

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Циганов Олександр Миколайович

УДК 621.314.21

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.09.01. "Електричні машини й апарати"

14. Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О. М. Циганов

Науковий керівник Ставинський Андрій Андрійович, доктор технічних наук,
професор

Миколаїв, 2021

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.01 "Електричні машини й апарати" (141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). - Миколаївський національний аграрний університет, Міністерства освіти і науки України, Миколаїв, 2021.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.052.05 в Державному університеті "Одеська політехніка" Міністерства освіти і науки України.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі збереження матеріальних і енергетичних ресурсів при виробництві і експлуатації однофазних і трифазних силових розподільчих трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами.

Розглянуто стан розвитку і конструктивно-технологічні особливості електромагнітних систем, що перебувають у виробництві і традиційно застосовуються в сучасних розробках трансформаторів і реакторів. Запропоновано інноваційні конструкторсько-технологічні рішення удосконалення трансформаторного обладнання заміною традиційних прямокутних і кругових утворюючих контурів зовнішнього контуру, стрижнів і обмоткових котушок на шестигранні і восьмигранні контури. Симетричний шестигранний зовнішній контур зменшує об'єм і число кутових зон зміни напрямку магнітного потоку магнітопроводу відносно напрямку текстури електротехнічної сталі та зменшує середню довжину витків розташуванням обмоткових котушок на трьох стрижнях. Це надає можливість зменшення маси, вартості і втрат однофазного трансформатора або реактора. Формування витків обмоткових котушок і розташування пакетів і груп прямокутних пластин сталі плоскопаралельно і під кутами 120° у восьми і шестигранному рівнобічних

контурах підвищує надійність та знижує металоємність, втрати і трудоємність виробництва планарних електромагнітних систем. Надійність підвищується, металоємність і втрати знижуються відповідно усуненням внутрішніх залишкових напруг криволінійного вигину провідника на більшій частині довжини кожного витка та підвищенням коефіцієнту заповнення перерізом стрижня контуру багатогранника (контурного коефіцієнту) відносно традиційного кругового контуру. Вказані структурні перетворення передбачають деякі зміни процесів виготовлення магнітопроводів і обмоток та технологічного оснащення, тобто певних витрат. Тому необхідно попереднє теоретичне обґрунтування наявності переваг та доцільності структурно-геометричних змін на основі розробки математичних моделей оптимізаційного зіставлення електромагнітних систем з інноваційними і традиційними технічними рішеннями.

Існують різновиди оптимізаційних методик розрахунків електромагнітних систем, що пристосовані до конкретних структурно-геометричних виконань магнітопроводів і обмоток. Такі методики відрізняються індивідуальними керованими змінними і застосовуються при параметричному синтезі електромагнітних статичних пристроїв. Також існує метод цільових функцій загального виду для усіх електромеханічних пристроїв, який відрізняється від інших безрозмірними оптимізаційними складовими та універсальними геометричними і електромагнітною керованими змінними. Цей метод максимально відповідає рішенням питання узагальненого оптимізаційного зіставлення варіантів електромагнітних систем, тобто структурного синтезу.

Названим методом структурного і структурно-параметричного синтезу створено низку проєктних моделей окремих критеріїв оптимізації та визначено основні показники технічного рівня, тобто масовартісного і енергетичного аналізу електромагнітних систем трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами. Отримала подальший розвиток задача оптимізаційного порівняльного аналізу основних традиційних варіантів однофазних і трифазних планарних електромагнітних систем відповідно з прямокутними і круговими

утворюючими контурами. Вперше розроблені проєктні моделі показників технічного рівня однофазної просторової радіальної системи з тристрижневим магнітопроводом та варіантів трифазних планарних систем з багатограними утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок. Екстремуми показників маси однофазної планарної стрижневої електромагнітної системи покращуються (знижуються) відносно електромагнітно еквівалентного планарного броньового аналога на (3,71-6,29)% при мідних обмотках і на (7,93-9,85)% при алюмінієвих обмотках. Показники вартості планарної броньової електромагнітної системи покращуються (знижуються) відносно стрижневого аналога при мідних провідниках на (2,55-1,1)%, а при алюмінієвих обмотках погіршуються на (3,17-5,81)%. Екстремуми показників втрат активної потужності однофазної планарної броньової системи при розрахунковій ідентичності коефіцієнтів додаткових втрат покращуються (знижуються) відносно стрижневого аналога на (4,22-1,42)%. Покращення, тобто зниження екстремумів показників маси і вартості однофазної радіальної тристрижневої системи відносно планарної стрижневої системи становить відповідно (1,46-1,98)% і (2,22-1,88)% при мідних обмотках та (0,84-0,53)% і (1,53-1,17)% при алюмінієвих обмотках. Розрахункове значення, при умовній ідентичності коефіцієнтів додаткових втрат текстурованих магнітопроводів, екстремумів показників втрат активної потужності радіальної тристрижневої системи відносно стрижневого аналога складає (2,41-2,11)%.

Визначено, що заміна кругових утворюючих контурів перерізів обмоткових котушок, стрижнів і ярем на восьмигранні при підвищенні електродинамічної стійкості викликає деяке покращення основних показників технічного рівня. При наявності в половині утворюючих контурів трьох пакетів екстремуми показників маси і вартості покращуються (знижуються) на (0,88-0,76) %, (1,17-1,03%) % при мідних і на (0,69-0,55) %, (0,94-0,78)% при алюмінієвих обмотках. При розташуванні в половині контурів чотирьох пакетів такі показники покращуються на (1,36-1,15) %, (1,81-1,59) % при мідних і на (1,01-0,81) %, (1,39-1,18%) при алюмінієвих обмотках. При повному заповненні сталлю восьмигранного контуру екстремуми вказаних показників технічного

рівня покращується відносно традиційного аналогу з контурним коефіцієнтом заповнення кругового контуру 0,931 відповідно на (1,19-1,02) %, (1,59-1,42) % при мідних і на (0,87-0,71) %, (1,22-1,04) % при алюмінієвих обмотках. Показники втрат при трьох, чотирьох пакетах в половинах контурів та при контурному коефіцієнті 1 покращуються на (1,21-1,10)%, (1,92-1,73)% та (1,68-1,52)%. Заміна в трифазних планарних стрижневих системах кругових і восьмигранних утворюючих контурів перерізів ярем на східчасті ярма з плоскими внутрішніми поверхнями додатково покращує основні показники технічного рівня. Також встановлено, що заміна в трифазній планарній системі з стрижневим стиковим магнітопроводом кругових утворюючих контурів на шестигранні з повним контурним заповненням стрижневої частини та значним зниженням трудомісткості виготовлення інноваційного варіанту призводить, в залежності від контурного заповнення утворюючого контуру стрижня традиційного аналогу з відповідним коефіцієнтом, що приймає значення: 0,851, 0,861, 0,931, до покращення вказаних масовартісних і енергетичного показників технічного рівня на ((2,30-1,91%), (3,19-2,77)%), ((2,07-1,72)%, (2,82-2,47)%), ((0,42-0,39)%, (0,49-0,46)%) при мідній, та на ((1,66-1,29)%, (2,42-1,99)%), ((1,49-1,16)%, (2,13-1,65)%), ((0,34-0,266)%, (0,43-0,35)%) при алюмінієвій обмотках.

Адекватність розроблених математичних моделей, визначення характеристик на основі безрозмірних складових цільових функцій і універсальних відносних керованих змінних підтверджена порівнянням розрахункових і фактичних характеристик трифазних трансформаторів ТМ40/10У1 та ТМН 2500/35У1 серійного випуску.

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

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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

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

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

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

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

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

5. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массостоймых показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А.А. Ставинский, Р.А.

Ставинский, А.Н. Цыганов // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 5 (81). – с. 106-112. (Ulrich`s periodicals directory).

6. Ставинский А. А. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №7(77). – с. 47-52. (Ulrich`s periodicals directory)

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

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

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

10. Циганов О.М. Залежність показників трифазних трансформаторів і реакторів від заповнення сталлю кругових і восьмигранних контурів стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів / О.М. Циганов // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Серія: Електричні машини та електротехнічне перетворення

енергії: – Харків : НТУ "ХПІ". – 2020. – №3(1357). – с. 15-23. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.03 (Фахове видання категорії "Б", Ulrich`s periodicals directory, Google Scholar)

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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

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

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

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

16. Ставинский А.А. Анализ целевых функций и управляемых переменных оптимизационных расчетов трансформаторов и реакторов / А.А.

Ставинский Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский, А.С. Садовый, А.Н. Цыганов // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК. – 2018. с. 45-49.

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

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

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

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

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

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

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

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

ABSTRACT

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

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.09.01 "Electric Machines and Apparatuses" (141-Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics). - Mykolayiv National Agrarian University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolayiv, 2021.

The dissertation will be defended at a meeting of the specialized academic council K41.052.05 at Odessa polytechnic state university of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of preservation of material and power resources at manufacture and operation of single - phase and three - phase power distribution transformers and reactors with the shifted magnetic conductors.

The state of development and design and technological features of electromagnetic systems that are in production and are traditionally used in modern designs of transformers and reactors are considered. Innovative design and technological solutions for the improvement of transformer equipment by replacing traditional rectangular and circular generatrices of the outer contour, rods and winding coils with hexagonal and octagonal contours are proposed. The symmetrical hexagonal outer contour reduces the volume and the number of angular zones of changing the direction of the magnetic flux of the magnetic circuit relative to the direction of the texture of electrical steel and reduces the average length of turns by arranging the winding coils on three rods. This makes it possible to reduce the mass, cost and losses of a single-phase transformer or reactor. The formation of turns of the winding coils and the arrangement of packages and groups of rectangular plates of steel plane-parallel and at angles of 120° in eight and hexagonal equilateral contours increases reliability and reduces metal consumption, losses and labor intensity of the production of planar electromagnetic systems. Reliability increases, metal

consumption and losses are reduced, respectively, by eliminating internal residual stresses of curvilinear bending of the conductor over most of the length of each turn and increasing the filling factor of the cross section of the polyhedron contour (contour factor) relative to the traditional circular contour. The indicated structural transformations provide for some changes in the manufacturing processes of magnetic cores and windings and technological equipment, that is, certain costs. Therefore, a preliminary theoretical substantiation of the presence of advantages and the feasibility of structural and geometric changes is necessary on the basis of the development of mathematical models for optimizing the comparison of electromagnetic systems with innovative and traditional technical solutions.

There are varieties of optimization methods for calculating electromagnetic systems, adapted to specific structural and geometric designs of magnetic circuits and windings. Such techniques are distinguished by individual controlled variables and are used in the parametric synthesis of electromagnetic static devices. There is also a general objective function method for all electromechanical devices, which differs from others by dimensionless optimization components and universal geometric and electromagnetic controlled variables. This method is most consistent with solving the issue of generalized optimization comparison of options for electromagnetic systems, that is, structural synthesis.

The named method of structural and structural-parametric synthesis created a number of design models of individual optimization criteria and determined the main indicators of the technical level, that is, mass-value and energy analysis of electromagnetic systems of transformers and reactors with laminated magnetic circuits. The task of optimization comparative analysis of the main traditional variants of single-phase and three-phase planar electromagnetic systems in accordance with rectangular and circular generating contours has received further development. For the first time, design models of indicators of the technical level of a single-phase spatial radial system with a three-phase magnetic circuit and variants of three-phase planar systems with multifaceted generating contours of rods and winding coils were developed. The extrema of the mass indices of a single-phase planar rod electromagnetic system improve (decrease) in relation to an

electromagnetically equivalent planar armored analogue by (3,71-6,29)% with copper windings and by (7,93-9,85)% with aluminum windings. The indicators of the cost of a planar armored electromagnetic system improve (decrease) relative to the rod analogue with copper conductors by (2,55-1,1)%, and with aluminum windings they deteriorate by (3,17-5,81)%. The extrema of the indicators of active power losses of a single-phase planar armor system with the calculated identity of the coefficients of additional losses are improved (reduced) relative to the rod analogue by (4,22-1,42)%. The improvement, that is, the decrease in the extrema of the mass indices and the cost of a single-phase radial three-rod system relative to a planar rod system, is, respectively, (1,46-1,98)% and (2,22-1,88)% for copper windings and (0,84-0,53)% and (1,53-1,17)% with aluminum windings. The calculated value, with the conditional identity of the coefficients of additional losses of textured magnetic circuits, the extrema of the indicators of the active power losses of the radial three-rod system relative to the rod analogue is (2,41-2,11)%.

It has been determined that the replacement of the circular generatrices of the cross-sections of the winding coils, rods and yokes with octagonal ones with an increase in the electrodynamic resistance causes some improvement in the main indicators of the technical level. In the presence of three packages in the halves of the forming contours, the extrema of the mass and cost indices improve (decrease) by (0,88-0,76)%, (1,17-1,03%)% for copper and (0,69-0,55)%, (0,94-0,78)% with aluminum windings. When located in the halves of the contours of four packages, such indicators improve by (1,36-1,15)%, (1,81-1,59)% with copper and (1,01-0,81)%, (1,39-1,18%) with aluminum windings. When the octahedral contour is completely filled with steel, the extremes of the indicated indicators of the technical level improve relative to the traditional analogue with a contour filling factor of a circular contour of 0,931, respectively by (1,19-1,02)%, (1,59-1,42)% with copper and (0,87-0,71)%, (1,22-1,04)% with aluminum windings. Loss rates with three, four packets in half loops and with a contour factor of 1 are improved by (1,21-1,10)%, (1,92-1,73)% and (1,68-1,52)%. Replacement in three-phase planar rod systems of circular and octagonal generatrices of the contours of the yoke sections by stepped yokes with flat inner surfaces additionally improves the main indicators of the

technical level. It was also found that the replacement in a three-phase planar system with a rod butt magnetic circuit of circular generatrices with a hexagonal one with a complete contour filling of the rod part and a significant reduction in the labor intensity of manufacturing an innovative version leads, depending on the contour filling of the forming rod contour of a traditional analogue with the corresponding coefficient, takes the value: 0,851, 0,861, 0,931, to the improvement of the mass-art indicators of the technical level by ((2,30-1,91%) (3,19-2,77%) ((2,07-1,72)%, (2,82-2,47)%) ((0,42-0,39)%, (0,49-0,46)%) with copper, and by ((1,66-1,29)%, (2,42-1,99)%) ((1,49-1,16)%, (2,13-1,65)%) ((0,34-0,266)%, (0,43-0,35)%) with aluminum windings.

The adequacy of the developed mathematical models, the determination of characteristics based on the dimensionless components of the objective functions and universal relative controlled variables is confirmed by comparing the calculated and actual characteristics of three-phase transformers TM40/10Y1 and TMH 2500/35Y1 of serial production.

Key words: single-phase and three-phase transformers and reactors, rectangular, circular, hexagonal and octagonal contours, laminated magnetic circuit, objective functions, optimization, comparative analysis, heat load.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП.....	18
Розділ 1. СТАН РОЗВИТКУ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	25
1.1. Особливості традиційних структур і конструкцій електромагнітних систем трансформаторів і реакторів.....	25
1.2. Методи оптимізаційних розрахунків статичних електромагнітних систем.....	29
1.3. Постановка задач дослідження.....	33
1.4. Висновки до розділу 1.....	35
Розділ 2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ АКТИВНИХ ЧАСТИН І МЕТОД ПРОЄКТНОГО СИНТЕЗУ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА РЕАКТОРІВ	37
2.1. Перетворення структур і конфігурацій активних елементів.....	37
2.2. Вплив конструктивно-технологічних чинників на механічну міцність і стійкість обмоток.....	44
2.3. Пропозиції удосконалення шихтованих текстурованих магнітопроводів.....	48
2.4. Цільові функції, вихідні данні та припущення оптимізаційного проектного синтезу варіантів електромагнітних систем	51
2.5. Висновки до розділу 2.....	63
Розділ 3. ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ОДНОФАЗНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ПРЯМОКУТНИМИ УТВОРЮЮЧИМИ КОНТУРАМИ ОБМОТКОВИХ КОТУШОК І ПЕРЕРІЗАМИ ШИХТОВАНОГО МАГНІТОПРОВОДУ	65
3.1. Масовартісні показники планарної стрижневої системи	65
3.2. Показники втрат активної потужності планарної стрижневої системи.....	72
3.3. Масовартісні показники планарної броньової системи.....	75
3.4. Показники втрат активної потужності планарної броньової системи.....	81

	15
3.5. Масовартісні показники радіальної тристрижневої системи	84
3.6. Показники втрат активної потужності радіальної тристрижневої системи.....	90
3.7. Висновки до розділу 3.....	93
Розділ 4. ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ СТРИЖНЕВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЗІ СХІДЧАСТИМИ ВНУТРІШНІМИ ПОВЕРХНЯМИ ЯРЕМ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ	94
4.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем	94
4.2. Показники втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем	101
4.3. Масовартісні показники системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем	104
4.4. Показники втрат активної потужності системи з восьмигранними утворюючим контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем	112
4.5. Висновки по розділу 4.....	115
Розділ 5. ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ СТРИЖНЕВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ПЛОСКИМИ ВНУТРІШНІМИ ПОВЕРХНЯМИ ЯРЕМ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ.....	117
5.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів.....	117
5.2. Показники втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів	124
5.3. Масовартісні показники системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів	127
5.4. Показники втрат активної потужності системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів	135
5.5. Масовартісні показники системи з шестигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів.....	139

	16
5.6. Показники втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів.....	148
5.7. Висновки до розділу 5.....	151
Розділ 6. ПІДСУМКИ ТА ПЕРЕВІРКА ОКРЕМИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ ВАРІАНТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ.....	154
6.1. Результати розрахунків окремих критеріїв оптимізації активної частини електромагнітних статичних пристроїв.....	154
6.2. Розрахунок основних характеристик варіантів трифазного трансформатора потужністю 40 кВ·А, що перебуває у виробництві	158
6.3. Основні характеристики аналога серійного зразка потужністю 40 кВ·А з восьмигранними утворюючими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем.....	162
6.4. Розрахунок основних характеристик трифазного трансформатора потужністю 2500 кВ·А, що перебуває у виробництві	165
6.5. Розрахунок основних характеристик аналога трансформатора потужністю 2500 кВ·А з восьмигранними утворюючими контурами комбінованого шихтовано-стикового магнітопроводу та плоскими внутрішніми поверхнями ярем.....	169
6.6. Висновки до розділу 6.....	172
ВИСНОВКИ.....	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	179
ДОДАТКИ.....	193
Додаток А. Порівняння середнього теплового навантаження обмоток варіантів однофазної електромагнітної системи.....	193
Додаток Б. Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.....	201

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕСП – електромагнітні статичні пристрої

ЕМС – електромагнітні системи

УК – утворюючі контури

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЕДС – електродинамічна стійкість

ЕТС – електротехнічна сталь

ЦФ – цільова функція

КЗ – керована змінна

ПТР – показник технічного рівня

ОТ – однофазний трансформатор

ТТ – трифазний трансформатор

ТР – трифазний реактор

ЕМН – електромагнітні навантаження

ММ – математична модель

АМО – активний матеріал обмотки

ВСТУП

Актуальність теми. Головними та енергометалоемними елементами систем електропостачання є трансформатори і реактори різної потужності. Втрати в силових розподільчих трансформаторах складають 1/3 від загальних втрат енергосистем. Основна частина цих втрат приходить на трансформатори I-III габаритів, особливо потужністю до 630 кВ·А. Тому зниження втрат таких трансформаторів уявляє важливу актуальну задачу. Також актуальним є зниження матеріалоемності і вартості та забезпечення електродинамічної стійкості кожної нової розробки трансформаторно-реакторного обладнання [1-16].

Необхідність рішення задач подальшого енергоресурсозбереження в Україні регламентується діючими Постановами Верховної ради від 22.02.2001 р. № 2274-111 (2274-14) "Енергетична стратегія України на період до 2030 року і Кабінету міністрів від 03.04.2006 р. № 412 "Про забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів» та від 22.10.2008 р. № 935 "Про організацію державного контролю за ефективним (раціональним) використанням паливно-енергетичних ресурсів.

Основою значної частини сучасних трансформаторів I-III габаритів і реакторів, а також усіх великих та потужних електромагнітних статичних пристроїв (ЕСП) є планарні електромагнітні системи (ЕМС) з шихтованими магнітопроводами. Структури ЕМС однофазних і трифазних ЕСП з прямокутними і круговими утворюючими контурами (УК) стрижнів і обмоткових котушок є "традиційними", тобто незмінними протягом минулого століття і характеризуються відомими недоліками [3-7, 12-22]. Останні технічні рішення і конструктивно-технологічні особливості таких ЕМС також є незмінними в останні десятиріччя, що пов'язано з технологічним консерватизмом та небажанням витрат на нові розробки [20]. При цьому відомо, що силові розподільчі трансформатори потужністю до 1000 кВ·А і напругою 6-10 кВ масового виробництва та застосування є значним резервом енергоресурсозбереження. Це пов'язано з тим, що підвищення енергоефективності таких трансформаторів усього на 0,1 % є виправданим і дає суттєвий ефект [3, 6, 20-22]. На трансформатори великої потужності, у зв'язку з коефіцієнтом корисної дії (ККД), що наближається до 100%, приходить усього 2% від загальних втрат [3, 6]. Однак потужні ЕСП

відрізняються складністю виробництва і містять комплексне автоматизоване обладнання охолодження, захисту та контролю, тобто є складними електротехнічними комплексами. Питання зниження трудомісткості складання магнітопроводів ЕСП масового випуску I-III габаритів та підвищення надійності, зокрема забезпечення електродинамічної стійкості (ЕДС), а також зниження вартості великих трансформаторів, є проблемними [4, 6, 11-25].

У систематизованих в [20] сучасних публікаціях основними способами і напрямками удосконалення ЕСП, як і в минулі десятиріччя, вважається використання нових електротехнічних матеріалів. Кардинальні способи енергоресурсозбереження в трансформаторобудуванні базуються на складних технологіях виробництва композитних провідників обмоток з "високотемпературною" надпровідністю і аморфної електротехнічної сталі (ЕТС). Однак виникають питання специфіки конструкції, експлуатації і комплектації трансформаторного і технологічного обладнання. До названих питань і недоліків відносяться вихід обмотки зі стану надпровідності після захисного відключення, зниження індукцій номінального режиму і насичення, підвищена технологічна чутливість до механічних впливів і крихкість багат шарової аморфної стрічки. Згідно [26] криогенні технології обмоток доцільні для застосування в трансформаторах великої потужності, а використання аморфної ЕТС обумовлено технологічною межею потужності ЕМС з витими магнітопроводами [16, 17]. Також "високотемпературні криогенні" і "аморфні" трансформатори мають значно підвищену вартість відносно аналогів з традиційними електротехнічними матеріалами [6, 10, 13, 14, 16, 17].

У більшості перебуваючих у виробництві трансформаторів і реакторів магнітопроводи виконуються з холоднокатаної анізотропної ЕТС. Заміна ізотропної трансформаторної ЕТС на анізотропну призвела до покращення масогабаритних показників та зниження втрат активної потужності ЕСП. Однак виникла проблема значного підвищення втрат в кутових зонах зміни напрямку магнітного потоку відносно напрямку текстури ділянок планарних шихтованих магнітопроводів і суттєвих додаткових втрат витих трифазних триконтурних магнітопроводів традиційних конструкцій, що в певній мірі знижує ефективність застосування анізотропної ЕТС.

Також важливим кроком на шляху подальшого удосконалення ЕСП з'явилося створення у другій половині ХХ віку методик оптимізації на основі визначення цільових функцій (ЦФ) з геометричними і електромагнітними керованими змінними (КЗ) та використання досягнень обчислювальної техніки в електромагнітних і теплових розрахунках [4, 6].

В останні десятиріччя додатково до сучасних досягнень електроматеріалознавства використовувались залишкові резерви удосконалення ЕМС ЕСП. Виконана, незважаючи на значні ускладнення технології та появу відходів ЕТС, заміна "прямих" стиків магнітопроводів з анізотропною ЕТС на "косі" [4, 6, 15, 20]. З міркувань зниження трудомісткості виготовлення, використання прямокутних перерізів стрижнів магнітопроводів поширено до потужності 630 кВ·А – серії Tumetic (федеративна республіка Німеччина) і ОСМ (Японія). При цьому відомі проблеми прямокутних УК обмоткових котушок вирішуються клеючим покриттям міжшарової ізоляції або капсулюванням обмоток (технології "CAST RESIN" і "RESIBLOC") [6, 15, 16].

Крім вказаних, існує інноваційний "евристичний" спосіб енергоресурсозбереження в електромеханіці застосуванням нетрадиційних структурно-геометричних перетворень ЕМС і споріднених технологій [5, 7, 12, 27-51]. Зокрема в ЕСП можлива заміна традиційних прямокутних і криволінійних УК елементів ЕМС на багатогранні [12, 29, 30, 32, 33, 35, 36, 38-40, 42, 45-51].

Сучасні вимоги щодо підвищення ККД і надійності та зниження питомої і технологічної матеріалоемності, а також трудомісткості виробництва, вимагають необхідність подальшого комплексного удосконалення електромеханічних пристроїв. Конструктивно-структурні і технологічні особливості і недоліки статичних ЕМС з традиційними УК вказують на необхідність удосконалення ЕСП різної потужності. В першу чергу постає питання зниження трудомісткості виготовлення та підвищення технічного рівня силових розподільчих трансформаторів і реакторів до 1000 кВ·А (кВ·Ар) з шихтованими магнітопроводами, як об'єктів масового випуску і застосування.

Тому *актуальним* науковим завданням є підвищення основних показників технічного рівня (ПТР) [7, 32, 39, 40] однофазних і трифазних ЕСП, а саме

зниження показників маси, вартості і втрат активної потужності, а також підвищення надійності ЕМС з шихтованими магнітопроводами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота входить до комплексу науково-дослідних робіт у галузі енергоресурсозбереження. Такі роботи відповідають закону України "Про енергозбереження". Виконані дослідження відповідають тематичному плану Міністерства освіти і науки України за науковим напрямком "Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології". Результати та положення дисертаційної роботи складають суттєву частину науково-дослідної роботи за темою "Удосконалення, структурний і параметричний синтез трансформаторів" №ДР0117U005255 і "Удосконалення, структурний та параметричний синтез електромагнітних статичних пристроїв" №0120UO5761, де автором створені проєктні математичні моделі удосконалених на основі інноваційних структурно-геометричних перетворень ЕМС однофазних і трифазних трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами.

Мета і задачі дослідження. Узагальнене порівняння показників відомих і перспективних конструкцій ЕМС однофазних і трифазних трансформаторів та реакторів з шихтованими магнітопроводами на основі ЦФ структурного синтезу.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання.

1. Аналіз традиційних та інноваційних конструкторсько-технологічних рішень елементів ЕМС однофазних і трифазних ЕСП.
2. Аналіз оптимізаційних методик та обрання методу проєктного синтезу ЕСП, що відрізняються структурно-геометричними особливостями ЕМС.
3. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів однофазної ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів шихтованих магнітопроводів.
4. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів трифазної планарної стрижневої ЕМС зі східчастими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів.

5. Розробка узагальнених моделей показників маси, вартості і втрат активної потужності варіантів трифазної планарної стрижневої ЕМС з плоскими внутрішніми поверхнями ярем шихтованих магнітопроводів.

6. Визначення залежностей показників технічного рівня від конструктивно-технологічних особливостей варіантів однофазних і трифазних ЕМС з шихтованими магнітопроводами.

Об'єкт дослідження – структури ЕМС однофазних і трифазних ЕСП з шихтованими магнітопроводами.

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

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач використані теорія електромагнітних перетворювачів, метод експертної оцінки та метод складання ЦФ з виділенням безрозмірних складових оптимізації ПТР ЕМС, що містять універсальні відносні геометричні і електромагнітну КЗ.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримали подальший розвиток оптимізаційні моделі однофазних планарних стрижневої і броньової ЕМС з прямокутними УК, а також варіантів трифазної ЕМС з круговими УК, що надало можливість порівняльного аналізу традиційних і нових конструктивних варіантів на основі узагальнених ЦФ ПТР.

2. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації ПТР радіальної тристрижневої ЕМС, які дозволяють оцінити ефективність структурних перетворень при проектуванні однофазних трансформаторів і реакторів.

3. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації ПТР варіантів трифазної планарної стрижневої ЕМС з рівнобічними восьмигранними УК, що забезпечує науково-практичне обґрунтування перспективних геометричних конфігурацій активних елементів.

4. Вперше одержані узагальнені моделі оптимізації ПТР варіантів трифазної планарної стрижневої ЕМС з рівнобічними шестигранними УК, на основі яких визначена доцільність спрощення виготовлення реакторів формуванням стрижнів з ідентичних прямокутних листів ЕТС.

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

Практичне значення отриманих результатів

1. Запропоновані і запатентовані нові конструкції ЕМС на основі нетрадиційних УК, що забезпечують покращення основних ПТР, зниження трудомісткості виготовлення та підвищення ЕДС ЕСП.

2. Запропоновані і запатентовані технологічні способи виготовлення магнітопроводів статичних ЕМС з покращеними ПТР.

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

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

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

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

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

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Міжнародному симпозіумі "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, SIEMA" (2008, Харків);

Всеукраїнських конференціях з міжнародною участю "Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів" (2008, 2011, Миколаїв); Міжнародної конференції "Проблеми підвищення ефективності електромеханических преобразователей в електроенергетических системах" (2010, Севастополь); International conference on "Modern electrical and energy systems" (2017, 2019, Кременчук); Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки" (2018, 2020, Миколаїв).

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

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 204 сторінок та містить 188 сторінок основної частини, у тому числі анотацію, перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, висновки, перелік використаних літературних джерел з 114 найменувань на 14 сторінках, двох додатків на 12 сторінках, 35 рисунка, 37 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН РОЗВИТКУ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Особливості традиційних структур і конструкцій електромагнітних систем трансформаторів і реакторів

На вихідній стадії становлення теорії і практики електротехніки були визначені два різновиди структур ЕМС трансформаторів – просторова і планарна [4, 15, 52-58]. В процесі розвитку електроенергетики і електромеханіки виникла необхідність масового випуску ЕСП. В зв'язку з технологічними перевагами розташування в одній площині плоских прямокутних пластин (листів) ЕТС та формування з них пакетів плоскопаралельних шарів магнітопроводів, основу більшості парку однофазних і трифазних ЕСП різної потужності складають ЕМС планарних структур (рис. 1.1, а-г). Також додатково до названих при побудові потужних трансформаторів застосовується планарна бронестрижнева структура (рис. 1.1. д), а при виготовленні ЕСП потужністю до 1000 кВ·А (кВ·Ар) додатково застосовуються просторові структури (рис. 1.1, е, ж) [6, 59-61].

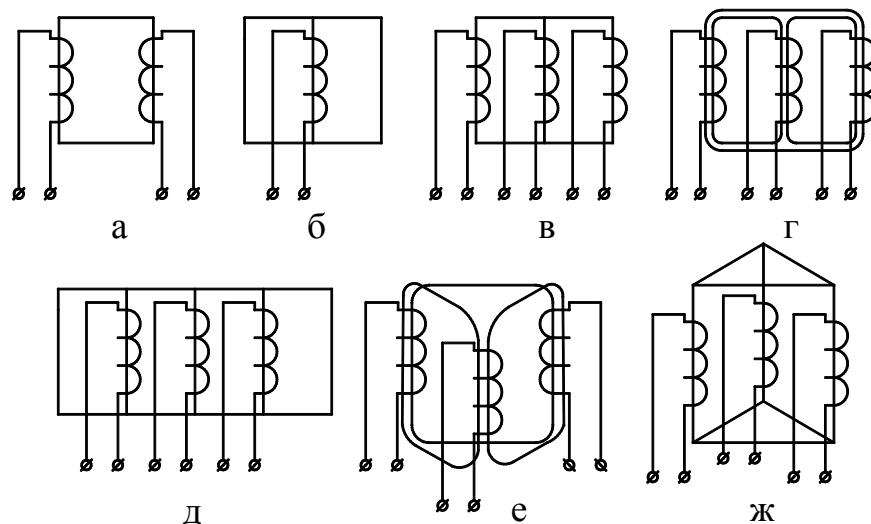


Рисунок 1.1 – Структурні схеми однофазних стрижневої (а) і броньової (б) та трифазних стрижневих (в, г) і бронестрижневої (д) планарних, а також аксіальних просторових (е, ж) електромагнітних систем

В стикових магнітопроводах реакторів з конструктивними зазорами використовуються плоскопаралельні роз'єми суміжних шарів ЕТС (рис. 1.2, а, б). При складанні магнітопроводів трансформаторів для зниження намагнічувального струму і підвищення конструктивної міцності використовуються прямі ортогональні (рис. 1. 2, в-д) та косі (рис. 1. 2, е-з) зсуви стиків суміжних шарів ЕТС, а також їх комбінації. Структурно-конфігураційні варіанти (рис. 1. 2, д-з) зменшують об'єми зон зміни напрямку магнітного потоку відносно напрямку текстури та збільшують площу стиків ділянок магнітопроводів. Однак підвищуються додаткові втрати наклепу розділення ділянок стрижнів і ярем на частини ("рамні" магнітопроводи зі схемою кутів з прямими на рис. 1. 2, д) та косими стиками) і трудомісткість виробництва та втрати зон гострих кутів косих стиків ЕТС (рис. 1. 2, е-з). При формуванні косих стиків виникають скриті відходи ЕТС у вигляді виступів – "вусів" (рис. 1. 2, е), або відходи фігурного розкроєння (рис. 1. 2, ж, з) [4, 6, 18, 20, 54-56]. Створено обладнання виконання косих стиків з послідовним малим зсувом в суміжних шарах, що знижує додаткові втрати. Такий зсув досягається зміною розмірів ділянок суміжних шарів ЕТС ("step-lap" і "malty step-lap" – магнітопроводи) [4, 16, 18, 20, 58]. Однак згідно [6, 18] косі стики не є ефективним рішенням удосконалення шихтованих магнітопроводів трансформаторів I-II габаритів. Також в [6] вказано, що збільшення втрат виготовлених планарних шихтованих текстурованих магнітопроводів відносно питомих втрат анізотропної ЕТС складає 37-58% незалежно від форм стиків. Задачі зниження втрат кутових зон різновидів шихтованих текстурованих магнітопроводів є дуже актуальною і проблемною.

В малих ЕСП і при потужності трансформаторів до 200 кВ·А застосовувались магнітопроводи з прямокутними перерізами стрижнів і ярем, тобто згідно класифікаціям [29, 30], з прямокутними утворюючими поверхнями або прямокутними УК (рис. 1. 3, а). Значними недоліками прямокутних УК є зниження надійності ізоляції в кутах при вигині витків малим радіусом та збільшення матеріалоемності обмоток [6, 15, 40]. Однак, як вже згадано у вступі, з початку ХХІ століття застосування прямокутних УК елементів ЕМС, з

метою підвищення технологічності виробництва магнітопроводів, поширене до потужності 1000 кВ·А. При цьому відсутнє дослідницьке аналітичне порівняння показників ЕМС з прямокутними і циліндричними УК.

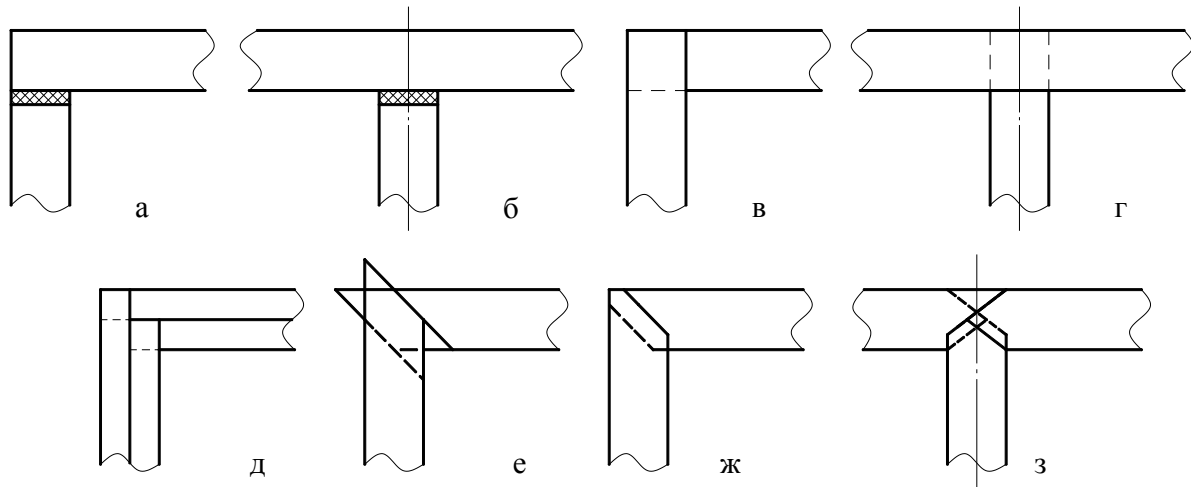


Рисунок 1.2 – Варіанти складання шарів електротехнічної сталі без зсуву (а, б) та з ортогональними (в-д) і косими (е-з) зсувами стиків в бокових і центральних зонах зміни напрямку магнітного потоку відносно напрямку текстури

Циліндричні утворюючі поверхні перерізів стрижнів і обмоткових вікон при "східчастому" заповненні у більшості кругових УК пакетами пластин ЕТС різної ширини (рис. 1. 3, б) застосовуються при потужності трансформатора S_H від 1 кВ·А. При 3 ($S_H \leq 16$ кВ·А), 4 ($S_H = 16-60$ кВ·А) і 16 ($S_H \geq 80000$ кВ·А) сходинках (пакетах ЕТС) в половині кола відношення площ східчастих перерізів магнітопроводів до площ кіл, тобто коефіцієнти заповнення кругових УК стрижнів контурами їх ортогональних перерізів (контурні коефіцієнти) складають $K_{\text{кк}}=0,851$, $K_{\text{кк}}=0,861$ і $K_{\text{кк}}=0,931$ [15, 54-56]. Недостатнє заповнення криволінійних УК з $K_{\text{кк}} < 0,9$ підвищує матеріалоємність та втрати ЕСП, а наближення до $K_{\text{кк}}=0,9$ та виконання ЕМС з $K_{\text{кк}} > 0,9$ суттєво підвищує трудомісткість виготовлення магнітопроводів заготовкою та складанням значного числа пакетів ЕТС, що відрізняються розмірами. Площа і конфігурації перерізів ярем у більшості ЕМС з криволінійними УК співпадають зі стрижнями. Однак інколи зовнішні поверхні ярем виконуються східчастими, а внутрішні плоскими, що згідно [15] призводить до деякого покращення показників ЕСП. Однак числове визначення вказаного покращення до

нинішнього часу також невідомо. Суттєвим недоліком криволінійних УК обмоткових котушок є зниження ЕДС ЕСП в зв'язку з виникненням внутрішніх технологічних залишкових механічних напруг криволінійного вигину обмоткових провідників. Такі напруги при коротких замиканнях складаються з напругами від електромагнітних сил та підсилюють їх дію і суттєво погіршують ЕДС ЕСП [23, 24].

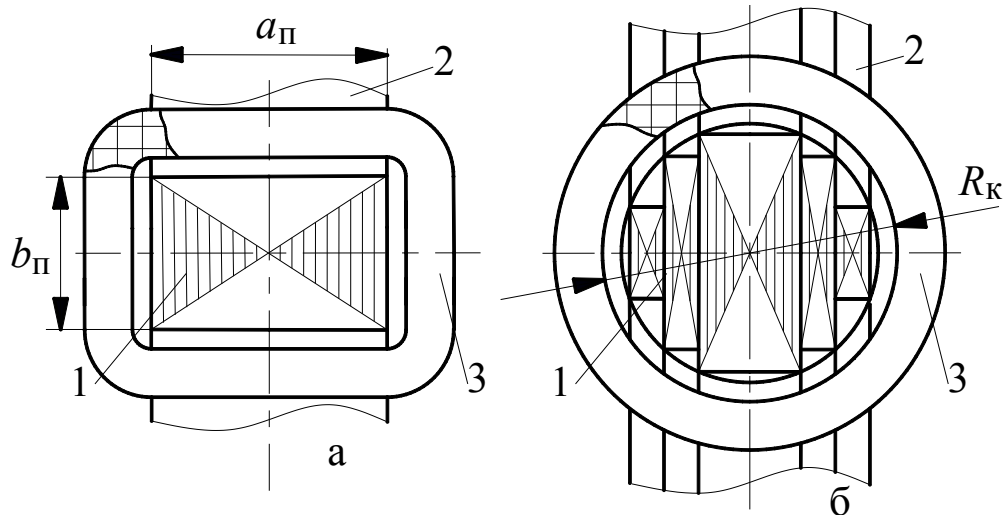


Рисунок 1.3 – Фрагменти схем електромагнітних систем з прямокутними (а) і круговими (б) утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – обмотка.

На основі освоєння виробництва рулонної ЕТС у другій половині ХХ віку крім шихтованих і витих планарних магнітопроводів в однофазних і трифазних ЕМС схем (рис. 1.1, а-д) і тороїдної схеми [53, 57], в трифазних ЕМС схем (рис. 1.1, е-ж) почалось застосування комбінованих (ярма виті, стрижні пластинчасті) і витих магнітопроводів (рис. 1.4). В однофазних варіантах з витими магнітопроводами максимально використані переваги рулонної анізотропної ЕТС відносно ізотропної трансформаторної ЕТС. Однак в трифазних ЕМС з двохконтурними фазними елементами витих магнітопроводів схем (рис. 1.1, г-ж) виникають 30-33% додаткові втрати від третіх гармонік контурних магнітних потоків окремих витих секцій [6, 15, 62]. Задача їх усунення також є проблемною. В варіантах просторових ЕМС зі стиковим комбінованим (рис. 1.4, а) та витим трисекційним (рис. 1.4, б) магнітопроводами також застосовуються кругові УК активних елементів. Це додатково до неповного заповнення контурних кіл

перерізів стрижнів та зниження ЕДС призводить до збільшення порожнин між обмотковими котушками, що обумовлено різницею довжин зовнішнього і внутрішнього контурів магнітопроводів. Підвищуються маси магнітопроводів і радіуси зовнішніх контурів $R_{\text{ККС(В)}}$ ЕМС (рис. 1.4) [29, 30, 35, 36, 40].

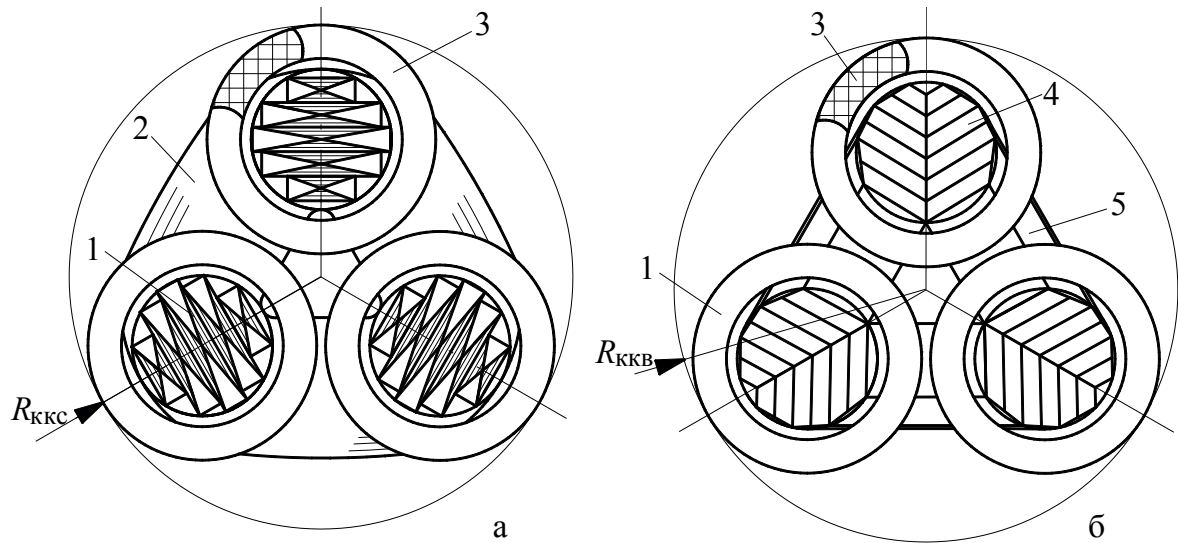


Рисунок 1.4 – Конструктивні схеми в поперечних перерізах трифазних просторових електромагнітних систем з комбінованим (а) і витим (б) магнітопроводами:

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

В зв'язку з вище переліченими особливостями та суттєвими недоліками ЕМС, що обумовлюють традиційні УК, їх подальше застосування при розробці нових ЕСП не відповідає сучасним вимогам.

1.2. Методи оптимізаційних розрахунків статичних електромагнітних систем

Масовартістні і енергетичні показники ЕСП, крім питомих та додаткових втрат застосованої ЕТС, а також міді (алюмінію) або сучасного надпровідникового композиту обмоток, в першу чергу залежать від структурно-геометричних особливостей і співвідношень розмірів активних елементів та електромагнітних навантажень (ЕМН). В свою чергу рівень ЕМН залежить від типу і призначення ЕСП та способу його охолодження. Максимально

раціональне, тобто оптимальне поєднання геометричних співвідношень і ЕМН досягається проектними оптимізаційними розрахунками шляхом знаходження екстремуму ЦФ за певним критерієм [4, 6, 63-87].

При заданих структурі ЕМС і вимогах технічного завдання проектування оптимізаційні розрахунки уявляють параметричний синтез ЕСП при певних проектних, зокрема теплових обмеженнях. Задачі удосконалення статичних ЕМС в рамках традиційних структур і УК (рис. 1.1 – рис. 1.4) на основі застосування покращених електроматеріалів і математичних моделей оптимізаційного параметричного синтезу [63-83] і адекватних теплових розрахунків [4, 6, 52, 88-92] практично вирішені.

В оптимізаційних розрахунках ЕСП малої потужності і спеціального призначення застосовуються ЦФ окремих критеріїв оптимізації – мінімумів маси або контурного об'єму та максимуму ККД [53, 57, 84-86]. Проектування трансформаторів і реакторів силового розподільчого призначення виконується з застосуванням ЦФ критеріїв мінімумів вартості або загальних витрат на виробництво і експлуатацію [63-65]. Сучасним аналогом ЦФ загальних витрат при постійній зміні вартості матеріалів і електроенергії є ЦФ повної капіталізованої вартості ЕСП [4, 86, 87].

Капіталізована вартість $C_{\text{кт(р)}}$ трансформатора (реактора) є підсумком вартості ЕСП $C_{\text{т(р)}}$, яка включає вартість експлуатації і монтажу, вартість втрат неробочого руху (магнітопроводу) $P_{\text{н(м)}}$ та вартість втрат короткого замикання (обмотки) $P_{\text{н(о)}}$ [4, 86, 87]

$$C_{\text{кт(р)}} = C_{\text{т(р)}} + K_{\text{н(м)}}P_{\text{н(м)}} + K_{\text{к(о)}}P_{\text{к(о)}}, \quad (1.1)$$

де $K_{\text{н(м)}}$ і $K_{\text{к(о)}}$ – питомі капіталізовані вартості втрат неробочого руху (магнітопроводу) і короткого замикання (обмотки).

Застосовується сукупність незалежних і залежних КЗ. Основними (незалежними) КЗ ЦФ оптимізації традиційних ЕМС є геометричні параметри – висота і ширина обмоткового вікна, довжина і ширина прямокутного перерізу стрижня (рис. 1.3, а) та діаметр кругового УК перерізу стрижня (рис. 1.3, б), а також ЕМН – середнє значення амплітуди індукції стрижня B_c і середня щільність струму обмоток трансформатора (щільність струму обмотки реактора) J_o [63-67,

70-74]. Інколи як незалежні КЗ використовуються співвідношення втрат короткого замикання і неробочого руху або співвідношення вартостей системи обмоток і магнітопроводу [72, 78, 83]. При цьому залежними стають основні розміри ЕМС діаметр $D_{\text{лкк}}$ (рис. 1.3, б), висота і ширина обмоткового вікна. Для скорочення числа геометричних КЗ оптимізації ЕМС (рис. 1.3, а-в) з прямокутними УК в [94, 95] запропоновані відносні (безрозмірні) геометричні КЗ відношень n , m , l довжини $a_{\text{п}}$ перерізу стрижня, висоти $h_{\text{в}}$ і ширини $b_{\text{в}}$ обмоткового вікна до ширини $b_{\text{в}}$ перерізу стрижня:

$$n = a_{\text{п}}/b_{\text{п}}; m = h_{\text{в}}/b_{\text{п}}; l = b_{\text{в}}/b_{\text{п}}. \quad (1.2)$$

З особливостей процесу електромагнітного перетворення енергії впливає складність моделювання і оптимізації ЕСП. У більшості методик параметричного синтезу загальна математична модель ЕСП поділяється, з метою спрощення, на сукупність моделей окремих елементів ЕМС і систему рівнянь. У відповідності до рівнянь таких моделей, комп'ютерні обчислювальні програми поділяються на окремі модельні блоки [70, 72, 78]. Пошук екстремумів ЦФ виконуються за допомогою алгоритмів, що розроблені з використанням відомих чисельних методів [68].

При структурно-конструктивній стабільності варіантів ЕМС з традиційними УК у минулому столітті, а також протягом останніх десятиріч і впливу факторів "технологічного консерватизму" та заощадження фінансових ресурсів, доцільність практичного використання дійсно нових пропозицій повинна бути доведена об'єктивним аналітичним обґрунтуванням на основі ЦФ узагальненого структурного синтезу ЕМС ЕСП [7, 32, 84-87].

Обрання кращого технічного рішення конкретної розробки технічного об'єкта потребує визначення та порівняння показників якості оптимізованих варіантів вирішення задачі тобто структурно-параметричного синтезу. При цьому параметричний синтез є можливим тільки при заданих структурі та проектних даних технічного завдання конкретної розробки. В зв'язку з цим, згідно [68], структурний і параметричний синтез об'єднуються в єдиному обчислювальному процесі. Поєднання структурного і параметричного синтезу нової розробки досягається методом експертної оцінки шляхом визначення "вагових"

коефіцієнтів (коефіцієнтів переваг). Однак значення подібних коефіцієнтів можуть бути суб'єктивними, що ускладнює проєктний синтез ЕМС.

Для зниження впливу суб'єктивного фактору в [69, 74, 75] пропонується узагальнене значення вагового коефіцієнту. Створені ЦФ багатокритеріальної оптимізації трансформаторів і реакторів з прямокутними УК, які залежать від одного узагальненого вагового коефіцієнту при умові використання та рівнозначності окремих критеріїв оптимізації.

У цілому відомі оптимізаційні математичні моделі вище перелічених інформаційних джерел визначаються індивідуальними взаємно неприйнятними геометричними КЗ (співвідношення розмірів прямокутного перерізу та діаметр УК стрижня ...), а електромагнітні КЗ, тобто ЕМН, залежать від потужності, виконання, способу охолодження і інших даних конкретного технічного завдання нового проєктування. Тому до теперішнього часу відсутнє узагальнене аналітичне зіставлення варіантів структур ЕМС, що відрізняються просторовою топологією та конфігураціями активних елементів.

Для можливості структурного синтезу, тобто узагальненого об'єктивного порівняльного аналізу можливих варіантів рішення задач удосконалення ЕМС, необхідно створення та застосування ЦФ, що задовольняють умовам електромагнітної еквівалентності і інваріантності зіставлення. Такі ЦФ повинні базуватися на універсальних ідентичних і прийнятних для будь яких структурно-геометричних рішень ЕМС КЗ та певних показниках, які не пов'язані з конкретним технічним завданням проєктування.

Рішення задачі структурного синтезу спрощується застосуванням в оптимізаційних ЦФ питомих значень ПТР та відносних КЗ, що запропоновані в [93, 94]. З використанням таких КЗ (1.2) в [57, 93, 94] визначено вплив зміни структури і геометричних співвідношень активних елементів на об'єм, масу і вартість варіантів одно і трифазних ЕМС малої потужності. В [95] також розглянуто вплив змін КЗ (1.2) на втрати активної потужності. Розраховані графічні залежності для обрання оптимальних геометричних співвідношень та визначено, що ЕМС з шихтованими магнітопроводами на 2-4% перевищують по матеріалоємності аналоги з витими магнітопроводами. Однак числові данні порівняльного аналізу варіантів структур

ЕМС не визначені, а результати досліджень [57, 93-95], що визначаються ЦФ з КЗ (1.2), стосуються тільки ЕМС з прямокутними УК.

Умовам структурного синтезу, тобто створення і обрання певної структури і конструкції об'єкту розробки, в даному випадку статичної ЕМС, відповідає метод універсального структурного і структурно-параметричного синтезу ЕМС електромеханічних пристроїв [84-87]. В такому методі, додатково до відносних КЗ застосовані безрозмірні (відносні) значення технічних характеристик у вигляді ПТР. Цим методом виконано оптимізаційний порівняльний аналіз відомих і нетрадиційних конструктивно-технологічних рішень просторових ЕМС трифазних трансформаторів [21, 22, 37, 38, 84-87]. При цьому в [96] показані переваги нетрадиційних пропозицій просторових трифазних ЕМС відносно просторових стикових ЕМС з прямокутними і круговими УК, а в [97] показані переваги просторових ЕМС відносно нових нетрадиційних пропозицій планарного аналога з прямокутними УК та стрижневим шихтованим магнітопроводом. В [98] названим методом виконано оптимізаційне зіставлення асинхронних короткозамкнених двигунів з внутрішнім та зовнішнім роторами та варіантів двигунів з аксіальним робочим зазором, а також варіантів ЕМС трансформаторів з обертовим магнітним полем. Крім того в [99] таким методом виконано структурний синтез однофазних ЕМС ЕСП з витими магнітопроводами. Порівняння варіантів ЕМС здійснюється на основі вищезгаданих безрозмірних ПТР та універсальних відносних КЗ [7, 32].

1.3. Постановка задач дослідження

З викладеного в підрозділах 1.1 і 1.2 огляду випливає, що сучасний розвиток промислового трансформаторобудування, як і протягом ХХ століття, здійснюється традиційними способами [10, 13, 20] в рамках традиційних будов (рис. 1.1 – рис. 1.3). Інновації застосовувалися в технологічних процесах на основі використання сучасних засобів автоматизації та обчислювальної техніки ("step" і "Unicore" технології шихтованих і витих магнітопроводів) [20].

В цілому традиційні конструкторсько-технологічні рішення досягли певної межі розвитку і застосовані остаточні (залишкові) резерви

удосконалення та зниження трудомісткості виробництва магнітопроводів. Такими резервами були заміна при появі відомих недоліків, прямих стиків шихтованих магнітопроводів на косі, заміна в трансформаторах з $200 \leq S_n < 1000$ кВ·А кругових УК на прямокутні та заміна східчастих внутрішніх поверхонь ярем ЕМС з круговими УК на плоскі. Однак аналітичного дослідження впливу на характеристики ЕСП заміни кругових УК елементів ЕМС відповідно на прямокутні і плоскі до нинішнього часу не виконано.

Подальше удосконалення ЕСП на основі здобутків галузей матеріалознавства і криогенної техніки обмежено фізичними властивостями матеріалів та специфікою використання [10-12, 18-20].

Названі фактори обумовлюють пошук та появу нових пропозицій удосконалення ЕМС нетрадиційними способами [5, 12]. Виникає доцільність капіталовкладень в науковий пошук і дослідно-конструкторські розробки покращення ПТР ЕСП на основі інноваційних евристичних структурно-геометричних перетворень активних елементів.

До деяких перевірених на експериментальних зразках вказаних пропозицій відносяться просторові ЕМС з нетрадиційними УК [35, 36, 40] та варіанти шихтованих і витих магнітопроводів з комбінацією марок ЕТС [28, 31, 39, 41]. Запропоновані також структурно-геометричні перетворення планарних ЕМС, зокрема заміна кругових УК на багатогранні, що призводить до зниження трудомісткості виготовлення зменшенням в межах перерізів стрижнів і ярем пакетів ЕТС, що відрізняються розмірами [29, 33].

Переваги заміни прямокутних і кругових УК на секторні і шестигранні в просторових ЕМС трифазних трансформаторів обґрунтовані в [96, 97]. Також в [99] показана доцільність заміни прямокутних УК однофазних ЕМС з витими магнітопроводами на шестигранні. Тому виникає практична необхідність доповнення досліджень вказаного напрямку визначенням впливу використання багатогранних УК активних елементів на основі ПТР, тобто показники маси, вартості і втрат активної потужності ЕМС ЕСП з шихтованими магнітопроводами.

Вказане завдання в частині удосконалення однофазних і трифазних планарних стрижневих ЕМС є метою дисертаційної роботи, та вирішується на основі:

1. Аналізу відомих технічних рішень та інноваційних пропозицій удосконалення активних частин ОТ (ОР), ТТ (ТР) на основі багатогранних УК обмоток і шихтованих магнітопроводів.

2. Створення ММ основних ПТР перебуваючих у виробництві та інноваційних пропозицій однофазних ЕМС з шихтованими магнітопроводами.

