін ЕМН відносно базової ЕМС на 4 ... 12,7 % з причин двоконтурності фазних елементів (наявності третіх гармонік контурних магнітних потоків).

4.2.3. Визначено, що при використанні анізотропної ЕТС показник втрат радіальної ЕМС з шихтованим трисекційним магнітопроводом погіршується до 0,7 % у порівнянні з базовою ЕМС при умові зниження J_0 до 1,4 А/мм² і підвищення B_c до 1,7 Тл. При умові зниження B_c до 1,45 Тл і підвищення J_0 до 3,5 А/мм² показник втрат такої ЕМС може бути покращений до 1,14 %.

5. З використанням базового методу відповідно розроблена і вперше створена ММ визначення ПТР та виконано зіставлення традиційного (з круговими УК) та запропонованого (з шестигранними УК) варіантів аксіальної просторової ЕМС з двоконтурними фазними елементами.

5.1. На основі порівняння аксіальних просторових ЕМС з круговими і шестигранними УК та витими трисекційними магнітопроводами встановлено покращення в

нетрадиційній ЕМС показників маси і вартості на $(0,87 \dots 0,97)$ % та $(1,16 \dots 1,32)$ %. Показники втрат активної потужності в нетрадиційній ЕМС покращуються (знижуються) на $(0,88 \dots 1,43)$ % і $(1,1 \dots 1,65)$ % при використанні відповідно ізотропної і анізотропної ЕТС.

5.2. З порівняння базової планарної і нетрадиційної просторової аксіальної ЕМС з шестигранним УК і витим трисекційним магнітопроводом впливає наступне.

5.2.1. Досягається покращення відносних показників маси і вартості просторової ЕМС на $(8,46 \dots 8,67)$ % і $(9,08 \dots 9,53)$ %.

5.2.2. Показник втрат активної потужності просторової аксіальної ЕМС з витим трисекційним магнітопроводом при застосуванні ізотропної ЕТС погіршується на $(1,56 \dots 5,35)$ %. При застосуванні анізотропної ЕТС цей показник покращується на $(12,6 \dots 20)$ %.

6. З використанням базового методу вперше розроблені ММ варіантів радіальної просторової ЕМС з витими трисекційними магнітопроводами, які відрізняються прямокутними і шестиграними УК та здійснено зіставлення вказаних варіантів з якого впливає наступне.

6.1. На основі порівняння варіантів просторової радіальної ЕМС з трисекційними витими магнітопроводами встановлено, що заміна прямокутних УК на шестигранні додатково до підвищення надійності призводить до покращення на $(1 \dots 1,17)$ %, $(1,56 \dots 1,9)$ % і $(1 \dots 2,5)$ % відповідно показників маси, вартості та втрат активної потужності ТТ.

6.2. З порівняння базової планарної і нетрадиційної просторової радіальної ЕМС з шестиграними УК і витим трисекційним магнітопроводом визначені певні переваги та деякі особливості.

6.2.1. Досягається покращення показників маси і вартості просторової радіальної ЕМС на $(7,5 \dots 9)$ % і $(12,3 \dots 15,9)$ %.

6.2.2. Показник втрат активної потужності просторової радіальної ЕМС з витим трисекційним магнітопроводом при застосуванні ізотропної ЕТС погіршується

до 5,92 %. При застосуванні анізотропної ЕТС вказаний показник покращується на (22,8...23,9) %.

7. Базовим методом відповідно перероблена та вперше розроблена ММ визначення ПТР варіантів просторової аксіальної ЕМС з суміщеними фазними елементами. Із зіставлення таких ЕМС, що відрізняються секторними і шестигранними УК та витим і комбінованим стиковими магнітопроводами, встановлено наступне.

7.1. Визначено незначне покращення показників маси і вартості при погіршенні на (0,23 ... 1,17) % показника втрат ЕМС з шестигранними УК відносно ЕМС з секторними УК.

7.2. З порівняння базової планарної і нетрадиційної просторової аксіальної ЕМС з кутом округлення внутрішнього контуру ярма $\alpha_{\text{я}} = 5^\circ$ та шестигранними УК визначено покращення показників маси і вартості на (5,28 ... 5,57) %, а також покращення показника втрат активної потужності у випадку використання ізотропної ЕТС на (7,79 ... 11,28) %.

8. На основі виконаної роботи можна зробити узагальнені висновки.

8.1. Додатково до зручності вбудовування у циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметру досліджені просторові ЕМС за показниками маси і вартості є кращими відносно базової планарної ЕМС.

8.2. При виготовленні магнітопроводів з анізотропної ЕТС та застосуванні просторових ЕМС, досягається зниження втрат активної потужності відносно планарної ЕМС, тобто можливо подальше підвищення коефіцієнту корисної дії ТТ.

8.3. На основі технічних даних і фактичних розмірів елементів просторової ЕМС ТТ ТСЗМ-40-74.ОМ5, а також розрахунків його аналогів, доведена адекватність застосування методу та методики визначення геометричних співвідношень і характеристик індукційних статичних пристроїв із застосуванням понять показника вихідних даних та ЕМН, ПТР і універсальних відносних геометричних КЗ.

8.4. Заміна традиційних прямокутних та кругових УК на нетрадиційні, зокрема шестигранні, додатково до можливостей підвищення надійності дає певні покращення ПТР нових розробок ТТ як спеціального, так і розподільного призначень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бут, Д.А. Электромеханика сегодня и завтра / Д.А. Бут // Электричество. – 1995. – №1. – с. 2-10.
2. Иванов-Смоленский, А.В. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина [и др.] // Электропанорама. – 2001. – №1. – с. 14-15.
3. Шидловський, А.К. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990 – 2000 / А.К. Шидловський, Г.М. Федоренко // Техн. електродинаміка. – 2002. – №1. – с. 3-12.
4. ДСТУ 3270-95 Трансформатори силові. Терміни та визначення. – [Чинний від 01-07-1996]. – Київ: Держстандарт України. – 1996. – 85 с. – (Національний стандарт України).
5. Ставинский, А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / А.А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – с. 57-61.
6. Ставинский, А.А. Классификация структур электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей // А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – с. 53-58.
7. Ставинский, А.А. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей / А.А. Ставинский, И.А. Тищенко, И.И. Зеленый // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – №1(77). – с. 64-69.
8. Пуйло, Г.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко, В.В. Тонгалюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – с. 48-52.
9. Пуйло, Г.В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, Е.В. Трищенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – с. 49-52.

10. Пуйло, Г.В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Е.В. Трищенко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №2. – с. 42-45.
11. Белкин, Г. О первых шагах в реформированной электроэнергетике / Г. Белкин, А. Дробышев, В. Ивакин [и др.] // *Электроцех*. – 2008. – №9. – с. 13-16.
12. Коновалов, О.А. Основные технические требования к трансформаторно – реакторному оборудованию в современных условиях / О.А. Коновалов, В.Н. Подъячев // *Энергетик*. – 2010. – №8. – с. 29-31.
13. Wolkrold, W. Neue wege im Electromashinenbau / W. Volkrodt // *Electro – Job*. – 1985. – P. 29-38.
14. Конохов, Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин / Н.И. Конохов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №7. – с. 36-38.
15. Ставинский, А.А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей / А.А. Ставинский, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №4. – с. 79-82.
16. Ставинский, Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р.А. Ставинский // *Вісник КДУ*. – Кременчук: КДУ, 2010. – вип. 4, ч. 2 – с. 91-94.
17. Ставинский, А.А. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, О.О. Плахтырь // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №4. – с. 30-36.
18. Ставинский, А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин / А.А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – №2. – с. 53-58.
19. Ставинский, А.А. Возможности совершенствования судовых электромеханических комплексов на основе нетрадиционных технических решений электри-

ческих машин / А.А. Ставинский, В.В. Шевченко, В.К. Чекунов // Вісник Національного університету кораблебудування за 2010 рік. – Миколаїв: НУК, 2011. – 640 с., с. 287-293.

20. Бальян, Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р.Х. Бальян. – М.: Советское радио, 1971. – 720 с.

21. Ермолин, Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности / Н.П. Ермолин. – Л.: Энергия, 1970. – 190 с.

22. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский. – Л. Энергия, 1970. – 432 с.

23. Белопольский, И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд.2-е перераб. и доп. / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л.Г. Пикалова. – М.: Энергия, 1973. – 400с.

24. Майорец, А.И. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / [А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др.]. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

25. Аренков, А.Б. Изготовление трансформаторов с ленточными магнитопроводами / А.Б. Аренков, А.К. Климов, Ю.И. Липатов. – Л.: Судостроение, 1976. – 232 с.

26. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: [Учеб. пособие для вузов] / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

27. Flanagan, W.M. Handbook of transformers design and application / W.M. Flanagan. – Boston: Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.

