

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Проектний синтез електромеханічних об'єктів.

**Способи удосконалення, структурний і параметричний
синтез електромеханічних пристроїв і електричних
машин**

методичні вказівки

до вивчення курсу для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм
навчання спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка" за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

Миколаїв
2022

УДК 621.313
П79

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету (протокол № 9 від 23.05.2022р.)

Укладачі:

- Ставинський А. А. – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.
- Циганов О. М. – канд. тех. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.
- Мардзявко В. А. – канд. тех. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.
- Руденко А. Ю. – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

- Гавриш В. І. – канд. тех. наук, д.е.н., професор кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації та технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.
- Кошкін Д.Л. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, директор інституту післядипломної освіти Миколаївського національного аграрного університету

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕМ – електрична машина
ККД – коефіцієнт корисної дії
АД – асинхронний двигун
ЕМС – електромагнітна система
ЕТС – електротехнічна сталь
КАД – класичний асинхронний двигун
ІСП – індуктивний статичний пристрій
ОАД – обернений асинхронний двигун
ТАД – торцевий асинхронний двигун
УК – утворюючий контур
ЕМН – електромагнітні навантаження
ПТР – показник технічного рівня
ТТ – трифазний трансформатор
ЗМП – зовнішнє магнітне поле
ОТ – однофазний трансформатор
ТР – трифазний реактор
ВАХ – віброакустичні характеристики
ОР – однофазний реактор
ММ – математична модель
ЦФ – цільова функція
КЗ – керована змінна
ТЗ – технічне завдання
ВКЗ – втрати короткого замикання
ВНР – втрати неробочого руху
ЕМЕ – електромагнітна еквівалентність

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
Вступ.....	7
Розділ 1. Основні вимоги сучасного розвитку електричних машин і електротехнічних комплексів на їх основі.....	13
1.1. Задачі удосконалення асинхронних двигунів і електроприводів потужністю до 200 кВт.....	14
1.2. Класичні і нетрадиційні способи удосконалення електромеханічних пристроїв і агрегатів.....	21
1.3. Особливості активної та конструктивної частин асинхронних двигунів нетрадиційних структур і конструкцій.....	25
1.4. Особливості деяких статичних електромагнітних систем нетрадиційних структур і конфігурацій.....	29
1.5. Висновки до розділу 1.....	34
Розділ 2. Задачі оптимального проектування електромеханічних пристроїв, електротехнічних систем і комплексів.....	36
2.1. Загальне уявлення оптимізаційного проектування технічних об'єктів і систем.....	37
2.2. Постановка задач оптимізаційного проектування і управління функціонуванням електричних машин та електричних комплексів.....	41
2.3. Методи оптимізації, оцінки якості і аналітичного порівняльного аналізу електричних комплексів та машин.....	47
2.4. Особливості визначення показників технічного рівня асинхронних двигунів.....	55
2.5. Висновки до розділу 2.....	59
Розділ 3. Математичне моделювання варіантів структур асинхронних двигунів.....	60
3.1. Показники маси і вартості асинхронних двигунів з радіальними електромагнітними системами.....	60

3.2. Показники втрат активної потужності двигунів з радіальними електромагнітними системами та внутрішнім і зовнішнім роторами.....	72
3.3. Показники маси і вартості аксіальної електромагнітної системи двигуна з одним ротором.....	81
3.4. Показники втрат активної потужності аксіального двигуна з одним ротором.....	93
3.5. Висновки до розділу 3.....	102
Розділ 4. Можливості енергоресурсозбереження на основі безкорпусного виконання і нетрадиційних магнітопроводів машин змінного струму.....	105
4.1. Проблеми і способи зниження відходів електротехнічної сталі при виробництві магнітопроводів.....	106
4.2. Асинхронні двигуни з безкорпусним статором.....	111
4.3. Варіанти конструктивного і теплоаеродинамічного удосконалення безкорпусних статорів.....	117
4.4. Короткозамкнені ротори з конусно-площинною структурою магнітопроводу.....	123
4.5. Висновки до розділу 4.....	126
Висновки по роботі.....	128
Список літератури.....	131

ВСТУП

Головним сучасним напрямом розвитку електромеханіки та електротехнічних комплексів є збереження енергетичних і матеріальних ресурсів при виробництві та експлуатації електромеханічних пристроїв, а також систем розподілу, споживання та перетворення електроенергії [1-6].

Комплексне енергоресурсозбереження при виробництві електричних машин (ЕМ) і апаратів уявляється в максимальному підвищенні коефіцієнту корисної дії (ККД) і $\cos\varphi$ та питомої потужності, а також підвищенні потужності одиничного електромеханічного агрегату [1-3].

Відомо [4], що 40% втрат в електроенергетичних системах приходить на розподільчі трансформатори, а 60% на лінії електропередачі і кабелі. В цілому втрати в розподільчих трансформаторах складають 2% від загальної виробленої електроенергії.

Визначено [5], що за останні (30...50) років витрачено в (3...4) рази більше паливно-енергетичних ресурсів відносно загальних енергетичних витрат з початку існування людства до 70-х років XX сторіччя. Найбільшим споживачем електроенергії є промисловий електропривод, на який приходить 60% від загальних витрат. З врахуванням витрат в побутовому електрообладнанні та поступової заміни в автомобілях теплових двигунів на електричні, можна вважати, якщо електропривод не стане енергозберігаючим, його доля втрат досягне 70%. При цьому електропривод як засіб автоматизації технологічних процесів за рахунок їх оптимізації має властивість «лавиноподібного» збільшення збереження енергоресурсів [6]. Однак сучасний стан розвитку та використання електрообладнання в Україні характеризується тим, що енергоемність одиниці загального вітчизняного валового продукту в 3,5 рази вище відносно інших промислово розвинених держав [5]. Тому рішення проблеми енергоресурсозбереження для України є важливим першочерговим завданням.

Актуальність. В сучасному світі розподіл та основне споживання електроенергії здійснюють індуктивні перетворювачі – трансформатори і асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором. На протязі сторіччя основу будови силових трансформаторів та загальнопромислових АД закритого обдуваемого і захищеного виконань складають відповідно планарні та радіальні схеми і структури електромагнітних систем (ЕМС) [7, 8, 14, 15].

Однофазні та трифазні трансформатори, які містять прямокутні обмоткові вікна та стрижні з прямокутними і круговими конфігураціями перерізів стрижнів [14, 15], що складені з пакетів пластин (листів) або навиті зі стрічки (рулону) електротехнічної сталі (ЕТС) можна вважати «класичними» або традиційними [16]. Загальнопромислові АД з зовнішнім статором і внутрішнім ротором з магнітопроводами, що містять плоскі шари ЕТС з круговими контурами також отримали відоме, зокрема з [7-13], найменування «класичних» (КАД) або «традиційних».

В минулий час розвиток електромеханіки також супроводжувався менш масштабними, у порівнянні з комплексними розробками і багатосерійним виробництвом трансформаторів з планарними ЕМС і КАД, дослідженнями і виготовленням індукційних статичних пристроїв (ІСП) з просторовими ЕМС обернених АД (ОАД) з зовнішнім ротором і так званих торцевих АД (ТАД) з аксіальним робочим зазором. Застосуванням вказаних електромеханічних пристроїв досягається покращення масогабаритних і експлуатаційних характеристик блоків електрообладнання та ряду механізмів загальнопромислового і спеціального призначень [11, 12, 16, 18-25].

Основу трансформаторів і реакторів, що перебувають у виробництві, складають ЕМС з вказаними традиційними прямокутними і криволінійними утворюючими контурами (УК) стрижнів і обмоткових котушок. На додаток до традиційних способів [14] зниження основних і додаткових втрат оптимізацією електромагнітних навантажень (ЕМН), транспонуванням провідників обмоток, відпалюванням шарів ЕТС, розроблені нові технологічні способи [15]. На основі таких способів створені і використовуються технології Step-lep, Malt-

Step-ler і Unicore формування планарних шихтованих і аналогів витих з вигнутих смуг анізотропної ЕТС магнітопроводів з малим перекриттям «косих» стиків суміжних шарів. Замість анізотропної ЕТС в стрічкових (рулонних) магнітопроводах силових трансформаторів знаходить застосування більш коштовна аморфна ЕТС зі зниженими питомими витратами [4, 15]. Однак аморфна ЕТС («скляний» крихкий метал) є непридатною до застосування в транспортних та інших спеціальних трансформаторах [16, 17].

В цілому КАД, ОАД і ТАД з традиційними (УК), радіальними і аксіальними конструкціями ЕМС характеризуються відомими недоліками зубцево-пазових структур [14, 26]. Традиційні радіальні магнітопроводи КАД і ОАД виготовляються зі значними відходам ЕТС [9-10]. Тому досягнутий стан розвитку практичної електромеханіки не є задовільним і остаточним.

В останній чверті минулого сторіччя склалась думка [9-13, 26-32], що потребуються нові підходи до створення АД. Однак сучасний стан нових розробок АД характеризується тим, що в минулі, відносно вказаних публікацій, роки нічого не змінили в частині створення і використання нових та нетрадиційних конструкцій ЕМС і конструктивної частини АД. Засвоєні в виробництві в ХХІ столітті КАД в конструктивно-структурному сенсі аналогічні попереднім технічним рішенням. Наприклад, КАД ВА04, ІВА0...ВА05П та інші практично не відрізняються від попередніх розробок ВА02 1970-х років [31, 32]. При проектуванні нових КАД застосовуються традиційні ЕМС і способи охолодження та традиційний корпус з зовнішнім обдувом [31-33]. Застосовані схеми конструктивної частини закритих і захищених КАД відповідають початку минулого сторіччя і, згідно [9, 31], не є ефективними.

Тенденцією останніх десятиріч розробок КАД є підвищення, відповідно до вимог [1-6], ККД зниженням ЕМН при збільшенні активної довжини і матеріалоємності [34-38], що суперечить завданню комплексного ресурсозбереження. Також енергоресурсозбереження на основі нових розробок електротехнічних комплексів і механізмів можливе застосування замість КАД відповідно спеціальних ОАД і ТАД [11, 12, 16, 18-25].

Сучасні трансформатори, реактори і дроселі згідно [4, 5] повинні виготовлятися на основі нових конструкційних і технологічних рішень, матеріалів і комплектуючих. Однак в нових розробках ІСП використовуються ЕМС з традиційними варіантами УК і конструкцій активної і конструктивної частини [15].

На основі викладеного задачі пошуку і обґрунтування нетрадиційних технічних рішень для підвищення показників технічного рівня (ПТР) трансформаторів, реакторів і АД загальнопромислового (силового) та спеціального призначень, а також енергоресурсозбереження при їх виробництві і експлуатації є важливими і актуальними.

Розробка і обґрунтування переваг нових електромеханічних пристроїв та електротехнічних систем і комплексів на їх основі передбачає рішення задач удосконалення та структурно-параметричного синтезу ЕМС. Виникає необхідність евристичного пошуку та узагальненого зіставлення варіантів ЕМС з метою створення ефективних конструктивно-технологічних рішень енергоресурсозберігаючих ЕМ і апаратів. Також рішення аналогічних задач необхідно при розробці сучасних електромеханічних систем та електротехнічних комплексів.

Названі задачі потребують визначення методології, яка забезпечує можливість оптимізаційного порівняльного аналізу варіантів створення електричних об'єктів, зокрема ЕМС ЕМ, що відрізняються структурами, компонентами і конфігураціями активних елементів. Такий аналіз є можливим на основі функціональних залежностей від універсальних та прийнятних для будь якого розглядуваного варіанту ЕМС (об'єкту) факторів впливу на ПТР.

Отже виникає доцільність розглядання комплексу питань розроблення, дослідження і порівняння варіантів рішення задач подальшого розвитку об'єктів електромеханіки і електротехніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота входить до комплексу наукових досліджень в напрямку енергоресурсозбереження, що виконуються на кафедрі Електроенергетики, електротехніки і електромеханіки Миколаївського національного аграрного університету. Вка-

зані роботи виконуються у відповідності зі сукупністю документів, зокрема Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»; комплексною програмою «Наукові основи електроенергетики» Національної академії наук України; державною науково-технічною програмою «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології».

Мета і задачі дослідження. Робота направлена на вирішення питань створення теоретичної основи вдосконалення АД загальнопромислового та спеціального призначення на основі визначення конструктивно-технологічних пропозицій і методологій, що забезпечують покращення та оптимізаційне визначення ПТР варіантів ЕМС.

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

- аналіз стану питань розвитку конструктивно-технологічних рішень удосконалення АД загальнопромислового і спеціального призначень;
- визначення методології оптимізаційного розрахунку ПТР та зіставлення варіантів ЕМС АД;
- визначення методів і засобів удосконалення та варіантів структур і виконань активної і конструктивної частини КАД, ОАД і ТАД.

Об'єкт дослідження – варіанти ЕМС і конструктивної частини АД загальнопромислового і спеціального призначень.

Предмет дослідження – ПТР варіантів ЕМС КАД, ОАД і ТАД.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач були використані: теорія індукційних перетворювачів, метод експертної оцінки, метод узагальненого моделювання на основі безрозмірних ПТР та універсальних відносних геометричних і електромагнітних координат.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Показана ідентичність виду узагальнених функцій оптимізації та оптимізаційного зіставлення варіантів ЕМС трансформаторів, реакторів і АД;

- Визначена можливість енергоресурсозбереження при виробництві КАД на основі безкорпусного виконання статора та нетрадиційних конструкцій шарів ЕТС магнітопроводів.

- Визначена можливість покращення масовартісних і енергетичних характеристик КАД, ОАД і ТАД застосуванням просторових структур елементарних шарів ЕТС магнітопроводів.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота містить перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, 50 рисунків, 12 таблиць, перелік літератури з 124 найменувань. Робота викладена на 143 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ВИМОГИ СУЧАСНОГО РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ЇХ ОСНОВІ

У нинішній час загальна виробнича і побутова діяльність людства базується на створенні та використанні електричної енергії. Вироблення, розподіл і перетворення електричної енергії в механічну, а також управління вказаними процесами, складають енергетичний цикл усіх галузей виробництва. Сучасний стан загальної енергетики характеризується тим, що глобальні процеси супроводжуються зростанням дефіциту і вартості сировини та енергоносіїв. Ці процеси викликають підвищення енергетичних вимог до промислового обладнання та пошук засобів енергоресурсозбереження в електромашинно- і апаратуробудуванні та удосконалення на новій елементній основі систем генерування і перетворення та комплексів електропостачання.

В найближчому майбутньому не передбачаються розробки засобів більш простого рішення задач безконтактних передачі і перетворення енергії, які були б простішими, дешевшими і надійнішими за безконтактні індукційні перетворювачі – трансформатори і АД з короткозамкненим ротором. Активна частина таких статичних і рухомих ЕМ включає трифазні та багатофазні обмотки в складі феромагнітних магнітопроводів. Основні структури і конструкції трифазних трансформаторів (ТТ) та технічні рішення АД з розподіленою обмоткою статора з короткозамкненим і фазним роторами були запропоновані видатним винахідником та вченим М.О. Доліво-Добровольським в 1889 році і майже за 100 років практично не перетерпіли змін.

В розділі 1 виконано аналіз стану питань і досягнутих результатів досліджень в напрямку удосконалення АД та ІСП.

1.1. Задачі удосконалення асинхронних двигунів і електроприводів потужністю до 200 кВт

В суспільному виробництві України експлуатуються десятки мільйонів АД загальною потужністю (40...50) млн. кВт (табл. 1.1) [6]. З цих двигунів на протязі року 10% виходять з ладу. В агропромисловому комплексі середній термін експлуатації АД складає 3 роки, а в окремих галузях промисловості їх аварійність складає від 20% до 60% [39]. Ремонт АД супроводжується, в основному, зниженням ККД і надійності, тому і вважається не зовсім доцільним [6]. За даними європейських експертів вартість енергії, що споживає середній АД в промисловості, в 5 разів перевищує його вартість [40].

Таблиця 1.1 – Розподіл асинхронних двигунів по потужності і споживанню електроенергії

Потужність, кВт	До 1,0	1,0...5,0	5,0...20,0	20,0...100,0	>100,0
% від загальної кількості	10	60	20	9	1
% від загального споживання електроенергії	5	40	30	20	5

З табл. 1.1 виходить, що з загального парку АД 95% електроенергії споживають АД потужністю до 100 кВт. В цілому асинхронні електроприводи потужністю (1...100) кВт споживають близько 90% загальної енергії, що перетворюють усі електроприводи [6]. На рис. 1.1 наведено фрагмент нормативів енергоефективності електродвигунів, що прийняті комісією виробників електричних машин і силової електроніки Європейського союзу. Залежність ККД від потужності за нормами EFF2 відповідає двигунам держав колишнього СРСР [37].

Згідно вказаному рисунку ККД АД загального призначення в діапазоні потужності від 1,5 до 250 кВт повинен зрости відповідно з 0,75 до 0,9 та з 0,94 до 0,975.

Реалізація задач підвищення енергоефективності систем і комплексів електрообладнання обумовлює стійке зростання матеріалоємності і відповідно ціни електричних машин з початку 80-х років минулого сторіччя [34-38]. Розробка АД з підвищеними ККД і матеріалоємністю характерна для Японії, США і провідних держав західної Європи. В табл. 1.2 наведено залежності змін економії енергії при експлуатації, ціни та терміну окупності від енергетичної ефективності варіантів АД з різними рівнями питомої матеріалоємності. Потужність і частота обертання при частоті електричного живлення 50 Гц кожного з вказаних варіантів складають 15 кВт і 1500 об/хв [37]. Підвищення ККД енергозберігаючих АД досягається за рахунок зниження щільності струму і збільшення активної довжини статора в середньому до 20% [34-38].

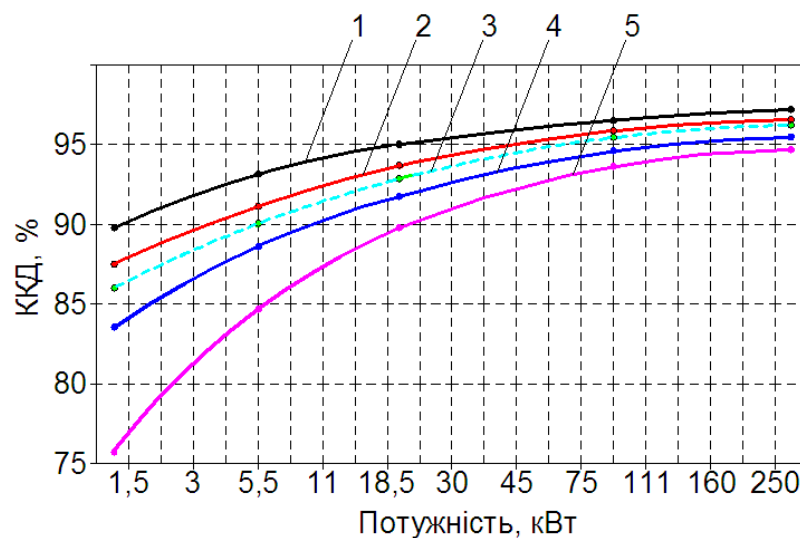


Рисунок 1.1 - Показники енергоефективності асинхронних двигунів:

- 1 – енергоефективність А; 2 – енергоефективність В;
- 3 – енергоефективність С; 4 – енергоефективність EFF1-D;
- 5 – енергоефективність EFF2.

Суттєва економія електроенергії також пов'язана з використанням АД статичних і рухомих ЕМ в складі регульованих і автоматизованих та комп'ютеризованих електромеханічних систем та електротехнічних комплексів. До складу вказаних об'єктів крім ЕМ і апаратів контролю і

захисту входять перетворювачі частоти, пристрої плавного пуску та регулятори збудження постійним струмом, редуктори і мультиплікатори, а також системи керування та обчислювальні пристрої. Оптимальні комбінації названих елементів дозволяють створити енергоефективні і високотехнологічні системи електрообладнання [39-43].

Розвиток силової і мікропроцесорної електроніки надав поштовх широкому застосуванню електромеханічних систем з силовими ланками перетворювач частоти – АД. Діапазон регулювання вказаних систем при підвищенні надійності, простоти і технологічності та низької вартості АД відносно колекторних двигунів відповідає аналогам постійного струму. В минулому часі широкому використанню частотного регулювання АД перешкоджала висока вартість силових напівпровідникових керованих перетворювачів.

Таблиця 1.2 – Залежність економії електроенергії та підвищення ціни і окупності експлуатації від енергоефективності асинхронного двигуна при зміні матеріалоемності

Рівень енергоефективності	Коефіцієнт корисної дії, %	Економія, кВтгод	Підвищення ціни, %	Термін окупності, рік, місяць
EFF2	89,5	-	-	-
EFF1-D	91,8	1000	25	2,4
C	92,6	1350	36	2,6
B	93,7	1800	50	2,7
A	94,5	2150	81	3,6

Зниження вартості електричних пристроїв в поєднанні зі зростанням цін на електротехнічні матеріали (рис. 1.2) і тенденція до продовження такого процесу змінила регульований привід кардинально [37].

Значним недоліком систем промислового електрообладнання України, згідно [6], є недостатня складова вказаного енергоресурсозберігаючого асинхронного регульованого електроприводу.

З наведеного, табл. 1.1, 1.2 і рис. 1.1, 1.2 випливає, що основними напрямками економії електроенергії та матеріальних ресурсів в Україні повинно стати удосконалення загальнопромислових і спеціальних АД малої і середньої потужності та заміна нерегульованого асинхронного електроприводу на регульований.

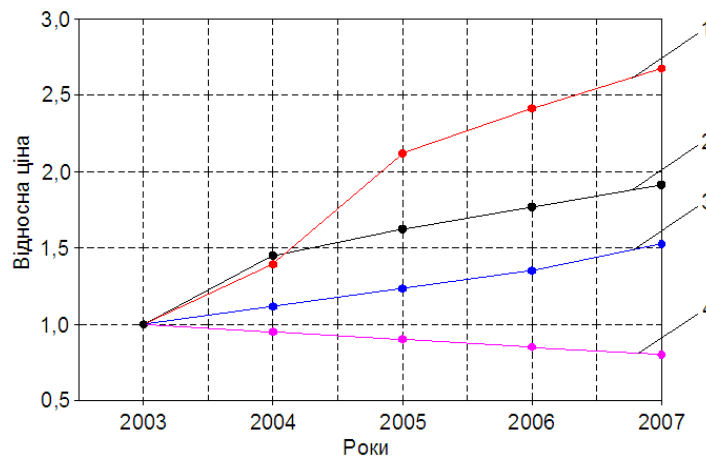


Рисунок 1.2 – Індекс зміни цін на електротехнічні матеріали та силові перетворювальні пристрої: 1 – обмотковий провід; 2 – електротехнічна сталь; 3 – алюміній; 4 – перетворювачі частоти.

Удосконалення конструкцій і технології виробництва АД відбувається за двома комплексними напрямками. У відповідності до першого напрямку вирішується задача подальшого удосконалення КАД з метою розробки високо економічних серій загального призначення [44, 45]. Другий напрямок уявляється в створенні АД, які призначені для конкретних механізмів і режимів роботи [3, 11, 12, 18-25, 40-43]. Важливими складовими частинами задач підвищення технічного рівня АД усіх призначень, крім оптимізації питомої потужності, є зниження матеріаломісткості конструктивної частини, а також послаблення теплових і механічних факторів, що прискорюють процес старіння ізоляції обмоток. Особливо актуальними вимогами удосконалення конструкцій і технологій КАД масового випуску є

підвищення екологічності виробництва, в першу чергу ливарного виготовлення елементів металевих оболонок ЕМС та економія металургійного прокату ЕТС. Тому удосконалення АД повинно відбуватися в напрямку інтенсифікації теплообміну активної частини з зовнішнім середовищем, зниження маси зовнішніх і внутрішніх елементів конструктивної частини, а також рішення проблеми зниження відходів ЕТС виробництва магнітопроводів [3, 9-13, 26-29]. Технологічним резервом підвищення ККД є досягнення зменшення довжини лобових частин і додаткових втрат шляхом підвищення якості та створення нових способів укладання секцій і ізоляції обмотки статора та заливки пазів ротора, а також бездеформаційних технологій складання і скріплення шарів ЕТС магнітопроводів [37, 45].

Конструктивні і структурні схеми більшості планарних і просторових ЕМС, що застосовуються у виробництві трансформаторів і реакторів (дроселів) характеризуються прямокутними (рис 1.3, *а*) і криволінійними (рис. 1.3, *б*) утворюючими контурами (УК) стрижнів і обмоткових вікон [14, 15, 46-48]. Максимальне застосування у виробництві вказаних ІСП отримала планарна ЕМС (рис. 1.4).

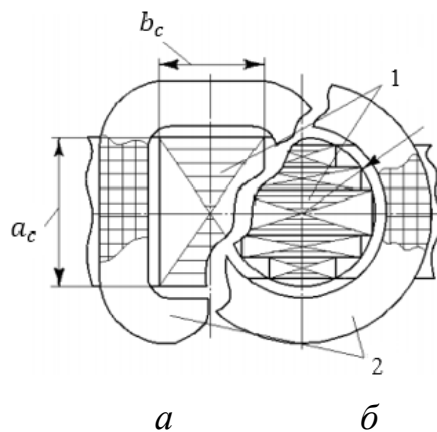


Рисунок 1.3 – Традиційні конфігурації стрижнів (1) і обмоткових котушок (2) індукційних статичних пристроїв

Деяке зниження втрат в магнітопроводі і зниження матеріалоемності однофазних трансформаторів (ОТ), ТТ і реакторів досягнуто в другій половині ХХ століття застосуванням замість ізотропної листової і

анізотропної рулонної ЕТС, а також просторових ЕМС з витими і комбінованими (виті ярма, шихтовані стрижні) магнітопроводами [46, 48]. Однак реалізовані практично просторові ЕМС, як і планарні аналоги, розроблені на основі «традиційних УК» (рис. 1.3, *а, б*), що знижує їх ефективність.

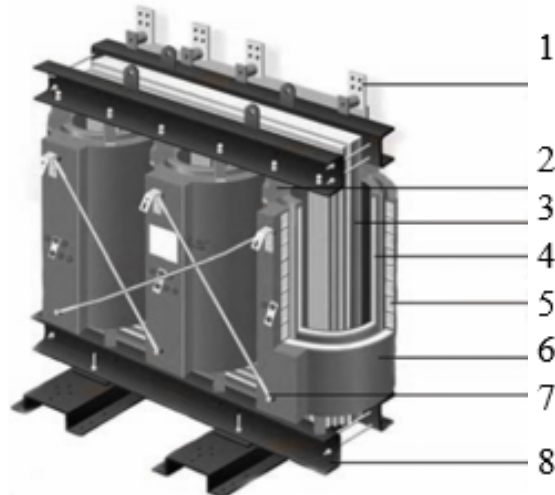


Рисунок 1.4 – Загальний вид планарної електромагнітної системи в складі сухого силового трансформатору з капсульованою обмоткою і його основні елементи конструкції: 1 – низьковольтний ввід; 2 – пружні прокладки; 3 – магнітопровід; 4 – низьковольтна обмотка; 5 – високовольтна обмотка; 6 – епоксидний шар з кварцовим наповнювачем; 7 – високовольтний ввід; 8 – опорна рама.

В останні десятиріччя використовувались залишкові «резерви» удосконалення статичних ЕМС з УК (рис. 1.3, *а, б*) і новітні досягнення електроматеріалознавства. В шихтованих планарних магнітопроводах виконана, незважаючи на значні ускладнення технологій, заміна «прямих» стиків на «косі» стики [15, 46, 48]. При виготовленні сучасних трансформаторів потужністю до 2500 кВ·А, з метою забезпечення підвищення захисту від зовнішнього середовища, електродинамічної стійкості і енергетичної ефективності, застосовуються «вакуумна» і «рвингова» технології капсулювання витків і котушок обмоток [49, 50]. Для можливості заміни «звичайних» створені транспоновані і стрічкові обмоткові

провідники. Здійснюється переведення виробництва магнітопроводів трансформаторів потужністю до 2500 кВ·А на стрічкову аморфну (нано-кристалічну) ЕТС [50]. У близькому майбутньому прогрес в розвитку ІСП планується досягнути також використанням кріогенної техніки та спеціальних обмоткових матеріалів, зокрема в трансформаторах з високотемпературними композитними надпровідниковими обмотками, елегазової, кабельної і гібридної ізоляцією.

Крім виробництва ефективних розподільчих ІСП існує необхідність розробки і удосконалення компактних і маломагнітних «нетрадиційних» конструкцій трансформаторів (рис. 1.5), в тому числі таких, що призначені для вбудовування в циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметру [16, 17].

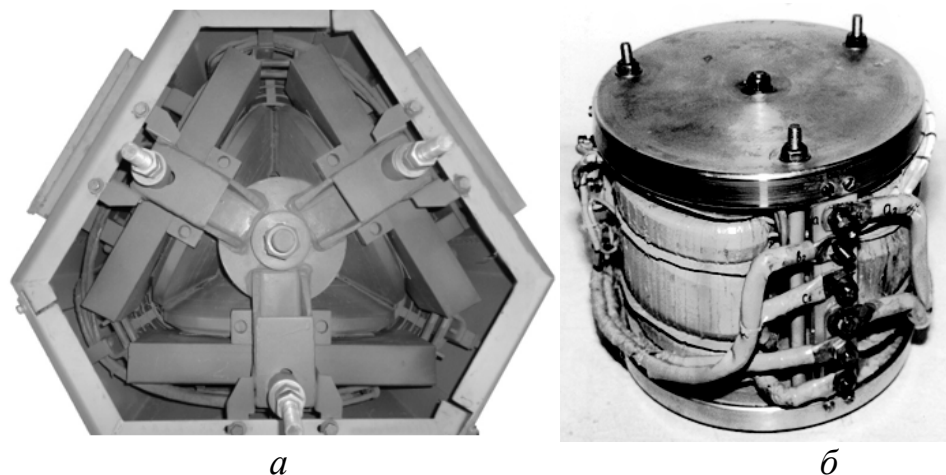


Рисунок 1.5 – Варіанти трифазного трансформатора з аксіальною просторовою електромагнітною системою та витим трисекційним (а) і комбінованим стиковим (б) магнітопроводами

Важливою сучасною санітарною, технічною і спеціальною вимогою, що пред'являється до електрообладнання, є електромагнітна сумісність, зокрема рівень зовнішнього магнітного поля (ЗМП) [54, 55]. Циліндричні і планарні структури обертових ЕМ, ТТ і трифазних реакторів (ТР) умовам практичного мінімуму ЗМП не задовольняють. Особливість симетричних аксіальних ЕМС обертових і статичних перетворювачів [56-58] –

теоретичний мінімум (нуль) підсумкового «магнітного моменту». Тому удосконалення і розробку, наприклад ТТ, який одночасно задовольняє умови максимальної компактності і маломагнітності без пристроїв магнітної компенсації, можна забезпечити використанням тільки аксіальних просторових ЕМС (рис. 1.5).

1.2. Класичні та нетрадиційні способи вдосконалення електромеханічних пристроїв і агрегатів

Електромеханіка – фундаментальна наука [59, 60] з більш ніж 170 – річною історією розвитку, удосконалення і поступового розширення структурного і видового складу електричних генераторів, двигунів і трансформаторів.

У зв'язку з особливою важливістю і актуальністю постановки і рішення задач подальшого розвитку, уявляється доцільним позначення і систематизація способів підвищення технічного рівня пристроїв електромеханіки.

Згідно [3] існують два традиційні і чотири нові способи підвищення технічного рівня ЕМ, електротехнічних комплексів і електромеханічних агрегатів.

Перший спосіб передбачає удосконалення електромеханічних пристроїв на основі використання нових магнітних і ізоляційних електротехнічних матеріалів зниженням втрат неробочого руху і величин ізоляційних проміжків, а також підвищення стійкості ізоляційних оболонок обмоткових проводів, секцій і котушок обмоток термічним і механіко-технологічним впливам.

Другий спосіб ґрунтується на постійному удосконаленні методів розрахунку і оптимізації.

Вказані два способи були кардинальними на протязі ХХ століття і дозволили багатократно знизити питому матеріалоемність ЕМ і апаратів. Вказану зміну характеризує рис. 1.6 [30]. Після досягнутого мінімуму

габаритні і масовартісні показники виконань АД з підвищеним ККД почали, як уже згадувалось, зростати, наприклад відносно серій 4А [44] і АІ [45]. При цьому до кінця минулого сторіччя виникла ситуація відносної стабільності властивостей ЕТС і ізоляції та має можливим лише деяке енергозбереження на основі застосування в магнітопроводах ІСП, наприклад монокристалічної та аморфної ЕТС [15, 49-53]. В частині матеріалу обмоток АД потужністю до 250 кВ·А альтернатива використанню міді і алюмінію відсутня, вельми актуальними є питання їх економії і ефективної утилізації.