3. Створення ММ основних ПТР перебуваючих у виробництві та інноваційних пропозицій трифазних планарних ЕМС з шихтованими магнітопроводами.

4. Визначення та порівняння числових значень ПТР варіантів ЕМС.

1.4. Висновки до розділу 1

1.4.1. Зростання дефіциту енергетичних і матеріальних ресурсів викликає необхідність пошуку шляхів удосконалення ЕСП, в першу чергу силових розподільчих трансформаторів I-III габаритів, як головних елементів розподілення енергетичних потоків та електромеханічних об'єктів масового виробництва.

1.4.2. Освоєння в другій половині ХХ віку трансформаторної анізотропної ЕТС призвело до покращення масогабаритних і енергетичних показників ЕСП. Однак виникла проблема значного підвищення втрат кутових зон шихтованих текстурованих магнітопроводів незалежно від форм стиків. Задача суттєвого зниження цих втрат є вельми актуальною.

1.4.3. Традиційні способи удосконалення трансформаторів і реакторів на основі інновацій електроматеріалознавства задіяні при незмінності традиційних структур ЕМС і обмежені техніко-економічною доцільністю (складні та витратні технології виготовлення і особливості аморфної ЕТС та створення і використання явища "високотемпературної" надпровідності) і фізичними властивостями матеріалів.

1.4.4. Здійснюється підвищення межі потужності трансформаторів з прямокутними УК з 200 до 1 000 кВ·А, також відомо про побудову ЕСП з плоскими внутрішніми поверхнями ярем при складанні магнітопроводів з

пакетів різних розмірів в повздовжньому і поперечному перерізах. Однак узагальнене аналітичне дослідження впливу названих особливостей на показники ЕСП не виконано.

1.4.5. Традиційні кругові УК обмоткових котушок зменшують середню довжину витків при високому феромагнітному заповненні криволінійних УК стрижнів, однак суттєво збільшують трудомісткість виготовлення магнітопроводів при застосуванні значної номенклатури пакетів ЕТС різної ширини.

1.4.6. Традиційні криволінійні УК обмоткових котушок створюють внутрішні технологічні залишкові напруження вигину витків, які при складанні з напруженнями від електромагнітних сил короткого замикання, суттєво знижують ЕДС ЕСП.

1.4.7. З аналізу інформаційних джерел впливає відсутність числового визначення впливу топології структур варіантів однофазних ЕМС та варіантів конфігурацій активних елементів трифазних планарних ЕМС на основні показники ЕСП з шихтованими магнітопроводами.

1.4.8. Удосконалення ЕСП додатково до застосування покращених електротехнічних матеріалів можливо зміною структури магнітопроводів і шарів ЕТС, а також геометрії УК ЕМС.

1.4.9. Загальновідомі методики оптимізації ЕСП відповідають традиційним структурам ЕМС з прямокутними і круговими УК, є взаємоне прийнятними методиками параметричного синтезу і не відповідають умовам інваріантності (універсальності) оптимізаційного зіставлення.

1.4.10. Визначення впливу структурної топології на ПТР ЕСП та обґрунтування доцільності застосування нових структурно-конструктивних розробок ЕМС потребує створення ЦФ узагальненого структурного синтезу, тобто об'єктивного оптимізаційного зіставлення традиційних і інноваційних варіантів рішення задачі на основі безрозмірних показників і універсальних відносних КЗ.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ АКТИВНИХ ЧАСТИН І МЕТОД ПРОЄКТНОГО СИНТЕЗУ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА РЕАКТОРІВ

2.1. Перетворення структур і конфігурацій активних елементів

В XXI віці крім збільшення виробництва електроенергії, важливою задачею є її збереження при передачі, розподіленні і перетворенні, що потребує подальшого підвищення технічного рівня та одиничної потужності елементів блочних агрегатів "генератор-трансформатор", силових розподільчих трансформаторів та елементів електроприводів. Важливе значення також має розробка високоефективних систем форсованого охолодження електрообладнання [1, 4, 5].

В зв'язку з тим, що традиційні ЕСП з прямокутними і круговими УК елементів ЕМС в структурно-конструктивному сенсі, як згадано в розділі 1, досягли певної межі розвитку, подальше удосконалення ЕСП можливо на основі пошуку і розробки інноваційних структурно-геометричних рішень магнітопроводів і обмоток [5, 7, 12, 32, 40].

В [29, 30, 35, 36] наведено пропозиції заміни традиційних прямокутних і кругових УК активних елементів на $n \geq 6$ – гранні контури в варіантах планарної (рис. 2.1, а) і просторових (рис. 2.1, б-г) ЕМС.

Мінімальній довжині витка планарної ЕМС з прямокутними УК (рис. 1.3, а) відповідає квадрат, хоча оптимальним, з врахуванням в ЕМС об'ємів і мас міді (алюмінію) і ЕТС, є прямокутний переріз стрижня [29, 57]. Розміру боку квадрата $a_{\text{СКП}}$ відповідають величини периметру $\Pi_{\text{СКП}}$ і площі $S_{\text{СКП}}$ перерізу стрижня:

$$\Pi_{\text{СКП}} = 4a_{\text{СКП}} = 4\sqrt{S_{\text{СКП}}}; \quad (2.1)$$

$$S_{\text{СКП}} = a_{\text{СКП}}^2. \quad (2.2)$$

Розміру боку $a_{\text{СВ}}$ рівнобічного восьмигранника (рис. 2.1, а) відповідають величини периметру $\Pi_{\text{СВ}}$ і площі $S_{\text{В}}$ перерізу стрижня:

$$\Pi_{\text{свн}} = 8a_{\text{св}} = 16R_{\text{к}} \sin(\pi/8) = 6,123R_{\text{к}}; \quad (2.3)$$

$$S_{\text{свн}} = 8K_{\text{кв}} a_{\text{кв}} R_{\text{к}} \cos(\pi/8) = 2,829K_{\text{кв}} R_{\text{к}}^2, \quad (2.4)$$

де $R_{\text{к}}$ – радіус контурної окружності, в яку вписаний переріз стрижня (рис. 2.1, а, в-г); $K_{\text{кв}}$ – коефіцієнт заповнення восьмигранного УК стрижня ЕТС, який на відміну від кругового УК (рис. 1.3, б) при трьох (рис. 2.1, а) і чотирьох сходинках (пакетах) в половині восьмигранника складає $K_{\text{кв}}=0,9$ і $K_{\text{кв}}=0,93$, а при заповненні вказаного УК ідентичними прямокутними пластинами (рис. 2.1, г) такий коефіцієнт в стиковому магнітопроводі складає $K_{\text{кв}} \approx 1$.

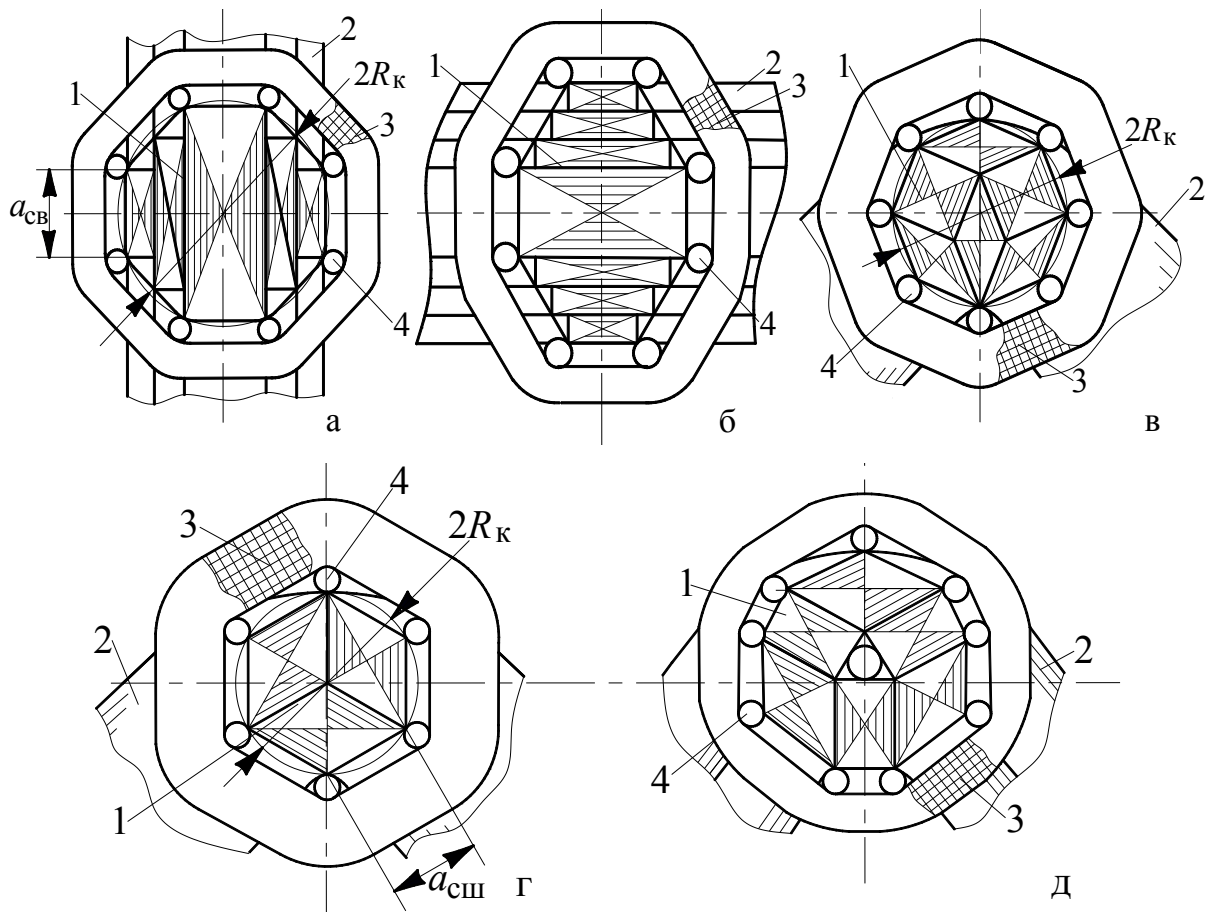


Рисунок 2.1 – Фрагменти схем варіантів планарних (а, б) і просторових стикових (в-д) електромагнітних систем з багатограними утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – обмоткова котушка; 4 – опорний елемент.

Розміру боку $a_{\text{сш}}$ рівнобічного шестигранника (рис. 2.1, г) відповідають величини периметру $\Pi_{\text{сш}}$ і площі $S_{\text{сш}}$ перерізу стрижня:

$$\Pi_{\text{сш}} = 6a_{\text{сш}} = 3,72\sqrt{S_{\text{сш}}}; \quad (2.5)$$

$$S_{\text{ш}} = 3K_{\text{кш}} a_{\text{сш}}^2 \sin(\pi/3) \approx 2,6a_{\text{сш}}^2, \quad (2.6)$$

де $K_{\text{кш}} \approx 1$ – коефіцієнт заповнення шестигранного УК стрижня ідентичними прямокутними пластинами ЕТС [40].

При умові рівності площ квадрата і шестигранника з (2.1), (2.2) і (2.5) впливає співвідношення

$$\Pi_{\text{спк}}/\Pi_{\text{сш}} = 4\sqrt{S_{\text{спк}}}/(3,72\sqrt{S_{\text{сш}}}) = 1,075. \quad (2.7)$$

Периметр кругового УК радіусу $R_{\text{к}}$ і площа східчастого перерізу стрижня з вказаним УК:

$$\Pi_{\text{о}} = 2\pi R_{\text{к}} = 6,283R_{\text{к}}; \quad (2.8)$$

$$S_{\text{ск}} = K_{\text{кк}} S_{\text{о}} = K_{\text{кк}} \pi R_{\text{к}}^2, \quad (2.9)$$

де $S_{\text{о}}$ – площа контурної окружності.

Виходячи з виразів (2.4), (2.6) і (2.9) співвідношення величин площ восьмигранника і шестигранника до площі контурного кола радіусу $R_{\text{к}}$ складають:

$$S_{\text{св}}/S_{\text{о}} = 2,829R_{\text{к}}^2/(\pi R_{\text{к}}^2) = 0,9; \quad (2.10)$$

$$S_{\text{сш}}/S_{\text{о}} = 2,6a_{\text{сш}}^2/(\pi R_{\text{к}}^2) = 0,83. \quad (2.11)$$

Співвідношення (2.10) і (2.11) наближаються до коефіцієнтів заповнення контурного кола східчастим перерізом стрижня при п'яти-шести, $K_{\text{кк}}=0,89-0,92$ і трьох (рис. 2.1, а), $K_{\text{кк}}=0,851$ сходинках в однієї половині контурного кола [15].

При цьому при відповідно приблизно однакових площах ЕТС перерізів стрижнів, співвідношення величин периметрів УК стрижнів (2.8) і (2.3), (2.5) складають:

$$\Pi_{\text{о}}/\Pi_{\text{свн}} = 2\pi R_{\text{к}}/(6,123R_{\text{к}}) = 1,0262; \quad (2.12)$$

$$\Pi_{\text{о}}/\Pi_{\text{сш}} = 2\pi R_{\text{к}}/(6R_{\text{к}}) = 1,0472. \quad (2.13)$$

Співвідношення (2.7), (2.12) і (2.13) [29] характеризують можливість економії провідникового матеріалу і зниження втрат короткого замикання у відповідності із зменшенням величин периметрів УК стрижнів (рис. 2.1, а-в) приблизно на 7,5 % і 2,6-4,7%. При цьому збільшення площ плоских

ділянок УК перерізів ярем знижує маси магнітопроводів і втрат неробочого руху. В варіанті стикового магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 2.1, в) в межах R_k збільшується площа перерізу стрижня відносно ЕМС (рис. 2.1, а, г), що надає можливість зменшення R_k і додаткового покращення ПТР.

Конфігурація УК, що має форму симетричного багатогранника із співвідношенням напівосей 1,5 (рис. 1.1, б), в якому встановленні чотири пакети листів ЕТС різної ширини в половину перерізу стрижня, має коефіцієнт заповнення ЕТС 0,92. Така конфігурація частково зберігає переваги прямокутного УК стрижня, тобто зменшення міжосьової відстані між стрижнями, що надає можливість зменшення довжини ярма приблизно на 9,7% в порівнянні з ЕМС з круговими УК. Середня довжина витка в порівнянні з прямокутним УК зменшується на 9,8%. Все це вказує на можливість зменшення маси, вартості та втрат активної потужності в ЕМС з симетричними восьмигранними УК.

Шестигранні УК дозволяють удосконалити трифазні просторові ЕМС структур (рис. 1.1, е, ж). Перевагою названих аксіальних симетричних просторових структур над радіальними і планарними ЕМС є теоретичний мінімум (ноль) "векторного магнітного моменту" і відповідно мінімум зовнішнього магнітного поля [46, 100].

Змінні і постійні зовнішні магнітні поля призводять до збоїв і відмов магнітометричних і електронних систем і регламентуються нормами електромагнітної сумісності [101]. Тому зниження таких полів силового електрообладнання до санітарних і спеціальних норм є актуальною задачею. Також встановлено [102], що застосування в аксіальних ЕМС (рис. 1.4) кругових УК не дозволяє у достатній мірі забезпечити вимоги електромагнітної сумісності в зв'язку зі складністю симетризування мас і положень в просторі окремих пакетів стрижнів та секцій магнітопроводів.

Заміна кругових УК елементів просторових ЕМС на $n \geq 6$ -гранні (рис. 2.1, б - г) дозволяє значно спростити виробництво стикових комбінованих і витих просторових, а також шихтованих планарних магнітопроводів та підвищити ЕДС ЕСП [35, 36, 40]. Знижуються матеріаломісткість та втрати

відносно традиційних аналогів просторових ЕМС з круговими УК [4, 15, 55], а також забезпечується, завдяки наявності ділянок паралельних поверхонь обмоткових вікон (рис. 2.1, в, г), можливість симетризування фазних активних елементів і мінімізація рівня зовнішнього магнітного поля просторових аксіальних ЕМС [46]. Конструкція (рис. 2.1, г) з центральними отворами стрижнів просторових аксіальних ЕМС [103] забезпечує можливість додаткового покращення основних ПТР формуванням двохконтурних ярем.

Додатковим, однак важливим обладнанням трансформаторних підстанцій і розподільчих пристроїв є одно та трифазні реактори. Вказані апарати мають структури, що аналогічні трансформаторам, однак відрізняються стиковими конструкціями магнітопроводів (рис. 2.2, а, б) та мають плоскі внутрішні поверхні ярем (рис. 2.2, в) [4, 15]. Конструктивні зазори між стиками (рис. 1.2, а, б) і площі перерізів стрижнів визначають індуктивності і реактивні потужності реакторів. ЕМС реакторів, як і трансформаторів потужністю з $16 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ($\text{кВ} \cdot \text{Ар}$), виконуються з круговими УК, що при стикових зазорах є технічно і технологічно невиправданим в зв'язку з наявністю інноваційних рішень [29, 30, 35].

Заміна кругових УК (рис. 2.2, б) на шестигранні (рис. 2.2, г) в ЕМС реактора (рис. 2.2, а) уявляється перспективними технічним рішенням у зв'язку з практично повним заповненням шестигранного УК ідентичними пластинами ЕТС. Також можливо використання структур стрижнів і ярем (рис. 2.2, д, е), які забезпечуються механічним розділенням під кутом пакетів з однотипних листів ЕТС, що складені із суміщенням кожного наступного листа до утворення паралелепіпеду (рис. 2.2, ж) [104]. При застосуванні автоматизованого обладнання, частини ярем (рис. 2.2, д) з пластин різної довжини формуються розділом стрічки (рулону) ЕМС з малою подачею. Подібні рішення дозволяють в повній мірі використовувати площу УК стрижня та зменшити масу і вартість елементів ЕМС реактора.

Також практично повне заповнення ЕТС восьмигранного УК перерізу стрижня ($K_{\text{кв}} \approx 1$) можливо в пропозиції планарного магнітопроводу трансформатора [104]. Такий магнітопровід (рис. 2.3, а) містить середню шихтовану вперепліт частину з прямокутними перерізами стрижнів і яремних ділянок та бокові частини (рис. 2.3, б, в), що складаються з заготовок виду (рис. 2.2, ж).

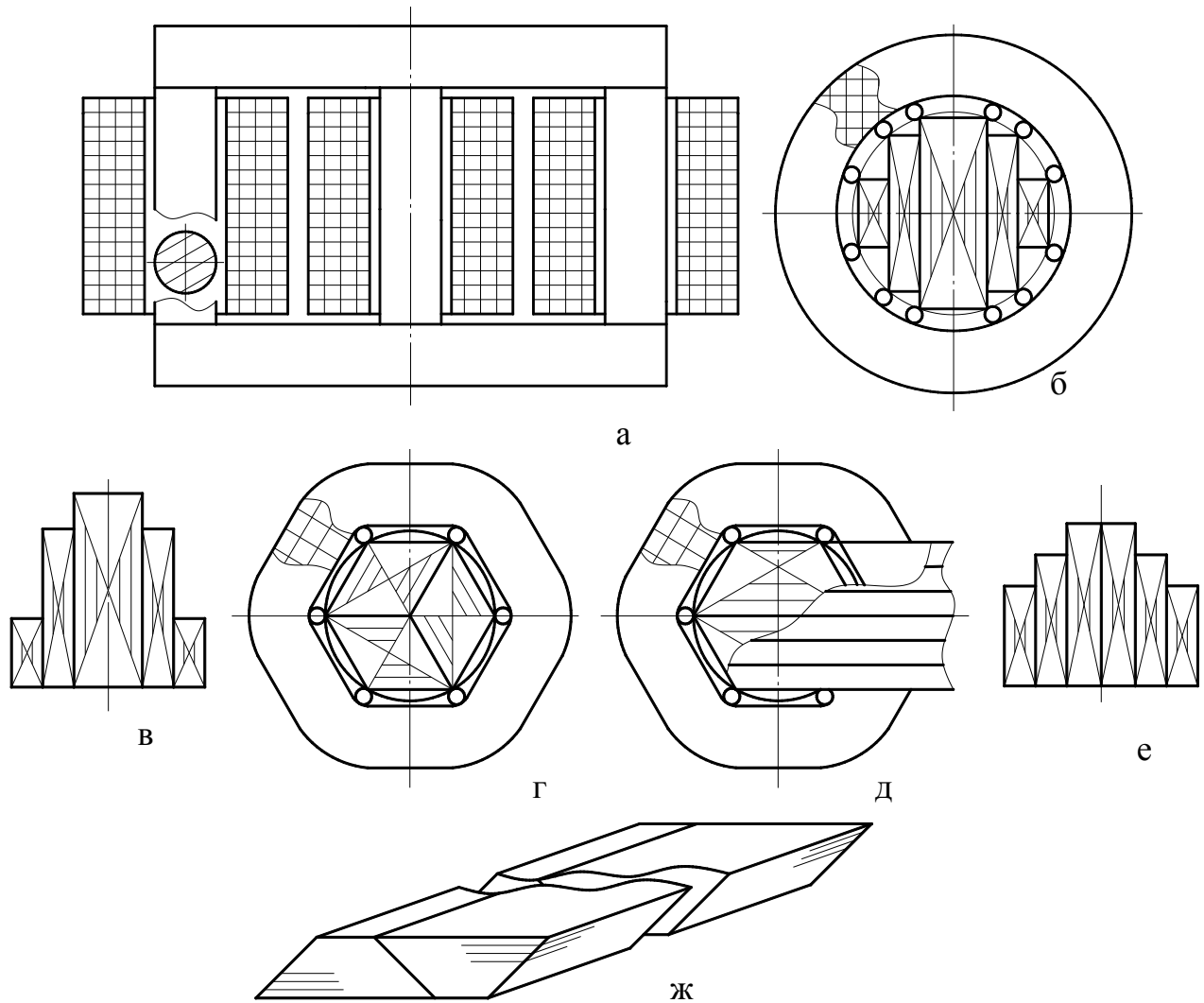


Рисунок 2.2 – Повздовжній переріз планарної стикової трифазної електромагнітної системи (а), варіанти конфігурацій перерізів стрижнів і ярем, що відповідають круговим і шестигранним (б-е) утворюючим контурам та заготовка елементів магнітопроводу (ж)

В розподільчих підстанціях потужністю до 1000 кВ·А значну частину обладнання складають однофазні трансформатори. Такі трансформатори мають структури (рис. 1.1, а, б) і прямокутні УК ЕМС та значна їх складова містить

шихтовані магнітопроводи. Перетворення планарної стрижневої (рис. 1.1, а) і броньової (рис. 1.1, б) структур в радіальну просторову тристрижневу (рис. 2.4, а) з варіантами шихтованого магнітопроводу з паралелограмних (рис. 2.4, б) або шевронних (рис. 2.4, в) пластин [105] надає можливість покращення основних ПТР однофазних ЕСП.

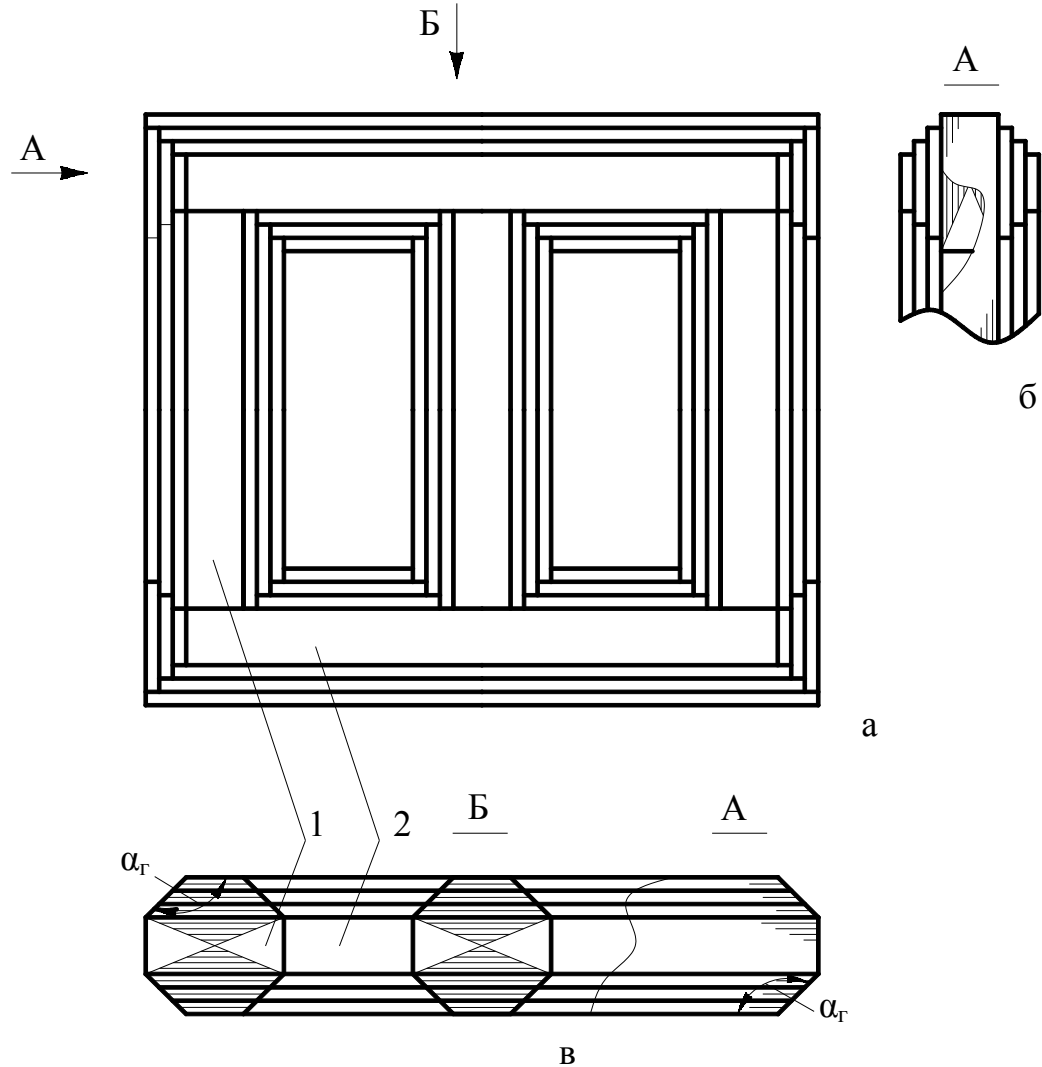


Рисунок 2.3 – Схема трифазного планарного магнітопроводу (а) з шихтованою вперепліт середньої та боковими стиковими частинами (б, в) [104]:

1 – стрижень, 2 – ярмо.

Вказана можливість в структурній схемі ЕМС (рис. 2.4, а) обумовлена зниженням числа технологічних роз'ємів в одному шарі магнітопроводу до трьох та мінімальним об'ємом кутових зон зміни напрямку магнітного потоку шихтованих текстурованих магнітопроводів відносно напрямку прокату ЕТС, а

також зменшенням середньої довжини витка збільшенням стрижневих обмоткових секцій до трьох відносно еквівалентних аналогів структур (рис. 1, а, б).

Наведені в підрозділі конструктивно-технологічні рішення (рис. 2.1 – рис. 2.4) створюють передумови покращення ПТР ЕСП нетрадиційним евристичним шляхом, однак потребують аналітичного обґрунтування наявності перелічених переваг.

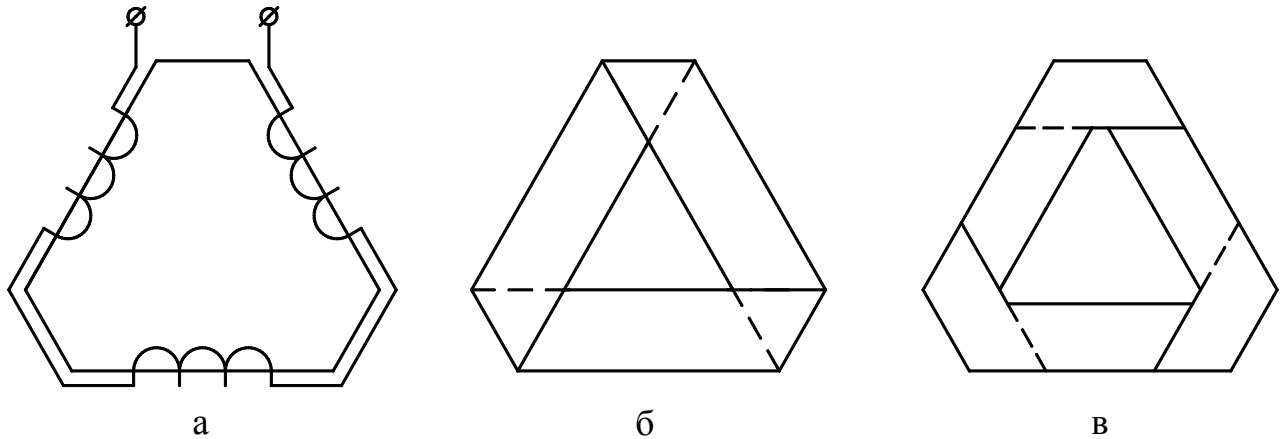


Рисунок 2.4 – Структурна схема однофазної радіальної електромагнітної системи з варіантами шихтованого магнітопроводу з паралелограмних (б) і шевронних (в) пластин електротехнічної сталі

2.2. Вплив конструктивно-технологічних чинників на механічну міцність і стійкість обмоток

Важливою складовою створення умов безперебійності і надійності електропостачання є забезпечення ЕДС силових розподільчих трансформаторів і реакторів [4, 15, 25]. Традиційними способами і конструктивними рішеннями ЕДС ЕСП є зміцнення матеріалу провідників обмоток і їх склеювання, опресування обмоткових котушок в осьовому і радіальному напрямках пресуючими кільцями і вертикальними упорно-ізоляційними (прошивними) рейками та встановлення жорстких опорно-ізоляційних циліндрів і горизонтальних прокладок. Також доцільно підвищення монолітності і симетризування витків та фазних котушок по висоті стрижня [15]. Однак число вертикальних рейок і горизонтальних прокладок обмежено необхідними перерізами каналів і площами поверхонь охолодження обмоток. Практика

експлуатації ЕСП свідчить, що застосування вказаних способів і рішень повністю не гарантує ЕДС обмоток. Згідно міжнародним даним, в загальній аварійності трансформаторів частина ушкоджень, що обумовленні недостатньою ЕДС, є дуже значною [24, 25].

Складовою проектних розрахунків ЕСП є визначення механічних сил і напруг в обмотках при коротких замиканнях. Недоліком попередніх методик розрахунків ЕДС обмоток ХХ і початку ХХІ століть була відсутність врахування технологічного фактору виготовлення обмоткових котушок, що обумовило значні погрішності. В ВАТ "ВІТ" (Запоріжжя) теоретично і експериментально встановлено, що кільцевий вигин провідників при намотуванні кругових витків котушок призводить до суттєвого зниження ЕДС, що потребує врахування при визначенні ЕДС і проектуванні обмоток [23, 24, 106].

В процесі намотування кругових або еліптичних витків обмоткових котушок ЕСП виникають деформації початкового вигину ε_B з максимумом $\varepsilon_{B\max}$ на зовнішньому контурі (рис. 2.5, а), які створюють в провіднику шириною b_n механічні напруги початкового вигину σ_B . При короткому замиканні ЕСП деформації ε_B складаються з деформаціями від електромагнітних сил, зокрема з деформаціями ε_{EMP} від радіальної сили, що стискає провідник. Максимальне значення $\varepsilon_{\Sigma\max}$ повної деформації ε_{Σ} створюється на зовнішньому радіусі контуру окружності вигину витка з середнім діаметром витка D_B [35, 106]:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_B + \varepsilon_{EMP};$$

$$\varepsilon_{\Sigma\max} = \varepsilon_{B\max} + \varepsilon_{EMP}; \quad \varepsilon_{B\max} = b_n / D_B. \quad (2.14)$$

Накладання деформацій початкового вигину і деформацій від сил стискання призводить до зростання напружень за всією довжиною ділянок криволінійного контуру витка, що стискаються. За час тривалості короткого замикання підсумкове напруження σ_{Σ} не повинно перевищувати критичних значень (з певним запасом), що є умовою ЕДС ЕСП:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_B + \Delta\sigma_{EMP}; \quad \sigma_{\Sigma} + \Delta\sigma_3 \leq \sigma_K, \quad (2.15)$$

де $\Delta\sigma_{EMP}$ – зростання напружень під дією деформації ε_{\max} ; $\Delta\sigma_3$ – запас напружень; σ_K – критичне значення напружень, яке для кругового витка (σ_{KK})

залежить від його геометричних параметрів і числа n_x хвиль деформаційного вигину по колу під дією електромагнітних сил, а також залежить від величини узагальненого модулю пружності матеріалу провідника $E_{n\Sigma}$ [106].

$$\sigma_{\text{КК}} = b_n (n_x^2 - 1) E_{n\Sigma} / (\sqrt{3} D_B). \quad (2.16)$$

Модуль $E_{n\Sigma}$ залежить від межі текучості матеріалу $\sigma_{\text{ТМ}}$ і геометричних параметрів вигнутого по колу провідника, а також функціонально пов'язаний з σ_Σ і ε_Σ [106]

$$E_{n\Sigma} = f_\Sigma(\sigma_{\text{ТМ}}, \sigma_\Sigma, b_n / D_B); \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_\Sigma = f_\sigma(\varepsilon_B, \varepsilon_{\text{ЕМР}}). \quad (2.18)$$

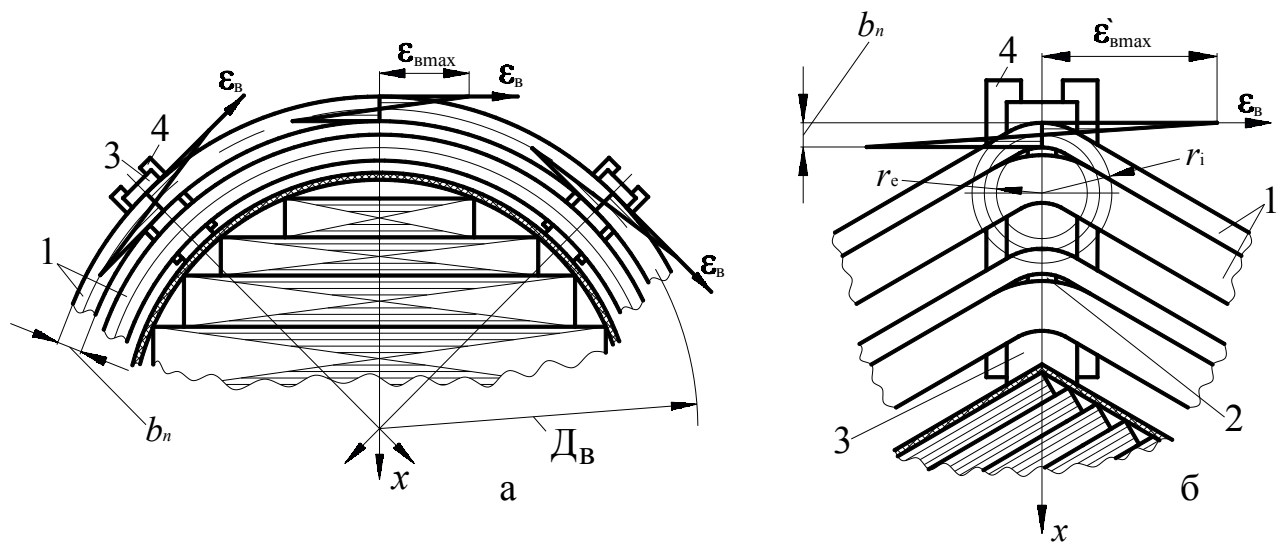


Рисунок 2.5 – Схеми вигину і деформації провідника по круговому контуру витка (а) і концентрація деформацій вигину в кутових зонах багатогранного контуру витка (б):

1 – провідник; 2 – вертикальна прокладка; 3 – прошивна рейка; 4 – опорна прокладка.

Згідно [106] використання методик розрахунку ЕДС ЕСП без врахування ε_B і σ_B призводить до завищення критичних напружень і критичних сил полягання провідників обмоток. Похибки розрахунків досягають відповідно 100% і 500%.

З (2.14) – (2.18) впливає спосіб підвищення ЕДС ЕСП, що реалізується в конструкціях і конфігураціях обмоток з $n \geq 6$ – граними УК обмоткових котушок і витків [35, 107]. Особливістю подібних обмоток є наявність ділянок витків, які сформовані прямими лініями, що перетинаються під тупими кутами вигину

витків $\alpha_{\text{в}} \geq 120^\circ$ (рис. 2.1, рис. 2.5, б). На відміну від криволінійних витків (рис. 2.5, а), на прямих ділянках, що складають основну частину багатогранних витків, усуваються складові деформацій і напружень (2.14), (2.15), що обумовлені вигином. Такі складові, згідно (2.15) – (2.17), як і можливі пошкодження виткової ізоляції при вигині, концентруються в зонах витків на вісях вершин багатогранника. Тому в цих зонах витків повинна бути підсилена ізоляція і зосереджені механічні кріплення обмоток, зокрема встановлені стовпи горизонтальних прокладок і прошивні рейки [107].

Для максимального підвищення електричної міцності і ЕДС обмоток, в кутових зонах граней між витками повинні бути встановлені додаткові вертикальні опорні елементи (прокладки) (рис. 2.6). Такі прокладки і рейки, а також отвори і виїмки під них в горизонтальних прокладках, можуть виконуватися за формою, яка відповідає внутрішньому $r_{\text{в}}$ і зовнішньому $r_{\text{з}}$ радіусам округлення кутів обмоткових витків [107].

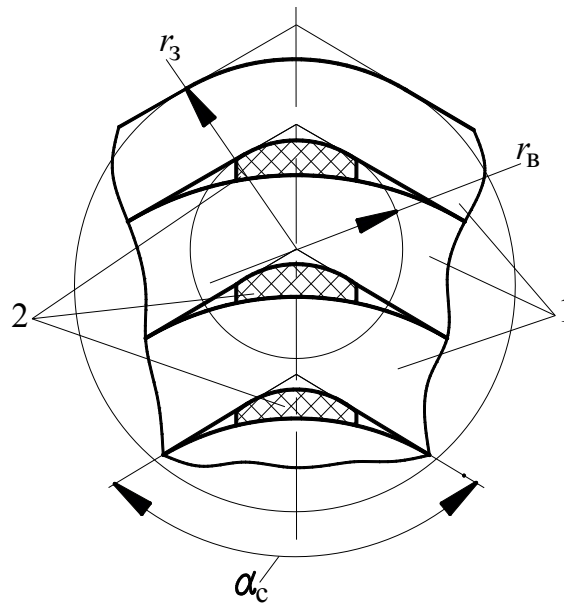


Рисунок 2.6 – Особливості будови обмотки з багатогранними утворюючими контурами витків і обмоткових котушок [107]:

1 – виток; 2 – опорний елемент.

Число граней УК витків обмотки повинно відповідати контуру УК перерізів стрижнів, що дозволяє удосконалити відомі та створити нові структури і конструкції ЕМС (рис. 2.1) [35, 36].

2.3. Пропозиції удосконалення шихтованих текстурованих магнітопроводів

Анізотропія елементів сучасних шихтованих магнітопроводів, як вже вказано вище, утворює багатократне зростання втрат зон повертання магнітного потоку відносно напрямку прокату і текстури ЕТС. Об'єм таких зон зменшується застосуванням двохрамних магнітопроводів, в яких крім додаткових втрат наклепу і розділення ЕТС на смуги та ділянки, збільшується намагнічувальна потужність і додаткові втрати в зв'язку з появою додаткових технологічних зазорів складання листів ЕТС (рис. 2.7) [54]. Для зниження втрат зменшенням нерівномірності розподілу магнітного поля в поперечному перерізі і кутах, зовнішню частину двохрамного магнітопроводу пропонується виконувати з ЕТС з покращеними магнітними властивостями відносно ЕТС внутрішньої частини [43].

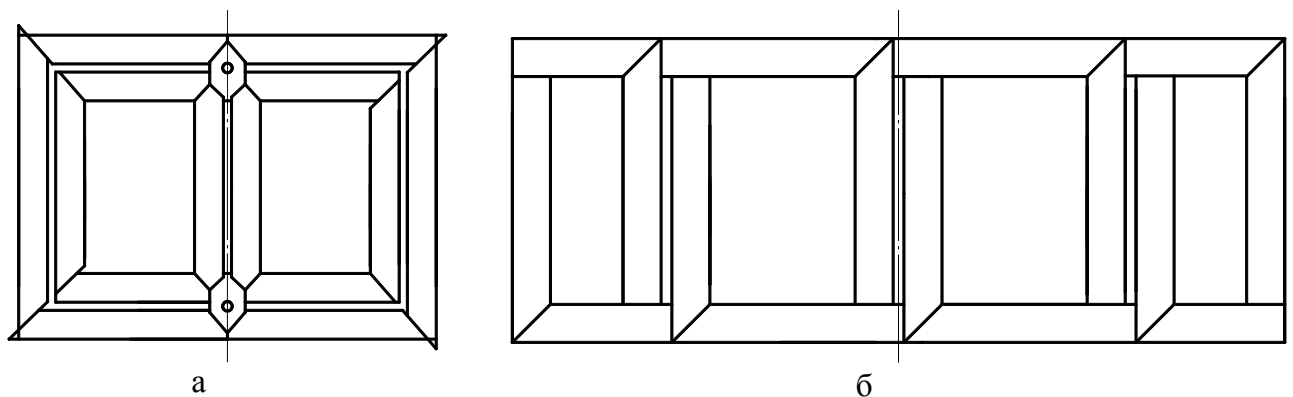


Рисунок 2.7 – Приклади схем стрижневого (а) і бронестрижневого (б) двохрамних планарних трифазних магнітопроводів [54]

Іншими пропозиціями удосконалення планарних шихтованих магнітопроводів уявляються варіанти з комбінацією ізотропної і анізотропної ЕТС [33, 39, 41].

В варіантах інноваційної, згідно [20], конструкції магнітопроводу [41] з прямокутним зовнішнім контуром і прямими стиками, комбінація ізотропної і анізотропної ЕТС в суміжних шарах чергується (рис. 2.8). Кутові зони містять тільки ізотропну ЕТС, що виключає значні додаткові втрати кутових зон. Однак

приблизно половина кожного з варіантів комбінованого магнітопроводу [41] містить ізотропну ЕТС з підвищеними питомими втратами. Збільшуються основні втрати, що знижує ефективність даної інновації.

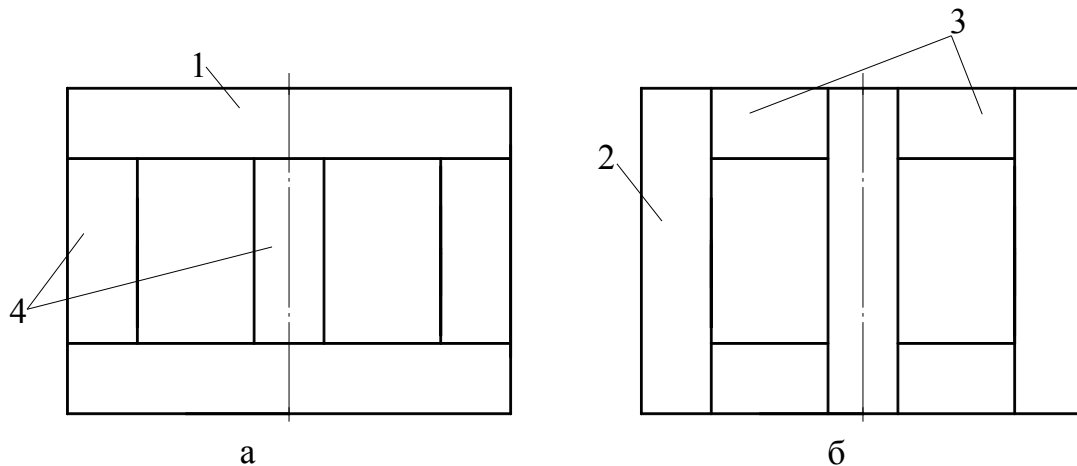


Рисунок 2.8 – Схема розташування суміжних шарів ізотропної електротехнічної сталі в ярах (а) і стрижнях (б) варіантів пропозиції магнітопроводу [41]:

1, 2 – ізотропні ділянки; 3, 4 – анізотропні ділянки.

Подальший розвиток пропозицій нетрадиційних комбінацій елементів шихтованих комбінованих магнітопроводів уявляє розташування пластин анізотропної ЕТС в зонах ортогональної зміни напрямку потоку відносно текстури [108]. Використовуються пластини ізотропної ЕТС шевронної форми з протилежними боками різної ширини. В бічних кутах планарного магнітопроводу подібні пластини встановлюються в суміжних шарах з протилежним направленням коротких і довгих боків. В протилежних середніх кутових (Γ – подібних) ділянках однофазних броньових і трифазних стрижневих (рис. 2.9, а) і бронестрижневих планарних магнітопроводів шевронні пластини встановлюються з ортогональним положенням середніх кутів. Шевронні пластини анізотропної ЕТС бічних ділянок для зниження нерівномірності розподілу поля можуть бути виконані з закругленням середніх кутів. Радіус закруглення відповідає величині ізоляційного проміжку b_{iz} між магнітопроводом і обмоткою (рис. 2.9, б). Для зменшення числа кутових зон і стиків доцільно, як згадано в підрозділі 2.1, заміна традиційних варіантів планарного магнітопроводу однофазної ЕМС [15, 52, 57] на радіальну

тристрижневу структуру (рис. 2.4, а) [108]. Яремно-кутові і стрижневі ділянки такого магнітопроводу доцільно виконувати відповідно з ізотропної і анізотропної ЕТС.

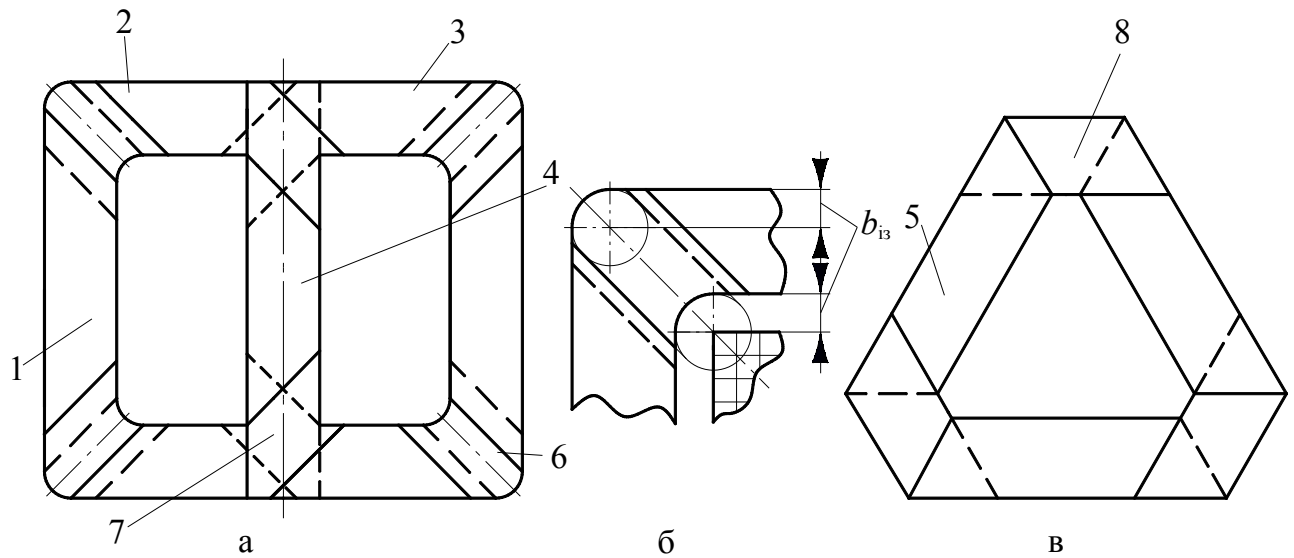


Рисунок 2.9 – Схеми трифазного стрижневого (а) з заокругленими верхівками кутів (б) і однофазного тристрижневого (в) магнітопроводів з пластинами 1-5 анізотропної і пластинами 6-8 ізотропної електротехнічних сталей варіантів пропозиції магнітопроводу [108]

Нероз’ємне з’єднання паралелограмних стрижневих і яремно-кутових ділянок утворює шевронні елементи магнітопроводу (рис. 2.9, в) і знижує число технологічних зазорів з шести до трьох [109]. Таке з’єднання, а також з’єднання кутів шевронних ізотропних та інших анізотропних ділянок магнітопроводів схем (рис. 2.9, а, б), може бути виконано зварюванням. Для рішення задач практичного застосування конструкцій і способу (рис. 2.9, рис. 2.10) доцільно проведення досліджень можливостей використання відомих способів (лазерне, електронно-променеве, дифузійне, тертям ...), або розробки спеціальних способів зварювання пластин ЕТС в стиках. Такі способи повинні забезпечити задовільні магнітні властивості зварювальних швів та можливості розділення (штампівки) зварених заготовок ЕТС [51].

Запобігання значного ускладнення виробництва магнітопроводів з з’єднанням стиків ізотропної і анізотропної ЕТС можливо інтегральним зварюванням і поперечним розділенням заготовок. Заготовки комбінації ЕТС для

поперечного розділення на комбіновані пластини магнітопроводів (рис. 2.9) утворюються суміщенням і з'єднанням по лініям стиків фрагментів смуг анізотропної (рис. 2.10, а) і ізотропної (рис. 2.10, б) ЕТС. До фрагменту (фрагментів) смуги анізотропної ЕТС можна приєднати один, два або декілька фрагментів смуги ізотропної ЕТС. Перед з'єднанням фрагментів анізотропні компоненти розташовуються з напрямком текстури, який є паралельним лініям розділення (рис. 2.10, в). Розділенні ділянки фрагментів з двома або декількома швами розрізаються під заданими кутами на пластини (рис. 2.10, г, д) з комбінацією ЕТС [109].

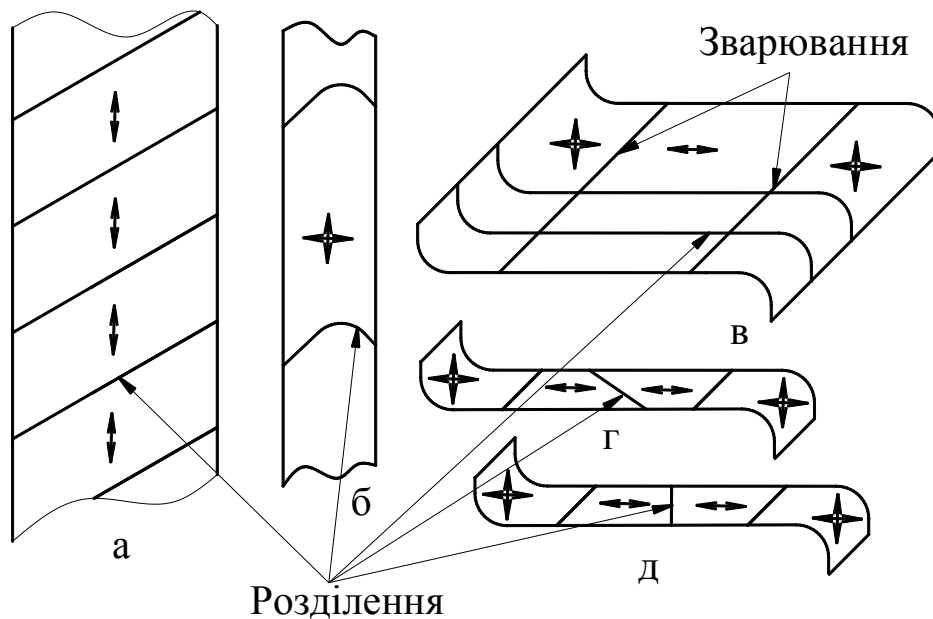


Рисунок 2.10 – Принципові схеми розкрою і з'єднання компонент згідно способу [109] виготовлення комбінованого магнітопроводу: поперечне розділення (а, б) прокату анізотропної (\leftrightarrow) і ізотропної (\blacklozenge) електротехнічних сталей на фрагменти; зварювання фрагментів по лініям стиків в заготовку та її поперечний поділ на ділянки (в); розділення ділянок фрагментів на комбіновані пластини (г, д).

2.4. Цільові функції, вихідні данні та припущення оптимізаційного проєктного синтезу варіантів електромагнітних систем

Для рішення поставлених задач структурного синтезу, тобто оптимізаційного зіставлення ПТР заданих варіантів ЕМС ЕСП універсальним

узагальненим методом [7, 32, 84-87] застосовується $k \geq 3$ ЦФ окремих критеріїв оптимізації. Основними є критерії мінімумів маси ($k=1$) вартості ($k=2$) і втрат активної потужності ($k=3$), які використовуються в даній роботі для дослідження ЕМС як з мідними так і з алюмінієвими обмотками. Вказані ЦФ $F_{kijcu(al)}^{(n)}$ містять загальні складові з показниками вхідних даних і ЕМН Π_{ij} однофазного (трифазного) трансформатора або реактора з мідними (алюмінієвими) обмотками, а також оптимізаційні безрозмірні складові-показники ЦФ $\Pi_{kijcu(al)}^*$, де латинські літери ij приймають певні позначення кирилицею (табл. 2.1), які відповідають варіантам ЕМС, що розглядаються в роботі

$$F_{kijcu(al)}^{(n)} = \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} K_k \Pi_{kijcu(al)}^*, \quad (2.19)$$

де K_k – складова питомих характеристик застосованої ЕТС, що відповідає i -показнику.

Літери ij та показники ЦФ (2.19) однофазного трансформатора (ОТ), трифазного трансформатора (ТТ) і трифазного реактора (ТР) приймають позначення відповідно ОТ, ТТ і ТР, а вказані показники, які відповідають електромагнітній потужності ЕСП, визначаються виразами [84]:

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

$$\Pi_{тр} = Q_H / (6,66 B_c f_1 J_0),$$

де S_H і Q_H – номінальні потужності трансформатора і реактора; B_c – середнє значення амплітуди індукції стрижня; f_1 – частота струму; K_{U1} , K_{U2} і $\cos \varphi_{2(1)}$ – коефіцієнти номінальної зміни напруги трансформатора під навантаженням [110] і енергетичний коефіцієнт навантаження (трансформатора).

Чисельними розрахунками визначаються екстремуми (мінімуми) Π_{kijcu}^* і Π_{kijale}^* вказаних показників за окремими критеріями оптимізації. Такі безрозмірні екстремуми є ПТР певного варіанту ЕМС, які у сукупності з іншими співмножниками (2.19) визначають фактичні розрахункові кількісні значення окремих техніко-економічних характеристик (маси і вартості ЕМС та втрат, наприклад ТТ).