28. Лизунов, С.Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга: под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.

29. Милн, П. Подводные инженерные исследования / П. Милн. – Л. Судостроение, 1984. – 340 с.

30. Коробков, В.А. Преобразование энергии океана / В.А. Коробков. – Л.: Судостроение, 1986. – 280 с.

31. Блинцов, В.С. Привязные подводные системы / В.С. Блинцов. – Київ: Наукова думка, 1998. – 232 с.

32. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М.Д. Агеев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
33. Ставинский, А.А. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств / А.А. Ставинский, И.Г. Забора // Проблемы автоматизации та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук. – техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2006. – с. 194-202.
34. Блинцов, В.С. Проблемы и пути развития электрооборудования и автоматизации подводных аппаратов / В.С. Блинцов // Проблемы автоматизации та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук. – техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – с. 257-269.
35. Блинцов, С.В. Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності / С.В. Блинцов. – Миколаїв: ТОВ «Фірма Іліон», 2008. – 204 с.
36. Moore, S. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. – Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
37. Глубоководные водолазные комплексы для флота России / ОАО «Тесис Про» www.thesis-pro.ru // Судостроение. – 2011. – №4. – с. 34-36.
38. Авдеева, Е.А. Варианты технических решений электромагнитных систем трехфазных трансформаторов систем электрооборудования подводных аппаратов / Е.А. Авдеева // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2011. – с. 59-63.
39. Блинцов, В.С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В.С. Блинцов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовой // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – с. 16-21.
40. Куландин, А.А. Энергетические системы космических аппаратов / А.А. Куландин, С.В. Тимашов, В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1972. – 427 с.

41. Шереметьевский, Н.Н. Электромеханика и мирный космос / Н.Н. Шереметьевский // Электротехника. – 1987. – №6. – с.10-16.

42. Грузков, С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: [Учеб. для вузов]: в 2Т.: Т.1: Системы электроснабжения летательных аппаратов / [С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М. Сугробов и др.]. – М.: Издат. МЭИ, 2005. – 568 с.

43. Грузков, С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: [Учеб. для вузов]: в 2Т.: Т.2: Элементы и системы электрооборудования – приемники и источники энергии / [С.А. Грузков, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев и др.]. – М.: Издат. МЭИ, 2005. – 552 с.

44. Месенжик, Я.З. Силовые кабельные линии для погружных электросистем / Я.З. Месенжик, А.А. Осягин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.

45. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В.А. Бормосов, М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, И.Е. Смольская. Режим доступа: www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article (13.09.2004).

46. Ставинский, А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) / А.А. Ставинский // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – с. 43-47.

47. Ставинский, А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) / А.А. Ставинский // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – №6. – с. 33-38.

48. Ставинский, А.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – №11(87). – с. 74-81.

49. Пентегов, И.В. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами / И.В. Пентегов, С.В. Римар, А.В. Лавренюк, О.И. Пет-

ренко // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – №14. – с. 86-97.

50. Морозовский, Ю. Новая технология Unicore для изготовления магнитопроводов [Электронный ресурс] / Ю. Морозовский // Режим доступа: www.kit-e.ru/articles/carcuit/2006-8-184.php.

51. Матухно, В.А. Методика оценки технологичности навивки магнитных систем трансформаторов / В.А. Матухно // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – №2(78). – с. 48-54.

52. Levin, M.I. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов / [M.I. Levin, И.В. Пентегов, С.В. Римар, А.В. Lavreniuk] // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – №1. – с. 40-44.

53. Матеріали інформаційного сайту компанії Cogent Powre Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Multi-Step-Lap-Core-Technical-Final.pdf>.

54. Матеріали інформаційного сайту Dotorresg.wordpress.com [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dotorresg.files.wordpress.com/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-a-khparde2004.pdf>

55. Матеріали інформаційного сайту компанії Cogent Powre Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Uncut-Toroidal-Cores-Final.pdf>.

56. Матеріали інформаційного сайту Academia.edu [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.academia.edu/2165784/impact_of_the_joint_design_parameters_on_transformer_losses.

57. Матеріали інформаційного сайту компанії АЕМ Unicore [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.aemcores.com.au/technology/unicore/distributed-gap-dg-cores>.

58. Матеріали інформаційного сайту компанії Cogent Power Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cogentpowerinc.com/PDFs/Cogent-Distributed-Gap-Wound-Cores-Final.pdf>.

59. Троицкий, В.А. Магнитодиэлектрики в силовой электротехнике / В.А. Троицкий, А.И. Ролик, А.И. Яковлев.– Киев: Техника, 1983. – 176 с.

60. Матеріали інформаційного сайту компанії Magnetics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mag-inc.com/products/powder-cores>.

61. Веселовский, О.Н. У истоков электромеханики. Столетие трансформатора. / О.Н. Веселовский, И.П. Копылов // Электротехника. – 1984. – №11. – с. 62-63.

62. Радионов, В.Г. Расчет потерь и тока холостого хода силовых трансформаторов из холоднокатаной стали / В.Г. Радионов, А.И. Шугайло, И.Я. Эйнгорн // Электротехника. – 1967. – №8. – с. 54-61.

63. Кравченко, А.Н. Снижение потерь холостого хода силовых трансформаторов / А.Н. Кравченко, А.И. Шугайло // Технічна електродинаміка. – 1984. – №2. – с. 5-7.

64. Кустов, С.С. Основные направления развития конструкций трансформаторов I – II габаритов / С.С. Кустов // Электрические станции. – 1995. – №8. – с. 62-67.

65. Янсон, Ю. Группа «Трансформер» приступила к производству трансформаторов из аморфных сплавов / Ю. Янсон // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – №12. – с.43-44.

66. Кравченко, А. Сухие энергосберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев: Радиоаматор, 2013. – №4. – с. 12-15.

67. Кравченко, А. Масляные энергосберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев: Радиоаматор, 2013. – №5. – с. 14-17.

68. Pefkov, R. Optimum design of High-Power, High-Frequency Transformer / R. Pefkov // Transaction on power electronics. IEEE. – 1996. – №11(1). – p. 33-42.

69. Chernoplekov, N.A. State of the art in applied high-current superconductivity / N.A. Chernoplekov // Physics-Uspekhi. – 2002. – № 45(6). – p. 659-665.

70. Baldwin, Thomas L. Design Optimization of High-Temperature Superconducting Power Transformers / Thomas L. Baldwin, John I. Ykema, Allen L. Cliff, Jaames L.

Langston // Transactions on applied superconductivity, IEEE. – 2003. – №13(2). – p. 2344-2347.

71. Chernoplekov, N.A. Application of superconductivity to ship electrical equipment / N.A. Chernoplekov, L.I. Chubraeva // Unconventional electromechanical and electrical systems: Proceedings of the 6th international conference. – Szczecin: Politechnika Szczecinska, 2004. – p. 471-476.

72. Пуйло, Г.В. Эффективность применения обмоток с высокотемпературной сверхпроводимостью в силовых трансформаторах / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпаная // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №14(90). – с. 43-52.

73. Молотилев, Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочное издание / [Б.В. Молотилев, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко и др.]. – М.: Металлургия, 1969. – 168 с.

74. Аморфные сплавы / Департамент технического развития ОАО «МРС Центр» // Обзор новых технологий в электроэнергетике. – 2011. – №1. – с. 6-13.

75. Казаджан, Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов: под ред. В.Д. Дурнева / Л.Б. Казаджан. – М. Наука и технологии. – 2000. – 224 с.

76. Авдеева, Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массоустойчивые показатели) / Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №4. – с. 15-20.

77. Авдеева, Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) / Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – с. 13-17.

78. Розов, В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения / В.Ю. Розов. – Киев: 1995. – 42 с. – (препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; №772).

79. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. – М.: ВНИИ стандартэлектро, 1989. – 23 с.

80. Григорьев, Б.П. Актуальные проблемы снижения физических полей судов / Б.П. Григорьев // Труды международной конференции по судостроению: Секция F. Судовая электродинамика, магнетизм и гидродинамика. – Спб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1994. – с. 3-7.

81. Ткаченко, В.А. Победа над магнитной миной / В.А. Ткаченко // Техника и вооружение. – 1971. – №10. – с. 10-15.

82. ДСТУ 2465 – 94. Сумісність технічних засобів. Електромагнітна стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. – [Чинний від 01–01–95]. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. – (Національний стандарт України).

83. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломощном исполнении / В.С. Лупиков, А.Г. Середя, И.В. Крюкова [и др.] // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – №2. – с. 26-33.

84. Авдеева, Е.А. Способы обеспечения электромагнитной совместимости трехфазных трансформаторов / Е.А. Авдеева // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2013. – с. 39-45.