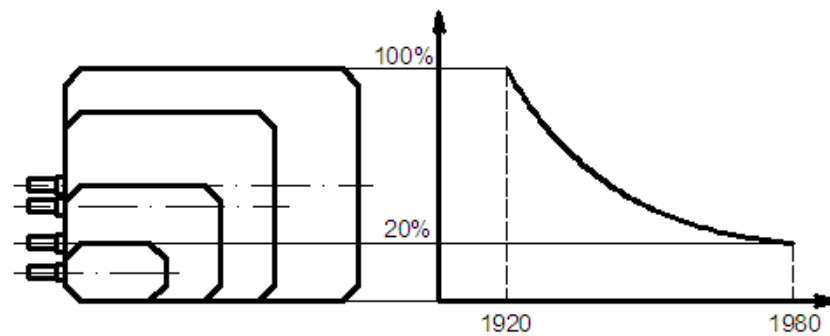


Рисунок 1.6 – Зміна масогабаритних показників асинхронного двигуна в минулому сторіччі

За останні десятиріччя забезпечено розширення границь і можливостей багатокритеріальної оптимізації на основі безперервного розвитку методів і засобів автоматизованого проектування. Однак застосування сучасних досягнень прикладної математики та програмування в практичних розрахунках не може суттєво вплинути на покращення досягнутих ПТР ЕМ і трансформаторів традиційних структур і конструкцій.

У другій половині ХХ століття еволюції пристроїв електромеханіки сприяло удосконалення енергетичних установок транспортних засобів, розвиток теорії і практики систем автоматики, обчислювальної техніки, авіації і космонавтики, а також електронних систем. Це стало причиною виникнення певних напрямків удосконалення електромеханічних пристроїв і іншими способами.

Згідно третього способу, зниження питомої матеріалоемності елементів електрообладнання досягається підвищенням ЕМН і застосуванням технічних

рішень, способів та пристроїв інтенсифікації охолодження (форсованого повітряного, рідинного, кріогенного) [1, 2].

Четвертий спосіб забезпечує суттєве зниження питомої матеріалоемності індукційних перетворювачів підвищенням частоти струму до 200...400 Гц при числі полюсів $2p \leq 4$ [1, 61, 62].

Однак деякі способи потребують суттєвого ускладнення і підвищення вартості конструкцій за рахунок використання додаткових систем і пристроїв (нетрадиційне охолодження, газові або магнітні підшипники, редуктори [61, 62]) і застосовуються в технічно обґрунтованих випадках.

П'ятий спосіб базується на системному підході – інтеграції з електронно-напівпровідниковими пристроями функціонування і регулювання, а також елементами конструкцій приводних механізмів [18-25, 41-43, 63-67].

Суміщенням електромеханічних перетворювачів з електронними компонентами здійснюється функціональне і конструктивне об'єднання енергетичних та інформаційних процесів в єдиному пристрої [68, 69]. Особливістю стану електромеханіки нашого часу є конкурування частото-регульованого асинхронного і вентильного безконтактного синхронного електроприводу. Вентильні (безконтактні) двигуни постійного струму відрізняються підвищеною керованістю, швидкодією, прецизійністю та іншими якостями.

Суміщенням ЕМ з механізмом виключаються проміжкові конструктивні і кінематичні ланки. Це дозволяє зменшити витрати на виготовлення, покращити масогабаритні показники та підвищити продуктивність і ККД електричних механізмів та комплексів обладнання. Одним з шляхів підвищення технічного рівня електромеханічних механізмів і агрегатів, як вже вказувалось, є застосування АД з підвищеною конструктивною пристосованістю до ряду технічних пристроїв. На рис. 1.7 наведено схеми відцентрових електровентиляторів з ТАД, ОАД і КАД. Компоновки (рис. 1.7, а, б) відрізняються від традиційної схеми (рис. 1.7, в) меншими габаритними розмірами і підвищеною симетрією будови, що зменшує число частоти власних

коливань і сприяє покращенню віброакустичних характеристик (ВАХ). Перевагами сполучень елементів електровентиляторів (рис. 1.7, *а, б*) відносно традиційної будови (рис. 1.7, *в*) є вентиляція ТАД і ОАД потоками всмоктуваного повітря. Знижуються механічні втрати і енерговитрати на охолодження та металоємність конструктивної частини вбудованих АД.

Іншим можливим прикладом системного підходу і використання принципу просторової симетрії є удосконалення обладнання охолодження з примусовою циркуляцією рідинного або газового холодоагенту в баку і каналах охолодження ЕМС ТТ або ТР.

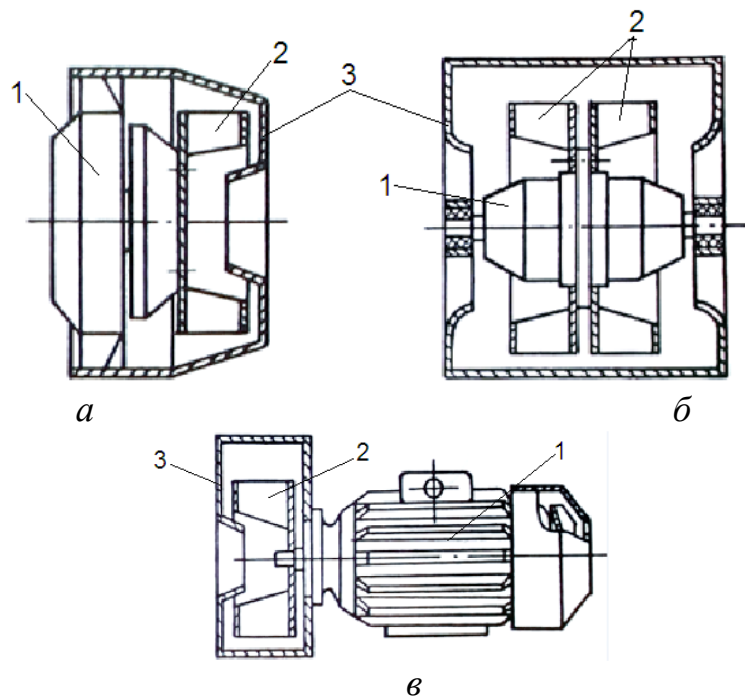


Рисунок 1.7 – Схеми відцентрових електровентиляторів: *а* – відцентровий прямоточний з вбудованим аксіальним двигуном; *б* – відцентровий двостороннього всмоктування з вбудованим оберненим двигуном; *в* – відцентровий з двигуном традиційного виконання;
1 – електродвигун, 2 – робоче колесо, 3 – корпус.

Традиційні планарні ЕМС ТТ відрізняються суттєвою нерівномірністю розподілу теплового поля і гіршими умовами охолодження котушок обмотки на середньому стрижні. Інтенсифікація охолодження потужних трансформаторів і реакторів здійснюється примусовою циркуляцією трансформаторного масла з

встановленням в маслопровід кожного радіатора зануреного електронасосу [14, 70]. При цьому планарна структура ЕМС обумовлює збільшення числа радіаторів зі зниженням одиничної потужності і продуктивності електронасосів і зниження енергетичної ефективності електроприводу системи охолодження і трансформаторного агрегату в цілому.

Варіанти аксіальної просторової ЕМС зі сполученням стрижнів трикутником (рис. 1.5, рис. 1.8) дозволяють створити симетричну в аксіальному і радіальному напрямках структуру активної і конструктивної частини трифазного індукційного статичного пристрою. Така структура відрізняється наявністю вільного простору в зонах внутрішніх контурів ярем (рис. 1.8, *а, б*). Вказані особливості дозволяють інтегрувати з метою енергоресурсозбереження комплексне обладнання примусової циркуляції трансформаторного масла в єдиний занурений електронасос з трубопроводами і масляними колекторами з пресуючих елементів магнітопроводу [32]. Пресуючі елементи і колектори можуть бути виконані з швелерів (рис. 1.8, *в*), які зістиковані на вісі ЕМС (рис. 1.8, *б*) зкошеними кінцівками. З метою інтенсифікації зовнішньої і внутрішньої циркуляції масла електронасос вбудований в порожнину внутрішнього контуру нижнього ярма, кожний колектор містить центральний отвір входу масла, а між електронасосом і ярмом встановлена перегородка (рис. 1.8, *г*).

Шостий спосіб уявляється в пошуку і розробці нетрадиційних рішень активної і конструктивної частин ЕМ. Такий спосіб надає можливість зниження як питомої, так і технологічної матеріалоємності «евристичними» структурно-геометричними перетвореннями. Додаткова ефективність підвищення технічного рівня пристроїв і систем електромеханіки утворюється органічним об'єднанням декількох способів удосконалення.

1.3. Особливості активної і конструктивної частин асинхронних двигунів нетрадиційних структур і конструкцій

Можливості подальшого підвищення технічного рівня ЕМ і апаратів використанням покращених матеріалів, автоматизованого проектного

синтезу і форсованого охолодження в рамках традиційних конструкцій радіальних і аксіальних магнітопроводів КАД, ОАД, ТАД, трансформаторів і реакторів практично вичерпані [3, 9-13, 26-32, 71].

На рис. 1.9, *а* представлена будова одної з розробок початку ХХІ століття – спеціальний КАД з залитими електроізоляційним компаундом лобовими частинами обмотки статора. Двигун відрізняється підвищеною надійністю капсульованої обмотки статора [32]. Однак концептуально активно-конструктивна частина та основні показники такого АД незначно відрізняються від попередніх аналогів та КАД загальнопромислових серій (рис. 1.9, *б*).

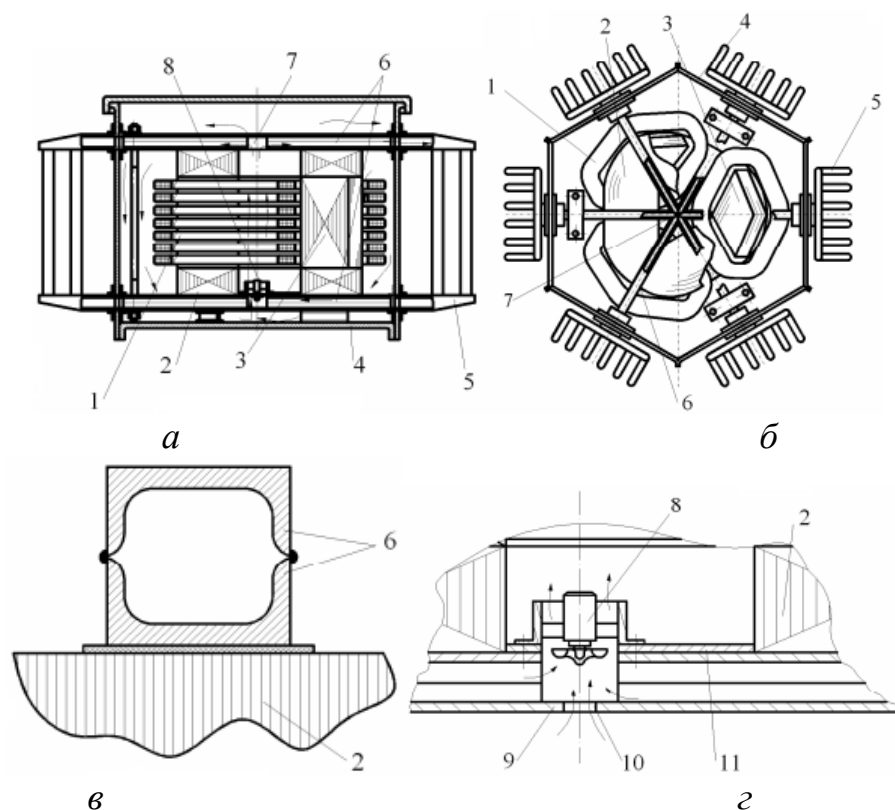


Рисунок 1.8 – Конструктивна схема трифазного трансформатора з аксіальною просторовою електромагнітною системою і обладнанням примусового охолодження: 1 – обмотка; 2 – ярмо; 3 – стрижень;
 4 – бак; 5 – радіатор; 6 – яремна балка-хладагентопровід;
 7 – верхній колектор хладагенту; 8 – електронасос; 9 – нижній колектор хладагенту; 10 – отвір входу хладагенту; 11 – перегородка.

В [7, 9, 26-32] вказано, що в останній чверті минулого сторіччя з традиційних конструкцій і матеріалів «вижато» все. Згідно [31] цілий ряд «нових» серій КАД, що створені з початку ХХІ століття, практично не мають переваг перед попередніми зразками кінця попереднього століття, а нові технічні рішення можуть бути знайдені із застосуванням теорії систем і теорії симетрії. Крім того, основним резервом розвитку електромеханічних пристроїв є перетворення структур і конфігурацій активних елементів [9, 27-29, 72-74].

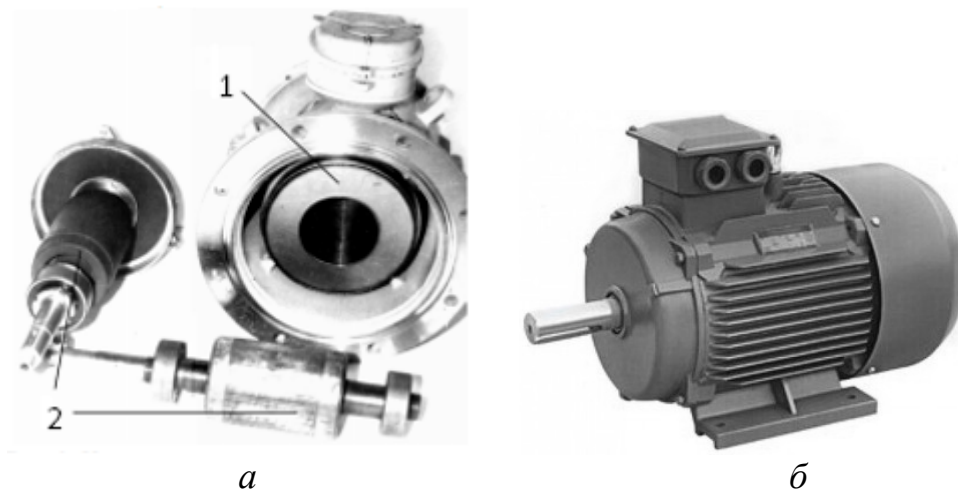


Рисунок 1.9 – Загальний вигляд активної і конструктивної частин асинхронних двигунів вибухозахищеного (а) та загальнопромислового виконань (б): 1 – статор; 2 – варіанти короткозамкненого ротора

Деякі результати розробок нетрадиційних технічних рішень АД з використанням концепцій системного підходу, просторових симетрій і структур ЕМС подано на рис. 1.9 – 1.14.

Прикладом системного підходу при розробці обертових ЕМ є забезпечення багатофункціональності магнітопроводу статора або елементів обмотки ротора варіантів АД з циліндричним (радіальним) зазором.

На рис. 1.10 показані конструктивна схема закритого обдуваемого АД і особливості магнітопроводу з просторовою «багатопощинною» структурою [3, 32, 75-77], яка забезпечує зниження відходів ЕТС при виробництві та інші переваги. У вказаному безкорпусному АД (рис. 1.10, а) конструктивна

частина містить несучи опорні елементи, а магнітопровід (рис. 1.10, б) статора складається з просторових шарів ЕТС з вигнутих в осьовому напрямку і накладених та плоских ділянок (рис. 1.10, в). Просторова зона підвищує площу поверхні охолодження статора і виконує функції жорсткого корпусу, що опирається на опорні елементи з підшипниковими щитами.

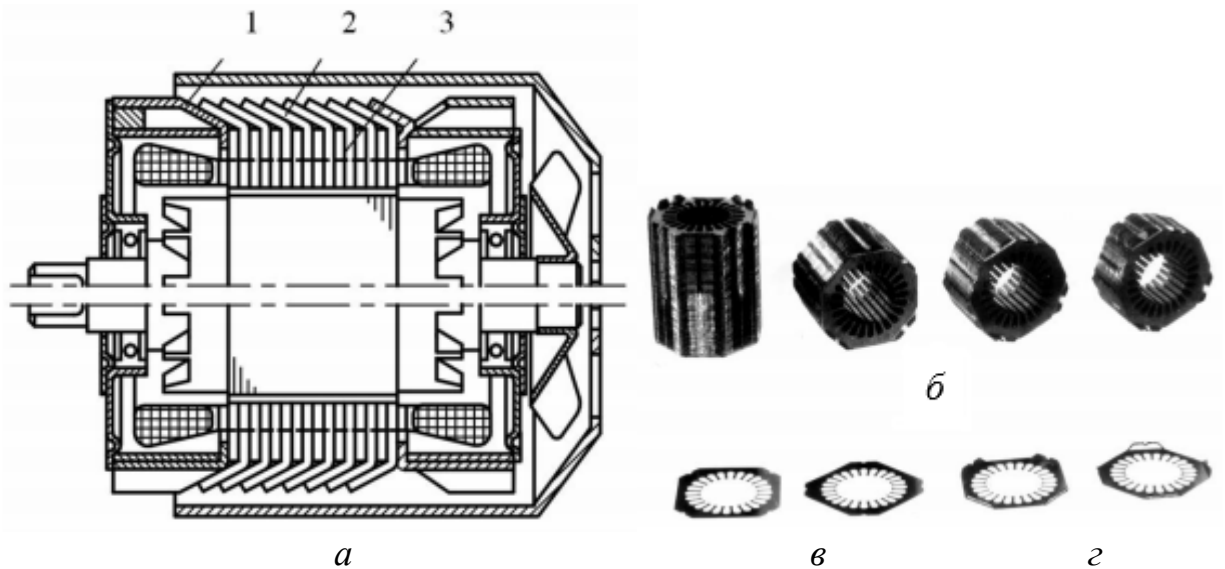


Рисунок 1.10 – Конструктивна схема (а) і особливості багатоплощинного магнітопроводу (б-г) асинхронного двигуна: 1 – опорний елемент; 2 – опорна ділянка ярма; 3 – зубцово-пазовий шар з плоскими та багатоплощинними ділянками електротехнічної сталі.

Рис. 1.11 уявляє конструктивну схему ОАД з двома симетричними секціями і просторовою конусно-площинною структурою шарів ЕТС магнітопроводу ротора [20, 33, 78-80]. В межах потужності і полюсності, що дозволяють використати технологію заливки пазів, виконання ОАД (рис. 1.11, а, б) з двосекційним ротором забезпечує зниження матеріалоємності і трудомісткості виробництва, мінімум вузлів і деталей, підвищення рівномірності зазору і надійності, а також покращення ВАХ. Вказані переваги досягаються заливкою пазів кожної секції магнітопроводу (рис. 1.11, в) одночасно з відливкою проміжного короткозамкненого кільця з виступами кріплення механізму і корпусу (щита) встановлення підшипників. Статор встановлений на нерухомій вісі.

Зразки, що представлені на рис. 1.12 характеризують ТАД нетрадиційних розробок [22, 32, 81]. Особливістю, що відрізняє ТАД від КАД, це підвищений момент інерції ротора і, як наслідок, підвищені тривалість перехідних процесів і гіроскопічне навантаження в приводах механізмів рухомих об'єктів.

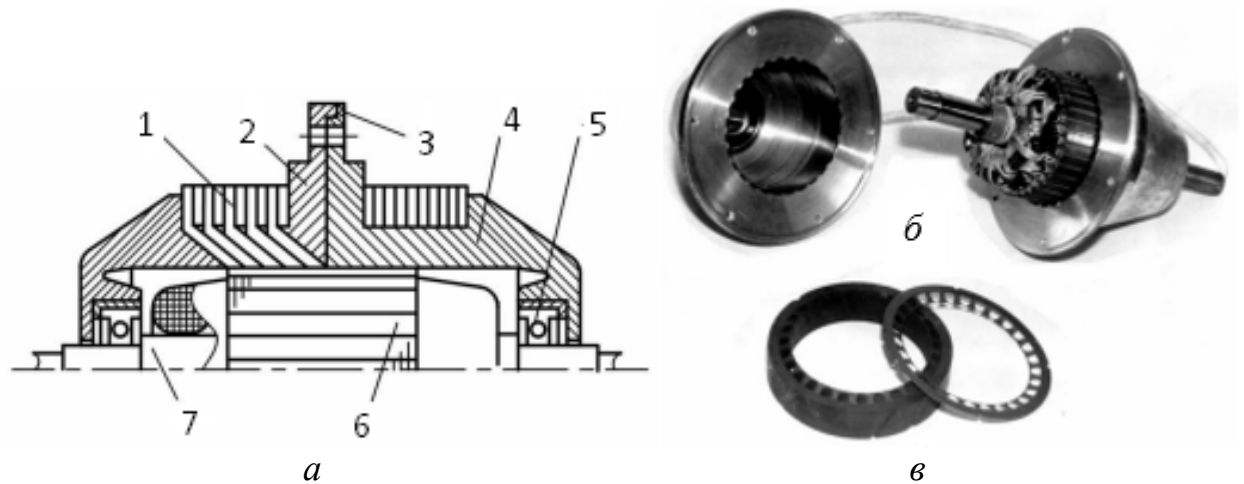


Рисунок 1.11 – Конструктивна схема (а) оберненого асинхронного двигуна зі знятим напівротором (б), пакет і пластина (в) магнітопроводу напівротора: 1 – магнітопровід напівротора; 2 – проміжне короткозамкнене кільце; 3 – фланець кріплення механізму; 4 – підшипниковий щит; 5 – підшипник; 6 – статор; 7 – вісь.

Зниження маси і матеріалоемності, моменту інерції і покращення показників ТАД в цілому, відносно їх аналогів традиційних структур і конструкцій [11, 12] досягається на основі просторової конусно-циліндричної структури шарів ЕТС витого магнітопроводу (рис. 1.12, а) короткозамкненого ротора (рис. 1.12, б). Також відомим конструктивним рішенням [82] підвищення ПТР ТАД невеликої потужності з числом полюсів $2p \leq 4$ є використання одноопорної конструкції ротора, що встановлений у внутрішню обойму «легкого» підшипнику великого діаметру (рис. 1.12, в, г).

1.4. Особливості деяких статичних електромагнітних систем нетрадиційних структур і конструкцій

Традиційні УК обмоткових котушок і перерізів стрижнів (рис. 1.3, *а, б*) обумовлюють відомі недоліки планарних і просторових ЕМС ІСП [48, 72-74]. Прямокутна форма котушки (рис. 1.3, *а*) підвищує середню довжину витка і знижує міцність ізоляції при малому радіусі округлення в кутових частинах прямокутно вигнутих провідників. Кругова кільцева форма котушки (рис. 1.3, *б*) забезпечує мінімальну середню довжину витка, але суттєво ускладнює технологію виробництва магнітопроводів, тому що відносно високий коефіцієнт заповнення кругового УК перерізу стрижня $K_{ко} = 0,927...0,931$ досягається використанням 14 - 16 пакетів пластин (листів) або рулонів ЕТС різної ширини в половині окружності [48]. При цьому встановлено, що деформації вигину і внутрішні залишкові напруги, що виникають при намотці кругових витків обмоткових котушок, складаючись з напругами від електромагнітних сил, призводять до пошкодження ізоляції. Тому кругові УК викликають зниження електродинамічної стійкості ІСП [83].

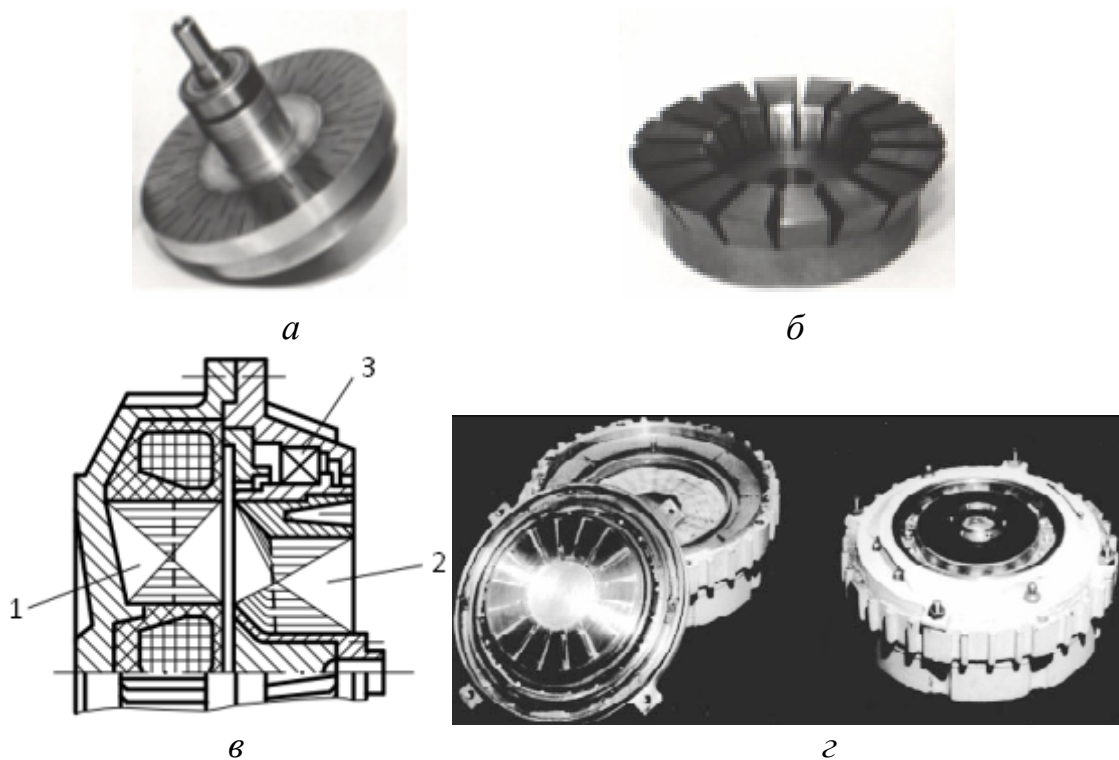


Рисунок 1.12 – Короткозамкнений ротор (*а*) з магнітопроводом (*б*) конусно-циліндричної структури торцевого двополюсного двигуна потужністю 1,5 кВт (380 В, 50 Гц) і конструктивна схема (*в*) та

зразки (з) двополюсного торцевого двигуна потужністю 150 Вт (27 В, 50 Гц): 1 – статор; 2 – ротор; 3 – підшипник.

На рис. 1.13, *а* зображено схему поперечного перерізу просторової аксіальної ЕМС ТТ (рис. 1.5, *а*), яка містить три секції витого магнітопроводу (рис. 1.13, *б*) [46, 48, 57]. Кожна секція сформована з окремих стрічок або суцільної стрічки ЕТС змінної ширини. При навивці кожної секції витки стрічки зсуваються в осьовому напрямку. В межах половини УК стрижня формуються трапецеїдально-чотирикутні перерізи ділянок секцій. Коефіцієнт заповнення кругового УК стрижню вказаними ділянками для ТТ потужністю до 1000 кВ·А постійний і складає 0,904 [48].

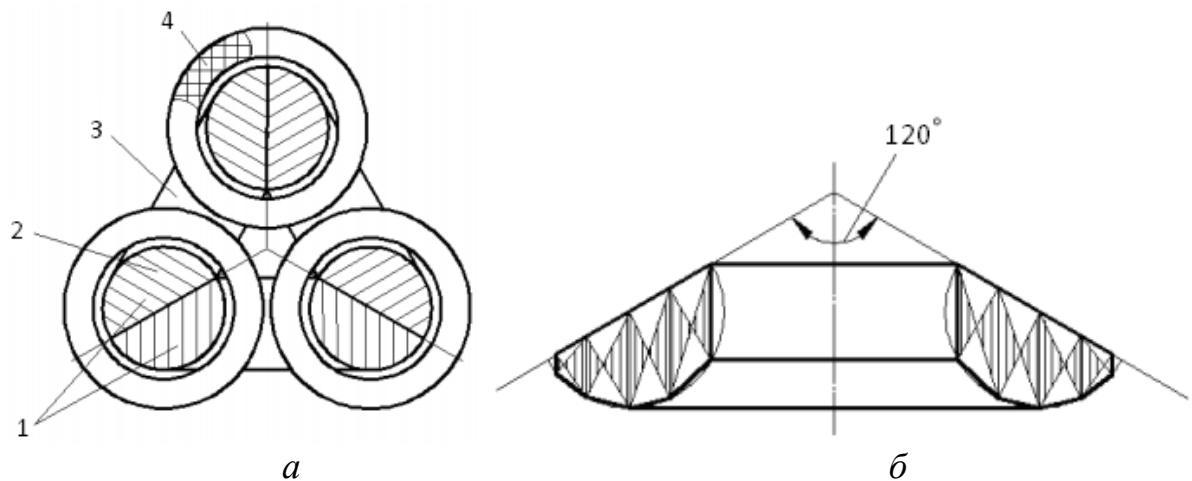


Рисунок 1.13 – Конструктивна схема аксіальної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами стержнів витого трисекційного магнітопроводу (*а*) і його секція (*б*): 1 – стрижень; 2 – стрижнева ділянка фазового елементу; 3 – яремна ділянка фазового елементу; 4 – котушка обмотки.

Приклади перетворення конфігурацій елементів аксіальних ЕМС одно- і трифазних ІСП на основі стикових витих, а також комбінованих магнітопроводів представлені на рис. 1.14. На рис 1.14, *а* показана схема трифазної компактної ЕМС з секторними УК і стрижнями з розрізаних коаксіальних заготовок, що утворені спіральною навивкою стрічкової ЕТС [84]. Таке конструктивно-технологічне рішення обумовлює паралельність

стінок обмоткових вікон і суміщення периферійних контурів стрижнів з кутовими ділянками контурів витих ярем, що підвищує компактність і створює високе заповнення контурного об'єму діаметру D_k , а також здібність вбудовування ІСП в циліндричні та сферичні оболонки [17]. На рис. 1.14, б показана схема ЕМС і магнітопроводу з витими ярами і шестигранними УК перерізів стрижнів з однакових прямокутних пластин ЕТС [85].

Така ідентичність знижує трудомісткість виробництва магнітопроводу відносно магнітопроводу традиційної ЕМС з криволінійними УК (рис. 1.14, б) стрижнів. Шестигранна конфігурація стрижнів може застосовуватися в ЕМС ОТ і однофазних реакторах (ОР) з витим (рис. 1.14, в) і шихтованим (рис. 1.14, г) просторовими броньовими магнітопроводами [86].

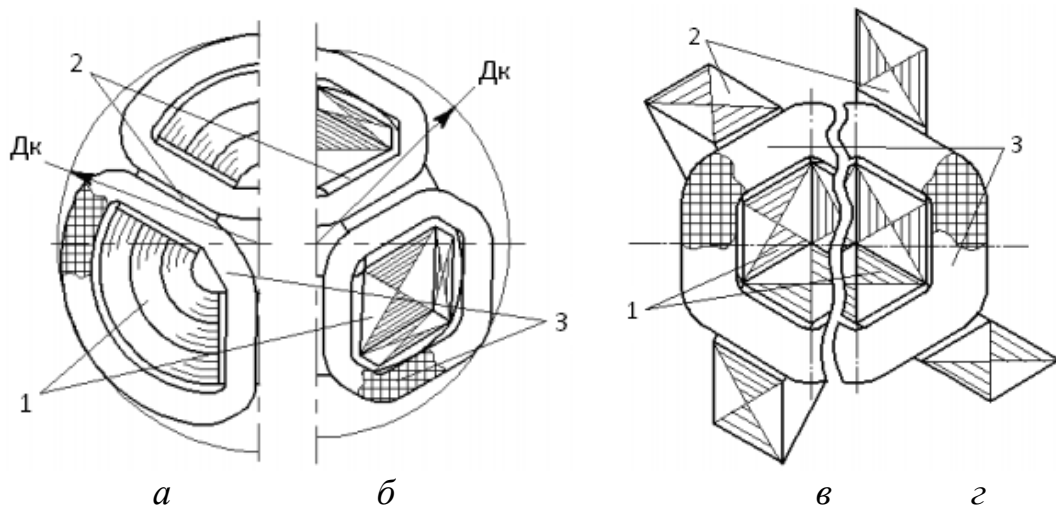


Рисунок 1.14 – Конфігурації варіантів аксіальних електромагнітних систем з секторними (а) і шестигранними (б-г) перерізами стрижнів магнітопроводів: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

На рис. 1.15 зображені схеми варіантів трифазних ЕМС з витими трисекційними магнітопроводами та шестигранними УК стрижнів і обмоткових котушок.

