

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

На правах рукопису



**Авдєєва Олена Андріївна**

УДК 621.314.21

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

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

**Автореферат** дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Одеса – 2015**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Блінцов Володимир Степанович,**  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова,  
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Пуйло Гліб Васильович,**  
професор кафедри електричних машин  
Одеського національного політехнічного  
університету

доктор технічних наук, професор  
**Кутковецький Валентин Якович,**  
професор кафедри інформаційних технологій  
та програмних систем  
Миколаївського Чорноморського державного  
університету імені Петра Могили

Захист дисертації відбудеться 3 вересня 2015 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, корпус № 2, ауд. 213-у.

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

Автореферат розіслано 30 липня 2015 р.

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



О.М. Бесараб

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сучасному етапі головним напрямом розвитку електромеханіки є комплексне енергоресурсозбереження при виробництві електромеханічних пристроїв і передаванні, розподілі та перетворенні електроенергії. Задачі зниження втрат електроенергії, витрат матеріалів, трудомісткості і енергоємності виробництва, а також підвищення надійності трансформаторів є дуже важливими. 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. Крім виробництва ефективних розподільних трифазних трансформаторів (ТТ) існує необхідність розробки і удосконалення спеціальних компактних ТТ, які призначені для вбудовування в циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметру об'єктів спеціальної техніки. Подальше удосконалення силових і спеціальних ТТ можливо, сумісно з використанням сучасних досягнень матеріалознавства і автоматизованого проектного синтезу, на основі нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень електромагнітних систем (ЕМС).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувались відповідно до плану науково-дослідних робіт в сфері енергоресурсозбереження на водному транспорті, а також пошукових підводно-технічних робіт, що проводяться у національному університеті кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова. Автор брала участь у виконанні комплексної науково-дослідної роботи за темою №1814 «Розробка теоретичних основ створення «інтелектуальних» підводних апаратів-роботів» (№ДР0111U002314) 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 математичних моделей (ММ) ЕМС, що забезпечують покращення компактності та інших показників технічного рівня (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 мети поставлені дві взаємопов'язані групи завдань.

До першої групи відносяться 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 утворюючих контурів (УК) стрижнів, обмоткових котушок та вікон;
- подальший розвиток методу оптимізації і порівняльного аналізу ЕМС (у подальшому базисного методу) на основі ММ з узагальненими цільовими функціями (ЦФ), що містять безрозмірні ПТР та універсальні відносні геометричні керовані змінні (КЗ);

- розробка на основі базисного методу з метою порівняльного аналізу ММ двох варіантів традиційних структур ЕМС, а саме планарної з суміщеними фазними елементами, прямокутними УК та прямокутним зовнішнім контуром шихтованого магнітопроводу та просторової аксіальної ЕМС з круговими УК і двоконтурними фазними елементами витого магнітопроводу.

Друга група задач пов'язана з аналізом і порівнянням, на основі базисного методу, ПТР нетрадиційних варіантів структур і конструкцій ЕМС ТТ на основі:

- розробки ММ варіантів трифазних просторових радіальних ЕМС з двоконтурними фазними елементами, що відрізняються шихтованим магнітопроводом і різновидами витого магнітопроводу з прямокутними та шестигранними УК;

- розробка ММ варіантів трифазних просторових аксіальних ЕМС з шестигранними УК, що відрізняються двоконтурними і суміщеними фазними елементами відповідно витого та комбінованого магнітопроводів;

- 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 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;

- на умовах еквівалентності 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, шестигранними УК та витим магнітопроводом, що забезпечує основу розробки компактних маломагнітних ТТ з магнітопроводами, у яких відсутні ділянки змін напряму магнітного потоку відносно текстури електротехнічної сталі (ЕТС);

- вперше розроблено варіанти ММ просторової радіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, секторними обмотковими вікнами та з прямокутними і шестигранними перерізами стрижнів витих магнітопроводів, що надає можливість

розробки компактних ТТ з 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 шестигранними УК, що створює основу розробки компактних маломанітних ТТ при використанні максимально спрощеної технології побудови комбінованих стикових магнітопроводів та магнітопроводів з комбінацією ЕТС.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному. Запропоновані нові конструкції ЕМС на основі нетрадиційних УК, що забезпечують підвищення компактності, інших ПТР та знижують трудомісткість виготовлення магнітопроводів. Запропоновано ряд технологічних операцій і способів виготовлення магнітопроводів статичних ЕМС з покращеними ПТР. Розроблено пропозиції варіантів 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 геометричних параметрів та оптимальних геометричних співвідношень елементів варіантів трифазних ЕМС за основними ПТР ТТ.

Результати досліджень використані у Державному підприємстві «Дослідно-проектний центр кораблебудування» Державного концерну «Укроборонпром», в розробках конструкторського відділу ПАТ «Інгул» (Миколаївський трансформаторний завод), а також при виконанні планових робіт в НДІ підводної техніки і технологій та у навчальному процесі НУК імені адмірала Макарова.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, розробки та результати дослідження, які виносяться на захист, одержані особисто автором. У спільних роботах [1, 4, 6, 8, 11, 13, 14] і [5, 9] автору належать наступні положення. З першого переліку фахових і наукометричних видань у роботі [1] автором виконано аналіз особливостей використання трансформаторного обладнання в об'єктах спеціальної техніки та удосконалення подібного обладнання на основі нетрадиційних структур та УК елементів статичних ЕМС. У роботі [4] автором запропонована ЦФ контурного об'єму ЕМС та визначена необхідність оптимізації об'єму (маси) ЕМС ТТ об'єктів підводної та авіаційно-космічної техніки з одночасним врахуванням критерію маси (об'єму). У роботі [6] автором проаналізовано вплив нетрадиційних УК елементів просторових аксіальних ЕМС, що забезпечують підвищення компактності ТТ, на конструктивно-технологічні особливості їх магнітопроводів і обмоток. У роботі [8] автором створено ММ масовартісного аналізу просторової аксіальної ЕМС з шестигранними перерізами стрижнів комбінованого стикового магнітопроводу. У роботі [9] автором розроблено ММ масовартісного аналізу варіантів аксіальної просторової ЕМС з витим трисекційним магнітопроводом. У роботі [10] автором розроблено ММ аналізу втрат активної потужності варіантів аксіальної просторової ЕМС з витим трисекційним магнітопроводом. У роботі [11] автором розглянуті конструктивно-технологічні особливості нетрадиційних планарного і просторового радіального магнітопроводів та можливості порівняльного аналізу різних типів структур на основі узагальнених відносних геометричних КЗ. В роботах [13, 14] автором визначені можливості оптимізації ЕМС ТТ зі складною нетрадиційною конфігурацією на основі заміни системи обмоток трансформатора обмоткою структурно еквівалентного реактора. З другого переліку матеріалів

конференцій у роботі [5] автором уточнена та розроблена ММ варіантів ЕМС з суміщеними фазними елементами відповідно з секторними і шестигранними УК. В роботі [9] другого переліку автором поставлена задача та здійснено математичне забезпечення рішення завдання мінімізації контурного об'єму ЕМС ТТ потужністю 6,3 кВ·А з суміщеними фазними елементами та секторними УК витого стикового магнітопроводу.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідалися та були схвалені на: Всеукраїнських науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Проблеми автоматики та 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 11 – у фахових і наукометричних вітчизняних та 3 закордонних журналах і спеціалізованих збірниках наукових праць, 10 – в матеріалах доповідей наукових конференцій. Також за участю автора отримано 2 патенти та 4 рішення про видачу патентів України на винахід і корисні моделі, які відображають особливості магнітопроводів ЕМС, що розглянуті в роботі.