85. Макарова, А.В. Оптимальные соотношения размеров трансформаторов с магнитопроводом прямоугольного сечения / А.В. Макарова // Электротехника. – 1988. – №7. – с. 2-6.

86. Пуйло, Г.В. Оптимальные соотношения размеров элементов активной части электромагнитных преобразователей / Г.В. Пуйло // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково-техн. зб. – 1998. – вип. 51. – с. 25-29.

87. Ставинский, А.А. Особенности тепловых процессов в трехфазных пространственных трансформаторах с параллельными стенками обмоточных окон / А.А. Ставинский, В.К. Чекунов, Р.А. Ставинский, О.О. Плахтырь // Электротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – с. 65-67.

88. Ставинський, Р.А. Трифазні трансформатори з ефективним використанням конструктивного об'єму: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати» / Р.А. Ставинський. – Одеса, 2003. – 20 с.

89. Плахтир, О.О. Удосконалення трифазних трансформаторів з просторовими магнітопроводами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати» / О.О. Плахтир. – Одеса, 2005. – 24 с.

90. Ставинский, А.А. Результаты исследования и технические решения по улучшению распределения магнитного поля в пространственных стыковых магнітопроводах трехфазных статических индукционных устройствах / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, О.О. Плахтырь // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково-техн. зб. – 2004. – вип. 62 – с. 117-121.

91. Ставинский, А.А. Сравнение массостоймых показателей трехфазных планарной и пространственной аксиальной статических электромагнитных систем с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – №12(88). – с. 35-43.

92. Ставинский, А.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №14(90). – с. 53-60.

93. Пат. 100077 України МПК НО1F 27/24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва та інші; Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – №а201104987; заявл. 20.04.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл. №21.

94. Рішення про видачу патенту України №U201501065 МПК НО1F 27/24. Роз'ємний магнітопровід компактної електромагнітної системи / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва. Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – заявл. 10.02.2015.

95. Пат.65005 Україна МПК НО1F 27-24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва та інші; Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – №и201104986; заявл. 20.04.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. №22.

96. Трансформаторы серий ОСМ, ОСВМ, ОСВМС, ОСЗМ, ОСЗМВ, ТСЗМ и ТСЗМВ (мощностью от 0,063 до 100 кВ·А). Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОБТ.140.240. – М.: Информэлектро, Зак. 1265. – 21с.

97. Ставинський, А.А. Геометричні співвідношення та масо-вартісні показники трифазних просторових трансформаторів малої потужності / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтир / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2000. – Вип.1(12). – с. 181-183.

98. Ставинский, А.А. Зависимости потерь трехфазных пространственных трансформаторов с параллельными стенками обмоточных окон от геометрических соотношений активной части / А.А. Ставинский, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский // Вісник Східноукр. нац. університету ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ. – 2003. – №4. – с. 95-100.

99. Авдеева, Е.А. Особенности структур вариантов трехфазного пространственного витого магнитопровода с двухконтурными фазными элементами стержней / Е.А. Авдеева // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – с. 59-65.

100. Рішення про видачу патенту України №U201414186 МПК НО1F 27/24, НО1G 41/02. Спосіб виготовлення магнітопроводу трифазного статичного індукційного пристрою / А.А Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва. Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – заявл. 30.12.2014.

101. Рішення про видачу патенту України №U201414182 МПК НО1F 27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою / А.А Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва. Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – заявл. 30.12.2014.

102. Рішення про видачу патенту України №U201414188 МПК НО1F 27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу трифазного індукційного статичного пристрою / А.А Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва. Заявник та власник НУК імені адмірала Макарова. – заявл. 30.12.2014.

103. Пуйло, Г.В. Автоматизация проектирования силовых трансформаторов на основе поэтапной оптимизации / Г.В. Пуйло, В.М. Суханов, В.П. Чайковский // Электромашиностроение и электрооборудование: Межвед. науч. техн. сб. – 1982. – вып. 34. – с. 53-58.

104. Бородулин, Ю.Б. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов / Ю.Б. Бородулин, В.А. Гусев, Г.В. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.

105. Автоматизированное проектирование электрических машин: Учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по спец. «Электромеханика» / [Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, П.П. Шишкин; под ред. Ю.Б. Бородулина]. – М.: Высш. шк., 1989. – 280 с.

106. Пентегов, И.В. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации / И.В. Петегов, С.В. Римар, Е.П. Стемковский // Технічна електродинаміка. – 2002. – №1. – с. 22-28.

107. Пуйло, Г.В. Показатели конструктивной эффективности силовых трансформаторов / Г.В. Пуйло, Е.В. Трищенко, Н.М. Кокуца // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвід. наук.-техн. зб. – 2004. Вип. 63. – с. 94-98.

108. Пентегов, И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов / И.В. Пентегов, С.В. Римар // Электричество. – 2006. – №3. – с. 35-47.

109. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества: [Учеб. пособие для студентов вузов] / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

110. Андронов, С.А. Методы оптимального проектирования: Текст лекций / С.А. Андронов. – СПб.: СПб. ГУАП, 2001. – 169 с.

111. Казанский, В.М. К вопросу о сравнении асинхронных электродвигателей торцевого и цилиндрического исполнений малой мощности / В.М. Казанский, В.Н. Зонов, В.М. Британчук // Материалы межвузовской научно-технической конференции «Асинхронные микромашины». – Каунас: КПИ. – 1969. – с. 216-219.

112. Паластин, Л.М. Электрические машины автономных источников питания / Л.М. Паластин. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.

113. Игнатов, В.А. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления / В.А. Игнатов, К.Я. Вильданов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

114. Ставинский, А.А. Анализ массостоймых показателей однофазного тороидального трансформатора / А.А. Ставинский, А.П. Коновалов, Р.А. Ставинский // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. № 57. – с. 85-89.

115. Авдеева, Е.А. Результаты сравнительного анализа трехфазных планарной и аксиальной пространственной электромагнитных систем трансформаторов с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон / Е.А. Авдеева // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2012. – с. 49-57.

116. Авдеева, Е.А. Структурные преобразования статических электромагнитных систем трехфазных трансформаторов для систем электрооборудования подводных аппаратов / Е.А. Авдеева // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2013. – с. 465-467.

117. Авдеева, Е.А. Массостоймые показатели трехфазных пространственных аксиальных электромагнитных систем трансформаторов для встраивания в оболочки ограниченного диаметра / Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції. – Севастопіль: Сев. НТУ, 2013. – с. 123-125.

118. Авдеева, Е.А. Структурные преобразования статических электромагнитных систем трехфазных трансформаторов для систем электрооборудования подводных аппаратов / Е.А. Авдеева // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. – 431-433.

119. Блинцов, В.С. Особенности проектирования трансформаторов электроэнергетических систем подводных и авиационно-космических аппаратов / В.С.

Блинцов, Е.А. Авдеева // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – №3-4 (444). – с. 49-52.

120. Авдеева, О.А. Мінімізація контурного об'єму просторової електромагнітної системи трифазного трансформатора з витим стиковим магнітопроводом / О.А. Авдеева, А.Г. Кисельова // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. 39-40.

121. Пуйло, Г.В. Построение обобщенных математических моделей трансформаторных устройств / Г.В. Пуйло // Електромашинобудування та електрообладнання: міжвідомчий наук.-техн. зб. – 1996. Вип. 48. – с. 89-95.

122. Ставинский, А.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч.1. Варианты и метод оценки преобразований / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Электричество. – 2014. – №9. – с. 34-43.

123. Пальчиков, О.О. Показатели массы и стоимости трансформаторов с вращающимся магнитным полем для преобразования числа фаз / О.О. Пальчиков // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв, 2014. – №5(455). – с. 67-72.

124. Ставинский, А.А. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей / А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №5. – с. 37-44.

125. Ставинский, А.А. Усовершенствование тихоходных биротативных асинхронных электроприводов на основе специальных контрроторных двигателей / А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №15(91). – с. 259-261.

126. Ставинский, А.А. Оптимальные геометрические соотношения вариантов тихоходного погружного асинхронного короткозамкнутого двигателя с внутренним и внешним ротором / А.А. Ставинский, О.О. Пальчиков // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. 67-75.

127. Авдеева, Е.А. Модель массы и стоимости трехфазной радиальной электромагнитной системы с ромбическими обмоточными окнами и прямоугольным сечением двухконтурных стержневых частей шихтованного магнитопровода // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 7(83). – с. 53-57.

128. Авдеева, Е.А. Потери активной мощности радиальной электромагнитной системы трехфазного трансформатора с ромбическими обмоточными окнами / Е.А. Авдеева // *Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах: Сб. науч. трудов Ульяновского государственного технического университета*. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – с. 172-181.

129. Авдеева, Е.А. Определение параметров технологических заготовок секций витого трехфазного магнитопровода с шестигранным сечением стержней / Е.А. Авдеева // *Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю*. – Миколаїв: НУК, 2013. – с. 82-86.