Конструкція і спосіб виготовлення секцій магнітопроводу дозволяють підвищити компактність аксіальної ЕМС (рис. 1.15, а) формуванням ділянок обмоткових вікон з паралельними стінками і спростити технологію виготовлення аксіального витого трисекційного стикового магнітопроводу на

основі шестигранних УК (рис. 1.15, а) можливо навивкою його симетричних секцій із заготовок ЕТС (рис. 1.15, з). Заготовки ЕТС двох секцій виконуються розділенням вихідної стрічки (рулону) прямокутної конфігурації $aee'a'$ на дві ідентичні частини, що містять прямокутні $abda'$ і $b'ee'd'$ та трикутні bcd і $b'c'd'$ ділянки. В процесі навивки секцій кожний наступний виток ЕТС товщиною $\delta_{\text{ЕТС}}$ зсувається тангенціально на постійну величину $\Delta_{\text{ЗС}} = \delta_{\text{ЕТС}} \text{tg} 30^\circ$. На рис. 1.15, б зображена схема поперечного перерізу радіальної ЕМС. Стрижні вказаної ЕМС можуть бути сформовані з витих секцій, що мають поперечні перерізи у виді прямокутних трапецій (рис. 1.15, в). Подібний переріз утворюється спіральною навивкою без осьового зсуву витків елементів $abdc$ і $a'b'dc$, що отримуються розділенням по прямій cd прямокутної розгортки $a'b'ba$ ЕТС (рис. 1.15, д).

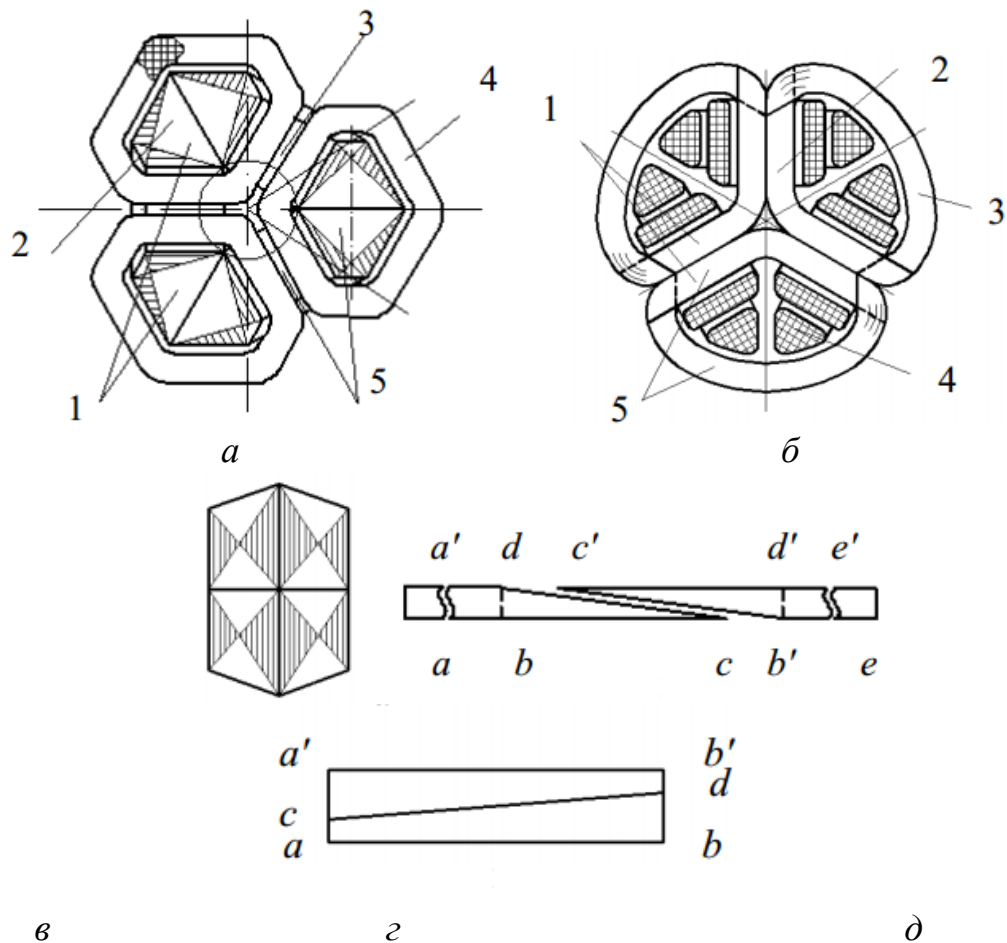


Рисунок 1.15 – Варіанти конструктивних схем і розгорток стрічок для

формування магнітопроводів аксіальної (a, ε) і радіальної (b, ν, δ) трифазних електромагнітних систем: 1 – стрижень; 2 – стрижнева ділянка секції; 3 – яремна ділянка секції; 4 – котушка обмотки; 5 – секція магнітопроводу.

Особливістю структур ЕМС (рис. 1.14, b -г і рис. 1.15, $a, б$) є наявність ділянок витків і котушок обмоток, що утворені прямими лініями, які перетинаються в УК під кутами 120° . В цих ділянках виключаються (виникають по всій довжині витків ЕМС з криволінійними УК) деформації вигину і залишкові механічні напруження волокон провідників [72, 74, 83]. Можливі пошкодження ізоляції, зони деформації і механічні напруження витків котушок (рис. 1.14, рис. 1.15) концентруються в місцях вигину провідників на осях вершин шестигранника [89]. Однак в цих зонах електрична і механічна міцність обмоткових котушок підсилюється додатковою ізоляцією і опорно-ізоляційними елементами. Згідно [74] шестигранні УК стрижнів забезпечують зниження матеріалоємності і втрат обмоток ІСУ відносно обмоток з прямокутними і круговими УК та стрижнями з $K_{ко} < 0,922$.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Рішення задач енергоресурсозбереження в процесі безперервного збільшення виробництва і розподілу електроенергії, а також розширення структурного і видового складу електромеханічних пристроїв потребує значних зусиль електромеханіків і інноваційної підтримки зі сторони держави.

2. Подальше суттєве зниження матеріаломісткості і підвищення енергетичних показників в рамках сформованих на протязі століття конструктивних виконань обертових і статичних електричних машин традиційними способами не видається можливим.

3. Основним напрямком подальшого розвитку є системний підхід, пошук і розробка нетрадиційних рішень активної і конструктивної частини ЕМ,

структурні перетворення і структурна оптимізація їх електромагнітних систем.

4. Можливості енергоресурсозбереження традиційними способами на основі кращих електроматеріалів, удосконалених методик визначення параметрів і оптимізаційних розрахунків з застосуванням сучасних засобів чисельного дослідження і автоматизованого проектування вичерпані.

5. Традиційні конструкції статора з литим корпусом, що прилягає до ярма циліндричного магнітопроводу і короткозамкненого ротора з валом, що проходить крізь центральний отвір, є перешкодою подальшому зниженню матеріалоємності, підвищенню надійності і удосконалення КАД.

6. Магнітопроводи ОАД і ТАД традиційних структур відповідно з плоских коаксіальних і циліндричних елементарних шарів ЕТС обмежують ефективність застосування вказаних АД.

7. На сучасному етапі розвитку електромеханіки головним фактором удосконалення ЕМ і електромеханічних систем є структурно-геометричні перетворення.

РОЗДІЛ 2

ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ І КОМПЛЕКСІВ

Постійно зростаючі вимоги до технічного рівня і якості нових розробок об'єктів проектування призводять до необхідності прогнозування показників і адекватних розрахунків характеристик таких об'єктів. При пошуку максимально раціональних варіантів та визначення сполучень геометричних і фізичних співвідношень, а також складу елементів та керуючих сигналів та інших особливостей нових розробок, використовуються методи оптимального проектування та керування. Це дає можливість детального обґрунтування технічних рішень, що приймаються, без попередньої їх апробації на фізичних об'єктах.

Основу оптимізаційного проектування складає пошук проектних рішень у відповідності з критерієм оптимальності або критерієм стійкості об'єкту і системи.

Оптимальне проектування ЕМ – досягнення практичної межі удосконалення конкретної структури і будови ЕМС у відповідності з заданим критерієм та врахуванням конструктивної частини і певних проектних обмежень, що обумовлені технічним завданням (ТЗ) розробки.

Оптимальне проектування електромеханічної системи передбачає сумісний розгляд обертової ЕМ і перетворювально – керуючих ланок, а також комплектуючих механізмів, узгоджувальних трансформаторів та інших компонентів.

Оптимальне рішення задачі керування електромеханічною системою означає визначення таких параметрів впливу на систему, за якими досягається оптимум критерію керування.

Виконання проектних розрахунків на основі оптимізаційних обчислень є обов'язковим в сучасних умовах і визнано необхідністю рішення задач енергоресурсозбереження та конкурентоспроможності нових розробок ЕМ, апаратів, електротехнічних систем і компонентів.

2.1. Загальне уявлення оптимізаційного проектування технічних об'єктів і систем

В сучасній діяльності людства виникає безліч задач, якісне і кількісне виконання яких можливе тільки оптимізаційним шляхом. Ефективне розв'язування оптимізаційних технічних та інших задач можливе тільки математичними методами. Для постановки і рішення оптимізаційного питання необхідно сформулювати критерій, тобто визначити якісний показник розглядуваного об'єкту. На основі такого показника можливе визначення оптимальних, а не деяких допустимих раціональних величин (параметрів), що визначають об'єкт проектування. Оптимізація здійснюється варіюванням (перебиранням), з визначенням заданого критерію, можливих варіантів рішення задачі створення об'єкту та визначенням кращого з цих варіантів на основі розрахунку екстремального значення критерію.

Визнане математично уявлення об'єкту (пристрою, системи, процесу або явища), що вивчається і аналізується, має назву математичної моделі (ММ). Математичне уявлення, що визначає залежність критерію оптимізації від оптимізаційних дій називають цільовою функцією (ЦФ). Фактори впливу на ММ і зміну її ЦФ, що надають можливість оптимізації, називають керованими змінними (КЗ) або координатами (параметрами). Сукупність уявлення (опису) елементів об'єкту оптимізації, їх зв'язків і взаємодій у виді ММ повинна забезпечити відповідність з прийнятою (заданою) адекватністю, тобто погрішністю і точністю (мірою співпадіння) результатів віртуального

(чисельного) моделювання та фізичного дослідження (випробування) реального зразка такого об'єкту. Іншими характеристиками ММ є універсальність та економічність. Під універсальність розуміється можливість застосування для аналізу та адекватного зіставлення будь яких варіантів уявлення реального об'єкту, а також повноту урахування його властивостей. Економічність ММ визначається витратами часу розрахунків і об'єму пам'яті обчислювальних процесів.

Проектування більшості технічних пристроїв і систем, в тому числі ЕМ і електричних комплексів, визначається терміном проектного синтезу [8, 44, 45, 90-94]. Проектний синтез визначає процес пошуку варіанту, що задовольняє всі вимоги, що пред'являються до проектованого об'єкту ТЗ і стандартами. Визначення оптимального варіанту об'єкту досягається оптимізаційним проектним синтезом, який поділяється на структурний, параметричний і структурно-параметричний [90, 91].

Структурний синтез визначається енциклопедичним поняттям структури, яке означає будову, розташування, порядок і сукупність стійких зв'язків об'єкту, що забезпечують його цілісність і тотожність самому собі, тобто збереження основних властивостей при різних зовнішніх і внутрішніх змінах. Структурний синтез певного об'єкту уявляється в пошуку і порівнянні можливих альтернатив і варіантів типів, числа, форм і положень в просторі, а також комбінації і способів зв'язку елементів такого об'єкту між собою. Оптимізаційний структурний синтез передбачає, додатково до пошуку структур, створення ММ, що надають можливість об'єктивного порівняльного аналізу (оптимізаційного зіставлення) розглядуваних структур з метою визначення кращого варіанту об'єкту.

Параметричний синтез заключається в розгляді варіантів об'єкту в рамках заданої структури і визначенні та порівнянні числових значень або співвідношень параметрів, що забезпечують працездатність і рівень характеристик, які задовольняють ТЗ. Оптимізаційним параметричним синтезом за допомогою ЦФ визначаються екстремальні (оптимальні)

значення КЗ, що забезпечують кращі показники і характеристики об'єкту оптимізації.

Оптимізаційний структурно-параметричний синтез складається в знаходженні оптимальної структури і екстремальних значень КЗ ЦФ цієї структури, тобто в визначенні глобально-оптимальної структури і глобально-оптимальних значень КЗ. Алгоритм [90] визначення глобально-оптимального рішення спрощено характеризується рис. 2.1 і містить чотири процедури. Першою є синтез допустимої структури (СДС), яка забезпечує вибір допустимого рішення з будь-якої підобласті усієї області пошуку. Другою процедурою здійснюється зміна кроку локального пошуку (КЛП), якою досягається перехід від одного рішення до другого допустимого рішення, як правило ідентичної структури, однак з покращеним значенням критерію. Під кроком локального пошуку розуміється умовний крок по певному методу та алгоритму пошуку локального екстремуму [91]. Третьою процедурою досягається глобальний пошук (ГП), що керує роботою процедур СДС і КЛП. Четверта процедура – перевірка умов припинення пошуку (ПУПП), яка визначає кінець рішення задачі.



Рисунок 2.1 – Схема алгоритму пошуку глобального екстремуму

Структурний синтез виконується логічним аналізом недоліків наявних аналогів і їх усуненням, зокрема евристичними прийомами. Основним евристичним прийомом є структурне перетворення зміною форм і положень в просторі, а також симетруванням та зміною зв'язків елементів об'єктів [90]. Приклади евристичних структурних перетворень наведені на рис. 1.8 і 1.10 – 1.15. Іншим способом синтезу структур є еволюційний генетичний підхід

[60], за яким об'єкт розглядається як особливий клас еволюціонуючих динамічних систем природно – антропогенного походження з власною генетичною будовою і видовою структурою.

Процес оптимізаційного проектного синтезу технічного об'єкту уявляється схемою (рис. 2.2) і відбувається ітераційно (послідовними наближеннями) з оцінкою і перепроєктуванням до тих пір, поки проект не буде відповідати критеріальному екстремуму оптимізації і певним проектним обмеженням. Оптимізаційний синтез виконується в три етапи (рівня схеми, рис. 2.2). Перший етап уявляється в пошуку і обранні варіантів технічних рішень на рівні задумки (ідеї). Застосовується аналіз науково-технічної інформації, розглядаються бази готових проектних рішень, спеціальні експертні системи. Враховується економічний фактор (прогнозування вартості, термінів виконання). Формується перший вихідний варіант ТЗ з вказівкою показників, які повинні бути забезпечені. Другий та третій етапи уявляють структурний і параметричний синтези. Отримані проектні рішення оцінюються з використанням проектних процедур аналізу екстремумів КЗ. Приймається рішення про вихід з процесу ітерації, або перепроєктування з можливою зміною принципу дії деяких елементів (гідропривід, пневмопривод, електропривід) або системи в цілому та зміною ТЗ.

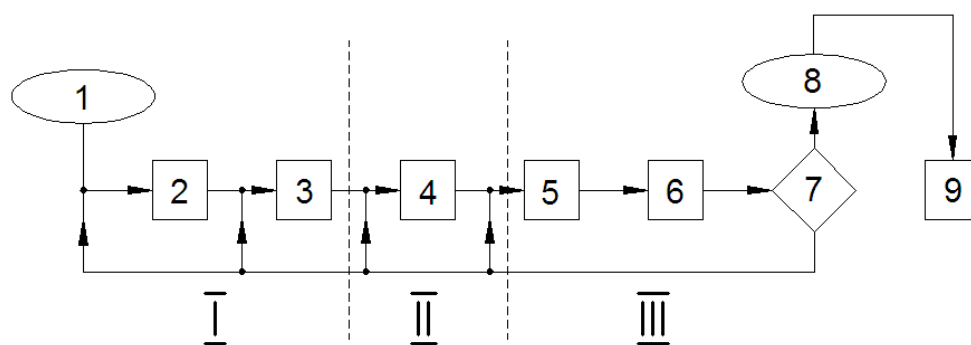


Рисунок 2.2 – Схема оптимізаційного проектування:

- 1 – початок; 2 – вибір принципів побудови об'єкту проектування;
- 3 – формування технічного завдання; 4 – структурний синтез;
- 5 – параметричний синтез; 6 – аналіз ефективності;
- 7 – перевірка ефективності; 8 – кінець; 9 – реалізація.

Для рішення задачі структурного синтезу необхідно визначити якість структур визначенням кількісних оцінок, які розраховуються при параметричному синтезі. При цьому параметричний синтез виконується тільки для заданої структури. Вихід з протиріччя – об'єднання структурного і параметричного синтезу в єдиному обчислювальному процесі (рис. 2.1) діалогової системи оптимізаційного проектування.

При неможливості аналітичного забезпечення зв'язку структурного і параметричного синтезів застосовується метод експертних оцінок варіантів структур з призначенням коефіцієнтів переваг [90, 91].

2.2. Постановка задач оптимізаційного проектування і управління функціонуванням електричних машин та електричних комплексів

В сучасному світі технологічна і побутова діяльність людства забезпечується функціональним сполученням електротехнічних та електронних пристроїв в багатокомпонентні електричні комплекси. Їх головними елементами є рухомі і статичні ЕМ, що виробляють, перетворюють і забезпечують розподіл електроенергії та ЕМ і електричні апарати для управління, вимірювання, контролю стану і захисту. До їх складу також входять сильно та слабострумні перетворювальні і керуючі електронні ланки та інколи деякі елементи з механічним (мультиплікатори), гідравлічним (гідроприводи) та іншими принципами дії. В цілому такі комплекси уявляють складні електромеханотронні системи, оптимальне проектування яких повинно виконуватись з врахуванням як силових, так і управляючих електромеханічних, електронних та інших компонентів.

При рішенні задачі проектного синтезу будь – якого технічного пристрою або комплексу необхідне рішення трьох завдань: обрання фізичного принципу дії, визначення оптимальної структури при оптимальному принципі дії і знаходження оптимальних співвідношень певних величин і параметрів.

Принцип дії ЕМ обумовлений індукційним і силовим проявленням електромагнітного поля. Оптимальність електромагнітного принципу дії основних та допоміжних елементів електричних комплексів обумовлена попереднім розвитком людства і космічними аналогами фізичного стану всесвіту [59]. Тому принцип дії електромеханічних та інших електричних компонентів комплексів електрообладнання при їх проектному синтезі є досить ефективним і заданим.

В формалізованому виді задача оптимального проектування ЕМ уявляється у визначенні за допомогою ЦФ F_{EM} , що залежить від $k = 1 \dots n$ КЗ $x_1 \dots x_n$ екстремальних значень $x_{1e} \dots x_{ne}$ цих КЗ і розрахунку на їх основі екстремального значення F_{EME} такої функції. При значеннях $x_{1e} \dots x_{ne}$ ЦФ набуває мінімальне або максимальне значення при певних $k = 1 \dots m$ проектних обмеженнях PO_{KK} [8, 44, 45, 92-97]:

$$F_{EM} = f_{EM}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

$$PO_{1K} = PO_{1KH}; \quad PO_{2K} \leq PO_{2Kmax}; \quad PO_{3K} \geq PO_{3Kmin}; \quad k \geq 0,$$

де PO_{1KH} – нормативне (вимога стандарту) обмеження, наприклад напруга короткого замикання трансформатора; PO_{2Kmax} і PO_{3Kmin} – проектні обмеження виконання та призначення ЕМ згідно ТЗ, наприклад максимально допустимі температура обмотки статора і значення номінального ковзання та мінімально допустимі кратності мінімального та пускового моментів АД.

Електромеханічні пристрої, зокрема ЕМ – складні системи з електромагнітною і електромеханічною взаємодією провідних електричних і магнітних кіл та енергетичною сукупністю магнітних, теплових і силових механічних полів. Через складності процесів перетворення енергії в статичних і рухомих ЕМ впливає складність їх ММ та складність моделювання електричних комплексів. В деяких методиках загальне рівняння (2.1) поділяється на систему рівнянь. Загальна ММ з метою спрощення поділяється на сукупність ММ окремих елементів, а

оптимізаційна програма поділяється на окремі модельні блоки [95, 96]. Також КЗ поділяються на основні (незалежні) та залежні.

Основними КЗ оптимізації ОТ, ТТ і реакторів є геометричні розміри і ЕМН. Також застосовуються деякі відносні КЗ [47, 48, 95-100]. Задачу оптимізаційного структурного синтезу ОТ і ТТ в рамках планарних конструкцій ЕМС можна вважати частково дослідженою [47, 98-100]. Варіанти таких структур [14, 47, 48, 72] відрізняються числом стрижнів і ярем та типами і числом обмоток. В [47] вказано, що однофазна броньова ЕМС з прямокутними УК незначно поступається аналогічній стрижневої за питомою потужністю на одиницю маси і об'єму, однак значно краща по конструкції і технології. Згідно [100] маси планарних ЕМС ОТ і ТТ з шихтованими магнітопроводами і прямокутними УК на (2...3)% перевищують маси аналогів з витими магнітопроводами. Для оптимізації ІСП з прямокутними УК застосовують ЕМН і безрозмірні геометричні КЗ – відношення боків прямокутних конфігурацій елементів магнітопроводу, що зменшує число КЗ та згідно з [98-100] спрощує ММ. При параметричній оптимізації розподільчих ОТ і ТТ з круговими УК за основні КЗ приймаються головні розміри – діаметр кругового УК стрижня, висота і ширина обмоткового вікна та ЕМН – індукція стрижня та середня густина струму обмоток, а також відношення втрат короткого замикання (ВКЗ) до втрат неробочого руху (ВНР) та відношення вартостей системи обмоток і магнітопроводу [48, 95-97].

Структура ЕМС КАД, як вже згадувалось, є незмінною близько 130 років і вважається заданою. Тому оптимізаційні розрахунки КАД, як і традиційних конструкцій ІСП практично є параметричними. При цьому відомості про визначення оптимальних геометричних співвідношень ЕМС ОАД і ТАД та впливу зміни структур ОАД і ТАД відносно КАД на показники АД, тобто оптимізаційне зіставлення варіантів структур АД, до появи робіт [101-104], є невідомими. Загальний перелік координат, варіації яких передбачені в ММ параметричної оптимізації в двоклітковій

модифікації КАД 16 величин. При застосуванні в роторі звичайної короткозамкненої обмотки число КЗ – 12 [45]. Основними КЗ, згідно [8, 44, 45, 92-94], є внутрішній діаметр і довжина осердя та індукція в робочому зазорі, інколи число витків фази або число ефективних провідників в пазу обмотки статора. Параметрична оптимізація КАД додатково ускладнена, а її якість погіршена виконанням на єдиній геометрії поперечного перерізу магнітопроводу декількох довжин і потужностей. Основною вважається друга довжина. При розрахунках КАД інших довжин варіюється тільки активна довжина і індукція зазору. При проектуванні модифікацій на основі головного виконання КАД додатковою КЗ може бути потужність. Для зменшення діапазону зміни та числа КЗ деякі з них задаються у відносних значеннях, наприклад відношення зовнішнього і внутрішнього діаметрів осердя статора [45].

Критеріями оптимізації ЕМ спеціального призначення (підводно-технічного, авіаційно-космічного, переносних електроінструментів) [17, 61, 62, 92] є окремі критерії мінімуму маси, контурного об'єму або зовнішнього діаметру ЕМС, а також мінімуму втрат активної потужності (максимуму ККД). Критеріями оптимізації силових ОТ, ТТ і загальнопромислових КАД є мінімуми вартості або приведених втрат на виробництво і експлуатацію [44, 45, 93, 94, 97]. При постійній зміні цін матеріалів і комплектуючих, сучасною альтернативою приведеної вартості, яка враховує ціну ЕМ, експлуатаційні витрати і капітальні вкладення, що обумовлені функціонуванням ЕМ, є інтегральний критерій «капіталізованої вартості» [15]. Цей критерій враховує часову інфляцію грошової маси та зміну цін.

Повна ЦФ капіталізованої вартості, наприклад ТТ, складається з підсумку вартості установки трансформатора (включаючи його ціну) $V_{\text{ТТ}}$ і капіталізованих вартостей втрат, що відрізняються від $V_{\text{НР}}$ $P_{\text{НР}}$ і $V_{\text{КЗ}}$ $P_{\text{КЗ}}$ коефіцієнтами $K_{\text{ВНР}}$ і $K_{\text{ВКЗ}}$,

$$F_{\text{ВТТ}} = V_{\text{ТТ}} + K_{\text{ВНР}}P_{\text{НР}} + K_{\text{ВКЗ}}P_{\text{КЗ}}, \quad (2.2)$$

де $K_{ВНР}$ і $K_{ВКЗ}$ – питомі капіталізовані вартості ВНР і ВКЗ [15].

Нормативний час окупності обортових ЕМ, ОТ і ТТ складає (5...10) років, а енергетична складова в декілька раз перевищує складову, що пов'язана з капітальними витратами. Тому основне значення має підвищення і оптимізація енергетичної складової елементів і систем електрообладнання [4, 5, 37-40, 71]. У зв'язку з виробництвом і вимогами нового проектування енергоефективних серій КАД, ОТ і ТТ зросла значність окремого критерію капіталізації – максимуму ККД.

При проектуванні сучасних електричних комплексів основне значення має застосування енергозберігаючого обладнання. Такі об'єкти уявляються комплексними ММ, які включають в себе окремі ММ всіх компонентів і ланок. При оптимізації електричного комплексу аналогом (2.2) є інтегральний критерій витрат, який враховує інфляцію. Наприклад для частотно-регульованого асинхронного електроприводу, в якому інвертор забезпечує коефіцієнт потужності АД, що наближається до 1, застосовується ЦФ [105].

$$F_{\text{ЕП}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{B_{\text{еп}i}}{K_{\text{зе}i}} + \sum_{i=1}^{i=n} B_{\text{еп}i} (K_{\text{ат}i} + K_{\text{об}i}) K_{\text{інф}} + \sum_{i=1}^{i=n} B_{\text{а}i} K_{\text{інф}}, \quad (2.3)$$

де $B_{\text{еп}i}$ – вартість кожного $i = (1...n)$ елементу електроприводу; $K_{\text{зе}i}$, $K_{\text{ат}i}$, $K_{\text{об}i}$ – відповідно коефіцієнт значності експлуатації, амортизаційних відрахувань і обслуговування i – елементу; $B_{\text{а}i}$ – вартість втрат активної енергії i – елементу; $K_{\text{інф}}$ – коефіцієнт інфляції, що залежить від нормативного строку окупності $T_{\text{н}}$ (в роках) при k роках експлуатації електроприводу і показнику інфляції за рік $\Pi_{\text{інф.р}}$ (в %),

$$K_{\text{інф}} = \left[\sum_{k=0}^{T_{\text{н}}-1} (1 + \Pi_{\text{інф.р}}/100\%)^k \right] / T_{\text{н}}.$$

Оптимізацію спеціальних виконань АД для регульованого електроприводу доцільно виконувати з проектним критерієм максимуму ККД в заданому діапазоні зміни частот обертання [105].

В деяких випадках проектування, зокрема електромеханічної системи, критерій оптимізації визначається декількома показниками. Пошук компромісного рішення за декількома критеріям називається багатокритеріальною оптимізацією. Застосовуються ЦФ узагальненого критерію, що уявляє скалярну згортку декількох критеріїв з різними коефіцієнтами значності (експертної оцінки) [90, 91]. Такі коефіцієнти повинні бути науково обґрунтовані.

Завданням будь-якого керування є реалізація впливу на регульовану систему (об'єкт керування) керуючих сигналів. Під об'єктом керування (рис. 2.3) розуміється, наприклад електромеханічна система, яка в загальному випадку містить пристрій керування (ПК) і об'єкт керування (ОК), що пов'язані з зовнішнім середовищем і між собою. Стан системи (рис. 2.3) в кожний момент часу t визначається в діапазоні часу T , вектор функцією [92, 106, 107]

$$\bar{x}(t) = (\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots, \bar{x}_a(t)); 0 \leq t \leq T. \quad (2.4)$$

Компоненти $x_i(t)$, $i = 1 \dots a$, що визначають стан системи, називаються фазовими КЗ об'єкту керування. З зовнішнього середовища на систему діють задавальні вхідні сигнали керування U_i , ($i = 1 \dots b$) і збурюючі впливи V_i , ($i = 1 \dots c$). Вихідними величинами системи є спостереження $\bar{y}_i$, ($i = 1 \dots d$), що контролюються зворотними зв'язками (спостерігачами), сигнали з яких поступають на ПК.

Заданий вплив КЗ $x_1 \dots x_a$ містить інформацію про мету керування. Множини всіх значень компонентів, які мають вектори $\bar{x}_i$, $\bar{U}_i$, $\bar{V}_i$ та $\bar{y}_i$ утворюють відповідно простір стану, простір керування, простір збурень та простір спостережень. Керуючі впливи $\bar{x}_i$ у загальному випадку залежать від U_i , y_i і V_i та алгоритму керування в виді функції

$$\bar{x}_i = f_x(U_i, V_i, y_i).$$

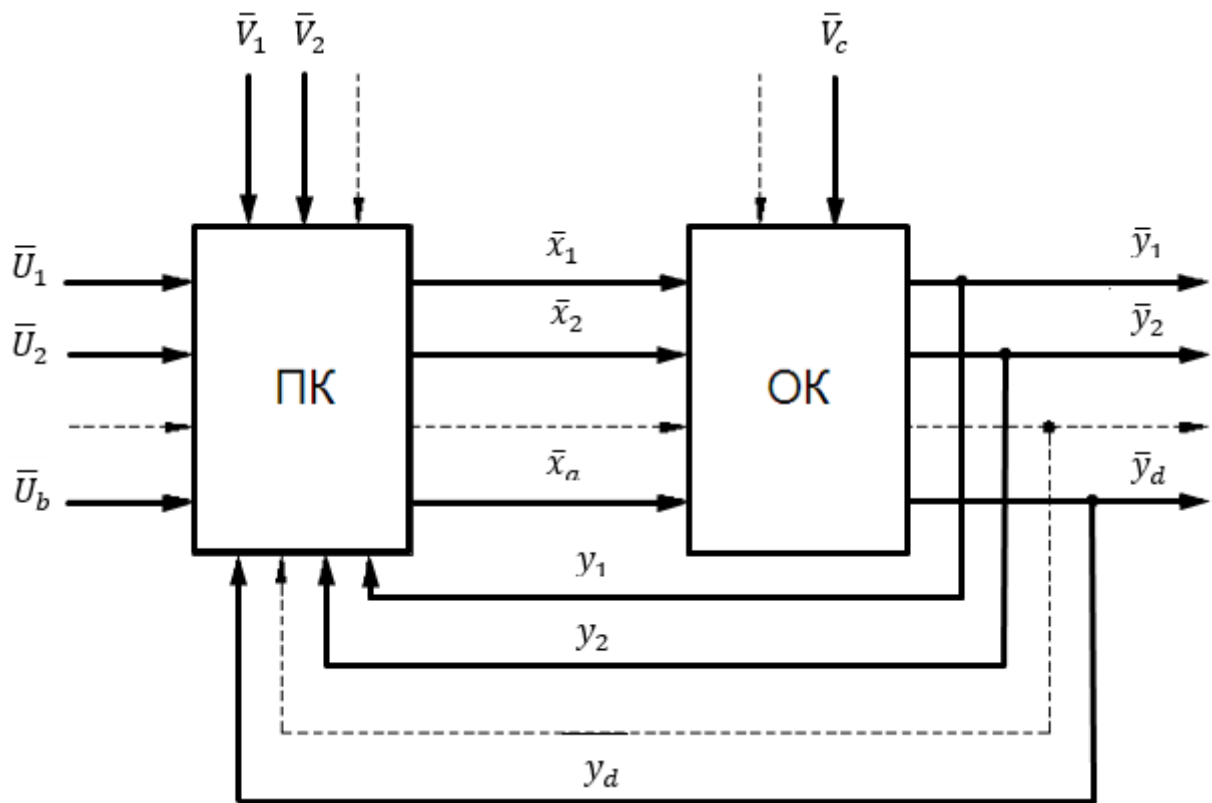


Рисунок 2.3 – Узагальнена схема об'єкту керування

Зміна стану об'єкту керування в часі визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = f_1[x_1(t), x_2(t), \dots, x_a(t), U_1(t), U_2(t), \dots, U_b(t), t] \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f_2[x_1(t), x_2(t), \dots, x_a(t), U_1(t), U_2(t), \dots, U_b(t), t] \\ \vdots \\ \frac{dx_a(t)}{dt} = f_a[x_1(t), x_2(t), \dots, x_a(t), U_1(t), U_2(t), \dots, U_b(t), t] \end{cases};$$

або у векторній формі

$$d\bar{x}_i(t)/dt = f_i[\bar{x}_i(t), \bar{U}_i(t), t],$$

де $\bar{x}_{(i=1\dots a)}(t)$ і $\bar{U}_{(i=1\dots b)}(t)$ – відповідно a – вимірний вектор стану, що визначає стан системи і b – вимірний керуючий вектор.