**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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

В **першому розділі** розглянуто приклади використання ТТ і трифазних груп однофазних трансформаторів, що призначені для встановлення в циліндричні та сферичні об'єми об'єктів підводної та іншої спеціальної техніки. З'ясовано, що структури і геометричні співвідношення традиційних варіантів ЕМС таких трансформаторів не відповідають в достатній мірі вимогам компактності і надійності.

З аналізу конструкцій, які використовуються при виробництві ТТ, випливає, що основні конфігурації елементів ЕМС з прямокутними і круговими УК обумовлюють відомі недоліки та характеризуються обмеженим потенціалом подальшого конструктивно-структурного розвитку. Удосконалення традиційних ЕМС відбувається шляхом суттєвого ускладнення технології виготовлення застосуванням косих

стиків зі зміною розмірів і конфігурацій суміжних шарів та виникненням відходів розкроєння ЕТС.

Крім забезпечення певного рівня загальних ПТР, деякі спеціальні ТТ повинні відповідати вимогам електромагнітної сумісності. 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 ТТ (рис. 1). Однак мінімізація «сумарного векторного магнітного моменту» на основі традиційних аксіальних конструкцій ЕМС ТТ (рис. 1, а) супроводжується значними труднощами у вигляді технологічних відхилень, які пов'язані з відомими недоліками кругових УК. Розробка подібних ТТ можлива на основі конструктивних рішень, що забезпечують максимальне технологічне наближення до певної практичної електромагнітної симетрії ЕМС. Можливість такого наближення при спрощенні технології виготовлення надають нетрадиційні секторні і багатогранні УК елементів просторових аксіальних ЕМС ТТ (рис. 1, б).

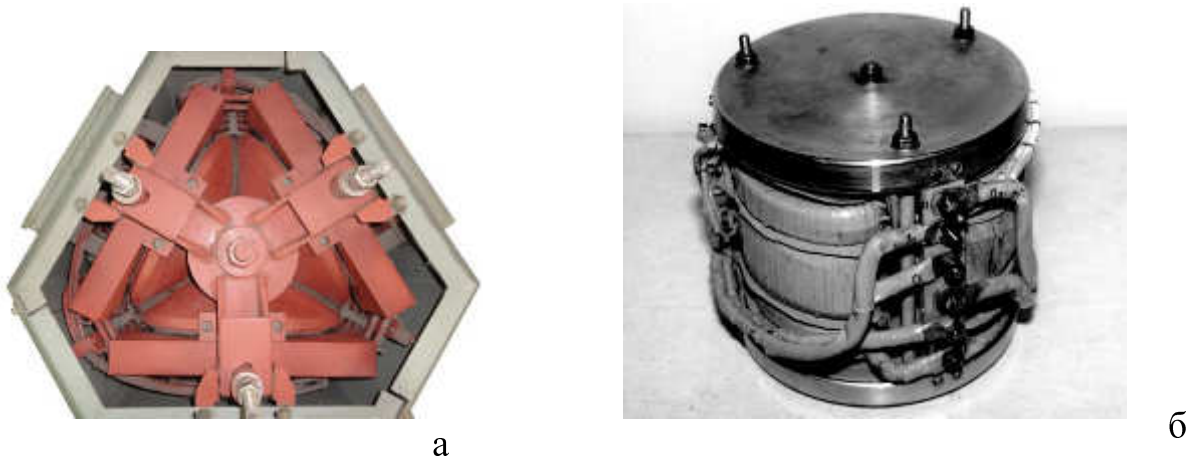


Рисунок 1 – Вигляд зверху в корпусі зі знятою кришкою і загальний вигляд трифазних трансформаторів з витим (а) та комбінованим (б) магнітопроводами

Визначено, що понад залежності від матеріалів, які використовуються в електротехнічній промисловості, важливим резервом подальшого удосконалення трансформаторів будь-якого призначення є перетворення структур і конфігурацій елементів планарних, а також аксіальних та радіальних просторових структур ЕМС на основі нетрадиційних УК стрижнів і обмоткових котушок та вікон.

У **другому розділі** здійснено аналіз можливості перетворення структур і УК елементів ЕМС. Обґрунтовані особливості та переваги нетрадиційних технічних рішень однофазних компонент групових ТТ для встановлення в трубчастій циліндричній оболонки. Розглянуті варіанти аксіальних та радіальних трифазних симетричних просторових ЕМС з шихтованими і витими трисекційними, а також витим та комбінованим стиковими магнітопроводами. Додатково розглянута трифазна планарна ЕМС з витим і комбінованим варіантами стикового магнітопроводу, які відрізняються відносно традиційного витого трисекційного аналогу суміщеними фазними елементами та відсутністю втрат від третіх гармонік контурних магнітних потоків.

Рішення задач використання варіантів конструктивно-структурних перетворень просторових ЕМС, що підвищують компактність ТТ, вимагає дослідження

впливу вказаних перетворень на основні ПТР. Визначення подібного впливу можливо, у відповідності до методу експертної оцінки, на основі зіставлення кількісних ПТР нетрадиційних ЕМС і базового аналогу. Умовам об'єктивного порівняльного аналізу *ii*-х варіантів ЕМС на думку автора максимально задовольняє базисний метод ЦФ з безрозмірними ПТР, а саме показниками маси  $\Pi_{1ii}^*$ , вартості  $\Pi_{2ii}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3ii}^*$ , та з геометричними основними відносними КЗ  $a_m$ ,  $\lambda_o$  і додатковою КЗ  $\alpha_c$ , що використовується у деяких ЕМС:

$$\Pi_{1(2)ii}^* = f(K_{3o}, \alpha_c, a_m, \lambda_o); \quad (1)$$

$$\Pi_{3ii}^* \equiv f(K_{3o}, \alpha_c, K_{yii}, a_m, \lambda_o), \quad (2)$$

де  $K_{3o}$  – коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, що враховує клас напруги;  $\alpha_c$  – центральний кут стрижня (рис. 2, а);  $K_{yii}$  – співвідношення коефіцієнтів додаткових втрат і питомих характеристик матеріалів при заданих електромагнітних навантаженнях (ЕМН) *ii*-го варіанту ЕМС;  $a_m$  і  $\lambda_o$  – відношення діаметрів розрахункових окружностей та відношення висоти і ширини обмоткового вікна магнітопроводу (рис. 2, а, б, рис. 3, а, б, в):

$$a_m = D_{нii} / D_{вii}; \quad \lambda_o = h_{oii} / b_{oii}.$$

Співвідношення  $K_{yii}$  визначається

$$K_{yii} = K_{дк} \gamma_o \Pi_{по} / (K_{днii} \gamma_c P_{пм}),$$

де  $K_{дк}$ ,  $K_{днii}$  – коефіцієнти додаткових втрат короткого замикання (ВКЗ) і втрат неробочого руху (ВНР) *ii*-го варіанту ЕМС;  $\gamma_{o(c)}$  – питома маса обмотки (магнітопроводу);  $\Pi_{по}$  – питомі втрати обмотки,  $P_{пм}$  – питомі втрати магнітопроводу.