130. Авдеева, Е.А. Массо-стоимостные показатели пространственных аксиальных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых магнитопроводов / Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №1. – с. 15-20.

131. Авдеева, Е.А. Потери активной мощности в трехфазных трансформаторах с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых пространственных магнитопроводов / Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №2. – с. 14-18.

132. Ставинский, А.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч.2. Примеры структур и результатов преобразований / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // *Электричество*. – 2014. – №10. с. 28-34.

133. Авдеева, О.А. Порівняльний аналіз масовартісних показників статичних трифазних просторових електромагнітних систем з витими стиковими магнітопроводами / О.А. Авдеева // *Збірник наукових праць НУК*. – 2014. – №3(453). – с.32-38.

134. Ставинский, Р.А. Сравнительный анализ периферийных поверхностей охлаждения обмоток трансформаторов малой мощности планарной и пространственной электромагнитных систем / Р.А. Ставинский // Збірник наукових праць НУК. – 2004. – № 3(396). – с. 104-110.

135. Авдєєва, О.А. Порівняння показників енергетичної ефективності трифазних трансформаторів з витими трисекційними магнітопроводами / О.А. Авдєєва // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукр. наук.-технічн.конференції з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. 46-51.

136. Матеріали інформаційного сайту «ОАО Электрозавод» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/pk_5_8.pdf.

ДОДАТКИ

Додаток А. Обґрунтування ідентичності відносних складових показників технічного рівня трансформатора і реактора, що є функціями універсальних геометричних керованих змінних

Аналогічно ЦФ (2.1) будь-яка структура однофазної або багатофазної ЕМС, зокрема трифазного реактору, може бути подана у вигляді

$$F_{\text{тp}i} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{тp}}^3 K_i \Pi_{\text{тp}i}^*}. \quad (\text{A.1})$$

Аналогічно складовим $\Pi_{\text{тt}}$, до показника вихідних даних і ЕМН трифазного реактору $\Pi_{\text{тp}}$ входять середнє значення індукції стрижня B_c , номінальна потужність Q_p , щільність фазного струму J_p та лінійна напруга U_p обмотки при частоті струму f_1 .

Перерізи ефективних витків обмоток високої (низької) напруги $S_{\text{в}1(2)}$ і $S_{\text{в}\Delta(\text{Y})}$ зі схемами з'єднань фаз Δ/Y та Y/Δ , а також номінальними струмами $I_{1(2)}$, I_p відповідно первинної (вторинної) обмоток ТТ і обмотки трифазного реактору визначаються співвідношеннями:

$$S_{\text{в}1} = I_1 / (\sqrt{3} J_1); \quad (\text{A.2})$$

$$S_{\text{в}2} = I_2 / J_2; \quad (\text{A.3})$$

$$S_{\text{в}\Delta} = I_p / (\sqrt{3} J_p); \quad (\text{A.4})$$

$$S_{\text{в}\text{Y}} = I_p / J_p, \quad (\text{A.5})$$

де $I_{1(2)}$ і I_p визначаються відомими виразами [20 – 23]:

$$I_1 = S_H \cos \varphi_2 / (\sqrt{3} U_1 \eta \cos \varphi_1); \quad (\text{A.6})$$

$$I_2 = S_H / (\sqrt{3} U_2); \quad (\text{A.7})$$

$$I_p = Q_H / (\sqrt{3}U_p). \quad (\text{A.8})$$

Площі обмоткових вікон ТТ і трифазного реактору з замкненим магнітопроводом $S_{от}$ і $S_{ор}$ визначаються числами витків первинної (вторинної) обмотки ТТ $w_{1(2)}$ і обмотки трифазного реактору $w_{p\Delta(Y)}$:

$$S_{от} = 2(S_{B1}w_1 + S_{B2}w_2)/K_{30}; \quad (\text{A.9})$$

$$S_{ор} = 2S_{B\Delta} w_{p\Delta}/K_{30} = 2S_{BY} w_{pY}/K_{30}. \quad (\text{A.10})$$

Після підстановки (А.2), (А.3) і (А.4) – (А.8), вирази (А.9) і (А.10) перетворюються:

$$S_{от} = \frac{2S_H}{\sqrt{3}K_{30}} \left(\frac{w_1 \cos \varphi_2}{\sqrt{3}U_1 J_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{w_2}{U_2 J_2} \right); \quad (\text{A.11})$$

$$S_{ор} = \frac{2Q_H w_{p\Delta}}{3U_p J_p K_{30}} = \frac{2Q_H w_{pY}}{\sqrt{3}U_p J_p K_{30}}. \quad (\text{A.12})$$

Електрорушійна сила одного витка (одиниця виміру – В) при вимірюванні індукції стрижня ТТ (трифазного реактору) $B_{ст(p)}$ і f_1 в Тл і Гц, а також вимірюванні площі ЕТС поперечного перерізу стрижня ТТ (трифазного реактору) $S_{ст(p)}$ в м², визначаються відомим виразом [20 – 23]

$$E_B = 4,44 f_1 B_{ст(p)} S_{ст(p)}. \quad (\text{A.13})$$

На основі (А.13) визначаються $w_{1(2)}$ і $w_{p\Delta(Y)}$:

$$w_1 = K_{U1} U_{\phi 1} / E_B = K_{U1} U_1 / (4,44 f_1 B_{ст} S_{ст}); \quad (\text{A.14})$$

$$w_2 = K_{U2} U_{\phi 2} / E_B = K_{U2} U_2 / (4,44 \sqrt{3} f_1 B_{ст} S_{ст}); \quad (\text{A.15})$$

$$w_{p\Delta} = U_{p\phi} / E_B = U_p / (4,44 f_1 B_{cp} S_{cp}); \quad (A.16)$$

$$w_{pY} = U_{p\phi} / (\sqrt{3} E_B) = U_p / (4,44 \sqrt{3} f_1 B_{cp} S_{cp}), \quad (A.17)$$

де $U_{\phi 1(2)}$ і $U_{p\phi}$ – фазні напруги первинної (вторинної) обмотки ТТ і обмотки трифазного реактору.

Вирази (A.11), (A.12) після підстановки (A.14) – (A.17) перетворюються:

$$S_{от} = \frac{S_H}{6,66 f_1 B_{ст} K_{30} S_{ст}} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{J_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{K_{U2}}{J_2} \right) = \frac{\Pi_{тТ}}{K_{30} S_{ст}}; \quad (A.18)$$

$$S_{оп} = \frac{Q_H}{6,66 f_1 B_{cp} J_p K_{30} S_{cp}} = \frac{\Pi_{тр}}{K_{30} S_{cp}}, \quad (A.19)$$

де показники $\Pi_{тТ}$ і $\Pi_{тр}$, що входять до (2.1) і (A.1) визначаються виразами:

$$\Pi_{тТ} = \frac{S_H}{6,66 f_1 B_{ст}} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{J_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{K_{U2}}{J_2} \right); \quad (A.20)$$

$$\Pi_{тр} = Q_H / (6,66 f_1 B_{cp} J_p). \quad (A.21)$$

При прийнятій конструкції ЕМС з обмотковими котушками, що чергуються, маса первинної (вторинної) обмотки ТТ $m_{w1(2)}$ і маса обмотки трифазного реактору m_{wp} визначаються:

$$m_{w1(2)} = 3 \gamma_o S_{B1(2)} l_{WT} w_{1(2)}; \quad (A.22)$$

$$m_{wp} = 3 \gamma_o S_{B\Delta(Y)} l_{wp} w_{p\Delta(Y)}, \quad (A.23)$$

де $l_{WT(p)}$ – середня довжина витка котушки обмотки ТТ (трифазного реактора).