При рішенні оптимізаційних задач керування на систему (1.2) накладається сукупність обмежень та граничних умов:

$$\bar{x}_i(t) \in \bar{x}_t, \quad \bar{U}_i(t) \in \bar{U}_t,$$

де $\bar{x}_t$ і $\bar{U}_t$ – деякі задані множини, що характеризують особливості функціонування об'єкту керування.

Критерієм оптимальності (показником якості) керування є у більшості випадків [92, 107] інтегральна ЦФ об'єкту керування електромеханічної системи в діапазоні t на відрізку $[0, T]$

$$F_{\text{ЕМС}}(U) = \int_0^T \Phi[x(t), U(t)] dt.$$

Оптимальному керуванню відповідає визначення сукупності екстремальних допустимих сигналів U_{te} при яких досягається екстремальне значення $F_{\text{ЕМС}} \rightarrow F_{\text{ЕМС max (min)}}$. Критерієм керування є мінімум t або максимум корисності, мінімум втрат та інші. Сигналами і КЗ керування, в залежності від призначення та особливостей системи, є напруга, струм, момент, частота струму (обертання), потужність та інші [39-43].

2.3. Методи оптимізації, оцінки якості і аналітичного порівняльного аналізу електричних комплексів та машин

Оптимізаційний проектний синтез та керування роботою електричних об'єктів здійснюється за допомогою рівнянь загального виду (2.1) - (2.4) методами досліджень функцій з аналітичними виразами [91, 92, 106, 107]. Визначення, наприклад в рівнянні (2.1), екстремальних значень $x_1 \dots x_n$ досягається рішенням системи рівнянь похідних вказаної ЦФ:

$$dF_{\text{ЕМ}}/dx_1 = 0; dF_{\text{ЕМ}}/dx_2 = 0; \dots; dF_{\text{ЕМ}}/dx_n = 0.$$

В зв'язку зі складністю вказаних системи та рівнянь застосовуються чисельні методики рішення. Для побудови методик оптимізації використовуються методи: «покоординатного спуску», «невизначених множників Лагранжа», «Гамільтона-Якобі», «динамічного програмування», «принципу максимуму», «лінійного програмування», «нелінійного програмування», «Монте-Карло», «геометричного програмування», «генетичних алгоритмів» та інші [92, 106, 107]. Класифікацію стратегій пошуку оптимальних рішень оптимізаційних задач на основі перелічених методів наведено на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Основні стратегії пошуку оптимальних рішень

Для визначення переваг або недоліків певних одиниць електрообладнання відносно аналогів, а також визначення технічного рівня (якості) нових розробок, зокрема ЕМ, застосовується методика [108], що відповідає методу експертної оцінки [90, 91]. За цією методикою розраховується комплексний ПТР нової розробки

$$Q_{k1} = \sum_{k=1}^{k=n} q_{ki} m_{ki},$$

де q_{ki} – відносний показник з $k = 1 \dots n$ номенклатури показників (характеристик) функціональної і технологічної ефективності нової розробки або її i – го варіанту; m_{ki} – коефіцієнт вагомості k – го показника, що

встановлений експертним методом при тому, що при загальному числі n показників підсумок m_{ki} згідно [108] дорівнює

$$\sum_{k=1}^{i=n} m_{ki} = 1.$$

Відносний показник q_{ki} визначається відношенням його розрахункового значення Q_{ki} до аналогічного показника базового аналогу

$$q_{ki} = Q_{ki}/Q_{ка}.$$

Основними ПТР ЕМ і електричних апаратів є масовартісні і енергетичні показники, а для електричних систем і комплексів додатково комплектність, діапазон регулювання. Додатковими показниками є контурний об'єм, ВАХ, рівень ЗМП, рівень відходів ЕТС при виробництві магнітопроводу та інші. Якщо всі показники q_{ki} нової розробки є кращими відносно аналогу, m_{ki} можна не визначати. Базовим аналогом певної розробки, тобто прототипом, є аналог з максимальним співпадіння конструктивно-технологічних або схемо-технічних ознак.

Особливістю відомих методів оптимізаційного синтезу ОТ, ТТ і КАД є залежність ЦФ від індивідуальних конфігурацій елементів традиційних ЕМС та залежність рівня ЕМН від умов ТЗ на проектування. Традиційні геометричні КЗ, що відображають індивідуальні структурні особливості, не задовольняють умови універсальності використання і ускладнюють об'єктивне зіставлення варіантів ЕМС, тобто структурний синтез. Наприклад, взаємо неприйнятними геометричними КЗ оптимізації трансформаторів і реакторів є співвідношення боків a_c , b_c прямокутного і діаметр D_k кругового УК «східчастого» перерізу стрижнів (рис. 1.3, а, б). Крім того, іншою особливістю методик, в яких КЗ – ЕМН, є «прив'язка» оптимізаційного процесу до конкретних потужностей, способів охолодження (повітряне, рідинне, кріогенне) і виконань (захищене, закрите, вбудоване), що ускладнює здійснення узагальненого аналізу варіантів та структурну оптимізацію ЕМС.

Методика побудови оптимізаційних ММ структурного синтезу електромеханічних пристроїв повинна надавати можливість узагальненого визначення впливу структурних перетворень ЕМС на основні ПТР ЕМ і апаратів. Вказане визначення можливо порівняльним аналізом варіантів ЕМС при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності (ЕМЕ) [11, 12, 28] і універсальності (інваріантності) виду і використання ЦФ і основних КЗ. Універсальними можна вважати КЗ, які прийнятні і ідентичні як для варіантів, що порівнюються, так і для будь-яких нетрадиційних пропозицій конструкцій ЕМС, що існують або можливі. Однак названий принцип протирічить процесу параметричного синтезу ЕМС, який припускає оптимізаційне варіювання густини струму, індукції і лінійного навантаження, а також перевірку проектних обмежень, зокрема контроль нагріву обмоток. В свою чергу варіювання ЕМН при параметричній оптимізації протирічить рішенню задачі узагальненого структурного синтезу ЕМС. Протиріччя обумовлено прив'язуванням діапазону зміни ЕМН до конкретних виконань, потужності і способу відводу тепла від активної частини. Тому для усунення вказаних протирічч і виключення залежності оптимізаційного процесу від потужності, величин ЕМН і особливостей системи охолодження, основні КЗ і окремі критерії оптимізації повинні бути подані відповідно у відносному і безрозмірному видах.

Викладеним умовам ЕМЕ (рівності електромагнітної потужності) і інваріантності порівняльного аналізу відповідає універсальна ЦФ окремих критеріїв оптимізації любых варіантів ЕМС виду [110-112]

$$F_{kii} = (\sqrt[4]{\Pi_{ii}})^3 K_{mk} \Pi_{kii}^* \quad (2.5)$$

де Π_{ii} – показник вихідних даних (ТЗ на проектування) і ЕМН ii – варіанту електромеханічного пристрою; K_{mk} – складова питомих характеристик використаних активних матеріалів; Π_{kii}^* – оптимізаційна безрозмірна складова, яка характеризує $k \geq 3$ ЦФ маси F_{1ii} , вартості F_{2ii} і F_{3ii} втрат активної потужності, а також інших можливих і спеціальних ЦФ, наприклад

діаметру сфери контурного об'єму компактної ЕМС ТТ, реактивної потужності або моменту інерції ротора керованого АД.

Екстремуми Π_{kii}^* ЦФ (2.5) є ПТР ЕМ або іншого електричного об'єкту [110-112]. При визначенні Π_{kii}^* ЕМ використовується сукупність геометричних КЗ, а при визначенні Π_{zii}^* додатково використовуються відносні електромагнітні КЗ.

Основні відносні геометричні КЗ оптимізації будь-якого ii – варіанту статичної ЕМС на основі ЦФ (2.5) уявляють відношення розмірів розрахункових діаметрів D_{zii} і D_{Bii} , а також висоти h_{Bii} і ширини b_{Bii} обмоткового варіанту магнітопроводу (табл. 2.1) [109-112]:

$$a_m = D_{zii}/D_{Bii}; \quad \lambda_b = h_{Bii}/b_{Bii}. \quad (2.6)$$

Відносними геометричними КЗ оптимізації ii – варіанту ЕМС АД є відношення, що визначаються показником вихідних даних і ЕМН АД Π_{AD} [м⁴], а також діаметром D_{ii} і довжиною $l_{\delta ii}$ активної поверхні статора (табл. 2.2) [112]:

$$a_m = D_{ii}^4/\Pi_{AD}; \quad \lambda_\delta = l_{\delta ii}/D_{ii}. \quad (2.7)$$

Для визначення безрозмірних складових ЦФ втрат активної потужності статичних ЕМС ОТ(ТТ) – $\Pi_{\text{от(тт)}}^*$ і ОР(ТР) – $\Pi_{\text{ор(тр)}}^*$ та ЦФ втрат активної потужності АД $\Pi_{\text{ад}}^*$ використовуються відносні електромагнітні КЗ [110-112]. Вказані КЗ трансформаторів (реакторів) містять співвідношення K_{pii} коефіцієнтів додаткових втрат і питомих характеристик матеріалів, які використовуються при розрахунках ВКЗ (навантажувальних втрат обмоток) і ВНР (втрат в магнітопроводі) трансформатора (реактора), а КЗ АД містять співвідношення втрат в зубцях K_{pzs} , ярмі K_{pas} і обмотках статора K_{pws} і ротора K_{pwr} , а також питомих характеристик матеріалів ЕМС АД.

Також усі ЦФ виду (2.5) ІСП зі складовими $\Pi_{\text{кот(тт)}}^*$ і $\Pi_{\text{кор(тр)}}^*$ залежать від коефіцієнту заповнення обмоткового вікна (класу напруги) K_{zo} активним

матеріалом обмотки, а в деяких конструкціях (варіанти 1, 3, 8, табл. 2.1) застосовується третя додаткова геометрична КЗ центрального кута стрижня α_c . Відповідно ЦФ (2.5) АД зі складовими $\Pi_{\text{КАД}}^*$ залежать від коефіцієнту заповнення пазу статора $K_{3П}$:

$$\Pi_{1(2)ТТ(ТР)}^* = f_{T1(2)ii}(a_m, \lambda_b, \alpha_c, K_{30}); \quad (2.8)$$

$$\Pi_{1(2)ОТ(ОР)}^* = f'_{T1(2)ii}(a_m, \lambda_b, \alpha_c, K_{30}); \quad (2.9)$$

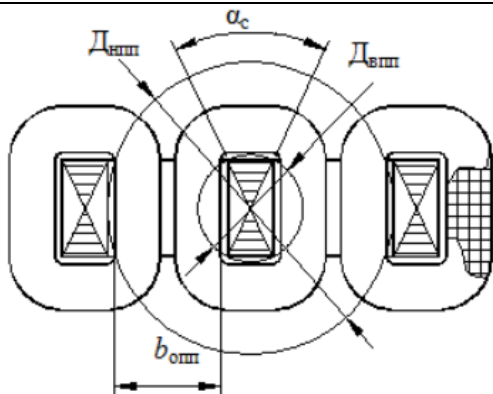
$$\Pi_{3ТТ(ТР)}^* = f_{T3ii}(a_m, \lambda_b, \alpha_c, K_{\text{пів}}, K_{30}); \quad (2.10)$$

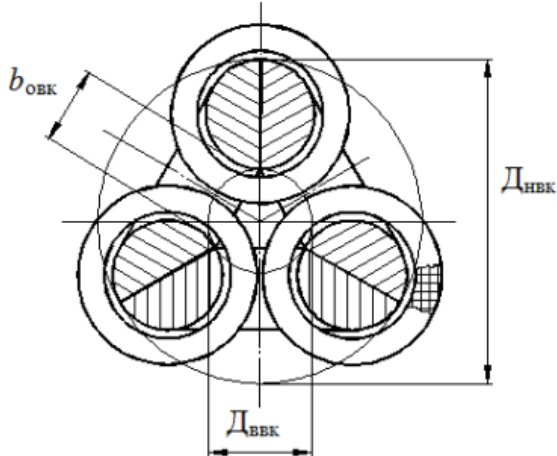
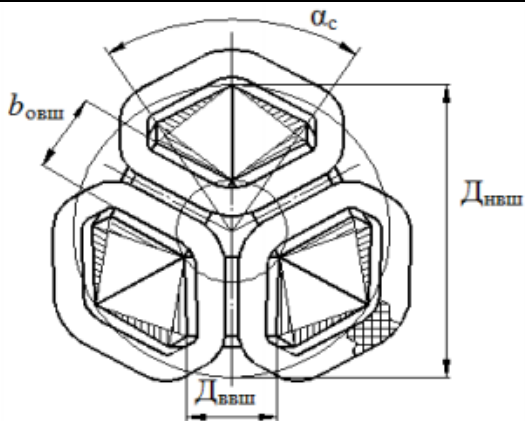
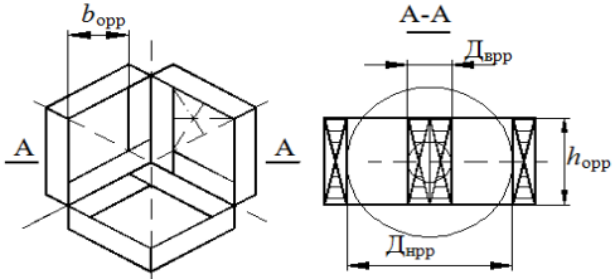
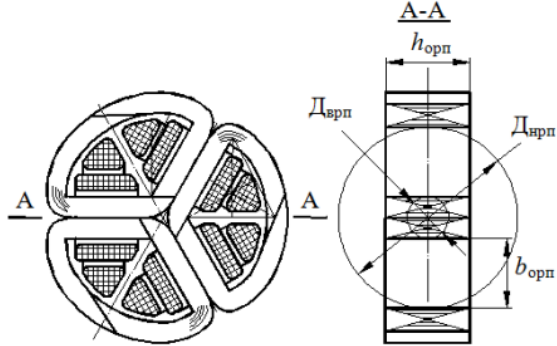
$$\Pi_{3ОТ(ОР)}^* = f'_{T3ii}(a_m, \lambda_b, \alpha_c, K_{\text{пів}}, K_{30}); \quad (2.11)$$

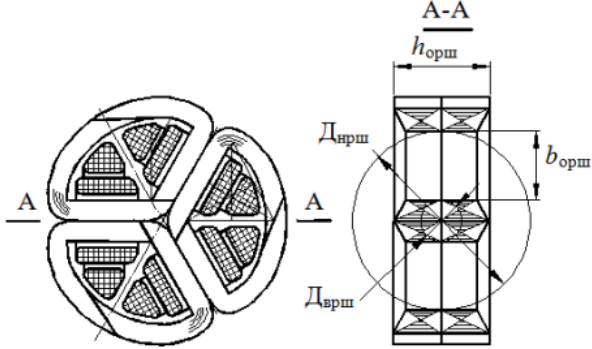
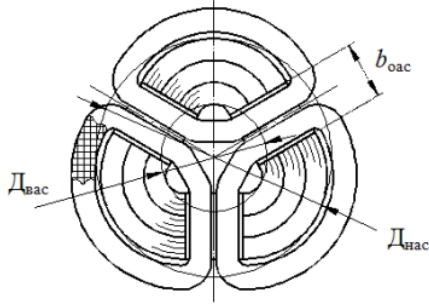
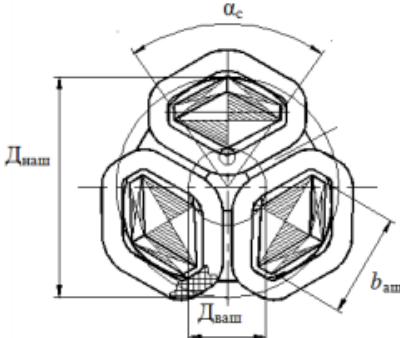
$$\Pi_{1(2)АД}^* = f_{g1(2)ii}(a_m, \lambda_\delta, K_{3П}); \quad (2.12)$$

$$\Pi_{3АД}^* = f_{g3ii}(a_m, \lambda_\delta, K_{3П}, K_{\text{пзс}}, K_{\text{пас}}, K_{\text{пws}}). \quad (2.13)$$

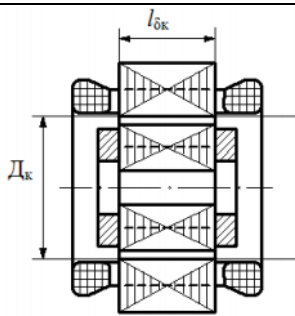
Таблиця 2.1 – Варіанти конструктивних схем і позначення показників технічного рівня статичних електромагнітних систем

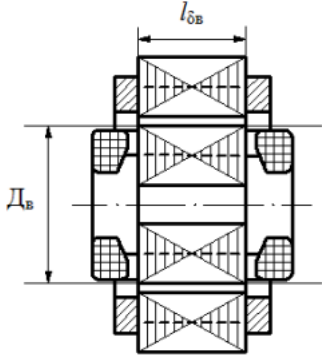
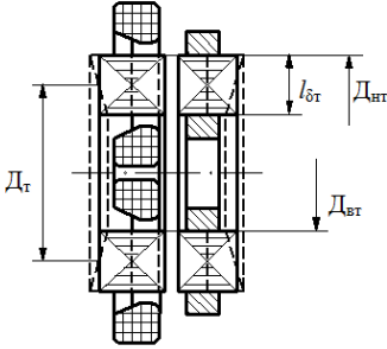
№ варіанта	Конструктивна схема	Позначення показника		
		Маса	Вартість	Втрати
1	2	3	4	5
1		$\Pi_{1\text{ппе}}^*$	$\Pi_{2\text{ппе}}^*$	$\Pi_{3\text{ппе}}^*$

2		$\Pi_{1\text{вк}}^*$	$\Pi_{2\text{вк}}^*$	$\Pi_{3\text{вк}}^*$
3		$\Pi_{1\text{вш}}^*$	$\Pi_{2\text{вш}}^*$	$\Pi_{3\text{вш}}^*$
1	2	3	4	5
4		$\Pi_{1\text{pp}}^*$	$\Pi_{2\text{pp}}^*$	$\Pi_{3\text{pp}}^*$
5.		$\Pi_{1\text{ppe}}^*$	$\Pi_{2\text{ppe}}^*$	$\Pi_{3\text{ppe}}^*$

6.		$\Pi_{1рше}^*$	$\Pi_{2рше}^*$	$\Pi_{3рше}^*$
7.		$\Pi_{1асе}^*$	$\Pi_{2асе}^*$	$\Pi_{3асе}^*$
8.		$\Pi_{1аше}^*$	$\Pi_{2аше}^*$	$\Pi_{3аше}^*$

Таблиця 2.2 – Варіанти конструктивних схем і позначення показників технічного рівня електромагнітних систем асинхронних короткозамкнених двигунів

№ варіанта	Конструктивна схема	Позначення показника		
		Маса	Вартість	Втрати
1		$\Pi_{1кае}^*$	$\Pi_{2кае}^*$	$\Pi_{3кае}^*$

2		$\Pi_{1\text{оae}}^*$	$\Pi_{2\text{оae}}^*$	$\Pi_{3\text{оae}}^*$
3		$\Pi_{1\text{тае}}^*$	$\Pi_{2\text{тае}}^*$	$\Pi_{3\text{тае}}^*$

У цілому метод структурної і параметричної оптимізації [109-112], який відповідає [108], дозволяє подолати згадані протиріччя і об'єднати структурний і параметричний синтези ЕМС виходячи з виду ЦФ (2.5). Структура ЦФ (2.5) відрізняється від інших відомих ЦФ оптимізації ІСП і АД тим, що компоненти Π_{ii} не входять до оптимізаційних безрозмірних складових $\Pi_{1(2)ii}^*$ (2.8), (2.9), (2.11), (2.12), які є залежними тільки від геометричних відносних КЗ (2.6), (2.7). Компоненти Π_{ii} також не входять в складові Π_{3ii}^* (2.10), (2.13), але відносні електромагнітні КЗ K_{pii} та K_{pzs} , K_{pas} , K_{pws} є функціями значень індукції і густин струмів активних елементів. Тому задача порівняльного аналізу енергетичної ефективності досліджуваних варіантів вирішується співставленням двох величин ПТР $(\Pi_{3iie}^*)'$ і $(\Pi_{3iie}^*)''$ кожної з ЕМС. Екстремуми $(\Pi_{3iie}^*)'$ і $(\Pi_{3iie}^*)''$ визначаються по мінімальним ($'$) і максимальним ($''$) значенням КЗ в виді діапазону зміни коефіцієнту $K_{pi}^{(')}$ статичної ЕМС або його аналогів для других електромеханічних пристроїв. Граничні значення електромагнітних КЗ відповідають відомим діапазонам

змін ЕМН в конструктивних виконаннях і межах ЕМН, що відповідно існують та використовуються при проектуванні.

На основі (2.5) – (2.13) для ІСП і АД також може бути складена ЦФ інтегрального критерію оптимізації (2.2), екстремум якого може бути визначений варіюванням КЗ α_m , $\lambda_{v(\delta)}$ і α_c та варіюванням індукції і густин струмів в КЗ K_{pii} , K_{pzs} , K_{pas} , K_{pws} .

2.4. Особливості визначення показників технічного рівня асинхронних двигунів

Розробка ММ ii – варіанту будь-якої ЕМС АД (рис. 1.10 – рис. 1.12, табл. 2.2) методом [109-112] виконується з використанням базисних рівнянь зв'язку параметрів магнітопроводів і обмоток статора і ротора з показником вихідних даних і ЕМН – Π_{AD} . Для АД базисними є рівняння [101] зв'язку підсумкової площі пазів статора (ротора) $S_{S(R)ii}$ з Π_{AD} і D_{ii} (табл. 2.1):

$$S_{Sii} = \Pi_{AD} / (K_{3\pi} \lambda_{\delta} D_{ii}^2); \quad (2.14)$$

$$S_{Rii} = \alpha_R \Pi_{AD} / (\lambda_{\delta} D_{ii}^2), \quad (2.15)$$

де α_R – розрахунковий коефіцієнт, що визначається відомими діапазонами значень коефіцієнтів розподілу K_p і скорочення кроку K_{ck} обмотки статора, $\cos\varphi$, коефіцієнту скосу пазів K_{cp} та відношенням густин струму статора J_s і струму ротора J_R [8, 101],

$$\alpha_R = K_p K_{ck} (0,2 + 0,8 \cos\varphi) J_s / (K_{cp} J_R).$$

Підсумкові площі пазів (2.14), (2.15) також виражаються через D_{ii} і розміри висот зубців статора (ротора) $h_{zs(r)ii}$:

$$S'_{Sii} = f_{SS}(D_{ii}, h_{zsii}); \quad (2.16)$$

$$S'_{Rii} = f_{SR}(D_{ii}, h_{zrii}). \quad (2.17)$$

Рішенням рівнянь рівностей (2.14) і (2.15) та (2.16) і (2.17) знаходяться залежності [101, 102]:

$$h_{zSii} = f_{zS}(\Pi_{AD}, K_{3\pi}, D_{ii}, \lambda_\delta); \quad S_{Sii} = 1 / (K_{3\pi} \lambda_\delta \sqrt{a_m \Pi_{AD}}); \quad (2.18)$$

$$h_{zRii} = f_{zR}(\Pi_{AD}, \alpha_R, D_{ii}, \lambda_\delta); \quad S_{Rii} = \alpha_R / (\lambda_\delta \sqrt{a_m \Pi_{AD}}). \quad (2.19)$$

Також визначаються залежності висот ярем магнітопроводів статора (ротора) $h_{aS(R)ii}$, середньої довжини витка обмотки статора l_{wii} , середнього діаметру (в ТАД середніх діаметрів) D_{kii} і перерізу короткозамикаючого кільця S_{kii} обмотки ротора від Π_{AD} і λ_δ :

$$h_{aS(R)ii} = \sqrt[4]{a_m \Pi_{AD}} / p; \quad l_{wii} = f_l(\Pi_{AD}, a_m, \lambda_\delta); \quad (2.20)$$

$$D_{kii} = f_k(\Pi_{AD}, a_m, \lambda_\delta); \quad S_{kii} = f_{SK}(\Pi_{AD}, a_m, \lambda_\delta). \quad (2.21)$$

З використанням (2.16) – (2.21) знаходяться рівняння мас магнітопроводу m_{Mii} , обмотки статора m_{wSii} і обмотки ротора m_{wRii} АД:

$$m_{Mii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 \gamma_c \Pi_{1Mii}^*; \quad m_{wSii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 \gamma_w K_{\gamma w} \Pi_{1wSii}^*; \quad (2.22)$$

$$m_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 \gamma_a \Pi_{1wRii}^*, \quad (2.23)$$

де γ_c , γ_w , γ_a – густина ЕТС, електротехнічної міді і алюмінію; Π_{1Mii}^* , Π_{1wSii}^* , Π_{1wRii}^* – відповідно безрозмірні складові ЦФ маси магнітопроводу, маси обмотки статора, маси обмотки ротора; $K_{\gamma w} = 1,07 \dots 1,09$ – коефіцієнт підвищення маси від наявності ізоляції і просочення.

На основі (2.22) і (2.23) визначаються підсумкові маса F_{1iiA} і вартість F_{2iiA} ЕМС АД [101]:

$$F_{1iiA} = m_{MiiA} + m_{wSii} + m_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 \gamma_c \Pi_{1iiA}^*; \quad (2.24)$$

$$F_{2iiA} = B_{MiiA} + B_{wSii} + B_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 B_c \gamma_c \Pi_{2iiA}^*; \quad (2.25)$$

де Π_{1iiA}^* і Π_{2iiA}^* – безрозмірні складові ЦФ маси і вартості ii – го варіанту ЕМС АД; B_{MiiA} , B_{wSii} і B_{wRii} – вартість магнітопроводу, обмотки статора і обмотки ротора.

Безрозмірні складові Π_{1iiA}^* і Π_{2iiA}^* рівнянь (2.24) і (2.25) визначаються:

$$\Pi_{1iiA}^* = \Pi_{1MAii}^* + \gamma_m \Pi_{1wSii}^* / \gamma_c + \gamma_a \Pi_{1wRii}^* / \gamma_c; \quad (2.26)$$

$$\Pi_{2iiA}^* = \Pi_{1MAii}^* + B_w \gamma_M \Pi_{1wSii}^* / B_c \gamma_c + B_a \gamma_a \Pi_{1wRii}^* / B_c \gamma_c, \quad (2.27)$$

де B_w і B_a – питомі вартості електротехнічних міді і алюмінію.

З використанням (2.7) і (2.14) – (2.21) складаються рівняння ЦФ втрат в об'ємі магнітопроводу P_{MiiA} , обмотці статора P_{wSii} і обмотці ротора P_{wRii} АД [102]:

$$P_{MiiA} = P_M (K_{dz} B_{z1}^2 m_{z1ii} + K_{da} B_{a1}^2 m_{a1ii}) = \\ = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 P_M B_{\delta}^2 P_c (K_{dz} K_{Bz}^2 \Pi_{3zSii}^* + K_{da} K_{Ba}^2 \Pi_{3aSii}^*); \quad (2.28)$$

$$P_{wSii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 (J_S^2 / \sigma_M) \Pi_{3wSii}^*; \quad (2.29)$$

$$P_{wRii} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 (J_R^2 / \sigma_A) \Pi_{3wRii}^*, \quad (2.30)$$

де P_M – питомі втрати ЕТС магнітопроводу при $f=50$ Гц і індукції 1 Тл; $K_{dz(a)}$ – коефіцієнт додаткових втрат зубців (ярма) статора [8]; $B_{z(a)s}$ – амплітуда магнітної індукції в зубці (ярмі) статора; $m_{z(a)ii}$ – маса зубців (ярма); $K_{Bz(a)}$ – відношення індукції зубця (ярма) до індукції зазору B_{δ} ; $\sigma_{M(A)}$ – питома провідність міді (алюмінію); Π_{3zSii}^* , Π_{3aSii}^* , Π_{3wSii}^* , Π_{3wRii}^* – безрозмірні складові ЦФ втрат зубців, ярем, обмоток статора і ротора, які є функціями a_m і λ_{δ} , а також ЕМН.

На основі рівнянь (2.28) – (2.30) визначаються підсумкові втрати АД з ii – варіантом ЕМС,

$$F_{3iiA}^* = K_{d\Sigma ii} (P_{Mii} + P_{wSii} + P_{wRii}) = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 K_{d\Sigma ii} K_{\Pi wR} \Pi_{3iiA}^*, \quad (2.31)$$

де $K_{d\Sigma ii}$ – коефіцієнт підвищення втрат; Π_{3iiA}^* – безрозмірна складова ЦФ втрат активної потужності АД з ii – варіантом ЕМС,

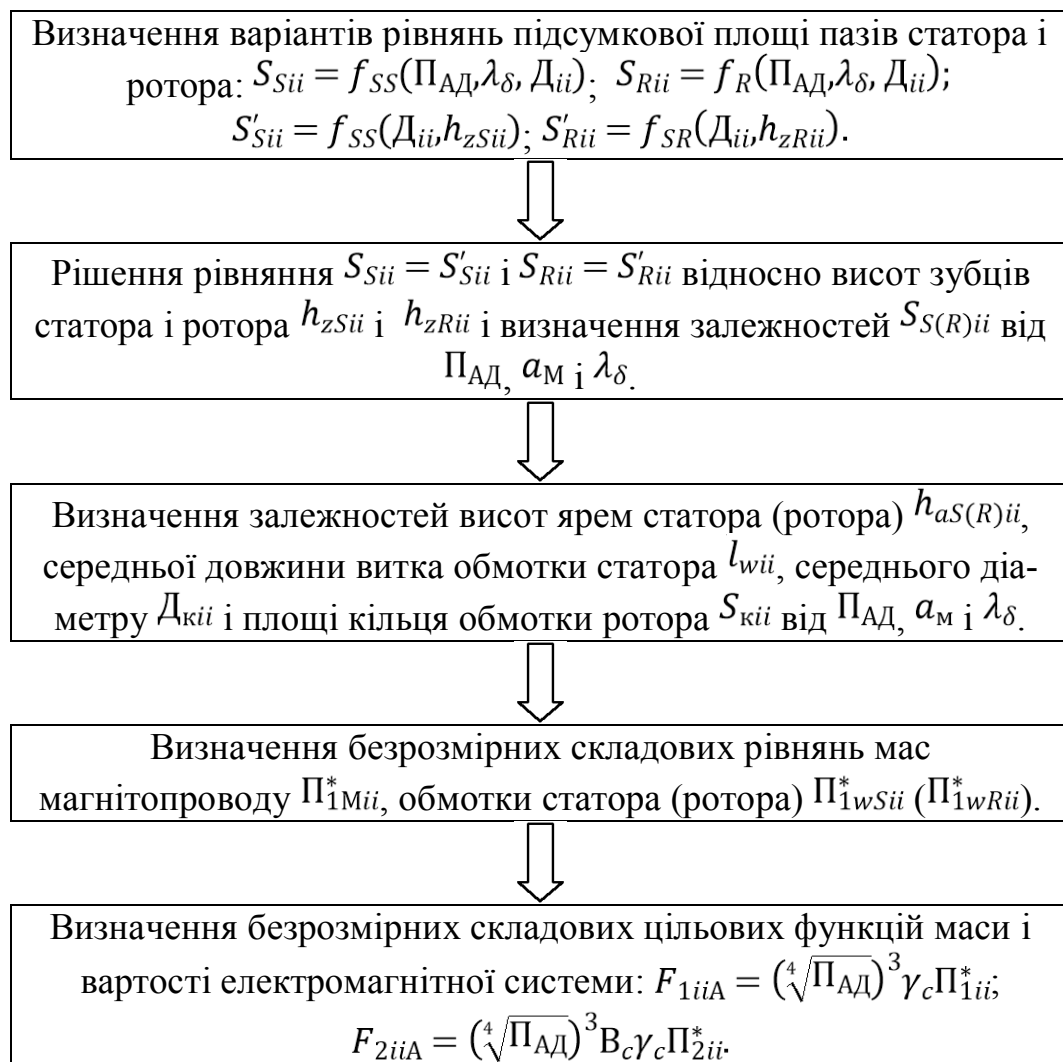
$$\Pi_{3iiA}^* = K_{\Pi zS} \Pi_{3zSii}^* + K_{\Pi aS} \Pi_{3aSii}^* + K_{\Pi wS} \Pi_{3wSii}^* + \Pi_{3wRii}^*. \quad (2.32)$$

Коефіцієнти, що входять в (2.31) і (2.32), є співвідношеннями.

$$K_{\Pi wR} = J_R^2 / \sigma_a; \quad K_{\Pi zS} = P_c K_{dz} K_{Bz}^2 B_{\delta}^2 \gamma_c \sigma_a / J_R^2;$$

$$K_{\Pi aS} = P_c K_{da} K_{Ba}^2 B_{\delta}^2 \rho_c \sigma_a / J_R^2; \quad K_{\Pi wS} = J_S^2 \sigma_a / J_R^2 \sigma_M.$$

Розробка ММ ii – варіанту ЕМС АД методом [110-112] виконується в послідовності (рис. 2.5).