Узагальнена ЦФ ПТР *ii*-го варіанту ЕМС визначається рівнянням

$$F_{ii} = K_{цi} (4 \sqrt{\Pi_{тт}})^3 \Pi_{iii}^*, \quad (3)$$

де  $K_{цi}$  – складова питомих характеристик використаної ЕТС;  $\Pi_{тт}$  – показник вихідних даних і ЕМН ТТ [м<sup>4</sup>],

$$\Pi_{тт} = S_H \cdot 10^3 [K_{U1} \cos \varphi_2 / (J_1 \eta \cos \varphi_1) + K_{U2} / J_2] / (6,66 B_c f_1).$$

До складових  $\Pi_{тт}$  відносяться:  $S_H$  – номінальна потужність [кВ·А];  $B_c$  – середнє значення амплітуди індукції стрижня [Тл];  $f_1$  – частота мережі [Гц];  $\cos \varphi_2$  – енергетичний коефіцієнт навантаження;  $\eta$  і  $\cos \varphi_1$  – коефіцієнт корисної дії і енергетичний коефіцієнт ТТ;  $K_{U1(2)}$  – коефіцієнти номінальної зміни напруги під навантаженням;  $J_{1(2)}$  – густина струму первинної (вторинної) обмотки [А/м<sup>2</sup>].



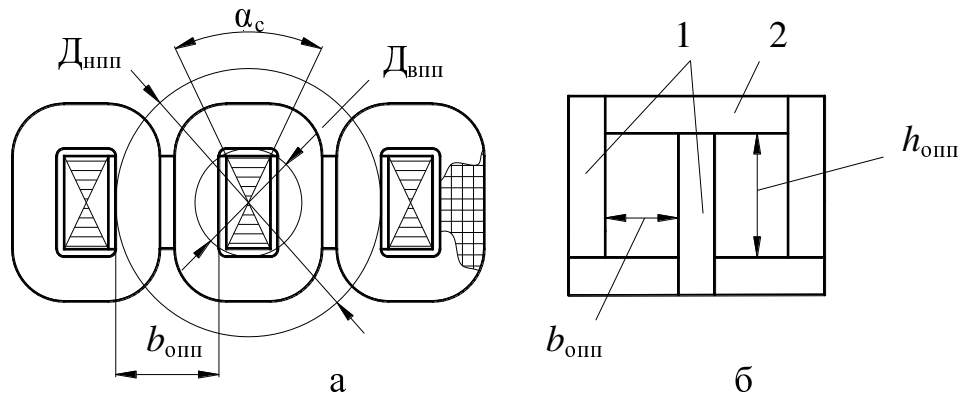


Рисунок 2 – Схема базової планарної електромагнітної системи (а) з прямокутними утворюючими контурами та прямокутними елементами магнітопроводу (б)

Оптимальні значення показника  $\Pi_{iii}^*$  і екстремальні значення КЗ  $a_m$ ,  $\lambda_o$ ,  $\alpha_c$  визначаються методами дослідження функцій з аналітичними виразами.

Для більшості об'єктів підводної, авіаційно-космічної та іншої спеціальної техніки максимально важливими є масогабаритні показники. Для підводних апаратів першим основним показником є об'єм і другим маса, а для авіаційно-космічних пристроїв 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.

Основною КЗ, від якої залежать ПТР є відношення  $a_m$  (рис. 4), при цьому габаритні розміри і діаметр контурного кола кожного з різноманітних варіантів ЕМС визначаються певною сукупністю КЗ  $a_m$ ,  $\lambda_o$ ,  $\alpha_c$ . У зв'язку з цим, у роботі сукупність (1) – (3) доповнена вельми важливою для трансформаторів зануреного і вбудованого виконань ЦФ контурного об'єму  $F_{4ii}$  з показником діаметру описаного кола  $\Pi_{4ii}^*$  сферичного або циліндричного об'єму, що обіймає  $ii$ -й варіант ЕМС, наприклад кола  $D_{\text{кс(ш)}}$  різновидів (рис. 3, а, б, в):

$$F_{4ii} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}}\right)^3 \Pi_{4ii}^*, \quad \Pi_{4ii}^* = f(K_{30}, a_m, \lambda_o, \alpha_c). \quad (4)$$

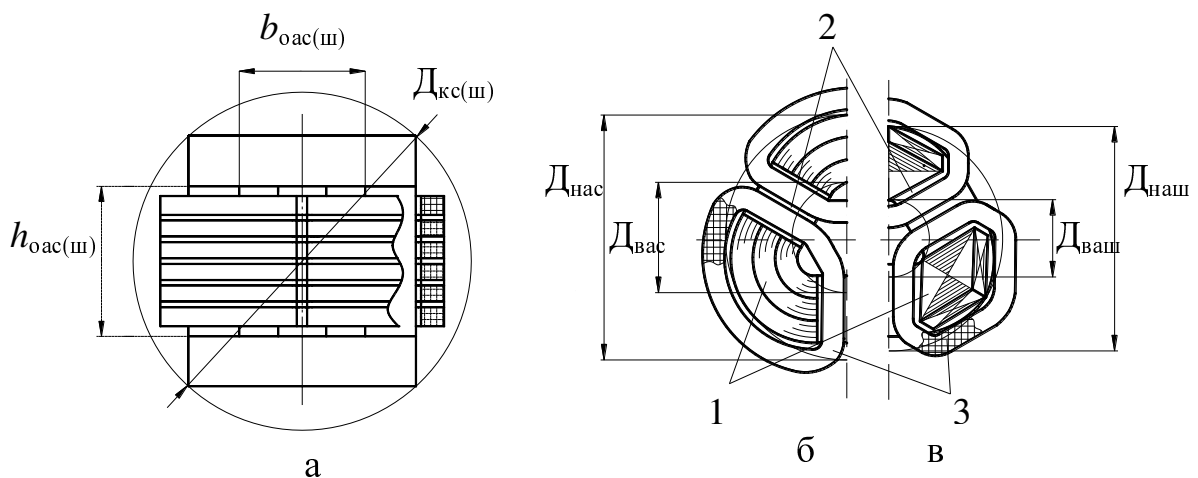


Рисунок 3 – Загальний вигляд (а) і варіанти поперечного перерізу аксіальної електромагнітної системи з витим (б) і комбінованим (в) магнітопроводами: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

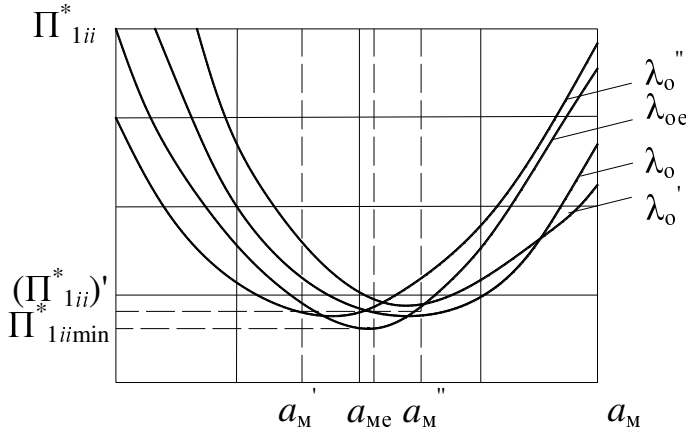


Рисунок 4 – Узагальнений вигляд залежностей показнику маси активної частини трансформатора від відносних геометричних керованих змінних

аналізу ЕМС, значення коефіцієнтів додаткових ВКЗ і ВНР при використанні ізотропної та анізотропної ЕТС, інтервали ЕМН і розрахункові діапазони змін  $K_{yii}$   $ii$ -х варіантів ЕМС.