Таблиця 2.1 – Позначення показників варіантів електромагнітних систем з шихтованими магнітопроводами

Варіант магнітної системи	Позначення показника вихідних даних	Показники, б.о.		
		Маси	Вартості	Втрати активної потужності
Однофазна планарна стрижнева з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	$P_{1СП}^*$	$P_{2СП}^*$	$P_{3СП}^*$
Однофазна планарна броньова з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	$P_{1БП}^*$	$P_{2БП}^*$	$P_{3БП}^*$
Однофазна просторова радіальна тристрижнева з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	$P_{1РТ}^*$	$P_{2РТ}^*$	$P_{3РТ}^*$
Трифазна планарна з прямокутними утворюючими контурами обмоток і перерізами стрижнів та ярем	$P_{ТТ}$	$P_{1ПП}^*$	$P_{2ПП}^*$	$P_{3ПП}^*$
Трифазна планарна стрижнева з круговими утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та ярем	$P_{ТТ}$	$P_{1КК}^*$	$P_{2КК}^*$	$P_{3КК}^*$
Трифазна планарна стрижнева з восьмигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів і ярем	$P_{ТТ}$	$P_{1ВВ}^*$	$P_{2ВВ}^*$	$P_{3ВВ}^*$
Трифазна планарна стрижнева з круговими утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	$P_{ТТ}$	$P_{1КП}^*$	$P_{2КП}^*$	$P_{3КП}^*$
Трифазна планарна стрижнева з восьмигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	$P_{ТТ}$	$P_{1ВП}^*$	$P_{2ВП}^*$	$P_{3ВП}^*$
Трифазна планарна стрижнева з шестигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	$P_{ТР}$	$P_{1ШП}^*$	$P_{2ШП}^*$	$P_{3ШП}^*$

Показники маси і вартості при заданому коефіцієнті заповнення обмоткового вікна обмотковим провідниковим матеріалом K_{30} (класу напруги), є залежними від геометричних безрозмірних КЗ. Основними геометричними КЗ є відношення висоти h_{ij} і ширини b_{ij} обмоткового вікна (рис. 2.11, а) та зовнішнього і внутрішнього діаметрів розрахункових окружностей варіанту магнітопроводу D_{1ij} і D_{2ij} (рис. 2.11, б, в). Додатковою відносною КЗ, що застосовується при побудові математичних моделей (ММ) деяких ЕМС, наприклад (рис. 2.11, б), є тригонометрична функція $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c :

$$\Pi_{1(2)ijcu(al)}^* = f_{1(2)ijcu(al)} \left[K_{30}, \lambda_B, a_M, t(\alpha_c) \right]; \quad (2.20)$$

$$\lambda_B = h_{Bij} / b_{Bij}; \quad (2.21)$$

$$a_M = D_{1ij} / D_{2ij}. \quad (2.22)$$

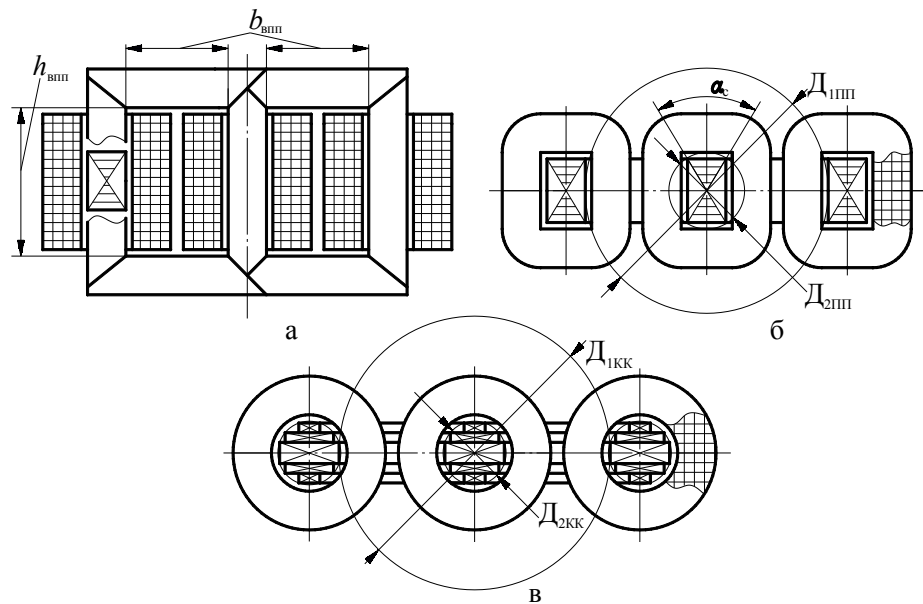


Рисунок 2.11 – Повздовжній (а) та поперечні перерізи варіантів планарної електромагнітної системи з прямокутними (б) і круговими (в) утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок

Для адекватного зіставлення варіантів ЕМС табл. 2.1 з різновидами УК, що розглядаються в роботі, приймаються ідентичними електромагнітні потужності, і відповідно показники $\Pi_{от}$, $\Pi_{тт}$ і $\Pi_{тр}$ з рівнями ЕМН, що залежать від призначення та виконання і типу охолодження ЕСП. Також відповідно приймаються однаковими електротехнічні матеріали, значення коефіцієнту K_{30} і коефіцієнту заповнення магнітопроводу ЕТС $K_{зс}$ та середні значення амплітуд індукції, які є однаковими в поперечних перерізах стрижнів і ярем. Для спрощення ММ реальні обмотки кожної з ЕМС замінюються еквівалентними розрахунковими обмотками [84] структурно-еквівалентних реакторів. Застосування поняття еквівалентної розрахункової обмотки надає можливість створення ММ ЕМС при складності визначення координат середніх витків обмоток в вікнах магнітопроводів нетрадиційних форм, зокрема в магнітопроводах (рис. 2.4, б, в). Розрахунки вартості виконуються з врахуванням співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників, що складає у середньому 0,85

[111] та при відношенні цін вказаних провідників C_{al} , C_{cu} до ціни ЕТС C_{st} в реальних діапазонах ($C_{al}/C_{st}=3-4,7$; $C_{cu}/C_{st}=3,5-5,5$).

Маси і вартості ЕТС магнітопроводу m_{mij} і C_{mij} та міді (алюмінію) розрахункових обмоток $m^{(')}_{oijcu(al)}$ і $C^{(')}_{oijcu(al)}$, варіантів однофазної (трифазної) ЕМС (табл. 2.1) визначаються рівняннями [84-86]:

$$m_{mij} = \gamma_{st} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{1mij}^* \quad (2.23)$$

$$C_{mij} = C_{st} \gamma_{st} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{2mij}^* \quad (2.24)$$

$$m^{(')}_{oijcu(al)} = \gamma_{cu(al)} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{1oijcu(al)} \quad (2.25)$$

$$C^{(')}_{oijcu(al)} = C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{2oijcu(al)}^* \quad (2.26)$$

де γ_{st} і $\gamma_{cu(al)}$ – густина ЕТС та мідного (алюмінієвого) обмоткового проводу; $\Pi_{1(2)mij}^*$ і $\Pi_{1(2)oijcu(al)}^*$ – відповідно показники маси (вартості) магнітопроводів і обмоток.

Рівняння маси (вартості) (2.19) варіантів однофазної (трифазної) ЕМС (табл. 2.1) визначаються на основі (2.23) – (2.26):

$$F^{(')}_{1ijcu(al)} = m^{(')}_{aijcu(al)} = m_{mij} + m^{(')}_{oijcu(al)} = \gamma_{st} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{1ijcu(al)}^* \quad (2.27)$$

$$F^{(')}_{2ijcu(al)} = C^{(')}_{aijcu(al)} = C_{mij} + C^{(')}_{oijcu(al)} = C_{st} \gamma_{st} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{2ijcu(al)}^* \quad (2.28)$$

Розробка ММ масовартісного аналізу ЕМС методом [84] у вигляді сукупності рівнянь (2.23) – (2.28) виконується з використанням базового рівняння:

$$\Pi_{cij} = \Pi_{ij} / \left(K_{30} S_{vij} \right); \quad (2.29)$$

Маса обмотки $m'_{oijcu(al)}$ однофазного ЕСП і маса обмотки $m''_{oijcu(al)}$ трифазного ЕСП визначаються загальними виразами:

$$m'_{oijcu(al)} = \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B l_{oij} S_{vij}; \quad (2.30)$$

$$m''_{oijcu(al)} = 1,5 \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B l_{oij} S_{vij}, \quad (2.31)$$

де Π_{cij} , S_{vij} , і l_{oij} – відповідно площа ЕТС поперечного перерізу стрижня, площа обмоткового вікна і середня довжина витка розрахункової обмотки ОТ, ТТ, ТР з ij – варіантом ЕМС.

Для узагальненого порівняння методом [84] втрат активної потужності варіантів технічних рішень однофазної (трифазної) ЕМС застосовуються оптимізаційні безрозмірні складові $\Pi_{3ijcu(al)}^*$ ЦФ вказаних втрат $F_{3ijcu(al)}^{(')}$

$$F_{3ijcu(al)}^{(')} = \gamma_{st} P_{st} \left(\Pi_{ij} \right)^{3/4} \Pi_{3ijcu(al)}^*, \quad (2.32)$$

де P_{st} – питомі втрати в ЕТС при заданому значенні магнітної індукції магнітопроводу B_c ЕСП.

Оптимізаційні складові $\Pi_{3ijcu(al)}^*$ ЦФ (2.32), як і показники маси і вартості (2.20) є залежними від основних безрозмірних геометричних КЗ λ_b і a_m та є залежними, в деяких ЕМС, від додаткової безрозмірної тригонометричної КЗ $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c (рис. 2.11, б). Крім того, оптимізаційна складова, тобто показник втрат активної потужності $\Pi_{3ijcu(al)}^*$ є залежною від однієї (двох у випадку наявності в ЕМС як мідної так і алюмінієвої обмоток) відносної електромагнітної (електромагнітних) КЗ втрат $K_{pcu(al)}$

$$\Pi_{3ijcu(al)}^* = f_{3ijcu(al)} \left[K_{30}, \lambda_b, a_m, t(\alpha_c), K_{pcu(al)} \right]. \quad (2.33)$$

Електромагнітна КЗ безрозмірної складової (3.33) ЦФ (2.32) є залежною від співвідношень коефіцієнтів додаткових втрат короткого замикання $K_{дк}$ і неробочого руху $K_{дн}$ та значень питомих мас активних матеріалів $\gamma_{cu(al)}$ і γ_{st} , а також від відношень значень питомих втрат обмотки (залежить від показника питомих втрат міді (алюмінію) $K_{pcu(al)}$ і густини струму розрахункової обмотки $J_{ocu(al)}$) та величини P_{st} ЕТС магнітопроводу [84-86]

$$K_{pcu(al)} = \frac{K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{pcu(al)} J_{ocu(al)}^2}{K_{дн} \gamma_{st} P_{st}}. \quad (2.34)$$

Третім основним ПТР ТТ, тобто показником енергетичної ефективності варіантів ЕМС, є екстремальне (мінімальне) значення $\Pi_{3ijcu(al)e}^*$ показника (2.33) [84].

Загальні втрати активної потужності (2.32) варіантів ЕСП визначаються підсумком втрат неробочого руху (магнітопроводу) $P_{нпсу(al)}$, $P_{нксу(al)}$ і втрат короткого замикання (обмоткових) $P_{кijcu(al)}^{(')}$ [15, 57, 110]

$$F_{3ijcu(al)}^{(')} = P_{\Sigma ijcu(al)}^{(')} = P_{нijcu(al)} + P_{кijcu(al)}^{(')} \equiv \Pi_{3ijcu(al)}^*, \quad (2.35)$$

де геометричні параметри та значення мас елементів ЕМС відомі зі складання рівнянь (2.23) і (2.25), а втрати короткого замикання варіантів однофазної ЕМС $P'_{kijcu(al)}$ і трифазної ЕМС $P''_{kijcu(al)}$ визначаються виразами [84]:

$$P'_{kijcu(al)} = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{псу(al)} J_{осу(al)}^2 S_{вii} l_{wij}; \quad (2.36)$$

$$P''_{kijcu(al)} = 1,5 K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{псу(al)} J_{осу(al)}^2 S_{вii} l_{wij}. \quad (2.37)$$

Методика побудови узагальнених ММ оптимізаційного зіставлення, тобто структурного синтезу, повинна забезпечувати порівняння варіантів ЕМС при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності (рівності Π_{ij}) і інваріантності (універсальності) виду ЦФ та основних КЗ. Таким вимогам відповідають ЦФ $F^{(n)}_{1(2)ijcu(al)}$ маси і вартості ЕМС [84-86], безрозмірні оптимізаційні складові яких визначаються виключно КЗ геометричних співвідношень активних елементів і є незалежними від електромагнітних КЗ (обумовлено винесенням ЕМН в показник Π_{ij}). Однак вказаний принцип при визначенні показників втрат знаходиться у протиріччі з процесом параметричного синтезу трансформаторів та інших електромеханічних пристроїв, який передбачає варіювання ЕМН, тобто можливість змін їх величин та співвідношень при перевірці і врахуванні проєктних обмежень, зокрема нагріву обмоток. В свою чергу варіювання ЕМН при параметричній оптимізації протиречить рішенням задачі узагальненого структурного синтезу ЕМС. Протиріччя обумовлено прив'язкою діапазону змін ЕМН до конкретних виконань, потужностей і способів відводу тепла від активної частини. Тому для подолання названого протиріччя і вилучення залежності узагальненого структурного синтезу від потужності, величин ЕМН і особливостей структур і УК елементів ЕМС та систем охолодження, КЗ і показники окремих критеріїв оптимізації повинні бути уявлені у відносному (безрозмірному) виді. Також при визначенні показників втрат відносна електромагнітна КЗ повинна змінюватись в певному реальному діапазоні, що враховує як "сухе" виконання, так і виконання ЕСП з відомими способами інтенсифікації охолодження (рідинне, примусове...). Таким виконанням і способам повинні відповідати відомі мінімальні і максимальні розрахункові значення ЕМН, які також повинні враховувати певний діапазон потужності [15]. Відповідно порівнюються діапазонні значення показників втрат.

Згідно [4, 6, 10, 15] в сучасних ТТ використовуються анізотропні ЕТС марок 3406–3409 з $K_{zc}=0,96–0,97$ при товщині стрічки (рулону) $\delta_c=0,27–0,35$ мм. Для розрахунків $K_{pcu(al)}$ і $\Pi^*_{zijcu(al)}$ приймаються значення $V_c=1,45–1,75$ Тл та ЕТС 3407, товщиною $\delta_c=0,35$ мм, у якій при $f_1=50$ Гц питомі втрати при $V_c=1,45$ Тл і $V_c=1,7$ Тл відповідно складають $P_{1,45/50}=0,988$ Вт/кг і $P_{1,7/50}=1,36$ Вт/кг. В розрахунках «сухих» і «масляних» ТТ потужністю до 10...160 кВ·А, а також 160...630 кВ·А використовуються значення $K_{дк}\leq 1,04$ і $K_{дк}\leq 1,075$. Приймається $K_{дк}=1,04$. Для мідного (алюмінієвого) проводу з $\gamma_{cu(al)}=8900$ (2700) кг/м³, $K_{псу(al)}=2,4\cdot 10^{-12}$ (12,75 $\cdot 10^{-12}$) Вт·м⁴/(А²кг) і при частоті $f_1=50$ Гц, у діапазонах $S_H=0,3–1$ кВ·А і $S_H=1–2,5$ кВ·А $J_{ocu(al)}=1,4–2,4$ (1,1–1,8) А/мм². В масляних ТТ при $S_H=2,5–63$ кВ·А $J_{ocu(al)}=1,8–2,2$ (1,4–1,8) А/мм² і при $S_H=63–630$ кВ·А, $J_o=2,2–3,5$ (1,6–2,7) А/мм², а в «сухих» ТТ з $S_H=10–1600$ кВ·А напівпідсумок густин струму первинної і вторинної концентричних обмоток складає $J_{ocu(al)}=1,7–2,4$ (1,2–1,8) А/мм².

Підвищення втрат неробочого руху в готовому планарному магнітопроводі відносно значень P_{st} анізотропної ЕТС залежить від сукупності фізичних і конструктивно-технологічних чинників [4, 6, 15, 18]. Відомо [6, 18, 54], що загальне підвищення питомих втрат в готовому планарному магнітопроводі як з прямими, так і усіма косими стиками відносно питомих втрат ЕТС складає 1,37...1,58. Також в [18] зроблено висновок, що використання в шихтованих магнітопроводах з анізотропної ЕТС усіх косих стиків в ТТ малої і середньої потужності призводить до підвищення на 15...20 % втрат неробочого руху відносно ТТ з магнітопроводами, що містять прямі стики. У зв'язку з цим для розрахунків приймається середнє значення $K_{дн}=1,475$ [6, 22, 112].

У відповідності до наведених вище значень проектних діапазонів зміни ЕМН, питомих характеристик і коефіцієнтів додаткових втрат, розраховані наступні значення електромагнітних КЗ (2.34) ЦФ (2.32) варіантів ЕМС «сухих» і «масляних» і ТТ, які виявились однаковими при застосуванні мідних і алюмінієвих обмоток [22]:

$$\left. \begin{aligned} K_{pcu1} &\geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 3; \\ K_{pcu2} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 8; \\ K_{pcu3} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24; \end{aligned} \right\} (2.38)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{pal1} &\geq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,1 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 3; \\ K_{pal2} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,8 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 8; \\ K_{pal3} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (2,7 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24. \end{aligned} \right\} (2.39)$$

Результати чисельних оптимізаційних розрахунків екстремумів показників маси $\Pi^*_{1ппсу(al)}$, вартості $\Pi^*_{2ппсу(al)}$ і втрат активної потужності $\Pi^*_{3ппсу(al)}$ планарної ЕМС (рис. 2.11, а, б) при значеннях $\lambda_{ве}$, $a_{ме}$, $\alpha_{се}$, що відповідають кожному окремому критерію та наведені в [21, 22], подано в табл. 2.2, – табл. 2.5. Вказані розрахунки, а також аналогічні розрахунки розділів 3, 4, 5 дисертаційної роботи, виконані при $K_{зс}=0,97$ ($\delta_c=0,35$ мм), і $K_{зо}=0,3-0,15$, (клас напруги від 1 до 110 кВ [113]) та проектних діапазонних змінах КЗ $K_{pcu(al)}$ (2.36), (2.37).

Таблиця 2.2 – Екстремуми показника маси та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

K _{зо}	Екстремальні значення керованих змінних			(Π [*] _{1ппсу}) _e	Екстремальні значення керованих змінних			(Π [*] _{1ппал}) _e
	λ _{ве} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.		λ _{ве} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.	
0,3	2,76	2,11	50,9	27,8	2,73	3,46	50,4	16,8
0,25	2,75	2,27	50,8	29,4	2,72	3,74	50,3	17,9
0,15	2,74	2,8	50,6	34,5	2,71	4,7	50,2	21,8

Таблиця 2.3 – Екстремуми показника вартості та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної обмотки

K_{30}	Екстремальні значення керованих змінних						$(\Pi_{2ппсу}^*)_e$		
	C_{cu}/C_{st}								
	3,5			5,5			C_{cu}/C_{st}		
	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	3,5	4,5	5,5
0,3	2,8	1,345	51,5	2,81	1,16	51,7	51,7	59,34	66,2
0,25	2,79	1,43	51,4	2,81	1,23	51,6	53,9	61,60	68,7
0,15	2,77	1,71	51,2	2,79	1,46	51,3	60,9	69,17	76,5

Таблиця 2.4 – Екстремуми показника вартості та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

K_{30}	Екстремальні значення керованих змінних						$(\Pi_{2ппал}^*)_e$		
	C_{al}/C_{st}								
	3			4,7			C_{al}/C_{st}		
	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	3	3,8	4,7
0,3	2,76	2,19	50,9	2,77	1,85	51,0	26,6	29,65	32,8
0,25	2,75	2,36	50,78	2,76	2,01	50,9	28,1	31,26	33,8
0,15	2,74	2,91	50,5	2,75	2,42	50,8	33,2	36,63	40,1

Таблиця 2.5 – Екстремуми показника втрат та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

K_{30}	Екстремальні значення геометричних керованих змінних при величині $K_{рсу(al)}$									$(\Pi_{3ппсу(al)}^*)_e$		
	3			8			24					
	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	$\lambda_{ве},$ в.о.	$a_{ме},$ в.о.	$\alpha_{се},$ град.	3	8	24
	0,3	2,79	1,49	51,36	2,81	1,09	51,79	2,84	0,82	52,23	64,89	110,81
0,25	2,78	1,59	51,27	2,81	1,15	2,81	2,84	0,85	52,17	67,81	114,52	219,98
0,15	2,77	1,92	51,03	2,79	1,35	51,49	2,83	0,97	51,97	77,51	126,92	236,31

Важливою особливістю створення ММ проектного синтезу ЕМС методом [7, 32, 84-87] на основі рівнянь і співвідношень (2.19) – (2.39) є забезпечення можливості розрахунку діапазонних значень глобального екстремуму заданого критерію оптимізації ЦФ які задовольняють параметричному синтезу [68].

Глобальний екстремум ЦФ (2.19), тобто фактично її оптимізаційної складової $\Pi_{kijcu(al)}^*$, забезпечується певним (правильним) розташуванням на схемі (кресленні) ЕМС, зокрема (рис. 2.11), розрахункових діаметрів D_{1ij} , D_{2ij} .

Ознакою правильності вказаного розташування є положення КЗ рівняння ПТР в ступенях різних знаків, що забезпечує унімодальність кожного з критеріїв оптимізації [71].

Оптимізаційний структурний синтез ЕМС виконується визначенням та зіставленням їх ПТР [85, 86]. Такий метод відповідає нормативному документу [114] і методу експертної оцінки [68], відповідно до яких визначення кращого варіанту електричної машини та іншого пристрою досягається порівнянням відносних показників якості нової розробки відносно базового (кращого) аналогу. Визначається комплексний ПТР [114]

$$Q_{kij} = \sum_{k=1}^{k=n} q_{kij} m_{kij}, \quad (2.40)$$

де q_{kij} – відносний (безрозмірний) окремий ПТР, який визначається співвідношенням однотипних $k=1 \dots n$ величин, що характеризують технічний рівень ij – варіантів нової розробки відносно базового аналогу; m_{kij} – коефіцієнт вагомості k -го показника. Якщо в (2.40) всі q_{kij} нової розробки є кращими відносно аналогу, m_{kij} визначати необов'язково.

При оптимізаційному зіставленні варіантів ЕМС однофазного трансформатора за базову прийнята традиційна конструкція з прямокутними УК та стрижневим шихтованим магнітопроводом структури (рис. 1.1, а). При оптимізаційному зіставленні варіантів ЕМС трифазних трансформатора і реактора за базові прийняті традиційні конструкції з прямокутними і круговими УК обмоткових котушок та перерізів стрижнів і ярем стрижневих шихтованих магнітопроводів (рис. 2.11, б, в).

Важливою додатковою характеристикою технічного рівня ЕСП, що відповідає температурному проектному обмеженню параметричного синтезу ЕМС [4, 6, 15, 52, 53, 64, 92, 110], є тепловий стан обмоток.

На додаток до структурно-параметричного синтезу ЕСП, на основі застосування складових рівнянь (2.19), (2.23), (2.25), (2.32), можливо визначення та

співставлення їх теплового стану [87]. Застосовується рівняння перевищення температури $\Delta Q_{ijcu(al)}$ або середнього теплового навантаження $P_{wijcu(al)}$ обмоток відповідно ЕМС малопотужних і силових розподільчих ЕСП [52, 53]:

$$\Delta Q_{ijcu(al)} = \frac{P_{kijcu(al)} \left(1 + P_{nijcu(al)} / P_{kijcu(al)}\right)}{\alpha_T S_{wvijcu(al)} \left[1 + S_{m(v)vijcu(al)} / S_{wvijcu(al)}\right] \sqrt{\frac{P_{nijcu(al)}}{P_{kijcu(al)}}}}; \quad (2.41)$$

$$P_{wijcu(al)} = P_{kijcu(al)}^{(n)} / S_{wijcu(al)}, \quad (2.42)$$

де $P_{kijcu(al)}$ і $P_{nijcu(al)}$ – втрати короткого замикання (обмоткових) і втрати неробочого руху; α_T – питомий коефіцієнт тепловіддачі [53]; $S_{m(w)vijcu(al)}$ – площа "відкритої" поверхні охолодження магнітопроводу (еквівалентної обмотки); $S_{wijcu(al)}$ – площа ефективної поверхні охолодження еквівалентної обмотки:

$$P_{k(h)ijcu(al)} = f_{k(h)} \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_C), K_{pcu(al)} \right);$$

$$S_{m(w)vijcu(al)} = f_{m(w)ij} \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_C) \right); \quad S_{wijcu(al)} = f_w \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_C) \right).$$

Приклад складання функції середнього теплового навантаження обмотки варіантів однофазної планарної ЕМС наведено в додатку А.

Також на основі методу [7, 32, 84-87] можна виконати структурно-параметричну або параметричну оптимізацію ЕСП за інтегральним критерієм капіталізованої вартості. При застосуванні (2.19) – (2.39), рівняння (1.1) перетворюється до виду [86, 87]

$$C_{kijcu(al)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ij}} \right)^3 \left(\gamma_{st} K_{днij} P_{st} K_{н(м)} \Pi_{nijcu(al)}^* + \gamma_{cu(al)} K_{дк} K_{псу(al)} K_{к(о)} \Pi_{kijcu(al)}^* + K_B \gamma_{st} C_{st} \Pi_{2ijcu(al)}^* \right),$$

де K_B – коефіцієнт співвідношення вартості ЕСП і його ЕМС.

В цілому основною перевагою застосованого методу складання ЦФ [84-87] є можливість узагальненого структурного синтезу ЕМС без об'єднання в єдиному обчислювальному процесі структурного і структурно-параметричного синтезу. Фактично екстремум показника $\Pi_{1(2)ijcu(al)}^*$, який є незалежним від рівня та співвідношення ЕМН, визначає оптимальні геометричні співвідношення ЕМС за критерієм мінімуму маси (вартості). Це значно спрощує параметричний синтез.

Необхідність деякої зміни K_{30} в процесі розкладання обмотки при детальному проектуванні, корегування величин і співвідношень ЕМН при перевірці проектних обмежень та врахуванні неповного завантаження ЕСП при параметричному синтезі, а також зміна вартості матеріалів в залежності від потужності ЕСП, класу нагрівостійкості і інших чинників, не протирічить висновкам структурного синтезу. Це обумовлено тим, що показники $\Pi_{kijcu(al)}^*$ визначаються в проектних діапазонах змін K_{30} , співвідношень $C_{cu(al)}/C_{st}$ і рівня та співвідношення ЕМН, тобто КЗ $K_{pcu(al)}$. Іншими перевагами застосованого методу є універсальність і мінімальна кількість відносних КЗ a_m , λ_b , $t(\alpha_c)$, $K_{pcu(al)}$, а також представлення ММ ЕМС у вигляді одного цілісного рівняння.

2.5. Висновки до розділу 2

2.5.1. Використання в ЕМС багатограних УК знижує середню довжину витків обмоток відносно аналогів з ідентичною площею активного перерізу стрижня та з прямокутними УК і аналогів з круговими УК та $K_{kk} \leq 0,9$, що надає можливість деякого зниження втрат та матеріаломісткості ЕСП.

2.5.2. Застосування ЕСП з багатограними УК стрижнів і обмоткових котушок забезпечує потенціальну можливість підвищення надійності трансформації енергії підсиленням ЕДС статичних ЕМС виключенням механічних напружень вигину на більшій частині контурів витків.

2.5.3. Запропоновані стикові і комбінована стико-шихтована вперепліт конструкції планарних магнітопроводів з шести і восьмигранними УК перерізів стрижнів, які відрізняються відсутністю сходинок та практично повним заповненням контурів перерізів стрижнів.

2.5.4. Перетворення варіантів планарних однофазних структур ЕМС в просторову радіальну тристрижневу з прямокутним зовнішнім контуром утворює можливість енергоресурсозбереження при виробництві однофазних ЕСП зниженням числа і об'єму ЕТС яремно-кутових зон та застосуванням трисекційних обмоток.

2.5.5. Додаткове енергоресурсозбереження при створенні ЕСП шляхом зниження значних додаткових втрат текстурованого шихтованого

магнітопроводу можливо комбінацією марок ЕТС та розташуванням в яремно-стрижневих і кутових ділянках фрагментів з анізотропної і ізотропної ЕТС.

2.2.6. Виникає доцільність рішення задачі нероз'ємного з'єднання анізотропної і ізотропної ділянок шарів комбінованого магнітопроводу в пластини шевронної форми проведенням дослідних робіт застосування різновидів електрозварювальних технологій.

2.2.7. Умовам узагальненого зіставлення, тобто вимогам інваріантності і електромагнітної еквівалентності, максимально відповідає метод [84-86] структурного і структурно-параметричного синтезу ЕСП з перевіркою проектних обмежень на основі застосування ММ з безрозмірними ПТР і універсальними геометричними і електромагнітною відносними КЗ.

2.2.8. Визначена ідентичність проектних діапазонів змін відносних електромагнітних КЗ ЦФ ЕМС з мідними і алюмінієвими обмотками.

2.2.9. Застосований метод [84-86] дозволяє подлати відоме протиріччя [68] між структурним і параметричним синтезами на основі визначення ПТР в заданих діапазонах змін K_{30} та $K_{pcu(al)}$, а також можливості узагальненого співставлення перевищення температури (теплового навантаження) обмоток варіантів ЕМС.

РОЗДІЛ 3

**ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ОДНОФАЗНОЇ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ПРЯМОКУТНИМИ
УТВОРЮЮЧИМИ КОНТУРАМИ ОБМОТКОВИХ КОТУШОК І
ПЕРЕРІЗАМИ ШИХТОВАНОГО МАГНІТОПРОВОДУ**

3.1. Масовартісні показники планарної стрижневої системи

Для однофазної ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів і УК обмоткових котушок (рис. 3.1) діаметри розрахункових кіл $D_{1(2)ii}$ приймають позначення $D_{1(2)сп}$ і КЗ (2.21) і (2.22) визначаються співвідношеннями [51]:

$$a_m = D_{1сп} / D_{2сп}; \quad (3.1)$$

$$\lambda_b = h_{всп} / b_{всп}. \quad (3.2)$$

Ширина обмоткового вікна $b_{всп}$ магнітопроводу в ЕМС (рис. 3.1) визначається, з урахуванням (3.1), виразом

$$b_{всп} = \frac{D_{2сп}}{2} - \frac{b_{ссп}}{2} = \frac{a_m D_{1сп}}{2} - \frac{D_{1сп} \sin(\alpha_c/2)}{2} = \frac{D_{1сп}}{2} [a_m - \sin(\alpha_c/2)]. \quad (3.3)$$

Загальний об'єм стрижнів і ярем магнітопроводу ЕМС (рис. 3.1) визначається на основі (3.2), (3.3)

$$V_{сп} = 2h_{всп}S_{ссп} + 2b_{всп}S_{ссп} + 4b_{ссп}S_{ссп}, \quad (3.4)$$

де $S_{ссп}$ – площа прямокутного перерізу стрижня, розрахунковим діаметром $D_{1сп}$,

$$S_{ссп} = \frac{D_{1сп}^2}{2} \sin \alpha_c. \quad (3.5)$$

Площа ЕТС в прямокутному поперечному перерізі стрижня (рис. 3.1, б) визначається співвідношенням

$$\Pi_{ссп} = K_{зс} \frac{D_{1сп}^2}{2} \sin \alpha_c. \quad (3.6)$$

Об'єм $V_{сп}$ магнітопроводу ЕМС (3.1, а, б) визначається з використанням (3.2), (3.3), (3.5) – (3.6) виразом

$$\begin{aligned}
 V_{\text{СП}} &= 2 \frac{D_{1\text{СП}}}{2} \left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{D_{1\text{СП}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} + 2 \frac{D_{1\text{СП}}}{2} \left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \frac{D_{1\text{СП}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} + 4 D_{1\text{СП}} \times \\
 &\times \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \frac{D_{1\text{СП}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} = D_{1\text{СП}}^3 \left[\left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \lambda_{\text{В}} 0,5 \sin \alpha_{\text{с}} + \left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) 0,5 \sin \alpha_{\text{с}} + \right. \\
 &\left. + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \sin \alpha_{\text{с}} \right] = D_{1\text{СП}}^3 0,5 \sin \alpha_{\text{с}} \left[\left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \lambda_{\text{В}} + \left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right]. \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

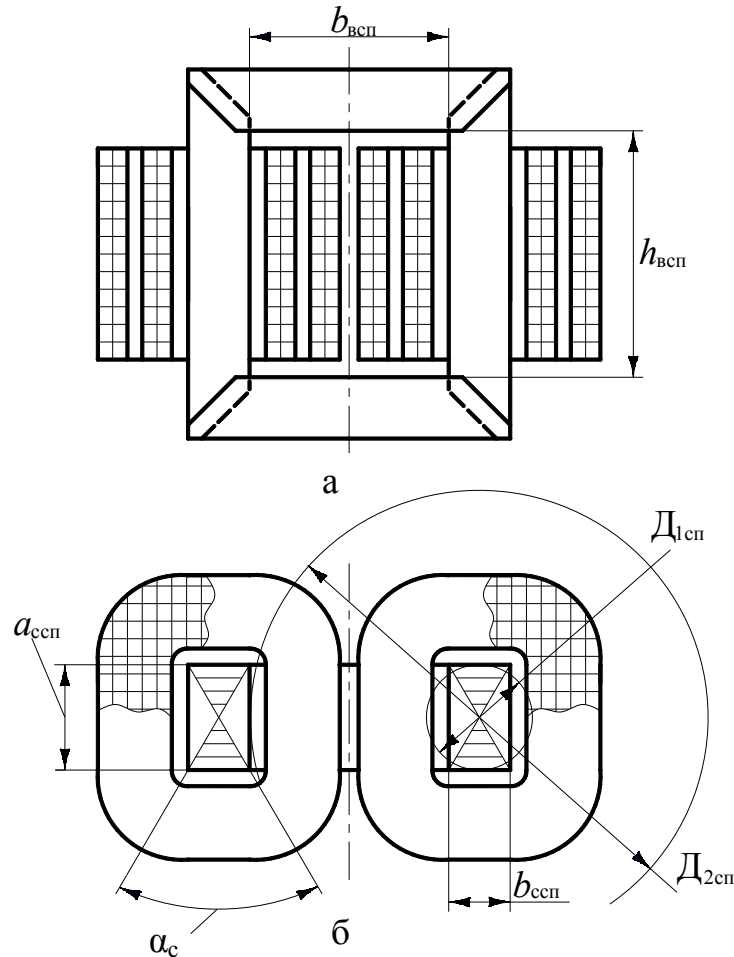


Рисунок 3.1 – Конструктивні схеми в повздовжньому (а) та поперечному (б) перерізах однофазної планарної електромагнітної система із стрижневим магнітопроводом

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 3.1) визначається як підсумок мас, що обмежені об'ємами стрижнів і ярем, з використанням (3.1), (3.2) та (3.7) рівнянням

$$m_{\text{МСП}} = K_{\text{ЗС}} \gamma_{\text{ст}} V_{\text{СП}} = K_{\text{ЗС}} \gamma_{\text{ст}} D_{1\text{СП}} \left(a_{\text{М}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{D_{1\text{СП}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} +$$

$$\begin{aligned}
& +D_{1\text{сп}} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \frac{D_{1\text{сп}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} + 4D_{1\text{сп}} \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \frac{D_{1\text{сп}}^2}{2} \sin \alpha_{\text{с}} = K_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}} D_{1\text{сп}}^3 0,5 \sin \alpha_{\text{с}} \times \\
& \times \left[\left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \lambda_{\text{в}} + \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right]. \quad (3.8)
\end{aligned}$$

З використанням базового рівняння (2.33) і співвідношень (3.2) і (3.3) отримується залежність між геометричними параметрами $\Pi_{\text{ссп}}$ та $b_{\text{всп}}$ планарного однофазного стрижневого магнітопроводу

$$\begin{aligned}
\Pi_{\text{ссп}} = \Pi_{\text{от}} / (K_{\text{зо}} S_{\text{всп}}) &= \Pi_{\text{от}} / (K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} b_{\text{всп}}^2) = \Pi_{\text{от}} / \left(K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} \frac{D_{1\text{сп}}^2}{4} (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2))^2 \right) = \\
&= 8\Pi_{\text{от}} / \left(K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} D_{1\text{сп}}^2 (a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2})^2 \right), \quad (3.9)
\end{aligned}$$

де $S_{\text{всп}}$ – площа обмоткового вікна ЕМС (рис. 3.1.), що визначається на основі (3.2), (3.3),

$$S_{\text{всп}} = h_{\text{всп}} b_{\text{всп}} = \lambda_{\text{в}} b_{\text{всп}}^2. \quad (3.10)$$

На основі рівності лівих частин (3.6) і (3.9) випливає зв'язок між $\Pi_{\text{ссп}}$ та $\Pi_{\text{от}}$

$$\Pi_{\text{ссп}} = \frac{K_{\text{зс}} D_{1\text{сп}}^2 \sin \alpha_{\text{с}}}{2} = \frac{8\Pi_{\text{от}}}{K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} D_{1\text{сп}}^2 (a_{\text{м}} - \sin \alpha_{\text{с}}/2)^2}. \quad (3.11)$$

З рівняння (3.11) визначається вираз внутрішнього розрахункового діаметру $D_{1\text{сп}}$ магнітопроводу планарної стрижневої ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів та ярем (рис. 3.1)

$$D_{1\text{сп}} = \sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_{\text{с}} K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2}}. \quad (3.12)$$

Середня довжина витка розрахункової еквівалентної обмотки з прямокутним внутрішнім контуром обмоткової котушки залежить від ширини обмоткового вікна $b_{\text{всп}}$ (3.3) (рис. 3.1) та визначається наступним виразом

$$l_{\text{осп}} = 2a_{\text{ссп}} + 2b_{\text{ссп}} + \frac{\pi b_{\text{всп}}}{4} = 2D_{1\text{сп}} \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2D_{1\text{сп}} \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \frac{D_{1\text{сп}}}{2} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) =$$

$$= D_{\text{лсп}} \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \quad (3.13)$$

Маса активного матеріалу обмотки (АМО) ЕМС схеми (рис. 3.1) визначається виходячи з (2.30), та (3.3), (3.13) рівнянням

$$\begin{aligned} m'_{\text{оспсу}(al)} = \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B b_{\text{всп}}^2 l_{\text{осп}} = \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \frac{D_{\text{лсп}}^2}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 D_{\text{лсп}} \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + \right. \\ \left. + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] = \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B D_{\text{лсп}}^3 \times \\ \times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right]. \quad (3.14) \end{aligned}$$

Після підстановки (3.12) в (3.8) та (3.14), рівняння мас ЕТС магнітопроводу і АМО ЕМС схеми (рис. 3.1) перетворюються:

$$\begin{aligned} m_{\text{мсп}} = K_{3c} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \\ \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{мсп}}^*; \quad (3.15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'_{\text{оспсу}(al)} = \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] = \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{оспсу}(al)}^*, \quad (3.16) \end{aligned}$$

де $\Pi_{\text{мсп}}^*$ та $\Pi_{\text{оспсу}(al)}^*$ – відносні показники мас магнітопроводу та провідникового матеріалу обмотки ЕМС схеми (рис. 3.1):

$$\Pi_{\text{мсп}}^* = K_{3c} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right.$$

$$\left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right]; \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{оспсу}(al)}^* = K_{30} \lambda_B \left(\frac{\sqrt{8 \Pi_{\text{от}}}}{\sqrt{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 & \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \right. \\ & \left. \times \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Маса $m'_{\text{аспсу}(al)}$ та вартість $C'_{\text{аспсу}(al)}$ активних матеріалів ЕМС схеми (рис. 3.1) визначаються, у відповідності з (2.31), (2.32) та на основі (3.15) – (3.18), рівняннями:

$$\begin{aligned} m'_{\text{аспсу}(al)} = m_{\text{мсп}} + m'_{\text{оспсу}(al)} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{мсп}}^* + \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{оспсу}(al)}^* = \\ = K_{3c} \gamma_{st} \left(\frac{\sqrt{8 \Pi_{\text{от}}}}{\sqrt{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \\ \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \left(\frac{\sqrt{8 \Pi_{\text{от}}}}{\sqrt{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\ \times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] = \\ = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{1\text{спсу}(al)}^*; \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$C'_{\text{аспсу}(al)} = C_{\text{мсп}} + C'_{\text{оспсу}(al)} = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{мсп}}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \times$$

$$\begin{aligned}
\times \Pi_{\text{оспссу}(al)}^* &= C_{st} \gamma_{st} K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \\
&+ \left. \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\
&\times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] = \\
&= C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{2\text{спссу}(al)}^*, \tag{3.20}
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{спссу}(al)}^*$ і $\Pi_{2\text{спссу}(al)}^*$ – відносні показники маси та вартості активних матеріалів однофазної планарної стрижневої ЕМС з прямокутними перерізами стрижнів і ярем магнітопроводу та прямокутними УК обмоткових котушок (рис. 3.1):

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{спссу}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + K_{30} \lambda_B \times \right. \\
&\times \left. \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \tag{3.21} \\
\Pi_{2\text{спссу}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + K_{30} \lambda_B \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \quad (3.22)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)спcu(al)}^*$ показників (3.21) і (3.22), що отримані при трьох значеннях K_{30} і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 3.1 – 3.3.

Таблиця 3.1 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів однофазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами, що відрізняються мідними та алюмінієвими провідниками обмоток

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.			Значення екстремуму показника маси ЕМС, б.о.
		a_{me}	λ_{ve}	α_{ce}	
$\Pi_{1спcu}^*$ (рис. 3.1)	0,3	2,08	2,21	47,13	17,84
	0,25	2,23	2,20	46,89	18,81
	0,15	2,74	2,17	46,25	22,04
$\Pi_{1спal}^*$ (рис. 3.1)	0,3	3,37	2,14	45,66	10,65
	0,25	3,64	2,13	45,46	11,37
	0,15	4,54	2,11	44,95	13,76

Таблиця 3.2 – Екстремуми показників вартості однофазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами і мідними обмотками

Позначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, б.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2спcu}^*$ (рис. 3.1)	0,3	33,57	36,12	38,56	40,91	43,18
	0,25	34,90	37,49	39,97	42,36	44,66
	0,15	39,32	42,07	44,68	47,19	49,62

Таблиця 3.3 – Екстремуми показників вартості однофазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами і алюмінієвими обмотками

Позначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, б.о.				
		3	3,4	3,8	4,2	4,7
$\Pi_{2спл}^*$ (рис. 3.1)	0,3	17,04	18,06	19,03	19,97	21,08
	0,25	17,99	19,04	20,04	20,99	22,14
	0,15	21,14	22,28	23,38	24,42	25,67

3.2. Показники втрат активної потужності планарної стрижневої системи

Об'єми стрижнів $V_{ссп}$ і ярем $V_{ясп}$ планарного магнітопроводу з прямокутними перерізами стрижнів та ярем ЕМС (рис. 3.1) визначаються виразами:

$$V_{ссп} = 2h_{всп}S_{ссп}; \quad (3.23)$$

$$V_{ясп} = (2b_{всп} + 2b_{ссп})S_{ссп}. \quad (3.24)$$

Після використання (3.2), (3.3) та підстановки (3.5), (3.6), вирази (3.23), (3.24) перетворюються до виду:

$$\begin{aligned} V_{ссп} &= 2h_{всп}S_{ссп} = 2b_{всп}\lambda_{в}S_{ссп} = \frac{D_{1сп}}{2}(a_{м} - \sin(\alpha_{с}/2))\lambda_{в} \frac{D_{1сп}^2}{2} \sin \alpha_{с} = \\ &= \frac{D_{1сп}^3}{4}(a_{м} - \sin(\alpha_{с}/2))\lambda_{в} \sin \alpha_{с}; \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} V_{ясп} &= (2b_{всп} + 2b_{ссп})S_{ссп} = \left(2 \frac{D_{1сп}}{2}(a_{м} - \sin(\alpha_{с}/2)) + 2D_{1сп} \sin \frac{\alpha_{с}}{2} \right) \frac{D_{1сп}^2}{2} \sin \alpha_{с} = \\ &= D_{1сп}^3 \frac{\sin \alpha_{с}}{2} \left[(a_{м} - \sin(\alpha_{с}/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_{с}}{2} \right]. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Виходячи з (3.25) і (3.26) загальні втрати неробочого руху ЕМС (рис. 3.1) визначаються

$$\begin{aligned}
P_{\text{нсп}} &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} (V_{\text{ссп}} + V_{\text{ясп}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} \left(\frac{D_{\text{лсп}}^3}{4} (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) \lambda_{\text{в}} \sin \alpha_{\text{с}} + \right. \\
&+ \left. D_{\text{лсп}}^3 \frac{\sin \alpha_{\text{с}}}{2} \left((a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} D_{\text{лсп}}^3 \left[0,25 (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) \times \right. \\
&\quad \left. \times \lambda_{\text{в}} \sin \alpha_{\text{с}} + \frac{\sin \alpha_{\text{с}}}{2} \left((a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right]. \quad (3.27)
\end{aligned}$$

Рівняння втрат короткого замикання (2.36) для однофазної ЕМС (рис. 3.1) при підстановці (3.2), (3.3) і (3.12) перетворюється до виду

$$\begin{aligned}
P'_{\text{кспсу}(al)} &= K_{\text{дк}} \gamma_{cu}(al) K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} b_{\text{всп}}^2 l_{\text{осп}} = K_{\text{дк}} \gamma_{cu}(al) K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} \frac{D_{\text{лсп}}^2}{4} \times \\
&\times \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2 D_{\text{лсп}} \left(2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right) = K_{\text{дк}} \gamma_{cu}(al) K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} \times \\
&\quad \times D_{\text{лсп}}^3 \left[\frac{1}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right) \right]. \quad (3.28)
\end{aligned}$$

Загальні втрати (2.35) ЕМС (рис. 3.1) визначаються на основі (3.27) і (3.28) рівнянням

$$\begin{aligned}
P'_{\Sigma \text{спсу}(al)} &= P_{\text{нсп}} + P'_{\text{кспсу}(al)} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} D_{\text{лсп}}^3 \left[0,25 (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) \lambda_{\text{в}} \sin \alpha_{\text{с}} + \right. \\
&+ \left. \frac{\sin \alpha_{\text{с}}}{2} \left((a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right] + K_{\text{дк}} \gamma_{cu}(al) K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} D_{\text{лсп}}^3 \left[\frac{1}{2} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2 \times \right. \\
&\times \left. \left(2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right) \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} D_{\text{лсп}}^3 \left[0,25 (a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) \times \right. \\
&\quad \left. \times \lambda_{\text{в}} \sin \alpha_{\text{с}} + \frac{\sin \alpha_{\text{с}}}{2} \left((a_{\text{м}} - \sin(\alpha_{\text{с}}/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right] + K_{\text{зо}} K_{\text{рпсу}(al)} \lambda_{\text{в}} \times \\
&\quad \times \left[\frac{1}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right) \right]. \quad (3.29)
\end{aligned}$$

При підстановці (3.12) рівняння загальних підсумкових втрат (3.29) перетворюється

$$P'_{\Sigma \text{спсу}(al)} = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 K_{дн} \left[\sqrt{\frac{8 \Pi_{от}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right]^3 \left[\left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \lambda_B \sin \alpha_c + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left(\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + K_{30} K_{pcu}(al) \lambda_B \frac{1}{4} \left[a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right]^2 \right] \times \\ \left. \times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right] = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \gamma_{st} P_{st} \Pi_{3\text{спсу}(al)}^*, \quad (3.30)$$

де $\Pi_{3\text{спсу}(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 3.1),

$$\Pi_{3\text{спсу}(al)}^* = K_{дн} \left[\sqrt{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right]^3 \left[\left[0,25 \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \lambda_B \sin \alpha_c + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left(\left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + K_{30} K_{pcu}(al) \lambda_B \frac{1}{4} \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 \right] \times \\ \left. \times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right]. \quad (3.31)$$

Екстремуми (мінімуми) показника втрат активної потужності (3.31) ЦФ (3.30) планарної стрижневої ЕМС (рис. 3.1) з мідними і алюмінієвими провідниками обмоток наведені при трьох значеннях K_{30} і співвідношеннях (2.38), (2.39) в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів однофазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами, що відрізняються мідними і алюмінієвими провідниками обмоток

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношеннях коефіцієнтів додаткових втрат і питомих характеристик електротехнічних матеріалів		
	$\Pi_{3\text{спсу}(al)}^*$		
	3	8	24
0,3	41,97	72,25	141,29
0,25	43,78	74,56	144,35
0,15	49,82	82,29	154,54

3.3. Масовартісні показники планарної броньової системи

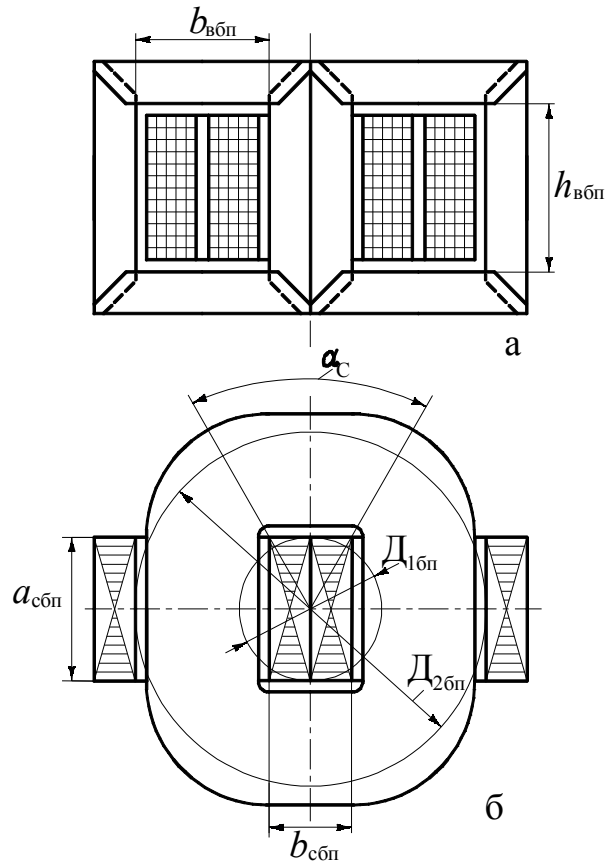


Рисунок 3.2 – Конструктивна схема в повздовжньому (а) та поперечному (б) перерізах однофазної планарної електромагнітної системи з броньовим магнітопроводом

Для однофазної броньової ЕМС з прямокутними перерізами стрижня та ярем магнітопроводу і прямокутними УК обмоткових котушок (рис. 3.2), діаметри розрахункових кіл $D_{1(2)ii}$ приймають позначення $D_{1(2)бп}$ і КЗ (2.21) і (2.22) визначаються співвідношеннями [51]:

$$a_m = D_{1бп} / D_{2бп}; \quad (3.32)$$

$$\lambda_v = h_{вбп} / b_{вбп}, \quad (3.33)$$

Ширина обмоткового вікна $b_{вбп}$ магнітопроводу ЕМС (рис. 3.2) визначається, з використанням (3.32), виразом

$$b_{вбп} = \frac{D_{2бп}}{2} - \frac{b_{сбп}}{2} = \frac{a_m D_{1бп}}{2} - \frac{D_{1бп} \sin(\alpha_c/2)}{2} = \frac{D_{1бп}}{2} [a_m - \sin(\alpha_c/2)]. \quad (3.34)$$

Об'єми стрижня і ярем броньового однофазного магнітопроводу ЕМС з прямокутними УК (рис. 3.2) визначається з використанням (3.33), (3.34)

$$V_{бп} = 2h_{вбп}S_{сбп} + 2b_{вбп}S_{сбп} + 2b_{сбп}S_{сбп}, \quad (3.35)$$

де $S_{сбп}$ – площа прямокутного перерізу стрижня ЕМС (рис. 3.2, а, б) з розрахунковим діаметром $D_{1бп}$,

$$S_{сбп} = D_{1бп}^2 \sin \alpha_c / 2. \quad (3.36)$$

Маса ЕТС броньового однофазного магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 3.2) визначається з використанням (3.32), (3.33) та (3.36), рівнянням виду

$$\begin{aligned} m_{мбп} = K_{зс} \gamma_{st} V_{бп} = K_{зс} \gamma_{st} 2 \frac{D_{1бп}}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \frac{D_{1бп}^2}{2} \sin \alpha_c + \\ + 2 \frac{D_{1бп}}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \frac{D_{1бп}^2}{2} \sin \alpha_c + 2 D_{1бп} \sin \frac{\alpha_c}{2} \frac{D_{1бп}^2}{2} \sin \alpha_c = K_{зс} \gamma_{st} D_{1бп}^3 \sin \alpha_c \times \\ \times \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B 0,5 + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) 0,5 + \sin \frac{\alpha_c}{2} \right]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Площа ЕТС перерізу стрижня однофазного броньового магнітопроводу з прямокутним поперечним перерізом стрижня (рис. 3.2, б) визначається виразом

$$\Pi_{сбп} = K_{зс} D_{1бп}^2 \sin \alpha_c / 2. \quad (3.38)$$

Площа обмоткового вікна магнітопроводу ЕМС (рис. 3.2) визначається з використанням (3.32) і (3.33)

$$S_{вбп} = h_{вбп} b_{вбп} = \lambda_B b_{вбп}^2. \quad (3.39)$$

Використовуючи базове рівняння (2.33) і співвідношення (3.32) і (3.33) визначається залежність між геометричними параметрами $\Pi_{сбп}$ та $b_{вбп}$ однофазного планарного броньового магнітопроводу

$$\begin{aligned} \Pi_{сбп} = \Pi_{от} / (K_{зо} S_{вбп}) = \Pi_{от} / (K_{зо} \lambda_B b_{вбп}^2) = \Pi_{от} / \left(K_{зо} \lambda_B \left(\frac{D_{1бп}}{2} \left(a_M - \sin \left(\alpha_c / 2 \right) \right) \right)^2 \right) = \\ = 8 \Pi_{от} / \left(K_{зо} \lambda_B \left[D_{1бп} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 \right), \end{aligned} \quad (3.40)$$

З рівності лівих частин (3.38) і (3.40) можна визначити зв'язок між $\Pi_{сбп}$ і $\Pi_{от}$

$$\Pi_{сбп} = \frac{K_{зс} D_{1бп}^2 \sin \alpha_c}{2} = \frac{8 \Pi_{от}}{K_{зо} \lambda_B \left[D_{1бп} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2}. \quad (3.41)$$

З рівняння (3.41) визначається вираз внутрішнього розрахункового діаметру $D_{16\pi}$ магнітопроводу планарної однофазної броньової ЕМС з прямокутними перерізами стрижня та ярем (рис. 3.2)

$$D_{16\pi} = \sqrt[4]{\frac{8\Pi_{от}}{\sin\alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right)^2}}. \quad (3.42)$$

Середня довжина витка розрахункової еквівалентної обмотки однофазної броньової ЕМС (рис. 3.2) залежить від ширини обмоткового вікна $b_{в6\pi}$ (3.34) та визначається виразом

$$\begin{aligned} l_{обп} &= 2a_{с6\pi} + 2b_{с6\pi} + \frac{2\pi b_{в6\pi}}{2} = 2D_{16\pi} \cos\frac{\alpha_c}{2} + 2D_{16\pi} \sin\frac{\alpha_c}{2} + \frac{2\pi}{2} \frac{D_{16\pi}}{2} \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) = \\ &= D_{16\pi} \left[2\cos\frac{\alpha_c}{2} + 2\sin\frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Маси АМО варіантів однофазних броньових ЕМС схеми (рис. 3.2.), що відрізняються мідними та алюмінієвими обмотками, визначаються, використовуючи (2.30), і (3.33), (3.43) рівнянням

$$\begin{aligned} m'_{обпсц(ал)} &= \gamma_{сц(ал)} K_{30} \lambda_B b_{в6\pi}^2 l_{обп} = \gamma_{сц(ал)} K_{30} \lambda_B \frac{D_{16\pi}^2}{4} \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right)^2 D_{16\pi} \left[2\cos\frac{\alpha_c}{2} + \right. \\ &+ \left. 2\sin\frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) \right] = \gamma_{сц(ал)} K_{30} \lambda_B D_{16\pi}^3 \left[0,25 \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right)^2 \left(2\cos\frac{\alpha_c}{2} + \right. \right. \\ &\left. \left. + 2\sin\frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Підстановкою (3.42) в (3.37) та (3.44), рівняння мас ЕТС магнітопроводу і АМО ЕМС (рис. 3.2) перетворюються:

$$\begin{aligned} m_{м6\pi} &= K_{3c} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{от}}{\sin\alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right)^2}} \right)^3 0,5 \sin\alpha_c \left[\left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) \lambda_B + \right. \\ &\left. + \left(a_M - \sin\frac{\alpha_c}{2}\right) + 4\sin\frac{\alpha_c}{2} \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \Pi_{м6\pi}^*, \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$m'_{\text{обсци}(al)} = \gamma_{\text{ци}(al)} K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right)^2}} \right)^3 \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha}{2}\right)^2 \times \right. \\ \left. \times \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right) \right) \right] = \gamma_{\text{ци}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}}\right)^3 \Pi_{\text{обпци}(al)}^*, \quad (3.46)$$

де $\Pi_{\text{мбп}}^*$ та $\Pi_{\text{обпци}(al)}^*$ – відносні показники мас магнітопроводу та провідникового матеріалу обмоток ЕМС схеми (рис. 3.2):

$$\Pi_{\text{мбп}}^* = K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right) \lambda_B + \right. \\ \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right]; \quad (3.47)$$

$$\Pi_{\text{обпци}(al)}^* = K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right)^2}} \right)^3 \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right) \right) \right]. \quad (3.48)$$

Маса $m'_{\text{абпци}(al)}$ та вартість $C'_{\text{абпци}(al)}$ активних матеріалів ЕМС схеми (рис. 3.2) визначаються, у відповідності з (2.27), (2.28) та на основі (3.45) – (3.48), рівняннями:

$$m'_{\text{абпци}(al)} = m_{\text{мбп}} + m'_{\text{обпци}(al)} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}}\right)^3 \Pi_{\text{мбп}}^* + \gamma_{\text{ци}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}}\right)^3 \Pi_{\text{обпци}(al)}^* = \\ = K_{3c} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2}\right) \lambda_B + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \left(a_M - \sin \frac{\lambda_B}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left] + \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{OT}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\
& \times \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] = \\
& = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{OT}} \right)^3 \Pi_{16псу(al)}^*; \tag{3.49}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C'_{абпсу(al)} &= C_{мбп} + C'_{обпсу(al)} = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{OT}} \right)^3 \Pi_{мбп}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{OT}} \right)^3 \times \\
& \times \Pi_{обпсу(al)}^* = C_{st} \gamma_{st} K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{OT}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 0,5 \sin \alpha_c \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \right. \\
& \left. + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \times \\
& \times \left[\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{OT}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right]^3 \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{OT}} \right)^3 \Pi_{26псу(al)}^*, \tag{3.50}
\end{aligned}$$

де $\Pi_{16псу(al)}^*$ і $\Pi_{26псу(al)}^*$ – відносні показники маси та вартості активних матеріалів однофазної планарної броньової ЕМС з прямокутними перерізами стрижня і ярем магнітопроводу та прямокутними УК обмоткових котушок (рис. 3.2):

$$\Pi_{16псу(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{8 \Pi_{OT}}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \lambda_B + \right.$$

$$+ \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left] + K_{30} \lambda_B \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \left. \right]; \quad (3.51)$$

$$\Pi_{26псу(al)}^* = \left[\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right]^3 \left[K_{3c} 0,5 \sin \alpha_c \times \right. \\ \left. \times \left[\left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B + \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) + 4 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] + K_{30} \lambda_B \left[0,25 \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right) \right] C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \right]. \quad (3.52)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)6псу(al)}^*$ показників (3.51) і (3.52), що отримані при трьох значеннях K_{30} і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 3.5. і табл. 3.7 [51].