Після підстановки (A.2) – (A.8), а також (A.14) – (A.17), (A.22) і (A.23) перетворюються:

$$m_{w1(2)} = 0,39\gamma_o I_{1(2)} K_{U1(2)} U_{1(2)} l_{WT} / (J_{1(2)} f_1 B_{CT} S_{CT}); \quad (A.24)$$

$$m_{WP} = 0,39\gamma_o I_p U_p l_{WP} / (J_p f_1 B_{CP} S_{CP}). \quad (A.25)$$

Виходячи з (А.6) – (А.8), (А.20), (А.21) і (А.24), (А.25) сумарна маса обмоток ТТ і маса обмотки трифазного реактору визначаються:

$$m_{WT} = m_{w1} + m_{w2} = 1,5\gamma_o \Pi_{TT} l_{WT} / S_{CT}; \quad (A.26)$$

$$m_{WP} = 1,5\gamma_o \Pi_{TP} l_{WP} / S_{CP}. \quad (A.27)$$

На основі (А.20), (А.21) вирази (А.26), (А.27) перетворюються до вигляду:

$$m_{WT} = 1,5\gamma_o K_{30} S_{OT} l_{WT}; \quad (A.28)$$

$$m_{WP} = 1,5\gamma_o K_{30} S_{OP} l_{WP}. \quad (A.29)$$

Електричні втрати в еквівалентних первинній і вторинній обмотках з котушками, що чергуються ($J_1 = J_2 = J_o$) і в обмотці трифазного реактору $P_{елр}$ розраховуються у відповідності з [20 – 23]:

$$P_{ел1(2)} = K_{по} J_o^2 m_{w1(2)}; \quad (A.30)$$

$$P_{елр} = K_{по} J_p^2 m_{WP}, \quad (A.31)$$

ВКЗ ТТ P_{WT} і втрати навантаження обмотки трифазного реактору [23] визначаються на основі (А.24), (А.25) і (А.30), (А.31):

$$P_{WT} = K_{дWT} (P_{эл1} + P_{эл2}) = 1,5K_{дWT} K_{по} \gamma_o J_o^2 \Pi_{TT} l_{WT} / S_{CT}; \quad (A.32)$$

$$P_{WP} = K_{дWP} P_{елр} = 1,5K_{дWP} K_{по} \gamma_o J_p^2 \Pi_{TP} l_{WP} / S_{CP}, \quad (A.33)$$

де $K_{двт}$ і $K_{дwp}$ – коефіцієнти додаткових втрат обмоток під навантаженням ТТ і трифазного реактору.

При виразі геометричних параметрів ЕМС через КЗ α_m , λ_0 і α_c розрахункові вирази визначення $I_{wt(p)}$ і $S_{ст(p)}$, а також об'єми елементів і маси ідентичних структур і конструкцій магнітопроводів і обмоток, що виставлені у відносних одиницях, є однаковими для трансформаторів і реакторів [92, 122]:

$$m_{wt(p)} = \sqrt[4]{\Pi_{тг(p)}^3} \Pi_{mwt(p)}^*; \quad (A.34)$$

$$\Pi_{mwt}^* = \Pi_{mwp}^*; \quad (A.35)$$

$$m_{mt(p)} = \sqrt[4]{\Pi_{тг(p)}^3} \Pi_{mmt(p)}^*; \quad (A.36)$$

$$\Pi_{mmt}^* = \Pi_{mmp}^*, \quad (A.37)$$

де $m_{wt(p)}$ і $\Pi_{mwt(p)}^*$ – маса і безрозмірний показник маси обмотки ТТ (трифазного реактору);

$m_{mt(p)}$ і $\Pi_{mmt(p)}^*$ – маса і безрозмірний показник маси магнітопроводу ТТ (трифазного реактору).

З (A.34) – (A.37) випливає, що визначені у безрозмірних одиницях ВНР і ВКЗ ТТ та втрати в магнітопроводах і обмотках ідентичних структур і конфігурацій електромагнітно еквівалентних ЕМС ТТ і трифазного реактору є однаковими при однакових коефіцієнтах співвідношень питомих втрат $K_{утгii}$ і $K_{утрii}$ (2.2)

$$K_{утгii} = K_{утрii} = K_{yii}.$$

У зв'язку з ідентичністю КЗ і вигляду правих частин вихідних рівнянь відповідно (A.18), (A.19) і (A.28), (A.29), а також (A.35), (A.37), ЦФ (2.1) ТТ та ЦФ (A.1) трифазного реактору з однаковими структурою і конструкцією ЕМС містять ідентичні показники $K_i \Pi_{тгi}^*$ та $K_i \Pi_{тргi}^*$ і відрізняються тільки показниками $\Pi_{тг}$ та $\Pi_{трг}$.

З доведеної в додатку А аналогії випливає практичний висновок про спрощення рішення задач визначення оптимальних геометричних співвідношень та порівняльного аналізу ЕМС трансформаторів зі складними конфігураціями обмоткових вікна, який наведено у підрозділі 2.1.

Додаток Б. Методика розрахунку варіантів активної частини трифазного трансформатора з використанням цільових функцій відносних показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними (на прикладі трансформатора ТСЗМ-40-74.ОМ.5)

Трансформатори ТСЗМ (виробник Холдинговая компания «Электrozавод», Росія, Москва) призначені для використання в системах електрообладнання суден і кораблів (виконання ТСЗМВ) необмеженого району плавання та відрізняються покращеними масогабаритними показниками [96, 136]. За конструктивним виконанням ТТ ТСЗМВ є сухими та краплезахищеними.

Обрана для розрахунків потужність та інші дані з діапазону [96, 136] відповідають конкретному виконанню ТТ випуску 1982 року (рис. 2.3), який є складовою обладнання лабораторної підстанції кафедри «Суднові електроенергетичні системи» НУК імені адмірала Макарова. Технічна характеристика вказаного ТТ ТСЗМ-40-74.ОМ5 (у подальшому «ТТ-40»): номінальна потужність $S_n = 40 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $f_1 = 50 \text{ Гц}$; зміна напруги $\Delta U_{\%} = 2,8 \%$; коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,968$; номінальна напруга $U_{1(2)} = 380(230) \text{ В}$; Схема з'єднання обмоток $Y/Y_n - 0$; Загальна конструктивна схема та габаритно-приєднувальні розміри «ТТ-40», який на даний час перебуває у виробництві, наведені на рис. Б-1 [136]. Конструкція його активної частини відповідає схемі (рис. 4.3) і уявляє нероз'ємну (безстикову) ЕМС з круговими УК та вмотаними обмотками [26]. Інші відомості, зокрема креслення, обмоткові дані та ЕМН «ТТ-40» є власністю розробника та у відкритому доступі відсутні, також є невідомою марка використаної анізотропної ЕТС. Виміряні (при частковому розбиранні) розміри (мм) елементів його ЕМС наведено на рис. Б-2. Згідно [96, 136] загальна маса «ТТ-40» складає $m_{\text{ТТ40}} = 268 \text{ кг}$.

Коефіцієнти напруг K_{U1} і K_{U2} [21] первинної і вторинної обмоток «ТТ-40»:

$$K_{U1} = 1 - \Delta U_{\%} / 200 = 1 - 2,8 / 200 = 0,986 ;$$

$$K_{U1} = 1 + \Delta U_{\%} / 200 = 1 + 2,8 / 200 = 1,014 .$$

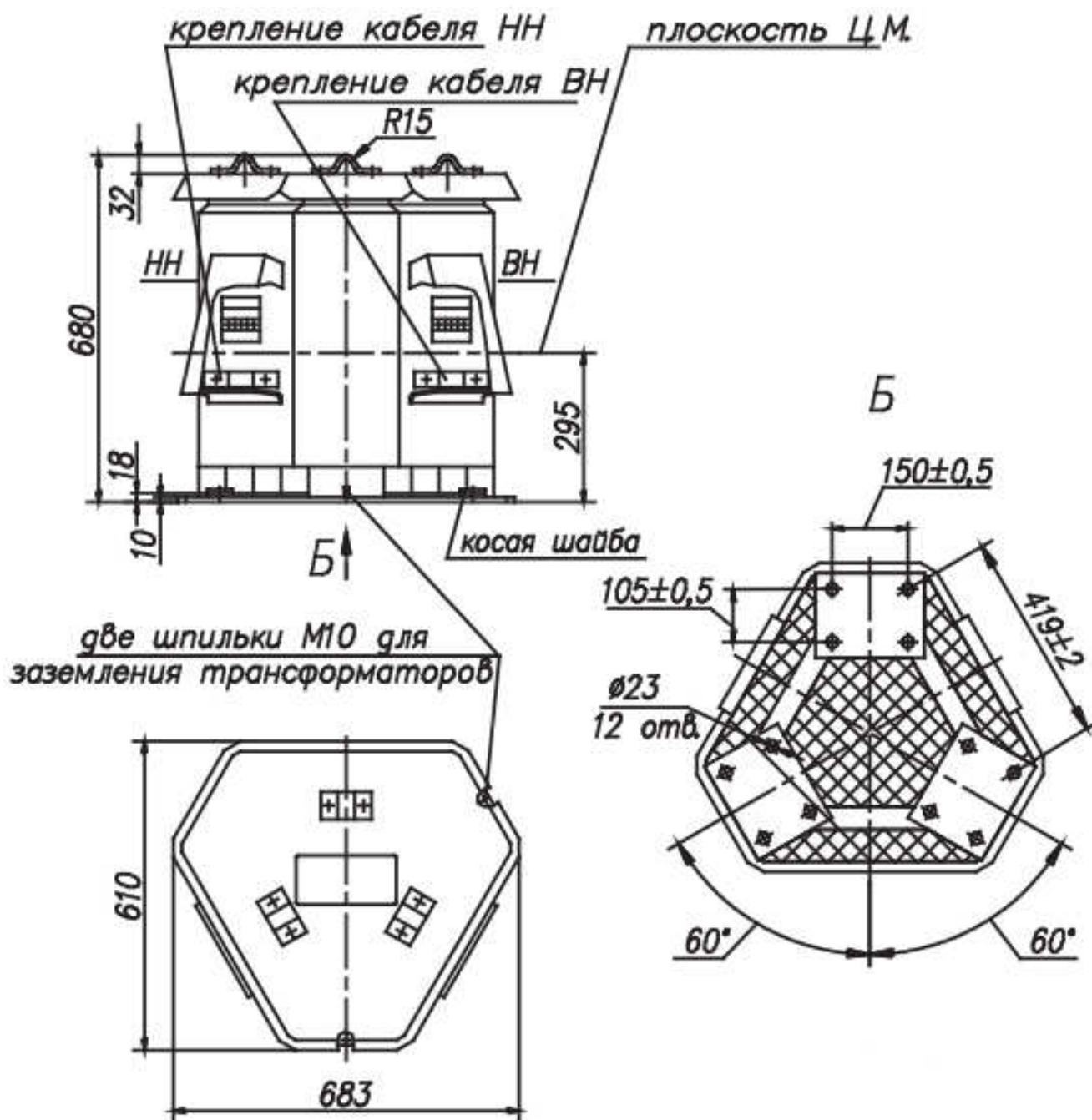


Рис. Б-1. Габаритно-приеднувальні розміри трифазного трансформатору ТСЗМ-40-74.ОМ5

Відносні геометричні КЗ ЕМС «ТТ-40», відповідно до рис. Б-2, складають:

$$a'_M = D'_{\text{НВК}} / D'_{\text{ВВК}} = 412 / 208 = 1,98 ;$$

$$\lambda'_0 = h'_{\text{ОВК}} / b'_{\text{ОВК}} = 350 / 170 = 2,059 .$$

Показник вихідних даних та ЕМН (2.2) «ТТ-40» має величину

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ТТ40}} &= \frac{S_{\text{Н}} \cdot 10^3}{6,66 J_0 B_c f_1} = \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{\eta \cos \varphi_1} + K_{U2} \right) = \\ &= \frac{40 \cdot 10^3}{6,66 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 50} \left(\frac{0,986 \cdot 0,85}{0,968 \cdot 0,96} + 1,014 \right) = 7,192 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^4, \end{aligned}$$

де з наведеного у підрозділі 2.3 діапазону ЕМН обираються значення $J_0 = 2 \cdot 10^6$ А/м²; $B_c = 1,6$ Тл, також приймаються марка ЕТС 3407 і значення енергетичних коефіцієнтів навантаження та «ТТ-40»:

$$\cos \varphi_2 = 0,85 ; \quad \cos \varphi_1 = 0,96 .$$

На основі прийнятих ЕМН і $\cos \varphi_{1(2)}$ та (4.14), (4.15) визначаються функція $f'_{\text{ВК}}(a'_M, \lambda'_0)$ та приблизне значення коефіцієнту заповнення обмоткового вікна K'_{30} «ТТ-40» з розмірами ЕМС (рис. В-2):

$$\begin{aligned} f'_{\text{ВК}}(a'_M, \lambda'_0) &= \lambda'_0 (1 - 0,0718 a'_M)^2 (a'_M - 1)^2 = \\ &= 2,059 (1 - 0,718 \cdot 1,98^2) (1,98 - 1)^2 = 1,455 ; \\ K'_{30} &= (1,555)^4 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[(D'_{\text{ВК}})^4 K_{3c} K_{\text{КК}} f'_{\text{ВК}}(a'_M, \lambda'_0) \right] = \\ &= 5,847 \cdot 0,7808 \cdot 10^{-3} / (0,208^4 \cdot 0,97 \cdot 0,904 \cdot 1,455) = 0,177 . \end{aligned}$$

Отримане значення $K'_{30} = 0,177$ при $U_{1(2)} < 1000$ В відповідає нероз'ємній

(безстиків) конструкції ЕМС з вмотаними обмотками [26].

Показник (4.22) маси «ТТ-40»

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{1\text{BK}}^*\right)' &\approx 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/[K_{3c} K'_{30} K_{KK} f'_{BK}(a'_M, \lambda'_0)]}\right)^3 \{K_{3c} K_{KK} [(\lambda'_0 + 1)(1 - 0,0718 a'_M)(a'_M - 1)^2 + \\ &+ 0,65654(a'_M - 1)^3] + 3,48188 K'_{30} \lambda'_0 (1 - 0,0718 a'_M)^2 (a'_M - 0,07181) \gamma_0 / \gamma_c\} = \\ &= 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/(0,97 \cdot 0,177 \cdot 0,904 \cdot 1,455)}\right)^3 \{0,97 \cdot 0,904 \times \\ &\times [(2,059 + 1)(1 - 0,0718 \cdot 1,98)(1,98 - 1)^2 + 0,65654(1,98 - 1)^3] + 3,48188 \cdot 0,177 \cdot 2,059 \times \\ &\times (1 - 0,0718 \cdot 1,98)^2 (1,98 - 0,07181) 8900 / 7650\} = 30,436. \end{aligned}$$

Маса активної частини «ТТ-40» визначається на основі ЦФ (2.1)

$$m'_{\text{BK}} \approx \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT40}}}\right)^3 \left(\Pi_{1\text{BK}}^*\right)' = 7650 \left(\sqrt[4]{7,195 \cdot 10^{-5}}\right)^3 30,436 = 182 \text{ кг.}$$

Приблизна маса конструктивної частини m_{TK} «ТТ-40» складає

$$m_{\text{TK}} = m_{\text{TK40}} - m'_{\text{BK}} = 268 - 182 = 86 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт втрат активної потужності (2.12) «ТТ-40»

$$K'_{\text{yB2}} = \frac{K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{по}} J_0^2}{K_{\text{днз}} \gamma_c P'_{\text{пм}}} = \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,0 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 1,1} = 7,88,$$

де $P'_{\text{пм}} = 1,1$ Вт/кг – питомі втрати ЕТС 3407 при $B_c = 1,6$ Тл.

Показник втрат активної потужності «ТТ-40» з вище прийнятими ЕМН визначається на основі (4.30):

$$\begin{aligned}
\left(\Pi_{3BK2}^*\right)' &\approx 2,0665K_{ДНЗ} \left(\sqrt[4]{1/[K_{3C}K'_{30}K_{KK}f'_{BK}(a'_M, \lambda'_o)]}\right)^3 \{K_{3C}K_{KK}[(\lambda'_o + 1)(1 - 0,0718a'_M) \times \\
&\times (a'_M - 1)^2 + 0,65654(a'_M - 1)^3] + 3,48188K'_{yB2}K'_{30}\lambda'_o(1 - 0,0718a'_M)^2(a'_M - 0,07181)\} = \\
&= 2,0665 \cdot 1,34 \cdot \left(\sqrt[4]{1/(0,97 \cdot 0,177 \cdot 0,904 \cdot 1,455)}\right)^3 \{0,97 \cdot 0,904 \times \\
&\times [(2,059 + 1)(1 - 0,0718 \cdot 1,98)(1,98 - 1)^2 + 0,65654(1,98 - 1)^3] + 3,48188 \cdot 7,88 \cdot 0,177 \times \\
&\times 2,059 \cdot (1 - 0,0718 \cdot 1,98)^2(1,98 - 0,07181)\} = 142.
\end{aligned}$$

Втрати активної потужності «ТТ-40» у відповідності з (2.11) визначаються

$$P'_{\Sigma BB} = \gamma_c P'_{\Pi M} \left(\sqrt[4]{\Pi_{ТТ40}}\right)^3 \left(\Pi_{3BK2}^*\right)' = 7650 \cdot 1,1 \cdot \left(\sqrt[4]{7,192 \cdot 10^{-5}}\right)^3 \cdot 142 = 933 \text{ Вт.}$$

Величина коефіцієнту корисної дії «ТТ-40», що отримана за розробленою методикою та по прийнятим у даному додатку ЕМН і $\cos\varphi$, наближається до реального значення «ТТ-40»

$$\eta' = 1 - P'_{\Sigma BK} / (S_H \cos \varphi_2 + P'_{\Sigma BK}) = 1 - 933 / (4000 \cdot 0,85 + 933) = 0,973 \approx \eta.$$

Заміна «вмотаної» конструкції ЕМС на її виконання з витим стиковим магнітопроводом при $U_{1(2)} < 1000$ В призводить до підвищення K'_{30} до значення $K''_{30} = 0,3$.