Визначення безрозмірних складових рівнянь втрат зубців Π_{3zSii}^* ,
 ярма Π_{3aS}^* і обмоток статора Π_{3wSii}^* і ротора Π_{3wRii}^* , а також
 рівняння втрат активної потужності

$$F_{3iiA} = (\sqrt[4]{\Pi_{AD}})^3 K_{d\Sigma ii} K_{pwR} \Pi_{3ii}^*$$

Рисунок 2.5 – Складові і послідовність розробки математичної моделі визначення основних показників технічного рівня асинхронного двигуна

Коефіцієнти $K_{d\Sigma ii}$ враховують підвищення втрат в ЕМС до підсумкових втрат АД

$$K_{d\Sigma ii} = K_{dpii} K_{Mii} K_{diii},$$

де K_{dpii} – коефіцієнт підвищення підсумкових втрат поверхнево-пульсаційними втратами магнітопроводу; K_{Mii} – коефіцієнт підвищення підсумкових втрат механічними і вентиляційними складовими; K_{diii} – коефіцієнт підвищення втрат навантажувально-додатковими складовими.

Зіставлення ПТР у виді відносних складових Π_{kii}^* ЦФ, тобто структурно-параметричний синтез ЕМС виконується при умові ЕМЕ, тобто рівності електромагнітних потужностей і показників Π_{ii} варіантів, що порівнюються.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Задачі одночасного структурно-параметричного синтезу в традиційних методиках оптимізаційного проектування електричних пристроїв є суперечливими і вирішуються інтерактивно компромісним шляхом з застосуванням експертного методу.

2. Якісний проектний синтез електротехнічних систем і комплексів є можливим при системному поєднанні аналізу електромеханічних, електронних, механічних та інших компонентів і процесів з застосуванням структурно-параметричної оптимізації.

3. Поєднання структурного і параметричного синтезу в аналітичному зіставленні варіантів ЕМС статичних і рухомих ЕМ та реакторів досягається застосуванням оптимізаційного методу безрозмірних показників технічного рівня і відносних геометричних і електромагнітних КЗ.

4. Метод безрозмірних показників технічного рівня та відносних геометричних і електромагнітних КЗ відрізняється універсальністю, тобто інваріантністю до структур та конструктивних виконань, типу охолодження і діапазону потужностей, а також наочністю ММ ЕМС, що подаються у виді цілісних рівнянь.

5. Надається можливість оптимізаційного проектного синтезу ЕМС і перевірки проектних обмежень на основі аналітичного визначення цілісних рівнянь ЦФ та зіставлення критеріальних ПТР проектних варіантів при дотриманні умов ЕМЕ.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАНТІВ СТРУКТУР АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Чинники зниження енергетичних втрат і питомої матеріалоемності незмінних протягом багатьох десятиліть традиційних структур (рис. 3.1, *а*) ЕМС АД (рис. 1.9) вдосконаленням електротехнічних матеріалів у другій половині ХХ століття доповнені можливостями оптимізаційного проектування на основі прогресу обчислювальної техніки [8]. Також розвивалися з розширенням структурного і видового складу, спеціальні АД, в тому числі таких, що відрізняються зовнішнім положенням ротора (рис. 3.1, *б*) і аксіальним робочим зазором (рис. 3.1, *в*) [18-25]. Застосування електричних машин спеціального призначення і виконання їх натомість аналогів єдиних серій створює можливості вдосконалення низки механізмів, технічних систем та комплексів [16].

3.1. Показники маси і вартості асинхронних двигунів з радіальними електромагнітними системами

У зв'язку зі зростанням значимості використання спеціальних АД, в доповнення до визначення співвідношення головних розмірів і елементів ЕМС циліндричного (рис. 3.1, *а, б*) і аксіального (рис. 3.1, *в*) виконань [11, 12], виникає доцільність розв'язання задач оптимізаційного порівняльного аналізу їх масовартісних і енергетичних показників. Крім того, виникає необхідність аналітичної оцінки результатів структурного перетворення ЕМС, наприклад поділу (секціонування) магнітопроводів ротора і статора (рис. 3.1, *в*; рис. 3.2, *а, б*) з метою досягнення спеціальних вимог – поліпшення вібро-акустичних характеристик [120], а також контрроторного обертання [66, 67]. Іншими прикладами секціонування і перетворення структур ЕМС є заміна традиційної плоскої (рис. 3.1, *а, б*) або циліндричної (рис. 3.1, *в*) конфігурації елементарних шарів магнітопроводу відповідно на конусно-площинну (рис. 1.11, *а, б*) і конусно-циліндричну (рис. 1.12, *а, б*) конфігурації [20, 22, 28].

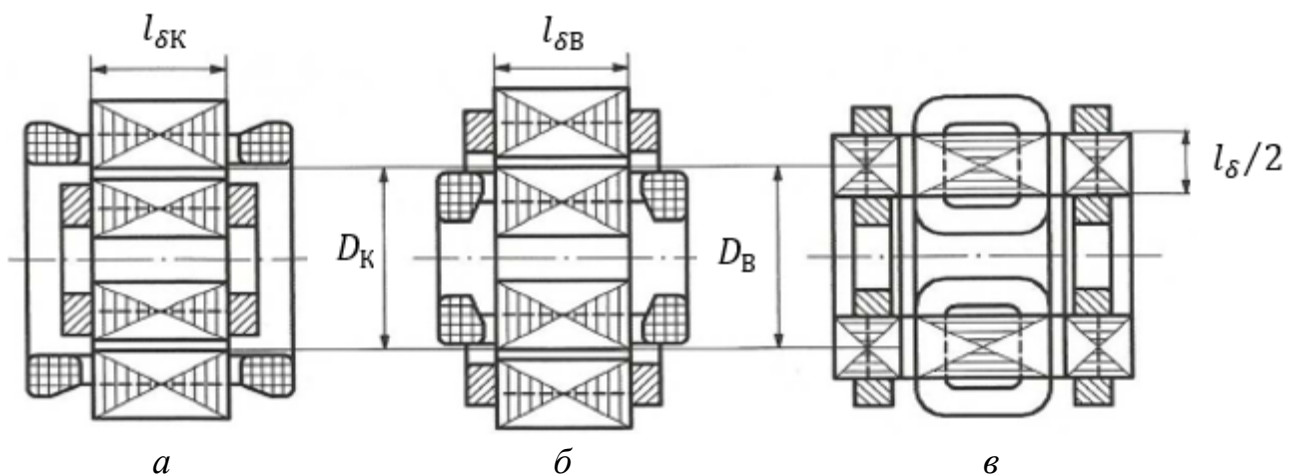


Рисунок 3.1 – Електромагнітні системи асинхронних короткозамкнених двигунів

При цьому загальними критеріями структурної і параметричної оптимізації ЕМС АД, що відрізняються положенням в просторі і конфігурацією елементів, а також числом ступенів свободи руху можуть

служити основні масовартісні та енергетичні характеристики показники технічного рівня [109, 112].

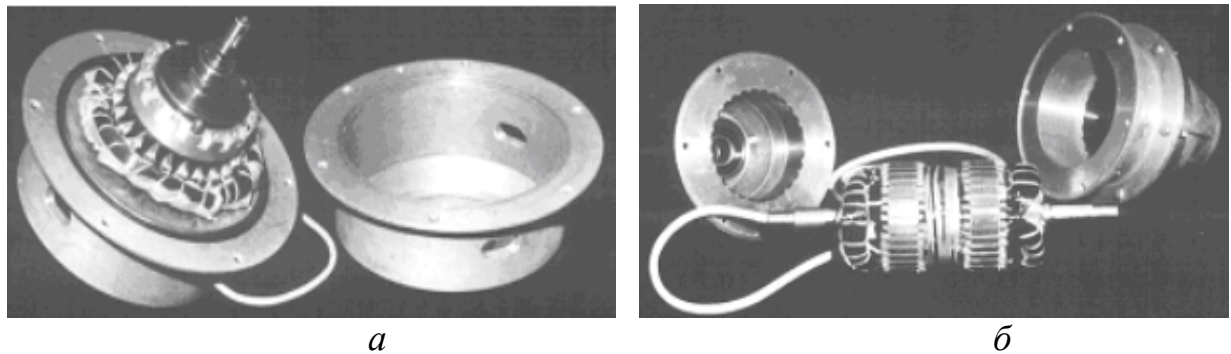


Рисунок 3.2 – Експериментальні зразки спеціальних асинхронних двигунів – торцевого двоторного (а) і оберненого з двопакетним статором і ротором (б)

При розробці електричної машини застосовуються різні методи оптимізації, що використовують поняття машинної постійної [8, 121].

Машинна постійна C_A зв'язує діаметр активної поверхні D і активну довжину l_δ статора з розрахунковою (електромагнітною) потужністю P' , частотою обертання магнітного поля Ω_1 , лінійним навантаженням A і амплітудою індукції в робочому зазорі B_δ електричної машини

$$C_A = D^2 l_\delta / P' = K_{CA} / (K_p K_y K_{sk} \Omega_1 A B_\delta), \quad (3.1)$$

де K_{CA} – коефіцієнт, що визначається прийнятою системою одиниць і особливостями розподілу магнітного поля в робочому зазорі; K_p , K_y і K_{sk} – коефіцієнту розподілу, укорочення і скосу обмоток статора і ротора.

Маса і вартість ЕМС електричної машини знижуються, а втрати зростають зі збільшенням електромагнітних навантажень A , B_δ і щільності струму статора (ротора) $J_{1(2)}$, а також відношень K_{Bz} і K_{Ba} до індукції B_δ відповідно амплітуд індукції зубця $B_{z1(2)}$ і ярма $B_{a1(2)}$ статора (ротора), які відповідають діапазонам [8, 121]:

$$K_{Bz} = K_{Bz1} = B_{z1} / B_\delta \approx K_{Bz2} = B_{z2} / B_\delta = 2,0 \dots 3,0; \quad (3.2)$$

$$K_{Ba} = K_{Ba1} = B_{a1}/B_{\delta} \approx K_{Ba2} = B_{a2}/B_{\delta} = 1,0 \dots 2,0. \quad (3.3)$$

Принципу електромагнітної еквівалентності порівняння різних ЕМС відповідає рівність P' та ідентичності відповідно ЕМН, коефіцієнтів K_{Bz} (3.2) і K_{Ba} (3.3), а також повного коефіцієнта заповнення паза статора $K_{зп}$ і коефіцієнта заповнення магнітопроводу ЕТС $K_{зс}$ [8, 121] порівнюваних електричних машин. На масовартісні та енергетичні характеристики об'єктів порівняння, подібних конструкцій (рис. 3.1), при ідентичних електромагнітних навантаженнях та способах охолодження істотний вплив роблять специфічні особливості структури і геометрії елементів ЕМС.

В цілому завдання оптимізації АД можна сформулювати як пошук екстремуму ЦФ $F_{ц}$, яка відповідає заданому критерію оптимізації

$$F_{ц} = f(\SigmaВД + \SigmaПО + \SigmaКЗ), \quad (3.4)$$

де $\SigmaВД$ – вихідні дані технічного завдання і константи проектування; $\SigmaПО$ – проектні обмеження, що визначаються вимогами технічного завдання; $\SigmaКЗ$ – сукупність КЗ.

У загальному випадку $\SigmaВД$ включає величини номінальних потужності $P_{н}$, фазової напруги U_1 і частоти f_1 ; числа фаз m_1 , пар полюсів p і пазів на полюс і фазу q_1 ; числа паралельних гілок a_1 і тип обмотки статора, що визначає обмотковий коефіцієнт. Величини і показники $\SigmaПО$ відповідають вимогам технічного завдання і складаються з основних проектних обмежень – перевищення температури обмотки, кратності початкового, максимального і мінімального моментів і пускового струму, а також спеціальних обмежень, наприклад рівнів шуму і вібрації. В склад $\SigmaКЗ$ звичайно входять величини і параметри головних розмірів і електромагнітні навантаження [8]. У зв'язку з великим числом доданків (3.3), задача оптимізації АД є досить складною, а КЗ у вигляді A , B_{δ} і $I_{1(2)}$ залежать від потужності, частоти обертання, призначення, способу охолодження АД і проектних обмежень і змінюються у відносно широких межах. Тому порівняльний аналіз варіантів АД з

«класичним» і нетрадиційним виконанням елементів активної частини (рис. 3.1) може бути виконаний на основі співставлення ЦФ структурної оптимізації ЕМС. Подібні ЦФ повинні відповідати основним показникам технічного рівня [112] і задовольняти умові універсальності, тобто прийнятності та ідентичності їх загального вигляду і КЗ для порівнюваних варіантів ЕМС. Крім того, для виключення залежності від потужності і способу охолодження, основні показники та КЗ повинні бути представлені у відносних одиницях.

Викладеним умов електромагнітної еквівалентності та універсальності відповідає метод оптимізації, згідно з яким будь-яка структура ЕМС може бути представлена сукупністю повних цільових функцій $F_{\text{ц}i}$ (2.5)

$$F_{\text{ц}i} = (\sqrt[4]{P_{\text{ВД}}})^3 K_i \Pi_{ia}^*, \quad (3.5)$$

де $P_{\text{ВД}}$ – показник вихідних даних (технічного завдання) проектування; K_i і Π_{ia}^* – коефіцієнт питомих характеристик електротехнічних матеріалів і відносний коефіцієнт-показник маси ($i = 1$), вартості ($i = 2$) і втрат активної потужності ($i = 3$) ЕМС, що є функцією відносних геометричних КЗ.

Порівняльний аналіз різних варіантів ЕМС виконується на основі визначення і зіставлення Π_{ia}^* при ідентичних $P_{\text{ВД}}$, що містять, відповідно з поняттям C_A , складову P' пов'язану з $P_{\text{н}}$ виразом

$$P' = K_E P_{\text{н}} / (\eta \cos \varphi), \quad (3.6)$$

де K_E – співвідношення ЕРС фази статора і U_1 ; η і $\cos \varphi$ – значення коефіцієнта корисної дії і енергетичного коефіцієнта АД.

Для визначення ЦФ (3.5) використовуються відомі вирази числа ефективних провідників паза статора $U_{\text{п}}$, чисел витків фази і зубців статора w_1 і z_1 , а також магнітного потоку робочого зазору Φ_{δ} [8, 121]:

$$U_{\text{п}} = w_1 a_1 / (p q_1); \quad (3.7)$$

$$w_1 = K_E U_1 / (4,44 K_p K_y f_1 \Phi_{\delta}); \quad (3.8)$$

$$z_1 = 2pm_1q_1; \quad (3.9)$$

$$\Phi_\delta = \lambda_\delta D^2 B_\delta / p; \quad (3.10)$$

де λ_δ – перша геометрична відносна КЗ оптимізації електричної машини, яка зв’язує l_δ і D .

Вказана КЗ в задачі, що розглядається відповідно визначається довжиною $l_{\delta K(3)}$ і діаметром $D_{K(3)}$ активної поверхні статора КАД (ОАД)

$$\lambda_{\delta K(3)} = l_{\delta K(3)} / D_{K(3)}; \quad (3.11)$$

Рівняння функцій $F_{ц1(2)}$ маси (вартості) електромагнітно-еквівалентних ЕМС різних АД складаються на основі визначення сумарної площі пазів в поперечному шарі магнітопроводу статора

$$S_{1\Sigma} = z_1 U_\pi S_{\text{еф}} / K_{\text{зп}}, \quad (3.12)$$

де $S_{\text{еф}}$ – площа перерізу ефективного провідника обмотки статора,

$$S_{\text{еф}} = P_n / (a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \varphi). \quad (3.13)$$

Підстановка (3.7) – (3.11) і (3.13) перетворює (3.12) до виду, який відповідає КАД (ОАД)

$$S_{1\Sigma K(3)} = P_{\text{ВД}} / (K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K(3)} D_{K(3)}^2), \quad (3.14)$$

де $P_{\text{ВД}}$ – показник електромагнітно-еквівалентних АД, який визначаються виразом і геометричної розмірністю:

$$P_{\text{ВД}} = K_E p P_n / (2,22 K_p K_y f_1 J_1 B_\delta \eta \cos \varphi); \quad (3.15)$$

$$[P_{\text{ВД}}] = [K_{\text{зп}} \lambda_{\delta K(3)} D_{K(3)}^2 S_{1\Sigma K(3)}] = [\text{м}^4]. \quad (3.16)$$

На основі (3.16) і ідентичності $P_{\text{ВД}}$ для порівнюваних КАД і ОАД вводиться друга геометрична відносна КЗ оптимізації ЕМС АД

$$a_{\text{МК}(3)} = D_{K(3)}^4 / P_{\text{ВД}}. \quad (3.17)$$

В ЕМС АД малої і середньої потужності, а також в розглядуваних КАД і ОАД використовуються пази форми, яка утворена зубцями статора (ротора) з паралельними стінками і висотою $h_{z1(2)K}$ і $h_{z1(2)3}$ (рис. 3.3). Найбільш

поширені трапецієподібні і грушоподібні пази подібної форми [8, 121] замінюються, при збереженні ширини і висоти зубців, еквівалентними по площі і близькими по конфігурації розрахунковими пазами трапецеїдальної форми з розрахунковою висотою шліца $h_{p1(2)K}$ і $h_{p1(2)3}$ статора (ротора) (рис. 3.3) відповідно КАД і ОАД.

$$S_{1\Sigma K(3)} = (b_{11\Sigma K(3)} + b_{12\Sigma K(3)})(h_{z1K(3)} - h_{p1K(3)})/2, \quad (3.18)$$

де $b_{11\Sigma K(3)}$ і $b_{12\Sigma K(3)}$ – суми розмірів $b_{11K(3)}$ і $b_{12K(3)}$ основ трапецій розрахункових пазів в поперечному шарі магнітопроводу статора КАД (ОАД) (рис. 3.3):

$$b_{11\Sigma K} = z_1 b_{11K} = \pi(D_K + 2h_{z1K}) - \pi D_K / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (3.19)$$

$$b_{12\Sigma K} = z_1 b_{12K} = \pi(D_K + 2h_{p1K}) - \pi D_K / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (3.20)$$

$$b_{11\Sigma 3} = z_1 b_{113} = \pi(D_3 + 2h_{z13}) - \pi D_3 / (K_{3c} K_{Bz}); \quad (3.21)$$

$$b_{12\Sigma 3} = z_1 b_{123} = \pi(D_3 + 2h_{p13}) - \pi D_3 / (K_{3c} K_{Bz}). \quad (3.22)$$

На основі рівності лівих частин (3.14) і (3.18) і після підстановки (3.19), (3.20) і (3.21), (3.22) визначаються, аналогічно [19], квадратні рівняння розрахунку висоти зубця статора КАД (ОАД):

$$h_{z1K}^2 - \alpha_1 D_K h_{z1K} - \alpha_2 \Pi_{ВД} / (K_{3п} \lambda_{\delta K} D_K^2) = 0; \quad (3.23)$$

$$h_{z13}^2 + \alpha_1 D_3 h_{z13} + \alpha_2 \Pi_{ВД} / (K_{3п} \lambda_{\delta K} D_3^2) = 0, \quad (3.24)$$

де α_1 і α_2 – співмножники:

$$\alpha_1 = (1 / (K_{3c} K_{Bz}) - 1) / (1 + K_{рш}); \quad (3.25)$$

$$\alpha_2 = 1 / \pi (1 - K_{рш}^2); \quad (3.26)$$

Вхідний в (3.25), (3.26) коефіцієнт $K_{рш}$ виходячи з реальних конфігурацій зубцово-пазових структур АД [8, 121] визначається співвідношенням

$$K_{рш} = h_{p1(2)K} / h_{z1(2)K} = h_{p1(2)3} / h_{z1(2)3} = 0,04 \dots 0,12. \quad (3.27)$$

Рішення рівнянь (3.23) і (3.24) відносно $h_{z1K(3)}$ мають вид:

$$h_{z1K} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД} a_{МК}} f_{K1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}); \quad (3.28)$$

$$h_{z13} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД} a_{МЗ}} f_{31}(K_{зп}, \lambda_{\delta 3}, a_{МЗ}), \quad (3.29)$$

де $f_{K1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K}, a_{МК})$ і $f_{31}(K_{зп}, \lambda_{\delta 3}, a_{МЗ})$ – функціональні співмножники спрощення запису:

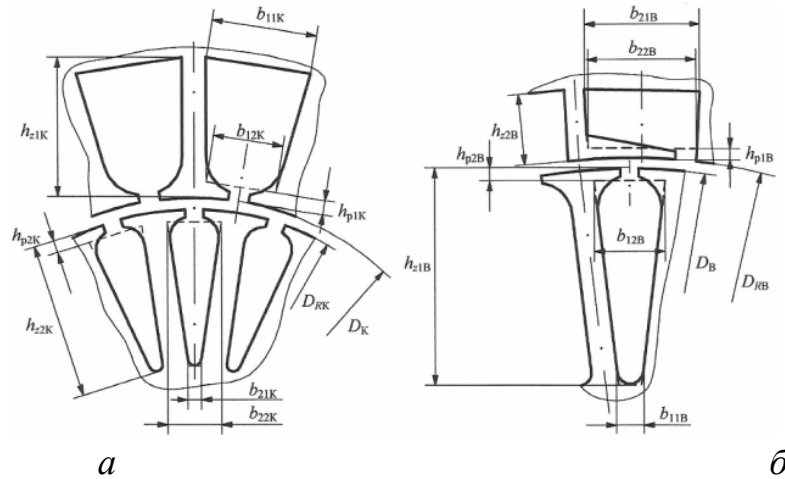


Рисунок 3.3 – Конфігурації і геометричні параметри зубцово-пазових структур асинхронних двигунів класичного виконання (а) і з зовнішнім ротором (б)

$$f_{K1}(K_{зп}, \lambda_{\delta K}, a_{МК}) = 0,5\alpha_1 + \sqrt{0,25\alpha_1^2 + \alpha_2/(K_{зп}\lambda_{\delta K}a_{МК})}; \quad (3.30)$$

$$f_{31}(K_{зп}, \lambda_{\delta 3}, a_{МЗ}) = -0,5\alpha_1 - \sqrt{0,25\alpha_1^2 - \alpha_2/K_{зп}\lambda_{\delta 3}a_{МЗ}}. \quad (3.31)$$

Сумарна площа пазів в поперечному перерізі магнітопроводу короткозамкненого ротора КАД (ОАД) визначається з використанням (3.8), (3.10), (3.16) і на основі [8, 121]

$$\begin{aligned} S_{2\Sigma K(3)} &= z_2 I_2 / J_2 = I_{1H} (0,2 + 0,8 \cos \varphi) 2m_1 w_1 K_p K_y / K_{ск} = \\ &= \gamma_1 \Pi_{ВД} / (\lambda_{\delta K(3)} D_{K(3)}^2), \end{aligned} \quad (3.32)$$

де γ_1 – розрахункове співвідношення, яке приймає для реальних K_p , K_y , $\cos \varphi$, $K_{ск}$, $J_{1(2)}$ значення

$$\gamma_1 = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos \varphi) J_1 / (K_{ск} J_2) = 1,338 \dots 2,785. \quad (3.33)$$

Відповідна (3.33) сумарна площа пазів в поперечному перерізі магнітопроводу ротора КАД (ОАД) (рис. 3.3)

$$S_{2\Sigma K(3)} = (b_{21\Sigma K(3)} + b_{22\Sigma K(3)})(h_{z2K(3)} - h_{pK(3)})/2, \quad (3.34)$$

де $b_{21\Sigma K(3)}$ і $b_{22\Sigma K(3)}$ – суми розмірів $b_{21K(3)}$ і $b_{22K(3)}$ основ трапецій розрахункових пазів в поперечному перерізі магнітопроводу ротора діаметра $D_{RK(3)}$ (рис. 3.3):

$$b_{21\Sigma K} = z_2 b_{21K} = \pi(D_{RK} - 2h_{z2K}) - \pi D_{RK}/(K_{3c}K_{Bz}); \quad (3.35)$$

$$b_{22\Sigma K} = z_2 b_{22K} = \pi(D_{RK} - 2h_{p2K}) - \pi D_{RK}/(K_{3c}K_{Bz}); \quad (3.36)$$

$$b_{21\Sigma 3} = z_2 b_{213} = \pi(D_{R3} - 2h_{z23}) - \pi D_{R3}/(K_{3c}K_{Bz}); \quad (3.37)$$

$$b_{22\Sigma 3} = z_2 b_{223} = \pi(D_{R3} - 2h_{p23}) - \pi D_{R3}/(K_{3c}K_{Bz}); \quad (3.38)$$

На основі рівності лівих частин (3.32) і (3.34) і підстановки (3.35) – (3.38) визначаються квадратні рівняння розрахунку висоти зубця ротора КАД (ОАД):

$$h_{z2K}^2 + K_D \alpha_1 D_K h_{z2K} + \alpha_2 \gamma_1 \Pi_{ВД}/(\lambda_{\delta K} D_K^2) = 0; \quad (3.39)$$

$$h_{z23}^2 - \alpha_1 D_3 h_{z23}/K_D - \alpha_2 \gamma_1 \Pi_{ВД}/\lambda_{\delta 3} D_3^2 = 0, \quad (3.40)$$

де K_D – коефіцієнт реальних співвідношень [8, 121] діаметрів активних поверхонь статора і ротора

$$K_D = D_{RK}/D_K \approx D_3/D_{R3} = 0,985 \dots 0,995. \quad (3.41)$$

Рішення рівнянь (3.39), (3.40) відносно $h_{z2K(3)}$:

$$h_{z2K} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД} a_{МК} f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК})}; \quad (3.42)$$

$$h_{z23} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД} a_{МЗ} f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{МЗ})}, \quad (3.43)$$

де $f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК})$ і $f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{МЗ})$ – функціональні співмножники спрощення запису:

$$f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК}) = -0,5 K_D \alpha_1 - \sqrt{0,25 K_D^2 \alpha_1^2 - \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\delta K} a_{МК})}; \quad (3.44)$$

$$f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{МЗ}) = 0,5 \alpha_1 / K_D + \sqrt{0,25 \alpha_1^2 / K_D^2 + \alpha_2 \gamma_1 / (\lambda_{\delta 3} a_{МЗ})}. \quad (3.45)$$

Висота ярма статора (ротора) КАД (ОАД) визначається на основі (3.3), (3.10), (3.11) і (3.17)

$$h_{a1(2)K(3)} = \Phi_{\delta} / (2 K_{3c} B_{a1(2)} l_{\delta K(3)}) = \alpha_3 \sqrt[4]{\Pi_{ВД} a_{МК(3)}} / p, \quad (3.46)$$

де α_3 – коефіцієнт,

$$\alpha_3 = 1/(2K_{3c}K_{Ba}). \quad (3.47)$$

Середня довжина витка обмотки статора КАД (ОАД) визначається у відповідності з [8, 121], а також на основі (3.11) і (3.28), (3.29):

$$l_{w1K} = 2l_{\delta K} + \beta\pi(1,16 + 0,14p)(D_K + h_{z1K})/p = \sqrt[4]{\Pi_{ВД}a_{МК}} \times \\ \times \{2\lambda_{\delta K} + \beta\pi(1,16 + 0,14p)[1 + f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК})]/p\}; \quad (3.48)$$

$$l_{w13} = 2l_{\delta 3} + \beta\pi(1,16 + 0,14p)(D_3 + h_{z13})/p = \sqrt[4]{\Pi_{ВД}a_{МЗ}} \times \\ \times \{2\lambda_{\delta 3} + \beta\pi(1,16 + 0,14p)[1 - f_{31}(K_{3п}, \lambda_{\delta 3}, a_{МЗ})]/p\}; \quad (3.49)$$

де β – відносний крок обмотки статора.