Таблиця 3.5 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів однофазної планарної броньової електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами, що відрізняються мідними та алюмінієвими провідниковими обмотками

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.			Значення екстремуму показника маси ЕМС, б.о.
		a_{me}	λ_{be}	α_{ce}	
$\Pi_{16псу}^*$ (рис. 3.2)	0,3	1,56	2,17	46,25	18,53
	0,25	1,67	2,16	46,03	19,68
	0,15	2,02	2,13	45,45	23,52
$\Pi_{16пап}^*$ (рис. 3.2)	0,3	2,46	2,11	44,95	11,56
	0,25	2,65	2,10	44,78	12,42
	0,15	3,29	2,08	44,35	15,26

Таблиця 3.6 – Екстремуми показників вартості однофазної планарної броньової електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами та мідними обмотками

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношенні вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, в.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi^*_{2бпци}$ (рис. 3.2)	0,3	33,07	35,37	37,57	39,69	41,73
	0,25	34,64	37,00	39,25	41,41	43,49
	0,15	39,89	42,43	44,85	47,16	49,38

Таблиця 3.7 – Екстремуми показників вартості однофазної планарної броньової електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами та алюмінієвими обмотками

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношенні вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
		3	3,4	3,8	4,2	4,7
$\Pi^*_{2бпал}$ (рис. 3.2)	0,3	17,77	18,74	19,66	20,53	21,58
	0,25	18,89	19,89	20,85	21,75	22,84
	0,15	22,64	23,76	24,82	25,83	27,03

3.4. Показники втрат активної потужності планарної броньової системи

Об'єми стрижня $V_{сбп}$ і ярем $V_{ябп}$ однофазного планарного броньового магнітопроводу з прямокутними перерізами ЕМС (рис. 3.2) визначаються виразами:

$$V_{сбп} = 2h_{вбп}S_{сбп}; \quad (3.53)$$

$$V_{ябп} = (2b_{вбп} + 2b_{сбп})S_{сбп}. \quad (3.54)$$

Після підстановки (3.34) і (3.38) та з використанням (3.36), вирази (3.53), (3.54) перетворюються до виду:

$$\begin{aligned} V_{сбп} &= 2b_{вбп} \lambda_B S_{сбп} = \frac{D_{1бп}^2}{2} [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \lambda_B \frac{D_{1бп}^2}{2} \sin \alpha_c = \\ &= \frac{D_{1бп}^3}{4} [a_M - \sin(\alpha_c/2)] \lambda_B \sin \alpha_c; \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} V_{ябп} &= (2b_{вбп} + 2b_{сбп}) S_{сбп} = \left[2 \frac{D_{1бп}^2}{2} (a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 D_{1бп} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \frac{D_{1бп}^2}{2} \sin \alpha_c = \\ &= D_{1бп}^3 \frac{\sin \alpha_c}{2} \left[(a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right]. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Виходячи з (3.49) і (3.50) загальні втрати неробочого руху ЕМС (рис. 3.2) визначаються

$$\begin{aligned} P_{нбп} &= \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} (V_{сбп} + V_{ябп}) = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} \left[\frac{D_{1бп}^3}{4} (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \lambda_B \sin \alpha_c + \right. \\ &+ \left. D_{1бп}^3 \frac{\sin \alpha_c}{2} \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} D_{1бп}^3 \left[0,25 (a_M - \sin(\alpha_c/2)) \times \right. \\ &\quad \left. \times \lambda_B \sin \alpha_c + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.57)$$

Рівняння втрат короткого замикання (2.36) для однофазної броньової ЕМС (рис. 3.2) при підстановці (3.32), (3.33) і (3.43), перетворюється до виду

$$\begin{aligned} P'_{кбпсу(al)} &= K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_o^2 \lambda_B b_{вбп}^2 l_{обп} = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_o^2 \lambda_B \frac{D_{1бп}^2}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \\ &\quad \times D_{1бп} \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{2\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_o^2 \lambda_B \frac{D_{1бп}^3}{4} \times \\ &\quad \times \left[a_M - \sin(\alpha_c/2) \right]^2 \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.58)$$

Загальні втрати (2.35) ЕМС (рис. 3.2) визначаються на основі (3.57) і (3.58) рівнянням

$$\begin{aligned}
P'_{\Sigma \text{бпсу}(al)} &= P_{\text{нбп}} + P'_{\text{кбп}} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{3c} \Pi_{1\text{бп}}^3 \left[0,25(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \lambda_B \sin \alpha_c + \frac{\sin \alpha_c}{2} \times \right. \\
&\times \left. \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + K_{\text{дк}} \gamma_{\text{осу}(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B \frac{\Pi_{1\text{бп}}^2}{4} [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \times \\
&\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{3c} \Pi_{1\text{бп}}^3 \left[0,25(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \times \right. \\
&\times \lambda_B \sin \alpha_c + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left. \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + K_{30} K_{\text{псу}(al)} \lambda_B 0,5 [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \times \\
&\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \tag{3.59}
\end{aligned}$$

При підстановці (3.42) рівняння підсумкових втрати (3.59) ЕМС (рис. 3.2) перетворюється

$$\begin{aligned}
P'_{\Sigma \text{бпсу}(al)} &= \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\
&\times \left[\left[0,25(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \lambda_B \sin \alpha_c + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\
&+ K_{30} K_{\text{псу}(al)} \lambda_B \frac{1}{4} [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \left. \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right] = \\
&= \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \gamma_{st} P_{st} \Pi_{3\text{бпсу}(al)}^*, \tag{3.60}
\end{aligned}$$

де $\Pi_{3\text{бпсу}(al)}^*$ – показник втрат активної потужності однофазної броньової ЕМС (рис. 3.2),

$$\Pi_{3\text{бпсу}(al)}^* = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[\left[0,25(a_M - \sin(\alpha_c/2)) \lambda_B \sin \alpha_c + \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\sin \alpha_c}{2} \left((a_M - \sin(\alpha_c/2)) + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \Big] + K_{30} K_{pcu(al)} \lambda_B \frac{1}{4} [a_M - \sin(\alpha_c/2)]^2 \times \\
& \times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \Big] . \quad (3.61)
\end{aligned}$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3бпсу(al)e}^*$ показника втрат активної потужності (3.61) ЦФ (3.30) планарної броньової ЕМС (рис. 3.2) з мідними (алюмінієвими) провідниками обмоток при трьох значеннях K_{30} і співвідношень (2.38), (2.39) наведені в табл. 3.8. [51].

Таблиця 3.8 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів однофазної планарної броньової електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами, що відрізняються мідними і алюмінієвими провідниками обмоток

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношеннях коефіцієнтів додаткових втрат і питомих характеристик електротехнічних матеріалів		
	$\Pi_{3бпсу(al)e}^*$		
	3	8	24
0,3	41,88	69,19	129,95
0,25	44,03	71,94	133,57
0,15	51,20	81,12	145,67

3.5. Масовартісні показники радіальної тристрижневої системи

Для радіальної тристрижневої ЕМС (рис. 3.3, а) з прямокутними перерізами стрижнів і трикутним обмотковим вікном магнітопровода КЗ (2.21) і (2.22) ЦФ (2.19) визначаються співвідношеннями [51]:

$$a_M = D_{1рт} / D_{2рт} ; \quad (3.62)$$

$$\lambda_B = h_{врт} / b_{врт} , \quad (3.63)$$

де $D_{1рт}$ і $D_{2рт}$ – розрахункові діаметри контурних кіл $h_{врт}$ і $b_{врт}$ висота та ширина обмоткового вікна магнітопровода (рис. 3.3, б).

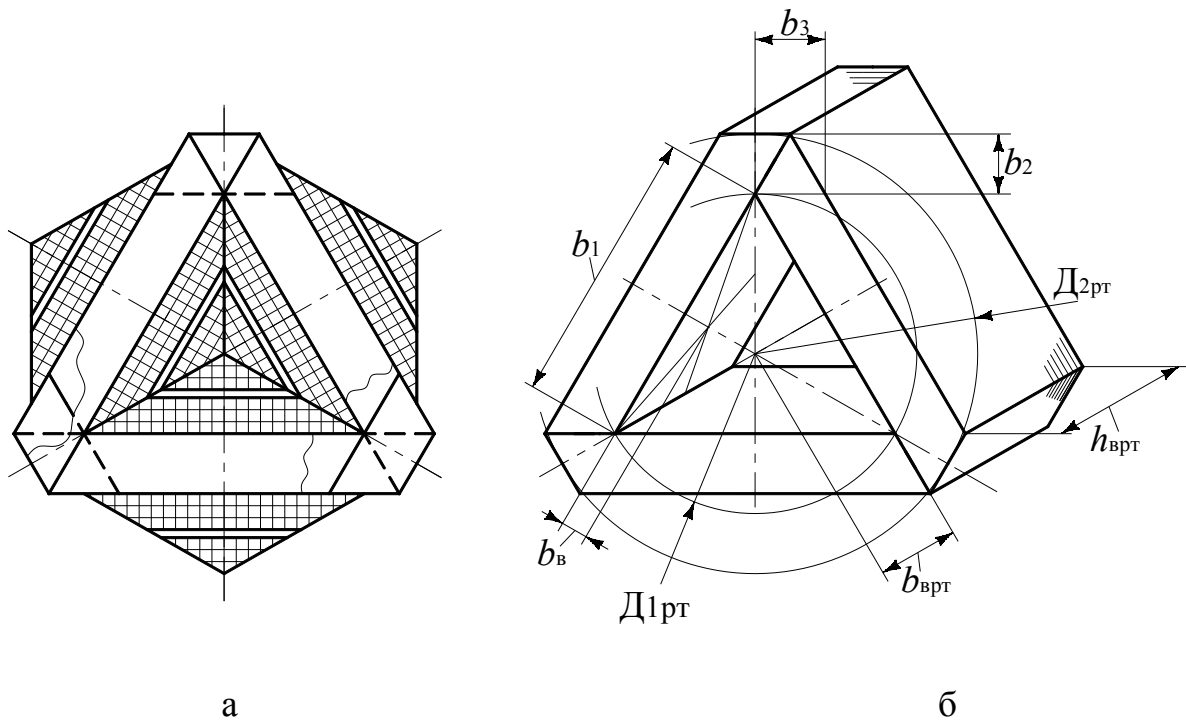


Рисунок 3.3 – Схема поперечного перерізу (а) та аксонометричний вид магнітопроводу (б) радіальної тристрижневої електромагнітної системи

Геометричні параметри стрижня b_1 , b_2 , b_3 та ширина обмоткового вікна $h_{\text{врт}}$ визначаються через розрахункові діаметри і КЗ (3.62) співвідношеннями та виразами:

$$b_1 = D_{1\text{рт}} \sin 60^\circ = (\sqrt{3}D_{1\text{рт}})/2; \quad (3.64)$$

$$b_2 = \frac{D_{2\text{рт}} - D_{1\text{рт}}}{2} = 0,5D_{1\text{рт}} (a_m - 1); \quad (3.65)$$

$$b_3 = b_2 / \sin 60^\circ = D_{1\text{рт}} (a_m - 1) / \sqrt{3}; \quad (3.66)$$

$$b_{\text{врт}} = \frac{D_{1\text{рт}}}{2} \sin 30^\circ = (D_{1\text{рт}}/4) = 0,25D_{1\text{рт}}. \quad (3.67)$$

Об'єми стрижнів та ярем радіального магнітопроводу (рис. 3.3, б) ЕМС (рис. 3.3, а), визначається на основі (3.63) – (3.66)

$$V_{\text{рт}} = (3b_1b_2h_{\text{врт}} + 3b_2b_3h_{\text{врт}})S_{\text{срт}}, \quad (3.68)$$

де $S_{\text{срт}}$ – площа ЕТС поперечного перерізу стрижня магнітопроводу (рис. 3.3, б),

$$S_{\text{срт}} = b_2h_{\text{врт}} = \lambda_{\text{в}}b_2b_{\text{врт}} = \lambda_{\text{в}}D_{1\text{рт}}^2 (a_m - 1)/8. \quad (3.69)$$

Маса ЕТС магнітопроводу (3.3, б) ЕМС (рис. 3.3, а) визначається з використанням (3.63) – (3.66) та (3.69), рівнянням

$$m_{\text{мрт}} = K_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}} V_{\text{рт}} = K_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}} \left[\sqrt{3} \left(D_{\text{лрт}} / 2 \right) 0,5 D_{\text{лрт}} (a_{\text{м}} - 1) 0,75 D_{\text{лрт}} \lambda_{\text{в}} + \right. \\ \left. + 0,375 D_{\text{лрт}} (a_{\text{м}} - 1) D_{\text{лрт}} (a_{\text{м}} - 1) / \sqrt{3} D_{\text{лрт}} \lambda_{\text{в}} \right] = K_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}} \left[0,325 \lambda_{\text{в}} D_{\text{лрт}}^3 (a_{\text{м}} - 1) + \right. \\ \left. + 0,216 \lambda_{\text{в}} D_{\text{лрт}}^3 (a_{\text{м}} - 1)^2 \right] = 0,2165 K_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}} \lambda_{\text{в}} D_{\text{лрт}}^3 (a_{\text{м}} - 1) (a_{\text{м}} + 0,5). \quad (3.70)$$

Базове рівняння зв'язку площ обмоткового вікна та ЕТС перерізу стрижня для ЕМС (рис. 3.3, а) має вид

$$\Pi_{\text{срт}} = K_{\text{зс}} S_{\text{срт}} = \Pi_{\text{от}} / (K_{\text{зо}} S_{\text{врт}}), \quad (3.71)$$

де площа обмоткового вікна магнітопроводу (рис. 3.3, б) визначається на основі (3.64) і (3.67),

$$S_{\text{врт}} = 3b_1 b_{\text{врт}} / 2 = \frac{3\sqrt{3}}{16} D_{\text{лрт}}^2 = 0,325 D_{\text{лрт}}^2. \quad (3.72)$$

При підстановці (3.69) і (3.72), рівняння (3.71) перетворюється

$$K_{\text{зс}} \lambda_{\text{в}} \frac{1}{8} D_{\text{лрт}}^2 (a_{\text{м}} - 1) = \Pi_{\text{от}} / (K_{\text{зо}} 0,325 D_{\text{лрт}}^2) = (\Pi_{\text{от}} 3,079) / K_{\text{зо}} D_{\text{лрт}}^2. \quad (3.73)$$

З (3.73) визначається вираз внутрішнього розрахункового діаметру $D_{\text{лрт}}$ магнітопроводу радіальної ЕМС (рис. 3.3, а)

$$D_{\text{лрт}} = \sqrt[4]{\frac{24,63 \Pi_{\text{от}}}{K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}}. \quad (3.74)$$

Середня довжина витка розрахункової еквівалентної обмотки ЕМС (рис. 3.3, а) залежить від геометричних розмірів $h_{\text{врт}}$, b_2 і відстані $b_{\text{в}}$ середнього витка еквівалентної обмотки від стрижня (рис. 3.3, б)

$$l_{\text{орт}} = 2(h_{\text{врт}} + b_2) + 2\pi b_{\text{врт}}, \quad (3.75)$$

де $b_{\text{в}}$ залежить від (3.67),

$$b_{\text{в}} = b_{\text{врт}} / 3 = 0,25 D_{\text{лрт}} / 3 = 0,083 D_{\text{лрт}}. \quad (3.76)$$

На основі (3.63), (3.65), (3.67) і (3.76) рівняння (3.75) перетворюється до виду

$$l_{\text{орт}} = 2 \left[\lambda_{\text{в}} 0,25 D_{\text{лрт}} + 0,5 D_{\text{лрт}} (a_{\text{м}} - 1) \right] + 2\pi 0,983 D_{\text{лрт}} =$$

$$= 0,5D_{\text{лрт}} [\lambda_{\text{в}} + 2(a_{\text{м}} - 1)] + 0,523D_{\text{лрт}} = 0,5D_{\text{лрт}} (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953). \quad (3.77)$$

Маси АМО варіантів ЕМС схеми (рис. 3.3, а), що відрізняються мідними і алюмінієвими обмотками, визначаються, виходячи з (2.30), (3.72), (3.77) рівнянням

$$\begin{aligned} m'_{\text{ортсu(al)}} &= \gamma_{\text{cu(al)}} K_{30} l_{\text{орт}} S_{\text{врт}} = \gamma_{\text{cu(al)}} K_{30} 0,5D_{\text{лрт}} (\lambda_{\text{в}} + 2a - 0,953) 0,325D_{\text{лрт}}^2 = \\ &= 0,16238\gamma_{\text{cu(al)}} K_{30} D_{\text{лрт}}^3 (\lambda_{\text{в}} + 2a - 0,953). \end{aligned} \quad (3.78)$$

Після підстановки (3.74) в (3.70) та (3.78), рівняння маси ЕТС магнітопроводу (рис. 3.3, б) і маси АМО варіантів ЕМС схеми (рис. 3.3, а) перетворюються:

$$\begin{aligned} m_{\text{мрт}} &= 0,216\gamma_{\text{ст}} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63\Pi_{\text{от}}}{K_{3\text{с}}K_{30}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)}} \right)^3 [K_{3\text{с}}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)(a_{\text{м}}+0,5) = \\ &= \gamma_{\text{ст}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{мртсu(al)}}^*; \end{aligned} \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} m'_{\text{ортсu(al)}} &= 0,1624\gamma_{\text{cu(al)}} K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63\Pi_{\text{от}}}{K_{3\text{с}}K_{30}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)}} \right)^3 \times \\ &\times (\lambda_{\text{в}} + 2a - 0,953) = \gamma_{\text{cu(al)}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{ортсu(al)}}^*, \end{aligned} \quad (3.80)$$

де $\Pi_{\text{мртсu(al)}}^*$ та $\Pi_{\text{ортсu(al)}}^*$ – відносні показники мас магнітопроводу (рис. 3.3, б) та провідникового матеріалу обмотки варіантів ЕМС схеми (рис. 3.3, а) з мідними та алюмінієвими обмотками:

$$\Pi_{\text{мрт}}^* = 0,216K_{3\text{с}} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63\Pi_{\text{от}}}{K_{3\text{с}}K_{30}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)}} \right)^3 \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)(a_{\text{м}} + 0,5); \quad (3.81)$$

$$\Pi_{\text{ортсu(al)}}^* = 0,162K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63\Pi_{\text{от}}}{K_{3\text{с}}K_{30}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)}} \right)^3 (\lambda_{\text{в}} + 2a - 0,953). \quad (3.82)$$

Маса $m_{\text{артсu(al)}}$ та вартість $C_{\text{артсu(al)}}$ активних матеріалів ЕМС схеми (рис. 3.3, б) визначаються, у відповідності з (2.27), (2.28) та на основі (3.79) – (3.82), рівняннями:

$$m'_{\text{артсu(al)}} = m_{\text{мрт}} + m'_{\text{ортсu(al)}} = \gamma_{\text{ст}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{мрт}}^* + \gamma_{\text{cu(al)}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{ортсu(al)}}^* =$$

$$\begin{aligned}
&= \gamma_{st} 0,216 K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + \gamma_{cu(al)} 0,162 K_{30} \times \\
&\quad \times \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 (\lambda_B + 2a - 0,953) = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \Pi_{1ртcu(al)}^*; \quad (3.83)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C'_{артcu(al)} &= C_{мрт} + C'_{ортcu(al)} = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \Pi_{мрт}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \times \\
&\quad \times \Pi_{ортcu(al)}^* = C_{st} \gamma_{st} 0,216 K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + \\
&\quad + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} 0,162 K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \times \\
&\quad \times (\lambda_B + 2a - 0,953) = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \Pi_{2ртcu(al)}^*, \quad (3.84)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1ртcu(al)}^*$ і $\Pi_{2ртcu(al)}^*$ – відносні показники маси та вартості активних матеріалів радіальної тристрижневої ЕМС (рис. 3.3, а) з прямокутними перерізами стрижнів та УК витків обмоткових катушок:

$$\begin{aligned}
\Pi_{1ртcu(al)}^* &= \Pi_{артcu(al)}^* + \gamma_{cu(al)} \Pi_{ортcu(al)}^* / \gamma_{st} = 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \times \\
&\quad \times \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + 0,75 K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \times \right. \\
&\quad \times (\lambda_B + 2a - 0,953) \left. \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} = 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) \times \right. \\
&\quad \times (a_M + 0,5) + 0,75 K_{30} (\lambda_B + 2a - 0,953) \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \left. \right]; \quad (3.85)
\end{aligned}$$

$$\Pi_{2ртcu(al)}^* = \Pi_{мртcu(al)}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \Pi_{ортcu(al)}^* / (C_{st} \gamma_{st}) =$$

$$\begin{aligned}
&= 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + \right. \\
&+ 0,75 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{30} (\lambda_B + 2a - 0,953) \right] C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \left. \right] = \\
&= 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^3 \left[K_{3c} \lambda_B (a_M - 1) (a_M + 0,5) + \right. \\
&\left. + 0,75 K_{30} (\lambda_B + 2a - 0,953) C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \right]. \quad (3.86)
\end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)ртcu(al)}^*$ показників (3.85) і (3.86), що отримані для трьох значень K_{30} і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 3.9. – табл. 3.11 [51].

Таблиця 3.9 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів однофазної радіальної тристрижневої електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів, що відрізняються мідними та алюмінієвими провідниками обмоток

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремуму показника маси ЕМС, б.о.
		a_{me}	λ_{ve}	
$\Pi_{1ртcu}^*$ (рис. 3.3, а)	0,3	1,37	1,50	17,58
	0,25	1,33	1,37	18,55
	0,15	1,26	1,06	21,79
$\Pi_{1ртal}^*$ (рис. 3.3, а)	0,3	1,20	0,83	10,56
	0,25	1,18	0,75	11,28
	0,15	1,14	0,58	13,68

Таблиця 3.10 – Екстремуми показників вартості варіантів однофазної радіальної тристрижневої електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів та мідними обмотками

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношенні вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, в.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
П* _{2ртси} (рис. 3.3, а)	0,3	32,87	35,34	37,70	39,98	42,18
	0,25	34,19	36,71	39,12	41,43	43,67
	0,15	38,63	41,29	43,84	46,28	48,64

Таблиця 3.11 – Екстремуми показників вартості варіантів однофазної радіальної тристрижневої електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів та алюмінієвими обмотками

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремуму показника вартості при співвідношенні вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
		3	3,4	3,8	4,2	4,7
П* _{2ртал} (рис. 3.3, а)	0,3	16,80	17,79	18,74	19,65	20,73
	0,25	17,75	18,77	19,74	20,68	21,79
	0,15	20,91	22,04	23,10	24,12	25,33

3.6. Показники втрат активної потужності радіальної тристрижневої системи

Об'єм стрижнів $V_{срт}$, і ярем $V_{ярт}$ радіального тристрижневого магнітопроводу (рис. 3.3, б) визначаються виразами:

$$V_{срт} = 3b_1 S_{срт}; \quad (3.87)$$

$$V_{ярт} = 3b_3 S_{срт}. \quad (3.88)$$

Підстановкою (3.64), (3.65) та (3.69) вирази (3.87), (3.88), перетворюються:

$$V_{\text{стр}} = 3b_1 S_{\text{пр}} = 3 \frac{\sqrt{3} D_{1\text{пр}} (\lambda_{\text{в}} D_{1\text{пр}}^2 (a_{\text{м}} - 1))}{2 \cdot 8} = 3 D_{1\text{пр}}^3 \frac{\lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}{16}; \quad (3.89)$$

$$V_{\text{япр}} = 3b_3 S_{\text{пр}} = 3 \frac{D_{1\text{пр}} (a_{\text{м}} - 1) \lambda_{\text{в}} D_{1\text{пр}}^2 (a_{\text{м}} - 1)}{\sqrt{3} \cdot 8} = 3 D_{1\text{пр}}^3 \frac{\lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}{8\sqrt{3}}. \quad (3.90)$$

Рівняння втрат неробочого руху трансформатора з ЕМС (рис. 3.3, а) з врахуванням (3.89) та (3.90) має наступний вид:

$$\begin{aligned} P_{\text{нрт}} &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} (V_{\text{стр}} + V_{\text{япр}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} \left(3 D_{1\text{пр}}^3 \frac{\lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}{16} + 3 D_{1\text{пр}}^3 \frac{\lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}{8\sqrt{3}} \right) = \\ &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} 0,216 D_{1\text{пр}}^3 (a_{\text{м}} - 1) \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} + 0,5). \end{aligned} \quad (3.91)$$

Рівняння втрат короткого замикання (2.36) для ЕМС (рис. 3.3, а) при підстановці (3.72) і (3.77) перетворюється до виду

$$\begin{aligned} P'_{\text{кртсц}(al)} &= K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} S_{\text{врт}} l_{\text{орт}} = K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} 0,325 D_{1\text{пр}}^2 \times \\ &\times 0,5 D_{1\text{пр}} (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953) = 0,162 K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} D_{1\text{пр}}^3 \times \\ &\times (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953). \end{aligned} \quad (3.92)$$

Загальні втрати (2.35) радіальної тристрижневої ЕМС (рис. 3.3, а) визначаються на основі (3.91) і (3.92):

$$\begin{aligned} P_{\Sigma \text{ртсц}(al)} &= P_{\text{нрт}} + P'_{\text{кртсц}(al)} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} 0,216 D_{1\text{пр}}^3 \left[K_{\text{зс}} (a_{\text{м}} - 1) \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} + 0,5) + \right. \\ &+ 0,162 K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} D_{1\text{пр}}^3 (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953) \left. \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} 0,216 D_{1\text{пр}}^3 \times \\ &\times \left[K_{\text{зс}} (a_{\text{м}} - 1) \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} + 0,5) + 0,75 K_{\text{псц}(al)} K_{\text{зо}} (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953) \right]. \end{aligned} \quad (3.93)$$

При підстановці (3.74) підсумкові втрати (3.93) радіальної тристрижневої ЕМС (рис. 3.3, а) з прямокутними УК стрижнів магнітопроводу (рис. 3.3, б) визначаються

$$\begin{aligned} P_{\Sigma \text{ртсц}(al)} &= \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 K_{\text{дн}} 2,394 \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}} \right)^3 \left[K_{\text{зс}} (a_{\text{м}} - 1) \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} + 0,5) + \right. \\ &+ 0,75 K_{\text{зо}} K_{\text{псц}(al)} (\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953) \left. \right] = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \gamma_{st} P_{st} \Pi_{\Sigma \text{ртсц}(al)}^* \end{aligned} \quad (3.94)$$

де $\Pi_{\Sigma \text{ртсц}(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 3.3, а),

$$\begin{aligned} \Pi_{3\text{ртсу}(al)}^* = 2,394K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{1}{K_{3\text{с}}K_{3\text{о}}\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}-1)}} \right)^3 \left[K_{3\text{с}}(a_{\text{м}}-1)\lambda_{\text{в}}(a_{\text{м}}+0,5) + \right. \\ \left. + 0,75K_{3\text{о}}K_{\text{рсu}(al)}(\lambda_{\text{в}}+2a_{\text{м}}-0,953) \right]. \end{aligned} \quad (3.95)$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3\text{ртсу}(al)}^*$ показника втрат активної потужності (3.95) ЦФ (3.94) варіантів радіальної ЕМС (рис. 3.3, а) з мідними і алюмінієвими провідниками обмоток при трьох значеннях $K_{3\text{о}}$ і співвідношеннях (2.38), (2.39) наведені в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів однофазної радіальної тристрижневої електромагнітної системи з прямокутними перерізами стрижнів, що відрізняються мідними і алюмінієвими провідниками

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик електротехнічних матеріалів		
	$\Pi_{3\text{ртсу}(al)e}^*$		
	3	8	24
0,3	41,15	70,50	137,33
0,25	42,96	72,82	140,38
0,15	49,02	80,56	150,57

Наведені в табл. 3.1 – табл. 3.4 та табл. 3.9 – табл. 3.12 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників і показників втрат активної потужності однофазної планарної стрижневої ЕМС з відповідно аналогічними показниками радіальної тристрижневої ЕМС, в прийнятих діапазонах змін $K_{3\text{о}}=0,3\dots0,15$, $C_{\text{cu}}/C_{\text{st}}=3'\dots4,7''$, $C_{\text{al}}/C_{\text{st}}=3,5'\dots5,5''$, $K_{\text{рсu}(st)}=3'\dots24''$:

$$(\Pi_{1\text{спсу}}^*/\Pi_{1\text{ртсу}}^*)=(17,84/17,58)\dots(22,04/21,79)=1,015\dots1,011;$$

$$(\Pi_{1\text{спal}}^*/\Pi_{1\text{ртal}}^*)=(10,65/10,56)\dots(13,76/13,68)=1,008\dots1,005;$$

$$(\Pi_{2\text{спсу}}^*/\Pi_{2\text{ртсу}}^*)'=(33,57/32,87)\dots(39,32/38,63)=1,021\dots1,018;$$

$$(\Pi_{2\text{спal}}^*/\Pi_{2\text{ртal}}^*)'=(17,04/16,81)\dots(21,14/20,92)=1,014\dots1,011;$$

$$(\Pi_{2\text{спсу}}^*/\Pi_{2\text{ртсу}}^*)''=(43,18/42,18)\dots(49,62/48,64)=1,023\dots1,02;$$

$$(\Pi_{2\text{спal}}^*/\Pi_{2\text{ртal}}^*)''=(10,65/10,56)\dots(13,76/13,68)=1,008\dots1,005;$$

$$(\Pi_{3\text{спсу}(al)}^*/\Pi_{3\text{ртсу}(al)}^*)'=(41,97/41,15)\dots(49,81/49,02)=1,019\dots1,016;$$

$$(\Pi_{3\text{спсу}(al)}^*/\Pi_{3\text{ртсу}(al)}^*)''=(141,29/137,34)\dots(154,54/150,57)=1,028\dots1,026.$$

3.7. Висновки до розділу 3

3.7.1. Екстремуми показників маси однофазної планарної стрижневої ЕМС з шихтованим магнітопроводом покращуються (знижуються) відносно планарного броньового аналога на (3,71-6,29)% при мідних обмотках і на (7,93-9,85)% при алюмінієвих обмотках.

3.7.2. Показники вартості планарної броньової ЕМС покращуються (знижуються) відносно стрижневого аналога при мідних провідниках на (2,55-1,1)%, а при алюмінієвих обмотках погіршуються на (3,17-5,81)%.

3.7.3. Екстремуми показників втрат активної потужності однофазної планарної броньової ЕМС при розрахунковій ідентичності коефіцієнтів додаткових втрат покращуються (знижуються) відносно стрижневого аналога (4,22-1,42)%.

3.7.4. Покращення, тобто зниження екстремумів показників маси і вартості однофазної радіальної тристрижневої ЕМС з шихтованим магнітопроводом становить відносно базового стрижневого аналога відповідно (1,46-1,98)% і (2,22-1,88)% при мідних обмотках та (0,84-0,53)% і (1,53-1,17)% при алюмінієвих обмотках.

3.7.5. Розрахункове значення, при умовній ідентичності коефіцієнтів додаткових втрат текстурованих магнітопроводів, екстремумів показників втрат активної потужності радіальної тристрижневої ЕМС відносно базового планарного аналога складає (2,41-2,11)%.

РОЗДІЛ 4

**ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ
СТРИЖНЕВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЗІ СХІДЧАСТИМИ
ВНУТРІШНІМИ ПОВЕРХНЯМИ ЯРЕМ ШИХТОВАНИХ
МАГНІТОПРОВОДІВ**

**4.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими
контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем**

Умовний об'єм, що створений переміщенням площин УК стрижнів, ярем і кутових зон, по їх структурним осям (рис. 1.1, в) вважається контурним об'ємом. Відношення до контурного об'єму реального магнітопроводу, який складений в межах УК з пакетів ЕТС різних розмірів, визначається контурним коефіцієнтом $K_{\text{кк(в)}}$ заповнення площі кругового (восьмигранного) УК площею східчастої фігури поперечного перерізу магнітопроводу (рис. 4.1, а – в).

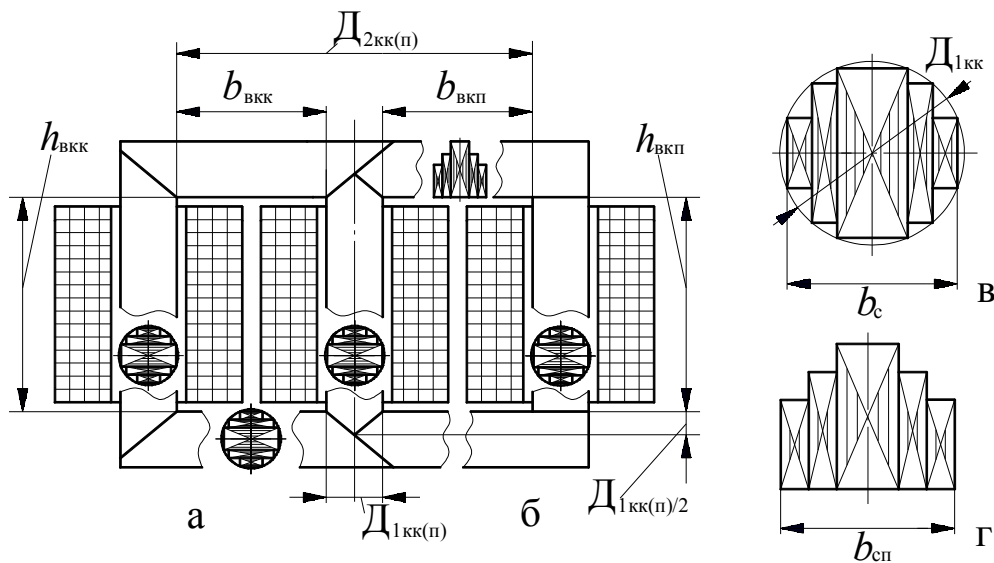


Рис. 4.1. Конструктивні схеми в повздовжніх перерізах (а, б) варіантів трифазної планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок та стрижнів, що відрізняються східчастими (а, в) та плоскими (б, г) внутрішніми поверхнями ярем магнітопроводу

Для варіантів ЕМС з круговими УК стрижнів і обмоткових котушок зі східчастими (що також мають кругові УК) поверхнями ярем (рис. 4.1, а, в),

діаметри розрахункових кіл $D_{1(2)ii}$ приймають позначення $D_{1(2)kk}$ і КЗ (2.21) і (2.22) визначаються співвідношеннями:

$$a_M = D_{1kk} / D_{2kk}, \quad (4.1)$$

$$\lambda_B = h_{Bkk} / b_{Bkk}. \quad (4.2)$$

В ЕМС (рис. 4.1, а, в) ширина обмоткового вікна b_{Bkk} магнітопроводу визначається, з урахуванням (4.1), виразом

$$b_{Bkk} = (D_{2kk} - D_{1kk}) / 2 = D_{1kk} (a_M - 1) / 2. \quad (4.3)$$

Контурний об'єм магнітопроводу ЕМС (рис. 2.3, а, 4.2, а) визначається з використанням (4.2), (4.3)

$$V_{kk} = 3h_{Bkk} S_{kk} + (4b_{Bkk} + 6D_{1kk}) S_{kk} + \Delta V_{ск}, \quad (4.4)$$

де S_{kk} – площа кругового УК діаметру D_{1kk} ; $\Delta V_{ск}$ – об'єм, що обмежений ділянками УК середнього стрижня в зонах його з'єднання з круговими УК ярем,

$$S_{kk} = \pi D_{1kk}^2 / 4 = 0,785 D_{1kk}^2. \quad (4.5)$$

Об'єм $\Delta V_{ск}$ знаходиться на основі використання еквівалентного об'єму паралелепіпеду з прямокутною основою і площею S_{kk} (4.5) та більшим боком D_{1kk} .

$$\Delta V_{ск} = S_{епк} D_{1kk} - S_{kk} b_{епк}. \quad (4.6)$$

Площа $S_{епк}$ і менший бік $b_{епк}$ вказаної прямокутної основи визначаються співвідношеннями:

$$S_{епк} = b_{епк} D_{1kk} = \pi D_{1kk}^2 / 4; \quad (4.7)$$

$$b_{епк} = S_{епк} / D_{1kk} = \pi D_{1kk} / 4. \quad (4.8)$$

Об'єм $\Delta V_{ск}$ відповідає ділянкам стрижня на відрізках $D_{1kk}/2$ центральної вісі (рис. 4.1, а) і розраховується, з врахуванням (4.7), (4.8) співвідношенням

$$\begin{aligned} \Delta V_{ск} &= S_{епк} D_{1kk} - S_{kk} b_{епк} = \pi \frac{D_{1kk}^2}{4} D_{1kk} - \pi \frac{D_{1kk}^2}{4} \pi \frac{D_{1kk}}{4} = \\ &= \frac{\pi D_{1kk}^3}{4} - \frac{\pi^2 D_{1kk}^3}{16} = 0,168 D_{1kk}^3. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Площа ЕТС поперечного перерізу стрижня з круговим УК (рис. 4.1, а, в) визначається співвідношенням

$$\Pi_{сскк(п)} = \pi K_{зс} K_{kk} D_{1kk(п)}^2 / 4. \quad (4.10)$$

Таким чином об'єм $V_{\text{КК}}$ магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 4.1, а, в) визначається з використанням (4.2), (4.3) (4.5), (4.9) та (4.10), виразом

$$V_{\text{КК}} = 3\left(D_{1\text{КК}}(a_{\text{М}} - 1)/2\right)\lambda_{\text{В}}\pi\left(D_{1\text{КК}}^2/4\right) + \left[4\left(D_{1\text{КК}}(a_{\text{М}} - 1)/2\right) + 6D_{1\text{КК}}\right]\pi\left(D_{1\text{КК}}^2/4\right) + 0,168D_{1\text{КК}}^3 = 0,785\left[(a_{\text{М}} - 1)(2 + 1,5\lambda_{\text{В}}) + 6,215\right]. \quad (4.11)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 4.1, а, в) визначається як підсумок мас, що обмежені об'ємами стрижнів, ярем та об'ємом ділянки центрального стрижня, що з'єднується із ярмом, з використанням (4.1), (4.2) та (4.4), (4.9) (4.11), рівнянням

$$m_{\text{МКК}} = \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} V_{\text{КК}} = \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} \left[\frac{\pi D_{1\text{КК}}^2}{4} (3h_{\text{ВКК}} + 4b_{\text{ВКК}} + 6D_{1\text{КК}}) + 0,168 \times \right. \\ \left. \times D_{1\text{КК}}^3 \right] = \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} \left[\frac{\pi D_{1\text{КК}}^2}{4} \left(3D_{1\text{КК}} \frac{(a_{\text{М}} - 1)}{2} \lambda_{\text{В}} + 4D_{1\text{КК}} \frac{(a_{\text{М}} - 1)}{2} + 6D_{1\text{КК}} \right) + 0,168 D_{1\text{КК}}^3 \right] = \\ = 0,785 \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} D_{1\text{КК}}^3 \left[(a_{\text{М}} - 1)(2 + 1,5\lambda_{\text{В}}) + 6,215 \right]. \quad (4.12)$$

На основі базового рівняння (2.29), а також (4.2) і (4.3) отримується залежність між геометричними параметрами планарного магнітопроводу $\Pi_{\text{ССКК}}$ та $b_{\text{ВКК}}$

$$\Pi_{\text{ССКК}} = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{30} S_{\text{ВК}}) = \Pi_{\text{ТТ}} / (K_{30} \lambda_{\text{В}} b_{\text{ВКК}}^2) = \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{30} \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^2 \left((a_{\text{М}} - 1)/2 \right)^2 \right] = \\ = 4 \Pi_{\text{ТТ}} / \left[K_{30} \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^2 (a_{\text{М}} - 1)^2 \right], \quad (4.13)$$

де $S_{\text{ВК}}$ – площа обмоткового вікна ЕМС (рис. 4.1, а), що визначається з врахуванням (4.2), (4.3),

$$S_{\text{ВК}} = h_{\text{ВКК}} b_{\text{ВКК}} = \lambda_{\text{В}} b_{\text{ВКК}}^2.$$

З рівності лівих частин (4.10) і (4.13) випливає

$$\frac{\pi K_{3c} K_{\text{КК}} D_{1\text{КК}}^2}{4} = \frac{4 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{30} \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^2 (a_{\text{М}} - 1)^2}. \quad (4.14)$$

З рівняння (4.14) визначається вираз внутрішнього розрахункового діаметру $D_{1\text{КК}}$ магнітопроводу стрижневої ЕМС з круговими УК стрижнів та ярем (рис. 4.1)

$$D_{1KK} = \sqrt[4]{\frac{5,093\Pi_{TT}}{K_{3C}K_{KK}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}}. \quad (4.15)$$

Середня довжина витка розрахункової еквівалентної обмотки з круговими УК обмоткових катушок залежить від ширини обмоткового вікна $b_{ВКК}$ (4.3) (рис. 4.1, а)

$$l_{ОКК} = 2\pi \left(\frac{D_{1KK}}{2} + \frac{b_{ВКК}}{4} \right) = \pi D_{1KK} \left(1 + \frac{a_M - 1}{4} \right). \quad (4.16)$$

Маса АМО варіантів ЕМС схеми (рис. 4.1, а, в), що відрізняються мідними та алюмінієвими обмоткам, визначається, виходячи з (2.31), та (4.3), (4.16) рівнянням

$$\begin{aligned} m''_{ОККcu(al)} &= 1,5\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B l_{ОКК} b_{ВКК}^2 = 1,5\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B \pi D_{1KK} \times \\ &\times \left(1 + \frac{(a_M - 1)}{4} \right) D_{1KK}^2 \left(\frac{(a_M - 1)}{2} \right)^2 = 1,178\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B D_{1KK}^3 (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [1 + (a_M - 1)/4]. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Після підстановки (4.15) в (4.12) та (4.17), рівняння маси ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 4.1, а) і маси АМО варіантів ЕМС схеми (рис. 4.1, а, в) перетворюються:

$$\begin{aligned} m_{МКК} &= \gamma_{st} K_{3C} K_{KK} V_{KK} = 0,785\gamma_{st} K_{3C} K_{KK} D_{1KK}^3 [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] = \\ &= 0,785\gamma_{st} K_{3C} K_{KK} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093\Pi_{TT}}{K_{3C}K_{KK}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] = \\ &= \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{МКК}^*; \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} m''_{ОККcu(al)} &= 1,5\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B l_{ВКК} b_{ВКК}^2 = 1,178\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B D_{1KK}^3 (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4] = \\ &= 1,178\gamma_{cu(al)} K_{30}\lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,093\Pi_{TT}}{K_{3C}K_{KK}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4] = \\ &= \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{ОККcu(al)}^*, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де $\Pi_{\text{МКК}}^*$ та $\Pi_{\text{ОККCu(al)}}^*$ – відносні показники мас магнітопроводу (рис. 4.1, а, в) та провідникового матеріалу обмотки варіантів ЕМС схем (рис. 4.1, а,) і (рис. 4.1, б, г) з мідними та алюмінієвими провідниками,

$$\Pi_{\text{МКК}}^* = 0,785 K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 \gamma_{\text{Cu(al)}} \times \\ \times [(a_{\text{М}} - 1)(2 + 1,5\lambda_{\text{В}}) + 6,215]; \quad (4.20)$$

$$\Pi_{\text{ОККCu(al)}}^* = 1,178 K_{30} \lambda_{\text{В}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 (a_{\text{М}} - 1)^2 \left[1 + \frac{(a_{\text{М}} - 1)}{4} \right]. \quad (4.21)$$

Маса $m''_{\text{акКCu(al)}}$ та вартість $C''_{\text{акКCu(al)}}$ активних матеріалів ЕМС схеми (рис. 4.1, а, в) визначаються, у відповідності з (2.27) і (2.28) та на основі (4.18)-(4.21), рівняннями [37]:

$$m''_{\text{акКCu(al)}} = m_{\text{МКК}} + m''_{\text{ОККCu(al)}} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МКК}}^* + \gamma_{\text{Cu(al)}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОККCu(al)}}^* = \\ = \gamma_{st} 0,785 K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 [(a_{\text{М}} - 1)(2 + 1,5\lambda_{\text{В}}) + 6,215] + \\ + \gamma_{\text{Cu(al)}} 1,178 K_{30} \lambda_{\text{В}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 (a_{\text{М}} - 1)^2 [1 + (a_{\text{М}} - 1)/4] = \\ = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{1\text{ККCu(al)}}^*; \quad (4.22)$$

$$C''_{\text{акКCu(al)}} = C_{\text{МКК}} + C''_{\text{ОККCu(al)}} = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МККCu(al)}}^* + C_{\text{Cu(al)}} \gamma_{\text{Cu(al)}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \times \\ \times \Pi_{\text{ОККCu(al)}}^* = C_{st} \gamma_{st} 0,785 K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 [(a_{\text{М}} - 1)(2 + 1,5\lambda_{\text{В}}) + \\ + 6,215] + C_{\text{Cu(al)}} \gamma_{\text{Cu(al)}} 1,178 K_{30} \lambda_{\text{В}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2}} \right)^3 (a_{\text{М}} - 1)^2 \times \\ \times [1 + (a_{\text{М}} - 1)/4] = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{2\text{ККCu(al)}}^*, \quad (4.23)$$

де $\Pi_{1\text{KKCu}(al)}^*$ і $\Pi_{2\text{KKCu}(al)}^*$ – відносні показники маси та вартості активних матеріалів трифазної планарної ЕМС з круговими УК стрижнів, обмоткових котушок і ярем магнітопроводу (рис. 4.1, а, в),

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{KKCu}(al)}^* &= \Pi_{\text{MKKu}(al)}^* + \gamma_{cu(al)} \Pi_{\text{OKKu}(al)}^* / \gamma_{st} = \\
&= 0,785 K_{3c} K_{\text{KK}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] + \\
&+ 1,178 K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4] (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) = \\
&= 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{KK}} [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] + \right. \\
&\quad \left. + 1,178 K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \quad (4.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi_{2\text{KKCu}(al)}^* &= \Pi_{\text{MKKu}(al)}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \Pi_{\text{OKKu}(al)}^* / (C_{st} \gamma_{st}) = \\
&= 0,785 K_{3c} K_{\text{KK}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] + \\
&+ C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) 1,178 K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times \\
&\times [1 + (a_M - 1)/4] = 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{\text{KK}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{KK}} [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + \right. \\
&\quad \left. + 6,215] + 1,178 C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4] / (C_{st} \gamma_{st}) \right]. \quad (4.25)
\end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)\text{KKCu}(al)}^*$ показників (4.24) і (4.25) ЦФ (4.22), (4.23), що отримані при трьох величинах K_{30} та K_{KK} і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)} / C_{st}$, представлені в табл. 4.1. і табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів, ярем і котушок мідної та алюмінієвої обмоток

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремумів показника маси ЕМС, б.о.
			a_{Me}	λ_{Be}	
$\Pi_{1ккcu}^*$ (рис. 4.1, а, в)	0,3	0,851	3,41	3,47	29,06
		0,861	3,42	3,47	28,99
		0,931	3,51	3,45	28,51
	0,25	0,851	3,63	3,43	30,64
		0,861	3,64	3,43	30,57
		0,931	3,75	3,41	30,09
	0,15	0,851	4,36	3,33	35,89
		0,861	4,38	3,33	35,82
		0,931	4,51	3,31	35,34
$\Pi_{1ккаl}^*$ (рис. 4.1, а, в)	0,3	0,851	5,28	3,23	17,34
		0,861	5,31	3,23	17,31
		0,931	5,47	3,21	17,11
	0,25	0,851	5,67	3,19	18,49
		0,861	5,69	3,19	18,47
		0,931	5,88	3,18	18,27
	0,15	0,851	6,97	3,11	22,37
		0,861	7,01	3,11	22,34
		0,931	7,23	3,09	22,14

Таблиця 4.2 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів, ярем і котушок мідної обмотки

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткової міді і електротехнічної				
			3,5	4	4,5	5	5,5
1	2	3	4	5	6	7	8
$\Pi_{2ккcu}^*$ (рис. 4.1, а, в)	0,3	0,851	54,62	58,75	62,71	66,51	70,19
		0,861	54,44	58,55	62,48	66,27	69,93
		0,931	53,22	57,21	61,02	64,69	68,23

1	2	3	4	5	6	7	8
	0,25	0,851	56,79	61,00	65,02	68,89	72,63
		0,861	56,61	60,79	64,79	68,65	72,37
		0,931	55,39	59,45	63,33	67,06	70,67
	0,15	0,851	64,03	68,49	72,74	76,82	80,75
		0,861	63,85	68,28	72,51	76,58	80,49
		0,931	62,63	66,94	71,05	74,99	78,78

Таблиця 4.3 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів, ярем і котушок алюмінієвої обмотки

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткового алюмінію і				
			3	3,4	3,8	4,2	4,7
П* _{2ккал} (рис. 4.1, а, в)	0,3	0,851	27,76	29,42	31,01	32,52	34,34
		0,861	27,69	29,35	30,92	32,43	34,24
		0,931	27,25	28,86	30,39	31,86	33,62
	0,25	0,851	29,30	31,01	32,64	34,19	36,06
		0,861	29,23	30,94	32,56	34,12	35,97
		0,931	28,79	30,45	32,03	33,54	35,35
	0,15	0,851	34,42	36,31	38,08	39,78	41,81
		0,861	34,36	36,22	37,99	39,69	41,71
		0,931	33,91	35,73	37,46	39,12	41,09

4.2. Показники втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем

Значення контурних об'ємів стрижнів $V_{ск}$, і ярем $V_{як}$ планарного магнітопроводу з круговими УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, а, в) визначаються наступними виразами:

$$V_{ск} = 3h_{вкк} S_{кк}; \quad (4.26)$$

$$V_{як} = (4b_{вкк} + 6D_{1кк}) S_{кк} + \Delta V_{ск}. \quad (4.27)$$

Підстановкою (4.3), (4.4) та з урахуванням (4.2), (4.5), (4.6) вирази (4.26), (4.27) перетворюються:

$$V_{ск} = 3h_{вкк} S_{кк} = 3b_{вкк} \lambda_{в} S_{кк} = 3D_{1кк} \left(\frac{a_{м} - 1}{2} \right) \lambda_{в} \frac{\pi D_{1кк}}{4} = D_{1кк}^3 \left[3 \left(\frac{a_{м} - 1}{2} \right) \lambda_{в} \frac{\pi}{4} \right]; \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned}
V_{\text{як}} &= \left[4b_{\text{ВКК}} + 6D_{1\text{КК}} \right] S_{\text{КК}} + \Delta V_{\text{СК}} = \left[4D_{1\text{КК}} \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6D_{1\text{КК}} \right] \frac{\pi D_{1\text{КК}}^2}{4} + 0,168 D_{1\text{КК}}^3 = \\
&= D_{1\text{КК}}^3 \left[4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right] \frac{\pi}{4} + 0,168. \quad (4.29)
\end{aligned}$$

Рівняння втрат неробочого руху ЕМС з круговими УК стрижнів та ярем з врахуванням (4.28), (4.29) приймає вид

$$\begin{aligned}
P_{\text{НКК}} &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{ДН}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} (V_{\text{СК}} + V_{\text{як}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{ДН}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} \left[D_{1\text{КК}}^3 \left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \right. \\
&+ D_{1\text{КК}}^3 \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + 6 \left. \right] \frac{\pi}{4} + 0,168 = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{ДН}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} D_{1\text{КК}}^3 \times \\
&\times \left[\left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right) \frac{\pi}{4} + 0,168 \right]. \quad (4.30)
\end{aligned}$$

Рівняння (2.37) втрат короткого замикання ЕМС (рис. 4.1, а, в) при підстановці (4.2), (4.3) і (4.16) перетворюється до виду

$$\begin{aligned}
P''_{\text{КККсу}(al)} &= 1,5 K_{\text{ДК}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_o^2 \lambda_{\text{В}} b_{\text{ВКК}}^2 l_{\text{ОК}} = 1,5 K_{\text{ДК}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_o^2 \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^2 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right)^2 \times \\
&\times \pi D_{1\text{КК}} \left(1 + \frac{a_{\text{М}} - 1}{4} \right) = 1,178 K_{\text{ДК}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_o^2 \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^3 (a_{\text{М}} - 1)^2 \left(1 + \frac{a_{\text{М}} - 1}{4} \right). \quad (4.31)
\end{aligned}$$

Загальні втрати ЕМС з круговими УК стрижнів та ярем (рис. 4.1, а, в) визначаються на основі (2.35), (4.30) і (4.31), виразом [38]

$$\begin{aligned}
P''_{\Sigma \text{КККсу}(al)} &= P_{\text{НКК}} + P''_{\text{КККсу}(al)} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{ДН}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} D_{1\text{КК}}^3 \times \\
&\times \left[\left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right) \frac{\pi}{4} + 0,168 \right] + 1,178 K_{\text{ДК}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{ЗО}} K_{\text{ПО}} J_o^2 \lambda_{\text{В}} D_{1\text{КК}}^3 \times \\
&\times (a_{\text{М}} - 1)^2 \left(1 + \frac{a_{\text{М}} - 1}{4} \right) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{ДН}} K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} D_{1\text{КК}}^3 \left[\left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right) \right] \times \\
&\times \frac{\pi}{4} + 0,168 \left. \right] + 1,178 K_{\text{ДК}} \gamma_{cu(al)} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \left(1 + \frac{a_{\text{М}} - 1}{4} \right). \quad (4.32)
\end{aligned}$$

При підстановці (4.15) загальні втрати (4.32) планарної ЕМС з круговими УК стрижнів та ярем визначаються [38]

$$\begin{aligned}
P_{\Sigma \text{KKCu}(al)}'' &= \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{5,093 \Pi_{\text{TT}} / \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \right]} \right)^3 \times \\
&\times \left[\left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} \left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + K_{\text{ЗС}} \left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) \right] + 1,178 K_{\text{PCu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \times \right. \\
&\quad \left. \times [1 + (a_{\text{М}} - 1)/4] \right] = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{\text{ЗККCu}(al)}^*, \quad (4.33)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{\text{ЗККCu}(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 4.1, а, в),

$$\begin{aligned}
\Pi_{\text{ЗККCu}(al)}^* &= K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{5,093 \Pi_{\text{TT}} / \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 \right]} \right)^3 \left[\left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{КК}} \left(3 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{В}} \frac{\pi}{4} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_{\text{М}} - 1}{2} \right) + 6 \right) + 0,168 \right] + 1,178 K_{\text{PCu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 1)^2 [1 + (a_{\text{М}} - 1)/4] \right]. \quad (4.34)
\end{aligned}$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{\text{ЗККCu}(al)e}^*$ показника втрат активної потужності (4.34) ЦФ (4.33) варіантів ЕМС (рис. 4.1, а, в) з мідними і алюмінієвими обмотками при трьох значеннях $K_{\text{ЗО}}$ та $K_{\text{КК}}$ і співвідношеннях (2.38), (2.39) наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів і котушок мідної та алюмінієвої обмоток, що відрізняються східчастими внутрішніми поверхнями ярем

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів (електротехнічна сталь, мідь, алюміній) і електромагнітних навантажень		
		$\Pi_{\text{ЗККCu}(al)e}^*$		
		3	8	24
1	2	3	4	5
0,3	0,851	68,31	117,39	229,08
	0,861	68,09	116,94	228,06
	0,931	66,67	113,99	221,34
0,25	0,851	71,27	121,20	234,12
	0,861	71,05	120,75	233,09
	0,931	69,63	117,79	226,37

1	2	3	4	5
0,15	0,851	81,13	133,87	250,91
	0,861	80,91	133,42	249,88
	0,931	79,49	130,46	243,15

Наведені в табл. 2.2 – табл. 2.5 і табл. 4.1 – табл. 4.4 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з круговими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має прямокутні УК активних елементів в прийнятих діапазонах змін $K_{30}=0,3\dots 0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3'\dots 4,7''$, $C_{al}/C_{st}=3,5'\dots 5,5''$, $K_{кк}=0,931$, $K_{pcu(st)}=3'\dots 24''$:

$$(\Pi^*_{1ккcu}/\Pi^*_{1ппcu})=(28,51/27,8)\dots(35,34/34,5)=1,025\dots 1,024;$$

$$(\Pi^*_{1ккал}/\Pi^*_{1ппал})=(17,11/16,8)\dots(22,14/21,8)=1,018\dots 1,015;$$

$$(\Pi^*_{2ккcu}/\Pi^*_{2ппcu})'=(53,22/51,7)\dots(62,63/60,9)=1,029\dots 1,028;$$

$$(\Pi^*_{2ккал}/\Pi^*_{2ппал})'=(27,25/26,6)\dots(33,91/33,2)=1,024\dots 1,021;$$

$$(\Pi^*_{2ккcu}/\Pi^*_{2ппcu})''=(68,23/66,2)\dots(78,78/76,5)=1,030\dots 1,029;$$

$$(\Pi^*_{2ккал}/\Pi^*_{2ппал})''=(33,62/32,8)\dots(41,09/40,1)=1,025\dots 1,024;$$

$$(\Pi^*_{3ккcu(al)}/\Pi^*_{3ппcu(al)})'=(66,67/64,89)\dots(79,49/77,51)=1,027\dots 1,025;$$

$$(\Pi^*_{3ккcu(al)}/\Pi^*_{3ппcu(al)})''=(221,34/215,09)\dots(243,156/236,31)=1,029\dots 1,028.$$

4.3. Масовартісні показники системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем

Розробка ММ ЕМС з восьмигранними УК стрижнів і обмоткових котушок [37, 48] здійснюється при використанні відносних КЗ (2.21), (2.22), що визначаються співвідношеннями геометричних параметрів магнітопроводу (рис. 4.2, а):

$$a_M = D_{1ВВ(\Pi)} / D_{2ВВ(\Pi)}; \quad (4.35)$$

$$\lambda_B = h_{ВВ(\Pi)} / b_{ВВ(\Pi)}, \quad (4.36)$$

де $D_{1ВВ(\Pi)}$ і $D_{2ВВ(\Pi)}$, $h_{ВВ(\Pi)}$ і $b_{ВВ(\Pi)}$ – внутрішній і зовнішній розрахункові діаметри та висота і ширина обмоткового вікна.