Оптимізовані за критерієм мінімуму маси значення геометричних КЗ базової ЕМС (рис. 2.10) та ЕМС (рис. 4.3), які відповідають показникам, що наведені в табл. 3.1 і табл. 4.1, а також $K''_{30} = 0,3$ і $K_{KK} = 0,904$ відповідно складають [76, 130]:

$$\begin{aligned}
a_{\text{МПП}} &= 2,115; \quad \lambda_{\text{МПП}} = 2,76; \quad \alpha_{\text{МПП}} = 0,889 \text{ рад} = 50,9^\circ; \\
a''_M &= 2,292; \quad \lambda''_o = 2,38.
\end{aligned}$$

Геометричні розрахункові параметри базової ЕМС, що задовольняє умовам еквівалентності електромагнітної потужності відповідно до ЕМС «ТТ-40»,

визначаються з використанням (3.9):

$$D_{\text{ВПШ}} = \sqrt[4]{8\Pi_{\text{ТТ40}} / \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{З0}}'' \lambda_{\text{ОПШ}} (a_{\text{МПШ}} - \sin(\alpha_{\text{СПШ}}/2))^2 \sin \alpha_{\text{СПШ}} \right]} =$$

$$= \sqrt[4]{8 \cdot 7,192 \cdot 10^{-5} / \left[0,97 \cdot 0,3 \cdot 2,76 \cdot (2,115 - \sin(0,889/2))^2 \sin 0,889 \right]} = 0,134 \text{ м.}$$

Розміри боків перерізу стрижня та їх співвідношення в базовій ЕМС (рис. 2.10), що відповідає «ТТ-40», визначаються на основі (3.3) і (3.4):

$$a_{\text{с}} = D_{\text{ВПШ}} \cos(\alpha_{\text{СПШ}}/2) = 0,134 \cos(0,889/2) = 0,121 \text{ м;}$$

$$b_{\text{с}} = D_{\text{ВПШ}} \sin(\alpha_{\text{СПШ}}/2) = 0,134 \sin(0,889/2) = 0,058 \text{ м;}$$

$$\lambda_{\text{СП}} = 0,121/0,058 = 2,1.$$

Значення геометричних КЗ $\lambda_{\text{ОПШ}}=2,76$ і $\lambda_{\text{СП}}=2,1$, які розраховані за розробленою у роботі методикою, знаходяться у діапазоні раціональних геометричних співвідношень базової планарної ЕМС з прямокутними УК та шихтованим магнітопроводом [20, 21, 23, 85].

Функція (4.14) для $a''_{\text{М}}$ і $\lambda''_{\text{О}}$ визначається

$$f''_{\text{ВК}}(a''_{\text{М}}, \lambda''_{\text{О}}) = \lambda''_{\text{О}} (1 - 0,0718 a''_{\text{М}})^2 = 238 \cdot (1 - 0,0718 \cdot 2,292)^2 (2,292 - 1)^2 = 2,773.$$

Розрахункові діаметри та геометричні параметри магнітопроводу варіанту ЕМС схеми (рис. 4.3) з $K''_{\text{З0}} = 0,3$ та $\Pi_{\text{ТТ}}$, що дорівнює $\Pi_{\text{ТТ40}}$, визначаються з використанням (4.2), (4.5), (4.6) і (4.15):

$$D''_{\text{ВБК}} = 1,555 \sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ40}} / \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{З0}}'' K_{\text{КК}} f''_{\text{ВК}}(a''_{\text{М}}, \lambda''_{\text{О}}) \right]} =$$

$$= 1,555 \sqrt[4]{7,192 \cdot 10^{-5} / (0,97 \cdot 0,3 \cdot 0,904 \cdot 2,773)} = 0,155 \text{ м;}$$

$$D''_{\text{НБК}} = a''_{\text{М}} D''_{\text{ВБК}} = 2,292 \cdot 0,155 = 0,335 \text{ м;}$$

$$b''_{\text{ОВК}} = 0,933 D''_{\text{ББК}} (1 - 0,0718 a''_M) = 0,933 \cdot 0,155 \cdot (1 - 0,0718 \cdot 2,292) = 0,121 \text{ м};$$

$$h''_{\text{ОВК}} = \lambda''_0 b''_{\text{ОВК}} = 2,38 \cdot 0,121 = 0,287 \text{ м};$$

$$b''_{\text{СБК}} = \sqrt{3} a''_M D''_{\text{ББК}} / 2 = \sqrt{3} \cdot 2,292 \cdot 2,38 / 2 = 0,308 \text{ м}.$$

Розраховані за створеною у роботі методикою геометричні розміри параметрів та елементів ЕМС схеми (рис. 4.3) з показником $\Pi_{\text{ТТ40}}$ та $K''_{30} = 0,3$ наведені, у порівнянні з аналогічними розмірами реального «ТТ-40», на рис. Б-2.

Маса ЕМС аналогу «ТТ-40» з $K''_{30} = 0,3$

$$m''_{\text{БК}} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ40}}} \right)^3 \left(\Pi_{1\text{БВ}}^* \right)'' = 7650 \cdot \left(\sqrt[4]{7,192 \cdot 10^{-5}} \right) \cdot 25,802 = 154,15 \text{ кг},$$

де $(\Pi_{1\text{БВ}}^*)''$ відповідає значенню табл. 4.1.

Показник втрат та втрати активної потужності аналогу «ТТ-40» з $K''_{30} = 0,3$:

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{3\text{БК}2}^* \right)'' &\approx 2,0665 K_{\text{ДНЗ}} \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3\text{С}} K_{30}'' K_{\text{КК}} f''_{\text{БК}}(a''_M, \lambda''_0)]} \right)^3 \{ K_{3\text{С}} K_{\text{КК}} [(\lambda''_0 + 1)(1 - 0,0718 a''_M) \times \\ &\times (a''_M - 1)^2 + 0,65654(a''_M - 1)^3] + 3,48188 K'_{\text{УВ}2} K''_{30} \lambda''_0 (1 - 0,0718 a''_M)^2 (a''_M - 0,07181) \} = \\ &= 2,0665 \cdot 1,34 \cdot \left(\sqrt[4]{1 / (0,97 \cdot 0,177 \cdot 0,904 \cdot 2,773)} \right)^3 \{ 0,97 \cdot 0,904 \times \\ &\times [(2,38 + 1)(1 - 0,0718 \cdot 2,292)(2,292 - 1)^2 + 0,65654(2,292 - 1)^3] + 3,482 \cdot 7,88 \cdot 0,3 \times \\ &\times 2,38 \cdot (1 - 0,0718 \cdot 2,292)^2 (2,292 - 0,07181) \} = 125; \\ P''_{\Sigma\text{БВ}} &= \gamma_c P'_{\text{ПМ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ40}}} \right)^3 \left(\Pi_{3\text{БК}2}^* \right)'' = 7650 \cdot 1,1 \cdot \left(\sqrt[4]{7,192 \cdot 10^{-5}} \right)^3 125 = 823,8 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Величина коефіцієнту корисної дії аналогу «ТТ-40» з $K''_{30} = 0,3$

$$\eta'' = 1 - P''_{\Sigma\text{БВ}} / (S_{\text{Н}} \cos \varphi_2 + P''_{\Sigma\text{БК}}) = 1 - 823,8 / (4000 \cdot 0,85 + 823,8) = 0,976.$$