У третьому та інших розділах дисертації визначені унімодальні (вигляду рис. 4) ЦФ мас  $m_{ii}$ , вартостей  $C_{ii}$  і втрат активної потужності  $P_{\Sigma ii}$  та розраховані екстремуми (мінімуми) ПТР  $\Pi_{1ie}^*$ ,  $\Pi_{2ie}^*$  і  $\Pi_{3ie}^*$   $ii$ -х варіантів ЕМС на основі рівнянь:

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

$$C_{ii} = C_{mii} + C_{wii} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1mii}^* + \gamma_o C_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{1wii}^* = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{2ii}^* ;$$

$$P_{\Sigma ii} = P_{nii} + P_{kii} = \gamma_c P_{\text{пм}} \left( \sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{3ii}^* ,$$

де  $m_{m(w)ii}$  – маса магнітопроводу (обмотки);  $C_{c(o)}$  – питома вартість магнітопроводу (обмотки);  $\Pi_{1m(w)ii}^*$  – показник маси магнітопроводу (обмотки), що є функцією  $a_M$ ,  $\lambda_o$ ,  $\alpha_c$ ;  $P_{nii}$  і  $P_{kii}$  – ВНР і ВКЗ ТТ з  $ii$ -м варіантом ЕМС.

Екстремуми показників мас варіантів ЕМС наведено в табл. 1 – табл. 8. Показники  $\Pi_{2ie}^*$ , що наведені в дисертації, розраховано в діапазоні  $C_o/C_c = 3,5 \dots 5,5$ , а  $\Pi_{3ie}^*$  визначені для двох марок ЕТС 2412 ( $\Pi_{3ii1}$ ) та 3407 ( $\Pi_{3ii2}$ ).

У третьому розділі розроблено ММ ЕМС з прямокутними УК та шихтованими вперепліт магнітопроводами.

Показники маси  $\Pi_{1\text{пм}}^*$  (табл. 1), вартості  $\Pi_{2\text{пм}}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3\text{пм}}^*$  базової ЕМС (рис. 2, а) визначаються рівняннями:

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

$$\times \left\{ K_{3c} \left[ (1 + 0,75 \lambda_o) a_M + (2 - 0,75 \lambda_o) \sin(\alpha_c/2) \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_o K_{3o} \lambda_o \times \right.$$

$$\left. \times (a_M - \sin(\alpha_c/2))^2 \left[ \sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + 0,3927(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \right] / \gamma_c \right\} ;$$

Для спрощення рішення задач порівняльного аналізу на основі базисного методу, особливо ЕМС з обмотковими вікнами нетрадиційної конфігурації, система реальних обмоток ТТ замінюються еквівалентною (за площею обмоткового вікна, що займає активний матеріал витків, потужністю, а також втратами) розрахунковою обмоткою з густиною струму  $J_o$ , що відповідає структурно та електромагнітно-еквівалентному реактору.

Також в розділі 2, крім застосування поняття розрахункової обмотки, прийняті припущення порівняльного

$$\begin{aligned} \Pi_{2\text{пп}}^* &= \left( \sqrt[4]{8 / \left[ K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left( a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ K_{3c} \left[ (1 + 0,75 \lambda_0) a_M + (2 - 0,75 \lambda_0) \sin(\alpha_c/2) \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_0 K_{30} \lambda_0 \times \right. \\ &\times \left. \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right)^2 \left[ \sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + 0,3927 \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right) \right] / (C_c \gamma_c) \right\}; \\ \Pi_{3\text{пп}1(2)}^* &= K_{\text{днп}1(2)} \left( \sqrt[4]{8 / \left[ K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ K_{3c} \sin \alpha_c \left[ 3 \sin(\alpha_c/2) + (1 + 0,75 \lambda_0) \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right) \right] + 0,75 K_{y\text{п}1(2)} K_{30} \lambda_0 \times \right. \\ &\times \left. \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right)^2 \left[ \sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \frac{\pi}{8} \left( a_M - \sin(\alpha_c/2) \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

де  $K_{3c}$  – ідентичний для усіх варіантів ЕМС коефіцієнт заповнення магнітопроводу ЕТС;  $K_{\text{днп}1(2)}$  і  $K_{y\text{п}1(2)}$  – розрахункові величини коефіцієнту  $K_{\text{дн}ii}$  та співвідношення  $K_{yii}$  для ЕМС (рис. 2, а).

Таблиця 1 – Екстремуми показників маси планарної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів шихтованого осердя

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

ПТР просторової радіальної ЕМС з прямокутними УК стрижнів і обмоткових котушок (рис. 5, а, б) та двоконтурними фазними елементами шихтованого вперепліт магнітопроводу (рис. 5, в, г), а саме показники маси  $\Pi_{1\text{пр}}^*$  (табл. 2), вартості  $\Pi_{2\text{пр}}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3\text{пр}1(2)}^*$  визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{пр}}^* &= 1,732 \left( \sqrt[4]{6,9282 / \left[ K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right)^3 \right]} \right)^3 \left\{ K_{3c} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right) \left( a_M - 0,25 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 0,25 K_{30} \left( a_M - 1 \right)^2 \left[ 2 + \left( a_M - 1 \right) \left( \lambda_0 + 1,0472 \right) \right] \gamma_0 / \gamma_c \right\}; \\ \Pi_{2\text{пр}}^* &= 1,732 \left( \sqrt[4]{6,9282 / \left[ K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right)^3 \right]} \right)^3 \left\{ K_{3c} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right) \left( a_M - 0,25 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 0,25 K_{30} \left( a_M - 1 \right)^2 \left[ 2 + \left( a_M - 1 \right) \left( \lambda_0 + 1,0472 \right) \right] \gamma_0 C_0 / \left( \gamma_c C_c \right) \right\}; \\ \Pi_{3\text{пр}1(2)}^* &= \sqrt{3} K_{\text{днр}1(2)} \left( \sqrt[4]{6,9282 / \left[ K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right)^3 \right]} \right)^3 \left\{ K_{3c} \lambda_0 \left( a_M - 1 \right) \left( a_M - 0,25 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 0,25 K_{y\text{п}1(2)} K_{30} \left( a_M - 1 \right)^2 \left[ 2 + \left( a_M - 1 \right) \left( \lambda_0 + 1,0472 \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

де  $K_{\text{днр}1(2)}$  і  $K_{y\text{п}1(2)}$  – розрахункові величини коефіцієнту  $K_{\text{дн}ii}$  та співвідношення  $K_{yii}$  для ЕМС (рис. 5, а, б).