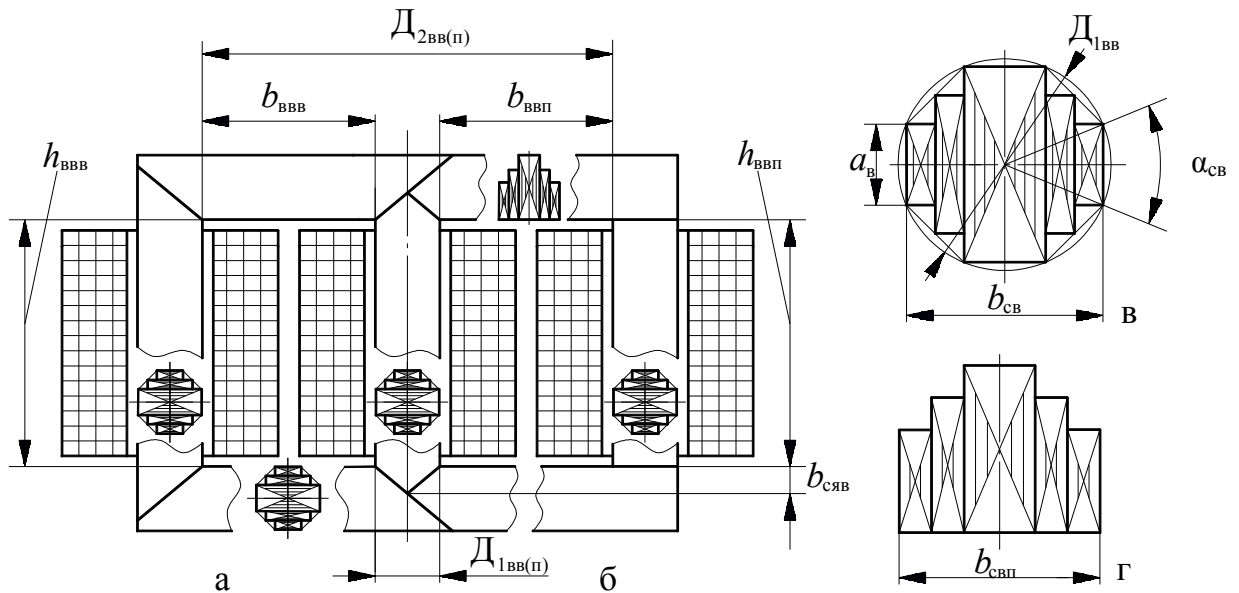


Рис. 4.2. Конструктивні схеми в повздовжніх перерізах (а, б) варіантів трифазної планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок та стрижнів стрижневого магнітопроводу, що відрізняються східчастими (в) та плоскими (г) внутрішніми поверхнями ярем

Визначення ширини обмоткового вікна $b_{BB(\Pi)}$ та площі ЕТС $\Pi_{ссВВ(\Pi)}$ в перерізі стрижня з восьмигранними УК магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2, а, б) здійснюється з використанням розрахункових діаметрів $D_{1(2)BB(\Pi)}$ та КЗ (4.35) і (4.36):

$$b_{BB(\Pi)} = (D_{2BB(\Pi)} - D_{1BB(\Pi)})/2 = D_{1BB(\Pi)} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right); \quad (4.37)$$

$$\Pi_{ссВВ(\Pi)} = K_{зс} 0,707 D_{1BB(\Pi)}^2. \quad (4.38)$$

Висота стрижня $h_{BB(\Pi)}$ згідно з рис. 4.2, а, б визначається з використанням (4.36) наступним виразом

$$h_{BB(\Pi)} = b_{BB(\Pi)} \lambda_B = \left(D_{1BB(\Pi)} \frac{(a_M - 0,924)}{2} \right) \lambda_B. \quad (4.39)$$

Контурний об'єм магнітопроводу ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та ярем (рис. 2.3, а, 4.2, а) визначається з використанням (4.35) – (4.39)

$$V_{BB} = 3h_{BB} \Pi_{ссВВ(\Pi)} + (4b_{BB} + 6D_{1BB}) \Pi_{ссВВ(\Pi)} + \Delta V_{сВ}, \quad (4.40)$$

де $\Delta V_{сВ}$ – об'єм, що обмежений ділянками УК стрижнів в зонах його з'єднання з поверхнями ярем, що мають восьмигранні УК (рис. 2.3, б, 4.2, в).

Об'єм ΔV_{CB} знаходиться на основі використання еквівалентного об'єму паралелепіпеда з прямокутною основою ширини восьмигранного стрижня b_{CB} та площею $\Pi_{CCBB(\Pi)}$

Площа $S_{\epsilon_{ПВ}}$ та менша сторона $b_{\epsilon_{ПВ}}$ такої прямокутної основи визначаються, з врахуванням (4.37) і (4.39), виразами та співвідношеннями:

$$S_{\epsilon_{ПВ}} = b_{\epsilon_{ПВ}} b_{CB}; \quad (4.41)$$

$$b_{\epsilon_{ПВ}} = \Pi_{CCBB(\Pi)} / b_{CB}; \quad (4.42)$$

$$b_{CB} = D_{1BB(\Pi)} \cos(\alpha_{CB}/2) = 0,924 D_{1BB(\Pi)}; \quad (4.43)$$

$$b_{\epsilon_{ПВ}} = 0,707 D_{1BB}^2 / 0,924 D_{1BB} = 0,764 D_{1BB}; \quad (4.44)$$

$$S_{\epsilon_{ПВ}} = \Pi_{CCBB(\Pi)} = 0,707 \sin(\alpha_{CB}/2) D_{1BB}^2 = 0,703 D_{1BB}^2, \quad (4.45)$$

де $\alpha_{CB} = 45^\circ$ – центральний кут грани восьмигранного рівнобічного стрижня (рис. 4.2, в).

Об'єм $\Delta V_{\text{СЯВ}}$ відповідає ділянкам стрижня на відрізках $b_{\text{СЯВ}}$ центральної вісі (рис. 4.2, а, б) та визначається, з врахуванням (4.38), (4.42) та (4.45)

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{СЯВ}} &= b_{\epsilon_{ПО}} b_{CB}^2 - \Pi_{CCBB(\Pi)} b_{\epsilon_{ПВ}} = 0,764 D_{1BB} \left(0,924 D_{1BB} \right)^2 - \\ &- 0,707 D_{1BB}^2 0,764 D_{1BB} = 0,113 D_{1BB}^3. \end{aligned} \quad (4.46)$$

Об'єм V_{BB} магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 4.2, а) визначається з використанням (4.35) – (4.40) та (4.46) виразом

$$\begin{aligned} V_{BB} &= \left[3 D_{1BB} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B 0,707 D_{1BB}^2 + \left(4 D_{1BB} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + \right. \right. \\ &+ \left. \left. 6 \cdot 0,924 D_{1BB} \right) 0,707 D_{1BB}^2 + 0,113 D_{1BB}^3 \right] = D_{1BB}^3 \left[(a_M - 0,924) \times \right. \\ &\left. \times (1,413 + 1,059 \lambda_B) + 4,028 \right]. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, а, б) визначається, з використанням (4.36) і (4.47)

$$m_{\text{МВВ}} = \gamma_{st} K_{3C} K_{KB} V_{BB} = \gamma_{st} K_{3C} K_{KB} \left[3 h_{BB} \Pi_{CCBB} + (4 b_{BB} + 6 b_{CB}) \Pi_{CCBB} + \Delta V_{\text{СЯВ}} \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \gamma_{st} K_{3c} K_{KB} \left[3D_{1BB} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B 0,707 D_{1BB}^2 + \left(4D_{1BB} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + \right. \right. \\
&+ \left. \left. 6 \cdot 0,924 D_{1BB} \right) 0,707 D_{1BB}^2 + 0,113 D_{1BB}^3 \right] = \gamma_{st} K_{3c} K_{KB} D_{1BB}^3 \left[(a_M - 0,924) \times \right. \\
&\quad \left. \times (1,413 + 1,059 \lambda_B) + 4,028 \right]. \tag{4.48}
\end{aligned}$$

Площа обмоткового вікна ЕМС з восьмигранними УК стрижнів

$$S_{OB(\Pi)} = h_{BB(\Pi)} b_{BB(\Pi)} = \lambda_B b_{BB(\Pi)}^2. \tag{4.49}$$

Використавши (2.9), (4.36) і (4.37), (4.49) можна отримати залежність між геометричними параметрами планарного магнітопроводу $\Pi_{CCBB(\Pi)}$ і $b_{BB(\Pi)}$ ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем

$$\begin{aligned}
\Pi_{CCBB(\Pi)} &= \Pi_{TT} / (K_{30} S_{OB(\Pi)}) = \Pi_{TT} / (K_{30} \lambda_B b_{BB}^2) = \\
&= 4 \Pi_{TT} / \left[K_{30} \lambda_B D_{1BB}^2 (a_M - 0,924)^2 \right], \tag{4.50}
\end{aligned}$$

де S_{OB} – площа обмоткового вікна ЕМС з восьмигранними УК стрижнів

$$S_{OB(\Pi)} = h_{BB(\Pi)} b_{BB(\Pi)} = \lambda_B b_{BB(\Pi)}^2.$$

З рівності лівих частин (4.38) і (4.50) впливає залежність $D_{1BB(\Pi)}$ від вихідних даних та геометричних КЗ:

$$K_{3c} K_{KB} 0,707 D_{1BB(\Pi)}^2 = 4 \Pi_{TT} / \left[K_{30} \lambda_B D_{1BB(\Pi)}^2 (a_M - 0,924)^2 \right];$$

$$D_{1BB(\Pi)} = \sqrt[4]{\frac{4 \Pi_{TT}}{0,707 K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} = \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}. \tag{4.51}$$

Після підстановки (4.51) в (4.48) рівняння маси магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2, а, в) приймає вид

$$\begin{aligned}
m_{MBB} &= \gamma_{st} K_{3c} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059 \lambda_B) + \right. \\
&\quad \left. + 4,028 \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{MBB}^*, \tag{4.52}
\end{aligned}$$

де Π_{MBB}^* – показник маси магнітопроводу з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, а),

$$\Pi_{\text{МВВ}}^* = K_{\text{ЗС}} K_{\text{КВ}} \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} K_{\text{КВ}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 0,924)^2}}^3 \left[(a_{\text{М}} - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_{\text{В}}) + 4,028 \right]. \quad (4.53)$$

Середня довжина витка котушки еквівалентної обмотки ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, а) визначається на основі (4.37), (4.38) та (4.43) рівнянням

$$l_{\text{ОВВ}(\Pi)} = 8a_{\text{В}} + \frac{\pi b_{\text{ВВ}(\Pi)}}{4} = 8 \cdot 0,383 D_{\text{1ВВ}(\Pi)} + \frac{\pi D_{\text{1ВВ}(\Pi)} (a_{\text{М}} - 0,924)/2}{4} = 3,062 \left[1 + 0,256(a_{\text{М}} - 0,924) \right] D_{\text{1ВВ}(\Pi)}, \quad (4.54)$$

де $a_{\text{В}}$ – ширина грані восьмигранного УК стрижня, що визначається через діаметр описаної окружності $D_{\text{1ВВ}(\Pi)}$ (рис. 4.2, а, б) співвідношенням

$$a_{\text{В}} = D_{\text{1ВВ}(\Pi)} \sin(\alpha_{\text{СВ}} / 2) = 0,383 D_{\text{1ВВ}(\Pi)}. \quad (4.55)$$

На основі (4.37) і (4.54) загальне рівняння маси провідникового матеріалу обмоткових котушок (2.10) ЕМС (рис. 4.2, а, б) з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем магнітопроводу приймає вид

$$m''_{\text{ОВВсu}(al)} = 1,5\gamma_{\text{cu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} l_{\text{ОВА}(\Pi)} b_{\text{ВВ}(\Pi)}^2 = 1,5\gamma_{\text{cu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} 3,062 \times \left[1 + 0,256(a_{\text{М}} - 0,924) \right] D_{\text{1ВВ}(\Pi)}^3 = 1,148\gamma_{\text{cu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} D_{\text{1ВВ}(\Pi)}^3 (a_{\text{М}} - 0,924)^2 \times \left[1 + 0,256(a_{\text{М}} - 0,924) \right]. \quad (4.56)$$

Підстановкою (4.51) рівняння (4.56) маси АМО ЕМС з восьмигранними УК стрижнів перетворюється до виду

$$m''_{\text{ОВВсu}(al)} = 1,1481\gamma_{\text{cu}(al)} K_{\text{ЗО}} \lambda_{\text{В}} \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{ЗС}} K_{\text{ЗО}} K_{\text{КВ}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 0,924)^2}}^3 \times (a_{\text{М}} - 0,924)^2 \left[1 + 0,256(a_{\text{М}} - 0,924) \right] = \gamma_{\text{cu}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОВВсu}(al)}^*, \quad (4.57)$$

де $\Pi_{\text{ОВВсu}(al)}^*$ – показник маси провідникового матеріалу обмоткових котушок ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{OBVCu}(al)}^* &= 1,1481 K_{30} \lambda_B \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \times \\ &\times (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,2565(a_M - 0,924)]. \end{aligned} \quad (4.58)$$

Маса $m''_{\text{abvcu}(al)}$ і вартість $C''_{\text{abvcu}(al)}$ активних матеріалів ЕМС (рис. 4.2, а) визначаються на основі (4.52), (4.53) і (4.57), (4.58) наступними рівняннями [37]:

$$\begin{aligned} m''_{\text{abvcu}(al)} &= m_{\text{MBVCu}(al)} + m''_{\text{OBVCu}(al)} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{MBB}}^* + \\ &+ \gamma_{cu}(al) \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{OBVCu}(al)}^* = \gamma_{st} K_{3C} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \times \\ &\times [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + 4,028] + 1,1481 \gamma_{cu}(al) K_{30} \lambda_B \times \\ &\times \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \times (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \\ &= \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \left[K_{3C} K_{KB} [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + \right. \\ &\left. + 4,028] + \frac{\gamma_{cu}(al) \lambda_B K_{30}}{\gamma_{st}} 1,148 K_{30} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \right] = \\ &= \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{BVCu}(al)}^*; \end{aligned} \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} C''_{\text{abvcu}(al)} &= C_{\text{MBB}} + C''_{\text{OBVCu}(al)} = \gamma_{st} C_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{MBB}}^* + \\ &+ \gamma_{cu}(al) C_{cu}(al) \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{OBVCu}(al)}^* = C_{st} \gamma_{st} K_{3C} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \times \\ &\times [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + 4,028] + 1,1481 C_{cu}(al) \gamma_{cu}(al) K_{30} \lambda_B \times \\ &\times \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \left[K_{3c} K_{KB} [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + \right. \\
&+ 4,028] + \frac{C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \lambda_B K_{30}}{C_{st} \gamma_{st}} 1,148 K_{30} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \left. \right] = \\
&= \gamma_{st} C_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{2BVCu(al)}^*, \quad (4.60)
\end{aligned}$$

де показники маси і вартості ЕМС (рис. 4.2, а, б) представлені функціональними залежностями:

$$\begin{aligned}
\Pi_{1BVCu(al)}^* &= \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \left[K_{3c} K_{KB} [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + \right. \\
&+ 4,028] + \frac{\gamma_{cu(al)} \lambda_B K_{30}}{\gamma_{st}} 1,148 K_{30} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \left. \right]; \quad (4.61)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi_{2BVCu(al)}^* &= \sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}}^3 \left[K_{3c} K_{KB} [(a_M - 0,924)(1,413 + 1,059\lambda_B) + \right. \\
&+ 4,028] + \frac{C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)}}{\gamma_{st} C_{st}} 1,148 K_{30} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \left. \right]. \quad (4.62)
\end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)BVCu(al)e}^*$ показників (4.61) і (4.62) ЦФ (4.59), (4.60), що отримані для трьох значень K_{30} та K_{KB} і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, наведені в табл. 4.5. та табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Екстремуми показників маси та керованих змінних планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, ярем і котушок мідної та алюмінієвої обмоток

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремумів показника маси ЕМС, б.о.
			a_{Me}	λ_{Be}	
1	2	3	4	5	6
Π_{1BVCu}^* (рис. 4.2, а, в)	0,3	0,9	3,25	3,39	28,80
		0,931	3,29	3,38	28,59
		1	3,37	3,37	28,17

1	2	3	4	5	6
	0,25	0,9	3,47	3,35	30,37
		0,931	3,51	3,34	30,16
		1	3,60	3,33	29,74
	0,15	0,9	4,18	3,26	35,61
		0,931	4,23	3,25	35,40
		1	4,35	3,24	34,98
$\Pi_{2ВВal}^*$ (рис. 4.2, а, в)	0,3	0,9	5,07	3,17	17,22
		0,931	5,14	3,16	17,13
		1	5,29	3,15	16,96
	0,25	0,9	5,45	3,14	18,37
		0,931	5,53	3,13	18,29
		1	5,69	3,12	18,11
	0,15	0,9	6,72	3,06	22,24
		0,931	6,81	3,06	22,16
		1	7,02	3,05	21,98

Таблиця 4.6 – Екстремуми показників вартості планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, ярем і катушок мідної обмотки

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткової міді (алюмінію) і електротехнічної сталі, в.о.				
			3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2ВВси}^*$ (рис. 4.2, а, в)	0,3	0,9	54,02	58,09	61,98	65,74	69,37
		0,931	53,49	57,51	61,35	65,05	68,63
		1	52,41	56,31	60,05	63,64	67,12
	0,25	0,9	56,18	60,33	64,29	68,11	71,80
		0,931	55,66	59,75	63,66	67,43	71,06
		1	54,57	58,55	62,35	66,01	69,54
	0,15	0,9	63,39	67,79	71,99	76,01	79,89
		0,931	62,87	67,21	71,35	75,33	79,16
		1	61,78	66,01	70,04	73,91	77,64

Таблиця 4.7 – Екстремуми показників вартості планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, ярем і котушок алюмінієвої обмотки

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
			3	3,4	3,8	4,2	4,7
П* _{2ВВал} (рис. 4.2, а, в)	0,3	0,9	27,52	29,16	30,72	32,22	34,01
		0,931	27,33	28,95	30,49	31,97	33,74
		1	26,93	28,51	30,02	31,46	33,19
	0,25	0,9	29,05	30,74	32,35	33,89	35,73
		0,931	28,86	30,53	32,12	33,64	35,46
		1	28,46	30,09	31,65	33,13	34,91
	0,15	0,9	34,16	36,01	37,78	39,46	41,46
		0,931	33,97	35,81	37,54	39,21	41,19
		1	33,57	35,37	37,07	38,69	40,63

4.4. Показники втрат активної потужності системи з восьмигранними утворюючим контурами обмоткових котушок, стрижнів і ярем

Контурні об'єми стрижнів V_{cb} і ярем V_{yb} планарного магнітопроводу з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, а) визначаються наступними виразами:

$$V_{cb(\Pi)} = 3h_{bb(\Pi)}\Pi_{ccbb(\Pi)}; \quad (4.63)$$

$$V_{yb} = (4b_{bb} + 6b_{cb})\Pi_{ccbb(\Pi)} + \Delta V_{cb}. \quad (4.64)$$

На основі (4.36) – (4.39) та при урахуванні (4.46) вирази (4.63) і (4.64) перетворюються:

$$V_{cb(\Pi)} = 3D_{1bb(\Pi)} \frac{(a_M - 0,924)}{2} \lambda_B 0,707 D_{1bb(\Pi)}^2 = D_{1bb(\Pi)}^3 \left[\frac{(a_M - 0,924)}{2} \lambda_B 2,121 \right]; \quad (4.65)$$

$$\begin{aligned} V_{yb} &= \left(4D_{1bb} \frac{a_M - 0,924}{2} 0,707 D_{1bb}^2 + 6D_{1bb} 0,707 D_{1bb}^2 \right) + 0,113 D_{1bb}^3 = \\ &= D_{1bb}^3 \left[((a_M - 0,924) + 3) 1,414 + 0,113 \right]. \end{aligned} \quad (4.66)$$

Рівняння втрат неробочого руху ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем з врахуванням (4.65), (4.66) приймає вид

$$P_{\text{НВВ}} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} (V_{\text{св}} + V_{\text{яв}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} \left[D_{\text{ІВВ}}^3 \left[\frac{(a_{\text{м}} - 0,924)}{2} \lambda_{\text{в}} 2,121 \right] + D_{\text{ІВВ}}^3 \left[((a_{\text{м}} - 0,924) + 3) 1,414 + 0,113 \right] \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} D_{\text{ІВВ}}^3 \times \left[\left[\frac{(a_{\text{м}} - 0,924)}{2} \lambda_{\text{в}} 2,121 \right] + \left[((a_{\text{м}} - 0,924) + 3) 1,414 + 0,113 \right] \right]. \quad (4.67)$$

Рівняння (2.37) втрат короткого замикання ЕМС (рис. 4.2, а) при підстановці (4.36), (4.36) і (4.54) перетворюється до виду

$$P''_{\text{КВВсц}(al)} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{сц}(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} b_{\text{ВВ}}^2 l_{\text{ОВВ}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{\text{сц}(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} D_{\text{ІВВ}}^2 \times \left(\frac{(a_{\text{м}} - 0,924)}{2} \right)^2 3,062 D_{\text{ІВВ}} \left[1 + 0,256(a_{\text{м}} - 0,924) \right] = K_{\text{дк}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} \times 1,1481 \gamma_{\text{сц}(al)} D_{\text{ІВВ}}^3 (a_{\text{м}} - 0,924)^2 \left[1 + 0,2565(a_{\text{м}} - 0,924) \right]. \quad (4.68)$$

Загальні втрати ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, а) визначаються на основі (2.35), (4.67) і (4.68) рівнянням

$$P''_{\Sigma \text{ВВсц}(al)} = P_{\text{НВВ}} + P''_{\text{КВВ}} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} D_{\text{ІВВ}}^3 \left[\left(\frac{(a_{\text{м}} - 0,924)}{2} \lambda_{\text{в}} 2,121 \right) + \left[((a_{\text{м}} - 0,924) + 3) \times 1,414 + 0,113 \right] \right] + K_{\text{дк}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} K_{\text{уп}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} 1,148 \gamma_{\text{сц}(al)} D_{\text{ІВВ}}^3 \times (a_{\text{м}} - 0,924)^2 \times \left[1 + 0,256(a_{\text{м}} - 0,924) \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} D_{\text{ІВВ}}^3 \times \left[\left(\frac{(a_{\text{м}} - 0,924)}{2} \lambda_{\text{в}} 2,121 \right) \left[((a_{\text{м}} - 0,924) + 3) 1,414 + 0,113 \right] + K_{\text{дк}} K_{\text{зо}} K_{\text{рц}(al)} \lambda_{\text{в}} 1,148 \times (a_{\text{м}} - 0,924)^2 \times \left[1 + 0,256(a_{\text{м}} - 0,924) \right] \right]. \quad (4.69)$$

При підстановці (4.51) підсумкові втрати (4.69) планарної ЕМС (рис. 4.2, а) визначаються [38]

$$P''_{\Sigma \text{ВВсц}(al)} = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ГТ}}} \right)^3 K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} K_{\text{кв}} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} \left[(a_{\text{м}} - 0,924) \times \right. \right.$$

$$\times(1,413 + 1,059\lambda_B)4,028] + K_{30}K_{pcu(al)}\lambda_B 1,148 \times \\ \times(a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{TT}} \right)^3 \Pi_{3BVCu(al)}^* \quad (4.70)$$

де $\Pi_{3BVCu(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 4.2, а) з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та східчастими внутрішніми поверхнями ярем,

$$\Pi_{3BVCu(al)}^* = K_{дн} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c}K_{30}K_{KB}\lambda_B(a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3c}K_{KB} [(a_M - 0,924) \times \right. \\ \left. \times(1,413 + 1,059\lambda_B)4,028] + K_{30}K_{pcu(al)}\lambda_B 1,148 \times \right. \\ \left. \times(a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \right]. \quad (4.71)$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3BVCu(al)e}^*$ показника втрат активної потужності (4.71) ЦФ (4.70) варіантів ЕМС (рис. 4.2, а) з мідними і алюмінієвими обмотками при трьох значеннях K_{30} та $K_{кк}$ і співвідношеннях (2.38), (2.39) наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток, що відрізняється східчастими внутрішніми поверхнями ярем

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів (електротехнічна сталь, мідь, алюміній) і електромагнітних навантажень		
		$\Pi_{3BVCu(al)e}^*$		
		3	8	24
0,3	0,9	67,59	115,98	226,05
	0,931	66,97	114,70	223,13
	1	65,71	112,07	217,14
0,25	0,9	70,54	119,77	231,06
	0,931	69,92	118,49	228,14
	1	68,65	115,85	222,15
0,15	0,9	80,37	132,40	247,77
	0,931	79,75	131,12	244,85
	1	78,48	128,48	238,85

Наведені в табл. 4.1 – табл. 4.8 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з круговими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має восьмигранні УК вказаних активних елементів в прийнятих діапазонах змін $K_{30}=0,3\dots 0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3'\dots 4,7''$, $C_{al}/C_{st}=3,5'\dots 5,5''$, $K_{kk}=0,931$, $K_{pcu(st)}=3'\dots 24''$, $K_{KB(\Pi)}=1$:

$$(\Pi^*_{1kkcu}/\Pi^*_{1bbcu})=(28,51/28,17)\dots(35,34/34,98)=1,012\dots 1,010;$$

$$(\Pi^*_{1kcal}/\Pi^*_{1bbal})=(17,11/16,96)\dots(22,14/21,98)=1,008\dots 1,007;$$

$$(\Pi^*_{2kkcu}/\Pi^*_{2bbcu})'=(53,22/52,41)\dots(62,63/61,78)=1,015\dots 1,013;$$

$$(\Pi^*_{2kcal}/\Pi^*_{2bbal})'=(27,25/26,93)\dots(33,91/33,57)=1,011\dots 1,01;$$

$$(\Pi^*_{2kkcu}/\Pi^*_{2bbcu})''=(68,23/67,1)\dots(78,78/77,64)=1,016\dots 1,014;$$

$$(\Pi^*_{2kcal}/\Pi^*_{2bbal})''=(33,62/33,19)\dots(41,09/40,63)=1,012\dots 1,011;$$

$$(\Pi^*_{3kkcu(al)}/\Pi^*_{3bbcu(al)})'=(66,67/65,71)\dots(79,49/78,48)=1,014\dots 1,012;$$

$$(\Pi^*_{3kkcu(al)}/\Pi^*_{3bbcu(al)})''=(221,34/217,14)\dots(243,156/238,85)=1,019\dots 1,018.$$

4.5. Висновки по розділу 4

4.5.1. Трифазні планарні ЕМС ЕСП класу напруги 1-110 кВ з стрижневими магнітопроводами і круговими та прямокутними УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок відрізняються значеннями мінімальних показників маси і вартості відповідно на (4,34-3,87)% і (5,68-5,26)% при $K_{kk}=0,851$ та (2,49-2,38)% і (2,97-2,89)% при $K_{kk}=0,931$ в варіантах з мідними обмотками. Вказані показники при використанні в обмотках з круговими УК алюмінію погіршуються, як і при наявності мідних обмоток, відносно ЕМС з прямокутними УК на (3,11-2,55)%, (4,48-4,08)% при $K_{kk}=0,851$ та на (1,81-1,53)% і (2,44-2,41)% при $K_{kk}=0,931$.

4.5.2. Підвищення екстремумів показників втрат активної потужності ЕСП з кутовими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок відносно електромагнітно-еквівалентних аналогів з прямокутними УК при використанні в обмотках як міді, так і алюмінію, в проектному діапазоні змін величин і

співвідношень ЕМН та в діапазоні напруг, що характеризуються $K_{30}=0,3-0,15$, складають при $K_{кк}=0,851$ і $K_{кк}=0,931$ відповідно $(5,61-5,20)\%$ та $(2,79-2,72)\%$.

4.5.3. Заміна в трифазній планарній ЕМС структури (рис. 1.1, в) кругових УК обмоткових котушок, перерізів стрижнів і ярем з 3 і 4 сходинками (пакетами) ЕТС в половині кола ($K_{кк}=0,851$ і $K_{кк}=0,861$) на електромагнітно еквівалентні аналоги з восьмигранними УК і трьома і чотирма сходинками в половині рівнобічного восьмигранника ($K_{кв}=0,9$ і $K_{кв}=0,931$) призводить до покращення (зниження) екстремумів показників маси і вартості відповідно на $(0,88-0,76)\%$, $(1,17-1,03)\%$ та $(1,36-1,15)\%$, $(1,85-1,59)\%$ при мідних та на $(0,69-0,55)\%$, $(0,94-0,78)\%$ та $(1,01-0,81)\%$, $(1,39-1,18)\%$ при алюмінієвих обмотках, а також до зниження екстремумів показників втрат активної потужності на $(1,20-1,10)\%$ та $(1,92-1,73)\%$. Заміна у вказаній структурі ЕМС кругового УК із 16-ма сходинками в ($K_{кк}=0,931$) на контур рівнобічного восьмигранника з 4 сходинками ($K_{кв}=0,931$), призводить при суттєвому зниженні трудомісткості виготовлення магнітопроводу до зовсім незначного погіршення екстремумів показників маси і вартості відповідно на $(0,3-0,19)\%$ і $(0,59-0,48)\%$ при мідних та на $(0,14-0,09)\%$ і $(0,27-0,24)\%$ при алюмінієвих обмотках, а також до незначного погіршення екстремумів показників втрат активної потужності на $(0,81-0,69)\%$. При заміні в ЕМС кругових УК ($K_{кк}=0,931$) на восьмигранні ($K_{кв}\approx 1$) відбувається покращення (зниження) екстремумів показників маси і вартості на $(1,19-1,02)\%$ і $(1,59-1,42)\%$ при мідних та на $(0,87-0,7)\%$ і $(1,22-1,04)\%$ при алюмінієвих обмотках, а також покращення (зниження) екстремумів показника втрат активної потужності на $(1,68-1,52)\%$.

РОЗДІЛ 5

**ПОКАЗНИКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ВАРІАНТІВ ТРИФАЗНОЇ СТРИЖНЕВОЇ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З ПЛОСКИМИ ВНУТРІШНІМИ ПОВЕРХНЯМИ
ЯРЕМ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ**

**5.1. Масовартісні показники системи з круговими утворюючими
контурами обмоткових котушок і стрижнів**

Для розробки ММ ЕМС з круговими УК стрижнів і обмоткових котушок, що відрізняються плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, б, г), використовуються отримані вище вирази та рівняння (4.1 – 4.3), (4.12 – 4.19) та визначаються об'єми і маси варіантів магнітопроводу, які задовольняють обраним промисловим значенням $K_k=0,851$, $K_k=0,861$ і $K_k=0,931$ [45, 47].

Контурний об'єм магнітопроводу з круговими УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем ЕМС схеми (рис. 4.1, б, г), визначається рівнянням

$$V_{кпі} = V_{куі} + 4b_{вкп} S_{кк} + 3h_{вкп} S_{кк} + 2b_{сп} S_{кк}, \quad (5.1)$$

де $V_{куі}$ – об'єм кутових зон магнітопроводу, що залежить від кількості пакетів ЕТС в половині діаметра стрижня ($V_{ку3}$ – три), ($V_{ку4}$ – чотири) та ($V_{ку16}$ – шістнадцять).

Коефіцієнт $K_{кi}$ при названому числі пакетів ($i=3, 4, 16$) приймає значення: $K_{к3}=0,851$, $K_{к4}=0,861$ та $K_{к16}=0,931$, а розмір ширини пакету східчастого стрижня (ярма) ЕМС (рис. 4.1, г) наближається до діаметру

$$b_{сп} = 0,939D_{1кп}. \quad (5.2)$$

На (рис. 5.1, а) зображено фрагмент магнітопроводу планарної стрижневої ЕМС, що уявляє собою кутову зону сполучення ярма з плоскими внутрішніми поверхнями стрижня. Представленому фрагменту відповідають стрижні та ярма, що складені з трьох пакетів ЕТС (в половинах перерізів), геометричні розміри яких в стрижнях і ярмах співпадають.

Контурний об'єм кутових зон магнітопроводу $V_{\text{куз}}$ ЕМС з круговими УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, б, г) визначається обчисленням геометричних розмірів пакетів. Для ярма, що складається з трьох типорозмірів пакетів в половині перерізу, висота та довжина третього пакету (рис. 5.1) відповідає ширині стрижня $b_{\text{сп}}$ (рис. 4.1. б, г). Ширина такого (більшого) пакету (рис. 5.1) h_c визначається виразом

$$h_c = D_{1\text{кп}} \sin 20^\circ = 0,342 D_{1\text{кп}}. \quad (5.3)$$

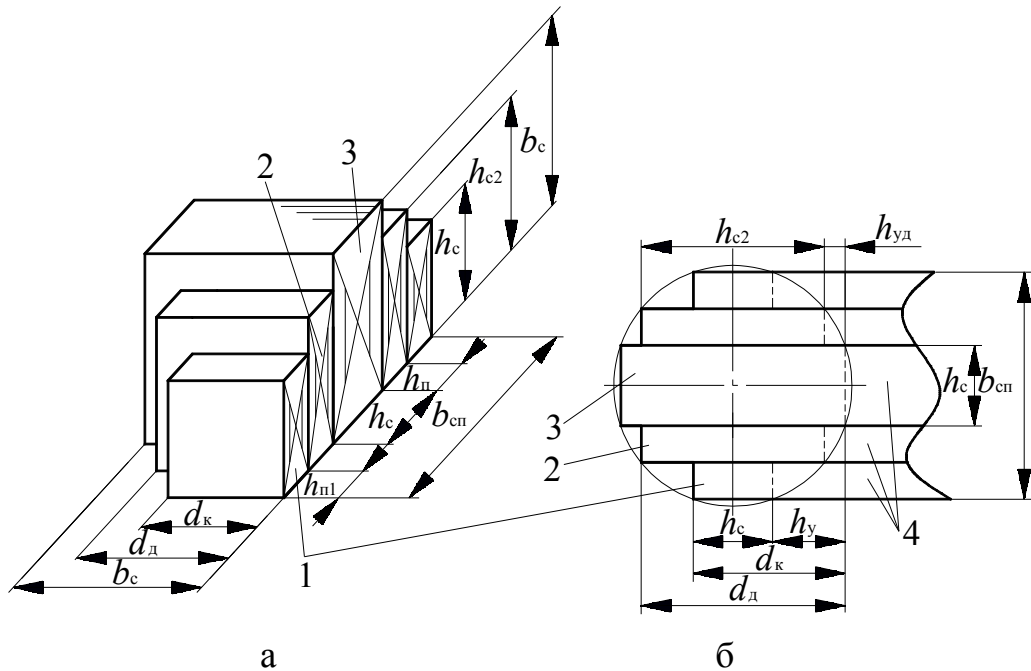


Рис. 5.1 Схема фрагменту (а) і вид зверху (б) кутової зони магнітопроводу з плоскими внутрішніми поверхнями ярем та з трьома пакетами в половині утворюючого кола:

1 – перший; 2 – другий; 3 – третій пакети електротехнічної сталі; 4 – зовнішня поверхня ярма.

Ширина першого (меншого) пакету $h_{\text{п1}}$ (рис. 5.1, а) визначається при уявленні, що в діаметр стрижня вписаний квадратний пакет ЕТС зі сторонами h_{c2} . При такому уявленні віднявши від ширини стрижня $b_{\text{сп}}$ значення ширини квадрату h_{c2} , знайдемо подвійну ширину першого пакету $h_{\text{п1}}$:

$$h_{\text{п1}} = (b_{\text{сп}}/2) - (h_{c2}/2); \quad (5.4)$$

$$h_{c2} = (D_{1\text{кп}}/2)\sqrt{2} = 1,414(D_{1\text{кп}}/2) = 0,707 D_{1\text{кп}}; \quad (5.5)$$

$$h_{\text{п1}} = \left(0,939D_{\text{1кп}}/2\right) - \left(0,707D_{\text{1кп}}/2\right) = 0,116D_{\text{1кп}}. \quad (5.6)$$

Ширина другого пакету $h_{\text{п}}$ (рис. 5.1, а) визначається відніманням від сторони квадрата $h_{\text{с2}}$, що вписаний в діаметр стрижня, значення ширини (5.3) третього пакету $h_{\text{с}}$ (рис. 5.1, а)

$$h_{\text{п}} = (h_{\text{с2}} - h_{\text{с}})/2 = \left(0,707D_{\text{1кп}} - 0,342D_{\text{1кп}}\right)/2 = 0,182D_{\text{1кп}}. \quad (5.7)$$

Довжина першого пакету $d_{\text{к}}$ визначається як підсумок половини $h_{\text{с}}$ першого пакету стрижня (5.3) та половини ширини стрижня $b_{\text{сп}}$ (рис. 5.1, б)

$$d_{\text{к}} = (h_{\text{с}}/2) + (b_{\text{сп}}/2) = \left(0,342D_{\text{1кп}}/2\right) + \left(0,939D_{\text{1кп}}/2\right) = 0,641D_{\text{1кп}}. \quad (5.8)$$

Довжина другого пакету $d_{\text{д}}$ (рис. 5.1, а) визначається як підсумок половини довжини другого пакету $h_{\text{с2}}$ та половини ширини стрижня $b_{\text{сп}}$ (рис. 5.1, б)

$$d_{\text{д}} = b_{\text{сп}}/2 + h_{\text{с2}}/2 = \left(0,939D_{\text{1кп}}/2\right) + \left(0,707D_{\text{1кп}}/2\right) = 0,823D_{\text{1кп}}. \quad (5.9)$$

Висота першого та другого пакету відповідають розмірам $h_{\text{с}}$ та $h_{\text{с2}}$.

Контурний об'єм кутової зони магнітопроводу визначається на основі (5.2 – 5.8) обчисленням об'єму кожного пакету. Наприклад об'єм першого пакету V_1 (рис. 5.1, б) визначається на основі (5.4, 5.6) виразом

$$V_1 = d_{\text{к}}h_{\text{п1}}h_{\text{с}} = 0,641D_{\text{1кп}} \cdot 0,116D_{\text{1кп}} \cdot 0,342D_{\text{1кп}} = 0,051D_{\text{1кп}}^3. \quad (5.10)$$

Контурний об'єм другого пакету V_2 (рис. 5.1, б) визначається з використанням (5.5, 5.7, 5.9)

$$V_2 = d_{\text{д}}h_{\text{с2}}h_{\text{п}} = 0,823D_{\text{1кп}} \cdot 0,707D_{\text{1кп}} \cdot 0,182D_{\text{1кп}} = 0,212D_{\text{1кп}}^3. \quad (5.11)$$

Контурний об'єм третього пакету V_3 (рис. 5.1, а, б) визначається за допомогою (5.2, 5.3) виразом

$$V_3 = 2b_{\text{сп}}h_{\text{с}} = 2 \cdot 0,939D_{\text{1кп}} \cdot 0,342D_{\text{1кп}} = 0,302D_{\text{1кп}}^3. \quad (5.12)$$

Підсумкове значення контурного об'єму однієї кутової зони магнітопроводу визначається з врахуванням (5.10 – 5.12)

$$V_{\text{куо}} = V_1 + V_2 + V_3 = 0,051D_{\text{1кп}}^3 + 0,212D_{\text{1кп}}^3 + 0,302D_{\text{1кп}}^3 = 0,565D_{\text{1кп}}^3. \quad (5.13)$$

В ЕМС (рис. 4.1, б, г) чотири бічні кутові зони (5.13), тому їх загальний контурний об'єм визначається

$$V_{ky3} = 4V_{ky0} = 4 \cdot 0,565 D_{1кп}^3 = 2,262 D_{1кп}^3. \quad (5.14)$$

Підстановка в (5.1) виразу (5.14) визначає контурний об'єм магнітопроводу ЕМС з круговими УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем схеми (рис. 4.1, б, г)

$$V_{кп} = 4D_{1кп} \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{\pi D_{1кп}^2}{4} + 3D_{1кп} \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{\pi D_{1кп}^2}{4} + 2 \cdot 0,937 D_{1кп} \frac{\pi D_{1кп}^2}{4} + 2,262 D_{1кп}^3 = D_{1кп}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + 3,734 \right]. \quad (5.15)$$

Рівняння контурного об'єму (5.1) та відповідно рівняння маси ЕТС магнітопроводу ЕМС з круговими УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем $m_{мкп}$ схеми (рис. 4.1, б, г) на основі використання (4.1), (4.2) та (5.15) перетворюються

$$m_{мкп} = \gamma_{st} K_{зс} K_{кк} V_{кп} = \gamma_{st} K_{зс} K_{кк} D_{1кп}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + 3,734 \right]. \quad (5.16)$$

Після підстановки (4.15) в (5.16) рівняння маси ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 5.1, б, г) приймає вид

$$m_{мкп} = \gamma_{st} K_{зс} K_{кк} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{тт}}{K_{зс} K_{кк} K_{зо} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \lambda_B 2,356 + 3,734 \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{мкп}^*, \quad (5.17)$$

де $\Pi_{мкп}^*$ – показник маси магнітопроводу (рис. 4.1, б, г),

$$\Pi_{мкп}^* = K_{зс} K_{кк} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{зс} K_{кк} K_{зо} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \lambda_B 2,356 + 3,734 \right]. \quad (5.18)$$

На основі (4.19), (5.18) і (2.27), (2.28) рівняння маси $m_{акпсц(al)}''$ та вартості $C_{акпсц(al)}''$ активних матеріалів трифазної планарної ЕМС с круговими УК та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, б, г) мають вид:

$$\begin{aligned}
m''_{\text{акпсu}(al)} &= m_{\text{МКПЗ}}'' + m''_{\text{ОККсu}(al)} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МКП}}^* + \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОККсu}(al)}^* = \\
&= \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times \\
&\times \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + 3,734 \right] + \gamma_{cu(al)} 1,178 K_{30} \lambda_B \times \\
&\times \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 (a_M - 1)^2 \left[1 + (a_M - 1)/4 \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{1\text{кпсu}(al)}^*; \quad (5.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C''_{\text{акпсu}(al)} &= C_{\text{МКП}} + C''_{\text{ОККсu}(al)} = \gamma_{st} C_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МКП}}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОККсu}(al)}^* = \\
&= \gamma_{st} K_{3c} K_{\text{КК}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + 3,734 \right] + \\
&+ C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} 1,178 K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 (a_M - 1)^2 \left[1 + (a_M - 1)/4 \right] = \\
&= \gamma_{st} C_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{2\text{кпсu}(al)}^*, \quad (5.20)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{кпсu}(al)}^*$ і $\Pi_{2\text{кпсu}(al)}^*$ – відносні показники маси і вартості ЕМС (рис. 4.1, б, г) з магнітопроводом, що складений в стрижнях і ярмах відповідно з трьох пакетів ЕТС в половинах перерізів стрижня та ярма (рис. 5.1):

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{кпсu}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{КК}} \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + \right. \right. \\
&\left. \left. + 3,734 \right] + 1,178 K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2 \left[1 + (a_M - 1)/4 \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_c \right]; \quad (5.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi_{2\text{кпсu}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{\text{КК}} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{КК}} \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \pi + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B 2,356 + \right. \right. \\
&\left. \left. + 3,734 \right] + 1,178 K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2 \left[1 + \frac{(a_M - 1)}{4} \right] C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \right]. \quad (5.22)
\end{aligned}$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)кпсу(al)}^*$ показників (5.21) і (5.22) ЦФ (5.19), (5.20), що отримані при трьох величинах K_{30} та $K_{кк}$ і при реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 5.1. і табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток з плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремуму показника маси ЕМС, б.о.
			a_{me}	λ_{ve}	
$\Pi_{1кпсу}^*$ (рис. 4.1, б, г)	0,3	0,851	3,39	3,42	28,92
		0,861	3,41	3,42	28,85
		0,931	3,50	3,40	28,37
	0,25	0,851	3,62	3,88	30,49
		0,861	3,64	3,36	30,42
		0,931	3,73	3,37	29,95
	0,15	0,851	4,35	3,29	35,74
		0,861	4,37	3,28	35,67
		0,931	4,49	3,27	35,19
$\Pi_{1кпаl}^*$ (рис. 4.1, б, г)	0,3	0,851	5,26	3,19	17,27
		0,861	5,29	3,19	17,24
		0,931	5,45	3,18	17,05
	0,25	0,851	5,65	3,16	18,43
		0,861	5,68	3,16	18,40
		0,931	5,86	3,15	18,21
	0,15	0,851	6,95	3,08	22,31
		0,861	6,98	3,08	22,27
		0,931	7,21	3,07	22,08

Таблиця 5.2 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної обмотки та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Значення екстремумів показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, в.о.				
			3,5	4	4,5	5	5,5
П* _{2кпсц} (рис. 4.1, б, г)	0,3	0,851	54,29	58,38	62,31	66,08	69,74
		0,861	54,11	58,18	62,09	65,85	69,48
		0,931	52,90	56,85	60,63	64,27	67,79
	0,25	0,851	56,46	60,63	64,62	68,46	72,17
		0,861	56,27	60,42	64,40	68,22	71,91
		0,931	55,07	59,09	62,95	66,65	70,23
	0,15	0,851	63,68	68,11	72,32	76,38	80,28
		0,861	63,49	67,90	72,10	76,13	80,02
		0,931	62,29	66,57	70,65	74,56	78,33

Таблиця 5.3 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів та котушок алюмінієвої обмоток та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Значення екстремумів показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
			3	3,4	3,8	4,2	4,7
П* _{2кпал} (рис. 4.1, б, г)	0,3	0,851	27,63	36,15	30,85	32,35	34,16
		0,861	27,56	36,07	30,77	32,27	34,06
		0,931	27,12	35,59	30,24	31,70	33,45
	0,25	0,851	29,18	30,86	32,48	34,03	35,88
		0,861	29,11	30,79	32,39	33,94	35,78
		0,931	28,66	30,31	31,87	33,37	35,17
	0,15	0,851	34,28	36,15	37,91	39,60	41,62
		0,861	34,22	36,07	37,83	39,52	41,52
		0,931	33,77	35,58	37,31	38,95	40,91

5.2. Показники втрат активної потужності системи з круговими утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Значення контурного об'єму ярем $V_{\text{яп}}$ планарного магнітопроводу з круговими УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, б, г) визначається виразом

$$V_{\text{яп}} = (4b_{\text{вкк}} + 2b_{\text{сп}})S_{\text{кк}} + V_{\text{ку}}. \quad (5.23)$$

Після підстановки (4.3), (4.5) та з урахуванням (5.2) вираз (5.23) перетворюється до виду

$$\begin{aligned} V_{\text{яп}} &= \left(4D_{1\text{кп}} \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2}\right) + 2 \cdot 0,939D_{1\text{кп}}\right) \frac{\pi D_{1\text{кп}}^2}{4} + 2,262D_{1\text{кп}} = \\ &= \frac{\pi D_{1\text{кп}}^3}{4} \left[4 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2}\right) + 1,879\right] + 2,262. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Контурний об'єм стрижнів ЕМС магнітопроводу з круговими УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, б, г) відповідає об'єму, що визначається (4.28).

Рівняння втрат неробочого руху ЕМС, що містить магнітопровід з круговими УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем, після підстановки (4.28) та (5.24) приймає вид

$$\begin{aligned} P_{\text{нкп}} &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} (V_{\text{яп}} + V_{\text{ск(п)}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} \left(D_{1\text{кп}}^3 \left(3 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{в}} \frac{\pi}{4} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{D_{1\text{кп}}^3 \pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2} \right) + 1,879 \right) + 2,262 \right) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} D_{1\text{кп}}^3 \times \\ &\quad \times \left[\left(3 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2} \right) \lambda_{\text{в}} \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2} \right) + 1,879 \right) + 2,262 \right]. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Рівняння (2.37) втрат короткого замикання при підстановці (4.2), (4.3) і (4.16) стосовно ЕМС (рис. 4.1, а, г) перетворюється до виду

$$P''_{\text{ккп}cu(al)} = 1,5K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_o^2 \lambda_{\text{в}} b_{\text{вк}}^2 l_{\text{оп}} = 1,5K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_o^2 \lambda_{\text{в}} D_{1\text{к}}^3 \left(\frac{a_{\text{м}} - 1}{2} \right)^2 \times$$

$$\times \pi D_{1к} \left(1 + \frac{a_m - 1}{4}\right) = 1,178 K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_0^2 \lambda_B D_{1к}^3 (a_m - 1)^2 \left(1 + \frac{a_m - 1}{4}\right). \quad (5.26)$$

Загальні втрати ЕМС з круговими УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, а, г) визначаються на основі (2.35) підсумком (2.25) і (5.26)

$$\begin{aligned} P_{\Sigma кпсу(al)}'' &= P_{нкп}'' + P_{кпсу(al)}'' = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} K_{кк} D_{1кп}^3 \left[\left(3 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) \lambda_B \frac{\pi}{4}\right) + \frac{\pi}{4} \times \right. \\ &\times \left. \left(4 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) + 1,879\right) + 2,262 \right] + 1,178 K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_0^2 \lambda_B D_{1кп}^3 (a_m - 1)^2 \times \\ &\times \left(1 + \frac{a_m - 1}{4}\right) = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} K_{кк} D_{1к}^3 \left[\left(3 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) \lambda_B \frac{\pi}{4}\right) + \frac{\pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) + 1,879\right) + \right. \\ &\left. + 2,262 \right] + 1,178 K_{зо} K_{псу(al)} \lambda_B (a_m - 1)^2 \left(1 + \frac{a_m - 1}{4}\right). \quad (5.27) \end{aligned}$$

При підстановці (4.15) підсумкові втрати (5.27) ЕМС з круговими УК обмоткових котушок і стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.1, а, г) визначаються

$$\begin{aligned} P_{\Sigma кпсу(al)}'' &= \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}}\right)^3 K_{дн} \left(\sqrt[4]{5,093 \Pi_{тт} / \left[K_{зс} K_{кк} K_{зо} \lambda_B (a_m - 1)^2\right]}\right)^3 \left[\left[K_{зс} K_{кк} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left(3 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) \lambda_B \frac{\pi}{4}\right) + \frac{\pi}{4} \left(4 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) + 1,879\right) + 2,262 \right] + 1,178 K_{псу(al)} K_{зо} \lambda_B (a_m - 1)^2 \times \\ &\left. \times \left[1 + (a_m - 1)/4\right] \right] = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}}\right)^3 \Pi_{3кпсу(al)}^*, \quad (5.28) \end{aligned}$$

де $\Pi_{3кпсу(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕТС (рис. 4.1, б, г),

$$\begin{aligned} \Pi_{3кпсу(al)}^* &= K_{дн} \left(\sqrt[4]{5,093 \Pi_{тт} / \left[K_{зс} K_{зо} \lambda_B (a_m - 1)^2\right]}\right)^3 \left[\left[K_{зс} \left(3 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) \lambda_B \frac{\pi}{4}\right) + \frac{\pi}{4} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left(4 \left(\frac{a_m - 1}{2}\right) + 1,879\right) + 2,262 \right] + 1,178 K_{псу(al)} K_{зо} \lambda_B (a_m - 1)^2 \left[1 + (a_m - 1)/4\right] \right]. \quad (5.29) \end{aligned}$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3кпсу(al)e}^*$ показника втрат активної потужності (5.29) ЦФ (5.28) варіантів ЕМС (рис. 4.1, а, б) з мідними (алюмінієвими)

обмотками при трьох значеннях K_{30} та $K_{кк}$ і співвідношеннях (2.38), (2.39) наведені в табл. 5.4

Таблиця 5.4 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стрижнів і котушок мідної та алюмінієвої обмоток, що відрізняються плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Коефіцієнт заповнення обмотковог о вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів (електротехнічна сталь, мідь, алюміній) і електромагнітних навантажень		
		$\Pi_{3кпсу(а)е}^*$		
		3	8	24
0,3	0,851	67,92	116,61	227,39
	0,861	67,70	116,17	226,37
	0,931	66,29	113,24	219,71
0,25	0,851	70,87	120,41	232,41
	0,861	70,65	119,96	231,39
	0,931	69,24	117,03	224,73
0,15	0,851	80,72	133,06	249,16
	0,861	80,50	132,61	248,14
	0,931	79,09	129,68	241,47

Наведені в табл. 4.1 – табл. 4.4 та табл. 5.1 – табл. 5.4 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з круговими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має кругові УК стрижнів і обмоткових котушок і плоскі внутрішні поверхні ярем східчастих перерізів в прийнятих діапазонах змін $K_{30}=0,3\dots0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3' \dots 4,7''$, $C_{al}/C_{st}=3,5' \dots 5,5''$, $K_{кк}=0,931$, $K_{псу(st)}=3' \dots 24''$:

$$(\Pi_{1ккcu}^*/\Pi_{1кпсу}^*)=(28,51/28,37)\dots(35,34/35,19)=1,005\dots1,004;$$

$$(\Pi_{1ккаl}^*/\Pi_{1кпал}^*)=(17,11/17,05)\dots(22,14/22,08)=1,003\dots1,003;$$

$$\begin{aligned}
(\Pi_{2ккcu}^*/\Pi_{2кпсу}^*)' &= (53,22/52,90) \dots (62,63/62,29) = 1,006 \dots 1,005; \\
(\Pi_{2ккаl}^*/\Pi_{2кпаl}^*)' &= (27,25/27,12) \dots (33,91/33,77) = 1,005 \dots 1,004; \\
(\Pi_{2ккcu}^*/\Pi_{2кпсу}^*)'' &= (68,23/67,79) \dots (78,78/78,33) = 1,006 \dots 1,005; \\
(\Pi_{2ккаl}^*/\Pi_{2кпаl}^*)'' &= (33,62/33,45) \dots (41,09/40,91) = 1,005 \dots 1,004; \\
(\Pi_{3ккcu(al)}^*/\Pi_{3кпсу(al)}^*)' &= (66,67/66,29) \dots (79,49/79,09) = 1,006 \dots 1,005; \\
(\Pi_{3ккcu(al)}^*/\Pi_{3кпсу(al)}^*)'' &= (221,34/219,71) \dots (243,156/241,47) = 1,007 \dots 1,006.
\end{aligned}$$

5.3. Масовартісні показники системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Розробка ММ ЕМС з восьмигранними УК стрижнів і обмоткових котушок, що мають плоскі внутрішні поверхні ярем (рис. 4.2, б, г), здійснюється при використанні рівнянь (4.35 – 4.39) та визначені об'єму магнітопроводу з врахуванням особливостей геометричної форми кутових зон ярем, що з'єднуються зі стрижнями [45, 47].

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2, б, в) визначається, з використанням (4.35) – (4.39), на основі обчислення контурного об'єму кутових зон ярма V_{vvi} , що суміщені зі стрижнями

$$V_{vvi} = V_{vui} + 4b_{vvi} \Pi_{ссвв(\Pi)} + 3h_{vvi} \Pi_{ссвв(\Pi)} + 2b_{св} \Pi_{ссвв(\Pi)}, \quad (5.30)$$

де V_{vui} – контурний об'єм кутових зон магнітопроводу, який залежить від кількості пакетів ЕТС в половині діаметра стрижня (V_{vui3} – три, V_{vui4} – чотири, V_{vui1} – повне заповнення, при цьому коефіцієнт $K_{кв}$ при названому числі пакетів $i=3; 4; 1$ приймає значення: $K_{кв} = 0,9$; $K_{кв} = 0,931$; $K_{кв} = 1$ [48].