Маса міді обмотки статора КАД (ОАД) визначається з використанням (3.11), (3.14) і (3.48), (3.49)

$$m_{w1K(3)} = \rho_m l_{w1K(3)} S_{1K(3)}/2 = \rho_m (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{w1K(3)}^*, \quad (3.50)$$

де ρ_m – щільність міді обмотки статора; $\Pi_{w1K(3)}^*$ - показник маси активного матеріалу обмотки статора:

$$\Pi_{w1K}^* = (\lambda_{\delta K} + [\beta\pi(1,16 + 0,14p)[1 + f_{K1}(K_{3п}, \lambda_{\delta K}, a_{МК})]/2p])/ \\ /(\lambda_{\delta K} \sqrt[4]{a_{МК}}); \quad (3.51)$$

$$\Pi_{w13}^* = (\lambda_{\delta 3} + [\beta\pi(1,16 + 0,14p)[1 - f_{31}(K_{3п}, \lambda_{\delta 3}, a_{МЗ})]/2p])/ \\ /(\lambda_{\delta 3} \sqrt[4]{a_{МЗ}}). \quad (3.52)$$

Діаметр $D_{3K(3)}$ і величина поперечного перерізу $S_{3K(3)}$ короткозамикаючого кільця ротора КАД (ОАД) визначається у відповідності з [8, 121] і на основі (3.32), (3.41) і (3.42), (3.43):

$$D_{3K} = D_{RK} - 1,2h_{z2K} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД}a_{МК}}(K_D - 1,2f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{МК})); \quad (3.53)$$

$$D_{33} = D_{R3} + 1,2h_{z23} = \sqrt[4]{\Pi_{ВД}a_{МЗ}}(1,2f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{МЗ}) + 1/K_D); \quad (3.54)$$

$$S_{3K(3)} = I_{3K(3)}/J_{3K(3)} = \gamma_1 (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^2 / (\gamma_2 \pi 2p \lambda_{\delta K(3)} (\sqrt[4]{a_{МК(3)}})^2), \quad (3.55)$$

де $I_{3K(3)}$ і $J_{3K(3)}$ струм і щільність струму короткозамкненого кільця; γ_2 – коефіцієнт, який враховує щільність струму в короткозамкненому кільці,

$$\gamma_2 = 0,8 \dots 0,85. \quad (3.56)$$

Маса роторної обмотки КАД (ОАД) визначається на основі (3.11), (3.32) і (3.53) – (3.55) рівнянням

$$m_{w2K(3)} = \rho_a(l_{\delta K(3)}S_{2\Sigma K(3)} + 2\pi D_{3K(3)}S_{3K(3)}) = \rho_a(\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{w2K(3)}^*, \quad (3.57)$$

де ρ_a і $\Pi_{w2K(3)}^*$ - щільність і показник маси матеріалу короткозамкненої обмотки:

$$\Pi_{w2K}^* = \left((\gamma_1 + \gamma_1/(\gamma_2 p \lambda_{\delta K})) [K_D - 1,2f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK})] \right) / \sqrt[4]{a_{MK}}; \quad (3.58)$$

$$\Pi_{w23}^* = \left((\gamma_1 + \gamma_1/[\gamma_2 p \lambda_{\delta 3}]) [1,2f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + 1/K_D] \right) / \sqrt[4]{a_{M3}}; \quad (3.59)$$

Площі поперечних перерізів магнітопроводів статора $S_{M1K(3)}$ і ротора $S_{M2K(3)}$ КАД (ОАД) при підстановці (3.17), (3.28), (3.29), (3.40), (3.42) і (3.43) – (3.47) представляються рівняннями:

$$\begin{aligned} S_{M1K} = 0,25\pi(D_K + 2h_{z1K} + 2h_{a1K})^2 - 0,25\pi D_K^2 - S_{1\Sigma K} = \\ (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^2 \{ \pi [f_{K1}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] [1 + \\ + f_{K1}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] - 1/(K_{3П} \lambda_{\delta K} a_{MK}) \} \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} S_{M13} = 0,25\pi(D_3 - 2h_{z13} - 2h_{a13})^2 - 0,25\pi D_3^2 - S_{1\Sigma 3} = \\ (\sqrt[4]{a_{M3}})^2 (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^2 \{ \pi [f_{31}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] [-1 + \\ + f_{31}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] - 1/(K_{3П} \lambda_{\delta 3} a_{M3}) \} \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} S_{M2K} \\ = 0,25\pi(D_{RK} - 2h_{z2K} - 2h_{a2K})^2 - 0,25\pi D_{RK}^2 - S_{2\Sigma K} = (\sqrt[4]{a_{MK}})^2 (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^2 \{ \pi \\ [f_{K2}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] [-K_D + \\ + f_{K2}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] - \gamma_1/(\lambda_{\delta K} a_{MK}) \} \\ ; \end{aligned} \quad (3.62)$$

S_{M23}

$$= 0,25\pi(D_{R3} - 2h_{z23} - 2h_{a23})^2 - 0,25\pi D_{R3}^2 - S_{2\Sigma 3} = (\sqrt[4]{a_{M3}})^2 (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^2 \{ \pi [f_{32}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p][1/K_D + f_{32}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] - \gamma_1/(\lambda_{\delta K} a_{MK}) \} \quad (3.63)$$

Маса магнітопроводу КАД (ОАД) визначається виходячи з (3.11) і (3.60) – (3.63)

$$m_{ММК(3)} = \rho_c K_{3c} l_{\delta K(3)} (S_{M1K(3)} + S_{M2K(3)}) = \rho_c (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{ММК(3)}^*, \quad (3.64)$$

де ρ_c і $\Pi_{ММК(3)}^*$ - щільність ЕТС і показник маси магнітопроводу КАД (ОАД):

$$\begin{aligned} \Pi_{ММК}^* &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{MK}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta K} [f_{K1}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] [1 + f_{K1}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] + \pi \lambda_{\delta K} [f_{K2}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] [1/K_D + f_{K2}(K_{3П}, \lambda_{\delta K}, a_{MK}) + \alpha_3/p] - 1/(K_{3П} a_{MK}) - \gamma_1/a_{MK} \} \end{aligned} \quad (3.65)$$

 $\Pi_{ММЗ}^*$

$$\begin{aligned} &= K_{3c} (\sqrt[4]{a_{M3}})^3 \{ \pi \lambda_{\delta 3} [f_{31}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] [-1 + f_{31}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] + \pi \lambda_{\delta 3} [f_{32}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] [1/K_D + f_{32}(K_{3П}, \lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + \alpha_3/p] - 1/(K_{3П} a_{M3}) - \gamma_1/a_{M3} \} \end{aligned} \quad (3.66)$$

Маса $M_{AK(3)}$ і залежна від питомих цін міді C_M , алюмінію C_A і ЕТС C_c вартість $C_{AK(3)}$ активних матеріалів КАД (ОАД) визначаються на основі (3.50) – (3.52), (3.57) – (3.59) і (3.64) – (3.66) рівняннями виду (3.7):

$$M_{AK(3)} = m_{w1K(3)} + m_{w2K(3)} + m_{ММК(3)} = \rho_c (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{МК(3)}^*; \quad (3.67)$$

$$C_{AK(3)} = C_{w1K(3)} + C_{w2K(3)} + C_{ММК(3)} = C_c \rho_c (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{ВК(3)}^*; \quad (3.68)$$

де $\Pi_{МК(3)}^*$ і $\Pi_{ВК(3)}^*$ - показники маси і вартості, які дозволяють визначати наявність оптимальних геометричних співвідношень ЕМС КАД (ОАД), що характеризуються екстремальними значеннями $a_{MK(3)E}$ і $\lambda_{MK(3)E}$:

$$\Pi_{MK(3)}^* = \rho_m \Pi_{w1K(3)}^* / \rho_c + \rho_a \Pi_{w2K(3)}^* / \rho_c + \Pi_{MMK(3)}^*; \quad (3.69)$$

$$\Pi_{BK(3)}^* = C_m \rho_m \Pi_{w1K(3)}^* / (C_c \rho_c) + C_a \rho_a \Pi_{w2K(3)}^* / (C_c \rho_c) + \Pi_{MMK(3)}^*. \quad (3.70)$$

В цілому можна зробити висновок, що рівняння (3.69) і (3.70) представляють можливість порівняльного аналізу КАД і ОАД за відносними коефіцієнтами показників маси і вартості ЕМС. Використанням повних ЦФ (3.67) і (3.68) може бути виконана поетапна параметрична оптимізація масовартісних показників розглянутих варіантів АД при заданих проектних обмеження. Також рівняння виду (3.67) і (3.68) з компонентами (3.69), (3.70) можуть використовуватися як складові ЦФ оптимізації АД за узагальненим критерієм. Приклади результатів розрахунків функціональних залежностей (3.69), (3.70) отриманих при $\rho_m / \rho_c = 8,9/7,65$; $\rho_a / \rho_c = 2,7/7,65$; $C_m / C_c = 90,25/13,5$; $C_a / C_c = 47/13,5$, а також мінімальних, середніх і максимальних значеннях коефіцієнтів $\gamma_1(1,338; 1,903; 2,785)$, $\gamma_2(0,8; 0,825; 0,85)$, $K_{Bz}(2; 2,5; 3)$, $K_{Ba}(1,6; 1,8; 2$ при $p=1$ і $1; 1,225; 1,45$ при $p=3$), $K_{рш}(0,04; 0,08; 0,12)$, $K_D(0,985; 0,99; 0,995)$ для КАД і ОАД з $2p=2$ і $2p=6$, приведені в табл. 3.1 - 3.2. Графіки залежностей (3.69), (3.70), що відповідають середнім значенням розрахункових коефіцієнтів АД зазначеної полюсності, представлені на рис. 3.4 і 3.5.

Таблиця 3.1 – Показники маси і вартості активної частини варіантів асинхронних короткозамкнених двополюсних двигунів з внутрішнім і зовнішнім ротором

γ_1 , в.о.		a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta KE}$, в.о.	Π_{MK}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta ZE}$, в.о.	Π_{M3}^* , в.о.	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta KE}$, в.о.	Π_{BK}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta ZE}$, в.о.	Π_{B3}^* , в.о.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,338	min	18	0,45	14,3	130,5	0,15	16,54	4,9	1,65	28,52	14,5	1,35	30,26

	ср.	10	0,45	11,92	57	0,25	12,78	3,0	2,0	25,72	11,0	1,3	24,31
	max	9	0,55	10,67	49	0,25	10,94	2,5	2,3	24,51	9,5	1,3	21,67
1,903	min	29	0,4	16,15	130,5	0,15	17,23	8,0	1,45	30,55	14,5	1,35	31,4
	ср.	18,5	0,45	13,07	57	0,25	13,38	4,9	1,7	27,1	11,0	1,3	25,39
	max	13	0,55	11,65	49	0,25	11,52	4,2	1,7	25,73	9,5	1,3	22,71
2,785	min	67,5	0,25	18,43	130,5	0,15	18,28	13,5	1,25	33,8	14,5	1,35	33,12
	ср.	30,5	0,4	14,89	57	0,25	14,31	7,6	1,65	29,28	11,0	1,3	27,08
	max	23	0,45	13,07	49	0,25	12,41	6,1	1,75	27,05	9,5	1,3	24,31

На основі виконаних оптимізаційних розрахунків встановлена доцільність та підтверджено припущення [125] розробки ОАД виходячи з умов мінімізації діаметра активної поверхні статора з метою поліпшення масовартісних показників ЕМС. З урахуванням відомих, в тому числі з [18, 19], конструктивних особливостей ОАД, які полягають у менших щодо КАД числі елементів, маси, металоємності і вартості конструктивної частини, представляється ефективною заміна КАД на ОАД в приводах, що допускають передачу обертаючого моменту механізму безпосередньо з зовнішнього ротора. Також доцільна розробка, на основі ЦФ (3.3) і отриманих у цій роботі виразів і рівнянь, математичних моделей порівняльного аналізу втрат активної потужності електромагнітно-еквівалентних КАД і ОАД.

Таблиця 3.2 - Показники маси і вартості активної частини варіантів асинхронних короткозамкнених шести полюсних двигунів з внутрішнім і зовнішнім ротором

γ_1 , в.о.		a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta KE}$, в.о.	P_{MK}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta ZE}$, в.о.	P_{M3}^* , в.о.	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta KE}$, в.о.	P_{BK}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta ZE}$, в.о.	P_{B3}^* , в.о.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1,338	min	32,7	0,25	8,42	244	0,08	9,19	8,7	1,0	18,23	48,8	0,4	17,67
	ср.	17,2	0,4	6,91	129,5	0,11	6,97	7,2	1,15	16,49	28,5	0,5	14,61

	max	11,5	0,45	6,13	87	0,14	5,87	7,8	1,2	15,46	22,2	0,55	13,09
1,903	min	58	0,2	9,29	244	0,08	9,51	14,8	0,8	19,2	48,8	0,4	18,31
	ср.	31,3	0,27	7,51	129,5	0,11	7,26	10	1,0	17,13	28,5	0,5	15,22
	max	20,8	0,35	6,63	87	0,14	6,14	9,5	1,1	16,03	22,2	0,55	13,69
2,785	min	113,3	0,15	10,51	244	0,08	9,98	28,5	0,6	20,77	48,8	0,4	19,27
	ср.	61,8	0,2	8,39	129,5	0,11	7,69	15,3	0,85	18,19	31,7	0,55	16,15
	max	42,7	0,25	7,34	87	0,14	6,54	13,2	0,95	16,92	22,2	0,55	14,60

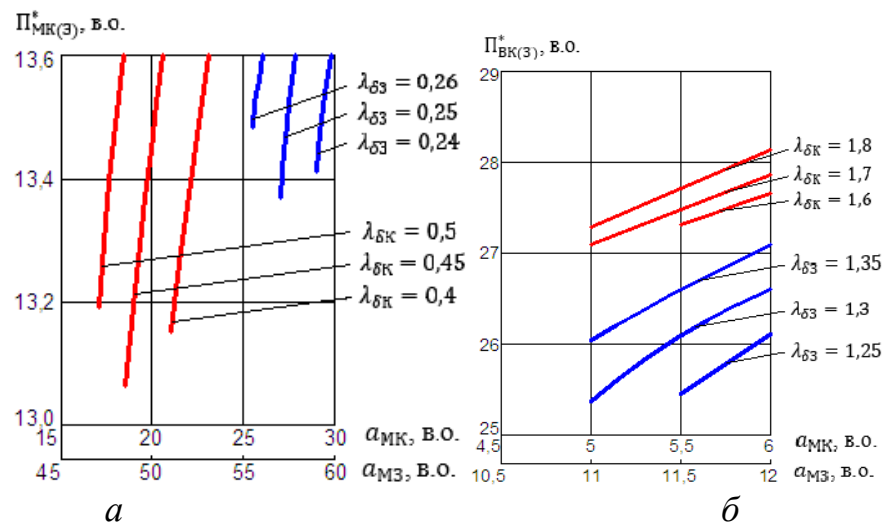


Рисунок 3.4 – Залежності показників маси (а) і вартості (б) дво полюсної електромагнітної системи асинхронного двигуна з внутрішнім (—) і зовнішнім (—) ротором

3.2. Показники втрат активної потужності двигунів з радіальними електромагнітними системами та внутрішнім і зовнішнім роторами

Обернене виконання АД зі схемою магнітопроводу (рис. 3.6, а) відрізняється від електромагнітно-еквівалентного КАД схеми (рис. 3.6, б) меншими середньою довжиною замикання силових ліній поля, обсягом і тепловиділенням в ЕТС ярма, а також обсягом і тепловиділеннями в міді лобових частин статора, що створює передумови підвищення ККД.

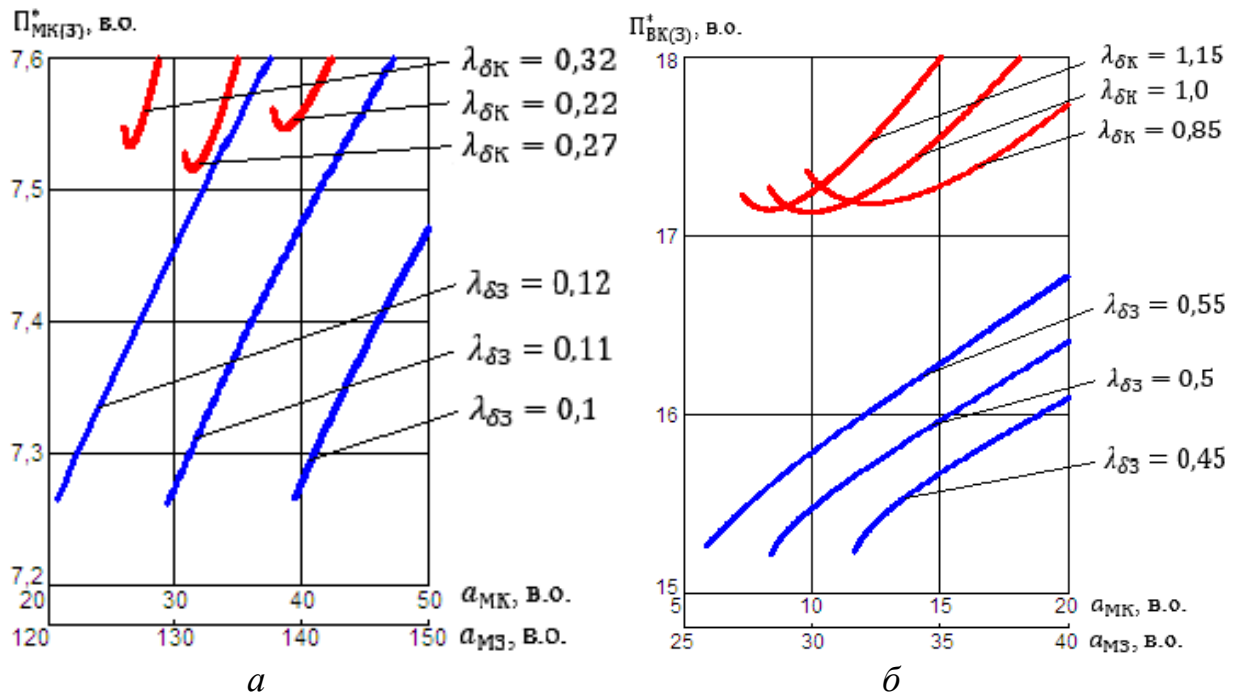


Рисунок 3.5 – Залежності показників маси (а) і вартості (б) шестиполусної електромагнітної системи асинхронного двигуна з внутрішнім (—) і зовнішнім (—) ротором

Рішення задачі порівняльного аналізу енергетичної ефективності ЕМС ви-конується методом [110-112] та згідно з принципом електромагнітної еквівалентності [11, 12] розглянутих варіантів АД. Використовуються ЦФ показників технічного рівня ЕМС, в тому числі ЦФ $F_{ВК(З)}$ втрат активної потужності з відносним коефіцієнтом-показником втрат в ЕМС $\Pi^*_{ВК(З)}$ КАД (ОАД), що є функцією двох відносних керованих змінних (КЗ) $\lambda_{\delta К(З)}$ і $a_{МК(З)}$:

$$F_{ВК(З)} = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 K_{П} K_{дМК(З)} \Pi^*_{ВК(З)}; \quad (3.71)$$

$$\Pi^*_{ВК(З)} = f(\lambda_{\delta К(З)}, a_{МК(З)}), \quad (3.72)$$

де $\Pi_{ВД}$ – показник вхідних даних і ЕМН, ідентичний згідно з названим принципом для порівнюваних КАД і ОАД; $K_{П}$ – складова питомих характеристик електротехнічних матеріалів; $K_{дМК(З)}$ – коефіцієнт підвищення втрат.

Використовувані КЗ є відносною активною довжиною $\lambda_{\delta K(3)}$ і відносним параметром $a_{MK(3)}$ ЕМС КАД (ОАД), які визначаються співвідношенням величин відповідно ідентичної геометричної розмірності:

$$\lambda_{\delta K(3)} = l_{\delta K(3)} / D_{K(3)}, [\text{м/м}]; \quad (3.73)$$

$$a_{MK(3)} = D_{K(3)}^4 / \Pi_{ВД}, [\text{м}^4/\text{м}^4], \quad (3.74)$$

де $l_{\delta K(3)}$ і $D_{K(3)}$ – активна довжина і діаметр активної поверхні статора КАД (ОАД).

В показник (3.5), в додаток до КЗ (3.73), (3.74), також входять співвідношення ЕМН, геометричних і розрахункових параметрів КАД (ОАД), які відповідають використуванню при проектуванні АД відомим розрахунковим діапазонах і величинам [8, 121]:

$$K_{Bz} = B_{z1(2)} / B_{\delta} = 2,0 \dots 3,0; \quad K_{Ba} = B_{a1(2)} / B_{\delta} = 1,0 \dots 2,0;$$

$$K_{рш} = h_{p1(2)K} / h_{z1(2)K} = h_{p1(2)3} / h_{z1(2)3} = 0,04 \dots 0,12;$$

$$K_D = D_{RK} / D_K = D_3 / D_{R3} = 0,985 \dots 0,995;$$

$$\gamma_1 = (K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos \varphi) J_1) / (K_{ск} J_2) = 1,338 \dots 2,785;$$

$$\gamma_2 = J_{3K} / J_2 = 0,8 \dots 0,85; \quad \beta = y_{п1} 2p / z_1 = 0,8 \dots 1,0,$$

де K_{Bz} і K_{Ba} – коефіцієнти відношень амплітуди індукції зазору B_{δ} до амплітуд індукцій зубця $B_{z1(2)}$ і ярма $B_{a1(2)}$ статора (ротора); $K_{рш}$ – коефіцієнт відношення висоти зубця статора (ротора) $h_{z1(2)K(3)}$ до висоти розрахункової шліцьової зони $h_{p1(2)K(3)}$ паза статора (ротора) КАД (ОАД); K_D – коефіцієнт відношення відповідно зовнішнього діаметру ротора D_{RK} до зовнішнього діаметра статора КАД D_K і відношення зовнішнього діаметра статора D_3 до внутрішнього діаметра ротора ОАД D_{R3} (рис. 3.6).

Коефіцієнт $K_{дМК(3)}$ наближено враховує підвищення основних втрат ЕМС до сумарних втрат КАД (ОАД)

$$K_{дМК(3)} = K_{дпК(3)} K_{МК(3)} K_{днК(3)}, \quad (3.75)$$

де $K_{\text{дпк}(3)}$ – коефіцієнт поверхнево-пульсаційних втрат холостого ходу; $K_{\text{мк}(3)}$ – коефіцієнт механічних втрат; $K_{\text{днк}(3)}$ – коефіцієнт додаткових навантажувальних втрат КАД (ОАД).

Враховане $K_{\text{дпк}(3)}$ підвищення втрат в ЕТС поверхневими і пульсаційними складовими визначається індукцією в зазорі, співвідношенням чисел пазів і геометричними співвідношеннями шліцьових зон зубців статора і ротора, які у електромагнітно-еквівалентних КАД і АДЗР відповідно рівні і близькі.

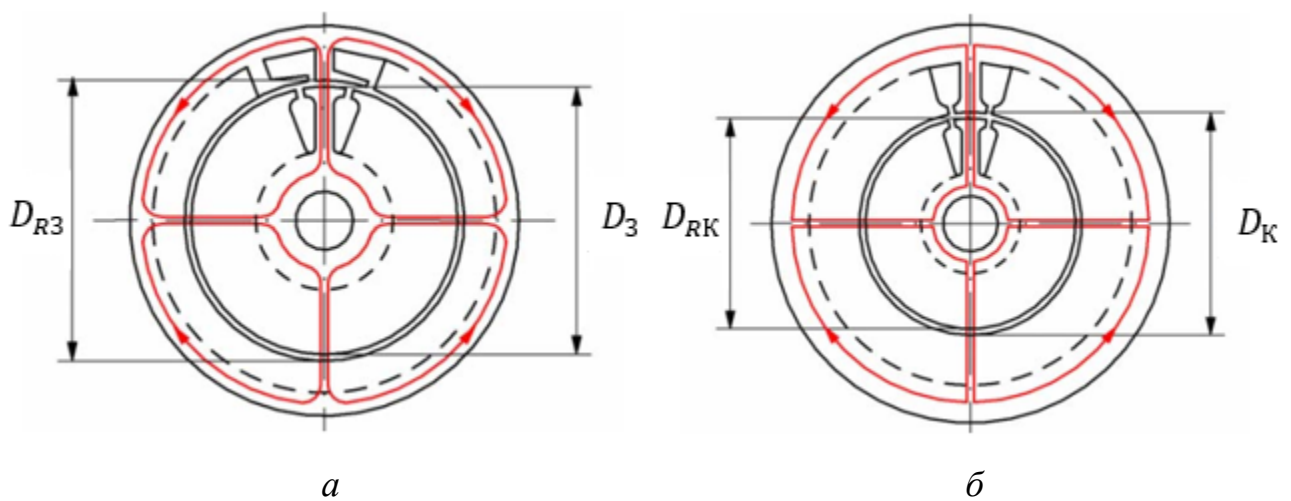


Рисунок 3.6 – Схеми поперечної структури магнітопроводів варіантів асинхронного двигуна з внутрішнім (а) і зовнішнім (б) роторами

Враховувані $K_{\text{мк}(3)}$ механічні і вентиляційні втрати визначаються залежностями виду [8, 121]

$$P_{\text{мехк}(3)} = K_{\text{тк}(3)} (f_1/p)^2 D_{\text{к}(3)}^3, \quad (3.76)$$

де $K_{\text{тк}(3)}$ – емпіричний коефіцієнт, значення якого невідоме для ОАД; f_1 – частота мережі.

Вхідні в (3.76) механічні втрати в підшипниках і тертя обертових поверхонь залежать від об'єму і маси ротору і тому в ОАД завищені відносно КАД. Однак, як правило, в ОАД відсутні елементи самовентиляції, які входять в конструктивну частину КАД закритого і захищеного виконання, а обертання зовнішніх поверхонь ротора ОАД приводить до їх охолодження.

Також функціональні елементи привідних механізмів з вбудованими ОАД, наприклад електровентилятор і ролики транспортера є своєрідними радіаторами охолодження. Тому вентиляційні втрати ОАД представляються суттєво меншими, ніж у еквівалентних КАД.

На підставі викладеного і незначної складової врахованих $K_{\text{днК(3)}}$ додаткових навантажувальних втрат, приймається припущення про рівність $K_{\text{дМК}} \approx K_{\text{дМЗ}} \approx K_{\text{дМ}}$. При такому припущенні повні активні втрати електромеханічної системи КАД (ОАД) наближено відображаються добутком $K_{\text{дМК(3)}} \Pi_{\text{БК(3)}}^*$.

Для визначення втрат в обмотках статора і ротора використовуються відомі вирази розрахунку і рекомендації вибору чисел витків фази і зубців статора w_1 і z_1 , активних опорів обмоток $r_{1\text{К(3)}}$ і $r_{2\text{К(3)}}$, типу і довжини лобових частин обмотки статора $l_{\text{л1К(3)}}$, а також коефіцієнта приведення струму кільця до струму стержня $K_{\text{пр}}$:

$$w_1 = U_{\text{п}} p q_1 / a_1; \quad (3.77)$$

$$z_1 = 2 p m_1 q_1; \quad (3.78)$$

$$r_{1\text{К(3)}} = 2 w_1 (l_{\delta\text{К(3)}} + l_{\text{л1К(3)}}) / (\sigma_{\text{м20}} a_1 S_{\text{еф}}); \quad (3.79)$$

$$r_{2\text{К(3)}} = l_{\delta\text{К(3)}} / (\sigma_{\text{а20}} S_{\text{ст}}) + (2\pi(D_{2\text{К(3)}} \mp 1,2 h_{z2\text{К(3)}})) / (\sigma_{\text{а20}} m_2 S_{\text{кл}} K_{\text{пр}}^2); \quad (3.80)$$

$$l_{\text{л1К(3)}} = \beta \pi (1,16 + 0,14 p) (D_{1\text{К(3)}} \pm h_{z1\text{К(3)}}) / 2 p; \quad (3.81)$$

$$K_{\text{пр}} = 2 \sin(\pi p / m_2), \quad (3.82)$$

де $U_{\text{п}}$ – число ефективних провідників паза статора; a_1 – число паралельних гілок; q_1 – число пазів на полюс і фазу; $m_1(2)$ – число фаз статора (ротора); $\sigma_{\text{м20}}$ і $\sigma_{\text{а20}}$ – питомі електричні провідності міді і алюмінію при 20°C; $S_{\text{еф}}$, $S_{\text{ст}}$ і $S_{\text{кл}}$ – відповідно площі перерізів ефективного провідника обмотки статора, стержня і клітки обмотки ротора.

При складанні ММ аналізу втрат активної потужності КАД (ОАД) також враховувалися співвідношення геометричних параметрів зубцово-пазових структур:

$$S_{1\Sigma K(3)} = P_{ВД}/(K_{зп}\lambda_{\delta K(3)}D_{K(3)}^2) = 1/(\sqrt{a_{МК(3)}}P_{ВД}K_{зп}\lambda_{\delta K(3)}); \quad (3.83)$$

$$S_{2\Sigma K(3)} = \gamma_1 P_{ВД}/(\lambda_{\delta K(3)}D_{K(3)}^2) = \gamma_1/(\sqrt{a_{МК(3)}}P_{ВД}\lambda_{\delta K(3)}); \quad (3.84)$$

$$h_{z1K(3)} = \sqrt[4]{P_{ВД}a_{МК(3)}}f_{K(3)1}(K_{зп},\lambda_{\delta K(3)},a_{МК(3)}); \quad (3.85)$$

$$h_{z2K(3)} = \sqrt[4]{P_{ВД}a_{МК(3)}}f_{K(3)2}(\lambda_{\delta K(3)},a_{МК(3)}); \quad (3.86)$$

де $K_{зп}$ – повний коефіцієнт заповнення паза статора; $S_{1\Sigma K(3)}$ і $S_{2\Sigma K(3)}$ – сумарні площі пазів в кожному із поперечних перерізів сердечників статора і ротора; $f_{K(3)1}(K_{зп},\lambda_{\delta K(3)},a_{МК(3)})$ і $f_{K(3)2}(\lambda_{\delta K(3)},a_{МК(3)})$ – функціональні співмножники спрощення запису рівняння втрат КАД (ОАД), що містять, в тому числі коефіцієнт заповнення магнітопроводу ЕТС $K_{зс}$:

$$f_{K(3)1}(K_{зп},\lambda_{\delta K(3)},a_{МК(3)}) = \pm 0,5\left([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})\right) \pm \sqrt{0,25\left([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})\right)^2 \pm \left[(1/\pi(1 - K_{рш}^2))/ (K_{зп}\lambda_{\delta K(3)}a_{МК(3)})\right]}; \quad (3.87)$$

$$f_{K2}(\lambda_{\delta K},a_{МК}) = -0,5K_D\left([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})\right) - \sqrt{0,25K_D^2\left([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})\right)^2 - \left[(1/\pi(1 - K_{рш}^2))\gamma_1\right]/(\lambda_{\delta K}a_{МК})}; \quad (3.88)$$

$$f_{32}(\lambda_{\delta 3},a_{М3}) = \{0,5([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш}))\}/K_D + \sqrt{\left(0,25\left([1/(K_{зс}K_{Bz}) - 1]/(1 + K_{рш})\right)^2/K_D^2\right) + \left(\gamma_1/\left[\pi(1 - K_{рш}^2)\right]\right)/(\lambda_{\delta 3}a_{М3})}. \quad (3.89)$$

Втрати в обмотці статора визначаються з використанням (3.73), (3.74), (3.77) – (3.85)

$$P_{ел1} = m_1 I_{1K(3)}^2 r_{1K(3)} = (\sqrt[4]{P_{ВД}})(J_1^2/\sigma_{м20})\Pi_{w1K(3)}^*, \quad (3.90)$$

де $\Pi_{w1K(3)}^*$ - відносний показник основних втрат обмотки статора КАД (ОАД),

$$\Pi_{w1K(3)}^* = [\lambda_{\delta K} + (\beta\pi(1,16 + 0,14p)(1 \pm f_{K(3)1}(K_{зп},\lambda_{\delta K},a_{МК(3)})/2p)]/$$

$$/[\lambda_{\delta K(3)} \sqrt[4]{a_{MK(3)}}] \quad (3.91)$$

Основні втрати в обмотці ротора КАД (ОАД) визначаються на основі (3.80), (3.84), (3.86)

$$P_{ел2} = m_2 I_2^2 r_{2K(3)} = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{w2K(3)}^*, \quad (3.92)$$

де $\Pi_{w2K(3)}^*$ - відносний показник основних втрат обмотки ротора:

$$\Pi_{w2K}^* = [(\gamma_1 + \gamma_1 \gamma_2 / (p \lambda_{\delta K})) (K_D - 1, 2 f_{K2}(\lambda_{\delta K}, a_{MK}))] / \sqrt[4]{a_{MK}}; \quad (3.93)$$

$$\Pi_{w23}^* = (\gamma_1 + \gamma_1 \gamma_2 / (p \lambda_{\delta 3})) (1, 2 f_{32}(\lambda_{\delta 3}, a_{M3}) + 1 / K_D) / \sqrt[4]{a_{M3}}. \quad (3.94)$$

Втрати в ЕТС магнітопроводу КАД (ОАД) визначаються з (3.83), (3.85) і з урахуванням відомих коефіцієнтів збільшення втрат зубців K_{dz} і ярма K_{da} [12], значень щільності ЕТС ρ_c , питомих втрат ЕТС P_c при частоті мережі 50 Гц і індукції 1 Тл, а також виразів мас зубців і ярма статора $m_{z1K(3)}$ і $m_{a1K(3)}$

$$\begin{aligned} P_{МВК(3)} &= P_c (K_{dz} B_{z1}^2 m_{z1K(3)} + K_{da} B_{a1}^2 m_{a1K(3)}) = \\ &= (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 P_c B_{\delta}^2 \rho_c (K_{dz} K_{Bz}^2 \Pi_{z1K(3)}^* + K_{da} K_{Ba}^2 \Pi_{a1K(3)}^*), \end{aligned} \quad (3.95)$$

де $\Pi_{z1K(3)}^*$ і $\Pi_{a1K(3)}^*$ - відносні показники мас зубців і ярма статора КАД (ОАД):

$$\begin{aligned} \Pi_{z1K(3)}^* &= K_{zc} (\sqrt[4]{a_{MK(3)}})^3 (\pi \lambda_{\delta K(3)} [f_{K(3)1}(K_{zp}, \lambda_{\delta K(3)}, a_{MK(3)})] \times \\ &\times [1 \pm f_{K(3)1}(K_{zp}, \lambda_{\delta K(3)}, a_{MK(3)})] - 1 / (K_{zp} a_{MK(3)})); \end{aligned} \quad (3.96)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{a1K(3)}^* &= K_{zc} (\sqrt[4]{a_{MK(3)}})^3 (\pi \lambda_{\delta K(3)} [1 / (2 p K_{zc} K_{Ba})] \\ &[1 \pm \pm 2 f_{K(3)1}(K_{zp}, \lambda_{\delta K(3)}, a_{MK(3)}) \pm 1 / (2 p K_{zc} K_{Ba})] \cdot \\ &) \end{aligned} \quad (3.97)$$

Втрати в ЕМС КАД (ОАД) визначаються на основі (3.90) – (3.97) рівнянням виду (3.71)

$$P_{BK(3)} = P_{ел1K(3)} + P_{ел2K(3)} + P_{МВК(3)} = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 K_{dMK(3)} (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{BK(3)}^*, \quad (3.98)$$

де $\Pi_{BK(3)}^*$ - відповідний (3.72) показник втрат, що дозволяє визначати оптимальні геометричні співвідношення ЕМС КАД (ОАД) за критерієм, що відповідає максимуму ККД з використанням екстремальних значень геометричних відносних КЗ $a_{MK(3)E}$ і $\lambda_{MK(3)E}$,

$$\begin{aligned} \Pi_{BK(3)}^* = [P_c B_{\delta}^2 \rho_c \sigma_{a20} / J_2^2] (K_{dz} K_{Bz}^2 \Pi_{z1K(3)}^* + K_{da} K_{Ba}^2 \Pi_{a1K(3)}^*) + \\ + (J_1^2 \sigma_{a20} / (J_2^2 \sigma_{m20})) \Pi_{w1K(3)}^* + \Pi_{w2K(3)}^*. \end{aligned} \quad (3.99)$$

Приклади результатів розрахунків екстремумів $\Pi_{BK(3)E}^*$ за рівнянням (3.99) для двох і чотирьохполюсних КАД (ОАД), отриманих при $K_{зп} = 0,3$; $K_{зс} = 0,97$, а також трьох (мінімальному 1,338, середньому 1,903 і максимальному 2,785) значеннях γ_1 , виконаних для марок ЕТС 2013 і 2412, представлені в табл. 3.3, 3.4. Екстремальні значення $\Pi_{BK(3)E}^*$ при кожному указаному γ_1 , які визначені з використанням групи відповідно мінімальних Σ_{min} , середніх $\Sigma_{ср}$ і максимальних Σ_{max} значеннях J_1 (5; 5,5; 6) А/мм²; J_2 (2; 2,5; 3) А/мм² і коефіцієнтів γ_2 (0,8; 0,825; 0,85), K_{Bz} (2; 2,5; 3), K_{Ba} (1,6; 1,8; 2), $K_{рш}$ (0,04; 0,08; 0,12) і K_D (0,985; 0,99; 0,995), приведені в табл. 3.3, 3.4. Графіки залежностей (3.99), що відповідають середнім значенням розрахункових коефіцієнтів і матеріалу магнітопроводу ЕТС 2013 КАД (ОАД) вказаної полюсності, представлені на рис. 3.7.