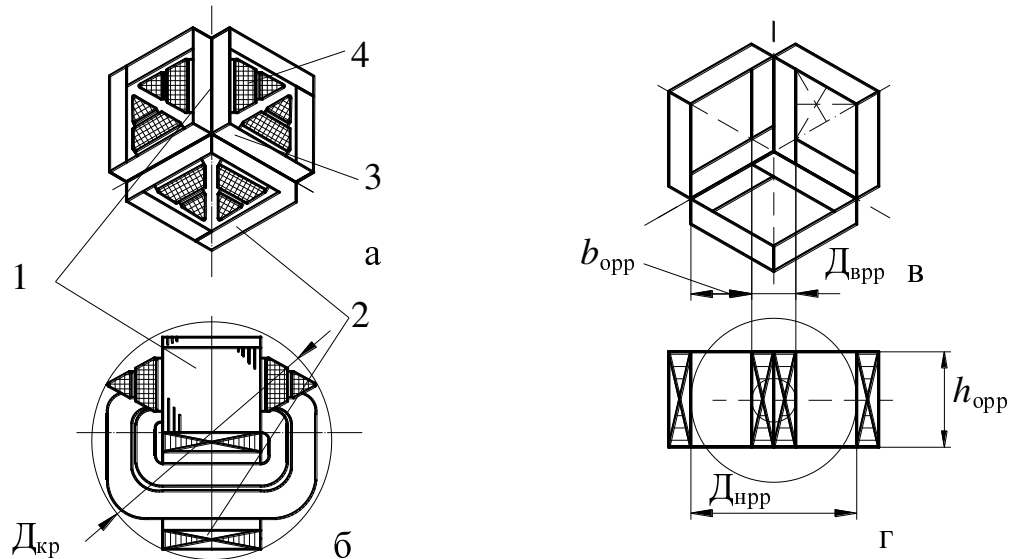


Рисунок 5 – Конструктивна схема в поперечному (а) і повздовжньому (б) перерізах і особливості магнітопроводу (в, г) радіальної електромагнітної системи з ромбічними обмотковими вікнами: 1 – стрижень; 2 – зовнішнє ядро; 3 – внутрішнє ядро; 4 – котушка обмотки.

Таблиця 2 – Екстремуми показників маси просторової радіальної електромагнітної системи з двоконтурними фазними елементами шихтованого осердя

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1ppe}^*$	26,9	28,6	30,9

У четвертому розділі розроблено ММ варіантів просторової аксіальної ЕМС з двоконтурними фазними елементами, які відрізняються круговими (рис. 6, а) і шестигранними (рис. 6, б) УК стрижнів витих магнітопроводів.

Показники маси  $\Pi_{1BK}^*$  (табл. 3), вартості  $\Pi_{2BK}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3BK(2)}^*$  просторової аксіальної ЕМС (рис. 6, а) визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1BK}^* &\approx 2,0665 \left( \sqrt[4]{1/[K_{3c} K_{30} K_{KK} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3c} K_{KK} [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + \\ &+ 0,65654(a_M - 1)^3] + 3,48188 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181) \gamma_0 / \gamma_c \}; \\ \Pi_{2BK}^* &\approx 2,0665 \left( \sqrt[4]{1/[K_{3c} K_{30} K_{KK} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3c} K_{KK} [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + \\ &+ 0,65654(a_M - 1)^3] + 3,4819 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181) C_o \gamma_0 / (C_c \gamma_c) \}; \\ \Pi_{3BK(2)}^* &= 2,0665 K_{дн3} \left( \sqrt[4]{1/[K_{3c} K_{30} K_{KK} f_{BK}(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times \\ &\times \{ K_{3c} K_{KK} [(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_M)(a_M - 1)^2 + 0,65654(a_M - 1)^3] + \\ &+ 3,482 K_{yB1(2)} K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,0718) \}; \end{aligned}$$

де  $K_{KK}$  – контурний коефіцієнт заповнення кругового УК перерізом стрижня,  $K_{KK} \leq 0,904$ ;  $K_{дн3}$  і  $K_{yB1(2)}$  – розрахункові величини  $K_{днi}$  та  $K_{yii}$  для ЕМС (рис. 6, а, б), а також

ЕМС (рис. 7, а);  $f_{\text{вк}}(a_M, \lambda_0)$  – співмножник скорочення запису рівнянь.

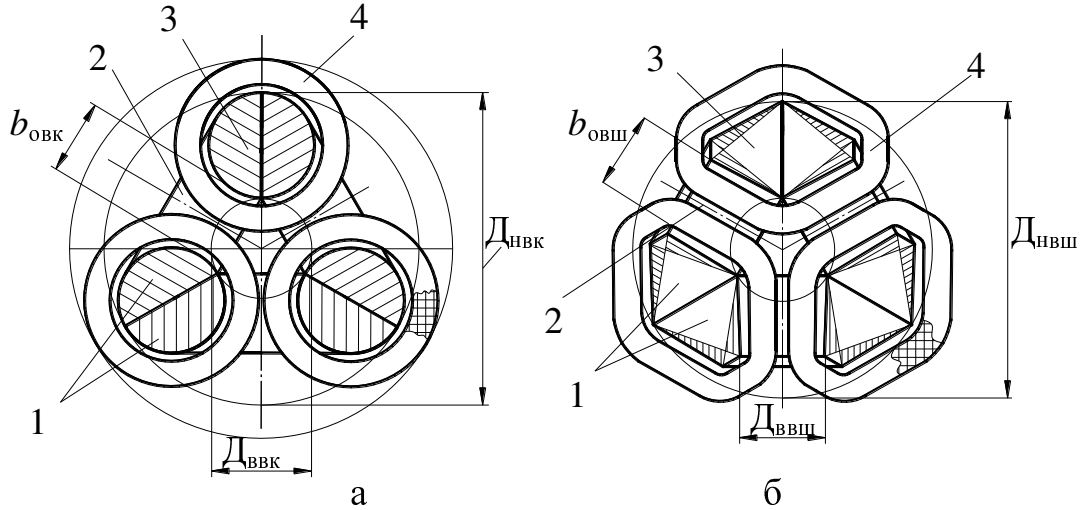


Рисунок 6 – Схеми поперечних перерізів трифазних аксіальних електромагнітних систем з круговими (а) і шестигранними (б) утворюючими контурами перерізів стрижнів витих трисекційних магнітопроводів: 1 – стрижень; 2 – яремна ділянка секції; 3 – стрижнева ділянка секції; 4 – котушка обмотки.

Таблиця 3 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами і витим трисекційним осердям

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1\text{вкк}}^{*(n)}$ , $K_{\text{кк}} = 0,904$	25,8	27,3	29,2

Показники маси  $\Pi_{1\text{вш}}^*$  (табл. 4), вартості  $\Pi_{2\text{вш}}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3\text{вш1(2)}}^*$  просторової аксіальної ЕМС (рис. 6, б) визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1\text{вш}}^* &= 1,5 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{3o}\lambda_0 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш3}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ &\left\{ K_{3c} \left[ f_{\text{вш1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш1}}(a_M, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 6,928 K_{3o} \lambda_0 [f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] \gamma_o / \gamma_c \right\}; \\ \Pi_{2\text{вш}}^* &= 1,5 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{3o}\lambda_0 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш3}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ &\left\{ K_{3c} \left[ f_{\text{вш1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш1}}(a_M, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 6,928 K_{3o} \lambda_0 [f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \right\}; \\ \Pi_{3\text{вш1(2)}}^* &= 1,5 K_{\text{дн3}} \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{3o}\lambda_0 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш3}}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ K_{3c} \left[ f_{\text{вш1}}^2(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш1}}(a_M, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) F_{\text{ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) + \right. \right. \\ &\left. \left. + 6,928 K_{\text{уб1(2)}} K_{3o} \lambda_0 [f_{\text{вш1}}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{вш2}}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] \right\}, \end{aligned}$$

де  $f_{\text{вш1(2)}}(a_M, \alpha_c)$ ,  $f_{\text{вш3}}(a_M, \alpha_c)$  і  $F_{\text{ш1}}(a_M, \alpha_c)$ ,  $F_{\text{ш2}}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)$  – співмножники скорочення запису рівнянь.