Фрагмент магнітопроводу (рис. 5.2) уявляє частину кутової зони, що сполучена із стрижнем і ярмом та не виходить за їх межі. Кутові частини та ярма формуються трьома пакетами ЕТС в половині перерізу стрижня (ярма). Складові магнітопроводу утворюють ідентичні площі перерізів ЕТС стрижнів і ярем, а розташування пакетів ярем забезпечує їх плоску основу.

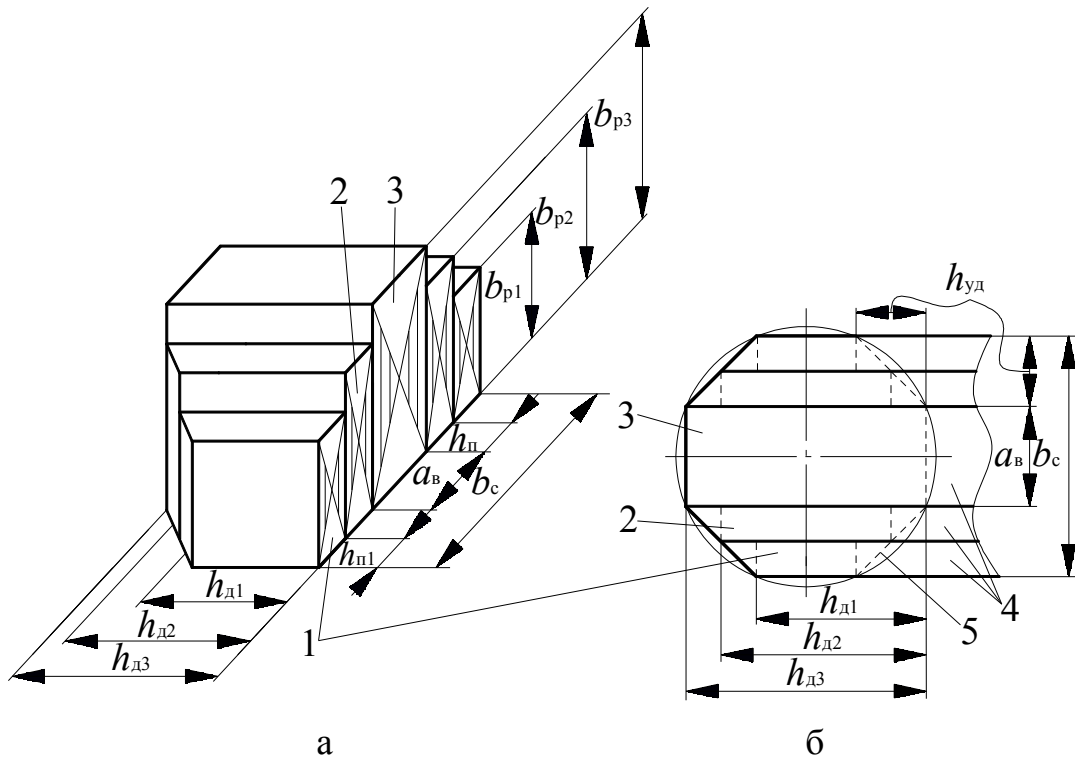


Рис. 5.2 Схема фрагменту (а) і вид зверху (б) кутової зони при повному заповненні восьмигранного контуру перерізу стрижня електротехнічною сталлю:

1, 2, 3 – перший, другий, третій пакети електротехнічної сталі; 4 – зовнішня поверхня ярма; 5 – грань периметру восьмигранного перерізу стрижня.

Контурний об'єм кутових зон магнітопроводу $V_{\text{вуз}}$ для ЕМС з восьмигранними УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.2, б) визначається обчисленням геометричних розмірів пакетів. Для ярма, що складається з трьох типорозмірів пакетів в половині перерізу, довжина $h_{\text{д3}}$ та висота $b_{\text{п3}}$ третього пакету (рис. 5.2, б) відповідає ширині стрижня $b_{\text{сп}}$ (рис. 5.1. б). Ширина такого (більшого) пакету (рис. 5.2) $a_{\text{в}}$ відповідає значенню ширини грані восьмигранного УК стрижня (4.55).

Ширини першого $h_{\text{п1}}$ та другого $h_{\text{п}}$ пакетів однакові та визначаються виходячи з властивостей восьмигранника та на основі визначення відстані $h_{\text{уд}}$ (рис. 5.2, а, б):

$$h_{\text{уд}} = \frac{a_{\text{в}}}{\sqrt{2}} = \frac{0,383D_{1\text{ВВП}}}{1,414} = 0,271D_{1\text{ВВП}}; \quad (5.31)$$

$$h_{\text{п1}} = h_{\text{п}} = \frac{h_{\text{уд}}}{2} = \frac{0,271D_{1\text{ВВП}}}{2} = 0,136D_{1\text{ВВП}}. \quad (5.32)$$

Довжина першого пакету $h_{д1}$ визначається як підсумок величин грані восьмигранника $a_{в}$, відстані $h_{уд}$ та розміру $h_{в}$, який відповідає половині сторони кутової грані пакету ярма (рис. 5.2, а):

$$h_{д1} = a_{в} + h_{уд} + h_{в}; \quad (5.33)$$

$$h_{в} = \frac{h_{уд}}{4} = \frac{0,276D_{1ВВП}}{4} = 0,068D_{1ВВП}; \quad (5.34)$$

$$h_{д1} = 0,383D_{1ВВП} + 0,271D_{1ВВП} + 0,068D_{1ВВП} = 0,721D_{1ВВП}. \quad (5.35)$$

Висота першого пакету b_{p1} відповідає значенню величини грані восьмигранника $a_{в}$.

Довжина другого пакету $h_{д2}$ визначається як підсумок величин грані восьмигранника $a_{в}$, відстані $h_{уд}$ (5.31) та потрійного значення розміру $h_{в}$ (5.34), що відповідає половині сторони кутової грані пакету ярма (рис. 5.2, а)

$$\begin{aligned} h_{д2} &= a_{в} + h_{уд} + 3h_{в} = \\ &= 0,383D_{1ВВП} + 0,271D_{1ВВП} + 3 \cdot 0,068D_{1ВВП} = 0,858D_{1ВВП}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Висота другого пакету b_{p2} відповідає підсумку величин грані восьмигранника $a_{в}$ та відстані (5.31) $h_{уд}$,

$$b_{p2} = a_{в} + h_{уд} = 0,383D_{1ВВП} + 0,271D_{1ВВП} = 0,654D_{1ВВП}. \quad (5.37)$$

Контурний об'єм кутової зони магнітопроводу (рис. 5.2, б, г) визначається на основі (5.31 – 5.37) обчисленням об'єму кожного пакету. Наприклад об'єм першого пакету V_1 (рис. 5.2, б) визначається на основі (5.30, 4.55, 5.33) виразом

$$\begin{aligned} V_1 &= (b_{p1}h_{п1}h_{д1})2 = \\ &= (0,383D_{1ВВП} \cdot 0,136D_{1ВВП} \cdot 0,721D_{1ВВП})2 = 0,075D_{1ВВП}^3. \end{aligned} \quad (5.38)$$

Об'єм другого пакету V_2 (рис. 5.2, б) визначається на основі (5.30, 5.34, 5.35) виразом

$$\begin{aligned} V_2 &= (b_{p2}h_{п2}h_{д2})2 = \\ &= (0,654D_{1ВВП} \cdot 0,135D_{1ВВП} \cdot 0,858D_{1ВВП})2 = 0,152D_{1ВВП}^3. \end{aligned} \quad (5.39)$$

Об'єм третього пакету V_3 (рис. 5.2, а, б) визначається за допомогою (4.55, 4.43) виразом

$$V_3 = a_b b_{p3} h_{d3} = 0,383 D_{1\text{ВВП}} \cdot 2 \cdot 0,924 D_{1\text{ВВП}} = 0,708 D_{1\text{ВВП}}^3. \quad (5.40)$$

Об'єм однієї кутової зони магнітопроводу, що обмежена УК перерізів стрижнів і ярем, визначається підсумком складових (5.38 – 5.40)

$$\sum V_{\text{вз}} = V_1 + V_2 + V_3 = 0,075 D_{1\text{ВВП}}^3 + 0,708 D_{1\text{ВВП}}^3 + 0,152 D_{1\text{ВВП}}^3 = 0,935 D_{1\text{ВВП}}^3. \quad (5.41)$$

В ЕМС, що містить три пакети в половині перерізу ярма (рис. 5.1, б, г) має чотири бічні кутові зони (5.41), тому їх загальний об'єм визначається

$$V_{\text{вз3}} = 4 \sum V_{\text{вз}} = 4 \cdot 0,935 D_{1\text{ВВП}}^3 = 3,740 D_{1\text{ВВП}}^3. \quad (5.42)$$

Підстановкою в (5.42) виразу (5.30) визначається об'єм, що обмежений восьмигранними УК різновидів магнітопроводу ЕМС з плоскими внутрішніми поверхнями ярем ЕМС схеми (рис. 4.2, б)

$$\begin{aligned} V_{\text{ВП}} &= 4 D_{1\text{ВВП}} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) 0,707 D_{1\text{ВВП}}^2 + 3 D_{\text{ВВП}} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B 0,707 D_{1\text{ВВП}}^2 + \\ &+ 2 \cdot 0,924 D_{\text{ВВП}} 0,707 D_{1\text{ВВП}}^2 + 3,740 D_{1\text{ВВП}}^3 = \\ &= D_{1\text{ВВП}}^3 \left[2,828 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + 3,740 \right]. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Рівняння контурного об'єму (5.43) та відповідно рівняння маси ЕТС магнітопроводу ЕМС з восьмигранними УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем $m_{\text{МВП}}$ схеми (рис. 5.2, б), на основі (4.36), (4.37) та (4.40) перетворюється до виду

$$\begin{aligned} m_{\text{МВП}} &= \gamma_{st} K_{3c} K_{kb} V_{\text{ВП}} = \gamma_{st} K_{3c} K_{kb} \left[3 h_{\text{ВП}} \Pi_{\text{свВП}} + (4 b_{\text{ВП}} + 2 b_{\text{св}}) \Pi_{\text{свВП}} + V_{\text{кув}} \right] = \\ &= \gamma_{st} K_{3c} K_{kb} \left[3 D_{1\text{ВВП}} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B 0,707 D_{1\text{ВВП}}^2 + \left(4 D_{1\text{ВВП}} \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$+2 \cdot 0,924 D_{\text{IВВП}}) 0,707 D_{\text{IВВП}}^2 + 3,740 D_{\text{IВВП}}^3] = \gamma_{st} K_{3c} K_{KB} D_{\text{IВВП}}^3 \times$$

$$\times \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right]. \quad (5.44)$$

Після підстановки (4.51) в (5.44) рівняння маси магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2, б) приймає вид

$$m_{\text{МВП}} = \gamma_{st} K_{3c} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right.$$

$$\left. + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВП}}^*, \quad (5.45)$$

де $\Pi_{\text{МВП}}^*$ – показник маси магнітопроводу ЕМС (рис. 4.2, б),

$$\Pi_{\text{МВП}}^* = K_{3c} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right.$$

$$\left. + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right]. \quad (5.46)$$

З використанням (4.57), (5.46), а також (2.27), (2.28), отримуються рівняння маси $m_{\text{авпсу}(al)}''$ та вартості $C_{\text{авпсу}(al)}''$ активних матеріалів трифазної планарної ЕМС з восьмигранними УК та плоскими внутрішніми поверхнями ярм (рис. 4.2, б):

$$m_{\text{авпсу}(al)}'' = m_{\text{МВП}} + m_{\text{овпсу}(al)}'' = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВП}}^* + \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{\text{овпсу}(al)}^* =$$

$$= K_{3c} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664 \Pi_{\text{ТТ}}}{K_{3c} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right.$$

$$\left. + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right] + \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times 1,148 K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,664 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \\
& = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{1\text{ВПСu}(al)}^*; \quad (5.47)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C''_{\text{авпсу}(al)} &= C_{\text{МВП}} + C''_{\text{ОВПСu}(al)} = \gamma_{st} C_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВП}}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОВПСu}(al)}^* = \\
&= K_{3C} K_{KB} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664 \Pi_{\text{TT}}}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \times \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right. \\
& \quad \left. + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right] + \frac{C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)}}{C_{st} \gamma_{st}} \times \\
& \times 1,148 K_{30} \lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \\
& = C_{st} \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{TT}}} \right)^3 \Pi_{2\text{ВПСu}(al)}^*, \quad (5.48)
\end{aligned}$$

де $\Pi_{1\text{ВПСu}(al)}^*$ і $\Pi_{2\text{ВПСu}(al)}^*$ – відносні показники маси і вартості ЕМС (рис. 4.2, б, г) з магнітопроводом, що складений в стрижнях і ярмах відповідно з п'яти пакетів ЕТС (рис. 5.2),

$$\begin{aligned}
\Pi_{1\text{ВПСu}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3C} K_{KB} \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + \left(4 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) + 1,848 \right) 0,707 + 3,740 \right] + \right. \\
& \quad \left. + K_{30} \lambda_B 1,148 (a_M - 0,924)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \quad (5.49)
\end{aligned}$$

$$\Pi_{2\text{ВПСu}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3C} K_{30} K_{KB} \lambda_B (a_M - 0,924)^2}} \right)^3 \left[K_{3C} K_{KB} \left[2,121 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \lambda_B + \right. \right.$$

$$+\left(4\left(\frac{a_M - 0,924}{2}\right) + 1,848\right) \times 0,707 + 3,740 \Bigg] +$$

$$+K_{30}\lambda_B 1,148(a_M - 0,924)^2 \left[1 + 0,256(a_M - 0,924)\right] C_{ccu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \Bigg]. \quad (5.50)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)впсу(al)}^*$ показників (5.49) і (5.50), ЦФ (5.47), (5.48), що отримані при трьох величинах K_{30} та $K_{кв}$ і реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 5.5. і табл. 5.6 і табл. 5.7.

Таблиця 5.5 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів і котушок мідної і алюмінієвої обмоток з плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремумів показника маси ЕМС, б.о.
			a_{me}	λ_{ve}	
$\Pi_{1впсу}^*$ (рис. 4.2, б, г)	0,3	0,9	3,18	3,65	28,64
		0,931	3,22	3,64	28,44
		1	3,30	3,61	28,02
	0,25	0,9	3,39	3,56	30,21
		0,931	3,44	3,58	30,01
		1	3,53	3,56	29,59
	0,15	0,9	4,11	3,44	35,46
		0,931	4,16	3,43	35,26
		1	4,28	3,41	34,84
$\Pi_{1впап}^*$ (рис. 4.2, б, г)	0,3	0,9	5,00	3,31	17,16
		0,931	5,07	3,30	17,08
		1	5,22	3,28	16,90
	0,25	0,9	5,38	3,26	18,32
		0,931	5,46	3,26	18,24
		1	5,62	3,24	18,06
	0,15	0,9	6,65	3,16	22,19
		0,931	6,75	3,15	22,11
		1	6,95	3,14	21,93

Таблиця 5.6 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів і котушок мідної обмоток та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Значення екстремумів показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, в.о.				
			3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{2впсц}^*$ (рис. 4.2, б, г)	0,3	0,9	53,56	57,57	61,42	65,12	68,69
		0,931	53,04	57,00	60,79	64,44	67,97
		1	51,98	55,83	59,51	63,06	66,48
	0,25	0,9	55,73	59,82	63,73	67,51	71,14
		0,931	55,21	59,25	63,11	66,83	70,41
		1	54,15	58,07	61,83	65,44	68,92
	0,15	0,9	62,96	67,31	71,45	75,43	79,26
		0,931	62,44	66,73	70,83	74,75	78,53
		1	61,38	65,55	69,54	73,36	77,04

Таблиця 5.7 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та котушок алюмінієвої обмоток та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Обозначення показника вартості варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня	Значення екстремумів показника вартості при співвідношеннях вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
			3	3,4	3,8	4,2	4,7
$\Pi_{2впап}^*$ (рис. 4.2, а, г)	0,3	0,9	27,37	28,99	30,54	32,02	33,79
		0,931	27,18	28,79	30,31	31,78	33,53
		1	26,79	28,36	29,85	31,28	32,98
	0,25	0,9	28,91	30,58	32,17	33,69	35,52
		0,931	28,72	30,37	31,94	33,45	35,25
		1	28,33	29,94	31,48	32,95	34,71
	0,15	0,9	34,03	35,86	37,60	39,27	41,26
		0,931	33,84	35,66	37,38	39,02	40,99
		1	33,44	35,22	36,91	38,52	40,44

5.4. Показники втрат активної потужності системи з восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Контурний об'єм стрижнів $V_{cb(п)}$ варіантів планарного магнітопроводу з восьмигранними УК визначається виразом (4.65).

Контурний об'єм ярем $V_{явп}$ планарного магнітопроводу з восьмигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, б, г) визначається

$$V_{явп} = (4b_{вп} + 2b_{св})\Pi_{ссвп} + V_{кув}. \quad (5.51)$$

Після підстановки (4.37), (4.38), (4.43) та з урахуванням (5.42) рівняння (5.51), перетворюється до виду

$$\begin{aligned} V_{явп} &= \left(4D_{1ввп} \frac{a_m - 0,924}{2} + 2 \cdot 0,939D_{1ввп} \right) 0,707D_{1ввп}^2 + 3,740D_{1ввп}^3 = \\ &= D_{1ввп}^3 \left[\left(4 \frac{a_m - 0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right]. \end{aligned} \quad (5.52)$$

Рівняння втрат неробочого руху ЕМС, що містить магнітопровід з восьмигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем після підстановки (4.65) та (5.52) приймає вид

$$\begin{aligned} P_{нвп} &= \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} K_{кв} (V_{явп} + V_{св(п)}) = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} K_{кв} \left[D_{1ввп}^3 \left(\frac{a_m - 0,924}{2} \lambda_B 2,121 \right) + \right. \\ &+ D_{1ввп}^3 \left(4 \left(\frac{a_m - 0,924}{2} \right) + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \left. \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{дн} K_{зс} K_{кв} D_{1ввп}^3 \times \\ &\times \left(\frac{a_m - 0,924}{2} \lambda_B 2,121 \right) + \left[\left(4 \left(\frac{a_m - 0,924}{2} \right) + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right]. \end{aligned} \quad (5.53)$$

Рівняння (2.37) втрат короткого замикання при підстановці (4.36), (4.37) і (2.20) стосовно ЕМС (рис. 4.2, а, г) перетвориться до виду

$$P''_{квпсу(al)} = 1,5K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_o^2 \lambda_B b_{ввп}^2 l_{оввп} = 1,5K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{зо} K_{по} J_o^2 \lambda_B D_{1ввп}^2 \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right)^2 3,062 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] D_{1\text{ВВП}} = 4,593 K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B \times \\ & \times D_{1\text{ВВП}}^3 \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)]. \end{aligned} \quad (5.54)$$

Загальні втрати ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, б, г) визначаються на основі (2.35) підсумком (2.53) і (5.54):

$$\begin{aligned} P''_{\Sigma \text{ВВВП}cu(al)} &= P''_{\text{НВП}} + P''_{\text{КВП}} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{3c} K_{\text{кв}} D_{1\text{ВВП}}^3 \left[\frac{a_M - 0,924}{2} \lambda_B 2,121 \right] + \\ & + \left[\left(4 \frac{a_M - 0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right] + 4,593 K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B D_{1\text{ВВП}}^3 \times \\ & \times \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right)^2 [1 + 0,256(a_M - 0,924)] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{3c} K_{\text{кв}} D_{1\text{ВВП}}^3 \times \\ & \times \left[\frac{a_M - 0,924}{2} \lambda_B 2,121 \right] + \left[\left(4 \frac{a_M - 0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right] + 4,593 K_{30} K_{\text{pcu}(al)} \lambda_B \times \\ & \times \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) [1 + 0,256(a_M - 0,924)]. \end{aligned} \quad (5.55)$$

При підстановці (4.51) підсумкові втрати (5.55) ЕМС з восьмигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 4.2, б, г) визначаються

$$\begin{aligned} P''_{\Sigma \text{ВВ}} &= \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{5,664 / \left[K_{3c} K_{30} K_{\text{кв}} \lambda_B (a_M - 0,924)^2 \right]} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{кв}} \left[\frac{a_M - 0,924}{2} \times \right. \right. \\ & \times \lambda_B 2,121 \left. \left. \right] + \left[\left(4 \frac{a_M - 0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right] + 4,593 K_{\text{pcu}(al)} K_{30} \lambda_B \left(\frac{a_M - 0,924}{2} \right) \times \right. \\ & \left. \times [1 + 0,256(a_M - 0,924)] \right] = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ}}} \right)^3 \Pi_{3\text{ВВ}cu(al)}^*, \end{aligned} \quad (5.56)$$

де $\Pi_{3\text{ВВ}cu(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 4.2, б, г),

$$\begin{aligned}
 \Pi_{3\text{впсу}(al)}^* = & K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{5,664 / \left[K_{3c} K_{30} K_{\text{кв}} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 0,924)^2 \right]} \right)^3 \left[K_{3c} K_{\text{кв}} \left[\frac{a_{\text{м}} - 0,924}{2} \times \right. \right. \\
 & \times \lambda_{\text{в}} 2,121 \left. \right] + \left[\left(4 \frac{a_{\text{м}} - 0,924}{2} + 1,878 \right) 0,707 + 3,740 \right] + 4,593 K_{\text{уп}} K_{30} \lambda_{\text{в}} \left(\frac{a_{\text{м}} - 0,924}{2} \right) \times \\
 & \times \left[1 + 0,256 (a_{\text{м}} - 0,924) \right]. \quad (5.57)
 \end{aligned}$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3\text{впсу}(al)}^*$ показника втрат активної потужності (5.57) ЦФ (5.56) варіантів ЕМС (4.2, б, г) з мідними і алюмінієвими обмотками при трьох значеннях K_{30} та $K_{\text{кв}}$ і співвідношеннях (2.38), (2.39) наведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів планарної електромагнітної системи з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток, що відрізняються плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Коефіцієнт заповнення контуру стрижня, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів (електротехнічна сталь, мідь, алюміній) і електромагнітних навантажень		
		$\Pi_{3\text{впсу}(al)}^*$		
		3	8	24
0,3	0,9	67,07	114,78	222,84
	0,931	66,47	113,53	219,99
	1	65,22	110,94	214,16
0,25	0,9	70,02	118,59	227,95
	0,931	69,42	117,34	225,11
	1	68,17	114,75	219,26
0,15	0,9	79,88	131,28	244,89
	0,931	79,27	130,02	242,04
	1	78,02	127,42	236,16

Наведені в табл. 4.1 – табл. 4.4, табл. 5.5 – табл. 5.8 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з круговими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має восьмигранні УК стрижнів і обмоткових котушок і плоскі внутрішні поверхні ярем східчастих перерізів в прийнятих діапазонах змін $K_{30}=0,3\dots 0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3'\dots 4,7''$, $C_{al}/C_{st}=3,5'\dots 5,5''$, $K_{pcu(st)}=3'\dots 24''$, $K_{KB}=0,931$, $K_{KB(II)}=1$:

$$\begin{aligned} (\Pi^*_{1KKcu}/\Pi^*_{1Bpcu}) &= (28,51/28,02)\dots(35,34/34,84)=1,017\dots 1,014; \\ (\Pi^*_{1KKal}/\Pi^*_{1Bpal}) &= (17,11/16,90)\dots(22,14/21,93)=1,012\dots 1,009; \\ (\Pi^*_{2KKcu}/\Pi^*_{2Bpcu})' &= (53,22/51,98)\dots(62,63/61,37)=1,023\dots 1,020; \\ (\Pi^*_{2KKal}/\Pi^*_{2Bpal})' &= (27,25/26,79)\dots(33,91/33,44)=1,017\dots 1,013; \\ (\Pi^*_{2KKcu}/\Pi^*_{2Bpcu})'' &= (68,23/66,48)\dots(78,78/77,04)=1,026\dots 1,022; \\ (\Pi^*_{2KKal}/\Pi^*_{2Bpal})'' &= (33,62/32,98)\dots(41,09/40,44)=1,019\dots 1,015; \\ (\Pi^*_{3KKcu(al)}/\Pi^*_{3Bpcu(al)})' &= (66,67/65,22)\dots(79,49/78,02)=1,022\dots 1,018; \\ (\Pi^*_{3KKcu(al)}/\Pi^*_{3Bpcu(al)})'' &= (221,34/217,14)\dots(243,156/236,16)=1,019\dots 1,029. \end{aligned}$$

Наведені в табл. 4.5 – табл. 4.8, табл. 5.5 – табл. 5.8 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з восьмигранними УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має восьмигранні УК стрижнів і обмоткових котушок і плоскі внутрішні поверхні ярем східчастих перерізів в прийнятих діапазонах змін $K_{30}=0,3\dots 0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3'\dots 4,7''$, $C_{al}/C_{st}=3,5'\dots 5,5''$, $K_{pcu(st)}=3'\dots 24''$, $K_{KB(II)}=1$:

$$\begin{aligned} (\Pi^*_{1BVCu}/\Pi^*_{1Bpcu}) &= (28,17/28,02)\dots(34,98/34,84)=1,005\dots 1,004; \\ (\Pi^*_{1BVal}/\Pi^*_{1Bpal}) &= (16,96/16,90)\dots(21,98/21,93)=1,003\dots 1,002; \\ (\Pi^*_{2BVCu}/\Pi^*_{2Bpcu})' &= (52,41/51,98)\dots(61,78/61,37)=1,008\dots 1,006; \\ (\Pi^*_{2BVal}/\Pi^*_{2Bpal})' &= (26,93/26,79)\dots(33,57/33,44)=1,005\dots 1,003; \\ (\Pi^*_{2BVCu}/\Pi^*_{2Bpcu})'' &= (67,12/66,48)\dots(77,64/77,04)=1,009\dots 1,007; \\ (\Pi^*_{2BVal}/\Pi^*_{2Bpal})'' &= (33,19/32,98)\dots(40,63/40,44)=1,023\dots 1,046; \\ (\Pi^*_{3BVCu(al)}/\Pi^*_{3Bpcu(al)})' &= (65,71/65,22)\dots(78,48/78,02)=1,007\dots 1,005; \\ (\Pi^*_{3BVCu(al)}/\Pi^*_{3Bpcu(al)})'' &= (217,14/217,14)\dots(238,85/236,16)=1,013\dots 1,011. \end{aligned}$$

5.5. Масовартісні показники системи з шестиграними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Індекси ii діаметрів $D_{1(2)ii}$ варіанту ЕМС з шестиграними УК стрижнів і обмоткових котушок та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3) приймають позначення $D_{1(2)шп}$, при цьому керовані змінні (2.5) і (2.6) визначаються співвідношеннями [49]:

$$a_m = D_{1шп} / D_{2шп}; \quad (5.58)$$

$$\lambda_b = h_{вшп} / b_{вшп}. \quad (5.59)$$

Ширина обмоткового вікна $b_{вшп}$ ЕМС (рис. 5.3) магнітопроводу з врахуванням (5.58) визначається виразом

$$b_{вшп} = (D_{2шп} - D_{1шп}) / 2 = D_{1шп} (a_m - 1) / 2. \quad (5.60)$$

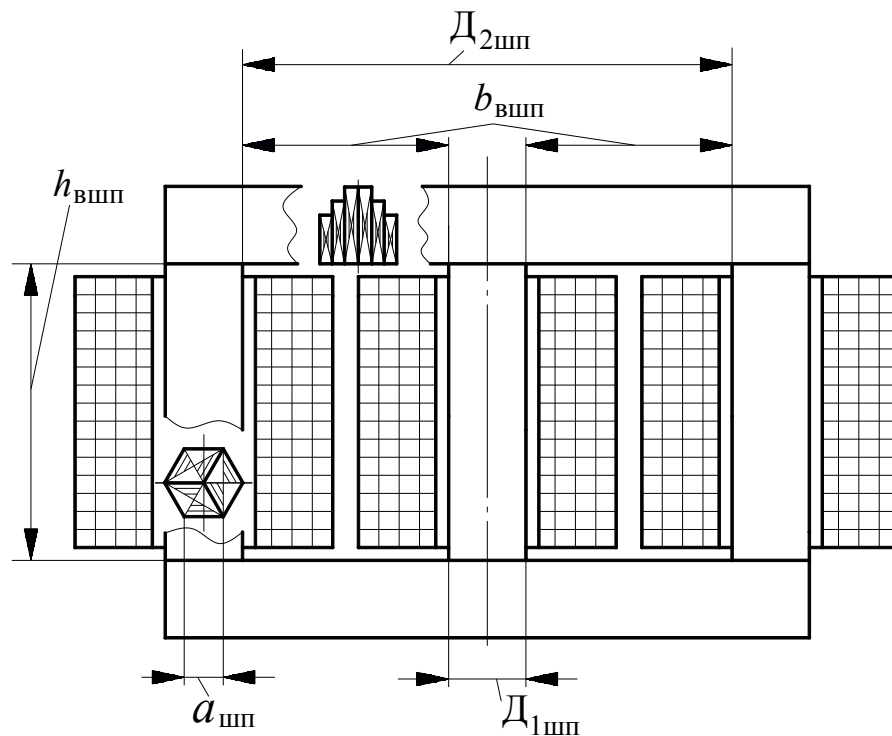


Рис. 5.3. Конструктивна схема в повздовжньому перерізі трифазної планарної електромагнітної системи з плоскими внутрішніми поверхнями ярем та шестиграними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Об'єм магнітопроводу (рис. 5.3) з шестиграними перерізами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем визначається

$$V_{\text{шп}} = 3h_{\text{вшп}}S_{\text{ш}} + 4b_{\text{вшп}}S_{\text{ш}} + 2D_{1\text{шп}}S_{\text{ш}} + V_{\text{куш}}, \quad (5.61)$$

де $S_{\text{ш}}$ – площа шестигранного УК та перерізу стрижня, що вписаний в діаметр $D_{1\text{шп}}$; $V_{\text{куш}}$ – об’єм кутових зон магнітопроводу

Магнітопровід з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3) містить кутові зони ярем, які суміщені зі стрижнями. Схема кутової зони, що складається з трьох пакетів в половині перерізу ярма і має площу, яка відповідає площі перерізу стрижня, зображена на рис. 5.4. При збільшенні числа пакетів та збереженні площі перерізу, об’єм і маса ярма (рис. 5.3) не змінюється.

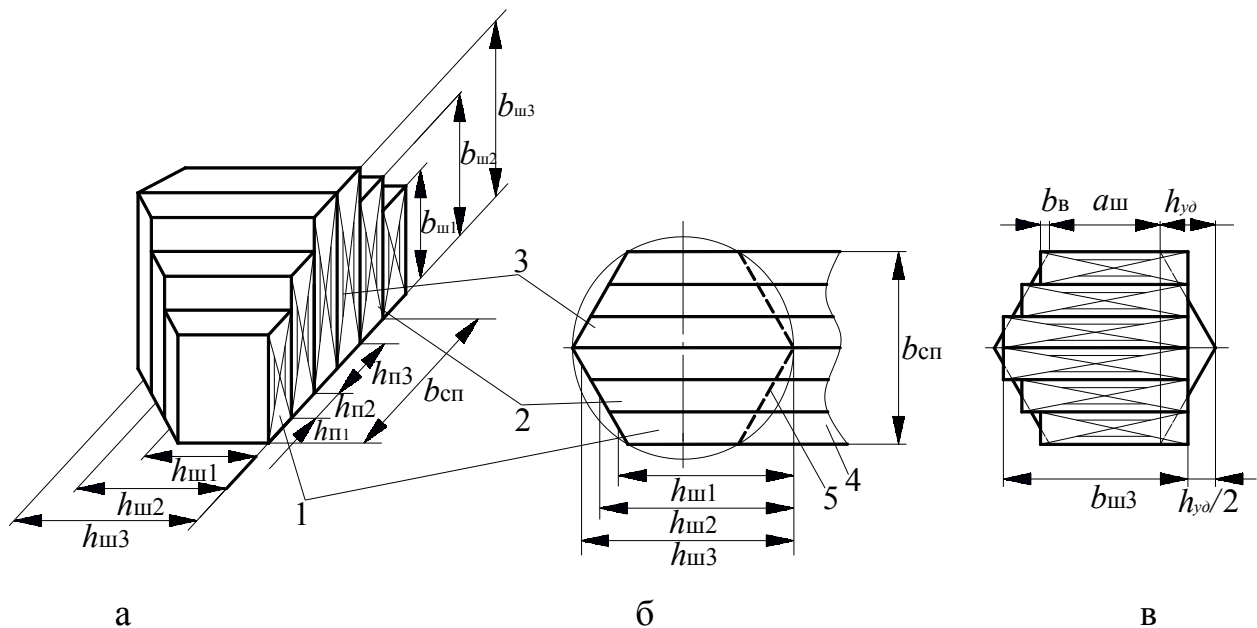


Рис. 5.4 Схема фрагменту кутової зони (а) на стику зі стрижнем, вид зверху кутової зони ярма (б) та поперечний переріз ярма з видом розміщення пакетів відносно периметру шестигранного контуру стрижня (в):

- 1, 2, 3 – перший, другий, третій пакети електротехнічної сталі;
4 – зовнішня поверхня ярма; 5 – контур периметру шестигранного стрижня.

Площа шестигранного УК та площа перерізу стрижня визначаються виразами:

$$S_{\text{ш}} = \frac{1}{4} D_{1\text{шп}}^2 \frac{3\sqrt{3}}{2} = \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2;$$

$$P_{\text{ссшп}} = K_{\text{зс}} K_{\text{кш}} \frac{3\sqrt{3}D_{1\text{шп}}^2}{8} \approx K_{\text{зс}} \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2. \quad (5.62)$$

де $K_{\text{кш}}$ – контурний коефіцієнт заповнення, $K_{\text{кш}} \approx 1$.

Для визначення об'єму кутової зони ярма $V_{\text{куш}}$ (рис. 5.4) необхідно обчислити геометричні розміри кожного пакету. Для ярма, що складений з трьох типорозмірів пакетів в половині перерізу, довжина більшого (третього) пакету $h_{\text{ш3}}$ відповідає значенню ширини шестигранного стрижня $b_{\text{с}}$ (рис. 5.4, а, б).

$$b_{\text{с}} = D_{1\text{шп}}. \quad (5.63)$$

Висота третього пакету $b_{\text{ш3}}$ визначається відповідно виходячи з рис. 5.4, та з умови забезпечення рівності відповідних ділянок площ перерізів стрижня та ярма, розрахункове східчасте ярмо об'єму, що еквівалентній реальному ярму, має віртуальні ділянки пакетів ЕТС, що виходять за межі шестигранника. При цьому еквівалентна цій площі частина розрахункової кутової зони не заповнена пакетами ЕТС. З рис. 5.4, в видно, що плоска основа ярма проходить через середину висоти грані шестигранника $h_{\text{уд}}$ та відділяє частину вершини цього шестигранника, при цьому площа ярма виходить за межі периметру шестигранника. Площа шестигранника, що відокремилася та площа частин ярма, які вишли за межі шестигранника тотожні. Теж саме спостерігається в східчастій вершині ярма, де кожен пакет, що має прямокутний переріз, виступає за периметр шестигранника, а виступ має ідентичну площу тій частині периметру шестигранника, що лишається не заповненою площиною пакету ЕТС. Таким чином конфігурація ярма (рис. 5.4) за рахунок плоскої основи матиме висоту $b_{\text{ш3}}$. Вказана висота визначається з застосуванням геометричних параметрів $a_{\text{ш}}$, $h_{\text{уд}}$ і $b_{\text{в}}$ (рис. 5.4, б):

$$a_{\text{ш}} = D_{1\text{шп}}/2; \quad (5.64)$$

$$h_{\text{уд}} = D_{1\text{шп}}/4; \quad (5.65)$$

$$b_{\text{в}} = D_{1\text{шп}}/24; \quad (5.66)$$

$$b_{\text{ш3}} = a_{\text{ш}} + \frac{1}{2}h_{\text{уд}} + 5b_{\text{в}} = \frac{1}{2}D_{1\text{шп}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}D_{1\text{шп}} + 5 \cdot \frac{1}{24}D_{1\text{шп}} = \frac{5}{6}D_{1\text{шп}}. \quad (5.67)$$

З (5.67) випливає, що $b_{ш3}$ на $(1/6)D_{1шп}$ менше ніж ширина стрижня.

Ширина третього пакету $h_{п3}$ визначається діленням ширини стрижня $b_{сп}$ на три частини

$$h_{п3} = \frac{1}{3}b_{сп} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D_{1шп}\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{6}D_{1шп}. \quad (5.68)$$

Ширина першого та другого пакету $h_{п1(2)}$ визначається діленням ширини стрижня $b_{сп}$ на шість частин

$$h_{п1(2)} = \frac{1}{6}b_{сп} = \frac{1}{6} \cdot \frac{D_{1шп}\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{12}D_{1шп}. \quad (5.69)$$

Довжина першого пакету $h_{ш1}$ визначається як сума довжини грані шестигранника $a_{ш}$ (5.64), висоти грані шестигранника $h_{уд}$ (5.65) та значення виступу пакету $b_{в}$ (5.66) за межі периметру шестигранника

$$h_{ш1} = a_{ш} + h_{уд} + b_{в} = \frac{1}{2}D_{1шп} + \frac{1}{4}D_{1шп} + \frac{1}{24}D_{1шп} = \frac{19}{24}D_{1шп}. \quad (5.70)$$

Висота першого пакету $b_{ш1}$ визначається сумою довжини грані (5.64), половини висоти грані шестигранника (5.65), та значення виступу пакету за межі периметру шестигранника (5.66)

$$b_{ш1} = a_{ш} + \frac{1}{2}h_{уд} + b_{в} = \frac{1}{2}D_{1шп} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}D_{1шп} + \frac{1}{24}D_{1шп} = \frac{31}{24}D_{1шп}. \quad (5.71)$$

Довжина другого пакету $h_{ш2}$ визначається як сума довжини першого пакету (5.70) та подвійного значення виступу пакету за межі периметру шестигранника (5.65)

$$h_{ш2} = h_{ш1} + 2b_{в} = \frac{19}{24}D_{1шп} + 2 \cdot \frac{1}{24}D_{1шп} = \frac{21}{24}D_{1шп}. \quad (5.72)$$

Висота другого пакету $b_{ш2}$ визначається сумою висоти першого пакету (5.71) та подвійного значення виступу пакету за межі периметру шестигранника (5.66)

$$b_{ш2} = b_{ш1} + 2b_{в} = \frac{31}{24}D_{1шп} + 2 \cdot \frac{1}{24}D_{1шп} = \frac{11}{8}D_{1шп}. \quad (5.73)$$

Об'єм кутової зони магнітопроводу (рис. 5.4) визначається на основі (5.62 – 5.73) обчисленням об'єму кожного пакету. Наприклад об'єм першого пакету V_1 визначається на основі (5.69 – 5.71) виразом

$$V_1 = (h_{п1}h_{ш1}b_{ш1})^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{12} D_{1шп} \cdot \frac{19}{24} D_{1шп} \cdot \frac{31}{24} D_{1шп} \right)^2 = \frac{19\sqrt{3}}{216} D_{1шп}^3. \quad (5.74)$$

Об'єм другого пакету V_2 (рис. 5.4) визначається на основі (5.69, (5.72) і (5.73) виразом

$$V_2 = (h_{п2}h_{ш2}b_{ш2})^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{12} D_{1шп} \cdot \frac{21}{24} D_{1шп} \cdot \frac{33}{24} D_{1шп} \right)^2 = \frac{189\sqrt{3}}{1728} D_{1шп}^3. \quad (5.75)$$

Об'єм третього пакету V_3 (рис. 5.4) визначається за допомогою (5.63), (5.67) і (5.68) виразом

$$V_3 = (h_{п3}h_{ш3}b_{ш3})^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{6} D_{1шп} \cdot \frac{5}{6} D_{1шп} \cdot D_{1шп} \right)^2 = \frac{5\sqrt{3}}{36} D_{1шп}^3. \quad (5.76)$$

Підсумкове значення об'єму кутової зони (рис. 5.4) визначається з врахуванням (5.74 – 5.76)

$$\begin{aligned} V_{куш} = V_1 + V_2 + V_3 &= \left(\frac{19\sqrt{3}}{216} D_{1шп}^3 + \frac{189\sqrt{3}}{1728} D_{1шп}^3 + \frac{5\sqrt{3}}{36} D_{1шп}^3 \right) = \\ &= \frac{1142\sqrt{3}}{3456} D_{1шп}^3 = 0,5723 D_{1шп}^3. \end{aligned} \quad (5.77)$$

ЕМС (рис. 5.3) містить чотири кутових зони об'єму (5.77), отже їх загальний об'єм становить

$$V_{куш3} = 4V_{куш} = 4 \cdot 0,5723 D_{1шп}^3 = 2,2893 D_{1шп}^3. \quad (5.78)$$

Підстановкою (5.78) у вираз (5.61) визначається об'єм магнітопроводу ЕМС (рис. 5.3) з шестигранними УК перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$$\begin{aligned} V_{шп} &= 3 \frac{D_{1шп}(a_m - 1)}{2} \lambda_B \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + 4 \frac{D_{1шп}(a_m - 1)}{2} \cdot \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + \\ &+ 2 D_{1шп} \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + 2,2893 D_{1шп}^3 = 2 D_{1шп}(a_m - 1) \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + 3 \frac{D_{1шп}(a_m - 1)}{2} \lambda_B \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2 + 2,289 D_{1\text{шп}}^3 + 2 D_{1\text{шп}} \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2 = D_{1\text{шп}}^3 \left(2(a_M - 1) \frac{3\sqrt{3}}{8} + 3(a_M - 1) \lambda_B \times \right. \\
& \quad \left. \times \frac{3\sqrt{3}}{8} + 2,289 + 2 \frac{3\sqrt{3}}{8} \right) = D_{1\text{шп}}^3 \left[\frac{6\sqrt{3}}{8} (a_M - 1) + \frac{9\sqrt{3}}{16} (a_M - 1) \lambda_B + \right. \\
& \quad \left. + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right]. \tag{5.79}
\end{aligned}$$

Визначення маси ЕТС магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 5.3, а) використовується з використанням (5.59), (5.61)

$$\begin{aligned}
m_{\text{мшп}} &= \gamma_{st} K_{3c} V_{\text{шп}} = \gamma_{st} K_{3c} \left[(3h_{\text{вшп}} + 4b_{\text{вшп}} + 2D_{1\text{шп}}) \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}} + \right. \\
& \quad \left. + 2,2893 D_{1\text{шп}}^3 \right] = \gamma_{st} K_{3c} \left[\left(3D_{1\text{шп}} \frac{(a_M - 1)}{2} \lambda_B + 4D_{1\text{шп}} \frac{(a_M - 1)}{2} + 2D_{1\text{шп}} \right) \times \right. \\
& \quad \left. \times \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2 + 2,2893 D_{1\text{шп}}^3 \right] = \gamma_{st} K_{3c} D_{1\text{шп}}^3 \times \\
& \quad \times \left[\frac{6\sqrt{3}}{8} (a_M - 1) + \frac{9\sqrt{3}}{16} (a_M - 1) \lambda_B + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right]. \tag{5.80}
\end{aligned}$$

З застосуванням базового рівняння (2.29), та виразів (5.59) і (5.60) отримується залежність між геометричними параметрами планарного магнітопроводу $\Pi_{\text{сшп}}$ і $b_{\text{вшп}}$ ЕМС з шестигранными УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$$\begin{aligned}
\Pi_{\text{сшп}} &= \Pi_{\text{тт}} / (K_{30} S_{\text{вш}}) = \Pi_{\text{тт}} / (K_{30} \lambda_B b_{\text{вшп}}^2) = \\
&= \Pi_{\text{тт}} / \left[K_{30} \lambda_B D_{1\text{шп}}^2 \frac{(a_M - 1)^2}{4} \right], \tag{5.81}
\end{aligned}$$

де $S_{\text{вш}}$ – площа обмоткового вікна ЕМС (рис. 5.3), що визначається з врахуванням (5.59), (5.60)

$$S_{\text{вш}} = b_{\text{вшп}}^2 \lambda_B = K_{30} \lambda_B \frac{D_{1\text{шп}}^2}{4} (a_M - 1)^2. \tag{5.82}$$

З рівності лівих частин виразу (5.62) і рівнянням (5.82) площі ЕТС перерізу стрижня

$$K_{3c} \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 = \Pi_{тт} / \left[K_{30} \lambda_B D_{1шп}^2 \frac{(a_M - 1)^2}{4} \right]. \quad (5.83)$$

Вираз внутрішнього розрахункового діаметру $D_{1шп}$ магнітопроводу стрижневої ЕМС з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3) визначається з рівняння (5.83)

$$D_{1шп} = \sqrt[4]{\frac{4\Pi_{тт}}{\frac{3\sqrt{3}}{8} K_{3c} K_{30} \lambda_B \frac{(a_M - 1)^2}{4}}}^3 = \sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}}^3. \quad (5.84)$$

Визначення середньої довжини витка розрахункової еквівалентної обмотки з шестигранними УК обмоткових котушок здійснюється на основі виразів (5.60) і (рис. 5.3)

$$\begin{aligned} l_{ошп} &= 6a_{ш} + \frac{2\pi b_{вшп}}{4} = 6\frac{1}{2} D_{1шп} + \frac{2(D_{1шп}/2)(a_M - 1)\pi}{4} = \\ &= 3D_{1шп} + \frac{\pi}{4} D_{1шп} (a_M - 1) = D_{1шп} \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right]. \end{aligned} \quad (5.85)$$

Маса АМО варіантів ЕМС схеми (рис. 5.3), що відрізняються мідними і алюмінієвими обмотками визначається на основі (2.31) та (5.60), (5.85) наступним рівнянням

$$\begin{aligned} m''_{ошпcu(al)} &= 1,5\gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B l_{ошп} b_{вкк}^2 = 1,5\gamma_{cu(al)} K_{30} \lambda_B \frac{D_{1шп}^2}{4} (a_M - 1)^2 D_{1шп} \times \\ &\times \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right] = \lambda_B K_{30} 1,5 \frac{D_{1шп}^3}{4} (a_M - 1)^2 \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right]. \end{aligned} \quad (5.86)$$

Після підстановки (5.84) в (5.80) та (5.86) рівняння маси ЕТС магнітопроводу і маси АМО ЕМС схеми (рис. 5.3) перетворюються:

$$\begin{aligned} m_{мшп} &= \gamma_{st} K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times \left[\frac{6\sqrt{3}}{8} (a_M - 1) + \frac{9\sqrt{3}}{16} (a_M - 1) \lambda_B + \right. \\ &\left. + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{тт}} \right)^3 \Pi_{мшпcu(al)}^*; \end{aligned} \quad (5.87)$$

$$m''_{\text{ошпсц}(al)} = 1,5\gamma_{\text{сц}(al)}K_{30}\lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3c}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 \frac{(a_M-1)^2}{4} \times$$

$$\times \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_M-1) \right] = \gamma_{\text{сц}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{ошпсц}(al)}, \quad (5.88)$$

де $\Pi^*_{\text{мшпсц}(al)}$ та $\Pi^*_{\text{ошпсц}(al)}$ – відносні показники мас магнітопроводу та АМО варіантів ЕМС схем (рис. 5.3) з мідними та алюмінієвими провідниками:

$$\Pi^*_{\text{мшпсц}(al)} = K_{3c} \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3c}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 \times$$

$$\times \left[\frac{6\sqrt{3}}{8}(a_M-1) + \frac{9\sqrt{3}}{16}(a_M-1)\lambda_B + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right]; \quad (5.89)$$

$$\Pi^*_{\text{ошпсц}(al)} = 1,5K_{30}\lambda_B \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3c}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 \frac{(a_M-1)^2}{4} \times$$

$$\times \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_M-1) \right]. \quad (5.90)$$

Маса $m_{\text{ашпсц}(al)}$ та вартість $C_{\text{ашпсц}(al)}$ активних матеріалів ЕМС схеми (рис. 5.3) визначаються, у відповідності з (2.27) і (2.28) та на основі (5.87), (5.88), рівняннями:

$$m_{\text{ашпсц}(al)} = m_{\text{мшп}} + m_{\text{ошп}} = \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{мшпсц}(al)} + \gamma_{\text{сц}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{ошпсц}(al)} =$$

$$= \gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{1\text{шпсц}(al)}; \quad (5.91)$$

$$C_{\text{ашпсц}(al)} = C_{\text{мшп}} + C_{\text{шпсц}(al)} = C_{st}\gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{мшпсц}(al)} + C_{\text{сц}(al)}\gamma_{\text{сц}(al)} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \times$$

$$\times \Pi^*_{\text{ошпсц}(al)} = C_{st}\gamma_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг}}} \right)^3 \Pi^*_{2\text{шпсц}(al)}. \quad (5.92)$$

де $C_{\text{сц}(al)}$ – питома вартість АМО; $\Pi^*_{1\text{шпсц}(al)}$ та $\Pi^*_{2\text{шпсц}(al)}$ – відносні показники маси та вартості активних матеріалів трифазної планарної ЕМС з шестигранними УК стрижнів, обмоткових котушок та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3):

$$\begin{aligned} \Pi_{1шпсу(al)}^* &= \Pi_{мшпсу(al)}^* + \gamma_{cu(al)} \Pi_{ошпсу(al)}^* / \gamma_{st} = \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3c}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 \times \\ &\times \left[K_{3c} \left[\frac{6\sqrt{3}}{8}(a_M-1) + \frac{9\sqrt{3}}{16}(a_M-1)\lambda_B + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] + 1,5K_{30}\lambda_B \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{(a_M-1)^2}{4} \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_M-1) \right] \gamma_{cu(al)} / \gamma_{st} \right]; \end{aligned} \quad (5.93)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2шпсу(al)}^* &= \Pi_{мшпсу(al)}^* + C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} \Pi_{ошпсу(al)}^* / (C_{st} \gamma_{st}) = \\ &= \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3}K_{3c}K_{30}\lambda_B(a_M-1)^2}} \right)^3 \times \left[K_{3c} \left[\frac{6\sqrt{3}}{8}(a_M-1) + \frac{9\sqrt{3}}{16}(a_M-1)\lambda_B + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] + 1,5K_{30}\lambda_B \frac{(a_M-1)^2}{4} \left[3 + \frac{\pi}{4}(a_M-1) \right] C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} / (C_{st} \gamma_{st}) \right]. \end{aligned} \quad (5.94)$$

Екстремальні значення (мінімуми) $\Pi_{1(2)шпсу(al)}^*$ показників (5.93) і (5.94) ЦФ (5.91), (5.92), що отримані при трьох величинах K_{30} при практично повному заповненні ЕТС контурного об'єму ($K_{кш} \approx 1$) і реальних співвідношеннях $C_{cu(al)}/C_{st}$, представлені в табл. 5.9. і табл. 5.10 і 5.11.

Таблиця 5.9 – Екстремуми показників маси та керованих змінних варіантів планарної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з мідною та алюмінієвою обмотками

Обозначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних, б.о.		Значення екстремумів показника маси ЕМС, б.о.
		a_{me}	λ_{ve}	
$\Pi_{1шпсу}^*$ (рис. 5.3)	0,3	3,35	3,37	28,39
	0,25	3,57	3,33	29,96
	0,15	4,28	3,24	35,20
$\Pi_{1шпа}^*$ (рис. 5.3)	0,3	5,18	3,15	17,05
	0,25	5,57	3,13	18,21
	0,15	6,84	3,05	22,08

Таблиця 5.10 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з мідною обмоткою

Позначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткової міді і електротехнічної сталі, в.о.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi^*_{2шпци}$ (рис. 5.3)	0,3	52,97	56,93	60,72	64,37	67,90
	0,25	55,13	59,17	63,03	66,74	70,33
	0,15	62,35	66,63	70,72	74,64	78,42

Таблиця 5.11 – Екстремуми показників вартості варіантів планарної електромагнітної системи з шестигранними утворюючими контурами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з алюмінієвою обмоткою

Обозначення показника маси варіанту системи	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Значення екстремумів показника вартості при співвідношенні вартості обмоткового алюмінію і електротехнічної сталі, в.о.				
		3	3,4	3,8	4,2	4,7
$\Pi^*_{2шпал}$ (рис. 5.3)	0,3	27,14	28,74	30,26	31,73	33,47
	0,25	28,67	30,32	31,89	33,39	35,19
	0,15	33,78	35,59	37,32	38,96	40,92

5.6. Показники втрат активної потужності системи з шестигранними утворюючими контурами обмоткових котушок і стрижнів

Об'єм ярем $V_{яшп}$ планарного магнітопроводу з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3) визначається

$$V_{яшп} = 4b_{вкк}S_{ш} + 2b_c S_{ш} + V_{куш}. \quad (5.95)$$

Підстановкою (5.60), (5.62) та з урахуванням (5.63) вираз (5.95) приймає вид

$$V_{яшп} = 4D_{1шп} \left(\frac{a_m - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + 2D_{1шп} \left(\frac{a_m - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1шп}^2 + 2,289D_{1шп}^3 =$$

$$= D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right]. \quad (5.96)$$

Об'єм стрижнів ЕМС з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3) визначається

$$V_{\text{сшп}} = 3h_{\text{вшп}} S_{\text{шп}} = 3D_{1\text{шп}} \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{3\sqrt{3}}{8} D_{1\text{шп}}^2 = D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right]. \quad (5.97)$$

Рівняння втрат неробочого руху ЕМС з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем після підстановки (5.96) та (5.97) приймає вид

$$\begin{aligned} P_{\text{ншп}} &= \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} (V_{\text{сшп}} + V_{\text{яшп}}) = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \\ &+ D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right] = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} \times \\ &\times D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right]. \quad (5.98) \end{aligned}$$

Загальне рівняння (2.37) втрат короткого замикання при підстановці (5.59), (5.60) і (5.85) відповідно до ЕМС (рис. 5.3) перетворюється

$$\begin{aligned} P''_{\text{кшпсу(al)}} &= 1,5K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су(al)}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B b_{\text{вшп}}^2 l_{\text{ошп}} = 1,5K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су(al)}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B D_{1\text{шп}}^2 \times \\ &\times \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 D_{1\text{шп}} \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right] = 1,5K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су(al)}} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B \times \\ &\times D_{1\text{шп}}^3 \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right]. \quad (5.99) \end{aligned}$$

Загальні втрати ЕМС з шестигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 5.3, а, в) визначаються підсумком (5.98) і (5.99) на основі рівняння

$$P''_{\Sigma\text{шп}} = P_{\text{ншп}} + P''_{\text{кшп}} = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{\text{зс}} D_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \left] + 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_B \Pi_{1\text{шп}}^2 \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right] = \\
& = \gamma_{st} P_{st} K_{\text{дн}} K_{3c} \Pi_{1\text{шп}}^3 \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right] + \\
& + 1,5 K_{30} K_{pcu(al)} \lambda_B \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right]. \tag{5.100}
\end{aligned}$$

При підстановці (5.84) рівняння підсумкових втрат (5.100) ЕМС (рис. 5.3) має вид

$$\begin{aligned}
P_{\Sigma\text{шп}} & = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} K_{ki} \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \times \right. \right. \\
& \times \left. \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right] + 1,5 K_{\text{дк}} K_{30} K_{\text{уп}} \lambda_B \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 \times \\
& \left. \left. \times \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right] \right] \right] = \gamma_{st} P_{st} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт}}} \right)^3 \Pi_{3\text{шп}cu(al)}^*, \tag{5.101}
\end{aligned}$$

де $\Pi_{3\text{шп}cu(al)}^*$ – показник втрат активної потужності ЕМС (рис. 5.3),

$$\begin{aligned}
\Pi_{3\text{шп}cu(al)}^* & = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \left[K_{3c} \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \lambda_B \frac{9\sqrt{3}}{8} \right] + \right. \\
& + \left[\left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{2} + \left(\frac{a_M - 1}{2} \right) \frac{3\sqrt{3}}{4} + 2,289 \right] + 1,5 K_{\text{дк}} K_{30} K_{pcu(al)} \lambda_B \left(\frac{a_M - 1}{2} \right)^2 \times \\
& \left. \left. \times \left[3 + \frac{\pi}{4} (a_M - 1) \right] \right] \right]. \tag{5.102}
\end{aligned}$$

Екстремуми (мінімуми) $\Pi_{3\text{шп}cu(al)}^*$ показника втрат активної потужності (5.102) ЦФ (5.101) при трьох значеннях K_{30} і співвідношеннях електромагнітних навантажень і питомих характеристик матеріалів (2.38), (2.39) ЕМС (рис. 5.3) з мідними (алюмінієвими) обмотками наведені в табл. 5.12

Таблиця 5.12 – Екстремуми показників втрат активної потужності варіантів планарної електромагнітної системи з шестигранными утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток, що відрізняються плоскими внутрішніми поверхнями ярем

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремуми показника втрат активної потужності, б.о. при співвідношенні коефіцієнтів додаткових втрат, питомих характеристик матеріалів (електротехнічна сталь, мідь, алюміній) і електромагнітних навантажень		
	$\Pi_{3шпсу(al)e}^*$		
	3	8	24
0,3	66,37	113,43	220,24
0,25	69,31	117,22	225,25
0,15	79,14	129,84	241,95

Наведені в табл. 4.1 – табл. 4.4, табл. 5.9 – табл. 5.12 результати розрахунків визначають співвідношення масовартісних показників та показників втрат активної потужності трифазної ЕМС з круговими УК стрижнів, ярем і обмоткових котушок з відповідно аналогічними показниками ЕМС, що має шестигранні УК стрижнів і обмоткових котушок і плоскі внутрішні поверхні ярем східчастих перерізів прийнятих діапазонів змін $K_{30}=0,3\dots 0,15$, $C_{cu}/C_{st}=3,5' \dots 5,5''$, $C_{al}/C_{st}=3' \dots 4,7''$, $K_{pcu(st)}=3' \dots 24''$, $K_{кк}=0,931$:

$$(\Pi_{1ккcu}^*/\Pi_{1шпсу}^*)=(28,51/28,39)\dots(35,34/35,20)=1,0047\dots 1,003;$$

$$(\Pi_{1ккаl}^*/\Pi_{1шпал}^*)=(17,11/17,05)\dots(22,14/22,08)=1,003\dots 1,002;$$

$$(\Pi_{2ккcu}^*/\Pi_{2шпсу}^*)'=(53,22/52,97)\dots(62,63/62,35)=1,005\dots 1,004;$$

$$(\Pi_{2ккаl}^*/\Pi_{2шпал}^*)'=(27,25/27,14)\dots(33,91/33,78)=1,004\dots 1,003;$$

$$(\Pi_{2ккcu}^*/\Pi_{2шпсу}^*)''=(68,23/67,90)\dots(78,78/78,42)=1,005\dots 1,004;$$

$$(\Pi_{2ккаl}^*/\Pi_{2шпал}^*)''=(33,62/33,47)\dots(41,09/40,92)=1,005\dots 1,004;$$

$$(\Pi_{3ккcu(al)}^*/\Pi_{3шпсу(al)}^*)'=(66,67/66,36)\dots(79,49/79,14)=1,005\dots 1,004;$$

$$(\Pi_{3ккcu(al)}^*/\Pi_{3шпсу(al)}^*)''=(221,34/220,24)\dots(243,156/241,956)=1,005\dots 1,004.$$

5.7. Висновки до розділу 5

5.7.1. Заміна в традиційних ЕМС з круговими УК обмоткових котушок і стрижнів кругових УК ярем на ярма з східчастими зовнішніми і плоскими

внутрішніми поверхнями та з пакетами ЕТС, що відповідають пакетам стрижнів, призводить до деякого покращення (зменшення) екстремальних значень показників маси вартості і втрат. При $K_{\text{кк}}$, що приймає значення 0,851, 0,861 і 0,931 показники маси покращуються відповідно на ((0,48-0,42)%, (0,49-0,42)%, (0,48-0,42)%) при мідних обмотках та на ((0,38-0,27)%, (0,38-0,29)%, (0,35-0,27)%) при алюмінієвих обмотках. При названих $K_{\text{кк}}$ показники вартості покращуються на ((0,62-0,53)%, (0,63-0,56)%, (0,63-0,57)%) при мідних обмотках та на ((0,52-0,43)%, (0,49-0,41)%, (0,48-0,41)%) при алюмінієвих обмотках. Покращення (зменшення) екстремальних значень показників втрат активної потужності при заміні кругових УК ярем на ярма з плоскими внутрішніми поверхнями та при вказаних умовах складає відповідно ((0,67-0,61)%, (0,67-0,61)% і (0,66-0,60)%).