З табл. 3.3 випливає, що зі збільшенням коефіцієнта γ_1 зростає показник $\Pi_{BK(3)E}^*$, що зв'язано з відносним зростанням J_1 в порівнянні з J_2 . Також з аналізу складових рівняння (3.99) випливає, що максимальні втрати виділяються в обмотці статора і складають 35...45% від $\Pi_{BK(3)E}^*$, що в 1,4...2,6 рази більше втрат в обмотці ротора. Це пояснюється співвідношеннями значень матеріаломісткостей, провідностей і щільностей струмів обмоток статора і ротора.

$\Pi_{ПЗ}^*$, в.о. $\Pi_{ПК}^*$, в.о.

$\Pi_{ПЗ}^*$, в.о. $\Pi_{ПК}^*$, в.о.

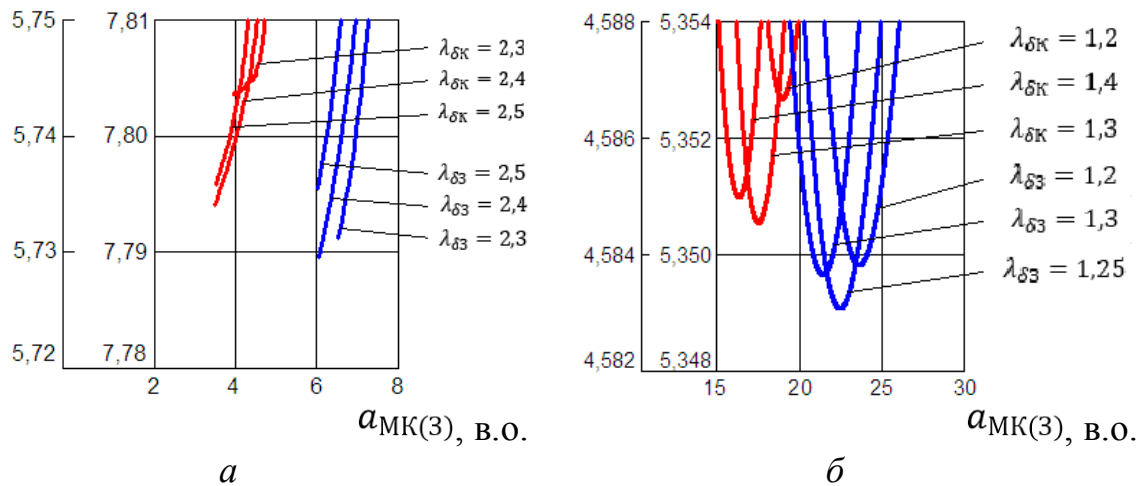


Рисунок 3.7 – Залежності показників втрат двополюсного (а) і чотириполюсного (б) еквівалентних електромагнітних систем асинхронних двигунів з внутрішнім (—) і зовнішнім (—) роторами

Залежності основних втрат ЕМС КАД і ОАД при $2p \geq 4$ від КЗ $a_{MK(3)}$ і $\lambda_{\delta K(3)}$ є унімодальними функціями і характеризуються конкретними екстремальними значеннями $a_{MK(3)E}$ і $\lambda_{\delta K(3)E}$.

Аналогічно залежностям масовартісних показників від геометричних співвідношень ЕМС КАД і ОАД, що не містять явно виражених екстремумів за $a_{MK(3)}$, значення відносних показників основних втрат при $2p=2$ знижуються при зменшенні $a_{MK(3)}$.

У всіх діапазонах зміни $\mathcal{V}_1$ зі збільшенням p зменшується різниця показників втрат порівнюваних АД.

Встановлено, що зниження втрат ОАД відносно електромагнітно-еквівалентного КАД при $p=1$, $p=2$, $p=3$ і $p=4$ складає відповідно 22...29%, 12...16%, 9,6...12% і 7,6...9,6%.

Таблиця 3.3 - Показники втрат еквівалентних електромагнітних систем асинхронних короткозамкнених двигунів з внутрішнім і зовнішнім роторами (електротехнічна сталь 2013)

γ_1 , в.о.	Σ	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta K}$, в.о.	Π_{BKE}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta 3}$, в.о.	Π_{B3E}^* , в.о.	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta K}$, в.о.	Π_{BKE}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta 3}$, в.о.	Π_{B3E}^* , в.о.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		$p=1$						$p=2$					
1,338	min	3,0	2,7	7,032	7,5	2,65	4,907	16,00	1,40	4,792	21,75	1,30	4,016
	cp	3,5	2,6	7,331	5,5	2,60	5,218	14,75	1,40	5,006	20,50	1,25	4,213
	max	3,5	2,55	7,668	6,0	2,15	5,567	13,75	1,40	5,254	19,50	1,20	4,433
1,903	min	5,0	2,3	7,481	8,0	2,45	5,354	18,00	1,35	5,133	24,25	1,30	4,367
	cp	3,5	2,4	7,794	6,0	2,40	5,729	17,75	1,30	5,351	22,75	1,25	4,583
	max	4,0	2,35	8,142	6,0	2,30	6,118	16,25	1,30	5,599	22,00	1,20	4,821
2,785	min	7,5	2,25	8,252	8,0	2,45	6,092	22,25	1,25	5,641	29,50	1,25	4,898
	cp	5,5	2,25	8,474	7,0	2,40	6,540	21,75	1,20	5,865	26,00	1,25	5,144
	max	4,5	2,3	8,789	7,0	2,35	6,952	20,50	1,20	6,110	25,75	1,20	5,409

Таблиця 3.4 - Показники втрат еквівалентних електромагнітних систем асинхронних короткозамкнених двигунів з внутрішнім і зовнішнім роторами (електротехнічна сталь 2412)

γ_1 , в.о.	Σ	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta K}$, в.о.	Π_{BKE}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta 3}$, в.о.	Π_{B3E}^* , в.о.	a_{MK} , в.о.	$\lambda_{\delta K}$, в.о.	Π_{BKE}^* , в.о.	a_{M3} , в.о.	$\lambda_{\delta 3}$, в.о.	Π_{B3E}^* , в.о.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		$p=1$						$p=2$					
1,338	min	6,0	2,90	5,583	7,0	2,80	4,117	25,00	1,55	3,822	31,75	1,50	3,293
	cp	6,0	2,80	5,781	7,5	2,85	4,377	23,00	1,55	3,971	29,25	1,45	3,430
	max	5,5	2,80	6,003	7,5	2,65	4,592	21,50	1,55	4,138	27,75	1,40	3,571
1,903	min	7,5	2,60	6,008	10,5	2,80	4,576	30,00	1,45	4,123	38,00	1,45	3,598
	cp	7,0	2,60	6,212	9,5	2,75	4,829	27,75	1,45	4,276	35,00	1,40	3,751
	max	6,5	2,60	6,436	9,0	2,65	5,067	25,50	1,45	4,443	31,75	1,40	3,908
2,785	min	8,5	2,45	6,634	14,0	2,65	5,212	39,50	1,30	4,573	50,25	1,35	4,055
	cp	8,5	2,40	6,850	12,5	2,65	5,501	36,50	1,30	4,732	44,00	1,35	4,234

	max	8,0	2,40	7,077	11,5	2,55	5,776	34,00	1,30	4,902	39,50	1,35	4,414
--	-----	-----	------	-------	------	------	-------	-------	------	-------	-------	------	-------

3.3. Показники маси і вартості аксіальної електромагнітної системи двигуна з одним ротором

У числі історичних досягнень початкової електротехніки представлений перший електродвигун обертального руху з плоским аксіальним робочим зазором, розроблений Б. С. Якобі в 1834 р. Потім удосконалювалися концентричні ЕМС і в кінці XIX століття на основі робіт М. О. Доливо-Добровольського пішло освоєння промислового виробництва трифазних, в тому числі асинхронних машин з циліндричним робочим зазором (рис. 3.8, а) [8].

Протягом минулого століття розвиток електромеханіки супроводжувався менш масштабним, порівняно з комплексними розробками і багатосерійним виробництвом КАД, дослідженнями і успішним виготовленням ТАД у США та західній Європі. Плоска форма і мала осьова довжина однороторних ТАД з ЕМС (рис. 3.9, б) дозволяє підвищити ПТР ряду технічних об'єктів. В якості прикладу таких об'єктів показані конструктивні схеми елементів підводно-технічного обладнання з серійним КАД (рис. 3.9, а, б) і з ТАД (рис. 3.9, в) [16].

Відомі недоліки ТАД полягають в осьовому тяжінні ротора до статора, нерівномірності розподілу магнітного поля в активному об'ємі і у конструктивної складності розміщення внутрішніх лобових частин статора в зоні положення валу і підшипників при числі полюсів $2p \leq 4$ [12].

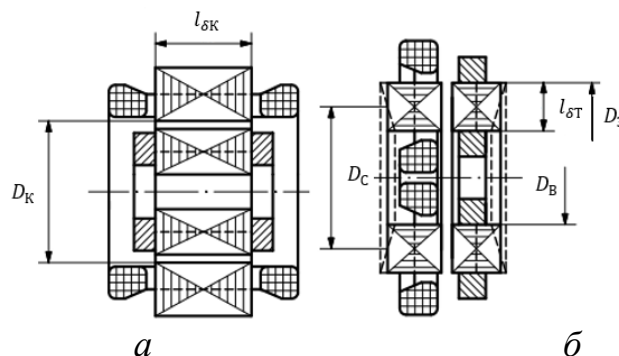


Рисунок 3.8 – Конструктивні схеми електромагнітних систем асинхронних короткозамкнених двигунів класичного (а) і аксіального (б) виконань

На додаток до конструктивного відповідності ряду механізмів, перевагами аксіальних ЕМС є відносно малі відходи ЕТС при виготовленні витих зубчастих магнітопроводів і спрощення обмотково-ізоляційних робіт. Виходячи з переваг плоского укладання, виконувалися розробки ТАД з друкованими та штампозварними обмотками. Однак освоєння виробництва таких ТАД, на відміну від аксіально-дискових тахогенераторів і двигунів постійного струму, не було. Згідно [24], розроблені для об'єктів побутової техніки однофазні ТАД з витими магнітопроводами і штампованими (із змінним кроком) пазами відрізняються відносно класичних аналогів ($2p = 4, f_1 = 50$ Гц) зниженою трудомісткістю виготовлення і підвищеними ПТР.

Однак пріоритети технологічної наступності, раніше вкладеної капітало-місткості обладнання та фактори стандартизації та автоматизованого проектування КАД практично обмежують можливості промислової реалізації малих ТАД [24]. Також в публікаціях не представлені залежності ПТР від ставлення ξ_T зовнішнього D_z і внутрішнього D_v діаметрів активної поверхні статора (рис. 3.8, б), роботи з оптимізації ТАД. При цьому згідно [12], потенціал розвитку КАД традиційними способами підвищення ПТР електромеханічних пристроїв практично вичерпаний. Тому незважаючи на технологічний консерватизм є перспективи розширення виробництва і використання ТАД і АД з зовнішнім ротором щонайменше в електромеханічних системах спеціального призначення [18-25, 63].

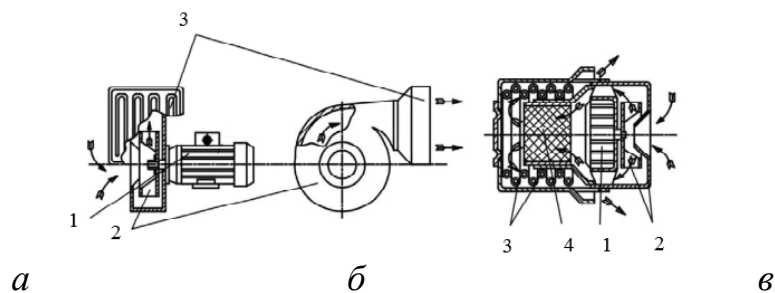


Рисунок 3.9 – Схеми агрегатів обробки дихально-газової суміші з відцентровим вентилятором, циліндричним електродвигуном і плоским теплообмінником (а – головний вид; б – вид збоку) і з вбудованим

фільтром і аксіальним електродвигуном (в): 1 – двигун; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – теплообмінник; 4 – комплект фільтрів очищення.

При розробці ММ розглядаються ЕМС з традиційною зубцово-пазовою структурою, не враховується обмеження розміщення внутрішніх лобових частин (на основі можливості їх укладання в зоні D_v статора на рис. 1.12, в), не враховується крайовий ефект розподілу магнітного поля. Виходячи з останнього припущення розподіл вздовж активної довжини КАД амплітуди індукції в робочому зазорі $B_{\delta k} = \text{const}$, а аналогічна функція розподілу індукції ТАД визначається зміною співвідношень елементів магнітопроводу вздовж поточного радіуса [12]. Така функція може мати вигляд умовно симетричного відносно середнього діаметра D_c і зростаючого або спадаючого від D_v до D_z розподілу. Симетричний і, більшою мірою, зростаючий розподіл підвищує використання активного об'єму і граничну потужність ТАД [12] і забезпечується трапецієподібними перерізами ярма (рис. 3.8, б). При трапецієподібному і традиційному прямокутному перетинах ярма і виключення насичення зубців і ярма в зонах відповідно D_v і D_z розрахунково-експериментальні співвідношення індукцій зазору $B_{\delta z}$ і $B_{\delta v}$ на граничних діаметрах становлять 1,2...1,25 [12]. Зазначені функції в відносних одиницях $B_{\delta i}/B_{\delta z}$ від ξ_T представлені на рис. 3.10, які визначаються відношенням поточного значення індукції $B_{\delta i}$ і діаметра D_i до відповідних індукції на зовнішньому діаметрі $B_{\delta z}$ і внутрішньому діаметрі D_v .

Оптимізаційні цільові функції (ЦФ) маси $F_{MK(T)}$ і вартості $F_{CK(T)}$ ЕМС КАД (ТАД), а також ЦФ активних втрат представляються рівнянням виду [103, 104]

$$F_{M(B)K(T)} = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 K_{M(B)} \Pi_{M(B)K(T)}^*, \quad (3.100)$$

де $\Pi_{ВД}$ – показник вхідних даних і електромагнітних навантажень (ЕМН) АД [101], який є ідентичним для розглядуваних ЕМС виходячи із принципу

електромагнітної еквівалентності порівняльного аналізу [11]; $K_{M(B)}$ – коефіцієнт питомих характеристик електротехнічних матеріалів; $\Pi_{M(B)K}^*$ і $\Pi_{M(B)T}^*$ – відносний показник у виді коефіцієнта маси (вартості) ЕМС відповідно КАД і ТАД, що визначаються відносними КЗ.

КЗ аналізу КАД є відносна активна довжина $\lambda_{\delta K}$ і розрахунковий параметр a_{MK} [101]:

$$\lambda_{\delta K} = l_{\delta K}/D_K, [м/м]; \quad a_{MK} = D_K^4/\Pi_{ВД}, [м^4/м^4]. \quad (3.101)$$

Для визначення ПТР ТАД також вводиться параметр a_{MT} , а відносна активна довжина $\lambda_{\delta T}$ аналогічно геометричним параметрам ЕМС трансформаторів і у відповідності з (2.7) виражається через відношення діаметрів ξ_T :

$$a_{MT} = D_c^4/\Pi_{ВД}, [м^4/м^4]; \quad (3.102)$$

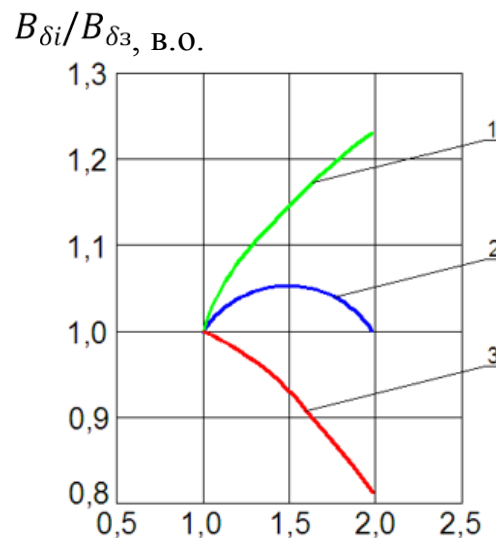
$$\xi_T = D_3/D_B, [м/м]; \quad (3.103)$$

$$\lambda_{\delta T} = (1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T). \quad (3.104)$$

Діаметр D_c є аналогом D_K [12] і активна довжина $l_{\delta T}$ ЕМС ТАД визначаються:

$$D_c = (D_3 + D_B)/2 = [D_3(1 + 1/\xi_T)]/2; \quad (3.105)$$

$$l_{\delta T} = (D_3 - D_B)/2 = [D_3(1 - 1/\xi_T)]/2; \quad (3.106)$$



$$\xi_T, \text{ в.о.}$$

Рисунок 3.10 – Варіанти розподілу індукції в робочому зазорі
торцевого асинхронного двигуна з прямокутним (1)
і з трапецієподібним (2, 3) перерізом ярма

Нерівномірний радіальний розподіл індукції в робочому зазорі ТАД враховується апроксимацією розрахунково-експериментальних залежностей виду (рис. 3.12):

$$B_\delta(\xi_T) = B_{\delta_3}(1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36}\xi_T^{0,15}); \quad (3.107)$$

$$B'_\delta(\xi_T) = B_{\delta_3}(1 + 0,204(\xi_T - 1)^{0,63}\xi_T^{0,15});$$

$$B''_\delta(\xi_T) = B_{\delta_3}(1,051 - 0,186(\xi_T - 0,5)(1 + \xi_T)^2\xi_T^{0,15}),$$

де апроксимація (3.107) відповідає трапецієвидному перерізу ярма з насиченням шарів ЕТС вздовж радіусу, близького до рівномірного.

Потік головного магнітного поля в робочому зазорі ТАД визначається з використанням (3.105) і (3.107)

$$\Phi_\delta = (2/\pi)B_{\delta_3}(1 - K_B) \int_0^{2\pi/p} \int_{D_B}^{D_3} (D/2)d(D/2)d\varphi = B_{\delta_3}(1 - K_B)(1/2p) \times \\ \times D_3^2(1 - 1/\xi_T^2) = B_{\delta_3}(1 - K_B)(2/p)D_c^2(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T), \quad (3.108)$$

де K_B – усереднений коефіцієнт розподілу індукції в робочому зазорі, який для ЕМС ТАД з ефективним використанням активного об'єму виражається залежністю розподілу індукції (3.107) і знаходиться

$$K_B = (0,167 \int_1^{\xi_T} (\xi_T - 1)^{1,36}\xi_T^{0,15} d\xi_T) / (\xi_T - 1). \quad (3.109)$$

Аналогічно ММ ЕМС КАД для визначення ЦФ (3.100) ТАД використовуються відомі вираження числа і перерізу ефективних провідників паза статора U_Π і $S_{\text{еф}}$, числа витків фази w_1 і зубців статора Z_1 :

$$U_\Pi = (w_1 a_1) / (p q_1); \quad (3.110)$$

$$S_{\text{еф}} = P_H / (a_1 m_1 J_1 U_1 \eta \cos \varphi); \quad (3.111)$$

$$w_1 = K_e U_1 / (4,44 K_p K_y f_1 \Phi_\delta); \quad (3.112)$$

$$z_1 = p m_1 q_1, \quad (3.113)$$

де a_1 – число паралельних гілок обмотки статора; K_e – співвідношення ЕРС фази статора і фазової напруги U_1 ; m_1 і q_1 – число фаз і пазів на полюс і фазу; K_p і K_y – обмоткові коефіцієнти розподілу і укорочення; J_1 – щільність струму статора; η і $\cos\varphi$ – коефіцієнт корисної дії і енергетичний коефіцієнт.

З урахуванням виразів (3.107) – (3.112) і КЗ (3.102), (3.103) сумарна площа пазів $S_{1\Sigma}$ в поперечному перерізі магнітопроводу статора

$$\begin{aligned} S_{1\Sigma} &= z_1 U_1 S_{\text{эф}} / K_{\text{зп}} = P_{\text{ВД}} / [K_{\text{зп}} D_c^2 2 (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)] = \\ &= \sqrt{P_{\text{ВД}}} / [K_{\text{зп}} 2 \sqrt{a_{\text{MT}}} (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)], \end{aligned} \quad (3.114)$$

де $K_{\text{зп}}$ – повний коефіцієнт заповнення паза статора, а показник $P_{\text{ВД}}$ електромагнітно-еквівалентних АД визначається виразом (3.15)

$$P_{\text{ВД}} = K_e p P_H / (2,22 K_p K_y f_1 J_1 B_{\delta H} (1 - K_B) \eta \cos\varphi). \quad (3.115)$$

Велика і менша сумарна ширина зубців на діаметрах D_z і D_B магнітопроводу статора (ротора) $b_{z\Sigma 1(2)}$ і $b_{B\Sigma 1(2)}$ з урахуванням розподілу індукції в робочому зазорі (3.107) $B_\delta(\xi_T i)$ і коефіцієнта заповнення ЕТС магнітопровода $K_{\text{зс}}$:

$$b_{z\Sigma 1(2)} = t_{z1(2)} B_{\delta z} / (B_{zH\Sigma 1(2)} K_{\text{зс}}) = \pi D_z \alpha_{z1(2)}; \quad (3.116)$$

$$b_{B\Sigma 1(2)} = t_{B1(2)} B_{\delta B} / (B_{B\Sigma 1(2)} K_{\text{зс}}) = \pi D_B \alpha_{B1(2)} / \xi_T; \quad (3.117)$$

де $t_{z1(2)}$ і $t_{B1(2)}$ – зубкові ділення по діаметру магнітопроводу статора (ротора) D_z і D_B ; $\alpha_{z1(2)}$ і $\alpha_{B1(2)}$ – розрахункові коефіцієнти зубців статора (ротора), зворотні до співвідношень $K_{Bz\Sigma 1(2)}$ і $K_{BB\Sigma 1(2)}$ амплітуд індукцій в зубці на D_z і D_B $B_{z\Sigma 1(2)}$ і $B_{B\Sigma 1(2)}$ до індукції в робочому зазорі $B_\delta(\xi_T)$ і $K_{\text{зс}}$:

$$\alpha_{z1(2)} = 1 / (K_{\text{зс}} K_{Bz\Sigma 1(2)}); \quad (3.118)$$

$$\alpha_{B1(2)} = (1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15}) / (K_{\text{зс}} K_{BB\Sigma 1(2)}); \quad (3.119)$$

На основі (3.116) – (3.119) в врахуванням постійності сумарної ширини пазів $b_{\Sigma 1(2)}$ по радіусі в площині активної поверхні магнітопроводу визначається рівняння зубцово-пазової структури статора, як зв'язок співвідношення $K_{B\Sigma 1}$ від параметра ξ_T

$$\begin{aligned} b_{\Sigma 1}/b_{\Sigma 1} &= \pi D_3(1 - \alpha_{31})/(\pi D_B(1 - \alpha_{B1})) = 1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \xi_T(1 - \alpha_{31})/(1 - \alpha_{B1}) = 1. \end{aligned} \quad (3.120)$$

Графік залежності (3.120) в функції $K_{B\Sigma 1} = f(\xi_T)$ для магнітопроводу статора приведений на рис. 3.11 при максимальній індукції $B_{zB\Sigma 1}$ на внутрішньому діаметрі зубців статора 2,1 Тл і для значення індукції в робочому зазорі на зовнішньому діаметрі $B_{\delta z} = 0,75$ Тл, які прийняті виходячи із рекомендованих значень індукції в робочому зазорі АД [121].

При визначенні розрахункового співвідношення магнітопроводу ротора $K_{B\Sigma 2}$ з поглибленими пазами, що забезпечує задані пускові характеристики, виконуються послідовні наближення. При відомому ξ_T знижується значення $B_{zB\Sigma 2}$ і методом ітерацій знаходиться раціональна геометрія зубцово-пазової зони ротора.

Після визначення $K_{B\Sigma 1}$ відповідно до ξ_T (за рис. 3.11) розраховується α_{31} і з використанням (3.120) визначається сумарна ширина паза статора

$$b_{\Sigma 1} = 2\pi D_c(1 - \alpha_{31})/(1 + 1/\xi_T). \quad (3.121)$$

Висота зубця статора з врахуванням коефіцієнта шліца $K_{pш1}$, знаходиться з врахуванням (3.115) і (3.120)

$$\begin{aligned} h_{z1} &= S_{1\Sigma}/[(1 - K_{pш1})b_{\Sigma 1}] = \\ &= \Pi_{ВД}/[(1 - K_{pш1})K_{3п}D_c^3 4\pi (1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{31})/(1 + 1/\xi_T)^2] = \\ &= \sqrt[4]{\Pi_{ВД}}/\left[\sqrt[4]{a_{MT}^3}(1 - K_{pш1})K_{3п}4\pi (1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{31})/(1 + 1/\xi_T)^2\right]. \end{aligned} \quad (3.122)$$

$K_{B\Sigma 1}$, в.о.

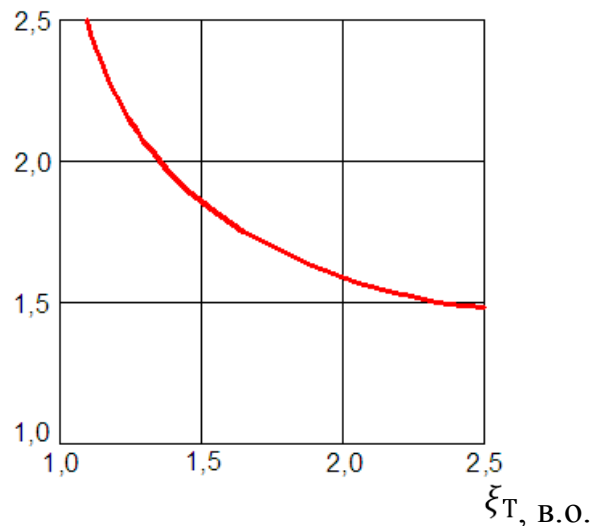


Рисунок 3.11 – Залежність співвідношення амплітуди індукції на зовнішній частині зубця до індукції в робочому зазорі від співвідношення діаметрів

Середня ширина котушки b_{cp} і середня довжина витка обмотки l_{w1} статора ТАД визначається згідно з [121] і (3.106):

$$l_{w1} = 2(l_{\delta T} + l_{л1}) = 2D_c(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T) + 2K_{л}b_{cp} = 2D_c[(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T) + K_{л}\beta\pi/(2p)], \quad (3.123)$$

де β – коефіцієнт укорочення обмотки статора, $l_{л1}$ і $K_{л}$ – довжина і коефіцієнт лобової частини котушки статора.

На основі (3.114) і (3.123) маса мідної обмотки статора ТАД з щільністю провідника ρ_m

$$m_{w1T} = \rho_m \frac{l_{w1}}{2} S_{1\Sigma} K_{зп} = \rho_m \sqrt[4]{\Pi_{ВД}^3} \Pi_{w1T}^*, \quad (3.124)$$

де Π_{w1T}^* - відносний показник маси активного матеріалу обмотки статора

$$\Pi_{w1T}^* = [(1 + 1/\xi_T)/(2^4 \sqrt{a_{MT}} (1 - 1/\xi_T))] \times [(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T) + K_{л}\beta\pi/(2p)]. \quad (3.125)$$

Аналогічно [101] визначаються елементи геометрії алюмінієвої обмотки ротора:

$$S_{2\Sigma} = z_2 I_2 / J_2 = I_{1H} (0,2 + 0,8 \cos \varphi) 2 m_1 w_1 K_p K_y / K_{ск} =$$

$$= (\sqrt{\Pi_{ВД}} \gamma_1 (1 + 1/\xi_T)) / (2\sqrt{a_{MT}} (1 - 1/\xi_T)); \quad (3.126)$$

$$h_{z2} = S_{2\Sigma} / ((1 - K_{рш2}) b_{п\Sigma2}) = \\ = \sqrt[4]{\Pi_{ВД}} \gamma_1 / \left[\sqrt[4]{a_{MT}^3} (1 - K_{рш2}) 4\pi (1 - 1/\xi_T) (1 - \alpha_{32}) / (1 + 1/\xi_T)^2 \right]; \quad (3.127)$$

$$S_3 = I_3 / J_3 = (\gamma_1 \sqrt{\Pi_{ВД}} (1 + 1/\xi_T)) / (\sqrt{a_{MT}} 4\pi p \gamma_2 (1 - 1/\xi_T)), \quad (3.128)$$

де $S_{2\Sigma}$ і $b_{п\Sigma2}$ – сумарні площа і ширина пазів ротора; h_{z2} і S_3 – висота зубців і переріз короткозамкненого кільця обмотки ротора; $I_{1н}$ – номінальний струм обмотки статора; Z_2 – число зубців статора; I_3 і J_3 – струм і щільність струму короткозамкненого кільця ротора; γ_2 – коефіцієнт, що враховує зменшення щільності струму J_3 у порівнянні з щільністю струму стержня J_2 ; $K_{рш2}$ – розрахункове співвідношення шліца зубця ротора; $K_{ск}$ – коефіцієнт скосу пазів; γ_1 – розрахунковий коефіцієнт трансформації статора відносно ротора, що приймається для реальних K_p , K_y , $\cos\varphi$, $K_{ск}$, $J_{1(2)}$ значення:

$$\gamma_1 = K_p K_y (0,2 + 0,8 \cos\varphi) J_1 / (K_{ск} J_2) = 1,338 \dots 2,785.$$

Маса роторної обмотки ТАД представлена на основі (3.126) – (3.128) виразом

$$m_{w2T} = \rho_a [l_{\delta T} S_{2\Sigma} + \pi(D_3 + l_3 + D_b - l_3) S_3] = \rho_a \sqrt[4]{\Pi_{ВД}^3} \Pi_{w2T}^*, \quad (3.129)$$

де l_3 – радіальна довжина короткозамкненого кільця ротора; ρ_a і Π_{w2T}^* – щільність і відносний показник маси алюмінієвої короткозамкненої обмотки

$$\Pi_{w2T}^* = \gamma_1 / (2\sqrt[4]{a_{MT}}) \left[1 + (1 + 1/\xi_T) / ((1 - 1/\xi_T) \gamma_2 p) \right]. \quad (3.130)$$

Поперечні перерізи зубців статора (ротора) визначаються рівнянням

$$S_{z1(2)} = \int_0^{2\pi} \int_{D_b}^{D_3} (D/2 - b_{п\Sigma1(2)} / (2\pi)) d D/2 d\varphi = \\ = \pi [0,25 D_3^2 (1 - 1/\xi_T^2) - b_{п\Sigma1(2)} / (2\pi) (1 - 1/\xi_T)] = \pi \sqrt{\Pi_{ВД}} \sqrt{a_{MT}} \times \\ \times \left[(1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T) - 2(1 - \alpha_{31(2)}) (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)^2 \right]. \quad (3.131)$$

Висота ярма прямокутного поперечного перерізу еквівалентного по площі трапецієподібному перерізу ярма статора (ротора) ТАД знаходиться на основі (3.106 - 3.108) по інтегральному значенню потоку головного магнітного поля

$$h_{a1(2)} = \Phi_{\delta} / (2K_{zc}l_{\delta T}B_{a1(2)}) = B_{\delta z}(1 - K_B)2D_c^2(1 - 1/\xi_T)(1 + 1/\xi_T) / [B_{\delta z}K_{zc}2p(1 + 1/\xi_T)D_c(1 - 1/\xi_T)K_{Ba}] = \alpha_{31(2)}(1 - K_B)D_c/p, \quad (3.132)$$

де K_{Ba} – співвідношення амплітуд індукцій $B_{\delta z}$ в робочому зазорі на зовнішньому діаметрі і зовнішньому витці ярма B_{az} ; $\alpha_{31(2)}$ – коефіцієнти ярма статора (ротора)

$$\alpha_{31(2)} = 1/(K_{zc}K_{Ba}). \quad (3.133)$$

Площі аксіальних поперечних перерізів ярма статора і ротора приймаються однаковими ($S_{a1} \approx S_{a2} \approx S_a$) і визначаються

$$S_a = \pi(D_3^2 - D_B^2)/4 = \pi D_c^2(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T) = \sqrt{\Pi_{BD}}\sqrt{a_{MT}}\pi(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T); \quad (3.134)$$