Таблиця 4 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з шестиграними утворюючими контурами і витим трисекційним осердям

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

У п'ятому розділі розроблено ММ варіантів радіальної ЕМС (рис. 7, а) з дво-контурними фазними елементами та прямокутними (рис. 7, б) і шестиграними (рис. 7, в) УК стрижнів витих магнітопроводів.

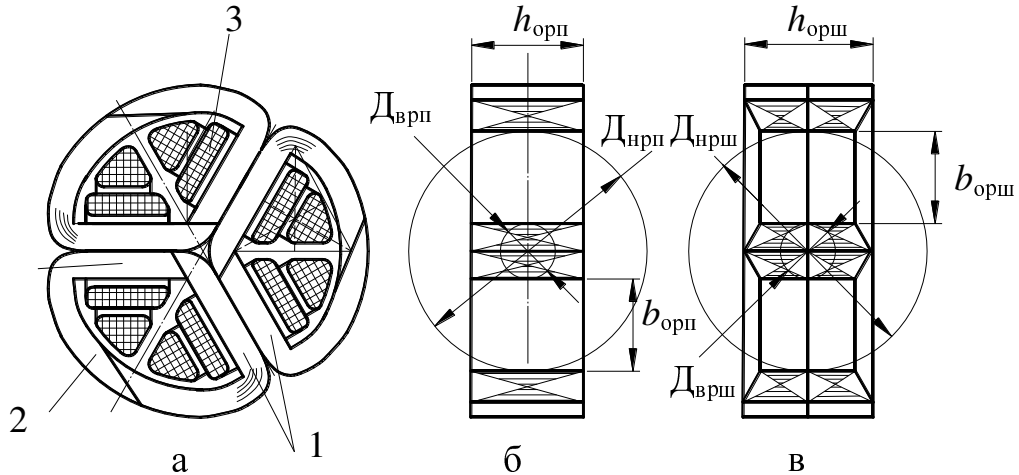


Рисунок 7 – Схема поперечного перерізу (а) і варіантів витого трисекційного магнітопроводу з прямокутним (б) і шестиграним (в) перерізами стрижнів радіальної електромагнітної системи: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки

Показники маси  $\Pi_{1\text{рп}}^*$  (табл. 5), вартості  $\Pi_{2\text{рп}}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3\text{рп1(2)}}^*$  ЕМС (рис. 7, а) з прямокутними УК (рис. 7, б) визначаються рівняннями:

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

$$\Pi_{2\text{рп}}^* = 6,5656 \left( \sqrt[4]{1 / [K_{3c} K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^3]} \right)^3 (a_M - 1) \{ K_{3c} \lambda_o (a_M - 0,3357) + 0,29534 K_{3o} (a_M - 1) [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + 1,1514)] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \};$$

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

Таблиця 5 – Екстремуми показників маси просторової радіальної електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів витого трисекційного осердя

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

Показники маси  $\Pi_{1рш}^*$  (табл. 6), вартості  $\Pi_{2рш}^*$  і втрат  $\Pi_{3рш1(2)}^*$  ЕМС (рис. 7, а) з шестигранними перерізами стрижнів (рис. 7, в) визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1рш}^* &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1 / \{K_{3c} K_{30} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735]\}} \right)^3 \times \\ &\times \{K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{30} (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] \gamma_o / \gamma_c \}; \\ \Pi_{2рш}^* &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1 / \{K_{3c} K_{30} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735]\}} \right)^3 \times \\ &\times \{K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{30} (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}; \\ \Pi_{3рш1(2)}^* &= 6,5656 K_{дн3} \left( \sqrt[4]{1 / \{K_{3c} K_{30} (a_M - 1)^2 [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735]\}} \right)^3 \times \\ &\times \{K_{3c} (a_M - 0,3355) [\lambda_o (a_M - 1) - 0,57735] + 0,29533 K_{yв1(2)} K_{30} (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [(a_M - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] \}. \end{aligned}$$

Таблиця 6 – Екстремуми показників маси просторової радіальної електромагнітної системи з шестигранними перерізами стрижнів витого трисекційного осердя

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1рше}^*$	25,5	27,1	29,2

В шостому розділі виконано уточнення, у відповідності до вигляду ЦФ (1) – (3) і прийнятих припущень, відомої ММ ЕМС (рис. 3, а, б) з секторними УК та суміщеними фазними елементами витого стикового магнітопроводу. Також розроблена ММ ЕМС (рис. 3, а, в) з шестигранними УК та комбінованим магнітопроводом, яка містить складені з ідентичних прямокутних шарів ЕТС стрижні. Крім того, узагальнені результати розрахункових досліджень впливу структурних перетворень ЕМС на ПТР і визначена можливість розробки методики загальної оптимізації ТТ на основі інтегрального критерію повної капіталізованої вартості та з використанням складових рівнянь (1) – (3).

Показники маси  $\Pi_{1ac}^*$  (табл. 7), вартості  $\Pi_{2ac}^*$  і втрат активної потужності  $\Pi_{3ac1}^*$  просторової аксіальної ЕМС з витим стиковим магнітопроводом (рис. 3, а, б) визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1ac}^* &= \pi \left( \sqrt[4]{3 / \{ \pi K_{3c} K_{30} \lambda_o [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25 (a_M - 1)] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \}} \right)^3 \{ K_{3c} (a_M - 1) \times \\ &\times [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25 (a_M - 1)] \{ K_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,1547) + 2,4184 [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25 (a_M - 1)] \} + \\ &+ 0,4775 K_{30} \lambda_o [2,0472 (a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2ac}^* &= \pi \left( \sqrt[4]{3 / \left\{ \pi K_{3c} K_{30} \lambda_o [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right\}} \right)^3 \{ K_{3c} (a_M - 1) \times \\ &\times [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] \{ K_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,1547) + 2,4184 [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] \} + \\ &+ 0,4775 K_{30} \lambda_o [2,0472(a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}; \\ \Pi_{3ac1}^* &= \pi K_{\text{дна1}} \left( \sqrt[4]{3 / \left\{ \pi K_{3c} K_{30} \lambda_o [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right\}} \right)^3 \{ \pi K_{3c} (a_M - 1) \times \\ &\times [0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)] \{ K_{\alpha 2} (\lambda_o + 1,1547) + 1,83(0,5733 K_{\alpha 1} + 0,25(a_M - 1)) \} + \\ &+ 1,5 K_{\text{yа1}} K_{30} K_{\alpha 2}^2 \lambda_o [2,0472(a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2}] \}, \end{aligned}$$

де  $K_{\text{дна1}}$  і  $K_{\text{yа1}}$  – розрахункові величини  $K_{\text{днii}}$  та  $K_{\text{yii}}$  для ЕМС (рис. 3, а – в) при використанні ЕТС 2412;  $K_{\alpha 1(2)}$  – коефіцієнти кута округлення ярма.