5.7.2. При заміні в ЕМС з восьмигранними УК обмоткових котушок і стрижнів восьмигранних УК яремних зон на конфігурацію перерізів ярем з східчастими зовнішніми та плоскими внутрішніми поверхнями покращуються (зменшуються) екстремальні значення показників маси вартості і втрат. Вказане перетворення при $K_{\text{кв}}$ 0,9, 0,931 та 1 покращує показники маси на ((0,56-0,43)%, (0,56-0,42)%, (0,54-0,41)%) при мідних обмотках та на ((0,34-0,24)%, (0,34-0,23)%, (0,33-0,23)%,) при алюмінієвих обмотках. Показники вартості покращуються відповідно на ((0,91-0,75)%, ((0,90-0,73)%, (0,89-0,72)%), при мідних обмотках та на ((0,59-0,46)%, (0,58-0,43)%, (0,57-0,43)%) при алюмінієвих обмотках. Покращення (зменшення) екстремальних значень показників втрат активної потужності при вказаній заміні та при $K_{\text{кв(п)}}$, що приймає значення 0,9, 0,931 та 1 становить ((1,04-0,85)%, (1,03-0,84)% та (1,01-0,82)%).

5.7.3. Заміна кругових УК стрижнів зі значеннями $K_{\text{кк}}$ 0,851; 0,861; 0,931 на восьмигранні зі значеннями $K_{\text{кв}}$ 0,9; 0,931; 1 при плоских внутрішніх поверхнях ярем призводить до покращення (зменшення) екстремумів показників маси, вартості і втрат. Показники маси покращуються на ((1,44-1,19)%, (1,90-1,57)%, (1,72-1,42)%) при мідних обмотках і на ((1,03-1,17)%, (1,35-1,03)%, (1,19-0,93)%) при алюмінієвих обмотках. При вказаних $K_{\text{кк}}$ та $K_{\text{кв}}$ показники вартості

покращуються на $((2,06-1,77)\%$, $(2,7-2,32)\%$, $(2,47-2,13)\%$) при мідних обмотках і на $((1,52-1,24)\%$, $(1,96-1,61)\%$, $(1,78-1,46)\%$) при алюмінієвих обмотках. Покращення екстремальних значень показників втрат активної потужності при вказаних перетвореннях та зазначених вище $K_{\text{кк}}$ та $K_{\text{кв}}$ становить $(2,23-1,94)\%$, $(2,92-2,55)\%$ та $(2,67-2,33)\%$.

5.7.4. Заміна кругових УК стрижнів ($K_{\text{кк}}=0,931$) на шестигранні з повним заповненням при плоских внутрішніх поверхнях ярем призводить до покращення основних ПТР. При мідних та алюмінієвих обмотках показники маси і вартості покращуються відповідно на $(0,41-0,38)\%$ $(0,49-0,46)\%$ та на $(0,34-0,27)\%$ і $(0,43-0,37)\%$. Покращення екстремальних значень показників втрат активної потужності при вказаній заміні складає $(0,49-0,48)\%$.

5.7.5. Наведені вище висновки 5.7.1-5.7.3 для значень $K_{\text{кк}}=0,861$, $K_{\text{кк}}=0,931$ та $K_{\text{кв}}=0,931$, $K_{\text{кв}}=1$ отримані за схемами та по рівнянням, які аналогічні рівнянням підрозділів 5.1-5.4. Результати розрахунків [48], що визначають такі висновки, в графічному вигляді подано в розділі 6.

РОЗДІЛ 6

ПІДСУМКИ ТА ПЕРЕВІРКА ОКРЕМИХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНОГО
СИНТЕЗУ ВАРІАНТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ6.1. Результати розрахунків окремих критеріїв оптимізації активної
частини електромагнітних статичних пристроїв

Числове співставлення отриманих значень екстремумів безрозмірних ПТР варіантів однофазних і трифазних ЕСП можна представити у вигляді гістограм (рис. 6.1- рис. 6.4). На вказаних гістограмах відрізки, що прокладені по осі Π^*_{1-3ii} із значеннями екстремумів ПТР (маси, вартості та втрат активної енергії) порівнювальних ЕМС містять виноски з вказаними у відсотках значеннями зміни ПТР порівнювальних структур.

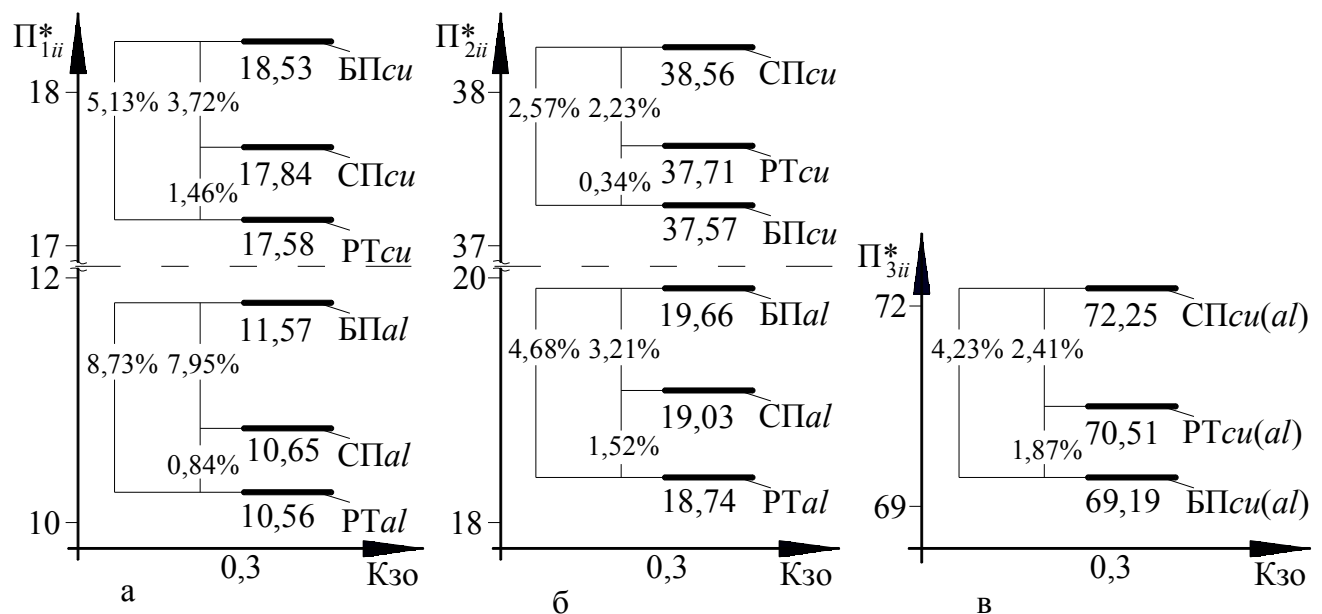


Рисунок 6.1. Значення залежностей екстремумів показників маси (а), вартості (б) та втрат (в) варіантів однофазних електромагнітних систем з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та ярем:

Π^*_{1ii} , Π^*_{2ii} , Π^*_{3ii} – показники маси, вартості, втрат активної потужності, де індекс ii приймає позначення, що відповідає позначенням табл. 2.1 варіанту електромагнітної системи

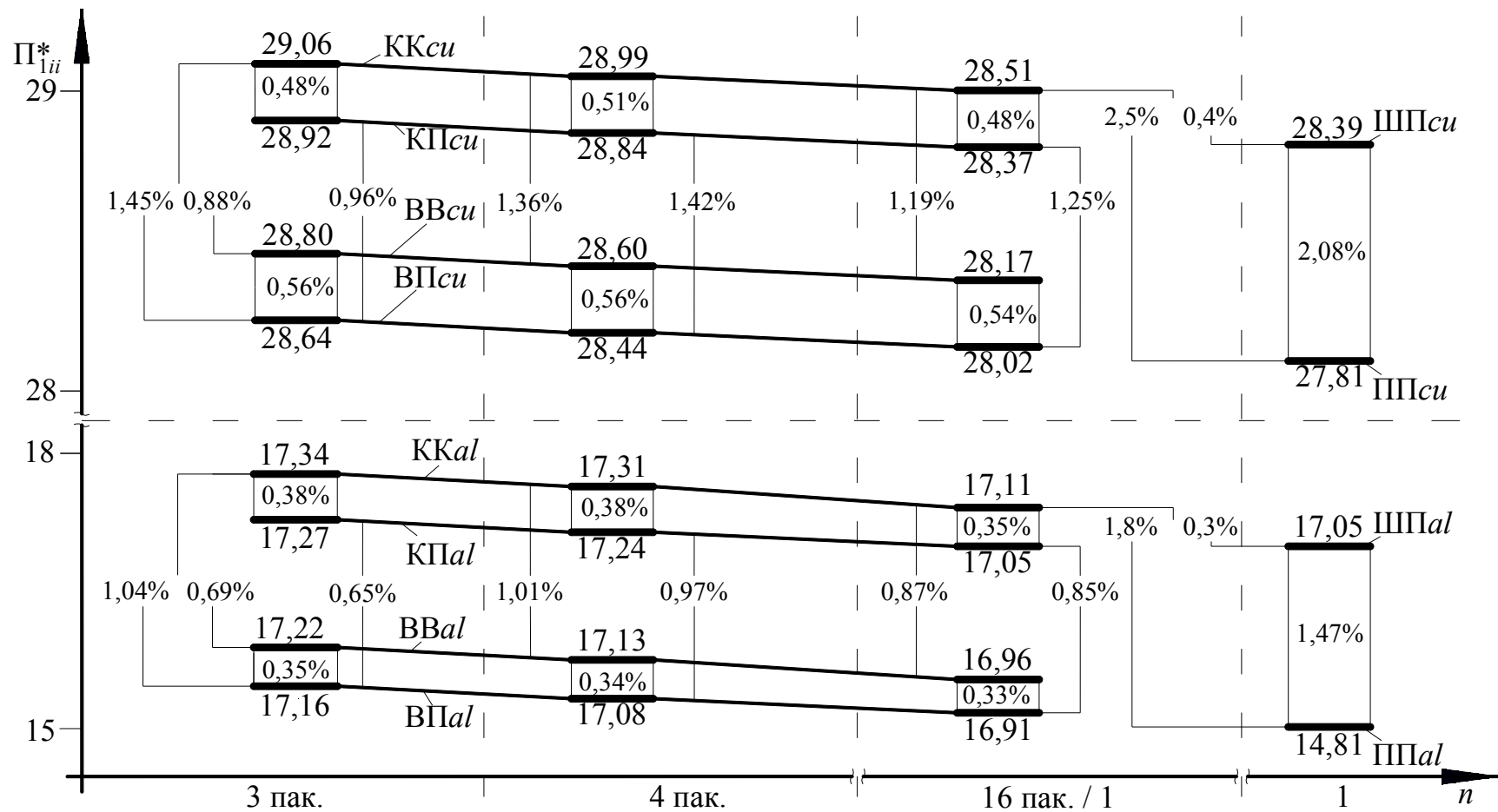


Рисунок 6.2. Значення залежностей екстремумів показників маси при $K_{30}=0,3$ варіантів трифазних електромагнітних систем з круговими, восьмигранними, шестигранними та прямокутними утворюючими контурами стрижнів, де Π_{1ii}^* – показник маси з індексом ii , що відповідає позначенням табл. 2.1, в залежності від заповнення утворюючого контуру перерізу стрижня електротехнічною сталлю при числі пакетів n , 1 відповідає повному заповненню утворюючого контуру стрижня

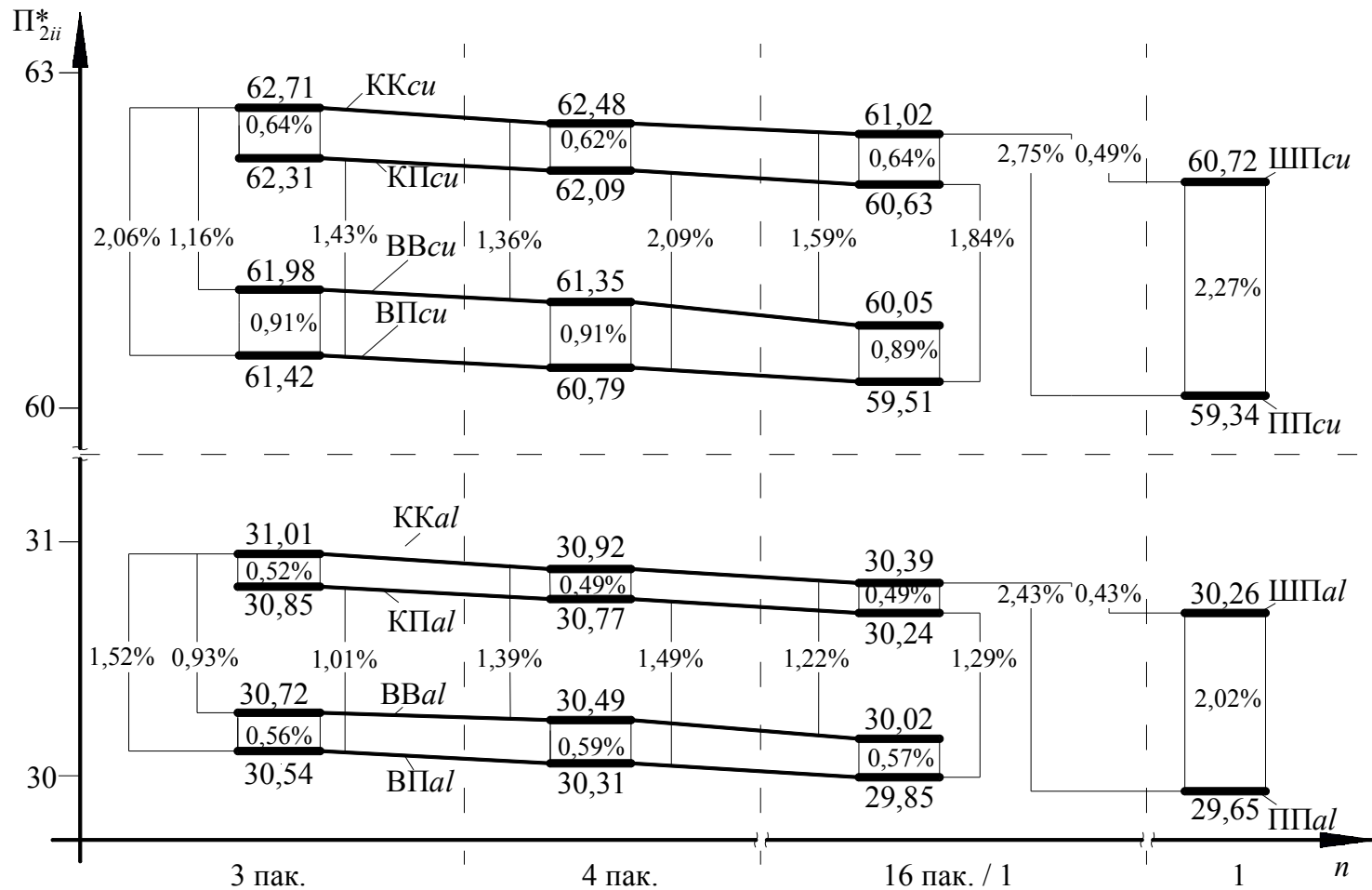


Рисунок 6.3. Значення залежностей екстремумів показників вартості при ($K_{30}=0,3$) і $C_{cu(al)}/C_{st} = 4,5(3,8)$ варіантів трифазних електромагнітних систем з круговими, восьмигранними, шестигранними та прямокутними утворюючими контурами стрижнів, де Π_{2ii}^* – показник вартості з індексом ii , що відповідає позначенням табл. 2.1, в залежності від заповнення утворюючого контуру перерізу стрижня електротехнічною сталлю при числі пакетів n , 1 відповідає повному заповненню утворюючого контуру перерізу стрижня

Наведені гістограми (рис. 6.1. – рис. 6.4), дозволяють співставити значення покращення ПТР порівнювальних ЕМС в широкому діапазоні. На координатній площині по вісі показника технічного рівня $\Pi^*_{(1-3)ij}$ варіантів ЕМС з 3, 4, 16 пакетами листів ЕТС в половині перерізу стрижня та з повним заповненням ЕТС, що в якості приклада визначені при значенні $K_{30}=0,3$, прокладені відрізки із значеннями екстремумів показників маси, вартості та втрат активної потужності. Стовпи з відрізками з'єднуються горизонтальними сполучними лініями та утворюють сімейства значень змін екстремумів ПТР для певної структури ЕМС та мають буквене позначення, яке є значенням індекса ij відповідного показника $\Pi^*_{(1-3)ij}$ ЕМС як з мідним так і з алюмінієвим обмотковими матеріалами.

Деяке покращення ПТР відбувається підвищенням коефіцієнта заповнення активного перерізу стрижня ЕТС при сталій кількості пакетів листів ЕТС за рахунок заміни кругових УК стрижнів на $n \geq 6$ гранні та формуванням комбінованих магнітопроводів з шихтованими середніми частинами стрижнів і ярем і стиковими їх боковими частинами для ЕМС трансформаторів, а також стикових магнітопроводів реакторів з плоскими внутрішніми поверхнями ярем.

Числове значення покращення ПТР порівнювальних варіантів ЕМС представлено у %, а сполучні лінії вказують які саме варіанти ЕМС порівнювалися для отримання цього значення. Така якісна та кількісна оцінка результатів структурного синтезу ЕМС уявляється корисним довідниковим матеріалом для проектувальників та спеціалістів у галузі трансформаторобудування.

6.2. Розрахунок основних характеристик варіантів трифазного трансформатора потужністю 40 кВ·А, що перебуває у виробництві

Трифазний трансформатор ТМ 40/10У1 (виробник ТОВ "УКРЕЛЕКТРОАПАРАТ", м. Хмельницький) призначений для застосування в силових розподільчих підстанціях та пристроях.

Технічна характеристика ТМ 40/10У1: номінальна потужність $S_H = 40 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $f_1 = 50 \text{ Гц}$; $U_1=10000 \text{ В}$; $U_2=400 \text{ В}$; $U_K = 3,98 \%$; $I_1 = 2,31 \text{ А}$; $I_2 = 57,74 \text{ А}$; маса виїмної частини $m_{\text{ТМ}} = 190 \text{ кг}$; маса активної частини 154 кг ; маса масла 110 кг ; схема та група з'єднання $Y/Y_H - 0$. Конструктивна схема і розміри елементів ЕМС вказаного трансформатора наведені на рис. 6.5. Загальний вид наочного навчального зразка та данні характеристики ТМ 40/10У1 наведено на рис. 6.6. Активна частина ТМ 40/10У1 відповідає схемі (рис. 2.3) з круговими УК стрижнів, обмоткових катушок і ярем та містить шихтований вперепліт магнітопровід з косими стиками і виступами – "вусами". Нормовані втрати неробочого руху і короткого замикання трансформатора ТМ 40/10У1 складають $P_H=150\text{Вт}$ і $P_K=880 \text{ Вт}$.

Відносні КЗ розрахунку ТМ 40/10У1, що відповідають розмірам (рис. 6.5), визначаються з врахуванням (рис. 2.11, в) співвідношеннями:

$$a'_M = \frac{D'_{1\text{КК}}}{D'_{2\text{КК}}} = \frac{340}{105} = 3,238; \quad \lambda'_B = \frac{h'_B}{b'_B} = \frac{325}{125} = 2,6.$$

Коефіцієнти напруги первинної та вторинної обмоток:

$$K_{U1} = \frac{1 - \Delta U\%}{200} = \frac{1 - 2,8}{200} = 0,986;$$

$$K_{U2} = \frac{1 + \Delta U\%}{200} = \frac{1 + 2,8}{200} = 1,014.$$

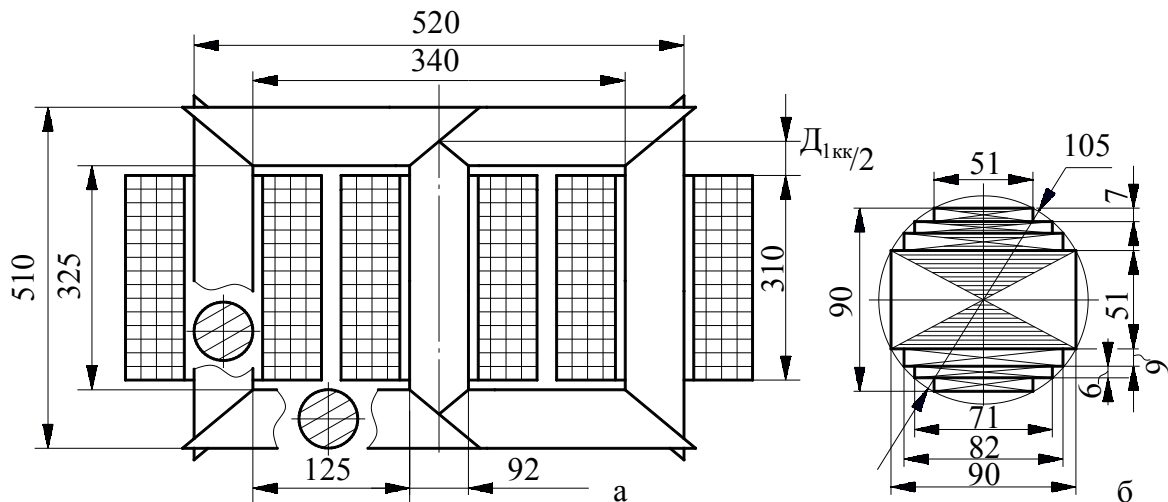


Рисунок 6.5 – Конструктивна схема, розміри елементів активної частини (а) та пакетів електротехнічної сталі стрижня (б) трифазного трансформатора ТМ 40/10У1

Величина ККД ТМ 40/10У1 складає

$$\eta = 1 - \frac{P_H + P_K}{S_H \cdot 10^3 + P_H + P_K} = 1 - \frac{150 + 880}{40 \cdot 10^3 + 150 + 880} = 0,975.$$

Показник вихідних даних та ЕМН ТМ 40/10У1

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ТТМ}} &= \frac{S_H \cdot 10^3}{6,66 J_0 B_c f_1} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{\eta \cos \varphi_1} + K_{U2} \right) = \frac{40 \cdot 10^3}{6,66 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 50} \times \\ &\times \left(\frac{0,986 \cdot 0,88}{0,975 \cdot 0,96} + 1,014 \right) = 5,486 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4, \end{aligned}$$

де прийняти, згідно рекомендаціям [15], значення $J_0 = 2,5 \cdot 10^6$ А/мм²; $B_c = 1,7$ Тл; також прийнято марку ЕТС 3407 та значення енергетичних коефіцієнтів навантаження трансформатора ТМ 40/10У1:

$$\cos \varphi_2 = 0,85; \quad \cos \varphi_1 = 0,96.$$

На основі (3.14), (3.15) визначається коефіцієнт заповнення обмоткового вікна $K'_{\text{зо ТМ}}$ ТМ 40/10У1 з геометричними розмірами (рис. 6.1):

$$K'_{\text{зо ТМ}} = \frac{(5,093)^4 \Pi_{\text{ТТМ}}}{\left[(D'_{\text{ІКК}})^4 K_{\text{зс}} K_{\text{КК}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2 \right]} = \frac{5,093 \cdot 5,486 \cdot 10^{-5}}{\left[(0,105)^4 \cdot 0,97 \cdot 0,861 \cdot 2,6(3,238-1)^2 \right]} = 0,251,$$

де $K_{\text{КК}} = 0,861$ відповідає чотирьом сходинкам в половині УК перерізу стрижня (рис. 6.5, рис. 6.6).

Відносний показник (2.27) маси активних матеріалів ЕМС трансформатора ТМ 40/10У1

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{\text{ІККсу}}^* \right)' &\approx 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{\text{зс}} K_{\text{КК}} K'_{\text{зоТМ}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2}} \right)^3 \left\{ K_{\text{зс}} K_{\text{КК}} \left[(a_M - 1)(2 + 1,5 \lambda_B) + 6,215 \right] + \right. \\ &+ 1,178 \frac{\gamma_0}{\gamma_c} K'_{\text{зоТМ}} \lambda'_B (a_M - 1)^2 \left[1 + \frac{a_M - 1}{4} \right] \left. \right\} = 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{0,97 \cdot 0,861 \cdot 0,251 \cdot 2,6(3,238-1)^2}} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ 0,97 \cdot 0,861 \cdot \left[(3,238 - 1)(2 + 1,5 \cdot 2,6) + 6,215 \right] + 1,178 \frac{8940}{7650} 0,251 \times \right. \\ &\left. \times 2,6(3,238 - 1)^2 \left[1 + \frac{3,238 - 1}{4} \right] \right\} = 27,117. \end{aligned}$$



а



б

СТОРОНА ВН		СТОРОНА НН		СХЕМА И ГРУППА СОЕДИНЕНИЯ	
СТУПЕНЬ ПЕРЕКЛ.	НАПРЯЖ. В	ТОК, А	НАПРЯЖ. В		ТОК, А
I	+5.0%			У/УН-0	
II	+2.5%				
III	10000	2,31	400,0		МАССА, КГ
IV	-2.5%				Масла 86
V	-5.0%				Активной части 154
				Полная 280	

ОАО "Укрэлектроаппарат"
 ТРАНСФОРМАТОР
 ТИП ТМ-40/10У1
 Мощность 40 кВА 50 Гц Фаз3 Uk % 3,98
 ЗАВ. N 042181 ТУ У 3.49-05758084-016-2000 2008 г.
 СДЕЛАНО В УКРАИНЕ г. Хмельницкий
 www.ukrelektroapparat.km.ua

в

Рисунок 6.6 – Загальний вид (а), кутова зона магнітопроводу (б) і технічна характеристика (в) трифазного трансформатора ТМ 40/10У1

Маса активної частини ЕМС трансформатора ТМ 40/10У1 (рис. 6.6, а) визначається з використанням ЦФ (2.19) та відповідає загальній масі виємної частини та масі активної частини (рис. 6.6, б, в)

$$m'_k \approx \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ ТМ}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{Ікксу}}^* \right)' = 7650 \left(\sqrt[4]{5,486 \cdot 10^{-5}} \right)^3 27,117 = 153,824, \text{ кг.}$$

КЗ ЦФ втрат активної потужності (2.34) ТМ 40/10У1

$$K'_{\text{рсu}} = \frac{K_{\text{дк}} \gamma_o K_{\text{по}} J_o^2}{K_{\text{дн}} \gamma_c P'_{\text{пв}}} = \frac{1,04 \cdot 8940 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,5 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 7,038.$$

де $P'_{\text{пв}} = 1,36$ Вт/кг – питомі втрати ЕТС марки 3407 при $B_c = 1,7$ Тл.

Показник втрат активної потужності ТМ 40/10У1 визначається на основі (2.32):

$$\begin{aligned}
\left(\Pi_{3\text{ККCu}}^*\right)' &\approx K_{\text{дн}} 0,785 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} K'_{30\text{ТМ}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2}} \right)^3 \left\{ K_{3\text{C}} K_{\text{КК}} \left[(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + \right. \right. \\
&+ 6,215 \left. \right] + 1,178 K'_{\text{pcu}} K'_{30} \lambda'_B (a_M - 1)^2 \left[1 + \frac{a_M - 1}{4} \right] \left. \right\} = 1,475 \cdot 0,785 \times \\
&\times \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{0,97 \cdot 0,861 \cdot 0,251 \cdot 2,6(3,238 - 1)^2}} \right)^3 \left\{ 0,97 \cdot 0,861 \left[(3,238 - 1) \times \right. \right. \\
&\times (2 + 1,5 \cdot 2,6) + 6,215 \left. \right] + 1,178 \cdot 7,038 \cdot 0,251 \cdot 2,6(3,238 - 1)^2 \times \\
&\left. \left. \times \left[1 + \frac{3,238 - 1}{4} \right] \right\} = 123,63.
\end{aligned}$$

Втрати активної потужності трансформатора ТМ 40/10У1

$$\begin{aligned}
P'_{\Sigma\text{ВККCu}} &= \gamma_c P'_{\text{пв}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ ТМ}}} \right)^3 \left(\Pi_{3\text{ККCu}}^* \right)' = \\
&= 7650 \cdot 1,36 \left(\sqrt[4]{5,486 \cdot 10^{-5}} \right)^3 123,63 = 1,027 \cdot 10^3 \text{ Вт.}
\end{aligned}$$

Розрахункова величина ККД ТМ 40/10У1 має значення

$$\eta' = 1 - \frac{P'_{\Sigma\text{В}}}{(S_{\text{H}} + P'_{\Sigma\text{В}})} = 1 - \frac{1,027 \cdot 10^3}{(40 \cdot 10^3 + 1,027 \cdot 10^3)} = 0,975.$$

Розрахункове значення коефіцієнту корисної дії трансформатора ТМ 40/10У1 становить 0,975, що відповідає реальному нормованому значенню.

6.3. Основні характеристики аналога серійного зразка потужністю 40 кВ·А з восьмигранними утворюючими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

При використанні (4.51) та показника вихідних даних ТМ 40/10У1, а також екстремумів КЗ (табл. 5.5): $a_M=3,257$ та $\lambda_B=3,39$ при $K_{30}=0,251$ та $K_{\text{КВ}}=0,931$, для ЕМС схеми (рис. 4.2, б, г) при чотирьох пакетах в половині восьмигранного УК стрижня розраховується значення розміру діаметру $D_{1\text{ВВ}}$ аналога (рис. 6.7)

$$D'_{1\text{ВВ}} = \sqrt[4]{\frac{5,664\Pi_{\text{ТТ ТМ}}}{K_{\text{ЗС}}K'_{\text{З0}}K_{\text{К}}\lambda_{\text{В}}(a_{\text{М}} - 0,924)^2}} =$$

$$= \sqrt[4]{\frac{5,664 \cdot 5,486 \cdot 10^{-5}}{0,97 \cdot 0,251 \cdot 0,931 \cdot 3,39(3,257 - 0,924)^2}} = 0,097 \text{ м.}$$

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу ЕМС аналога (рис. 6.7, а) визначається з використанням (4.37)

$$b''_{\text{ВВП}} = D''_{1\text{ВП}} \frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} = 0,097 \frac{3,257 - 0,924}{2} = 0,113 \text{ м.}$$

Висота обмоткового вікна визначається з використанням (4.36)

$$h''_{\text{ВВП}} = \lambda_{\text{В}} b''_{\text{ВВП}} = 3,257 \cdot 0,113 = 0,368 \text{ м.}$$

На основі (4.43) визначається ширина восьмигранного стрижня

$$b''_{\text{СВП}} = D''_{1\text{ВП}} 0,924 = 0,097 \cdot 0,924 = 0,09 \text{ м.}$$

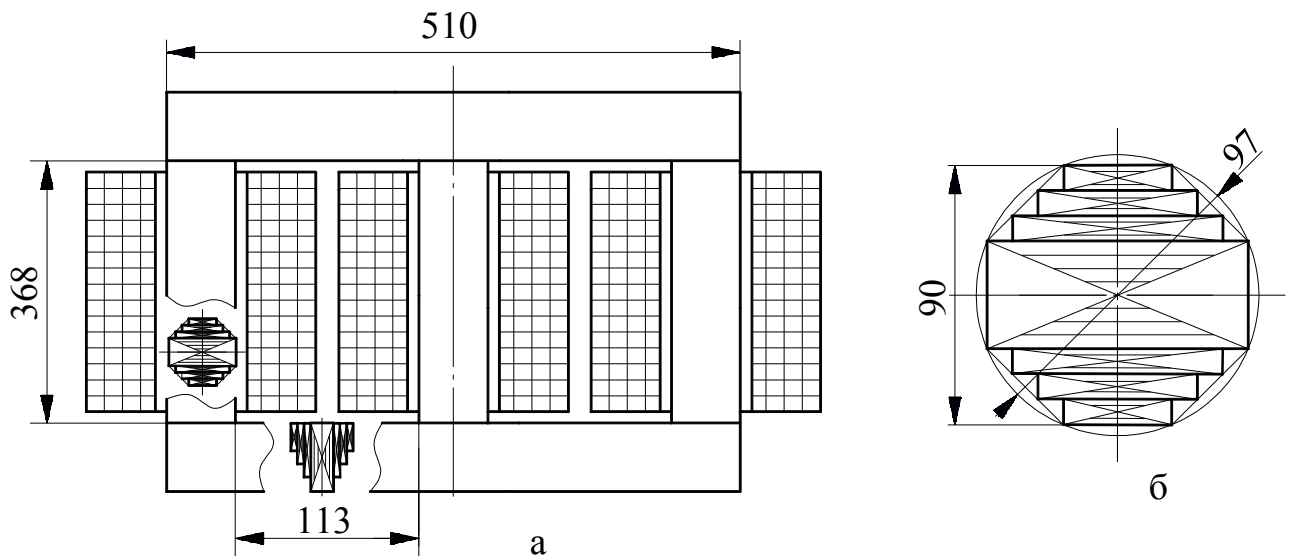


Рисунок 6.7 – Конструктивна схема, розміри елементів активної частини (мм) (а) та пакетів електротехнічної сталі стрижня (б) трифазного трансформатора з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярם

Площа поперечного перерізу сталі стрижня з восьмигранними УК (рис. 6.7, б) визначається на основі (4.38)

$$\Pi''_{\text{ССВП}} = K_{\text{ЗС}} 0,707 D''_{1\text{ВП}}{}^2 = 0,97 \cdot 0,707 \cdot 0,097^2 = 6,453 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Зовнішній розрахунковий діаметр розраховується по (4.35)

$$D''_{2\text{ВП}} = D''_{1\text{ВП}} \cdot a''_{\text{М}} = 0,097 \cdot 3,257 = 0,316 \text{ м}.$$

Довжина ярма

$$l''_{\text{ЯВП}} = D''_{2\text{ВП}} + 2D''_{1\text{ВП}} = 0,316 + 2 \cdot 0,097 = 0,51 \text{ м}.$$

Маса активних матеріалів (5.50) ЕМС (рис. 6.7) становить

$$\begin{aligned} m_{\text{атм}} &= \gamma_{\text{с}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ ТМ}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{ВП4су}}^* \right)' = 7650 \left(\sqrt[4]{5,486 \cdot 10^{-5}} \right)^3 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{ЗС}} K_{\text{К}} K_{\text{З0}} \lambda''_{\text{В}} (a''_{\text{М}} - 0,924)}} \right)^3 \times \\ &\times \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{К}} \left[2,828 \left(\frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} \right) + 2,121 \left(\frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} \right) \lambda''_{\text{В}} + 3,729 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\gamma_{\text{о}}}{\gamma_{\text{с}}} K_{\text{З0ТМ}}'' \lambda''_{\text{В}} 1,5 \times \left(\frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} \right)^2 \left[3,0616 + \frac{\pi}{4} (a''_{\text{М}} - 0,924) \right] \right] = \\ &= 7650 \left(\sqrt[4]{6,516 \cdot 10^{-5}} \right)^3 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{0,97 \cdot 0,931 \cdot 0,251 \cdot 3,39 (3,257 - 0,924)}} \right)^3 \times \\ &\times \left[0,97 \cdot 0,931 \left[2,828 \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right) + 2,121 \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right) 3,39 + 3,729 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{8940}{7650} 0,251 \cdot 3,39 \cdot 1,5 \times \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right)^2 \left[3,0616 + \frac{\pi}{4} (3,257 - 0,924) \right] \right] = 151,523 \text{ кг}. \end{aligned}$$

На основі (5.57) та з використанням значень електромагнітних КЗ (2.38) визначається показник втрат активної потужності

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{\text{ЗВПсу}}^* \right)'' &= K_{\text{ДН}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{ЗС}} K_{\text{К}} K_{\text{З0}} \lambda''_{\text{В}} (a''_{\text{М}} - 0,924)}} \right)^3 \times \\ &\times \left[K_{\text{ЗС}} K_{\text{К}} \left[2,828 \left(\frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} \right) + 2,121 \left(\frac{a''_{\text{М}} - 0,924}{2} \right) \lambda''_{\text{В}} + 3,729 \right] + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +K''_{\text{зотм}} \lambda''_{\text{в}} K''_{\text{рсу(al)}} 1,5 \times \left(\frac{a''_{\text{м}} - 0,924}{2} \right)^2 \left[3,0616 + \frac{\pi}{4} (a''_{\text{м}} - 0,924) \right] = \\
& = 1,475 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{0,97 \cdot 0,931 \cdot 0,251 \cdot 3,39 (3,257 - 0,924)}} \right)^3 \times \\
& \times \left[0,97 \cdot 0,931 \left[2,828 \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right) + 2,121 \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right) 3,39 + 3,729 \right] + \right. \\
& \left. + 0,251 \cdot 3,39 \cdot 7,038 \cdot 1,5 \left(\frac{3,257 - 0,924}{2} \right)^2 \left[3,0616 + \frac{\pi}{4} (3,257 - 0,924) \right] \right] = 120,517.
\end{aligned}$$

На основі (2.33) втрати активної потужності аналога (рис. 6.7) визначаються

$$P''_{\Sigma \text{ВП}} = \gamma_c P'_{\text{ПВ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ ТМ}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{ЗВПсу}}^* \right)'' = 7650 \cdot 1,36 \left(\sqrt[4]{5,486 \cdot 10^{-5}} \right)^3 120,517 = 1004 \text{ Вт.}$$

Величина коефіцієнта корисної дії аналога (рис. 6.3)

$$\eta'' = 1 - \frac{P''_{\Sigma \text{ВП}}}{(S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P''_{\Sigma \text{ВП}})} = 1 - \frac{1,004 \cdot 10^3}{(40 \cdot 0,85 + 1,004 \cdot 10^3)} = 0,977.$$

Маса ЕМС та ККД аналога з восьмигранними УК (рис. 6.7) наближені до значення трансформатора ТМ 40/10У1 та мають покращені значення у відповідності з результатами підрозділів 4.3 і 4.4.

6.4. Розрахунок основних характеристик трифазного трансформатора потужністю 2500 кВ·А, що перебуває у виробництві

Трифазний трансформатор ТМН 2500/35У1 призначений для застосування в силових розподільчих підстанціях та пристроях.

Технічна характеристика ТМН 2500/35У1: номінальна потужність $S_{\text{н}} = 2500$ кВ·А; $f_1 = 50$ Гц; $U_1 = 35000$ В; $U_2 = 11000$ В; $U_{\text{к}} = 6,64$ %; $I_1 = 41,2$ А; $I_2 = 131,0$ А; маса активної частини $m_{\text{ТМН}} = 3700$ кг; схема та група з'єднання $Y/\Delta - 11$. Конструктивна схема і розміри елементів ЕМС вказаного трансформатора наведені на рис. 6.8.

Загальний вид та данні технічної характеристики ТМН 2500/35У1 наведено на рис. 6.9. Активна частина ТМН 2500/35У1 відповідає схемі (рис. 2.3) та містить шихтований вперепліт магнітопровід з косими стиками, в якому установлено дев'ять пакетів в половині кругового УК стрижня. Нормовані втрати неробочого руху і короткого замикання трансформатора ТМН 2500/35У1 складають $P_H=3500\text{Вт}$ і $P_K=22000\text{Вт}$.

Відносні КЗ розрахунку ТМН 2500/35У1, що відповідають розмірам (рис. 6.8), визначаються з врахуванням (рис. 2.11, в) співвідношеннями:

$$a'_M = \frac{D'_{\text{Iкк}}}{D'_{\text{2кк}}} = \frac{860}{280} = 3,07; \quad \lambda'_B = \frac{h'_B}{b'_B} = \frac{895}{290} = 3,09.$$

Коефіцієнти напруги первинної та вторинної обмоток:

$$K_{U1} = \frac{1 - \Delta U\%}{200} = \frac{1 - 2,8}{200} = 0,986; \quad K_{U2} = \frac{1 + \Delta U\%}{200} = \frac{1 + 2,8}{200} = 1,014.$$

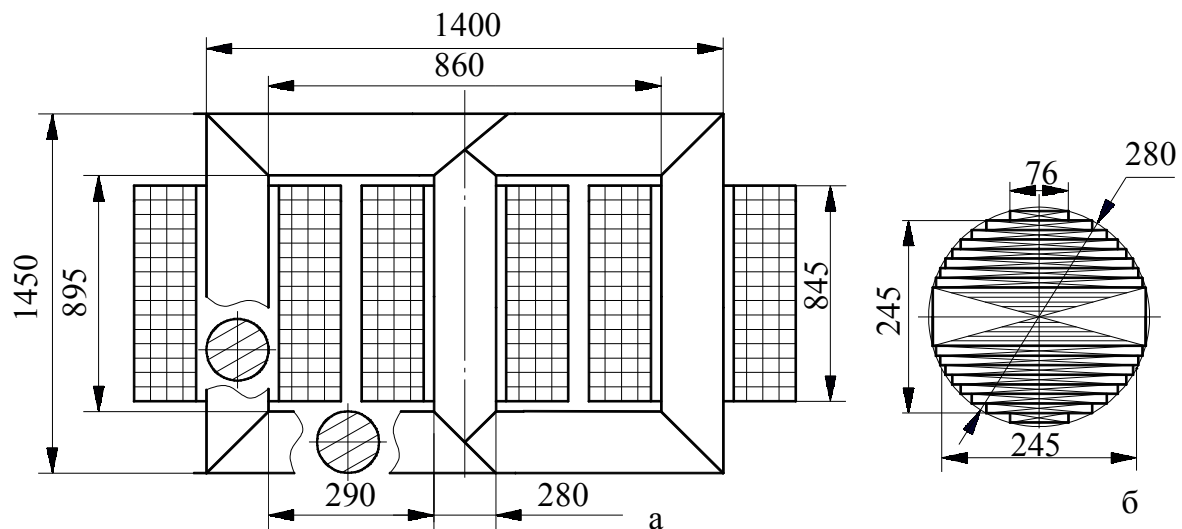


Рисунок 6.8 – Конструктивна схема, розміри елементів активної частини (мм) (а) та пакетів електротехнічної сталі стрижня (б) трифазного трансформатора ТМН 2500/35У1

Величина ККД ТМН 2500/35У1 складає

$$\eta = 1 - \frac{P_H + P_K}{S_H \cdot 10^3 + P_H + P_K} = 1 - \frac{3500 + 22000}{2500 \cdot 10^3 + 3500 + 22000} = 0,99.$$

Показник вихідних даних та ЕМН ТМ 2500/10У1

$$\Pi_{\text{ТТТМ}} = \frac{S_H \cdot 10^3}{6,66 J_0 B_c f_1} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{\eta \cos \varphi_1} + K_{U2} \right) = \frac{2500 \cdot 10^3}{6,66 \cdot 2,2 \cdot 10^6 \cdot 1,7 \cdot 50} \times$$

$$\times \left(\frac{0,986 \cdot 0,86}{0,99 \cdot 0,97} + 1,014 \right) = 4,046 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4,$$

де прийняти, згідно рекомендаціям [15], значення $J_0=2,2 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$; $B_c=1,7 \text{ Тл}$; марка ЕТС 3407 та значення енергетичних коефіцієнтів навантаження трансформатора ТМН 2500/35У1:

$$\cos \varphi_2 = 0,86; \cos \varphi_1 = 0,97.$$

На основі (3.14), (3.15) визначається коефіцієнт заповнення обмоткового вікна $K'_{30 \text{ ТМ}}$ ТМН 2500/35У1 з геометричними розмірами (рис. 6.8)

$$K'_{30 \text{ ТМ}} = \frac{(5,093)^4 \Pi_{\text{Т ТМН}}}{\left[(D'_{\text{ІКК}})^4 K_{\text{зс}} K_{\text{КК}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2 \right]} = \frac{5,093 \cdot 4,046 \cdot 10^{-3}}{\left[0,280^4 \cdot 0,97 \cdot 0,929 \cdot 3,09(3,07-1)^2 \right]} = 0,281,$$

де $K_{\text{КК}}=0,929$ відповідає дев'яти сходинкам в половині УК перерізу стрижня (рис. 6.8, рис. 6.9).



а



б

ТРАНСФОРМАТОР		
ТИПА ТМН-2500/35-У1		№ 190378
Номинальные: мощность	кВ·А	2500
напряжения ВН/НН	кV	35/ 11,0
токи ВН/НН	А	41,2/ 131
частота	Hz	50
Схема и группа соединения обмоток		У/Д-11
Напряжение к. з.	%	7,35
Масса t: полная		8,050
масла		2,590
активной части с крышкой и переключающим устройством		4,035
транспортная		8,000

в

Рисунок 6.9 – Магнітопровід (а), обмоткова котушка (б) і технічна характеристика (в) трифазного трансформатора ТМН 2500/35У1

Відносний показник маси (4.24) активних матеріалів ЕМС трансформатора ТМН 2500/35У1

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{1\text{ккcu}}^* \right)' &\approx \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3\text{с}} K_{\text{кк}} K'_{3\text{отм}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2}} \right)^3 \left\{ 0,785 K_{3\text{с}} K_{\text{кк}} [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + 6,215] + \right. \\ &+ 1,178 \frac{\gamma_0}{\gamma_c} K'_{3\text{отм}} \lambda'_B (a_M - 1)^2 \left[1 + \frac{a_M - 1}{4} \right] \left. \right\} = \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{0,97 \cdot 0,929 \cdot 0,281 \cdot 3,09 (3,07 - 1)^2}} \right)^3 \times \\ &\times \left\{ 0,97 \cdot 0,929 \cdot [(3,07 - 1)(2 + 1,5 \cdot 3,09) + 6,215] + 1,178 \frac{8940}{7650} 0,281 \times \right. \\ &\quad \left. \times 3,09 (3,07 - 1)^2 \left[1 + \frac{3,07 - 1}{4} \right] \right\} = 29,945. \end{aligned}$$

Маса активної частини ЕМС трансформатора ТМН 2500/35У1 визначається з використанням ЦФ (2.19) та відповідає загальній масі активної частини (рис. 6.5, в)

$$m'_{\text{ак}} \approx \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тг ТМН}}} \right)^3 \left(\Pi_{1\text{ккcu}}^* \right)' = 7650 \left(\sqrt[4]{4,046 \cdot 10^{-3}} \right)^3 29,945 = 3675 \text{ кг.}$$

КЗ ЦФ втрат активної потужності (2.34) ТМН 2500/35У1

$$K'_{\text{рсu}} = \frac{K_{\text{дк}} \gamma_0 K_{\text{по}} J_0^2}{K_{\text{дн}} \gamma_c P'_{\text{пв}}} = \frac{1,04 \cdot 8940 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,2 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} = 7,038,$$

де $P'_{\text{пв}} = 1,36$ Вт/кг – питомі втрати ЕТС марки 3407 при $V_c = 1,7$ Тл.

Показник втрат активної потужності ТМН 2500/35У1 визначається на основі (4.34):

$$\begin{aligned} \left(\Pi_{3\text{ккcu}}^* \right)' &\approx K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3\text{с}} K_{\text{кк}} K'_{3\text{отм}} \lambda'_B (a'_M - 1)^2}} \right)^3 \left\{ 0,785 K_{3\text{с}} K_{\text{кк}} [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_B) + \right. \\ &\quad \left. + 6,215] + 1,178 K'_{\text{рсu}} K'_{3\text{отм}} \lambda'_B (a_M - 1)^2 \left[1 + \frac{a_M - 1}{4} \right] \right\} = 1,475 \times \\ &\times \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{0,97 \cdot 0,929 \cdot 0,281 \cdot 3,09 (3,07 - 1)^2}} \right)^3 \left\{ 0,785 \cdot 0,97 \cdot 0,929 [(3,07 - 1) \times \right. \end{aligned}$$

$$\times (2 + 1,5 \cdot 3,09) + 6,215] + 1,178 \cdot 7,038 \cdot 0,281 \cdot 3,09 (3,07 - 1)^2 \times \\ \times \left[1 + \frac{3,07 - 1}{4} \right] \} = 122,954.$$

Втрати активної потужності трансформатора ТМН 2500/35У1

$$P'_{\Sigma_{\text{ВККСИ}}} = \gamma_0 P'_{\text{ПВ}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ТТ ТМН}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{ЗККСИ}}^* \right)' = 8940 \cdot 1,36 \left(\sqrt[4]{4,046 \cdot 10^{-3}} \right)^3 122,954 = 23980 \text{ Вт.}$$

Величина ККД ТМН 2500/35У1 має значення

$$\eta' = 1 - \frac{P'_{\Sigma_{\text{В}}}}{(S_{\text{Н}} + P'_{\Sigma_{\text{В}}})} = 1 - \frac{23980}{(2500 \cdot 10^3 + 23980)} = 0,991 \approx \eta = 0,99.$$

Розрахункове значення коефіцієнту корисної дії трансформатора ТМН 2500/35У1 становить 0,991, що наближається до реального нормованого значення.

6.5. Розрахунок основних характеристик аналога трансформатора потужністю 2500 кВ·А з восьмигранними утворюючими контурами комбінованого шихтовано-стикового магнітопроводу та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

При використанні (4.51) та показника вихідних даних 2500/35У1, а також екстремумів КЗ (табл. 4.5): $a_{\text{М}}=3,379$ та $\lambda_{\text{В}}=3,371$ при $K_{\text{З0}}=0,28$ та $K_{\text{КВ}}=1$, для ЕМС схеми (рис. 5.2 і рис. 6.10), розраховується значення розміру діаметру $D_{\text{1ВП}}$

$$D_{\text{1ВП}} = \sqrt[4]{\frac{5,664 \Pi_{\text{ТТ ТМ}}}{K_{\text{З0}} K'_{\text{З0}} K_{\text{КВ}} \lambda_{\text{В}} (a_{\text{М}} - 0,924)^2}} = \\ = \sqrt[4]{\frac{5,664 \cdot 6,046 \cdot 10^{-3}}{0,97 \cdot 0,281 \cdot 3,371 (3,379 - 0,924)^2}} = 0,254 \text{ м.}$$

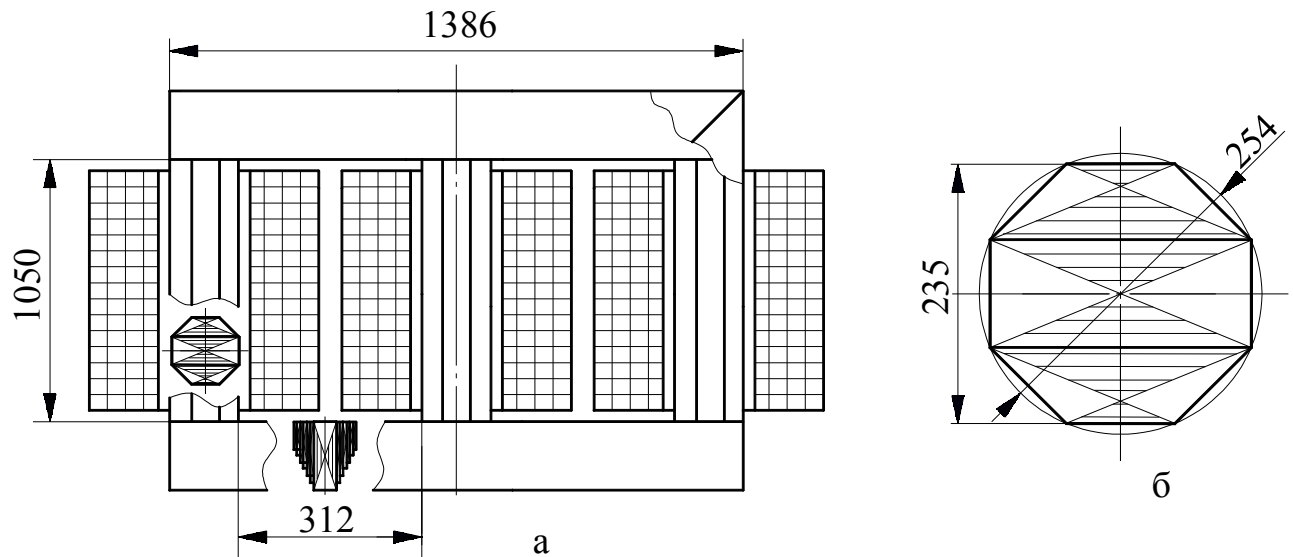


Рисунок 6.10 – Конструктивна схема, розміри елементів активної частини (а) та пакетів електротехнічної сталі стрижня (б) трифазного трансформатора з восьмигранними утворюючими контурами стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярם східчастого перерізу комбінованого шихтовано-стикового магнітопроводу

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу ЕМС аналога визначається з використанням (4.37)

$$b_{\text{ВВП}}'' = D_{1\text{В}}'' \frac{a_{\text{М}}'' - 0,924}{2} = 0,254 \frac{3,379 - 0,924}{2} = 0,312 \text{ м.}$$

Висота обмоткового вікна визначається з використанням (4.36)

$$h_{\text{ВВП}}'' = \lambda_{\text{В}} b_{\text{ВВП}}'' = 3,371 \cdot 0,312 = 1,05 \text{ м.}$$

На основі (4.43) визначається ширина восьмигранного стрижня

$$b_{\text{СВП}}'' = D_{1\text{ВП}}'' 0,924 = 0,254 \cdot 0,924 = 0,235 \text{ м.}$$

Загальний вид аналога ТМН 2500/35У1 відповідає схемі (рис. 6.10).