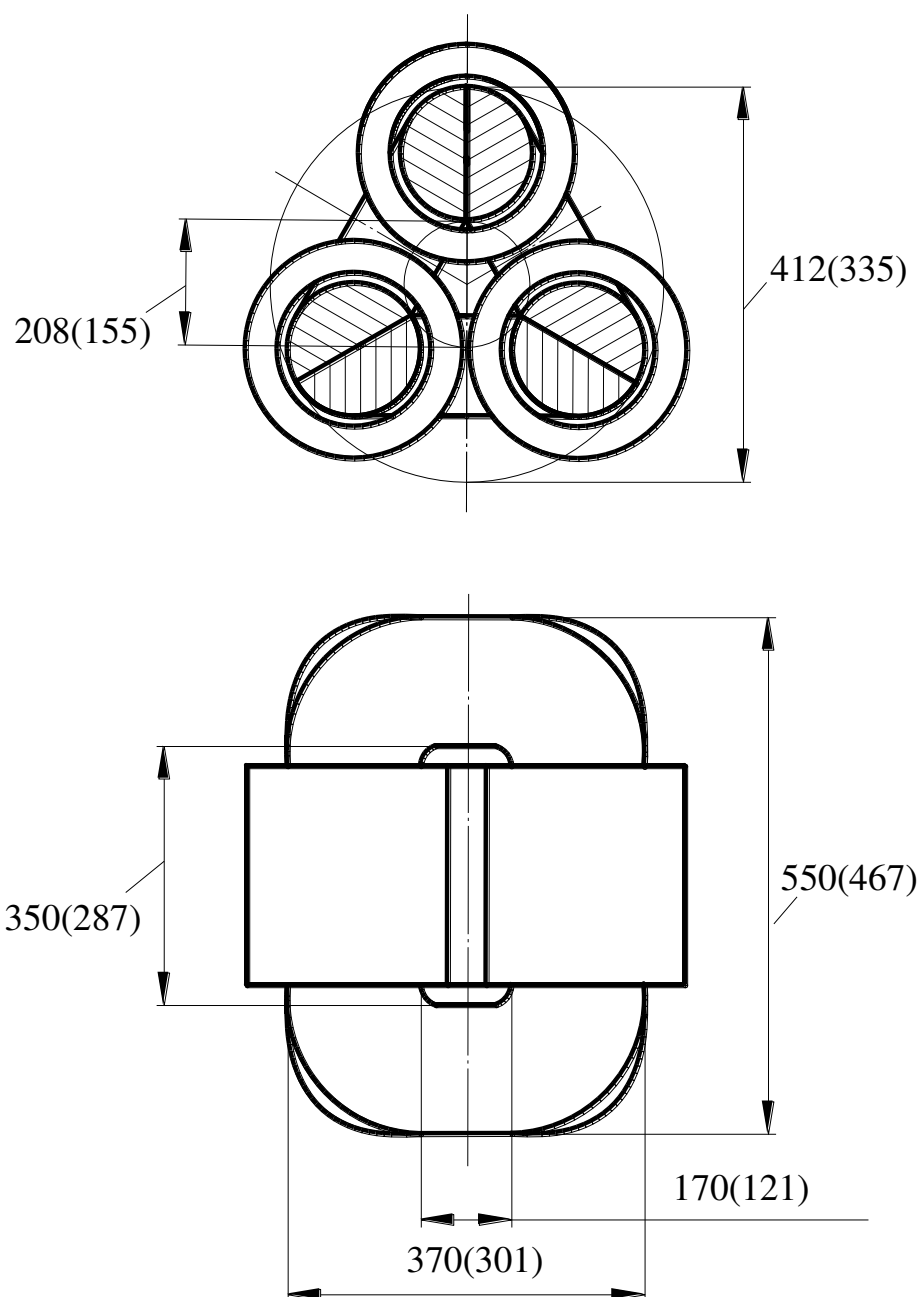


Рис. Б-2. Геометричні параметри електромагнітної системи трифазного трансформатора ТСЗМ-40-74.ОМ5 та його аналогу з $K_{30} = 0,3$ та покращеними масогабаритними показниками, що оптимізований за критерієм мінімуму маси

З виконаних розрахунків випливає, що заміна «вмотаної» конструкції ЕМС з $K'_{30} \approx 0,18$ на її виконання зі стиковими магнітопроводами ($K''_{30} = 0,3$) з оптимізацією за критерієм мінімуму маси, призводять до зниження маси на 15,4 % і підвищення розрахункового коефіцієнту корисної дії «ТТ-40» на 0,3 %. Також з рис. Б-2 випливає, що така заміна знижує габаритні розміри на (17 ... 23) %.

В додатку Б підтвержені адекватність застосування методу безрозмірних показників технічного рівня при проектуванні трансформаторів і висновок [45] про доцільність розробки силових ТТ потужністю до 1000 кВ·А на основі просторових ЕМС з витими стиковими магнітопроводами.

Додаток В

Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи

ДОВІДКА

про результати впровадження розробки вищого навчального закладу

Цим документом засвідчуємо, що розробка Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) – технічний проект «Дистанційно керований підводний апарат для надводного корабля» (шифр – КНПА-58250), № державної реєстрації 0109U005256 (науковий керівник – д.т.н., проф. Блінцов В.С., виконавець – м.н.с. Авдєєва О.А.) використана у Державному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» Державного концерну «Укроборонпром» при виконанні Державного оборонного замовлення зі створення перспективного корабля класу «корвет» проекту 58250.

Група і вид впровадження: VIII – нова техніка і технологія; III – виконання проектних робіт.

Найменування документів, які підтверджують впровадження: Звіт про науково-дослідну роботу по договору від 01.01.2009 р. №1731 «Складова частина ДКР, шифр «КНПА-58250».

Ефективність впровадження розробки:

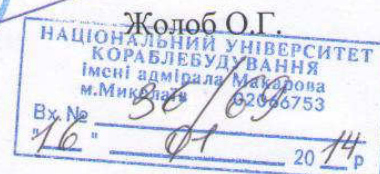
а) науково-технічні переваги полягають у розробці дистанційно керованого самохідного підводного апарату корабельного базування, який забезпечує висвітлення підводної обстановки в районах базування і тимчасової якірної стоянки корабля проекту 58250 та нейтралізацію виявлених загроз кораблю шляхом доставки до джерел загроз адекватних засобів знешкодження; визначені Замовником тактико-технічні характеристики дистанційно керованого самохідного підводного апарату корабельного базування досягнуто шляхом розробки та використання у технічному проекті низки інноваційних науково-технічних рішень у напрямках електроенергетики, електромеханіки та систем автоматичного керування режимами підводного апарата, а також оптимальних конструктивних рішень при загальній компоновці його вузлів і систем;

б) соціально-економічні переваги полягають у заміні водолазних технологій висвітлення підводної обстановки та нейтралізації загроз на роботизовані (безлюдні) підводні технології, а також у підвищенні якості і продуктивності виконуваних підводних робіт;

в) економічний ефект – не розраховувався.

Перспективи розширення впровадження полягають у розробці на базі створеного технічного проекту багатоцільового дистанційно керованого самохідного підводного апарату для ВМС ЗС України.

Директор –
генеральний конструктор
ДП «Дослідно-проектний центр
кораблебудування»





ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова правління

ПАТ «Інгул»

І.О.Тимченко



Д О В І Д К А

підтвердження практичного значення
результатів дисертаційної роботи
Авдесвої Олени Андріївни

Результати досліджень (конструкторсько-технологічні рішення та математичні моделі електромагнітних систем компактних трансформаторів) плануються до використання в розробках конструкторського відділу ПАТ «Інгул» (Миколаївський трансформаторний завод).

Головний інженер
ПАТ «Інгул»

О.Г.Кляс

Керівник конструкторського
відділу ПАТ «Інгул»

В.П.Богатиренко

ДОВІДКА

про результати впровадження розробки вищого навчального закладу

Цим документом засвідчуємо, що розробка Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) – технічні рішення і методика розрахунку компактних трансформаторів з просторовим магнітопроводом, яка виконана в рамках держбюджетної НДР № 1814 «Розробка теоретичних основ створення «інтелектуальних» підводних апаратів-роботів», № державної реєстрації 0111U002314 (науковий керівник – проф. Блінцов В.С., виконавець – аспірантка Авдєєва О.А.), використана при створенні теоретичних основ визначення архітектурно-конструктивного типу та головних конструктивних елементів підводного апарата-робота нового типу з інтелектуальним керуванням.

Група і вид впровадження: VIII – нова техніка і технологія; III – виконання проектних робіт.

Найменування документів, які підтверджують впровадження:

Звіт про науково-дослідну роботу «Розробка теоретичних основ створення «інтелектуальних» підводних апаратів-роботів» (заключний), за 2011-2012 р.р.;

Акт вводу в експлуатацію комплексу математичних моделей оптимізації масовартісних та енергетичних показників трифазних компактних трансформаторів «Розрахунок трифазних компактних трансформаторів з просторовим магнітопроводом для встановлення в оболонки обмеженого діаметру», затверджений ректором НУК «17» січня 2013 р..

Ефективність впровадження розробки:

а) науково-технічні переваги полягають у зниженні, в залежності від критерію оптимізації варіантів електромагнітних систем, до 7... 8,2 % показників маси та до 5 ... 8 % показників втрат активної потужності при підвищенні на 15 ... 20% показників компактності відносно відомих традиційних електромагнітно еквівалентних систем трансформаторів;

б) соціально-економічні переваги полягають у зниженні до 11 ... 13,6 % показників вартості варіантів електромагнітних систем при спрощенні та зменшенні трудомісткості виробництва шихтованих, витих та комбінованих різновидів магнітопроводів відносно традиційних аналогів;

в) економічний ефект – не розраховувався.

Перспективи розширення впровадження полягають в подальшому застосуванні математичних моделей варіантів компактних електромагнітних систем трифазних трансформаторів «Оптимізаційні розрахунки електромагнітних систем трифазних компактних трансформаторів з просторовим магнітопроводом для встановлення в оболонки обмеженого діаметру» в навчальному процесі за спорідненими напрямками підготовки фахівців та впровадження в проектну практику організацій, які проектують нові зразки об'єктів морської енергетики відновлюваного типу.

Ректор
Національного університету
кораблебудування ім. адм. Макарова,
д-р техн. наук, професор



Рижков С.С.