Таблиця 7 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з секторними утворюючими контурами і витим стиковим осердям

Показник маси, б.о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
	0,3	0,25	0,2
$\Pi_{1ace}^*$	26,45	28,0	30,0

Показники маси  $\Pi_{1аш}^*$  (табл. 8), вартості  $\Pi_{2аш}^*$  і втрат  $\Pi_{3аш1}^*$  просторової аксіальної ЕМС (рис. 3, а, в) визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{1аш}^* &= 6 \left( \sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{30} \lambda_o f_{аш1}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{ K_{3c} f_{аш1}(a_M, \alpha_c) \times \\ &\times [1 + 0,866 \lambda_o + 0,4184 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046 (a_M - 1)] + 0,866 K_{30} \lambda_o f_{аш2}(a_M, \alpha_c) \gamma_o / \gamma_c \}; \\ \Pi_{2аш}^* &= 6 \left( \sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{30} \lambda_o f_{аш1}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{ K_{3c} f_{аш1}(a_M, \alpha_c) [1 + 0,866 \lambda_o + 0,4184 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + \\ &+ 0,6046 (a_M - 1)] + 0,866 K_{30} \lambda_o f_{аш2}(a_M, \alpha_c) \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}; \\ \Pi_{3аш1}^* &= 6 K_{\text{дна1}} \left( \sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{30} \lambda_o f_{аш1}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \{ K_{3c} f_{аш1}(a_M, \alpha_c) \times \\ &\times [1 + 0,866 \lambda_o + 0,41838 K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + 0,6046 (a_M - 1) - 0,1403 f_{аш1}(a_M, \alpha_c) / (a_M - 1)] + \\ &+ 0,866 K_{\text{yа1}} K_{30} \lambda_o f_{аш2}(a_M, \alpha_c) \}, \end{aligned}$$

де  $f_{аш1(2)}$  – співмножники скорочення запису рівнянь.

Таблиця 8 – Екстремуми показників маси просторової аксіальної електромагнітної системи з шестиграними утворюючими контурами і комбінованим осердям

Показник маси, б.о.	Центральний кут ярма $\alpha_{\text{я}}$ , градус	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна		
		0,3	0,25	0,2
$(\Pi_{1ашe}^*)'$	3	26,28	27,8	29,83
$\Pi_{1ашe}^*$	5	26,3	27,81	29,84
$(\Pi_{1ашe}^*)''$	7	26,31	27,82	29,86



Результати розрахунків співвідношень ПТР, що визначені на основі оптимізації варіантів ЕМС за окремими критеріями маси, вартості і втрат активної потужності та які підтверджують переваги просторових ЕМС над базовим планарним аналогом, наведено в табл. 9.

Таблиця 9 – 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 2412	Анізотропна сталь 3407
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{ррє}}^*$	+(1,8...3,1)	+(6,2...9,5)	–(4,0...12,7)	–0,7...+1,1
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{вкє}}^*$	+(7,5...7,6)	+(7,8...8,1)	–(3,0...6,3)	+(10,9...18,7)
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{вшє}}^*$	+(8,6...8,7)	+(9,1...9,5)	–(1,6...5,4)	+(12,6...20,0)
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{рпє}}^*$	+(6,4...7,7)	+(10,6...13,7)	–7,0...+3,6	+(20,6...22,2)
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{ршє}}^*$	+(7,5...9,0)	+(12,3...15,9)	–5,9 ...+5,8	+(22,8...23,9)
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{асє}}^*$	+(4,6...5,0)	+(5,8...6,5)	+(8,0...12,6)	–
$\Pi_{i\text{шпє}}^* / \Pi_{i\text{ашє}}^*$	+(5,3...5,6)	+(6,5...6,9)	+(7,8...11,3)	–

Рівняння інтегрального оптимізаційного критерію повної капіталізованої вартості ТТ з *ii*-м варіантом ЕМС є ЦФ з сукупністю КЗ  $B_c, J_o, a_m, \lambda_o, \alpha_c$ ,

$$C_{\Sigma ii} = \left(4\sqrt{\Pi_{\text{ТТ}}}\right)^3 \left[ \gamma_c K_{\text{ст}} C_c \Pi_{2ii}^*(K_{3o}, a_m, \lambda_o, \alpha_c) + K_n K_{\text{днii}} \gamma_c P_{\text{пм}} \Pi_{\text{нii}}^*(K_{3o}, a_m, \lambda_o, \alpha_c) + K_k K_{\text{дк}} \gamma_o \Pi_{\text{по}} \Pi_{\text{кii}}^*(K_{3o}, a_m, \lambda_o, \alpha_c) \right],$$

де  $K_{\text{ст}}$  – коефіцієнт співвідношення вартості ТТ з урахуванням конструктивної частини та вартості його ЕМС;  $K_n$  і  $K_k$  – питомі капіталізовані вартості відповідно ВНР і ВКЗ, що використовуються при оптимізації трансформаторів в державах з ринковою економікою;  $\Pi_{\text{нii}}^*(a_m, \lambda_o, \alpha_c)$  і  $\Pi_{\text{кii}}^*(a_m, \lambda_o, \alpha_c)$  – безрозмірні складові ВНР і ВКЗ, що є складовими ЦФ  $\Pi_{3ii}^*$ .

Питання обрання певної конструкції ЕМС (рис. 3, рис. 5 – рис. 7) може бути вирішено з урахуванням застосованої на конкретному виробництві технології та обладнання виготовлення магнітопроводів, а також спеціальних вимог технічного завдання на проектування ТТ, зокрема електромагнітної сумісності.

У **додатку А** наведено обґрунтування ідентичності відносних складових ПТР однакових виконань, структур і конструкцій ТТ та електромагнітно-еквівалентного трифазного реактору, що є функціями геометричних КЗ  $a_m, \lambda_o, \alpha_c$ , у **додатку Б** наведена методика застосування (1) – (3) для розрахунків ТТ, а також визначений вплив на характеристики заміни «вмотаної» конструкції просторової ЕМС ТТ ТСЗМ-40-74.ОМ5 (рис. 1, а) на її виконання з витим трисекційним стиковим магнітопроводом, а у **додатку В** наведено документи про практичну значимість та використання результатів виконаних дисертаційних досліджень.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота розв'язує актуальне науково-практичне завдання створення теоретичних основ розробки спеціальних компактних ТТ систем електрообладнання об'єктів підводної техніки.

Основні наукові і практичні висновки роботи полягають у наступному.

1. З аналізу елементів електрообладнання підводно-технічних об'єктів впливає необхідність розробки спеціальних трансформаторів, що призначені до встановлення в циліндричні та сферичні об'єми (оболонки) обмеженого діаметру.

2. З аналізу сучасного стану трансформаторобудування впливає, що планарні і просторові ЕМС з традиційними прямокутними та круговими УК наближаються до певної межі розвитку і мають відомі технологічні та експлуатаційні недоліки. Одним із засобів удосконалення індукційних перетворювачів одно і багатофазного струму є структурне перетворення та використання нетрадиційних УК ЕМС.

3. Запропоновані і запатентовані нетрадиційні конструктивно-технологічні рішення, що покращують основні та специфічні ПТР і знижують трудомісткість виготовлення магнітопроводів трансформаторів малої і середньої потужності спеціального та розподільного призначень.

4. Отримав подальший розвиток базисний метод побудови ММ оптимізації і порівняльного аналізу варіантів ЕМС, що використовує узагальнені ЦФ з універсальними геометричними КЗ та безрозмірними складовими у вигляді окремих ПТР маси і вартості ЕМС та втрат активної потужності ТТ.