Маса активних матеріалів (5.47) ЕМС (рис. 6.10) становить

$$m_{\text{атм}} = \gamma_{\text{с}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ГТ ТМН}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{ВПСУ}}^* \right)' = 7650 \left(\sqrt[4]{6,046 \cdot 10^{-3}} \right)^3 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{3\text{С}} K_{\text{КВ}} K_{30} \lambda_{\text{В}}'' (a_{\text{М}}'' - 0,924)}} \right)^3 \times \\ \times \left[K_{3\text{С}} K_{\text{КВ}} \left[(a_{\text{М}}'' - 0,924)(1,4126 + 1,0594 \cdot 3,371) + 4,0278 \right] + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 1,148 K_{\text{зотм}}'' \lambda_B'' (a_M'' - 0,924)^2 \left[1 + 0,256 (a_M'' - 0,924) \right] = \\
& = 7650 \left(\sqrt[4]{6,046 \cdot 10^{-3}} \right)^3 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{0,97 \cdot 0,28 \cdot 3,371 (3,379 - 0,924)}} \right)^3 \times \\
& \quad \times \left[0,97 \left[(3,379 - 0,924) (1,4126 + 1,0594 \cdot 3,371) + 4,0278 \right] + \right. \\
& \quad \left. + \frac{8940}{7650} 1,1481 \cdot 0,28 \cdot 3,371 (3,379 - 0,924)^2 \left[1 + 0,256 (3,379 - 0,924) \right] \right] = 3618 \text{ кг}.
\end{aligned}$$

На основі (5.57) та з використанням значень електромагнітних КЗ (2.38), (2.39) визначаються втрати активної потужності

$$\begin{aligned}
\left(\Pi_{\text{звпсу}}^* \right)'' & = K_{\text{дн}} \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{K_{\text{зс}} K_{\text{кв}} K_{\text{зо}} \lambda_B'' (a_M'' - 0,924)}} \right)^3 \times \\
& \quad \times \left[K_{\text{зс}} K_{\text{к}} \left[(a_M'' - 0,924) (1,4126 + 1,0594 \cdot 3,371) + 4,0278 \right] + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\gamma_0}{\gamma_c} 1,148 K_{\text{зотм}}'' \lambda_B'' (a_M'' - 0,924)^2 \left[1 + 0,256 (a_M'' - 0,924) \right] \right] = \\
& = 1,475 \left(\sqrt[4]{\frac{5,664}{0,97 \cdot 0,28 \cdot 3,371 (3,379 - 0,924)}} \right)^3 \times \\
& \quad \times \left[0,97 \left[(3,379 - 0,924) (1,4126 + 1,0594 \cdot 3,371) + 4,0278 \right] + \right. \\
& \quad \left. + 7,038 \cdot 1,1481 \cdot 0,28 \cdot 3,371 (3,379 - 0,924)^2 \left[1 + 0,256 (3,379 - 0,924) \right] \right] = 136,324.
\end{aligned}$$

На основі (2.33) втрати активної потужності аналога (рис. 6.10) визначаються

$$P_{\Sigma \text{вп}}'' = \gamma_c P_{\text{пв}}' \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{тт тмн}}} \right)^3 \left(\Pi_{\text{звпсу}}^* \right)'' = 7650 \cdot 1,36 \left(\sqrt[4]{6,046 \cdot 10^{-3}} \right)^3 136,324 = 23221 \text{ Вт}$$

Величина коефіцієнта корисної дії аналога (рис. 6.6)

$$\eta'' = 1 - \frac{P''_{\Sigma\text{ВП}}}{(S_{\text{H}} \cos\varphi_2 + P''_{\Sigma\text{ВП}})} = 1 - \frac{23221}{(2500 \cdot 10^3 + 23221)} = 0,992.$$

Маса ЕМС та ККД аналога ТМН 2500/35У1, що відрізняється повним заповненням восьмигранних УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем (рис. 6.10) наближені до значення трансформатора та мають покращені значення.

6.6. Висновки до розділу 6

6.6.1. Розрахункові ПТР (рис. 6.1) вказують на потенційну можливість удосконалення однофазних ЕСП на основі тристрижневої ЕМС з симетричним шестигранним зовнішнім контуром магнітопроводу.

6.6.2. Зміни розрахункових ПТР варіантів трифазної планарної ЕМС з багатограними УК свідчить про можливість деякого удосконалення ЕСП відносно базових аналогів з круговими УК обмоткових котушок і стрижнів та $K_{\text{КК}} \leq 0,9$ при знижені трудомісткості виробництва.

6.6.3. Розрахункові значення мас ЕМС і втрат активної потужності перебуваючих у виробництві трансформаторів ТТ ТМ40/10У1 і ТМН 2500/35У1 з круговими УК та їх аналогів з восьмигранними УК підтверджують адекватність і доцільність застосування створених ММ і методики в практичних розрахунках ЕСП.

6.6.4. Маса ЕМС та втрати інноваційних пропозицій ТТ потужністю 40 кВ·А і 2500 кВ·А зменшуються на 1,49% (2,3 кг) і 2,5% (23,0 Вт) та 1,55% (57 кг) і 3,16% (759 Вт) відносно серійних аналогів ТМ40/10У1 і ТМН2500/35У1, що відповідає отриманим теоретичним результатам.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено наукове завдання оптимізаційного розрахункового обґрунтування перспективних інноваційних конструктивно-технологічних виконань статичних електромагнітних систем, що може бути використано при проєктному синтезі та удосконаленні однофазних і трифазних трансформаторів і реакторів з шихтованими магнітопроводами. Основні наукові і практичні здобутки роботи полягають у нижчеперелічених результатах.

1. Розглянуто сучасний стан розвитку і конструктивно-технологічні особливості одно та трифазних ЕМС з шихтованими магнітопроводами, які складають основу перебуваючих у виробництві ЕСП та традиційно використовуються в їх сучасних розробках, з якого можна констатувати наступне.

1.1. Найбільш поширеними при застосуванні технологій шихтовки плоскопаралельних шарів ЕТС є однофазні планарні стрижневі і броньові та трифазні стрижневі ЕМС з прямокутними і криволінійними, у більшості круговими, УК стрижнів і обмоткових котушок.

1.2. Прямокутні і криволінійні УК обумовлюють відомі недоліки та відсутність потенціалу подальшого конструктивно-структурного розвитку ЕСП.

1.3. Важливим напрямком удосконалення ЕСП є застосування на додаток до інновацій електроматеріалознавства нетрадиційних евристичних структурно-геометричних перетворень ЕМС, зокрема застосування багатогранних УК.

1.4. Сучасною тенденцією нетрадиційного рішення задачі зниження втрат ЕСП є застосування в магнітопроводах комбінацій анізотропної і ізотропної ЕТС.

2. Запропоновано нижчеперелічені інноваційні способи і конструктивно-технологічні пропозиції удосконалення ЕСП.

2.1. Спосіб підвищення ЕДС ЕСП заміною прямокутних і криволінійних УК витків обмоткових котушок на багатогранні при підсиленні ізоляції та встановленні обмоткових кріплень на осях вершин багатогранника.

2.2. Спосіб зниження втрат шихтованих магнітопроводів розташуванням в кутових ділянках зміни напрямку магнітного потоку між стрижневими та яремними частинами з анізотропної ЕТС пластин з ізотропної ЕТС та їх з'єднання спеціальним засобом зварювання. Доцільне проведення досліджень з визначення такого способу.

2.3. Конструктивні рішення шихтованих вперепліт, комбінованих шихтовано-стикових і стикових магнітопроводів, що надають можливість удосконалення ЕСП на основі багатогранних УК.

3. Наявність традиційних і інноваційних варіантів структур і конфігурацій активних елементів однофазних і трифазних ЕМС з шихтованими магнітопроводами викликає необхідність визначення впливу конструктивно-технологічних особливостей активних елементів на основні показники ЕСП.

4. Виконано огляд наявних методів проєктного синтезу ЕСП з якого впливає відсутність уніфікаційних можливостей ЦФ і КЗ традиційних оптимізаційних ММ.

4.1. Відомі методики оптимізаційних розрахунків ЕСП пристосовані до конкретних структурно-геометричних виконань активних елементів і забезпечують можливість вирішення задач параметричного синтезу лише традиційних конструкцій ЕСП.

4.2. Відсутність в відомих оптимізаційних моделях уніфікованих КЗ обумовило відсутність узагальненого числового порівняння варіантів однофазних планарних ЕМС з прямокутними УК та різновидів трифазних планарних ЕМС з прямокутними і круговими УК.

4.3. Вирішенню питань оптимізаційного зіставлення неоднакових структурно-геометричних і технологічних виконань ЕМС максимально відповідає універсальний метод структурного і структурно-параметричного синтезу (далі базовий метод) електромеханічних пристроїв на основі ЦФ з безрозмірними оптимізаційними складовими, що визначають основні ПТР за допомогою універсальних відносних геометричних і електромагнітних КЗ.

4.4. Вперше встановлено ідентичність проєктних діапазонів змін електромагнітної КЗ при оптимізаційному зіставленні втрат активної потужності при застосуванні в обмотках як міді, так і алюмінію.

4.5. В цілому різниці технічних характеристик варіантів ЕМС, крім структурно-геометричних особливостей, залежать від проєктного діапазону зміни електромагнітної КЗ $K_{pcu(al)}$ та у меншій мірі від класу напруги (діапазону K_{30})

5. На основі базового методу отримало подальший розвиток оптимізаційне моделювання та вперше створені ММ основних ПТР відповідно планарних стрижневої і броньової та просторової радіальної тристрижневої однофазних ЕМС та встановлено наступне.

5.1. Стрижнева ЕМС відрізняється від броньової ЕМС покращеними (зменшеними) екстремумами показників маси при мідних та алюмінієвих обмотках на (3,71-6,29)% та (7,93-9,85)% і погіршеними (збільшеними) екстремумами показників вартості при мідних обмотках на (2,55-1,1)% та покращеними екстремумами показників вартості на (3,17-5,81)% при алюмінієвих обмотках. Показники втрат броньової ЕМС покращуються (зменшуються) відносно стрижневої ЕМС на (4,22-1,42)%.

5.2. Радіальна тристрижнева ЕМС при умовно однакових додаткових втратах має покращені (знижені) відносно базового планарного стрижневого аналога значення екстремумів показників маси і вартості відповідно на (1,46-1,98)% і (2,22-1,88)% при мідних та (0,84-0,53)% і (1,53-1,17)% при алюмінієвих обмотках. Показники втрат знижуються на (2,41-2,11)%, що обумовлено деяким зниженням об'єму ЕТС і середньої довжини витка обмотки відносно базового аналогу.

5.3. Радіальна тристрижнева ЕМС в якій кількість кутових зон знижено до трьох, має потенціальну можливість додаткового суттєвого зниження втрат неробочого ходу зменшенням числа стиків і встановленням в кутових зонах пластин ізотропної ЕТС при застосуванні зварювання анізотропних стрижневих та яремно-кутових ділянок елементарних шарів шестигранного магнітопроводу.

6. При використанні базового методу отримало подальший розвиток оптимізаційне моделювання різновидів трифазної планарної стрижневої ЕМС з круговими УК обмоткових котушок і стрижнів, які відрізняються круговими УК та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з пакетів ЕТС різних розмірів. Також вперше створено ММ основних ПТР різновидів трифазної планарної стрижневої ЕМС з восьмигранними УК обмоткових котушок і стрижнів, які відрізняються восьмигранними УК та плоскими внутрішніми поверхнями ярем з пакетів ЕТС різних розмірів. З порівняння ПТР традиційних і інноваційних варіантів впливають нижче наведені переваги застосування $n \geq 4$ – граней УК, що обумовлено повним, або більш повним їх заповненням шарами ЕТС в перерізах стрижнів та ярем.

6.1. Застосування в трифазних планарних ЕМС замість кругових прямокутних УК при засобах підвищення надійності обмоток (склеювання витків, капсулювання ...) призводить до покращення (зниження) екстремумів показників маси, вартості і втрат. Екстремуми показників маси і вартості при $K_{\text{кк}}=0,931$ відрізняються на (2,49-2,38)% і (2,97-2,89)% при мідних та на (1,81-1,53)% і (2,44-2,41)% при алюмінієвих обмотках. При $K_{\text{кк}}=0,851$ такі екстремуми відрізняються на (4,34-3,87)% і (5,68-5,26)% при мідних і на (3,11-2,55)% і (4,48-4,08)% при алюмінієвих обмотках. Зниження екстремумів показників втрат складають при $K_{\text{кк}}=0,931$ і $K_{\text{кк}}=0,851$ відповідно на (2,79-2,72)% і (5,61-5,20)%. Це вказує на доцільність підвищення межі потужності застосування в ЕСП прямокутних УК.

6.2. Екстремуми показників маси і вартості ЕМС з восьмигранними УК обмоткових котушок, стрижнів і ярем покращуються (знижуються) відносно таких ПТР ЕМС з круговими УК. При наявності в половині УК трьох пакетів, такі показники покращуються на (0,88-0,76)% і (1,17-1,03)% при мідних і на (0,69-0,55)% і (0,96-0,84)% при алюмінієвих обмотках. При розташуванні в половині УК чотирьох пакетів вказані ПТР покращуються на (1,36-1,15)% і (1,85-1,65)% при мідних і на (1,01-0,8)% і (1,45-1,25)% при алюмінієвих обмотках. При наближенні контурного коефіцієнта заповнення ЕМС з круговими

УК до ($0,9 < K_{\text{кк}} < 0,94$) екстремуми вказаних показників ЕМС з восьмигранними УК та $K_{\text{вв}}=0,931$ при значному зниженні трудомісткості виробництва погіршуються усього на $(0,3-0,16)\%$, $(0,59-0,48)\%$ при мідних і на $(0,14-0,09)\%$, $(0,36-0,24)\%$ при алюмінієвих обмотках. Екстремуми показників втрат ЕМС з круговими УК при трьох і чотирьох пакетах в половині УК є гіршими відносно ЕМС з аналогічним числом пакетів та восьмигранними УК на $(1,32-1,25)\%$ та $(2,16-2,01)\%$, а при $K_{\text{кк}}=0,93$ (16 пакетів в половині круга) є кращими усього на $(0,8-0,69)\%$. При заміні в ЕМС кругових УК ($K_{\text{кк}}=0,931$) на восьмигранні ($K_{\text{кв}} \approx 1$) відбувається покращення (зниження) екстремумів показників маси і вартості на $(1,19-1,02)\%$ і $(1,59-1,42)\%$ при мідних та на $(0,87-0,7)\%$ і $(1,59-1,42)\%$ при алюмінієвих обмотках, а також покращення (зниження) екстремумів показника втрат активної потужності на $(1,68-1,52)\%$.

6.3. Екстремуми показників маси і вартості ЕМС з круговими УК мідних обмоток і стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем зі східчастими перерізами покращуються (знижуються) відносно аналога з круговими УК усіх активних елементів на $(0,482-0,416)\%$ і $(0,625-0,529)\%$ при трьох та на $(0,489-0,42)\%$ і $(0,63-0,56)\%$ при чотирьох пакетах, а також на $(0,48-0,42)\%$ і $(0,63-0,57)\%$ при багатьох пакетах в половині кругового УК. Аналогічно при алюмінієвих обмотках такі ПТР покращуються на $(0,38-0,29)\%$ і $(0,52-0,43)\%$ при трьох та на $(0,38-0,28)\%$ і $(0,49-0,4191)\%$ при чотирьох, а також на $(0,35-0,27)\%$ і $(0,48-0,41)\%$ при багатьох пакетах ЕТС в половині кругового УК. Екстремуми показників втрат завдяки плоским внутрішнім поверхням ярем знижуються на $(0,67-0,61)\%$ при трьох та на $(0,67-0,61)\%$ при чотирьох, а також на $(0,66-0,60)\%$ при багатьох пакетах ЕТС.

6.4. Екстремуми показників маси і вартості ЕМС з восьмигранними УК мідних обмоток і стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем зі східчастими перерізами знижуються відносно аналогів з восьмигранними УК усіх активних елементів на $(0,56-0,43)\%$ і $(0,91-0,75)\%$ при трьох та на $(0,56-0,42)\%$ і $(0,90-0,73)\%$ при чотирьох пакетах в половині УК, а також на $(0,54-0,41)\%$ і $(0,89-0,72)\%$ при повному заповненні восьмигранника. Також при

алюмінієвих обмотках названі ПТР покращуються на (0,35-0,24)% і (0,59-0,46)% при трьох та на (0,34-0,23)% і (0,58-0,43)% при чотирьох пакетах ЕТС в половині УК, а також на (0,33-0,23)% і (0,57-0,43)% при повному заповненні восьмигранника. Екстремуми показників втрат при плоских внутрішніх поверхнях ярем знижуються на (1,04-0,85)% при трьох, та на (1,03-0,84)% при чотирьох пакетах ЕТС в половині УК, а також на (1,01-0,82)% при повному заповненні восьмигранного УК.

7. Базовим методом вперше створені ММ основних ПТР трифазної планарної стрижневої ЕМС з шестигранними УК стрижнів і обмоткових котушок та плоскими внутрішніми поверхнями ярем східчастого перерізу. Завдяки практично повному заповненню ЕТС шестигранних УК стрижнів ідентичними прямокутними пластинами ЕТС та при суттєвому зниженні трудомісткості виготовлення забезпечується певне покращення основних ПТР відносно планарного аналога з круговими УК стрижнів і обмоткових котушок та плоскими внутрішніми поверхнями ярем східчастого перерізу.

7.1. Екстремуми показників маси і вартості, в залежності від контурного коефіцієнту заповнення кругового УК $K_{\text{кп}} = 0,851$ і $K_{\text{кп}} = 0,861$ знижуються на (1,83-1,50)% і (2,55-2,22)% та (1,58-1,30)%, (2,2-1,92)% при мідних та на (1,28-1,01)%, (1,91-1,57)% та (1,11-0,87)%, (1,65-1,36)% при алюмінієвих обмотках.

7.2. Екстремуми показників втрат при $K_{\text{кп}} = 0,851$ і $K_{\text{кп}} = 0,861$ знижуються на (2,73-2,42)% та (2,35-2,08)%.

8. На основі базового методу доведено, що основні ПТР є унімодальними функціями, оскільки КЗ знаходяться в ступінях різних знаків.

9. На основі базового методу вперше визначені рівняння середнього теплового навантаження обмоток варіантів однофазних ЕМС.

9.1. Стрижнева ЕМС з $K_{30} = 0,3$ має покращене значення теплового стану відносно броньової ЕМС при мідних та алюмінієвих обмотках на 36,63% та на 32,17%.

9.2. Радіальна тристрижнева ЕМС з $K_{30} = 0,3$ має покращене значення теплового стану відносно стрижневої ЕМС при мідних та алюмінієвих обмотках на 28,19% та на 31,93%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.

2. Шидловський А.К. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990-2000 р. / А.К. Шидловський, Г.М. Федоренко // Технічна електродинаміка. – 2002. – №1. с. 3-12.

3. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов (перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди, тема «В» совместного с Европейской комиссией проекта № STR – 1678 – 98 – BE). Перевод с английского Е. В. Мельниковой, редактор перевода В. С. Ионов // Энергосбережение. – 2003. – № 6. – с. 66-70.

4. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга: под ред. / С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина / – Москва: Энергоатомиздат, – 2004. – 616 с.

5. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / А.А. Ставинский // Электротехника и электромеханика. – 2004. – №1. – с. 57-61.

6. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий. В.А. Бормосов, М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, Н.Е. Смольская: URL: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (13.09.2004).

7. 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.

8. Пуйло Г.В. Показатели конструктивной эффективности силовых трансформаторов / Г.В. Пуйло, Е.В. Трищенко, Н.М. Кокуца // Електромашинобудування та електрообладнання. Республ. Міжвід. наук.-техн. збірник. – 2004. – №63. – с. 94-98.

9. Чайковский В.П. Параметры энергоэффективных электромагнитных устройств при различных эксплуатационных нагрузках / В.П. Чайковский, В.А. Матухно, С.А. Игнатенко // Электромашинобудування та електрообладнання. Міжвід. наук. техн. збірник. – 2006. – №66. – с. 33-34.

10. 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.

11. Коновалов О.А. Основные требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях / О.А. Коновалов, В.Н. Подячев // Энергетик – 2010. – №8. – с. 29-31.

12. Ставинский А.А. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей / А.А. Ставинский, И.А. Тищенко, Н.И. Зеленый // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 1(77) – с. 64-69.

13. Канарейкин А. "Умные" трансформаторы для "Умной" энергетики. / А. Канарейкин // Энергетика и промышленность России – 2012. – №8 (196).

14. Khatri A. Optimal design of transformer: A Compressive bibliographical survey / A. Khatri, O.P. Rahi // International Journal of scientific Engineering Technology. – 2012 – April. – pp. 159-167.

15. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов / Тихомиров П.М. – М : Альянс, 2013. – 528 с.

16. Кравченко А. Сухие энергозберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев : Радиоаматор, – 2013. – №4. – с.12-15.

17. Кравченко А. Масляные энергозберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев: Радиоаматор, – 2013. – №5. – с.14-17.

18. Levin M.I. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов / M.I. Levin, И.В. Пентегов, С.В. Римар, А.В. Lavzeniuk // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №7. – с.40-44.

19. Amadi – Echendu J.E. A bibliographic review of trends in design and management of electrical power transformers / J.E. Amadi – Echendu, J.M. Mafutsana // Proceedings of the 2016 International conference on Industrial Engineering and Operations Management. Cuala Lumpur. Malaysia – Mach. 10. – 2016 – pp. 2010-2018.

20. Костинский С.С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкций силовых трансформаторов / Костинский С.С. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – том. 20. №1-2. – с. 14-32.

21. Ставинський А.А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (масовартістні показники) / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Циганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 4 (1329). – с. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295.2019.4.05

22. Ставинський А.А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів шихтованих магнітопроводів (втрати активної потужності) / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.М. Циганов, Р.А. Ставинський, О.С. Садовий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", – 2019 – №4 (1329) – с. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295. 2019. 4.06.

23. Лазарев В.И. Обобщение результатов исследования по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов / В.И. Лазарев // Технічна електродинаміка. – 2005. – №1. – с. 53-60.

24. Лазарєв В.І. Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення) Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.09.01/ Ін-т. Електродинаміки НАН України. – К.: 2006. – 37 с.

25. Лурье А.И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. Составитель и научный редактор / А.И. Лурье. Москва: "Знак". – 2005. – 520с.

26. Крюков Д.О. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками / Д.О. Крюков, В.З. Манусов // *Электричество*. – 2019. – №8. – с. 4-16.

27. Пентегов И.В. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами / И.В. Пентегов, С.В. Рымар, А.В. Лавренюк, О.И. Петриенко // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Зб. наук. праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2002. – №14. – с. 86-97.

28. Philip Marketos, Turgul Meydan Novel Transformer Core Design Using Consolidated Stacks of Electrical steel / P. Marketos // *IEEE Transactions on Magnetism*. Vol. 42. – №10. October – 2006. – pp. 2821-2823.

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

30. Ставинский А.А. Классификации структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008 – №2 – с. 53-58.

31. Kefalas T.D. Transformers made of composite magnetic cores: An innovative design approach / T.D. Kefalas // *Recent Patents on Electr. Eng.* – 2009. – Vol 2. – №1. pp. 1-12.

32. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задач и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р.А. Ставинский // *Вісник КДУ ім. М. Остроградського*. – Кременчук: 2010. – Вип. 4. Ч.2. – с. 91-94.

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

34. Матухно В.А. Методика оценки технологичности навивки магнитных систем трансформаторов / Матухно В.А. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – №2(78) – с.48-54.

35. 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 // Електротехніка та електромеханіка. – 2011– №5. – с.43-47.

36. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) / А.А. Ставинский // Електротехніка та електромеханіка. – 2011– №6. – с. 33-38.

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

38. Ставинский А. А. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №7(77). – с. 47-52.

39. Kefalas T.D. Development of distribution transformers assembled of composite wound core. / T.D. Kefalas, A.G. Kladas // IEEE Trans. Magn. 48 (February (2)). – 2012 p. – pp. 775-778.

40. 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.

41. Levin M.I. Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов / M.I. Levin, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, А.В. Lavreniuk // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – с. 20-24.

42. Ставинский Р.А. Сравнительный анализ массостоймых показателей однофазных стержневых электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами / Р. А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Вісник НТУ "ХПІ" : Зб. наук. праць. Сер: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 5 (1114). – с. 91-95.

43. Magdaleno-Adame S. “Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers,” / S. Magdaleno-Adame, E. Melgoza-Vazquez, J.C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, // Int. Trans. Electr. Energ. Syst., – 2016. – vol. 26, – no. 8, – pp. 1737-1751.

44. Magdaleno-Adame S. Electromagnetic Finite Element Analysis of Electrical Steels Combinations in Lamination Core Steps of Single-Phase Distribution Transformers / S. Magdaleno-Adame, T.D. Kefalas, S. Garcia-Martinez, C. Perez-Rojas // IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (Ropec 2017). Ixtape, Mexico. DOI: 10.1109/ROPEC.2017.8261585.

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

46. Ставинский А.А. Технические решения трехфазного маломагнитного компактного трансформатора / А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Вісник НТУ "ХПІ" : Зб. наук. праць. Сер:

Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ "ХП". 2018. – № 5 (1281). – с. 116-122.

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

48. Циганов О.М. Залежність показників трифазних трансформаторів і реакторів від заповнення сталлю кругових і восьмигранних контурів стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів / О.М. Циганов // Вісник НТУ "ХП". Зб. наук. праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ "ХП". – 2020. – №3(1357). – с. 15-23. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.03

49. Циганов О.М. Удосконалення трифазних реакторів з планарними шихтованими магнітопроводами на основі шестигранних контурів стрижнів / О.М. Циганов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2020. – Вип. 1(120) – с. 160-165. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.1.160-165

50. Циганов О.М. Напрямок удосконалення трансформаторів на основі секціонування та комбінації марок сталі шихтованих магнітопроводів / О.М. Циганов // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції, Миколаїв: НУК. – 2020. – с. 28-30.

51. Ставинский А.А., Цыганов А.Н. Конструктивно-технологические предложения усовершенствования однофазного трансформатора с шихтованным магнитопроводом / А.А. Ставинский, А.Н. Цыганов // Електротехніка і електромеханіка. – 2020. – №6. с. 11-17. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.6.02. (Web of Science)

52. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.Б. Васютинский // Ленинград. Энергия. – 1970. – 432с.

53. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р.Х. Бальян // Москва. Советское радио. – 1971. – 720 с.
54. Майорец А.И. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк [и др.] // Москва. Энергия. – 1973. – 272 с.
55. Flanagan W.M. "Handbook of transformers desing and application" / W.M. Flanagan // Boston, Mc Graw Hill, – 1993. – 232 p.
56. Kulkarni S.V. Transformer Engineering: Design and Practica // S.V. Kulkarni, S.A. Khararde // New. Marcel dekker. – 2004. – 452 p.
57. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л.Г. Пикалова // – М.: Альянс. – 2013. – 400с.
58. Ray Arnold, Martin Heathcote J and P Transformer Book. GB Elsevier Science & Technology. 2016. 1008p.
59. Almen J. Performance evolution of amorphous hexa-core for distribution transformers Depatment of Materials and Manufacturing Technology / J. Almen, M. Breitholte // Division of High Voltage Engineering Chalmers university of Technologi. Gothenburg. Sweden. – 2012. – 40 p.
60. Материалы информационного сайта "ОАО" Электrozавод" [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/production/cata-log/pdf/additional/pk_5_8.pdf.
61. Инновационный прорыв на рынке силовых трансформаторов [Электронный ресурс] URL:[http:// https://www.elec.ru/articles/innovacionnyj-proryv-na-rynke-silovyh-transformato/](http://https://www.elec.ru/articles/innovacionnyj-proryv-na-rynke-silovyh-transformato/)
62. Рогинская Л.Э. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами / Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – Том 14. – №4. – с. 76-82.

63. Пуйло Г.В. Автоматизация проектирования силовых трансформаторов на основе поэтапной оптимизации / Г.В. Пуйло, В.М. Суханов, В.П. Чайковский // *Электромашиностроение и электрооборудование: Межвед. научн. техн. сб.* – 1982. Вып. 34. – с. 53-58.

64. Бородулин Ю.Б. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов / Ю.Б. Бородулин, В.А. Гусев, Г.В. Попов // – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 264 с.

65. Бородулин Ю.Б. Автоматизированное проектирование электрических машин / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, П.П. Шишкин // М. Высш. школа. – 1989. – 279 с.

66. Пуйло Г.В. Построение обобщенных математических моделей трансформаторных устройств / Г.В. Пуйло // *Электромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук-техн.* – 1996. – №48. – с.89-96.

67. Пуйло Г.В. Оптимальные соотношения размеров элементов активной части электромагнитных преобразователей / Г.В. Пуйло // *Электромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково-технічний збірник.* – К.: Техніка. – 1998. – Вип. 51. – с. 25-29.

68. Андронов С.А. Методы оптимального проектирования / С.А. Андронов // *Текст лекций* / – Санкт-Петербург. СПб. ГУАП. – 2001. – 169 с.

69. Пентегов И.В. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации / И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Е.П. Стемковский // *Технічна електродинаміка.* – 2002. – Вип. 1. – с. 22–28.

70. Пуйло Г.В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, А.В. Трищенко // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2004. – №1 – с. 49-52.

71. Чайковський В.П. Визначення властивостей оптимізаційної позіноміальної математичної моделі силових трансформаторів / В.П. Чайковський, В.А. Матухно, О.В. Трищенко // *Електромашинобудування та електрообладнання: Між-від. наук.-техн. зб.* – 2005. – Вип. 64. – с. 89-91.

72. 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.

73. Amairalis E.I. Methodology for the Optimum Design of Power Transformers Using Minimum Number of Input Parameters / E.I. Amairalis, P.S. Georgilakis // ICEM – 2006. PAPER NUMBER №470. p. 1-6.

74. Рымар С.В. Оптимизация трехфазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния / С.В. Рымар // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 4. – с. 30-32.

75. Пентегов И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Электричество. – 2006. – №3. – с. 35-47.

76. Пуйло Г.В. Математическая модель силового трансформатора, инвариантная к форме поперечного сечения магнитной системы / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук. техн. зб. – 2008. – Вип. 71. с. 56-60.

77. Матухно В.А. Проектирование оптимальных трансформаторов для различных эксплуатационных нагрузок / Матухно В.А. // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук. техн. зб. – 2009. – Вип. 73. – с. 97-101.

78. Пуйло Г.В. Концепция программного обеспечения для исследовательского проектного синтеза трансформаторов на основе инновационных технических решений / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко // Труды Одесского политехнического университета. – 2010. – Вип. № 1(33) – №2(34). – с. 105-111.

79. Загирняк М.В. Критерии рационального выбора электрических машин, аппаратов, трансформаторов и их серий / М.В. Загирняк, В.В. Прус // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. –2011. – №1(1). – с. 240-241.

80. Загирняк М.В. Оценка трансформаторов и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера / М.В. Загирняк, В.В. Прус, Б.И. Невзлин // Электротехника и электромеханика. – 2012. – №4. – с. 36-40.

81. Muhammad A.M. An innovative technique for design optimization of core type 3-phase distribution transformer using mathematica / A.M. Muhammad, A.V. Rana, M.A.S. Masoum, J. Muhammad, M. Ammar // Global Journal of Technology and Optimization. – 2012. – №3. – p. 30-35.

82. Попова Т.В. Системный многофакторный анализ расчета конструктивных параметров сварочных реакторов на основе целевых функций / Т.В. Попова, С.Н. Попов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №3/9(63). – с. 19-24.

83. Пуйло Г.В. Оптимальный проектный синтез трансформаторов с комбинацией обмоток из различных проводниковых материалов / Г.В. Пуйло, Е.П. Насыпанная // Електротехнічні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 16(92) – с. 59-64.

84. 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.

85. 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.

86. Ставинский А.А. Универсальный метод обоснованого вибора технических решений активной части электрических машин и аппаратов / А.А. ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Пальчиков // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2016. – № 11(1183). – с.70-79.

87. Ставинский А.А. Анализ целевых функций и управляемых переменных оптимизационных расчетов трансформаторов и реакторов / А.А.

Ставинский Е.А. Авдеева, Р.А. Ставинский, А.С. Садовый, А.Н. Цыганов // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК. – 2018. с. 45-49.

88. Mufuta J.M. Modelling of the mixed convection in the windings of a disc-type power transformer / J.M. Mufuta, E. Van Den Bulck // Applied Thermal Engineering. –2000. – №20. –р. 417-437.

89. Holtshausen C.B. Transformer Thermal Modelling, Load Curve Development and Life Estimation / C.B. Holtshausen // R&D Journal of the South Africa institution of mechanical engineering. – 2015. – Volume 31. – p. 12-16.

90. Matukhno V. Energy efficient transformers with various load graphics for the consumers of electric power / V. Matukhno, Yu. Baidak, V. Chaikovskiy // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – Т. 52. – Вип. 2. – с. 34-39.

91. Baidak Y. Oil Movement in Closed Environment of Distribution Transformer Tank Problem Simulation / Y. Baidak, V. Matukhno, L. Belikova // Transylvanian Review journal. – 2016. – Vol. 26. – №11.

92. Матухно В.А. Моделирование поля температуры розподільчого трансформатора / В.А. Матухно, Ю.В. Байдак, П. Томлейн // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – Т. 53. Вип. 2. – с. 29-38.

93. Бальян Р.Х. Аналитический метод геометрической оптимизации ферромагнитных устройств / Р.Х. Бальян, В.П. Обрусник // Электричество. – 1979. – №9. – с. 40-46.

94. Макарова А.В. Оптимальные соотношения размеров трансформаторов с магнитопроводом прямоугольного сечения / А.В. Макарова // Электротехника. – 1988. – № 7. – с. 2-6.

95. Баев Н.Г. Трансформаторы с оптимальной геометрией сердечников / Н.Г. Баев // Электричество. – 1991. – №2. – с. 74-75.

96. Плахтир О.О. Удосконалення трифазних трансформаторів з просторовими магнітопроводами: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 / Одеський національний політехнічний університет. Одеса. – 2005. – 24с.

97. Авдєєва О.А. Трифазні трансформатори для встановлення в обмежені об'єми об'єктів підводної техніки: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 / Одеський національний політехнічний університет. Одеса. – 2015. – 21с.

98. Пальчиков О.О. Оптимізація технічного рівня індукційних електромеханічних та статичних перетворювачів з обертовим магнітним полем: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05. 09.01 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків. – 2017. – 22с.

99. Садовий О.С. Структурний синтез електромагнітних систем однофазних трансформаторів і реакторів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Кременчук. – 2019. – 20с.

100. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Киев: – 1995. – 42 с. – (препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; №772).

101. 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).

102. Лупиков В.С., Серєда А.Г., Крюкова И.В., Гелярoвская О.А. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломощном исполнении. Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №2. – с. 26-33.

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

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

105. Магнітопровід індукційного статичного пристрою: Пат. №100077, МПК НО1F 27/24 / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, О.С.

Садовый, О.М. Циганов (Україна) – Заявл. 20.04.2011; Опубл. 12.11.2012, Бюл. №21. – 8с.

106. Лазарев В.І. Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення): автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01 / Інститут електродинаміки НАН України. Київ, 2006. 37 с.

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

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

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

110. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. Л.: Энергия, – 1970. – 190с.

111. Зенова В.П., Лурье А.И. Об электродинамической эффективности трансформаторов с алюминиевыми обмотками. В кн. "Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. Составитель и научный редактор А.И. Лурье. – М.: "Знак", – 2005. – 520с. – с. 348-355.

112. 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.

113. Рабинович С.И. Условия соразмерности и коэффициент полезного действия трансформаторов. Электричество. – 1946. – №6. – с. 27-33.

114. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. М.: ВНИИ стандартэлектро. – 1989. – 23с.

ДОДАТКИ

Додаток А.

**ПОРІВНЯННЯ СЕРЕДНЬОГО ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ
ОБМОТОК ВАРІАНТІВ ОДНОФАЗНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
СИСТЕМИ**

При структурній оптимізації ЕМС на додаток до визначення ПТР $\Pi_{ijcu(al)}^*$ можливо, як вказано в [87] і розділі 2, визначення та порівняння температурного проєктного обмеження кожного з варіантів конструктивно-технологічних виконань активної частини.

В масляних силових розподільчих трансформаторах функціями теплового стану є рівняння середнього теплового навантаження обмоток (2.42) з складовими втрат короткого замикання $P'_{kijcu(al)}$, Вт і площі ефективної поверхні охолодження $S'_{wijcu(al)}$, м² еквівалентної обмотки:

$$P_{wijcu(al)} = P'_{kijcu(al)} / S'_{wijcu(al)}; \quad (A-1)$$

$$P_{kijcu(al)}^{(0)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \Pi_{kijcu(al)}^*; \quad (A-2)$$

$$S_{wijcu(al)}^{(0)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^2 \Pi_{wijcu(al)}^*. \quad (A-3)$$

де $\Pi_{kijcu(al)}^*$ і $\Pi_{wijcu(al)}^*$ – показники втрат активної потужності і площі ефективної поверхні охолодження еквівалентної обмотки ij – варіанту ЕМС.

Кінцевими ділянками забезпечення електропостачання частки споживачів є масляні ОТ напругою до 1000 В ($K_{30}=0,3$). В таких ОТ застосовуються обмотки з круглих провідників без вентиляційних каналів, в яких обмоткові котушки стикаються з ізоляцією поверхонь обмоткових вікон. Ефективними

поверхнями охолодження таких обмоток є зовнішні поверхні, що виходять за межі обмоткових вікон ЕМС (рис. А-1).

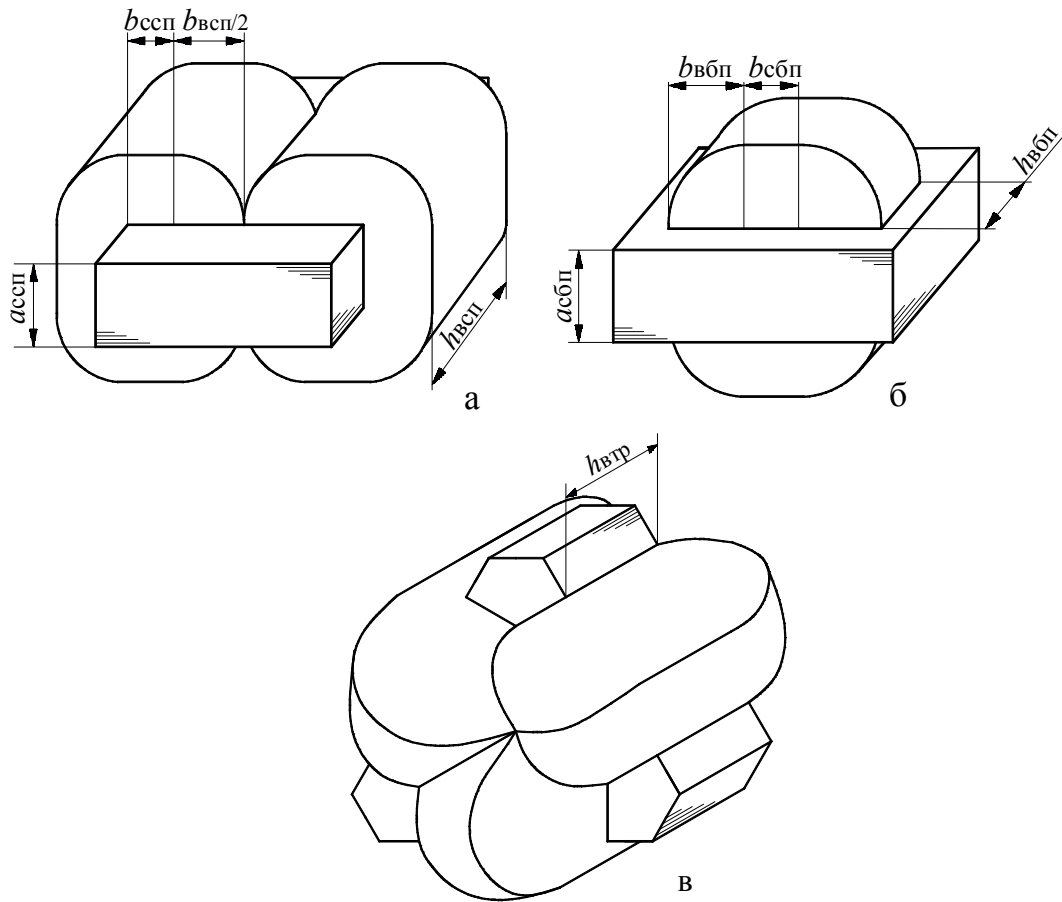


Рис. А-1 – Планарні стрижнева (а) і броньова (б) та просторова радіальна тристрижнева (в) однофазні статичні електромагнітні системи

Втрати активної потужності варіантів однофазних ЕМС (рис. А-1), що розглянуті в розділі 3, визначаються на основі (3.12), (3.28), (3.42), (3.58), (3.74), (3.92):

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{кспсу}(al)} &= K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_o^2 \lambda_B \left(\frac{8\Pi_{\text{от}}}{\sqrt[4]{\sin \alpha_c K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\
 &\times \left[\frac{1}{4} \left[a_M - \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right] = \\
 &= K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{\text{зо}} K_{\text{по}} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi_{\text{кспсу}(al)}^* ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P'_{\text{кбпсу}(al)} &= K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} \left(\sqrt[4]{\frac{8\Pi_{\text{то}}}{\sin \alpha_{\text{с}} K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_{\text{в}} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2}} \right)^3 \times \\
&\times \left[\frac{1}{4} \left[a_{\text{м}} - \sin \left(\alpha_{\text{с}} / 2 \right) \right]^2 \left[2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right] \right] = \\
&= K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{кбпсу}(al)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P'_{\text{ктрсу}(al)} &= K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \lambda_{\text{в}} \left(\sqrt[4]{\frac{24,63\Pi_{\text{то}}}{K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}} \right)^3 \times \\
&\times [\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953] = K_{\text{дк}} \gamma_{\text{су}(al)} K_{30} K_{\text{по}} J_0^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{от}}} \right)^3 \Pi^*_{\text{ктрсу}(al)},
\end{aligned}$$

де $\Pi^*_{\text{кспсу}(al)}$, $\Pi^*_{\text{кбпсу}(al)}$, $\Pi^*_{\text{ктрсу}(al)}$ – безрозмірні показники втрат активної потужності варіантів ЕМС (рис. А-1);

$$\begin{aligned}
\Pi^*_{\text{кспсу}(al)} &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_{\text{с}} K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_{\text{в}} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[\frac{1}{4} \left[a_{\text{м}} - \sin \left(\alpha_{\text{с}} / 2 \right) \right]^2 \times \right. \\
&\times \left. \left[2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right] \right]; \tag{A-4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi^*_{\text{кбпсу}(al)} &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_{\text{с}} K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_{\text{в}} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right)^2}} \right)^3 \left[\frac{1}{4} \left[a_{\text{м}} - \sin \left(\alpha_{\text{с}} / 2 \right) \right]^2 \times \right. \\
&\times \left. \left[2 \cos \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_{\text{м}} - \sin \frac{\alpha_{\text{с}}}{2} \right) \right] \right]; \tag{A-5}
\end{aligned}$$

$$\Pi^*_{\text{ктрсу}(al)} = \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3\text{с}} K_{30} \lambda_{\text{в}} (a_{\text{м}} - 1)}} \right)^3 [\lambda_{\text{в}} + 2a_{\text{м}} - 0,953]. \tag{A-6}$$

Безрозмірні показники втрат (А-4) – (А-6), що визначені при екстремальних значеннях КЗ за критерієм мінімуму маси ЕМС та при трьох значеннях K_{30} наведено в табл. А-1.

Таблиця А-1 – Значення безрозмірних показників втрат активної потужності однофазних планарних стрижневої і броньової та просторової радіальної тристрижневої електромагнітних систем

Позначення	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о. K_{30}	Екстремальні значення відносних геометричних керованих змінних		Показник втрат короткого замикання
		a_{me} , в.о.	λ_{ve} , в.о.	
$\Pi_{кспси}^*$	0,3	2,083	2,215	765,42
	0,25	2,234	2,203	787,69
	0,15	2,737	2,171	862,52
$\Pi_{кбпси}^*$	0,3	1,564	2,171	724,83
	0,25	1,669	2,161	751,57
	0,15	2,019	2,132	839,99
$\Pi_{кртси}^*$	0,3	1,371	1,507	626,89
	0,25	1,339	1,377	635,43
	0,15	1,263	1,068	664,52
$\Pi_{кспал}^*$	0,3	3,371	2,142	2091,0
	0,25	3,642	2,132	2169,0
	0,15	4,545	2,108	2466,0
$\Pi_{кбпал}^*$	0,3	2,463	2,108	2071,0
	0,25	2,654	2,101	1938,0
	0,15	3,288	2,081	2525,0
$\Pi_{кртal}^*$	0,3	1,204	0,832	1522,0
	0,25	1,186	0,759	1558,0
	0,15	1,145	0,585	1670,0

Площі, m^2 ефективних поверхонь охолодження обмоток варіантів ЕМС (рис. А-1) визначаються рівняннями:

$$S'_{вспси(al)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^2 \Pi_{вспси(al)}^*$$

$$S'_{вбпси(al)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^2 \Pi_{вбпси(al)}^*$$

$$S'_{вртси(al)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^2 \Pi_{вртси(al)}^*$$

де $\Pi_{\text{вспси}(al)}^*$, $\Pi_{\text{вбпси}(al)}^*$, $\Pi_{\text{вртси}(al)}^*$ – безрозмірні показники ефективних площ охолодження обмоток:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{вспси}(al)}^* = & \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^2 \left[\left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \left[4\pi \left(\frac{1}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \left[4\pi \left[\frac{1}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \frac{1}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] + \right. \\ & \left. + \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] + \left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] \right]; \end{aligned} \quad (\text{A-7})$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{вбпси}(al)}^* = & \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right)^2 \left[\left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \left[2\pi \left(\frac{1}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \left[\pi \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \frac{\alpha_c}{2} \lambda_B \right] + \left[\sin \frac{1}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] \right]; \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

$$\Pi_{\text{вртси}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right)^2 \left[0,75 \lambda_B + 3(a_M - 1) + \pi 0,75 \right]. \quad (\text{A-9})$$

Безрозмірні показники площ (A-7) – (A-9), що визначені при екстремальних значеннях КЗ за критерієм мінімуму маси ЕМС та при значенні $K_{30} = 0,3$ наведено в табл. А-2.

Таблиця А-2 – Значення безрозмірних показників площ ефективних поверхонь охолодження обмоток однофазних планарних стрижневої і броньової та просторової радіальної тристрижневої електромагнітних систем класу напруги 1000 В

Позначення	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о. K_{30}	Екстремальні значення відносних геометричних керованих змінних		Показник площі ефективної поверхні охолодження, в.о.
		a_{me} , в.о.	λ_{ve} , в.о.	
Π_{wspcu}^*	0,3	2,08	2,21	52,25
$\Pi_{wbpсu}^*$	0,3	1,56	2,17	31,35
$\Pi_{wртсu}^*$	0,3	1,37	1,50	56,59
Π_{wspal}^*	0,3	3,37	2,14	75,03
Π_{wbpal}^*	0,3	2,46	2,10	50,40
$\Pi_{wртal}^*$	0,3	1,20	0,83	80,21

Середні теплові навантаження варіантів ЕМС (рис. А-1), Вт/м², що відповідають (2.42) і (А-3) визначаються, при умові ідентичності $\Pi_{от}$, рівняннями:

$$P_{wspcu(al)} = P'_{кспсu(al)} / S_{wspcu(al)} = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \times$$

$$\times \Pi_{кспсu(al)}^* / \Pi_{wspcu(al)}^* = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right) \Pi_{\Theta спсu(al)}^* ;$$

$$P_{wbpсu(al)} = P'_{кбпсu(al)} / S_{wbpсu(al)} = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \times$$

$$\times \Pi_{кбпсu(al)}^* / \Pi_{wbpсu(al)}^* = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right) \Pi_{\Theta бпсu(al)}^* ;$$

$$P_{wртсu(al)} = P'_{кртсu(al)} / S_{wртсu(al)} = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right)^3 \times$$

$$\times \Pi_{кртсu(al)}^* / \Pi_{wртсu(al)}^* = K_{дк} \gamma_{cu(al)} K_{30} K_{по} J_o^2 \left(\sqrt[4]{\Pi_{от}} \right) \Pi_{\Theta ртсu(al)}^* ,$$

де $\Pi_{\Theta спсu(al)}^*$, $\Pi_{\Theta бпсu(al)}^*$, $\Pi_{\Theta ртсu(al)}^*$ – безрозмірні показники середнього теплового навантаження обмоток варіантів однофазної електромагнітної системи,

$$\begin{aligned}
\Pi_{\Theta\text{спци}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right) \left[\frac{1}{4} \left[a_M - \sin(\alpha_c/2) \right]^2 \times \right. \\
&\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \Big/ \left[\left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\
&+ \left[4\pi \left(\frac{1}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right)^2 \right] + \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \left[4\pi \left[\frac{1}{4} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \frac{1}{2} \times \right. \\
&\times \left. \left. \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] \right] + \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] + \left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] \Big]; \quad (\text{A-10})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi_{\Theta\text{бпци}(al)}^* &= \left(\sqrt[4]{\frac{8}{\sin \alpha_c K_{3c} K_{30} \lambda_B \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2}} \right) \left[\frac{1}{4} \left[a_M - \sin(\alpha_c/2) \right]^2 \times \right. \\
&\times \left[2 \cos \frac{\alpha_c}{2} + 2 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \Big/ \left[\left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\
&+ \left[2\pi \left(\frac{1}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right)^2 \right] + \left[\pi \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \frac{1}{2} \lambda_B \right] + \\
&\left. \left. \left[2 \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \lambda_B \right] \right] \right]; \quad (\text{A-11})
\end{aligned}$$

$$\Pi_{\Theta\text{бпци}(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{24,63}{K_{3c} K_{30} \lambda_B (a_M - 1)}} \right) \left[\lambda_B + 2a_M - 0,953 \right] \Big/ \left[0,75\lambda_B + 3(a_M - 1) + \pi 0,75 \right]. \quad (\text{A-12})$$

Безрозмірні показники середнього теплового навантаження обмоток (A-10) – (A-12), що визначені при екстремальних значеннях КЗ за критерієм мінімумів маси ЕМС та при значенні $K_{30} = 0,3$ наведено в табл. А-3.

Таблиця А-3 – Безрозмірні показники середнього теплового навантаження обмоток варіантів однофазних планарних стрижневої і броньової та просторової радіальної тристрижневої електромагнітних систем класу напруги 1000 В з прямокутними утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок, що відрізняються мідними і алюмінієвими провідниками обмоток

Позначення	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о. $K_{з0}$	Відносний показник середнього теплового навантаження електромагнітних систем
$\Pi_{\Theta спси}^*$	0,3	14,65
$\Pi_{\Theta блси}^*$	0,3	23,12
$\Pi_{\Theta ргси}^*$	0,3	10,52
$\Pi_{\Theta спал}^*$	0,3	27,87
$\Pi_{\Theta блал}^*$	0,3	41,09
$\Pi_{\Theta ртал}^*$	0,3	18,97

З табл. А-3 випливає, що при прийнятих умовах порівняння, стрижнева ЕМС має покращене значення вказаного навантаження відносно броньової ЕМС на 35,95% і на 29,23%, а радіальна тристрижнева ЕМС має покращене значення такого навантаження відносно стрижневої ЕМС на 22,26% і на 29,23% відповідно при мідних і алюмінієвих обмотках.

Додаток Б. Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи

ЭЛЕВАТОР-ПРОМСЕРВИС

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

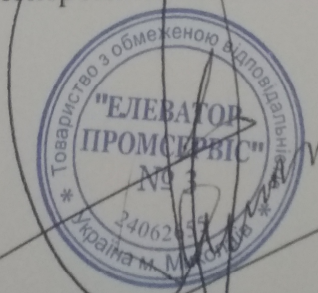
“ЕЛЕВАТОРПРОМСЕРВИС” **ELEVATORPROMSERVISE Ltd.**

№
07.07.2020р

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТОВ «ЕЛЕВЕТОРПРОМСЕРВИС»
Коваленко В.О.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Циганова Олександра Миколайовича

За результатами дослідження здобувача кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Миколаївського національного аграрного університету Циганова О.М. розглянуті пропозиції щодо удосконалення індукційних статичних пристроїв на основі восьмигранних конфігурації стрижнів та обмотувальних котушок. Що може бути використано при створенні теоретичних основ визначення оптимальних співвідношень геометричних параметрів магнітної системи з використанням математичної моделі. Що створить передумови зменшення масовартісних та енергетичних показників, спростить технологію виготовлення і збільшить надійність обмоток при коротких замиканнях. Впровадження вказаних результатів у практичну діяльність ТОВ «ЕЛЕВЕТОРПРОМСЕРВИС» створила передумови оптимального проектування машин для переробки сільгосппродуктів з врахуванням особливості конфігурацій електромагнітних систем.



Директор В.О. Коваленко

УКРАЇНА, 54050, м.Миколаїв, вул. Янтарна, 318/3
318/3, Yatarnaya str., Nikolaev, 54050, Ukraine

Тел./факс: (0512) 25-60-66, 25-32-13
63-23-66, 50-05-62
e-mail: elevator@ukr.net

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
ІНГУЛ»



Україна, 54028, м. Миколаїв, вул. Гмирьова, 8.

Телефон: (0512) 23-01-66, 23-02-61, Факс: 23-10-66, 23-03-31

Вих. № 36/21 від 14.09.2020р

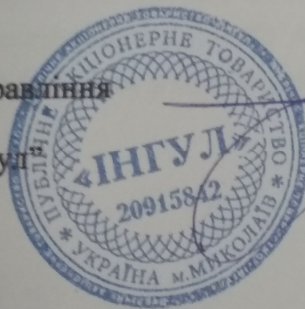
АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи

Циганова Олександра Миколайовича

Результати досліджень дисертаційної роботи (конструкторсько-технологічні рішення та результати аналітичних розрахунків екстремальних значень маси, вартості та втрат активної потужності електромагнітних систем однофазних трансформаторів) використовуються в розробках конструкторського відділу ПАТ «Інгул» (Миколаївський трансформаторний завод) та впроваджено в виробництво.

Голова правління

ПАТ «Інгул»



І.О. Тимченко



Виробничо-комерційне підприємство

РЕСПЕКТ
БІЗНЕС

Юридична адреса: 54030, м. Миколаїв, вул. Артилерійська, 19/3
Поштова адреса: 54030, м. Миколаїв, а/с 61
Тел/факс (0512)58-04-86, 58-04-87, 58-04-88, 58-04-89, 58-04-90
Р/р 26000001303292 в РВ АТ "ОТП Банк", м. Київ, МФО 300528.
ЄДРПОУ 30083568. E-mail: rtbs@gmx.com

Товариство з обмеженою відповідальністю

Вихідний № 18/ 4 Д

Від 26.11. 2018 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ ВКП «Респект Бізнес»

О.В. Моспаненко



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Циганова Олександра Миколайовича

Технічні рішення удосконалення статичних електромагнітних систем заміною традиційних прямокутних і кругових утворюючих контурів стрижнів та обмоткових котушок на багатогранні та проектні оптимізаційні математичні моделі структурно-параметричного синтезу трансформаторів і реакторів з нетрадиційними утворюючими контурами прийняті до впровадження при виконанні проектних робіт в ТОВ ВКП «Респект Бізнес».

Вказані результати дозволили скласти виробничу розрахункову методику проектування трансформаторного обладнання для суднових кондиціонерів та машин термічного різання з покращеними показниками технічного рівня.

Директор

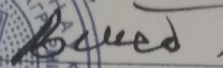


О.В. Моспаненко



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Миколаївського НАУ

 / академік Шебанін В.С.

21.01. 2021 року

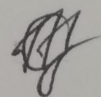
АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи Циганова О.М. у навчальний процес Миколаївського національного аграрного університету

Дисертаційне дослідження за темою "Структурний синтез і параметрична оптимізація трансформаторів та реакторів з шихтованими магнітопроводами" виконане Цигановим О.М. на кафедрі Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Миколаївського національного аграрного університету в рамках науково-дослідних робіт № 0117U005255 "Удосконалення, структурний і параметричний синтез електромагнітних систем трансформаторів" та №120U105761 "Удосконалення, структурний та параметричний синтез електромагнітних статичних пристроїв" (науковий керівник – доктор техн. наук, професор Ставинський А.А., виконавець Циганов О.М.)

Даний акт свідчить про те, що основні положення, висновки та рекомендації, які викладені в роботі Циганова О.М., використовуються у навчальному процесі Миколаївського національного аграрного університету при проведенні лекційних, практичних і лабораторних занять з дисциплін "Електричні машини" та "Проектний синтез електромеханічних об'єктів". Розроблена методика оптимізаційного структурно-параметричного синтезу однофазних трансформаторів та реакторів використовується при виконанні курсових проектів зі спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

В.о. декана
Інженерно-енергетичного
факультету, канд. пед. наук, доцент



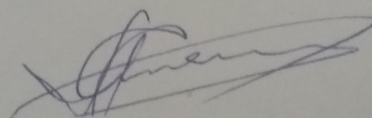
Горбунова К.М.

Голова методичної ради
Інженерно-енергетичного
факультету, канд. техн. наук, доцент



Горбенко О.А.

Науковий керівник, завідувач кафедри
"Електроенергетики, електротехніки та
електромеханіки",
доктор техн. наук, професор



Ставинський А.А.