5. Для можливості здійснення порівняльного аналізу на основі базисного методу розроблені ММ двох відомих планарної і просторової ЕМС з традиційними УК та уточнена відома ММ нетрадиційної просторової ЕМС с секторними УК. Також вперше розроблені ММ п'яти варіантів нетрадиційних просторових ЕМС з шестигранними УК і ромбічними та секторними обмотковими вікнами.

6. З використанням розроблених ММ отримані ПТР, що відповідають окремим критеріям оптимізації, на основі яких та на умовах еквівалентності електромагнітної потужності виконано зіставлення та визначені переваги варіантів нетрадиційних ЕМС над базовою планарною ЕМС.

7. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, на основі яких визначена методологія проектних досліджень з використанням ЦФ базисного методу, підтверджені результатами розрахунків зразків ТТ з аксіальними просторовими ЕМС.

Основні положення дисертації використовуються при розробці спеціальних ТТ, а також в навчальному процесі підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів з електромеханіки.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації за темою дисертації у фахових і наукометричних виданнях:

1. 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 // Электротехника і

електромеханіка. – 2012. – №2. – с. 16-21.

2. Авдеева, Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массо-стоимостные показатели) / Е.А. Авдеева // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №4. – с. 15-20.

3. Авдеева, Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) / Е.А. Авдеева // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – с. 13-17.

4. Блинов, В.С. Особенности проектирования трансформаторов электроэнергетических систем подводных и авиационно-космических аппаратов / В.С. Блинов, Е.А. Авдеева // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2012. – №3-4 (444). – с. 49-52.

5. Авдеева, Е.А. Модель массы и стоимости трехфазной радиальной электромагнитной системы с ромбическими обмоточными окнами и прямоугольным сечением двухконтурных стержневых частей шихтованного магнитопровода / Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 7(83). – с. 53-57.

6. Ставинский, А.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – №11(87). – с. 74-81.

7. 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.

8. Ставинский, А.А. Сравнение массо-стоимостных 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

#### Публікації в матеріалах науково-технічних конференцій:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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, 2013. – с. 465-467.

5. Авдеева, Е.А. Массоустойчивые 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. – Севастополь: Сев. НТУ, 2013. – с. 123-125.

6. 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.

7. Авдеева, Е.А. Определение параметров технологических заготовок секций витого трехфазного магнитопровода с шестигранным сечением стержней / Е.А. Авдеева // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матері-

али Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2013. – с. 82-86.

8. Авдеева, Е.А. Задачі та попередні результати розробки трансформаторів систем електрообладнання підводних апаратів / Е.А. Авдеева // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. – 431-433.

9. Авдєєва, О.А. Мінімізація контурного об'єму просторової електромагнітної системи трифазного трансформатора з витим стиковим магнітопроводом / О.А. Авдєєва, А.Г. Кисельова // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2014. – с. 39-40.

10. 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.

## АНОТАЦІЇ

**Авдєєва О.А. Трифазні трансформатори для встановлення в обмежені об'єми об'єктів підводної техніки.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. Одеський національний політехнічний університет МОН України, Одеса, 2015.

В дисертаційній роботі отримали подальший розвиток напрям удосконалення трансформаторів перетворенням структур і утворюючих контурів елементів електромагнітних систем та метод оптимізаційних розрахунків та порівняльного аналізу варіантів активної частини з використанням узагальнених цільових функцій, що містять безрозмірні показники технічного рівня і універсальні відносні геометричні керовані змінні. Розроблені математичні моделі нетрадиційних електромагнітних систем і показана можливість покращення показників трифазних трансформаторів на основі просторових магнітопроводів і оптимізаційних розрахунків за одним з критеріїв мінімумів маси, втрат активної потужності, або вартості активної частини. Методологія таких розрахунків надає можливість оптимізації варіантів трансформаторів за інтегральним показником капіталізованої вартості, що містить складові розроблених математичних моделей оптимізації за окремими критеріями.

*Ключові слова:* трансформатор, електромагнітна система, магнітопровід, обмотка, утворюючі контури, компактність, метод аналізу, керовані змінні, показники технічного рівня, оптимізація.

**Авдеева Е.А. Трехфазные трансформаторы для установки в ограниченные объемы объектов подводной техники.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. Одесский национальный политехнический университет МОН Украины, Одесса, 2015.

Диссертация решает научно-прикладную задачу повышения компактности и других показателей технического уровня трехфазных трансформаторов специального, а также распределительного назначения малой и средней мощности. Используемое в подводных и космических аппаратах электрооборудование размещается в цилиндрических и сферических оболочках ограниченных диаметров. Максимальное приближение контурного объема электромагнитной системы к цилиндру и сфере достигается симметричным пространственным расположением, а также нетрадиционными структурами и конфигурациями элементов. Предложены конструкции компактных электромагнитных систем и способы изготовления магнитопроводов с шихтованными, витыми и комбинированными элементами. В целом в работе получили дальнейшее развитие направление усовершенствования трансформаторов преобразованием структур и образующих контуров элементов электромагнитных систем и метод оптимизационных расчетов и сравнительного анализа вариантов активной части с использованием обобщенных целевых функций, содержащих безразмерные показатели технического уровня и универсальные относительные геометрические управляемые переменные. Получены математические модели нетрадиционных электромагнитных систем и показана возможность улучшения показателей трехфазных трансформаторов на основе пространственных магнитопроводов и оптимизационных расчетов по одному из критериев минимумов массы, потерь активной мощности или стоимости активной части. Методология таких расчетов создает возможность оптимизации трансформатора с использованием интегрального показателя капитализированной стоимости, содержащего составляющие разработанных математических моделей оптимизации по частным критериям.

*Ключевые слова:* трансформатор, электромагнитная система, магнитопровод, обмотка, образующие контуры, компактность, метод анализа, управляемые переменные, показатели технического уровня, оптимизация.

**E.A. Avdjejeva. Three-phase transformers for installation in limited volumes of underwater equipment. Manuscript.**

Ph.D. thesis in Engineering Science with a specialization 05.09.01 in electrical machines and devices. Odessa national polytechnic university, Odessa, 2015.

In the thesis the direction of transformers improvement is further developed with structures and forming contours conversion of electromagnetic systems elements. The method of optimization calculations and comparative analysis of the active part variants on the basis of nondimensional technical level indicators and universal relative geometric controlled variable is further developed too. The mathematical models of non-traditional electromagnetic systems are developed. The possibility of technical level indicators improving of three-phase transformers based on spatial magnetic cores and optimization calculations for one of the criteria of mass, active power losses or cost minimum of active part is shown. The methodology of calculation allows optimization of transformers variants using integral capital cost indicator that contains components of developed mathematical models for individual criteria optimization.

*Keywords:* transformer, electromagnetic system, magnetic core, winding, forming contours, compactness, method of analysis, controlled variables, technical level indicators, optimization.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТТ – трифазний трансформатор;  
ЕМС – електромагнітна система;  
ММ – математична модель;  
ПТР – показник технічного рівня;  
УК – утворюючий контур;  
ЦФ – цільова функція;  
КЗ – керовані змінні;  
ЕТС – електротехнічна сталь;  
ЕМН – електромагнітні навантаження;  
ВКЗ – втрати короткого замикання;  
ВНР – втрати неробочого руху.

Підписано до друку 28.07.2015 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.  
Ум.-друк. арк. 1,25.  
Наклад 100 прим. Зам. № 5293

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