Маса магнітопроводу ТАД знаходиться виходячи з (3.122), (3.127), (3.131) – (3.134)

$$m_{ММТ} = \rho_c K_{zc} [S_{z1}h_{z1} + S_{z2}h_{z2} + K_{Ta}(h_{a1} + h_{a2})S_a] = \rho_c \sqrt[4]{\Pi_{BD}^3} K_{Ta} \Pi_{ММТ}^*, \quad (3.135)$$

де ρ_c – щільність ЕТС; K_{Ta} і $\Pi_{ММТ}^*$ – коефіцієнт підвищення маси трапецієподібного ярма відносно еквівалентного по площі прямокутного ярма і відносний показник маси магнітопроводу ТАД:

$$K_{Ta} = \left[1 + \left(1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15} / \xi_T \right) \right] / [(1 + 1/\xi_T)(1 - K_B)]; \quad (3.136)$$

$\Pi_{ММТ}^*$

$$= K_{zc} \sqrt[4]{a_{MT}} \left(1 / ((1 - K_{pш1})K_{3п}) [(1 + 1/\xi_T)/(4(1 - \alpha_{31})) - 0,5] + \gamma_1 / (1 - K_{pш2}) [(1 + 1/\xi_T)/(4(1 - \alpha_{32})) - 0,5] \right) + K_{zc} \sqrt[4]{a_{MT}^3} K_{Ta} (\pi/p) (\alpha_{31} + \alpha_{32}) (1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T). \quad (3.137)$$

1,338	1,80	0,286	3,197	8,893	2,50	0,429	6,688	25,647
1,903	1,80	0,286	3,508	9,532	2,45	0,420	7,517	26,773
2,785	1,75	0,259	4,459	10,500	2,40	0,412	8,429	28,498
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p=2$								
1,338	1,55	0,216	6,465	5,615	2,15	0,365	11,425	15,259
1,903	1,50	0,200	7,869	6,030	2,10	0,355	12,783	15,986
2,785	1,50	0,200	8,946	6,655	2,10	0,355	13,853	17,091
$p=3$								
1,338	1,45	0,184	7,452	4,681	1,95	0,322	12,043	12,425
1,903	1,45	0,184	8,097	5,035	1,90	0,310	13,626	13,037
2,785	1,45	0,184	9,290	5,571	1,90	0,310	15,084	13,970
$p=4$								
1,338	1,45	0,184	8,793	3,971	1,80	0,286	16,760	10,312
1,903	1,45	0,184	9,712	4,279	1,75	0,273	18,792	10,832
2,785	1,45	0,184	11,003	4,747	1,75	0,273	20,818	11,620

Таблиця 3.6 - Екстремуми показників маси і вартості активної частини класичних асинхронних короткозамкнених двигунів

γ_1 , в.о.	λ_{KE}	a_{MKE} , в.о.	Π_{MKE}^* , в.о.	λ_{KE}	a_{MKE} , в.о.	Π_{BKE}^* , в.о.
1	2	3	4	5	6	7
$p=1$						
1,338	1,00	5,50	11,176	2,30	2,50	25,459
1,903	1,10	7,00	12,607	2,20	3,50	26,516
2,785	0,90	12,50	14,442	2,05	5,50	28,760
$p=2$						
1,338	0,60	9,25	7,200	1,75	5,00	18,010
1,903	0,50	15,50	7,869	1,65	6,00	18,881
2,785	0,35	32,50	8,846	1,40	8,75	20,238
$p=3$						
1,338	0,45	12,67	6,388	1,30	7,50	16,109
1,903	0,35	22,67	6,963	1,20	9,17	16,899

2,785	0,30	38,50	7,805	1,05	12,50	18,115
	$p=4$					
1	2	3	4	5	6	7
1,338	0,40	15,50	5,531	1,00	13,25	14,150
1,903	0,35	23,88	6,002	0,95	15,25	14,867
2,785	0,25	48,50	6,693	0,85	20,13	15,957

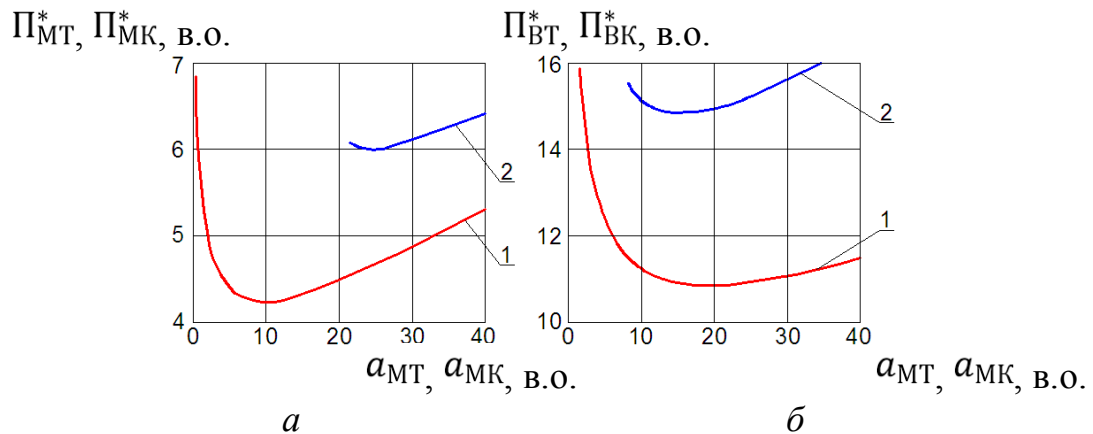


Рисунок 3.12 – Залежність показників маси (а) і вартості (б) восьмиполюсних варіантів електромагнітних систем асинхронних двигунів: торцевого (1) і електромагнітно-еквівалентного класичного (2) при $\gamma_1 = 1,903$

3.4. Показники втрат активної потужності аксіального двигуна з одним ротором

В [3] на додаток до відомих «традиційних» можливостей удосконалення та конструктивно-технологічним рішенням визначені способи підвищення технічного рівня електромеханічних пристроїв і комплексів «системним підходом», розробкою «нетрадиційної» активної і конструктивної частини, а також спеціальних виконань електричних машин, зокрема АД. Один з напрямків реалізації таких способів полягає в забезпеченні функціональної відповідності елементів активної частини і вузлів, що приводять в рух механізми на основі конструктивно-структурних відмінностей варіантів (рис. 3.13, а-в) аксіальної ЕМС [12] від АД «класичного» (АДК) виконання.

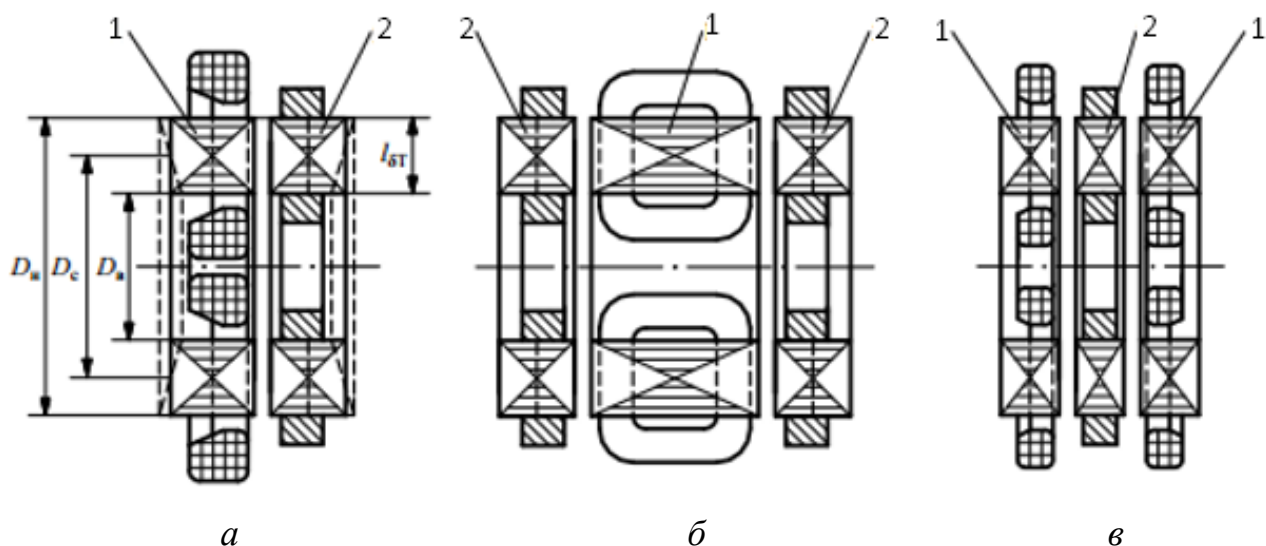


Рисунок 3.13 - Конструктивні схеми варіантів аксіальної електромагнітної системи з одним (а) і двома (б) роторами, а також з двосекційним статором і дисковим ротором (в): 1 – статор; 2 – ротор.

Можливі приклади інтеграції механічної і нетрадиційної електромеханічний компонент з однороторної (рис. 3.13, а) і двороторної (рис. 3.13, б) ЕМС торцевого АД (ТАД) представлені в [12], а також на схемах поршневого компресора (рис. 3.14, а) і двоступінчастого контрроторного вентилятора (рис. 3.14, б) [16]. З [63] відома система електромеханічного диференціалу, який містить ЕМС схеми (рис. 3.15, б) з двома роторами, встановленими на окремих валах трансмісії провідних коліс електромобіля. Вбудовуванням і згаданої інтеграцією елементів ТАД і механізмів досягається оптимізація співвідношення обертового моменту і маси, підвищення енергетичних показників і технічного рівня електромеханізмів в цілому. На основі використання аксіальних ЕМС (рис. 3.13, а, в) в діапазоні потужності 37...250 кВт випускаються високооборотні (5000...6500 об/хв) відцентрові компресори і насоси з частотним регулюванням і вбудованими електромеханічними, перетворювальними і мікропроцесорними компонентами [23, 25].

Подані вище факти і можливості розробки і застосування варіантів аксіальних ЕМС (рис. 3.13, а – в) обумовлюють доцільність доповнення

відомих, наприклад з [94], оптимізаційних методик розрахунку КАД роботами по визначенню раціональної геометрії та оптимізації активної частини ТАД. Також представляє, згідно [11, 12], теоретичний і практичний інтерес порівняльний аналітичний аналіз ТАД і КАД.

Аналогічно ЦФ (3.5) та на основі методу [112] втрати в ЕМС ТАД визначаються рівнянням виду

$$F_{\text{ПТ}} = (\sqrt[4]{P_{\text{ВД}}})^3 K_{\text{П}} P_{\text{ПТ}}^*, \quad (3.142)$$

де $P_{\text{ВД}}$ - показник вихідних даних і ЕМН, який є ідентичним для порівнюваних варіантів АД з циліндричним і аксіальним робочим зазором; $K_{\text{П}}$ – коефіцієнт питомих характеристик електротехнічних матеріалів; $P_{\text{ПТ}}^*$ – безрозмірний показник, що не залежить від потужності і представляється у вигляді коефіцієнта втрат ЕМС ТАД, що є функцією співвідношення ЕМН, а також K_3 – параметра a_{MT} і параметра-співвідношення ξ_{T} зовнішнього D_3 і внутрішнього $D_{\text{в}}$ діаметрів активної поверхні статора (рис. 3.15, а), ξ_{T} є перетвореним, стосовно до ТАД, параметром відносної довжини статора $\lambda_{\text{дк}}$ КАД [103, 104].

Значення $P_{\text{ВД}}$ на основі усереднення розрахунково-експериментальних залежностей радіального розподілу індукції в робочому зазорі ТАД представляються виразом [101]

$$P_{\text{ВД}} = K_{\text{Е}} p P_{\text{н}} / (2,22 K_{\text{Р}} K_{\text{У}} f_1 J_1 B_{\delta_3} (1 - K_{\text{В}}) \eta \cos \varphi), \quad (3.143)$$

де $K_{\text{Е}}$ – співвідношення ЕРС фази статора і напруги U_1 ; p – число пар полюсів; $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність; $K_{\text{Р}}, K_{\text{У}}$ – коефіцієнти розподілу і укорочення обмотки; f_1 і J_1 – частота та щільність струму статора; B_{δ_3} – значення індукції в робочому зазорі на зовнішньому діаметрі D_3 при нехтуванні крайовим ефектом; $K_{\text{В}}$ – усереднений коефіцієнт розподілу індукції в робочому зазорі [121], який для ЕМС ТАД з ефективним використанням активного обсягу (з трапецеїдальними ярмами) визначається

$$K_B = 0,167/(\xi_T - 1) \int_1^{\xi_T} (\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15} d\xi_T; \quad (3.144)$$

Для визначення геометричних співвідношень та втрат в обмотках статора і ротора використовуються відомі рекомендації вибору і вирази розрахунку [121] зубців статора z_1 , числа витків фази w_1 , активних опорів обмоток r_{1T} , r_{2T} , типу і довжини лобових частин обмотки статора $l_{л1}$, а також коефіцієнта приведення струму кільця до струму стрижня $K_{пр}$:

$$z_1 = 2pm_1q_1; \quad (3.145)$$

$$w_1 = U_{п}pq_1/a_1; \quad (3.146)$$

$$r_{1T} = 2w_1(l_{\delta T} + l_{л1})/(\sigma_{м20}a_1S_{эф}); \quad (3.147)$$

$$r_{2T} = l_{\delta T}/(\sigma_{а20}S_{ст}) + \pi(D_з + l_з + D_в - l_з)/(\sigma_{а20}m_2S_{кл}K_{пр}^2); \quad (3.148)$$

$$l_{л1} = K_{л}\beta\pi(D_з + l_{в1} + D_в - l_{в1})/(2p); \quad (3.149)$$

$$K_{пр} = 2\sin(\pi p/m_2), \quad (3.150)$$

де $U_{п}$ – число ефективних провідників в пазу статора; a_1 – число паралельних гілок; q_1 – число пазів на полюс і фазу; $m_{1(2)}$ – число фаз статора (ротора); $\sigma_{м20}$ і $\sigma_{а20}$ – питомі електричні провідності міді і алюмінію при 20°C; $S_{эф}$, $S_{ст}$ і $S_{кл}$ – відповідно площі перерізу ефективного провіднику обмотки статора, стержня і клітки обмотки ротора; $K_{л}$ – коефіцієнт пропорційності між $l_{л1}$ і полюсним діленням на $D_{з(в)}$; $l_{\delta T}$ – активна довжина ЕМС ТАД [12]; β – відносне вкорочення кроку обмотки статора; $l_{з(в1)}$ – виліт лобових частин обмотки ротора (статора).

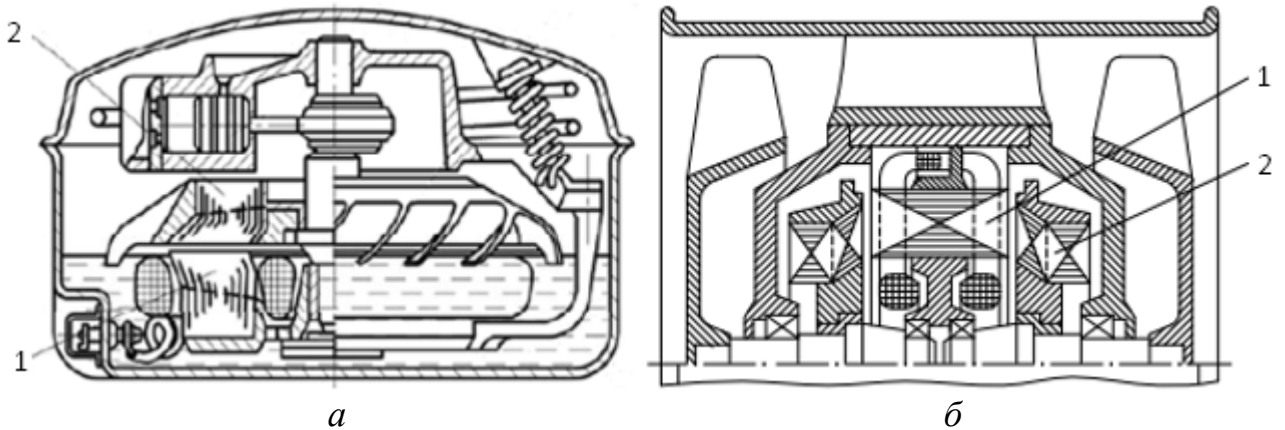


Рисунок 3.14 – Приклади конструктивних схем механізмів герметичного компресора і осьового вентилятора з вбудованим однороторним (а) і двороторним зустрічного обертання (б) торцевими асинхронними двигунами: 1 – статор; 2 – ротор.

При складанні ЦФ втрат активної потужності ТАД також враховувалися співвідношення геометричних параметрів зубцово-пазових структур [103]:

$$\begin{aligned} S_{1\Sigma} &= P_{ВД} / (K_{зп} D_c^2 2 (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)) = \\ &= \sqrt{P_{ВД}} / (K_{зп} \sqrt{a_{MT}} 2 (1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T)); \end{aligned} \quad (3.151)$$

$$S_{2\Sigma} = [\sqrt{P_{ВД}} \gamma_1 (1 + 1/\xi_T)] / [\sqrt{a_{MT}} 2 (1 - 1/\xi_T)]; \quad (3.152)$$

$$\begin{aligned} h_{z1} &= S_{1\Sigma} / ((1 - K_{рш1}) b_{п\Sigma1}) = \sqrt[4]{P_{ВД}} / \\ &/ [\sqrt[4]{a_{MT}^3} (1 - K_{рш1}) K_{зп} 4\pi (1 - 1/\xi_T) (1 - \alpha_{31}) / (1 + 1/\xi_T)^2]; \end{aligned} \quad (3.153)$$

$$\begin{aligned} h_{z2} &= S_{2\Sigma} / ((1 - K_{рш2}) b_{п\Sigma2}) = \sqrt[4]{P_{ВД}} \gamma_1 / \\ &/ [\sqrt[4]{a_{MT}^3} (1 - K_{рш2}) 4\pi (1 - 1/\xi_T) (1 - \alpha_{32}) / (1 + 1/\xi_T)^2]; \end{aligned} \quad (3.154)$$

$$b_{п\Sigma1(2)} = 2\pi D_c (1 - \alpha_{31(2)}) / (1 + 1/\xi_T), \quad (3.155)$$

де $S_{1\Sigma}$ і $S_{2\Sigma}$ – сумарні площі пазів в кожному із поперечних перерізів сердечників статора і ротора; $K_{зп}$ – повний коефіцієнт заповнення паза статора; D_c – середній діаметр ЕМС ТАД (рис. 3.13, а); $K_{рш1(2)}$ – розрахунковий коефіцієнт співвідношення висоти шліца і клина статора (ротора) до висоти зубця статора (ротора) $h_{z1(2)}$; γ_1 – розрахунковий коефіцієнт трансформації статора відносно ротора [121]; $b_{п\Sigma1(2)}$ – сумарна ширина паза статора (ротора); $\alpha_{31(2)}$ – розрахунковий коефіцієнт зубців статора (ротора), що залежить від відношення $K_{B\Sigma1(2)}$ [121] амплітуд індукції в зубці $B_{z\Sigma1(2)}$ на D_z і індукції в робочому зазорі $B_{\deltaн}$, а також коефіцієнта заповнення пакета магнітопроводу ЕТС $K_{зс}$,

$$\alpha_{31(2)} = 1/(K_{3c}K_{B3\Sigma 1(2)}). \quad (3.156)$$

Втрати в обмотці статора визначаються, згідно [121], з використанням (3.145 – 3.147), (3.149), (3.151) і (3.155)

$$P_{ел1T} = m_1 I_1^2 r_1 = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})(J_1^2 / \sigma_{м20}) \Pi_{w1T}^*, \quad (3.157)$$

де I_1 – струм обмотки статора; Π_{w1T}^* – безрозмірний показник основних втрат обмотки статора ТАД

$$\begin{aligned} \Pi_{w1T}^* = & (1 + 1/\xi_T) / (\sqrt[4]{a_{MT} 2} (1 - 1/\xi_T)) \times \\ & \times [(1 - 1/\xi_T) / (1 + 1/\xi_T) + K_L \beta \pi / (2p)] \end{aligned} \quad (3.158)$$

Основні втрати в обмотці ротора ТАД знаходять на основі (3.148), (3.150), (3.152), (3.154) і (3.155)

$$P_{ел2T} = m_2 I_2^2 r_2 = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 (J_2^2 / \sigma_{a20}) \Pi_{w2T}^*, \quad (3.159)$$

де I_2 і J_2 – струм і щільність струму обмотки ротора; Π_{w2T}^* – безрозмірний показник основних втрат обмотки ротора, які визначаються при використанні коефіцієнта γ_2 , який враховує зменшення щільності струму короткозамкненого кільця J_3 відносно щільності J_2

$$\Pi_{w2T}^* = \gamma_1 / (2\sqrt[4]{a_{MT}}) [1 + \gamma_2 (1 + 1/\xi_T) / (p(1 - 1/\xi_T))]. \quad (3.160)$$

Втрати в ЕТС зубців $P_{мz1T}$ і ярма P_{ma1T} магнітопроводу статора ТАД визначаються з (3.153), (3.155) і з урахуванням відомих коефіцієнтів збільшення втрат зубців K_{dz} і ярма K_{da} [10], значень щільності ЕТС ρ_c , питомих втрат ЕТС P_c при частоті мережі 50 Гц і індукції 1 Тл, а також виразів коефіцієнта α_{31} і маси ярма m_{a1T} [103]

$$P_{Mz1T} = P_c K_{dz} B_{\delta z}^2 \rho_c K_{3c} h_{z1} f_{\Pi zT} D_c^2 = P_c K_{dz} B_{\delta z}^2 \rho_c (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{z1T}^*; \quad (3.161)$$

$$P_{Ma1T} = P_c K_{da} K_{Ta} B_{a1}^2 m_{a1T} = P_c K_{da} K_{Ta} B_{a1}^2 \rho_c K_{Ba}^2 (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 \Pi_{a1T}^*, \quad (3.162)$$

де $f_{\Pi zT}$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу індукції зубців статора уздовж $l_{\delta T}$; K_{Ta} – коефіцієнт підвищення маси ярма трапецеїдального перерізу відносно еквівалентного по площі ярма прямокутного перерізу

(трапеційдальність забезпечує рівномірний розподіл індукції B_{a1} в ярмі вздовж $l_{\delta T}$); Π_{z1T}^* і Π_{a1T}^* - відносні показники втрат зубців і втрат ярма статора ТАД:

$$f_{\Pi zT} = \int_0^{2\pi} \int_{\xi_T}^1 (1/(4\xi_T) - (1 - \alpha_{31})/4) \times \\ \times ([1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36}\xi_T^{0,15}]/[K_{3c}(1 - \xi_T(1 - 1/(K_{B3\Sigma 1}K_{3c}))))]^2 \times \\ \times d(1/\xi_T)d\varphi; \quad (3.163)$$

$$\Pi_{z1T}^* = K_{3c}f_{\Pi zT}/ \\ /[\sqrt[4]{a_{MT}}(1 - K_{pш1})K_{3п}4\pi (1 - 1/\xi_T)(1 - \alpha_{31})/(1 + 1/\xi_T)^2]; \quad (3.164)$$

$$K_{Ta} = [1 + (1 - 0,167(\xi_T - 1)^{1,36}\xi_T^{0,15})/\xi_T]/[(1 + 1/\xi_T)(1 - K_B)]; \quad (3.165)$$

$$\Pi_{a1T}^* = \sqrt[4]{a_{MT}^3}K_{3c}K_{Ta}(\pi/p)\alpha_{31}(1 - 1/\xi_T)/(1 + 1/\xi_T), \quad (3.166)$$

де α_{31} – відомий з [11] розрахунковий коефіцієнт ярма.

Втрати в ЕМС ТАД визначаються на основі [104] і з використанням (3.158), (3.160), (3.164), (3.166) рівнянням виду (3.143)

$$P_{\Pi T} = K_{дMT}(P_{ел1T} + P_{ел2T} + P_{Mz1T} + P_{Ma1T}) = \\ = (\sqrt[4]{\Pi_{ВД}})^3 K_{дMT}(J_2^2/\sigma_{a20})\Pi_{\Pi T}^*, \quad (3.167)$$

де $K_{дMT}$ – коефіцієнт наближеного врахування підвищення основних втрат ЕМС ТАД до сумарних втрат; $\Pi_{\Pi T}^*$ - показник втрат, що дозволяє визначати оптимальні геометричні співвідношення ЕМС ТАД за критерієм максимуму ККД з використанням значень геометричних відносних КЗ a_{MTE} і ξ_{MTE} , що відповідають мінімуму втрат.

$$\Pi_{\Pi T}^* = P_c B_{\delta}^2 \rho_c \sigma_{a20} / J_2^2 (K_{дз} K_{B3\Sigma 1}^2 \Pi_{z1T}^* + K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{a1T}^*) + \\ + (J_1^2 \sigma_{a20}) / (J_2^2 \sigma_{m20}) \Pi_{w1T}^* + \Pi_{w2T}^*. \quad (3.168)$$

Коефіцієнт $K_{дMT}$ видається на основі [13] виразом

$$K_{\text{дмТ}} = K_{\text{дпТ}} K_{\text{мТ}} K_{\text{днТ}}, \quad (3.169)$$

де $K_{\text{дпТ}}$ – коефіцієнт поверхнево-пульсуючих втрат холостого ходу; $K_{\text{мТ}}$ – коефіцієнт механічних втрат; $K_{\text{днТ}}$ – коефіцієнт додаткових навантажувальних втрат ТАД.

Враховують $K_{\text{дпТ}}$ і $K_{\text{мТ}}$ підвищення втрат в ЕТС поверхневими $P_{\text{пов1(2)}}$ і пульсаційними $P_{\text{пул1(2)}}$ складовими, а також механічними і вентиляційними втратами $P_{\text{мехТ}}$ визначаються інтегральними залежностями з використанням [104]

$$P_{\text{мехТ}} = K_{\text{тТ}} (f_1/p)^2 D_3^3 / 8 \int_{\xi_T}^1 \frac{1}{\xi_T^2} d(1/\xi_T) =$$

$$= (K_{\text{тТ}}/24) (f_1/p)^2 D_3^3 (1 - 1/\xi_T^3); \quad (3.170)$$

$$P_{\text{пов1(2)}} = 0,25 K_{\text{о1(2)}} (z_{2(1)} 60 f/p)^{1,5} (\pi/z_{2(1)})^2 B_{\delta 3}^2 z_{1(2)} D_3^4 \times$$

$$\times \int_{\xi_T}^1 \beta_{\text{о1(2)}}^2 / \xi_T^2 \left(1 + K_{b\text{ш1(2)}} / \left[\pi \xi_T / z_{2(1)} - K_{b\text{ш1(2)}} + 5 K_D \pi \xi_T^2 / (z_{1(2)} K_{b\text{ш1(2)}}) \right] \right)^2 \times$$

$$\times (1 - 0,167 (\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15})^2 (\pi / (z_{1(2)} \xi_T) - K_{b\text{ш1(2)}}) d(1/\xi_T); \quad (3.171)$$

$$P_{\text{пул1(2)}} = 1,1 \times 10^{-7} (z_{2(1)} 60 f_1/p)^2 \rho_c K_{\text{зс}} B_{\delta 3}^2 h_{z1(2)} z_{1(2)}^2 D_3^2 \times$$

$$\times \int_{\xi_T}^1 K_{b\text{ш1(2)}}'^4 / (5 K_D \xi_T^2 + K_{b\text{ш1(2)}}')^2 \times (1 - 0,167 (\xi_T - 1)^{1,36} \xi_T^{0,15}) /$$

$$/ (K_{\text{зс}} (1 - \xi_T) (1 - 1/(K_{B\text{з}\Sigma 1(2)} K_{\text{зс}})))^2 \times$$

$$\times \left(1 / (16 \pi \xi_T - [1 - \alpha_{\text{з1(2)}}] / (16 \pi^2)) \right) d(1/\xi_T); \quad (3.172)$$

де $K_{\text{тТ}}$ – емпіричний коефіцієнт тертя; $K_{\text{о1(2)}}$ – коефіцієнт обробки активних поверхонь статора (ротора); $\beta_{\text{о1(2)}}$ – коефіцієнт, що залежить від відношення ширини шліца пазів ротора (статора) $b_{\text{ш2(1)}}$ до робочого зазору δ ; $K_{b\text{ш1(2)}}$ і K_D – коефіцієнти відношення $b_{\text{ш2(1)}}$ і δ до D_3 відповідно; $K_{b\text{ш1(2)}}'$ – відносний коефіцієнт розкриття паза.

Приклади розрахунків показника (3.168), відповідних середніх значень розрахункових коефіцієнтів для γ_1 восьмиполюсних ЕМС ТАД і КАД представлені на рис. 3.15. При порівнянні ЕМС ТАД і КАД приймається припущення $K_{\text{дМТ}} \approx K_{\text{дМК}}$ зважаючи на ідентичності геометричних співвідношень зубців і шліцьових зон ЕМС електромагнітно-еквівалентних ТАД і КАД. Результати розрахунків екстремумів $\Pi_{\text{ПТЕ}}^*$ за рівнянням (3.168) для ЕМС ТАД, отриманих при $K_{\text{зп}} = 0,3$; $K_{\text{зс}} = 0,97$; $K_{\text{Ва}} = 2$ при $p \leq 2$ і $K_{\text{Ва}} = 1,5$ при $p > 2$; $\gamma_2 = 0,85$, $K_{\text{рш}} = 0,12$, а також трьох (мінімальному 1,338, середньому 1,903 і максимальному 2,785) значеннях γ_1 , виконаних для марок ЕТС 2013 і 2412, представлені в табл. 3.7. Екстремальні показники втрат $\Pi_{\text{ПТЕ}}^*$ для електромагнітно-еквівалентних КАД [104] представлені в табл. 3.8.

Таблиця 3.7 - Екстремуми показників втрат торцевих асинхронних короткозамкнених двигунів

γ_1 , в.о.	$\xi_{\text{ТЕ}}$	$\lambda_{\text{ТЕ}}$	$a_{\text{МТЕ}}$, в.о.	$\Pi_{\text{ПТЕ}}^*$, в.о.	$\xi_{\text{ТЕ}}$	$\lambda_{\text{ТЕ}}$	$a_{\text{МТЕ}}$, в.о.	$\Pi_{\text{ПТЕ}}^*$, в.о.
	ЕТС 2013				ЕТС 2412			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$p=1$							
1,338	2,6	0,444	10,02	4,872	2,65	0,452	18,409	4,035
1,903	2,65	0,452	14,328	7,087	2,65	0,452	27,053	5,915
2,785	2,65	0,452	21,322	10,98	2,7	0,459	40,471	9,215
	$p=2$							
1,338	2,35	0,403	16,293	2,929	2,4	0,412	27,703	2,396
1,903	2,4	0,412	21,646	4,211	2,4	0,412	38,812	3,483
2,785	2,4	0,412	30,879	6,456	2,45	0,42	59,202	5,385
	$p=3$							
1,338	2,15	0,365	29,94	2,091	2,2	0,375	50,114	1,781

1,903	2,2	0,375	41,783	2,985	2,25	0,385	73,952	2,455
2,785	2,25	0,385	58,539	4,547	2,25	0,385	105,78	3,778
$p=4$								
1,338	2	0,333	40,021	1,756	2,05	0,344	66,176	1,418
1,903	2,05	0,344	55,495	2,495	2,1	0,355	93,732	2,044
2,785	2,1	0,355	74,219	3,785	2,1	0,355	138,01	3,136

Таблиця 3.8 - Екстремуми показників втрат класичних асинхронних короткозамкнених двигунів

γ_1 , В.О.	λ_{KE}	a_{MKE} , В.О.	$\Pi_{ПТЕ}^*$, В.О.	λ_{KE}	a_{MKE} , В.О.	$\Pi_{ПТЕ}^*$, В.О.
	ETC 2013			ETC 2412		
1	2	3	4	5	6	7
$p=1$						
1,338	2,2	2,5	5,825	2,4	5,1	4,544
1,903	2,35	4,09	8,108	2,6	6,5	6,422
2,785	2,75	4,5	12,01	2,95	8	9,664
$p=2$						
1,338	1,15	13,5	3,998	1,3	20,75	3,123
1,903	1,3	16,25	5,575	1,45	25,75	4,432
2,785	1,5	19,5	8,295	1,6	32,5	6,699
1	2	3	4	5	6	7
$p=3$						
1,338	0,8	40,33	3,036	0,95	56,83	2,379
1,903	0,95	45,17	4,243	1,05	70	3,386
2,785	1,05	56,67	6,333	1,15	90,5	5,134
$p=4$						
1,338	0,65	67,25	2,647	0,75	98,625	2,076
1,903	0,75	77,5	3,703	0,85	117,63	2,958
2,785	0,85	94,25	5,534	0,95	147,25	4,491

$\Pi_{ПТ}^*$, $\Pi_{ПК}^*$, В.О.

$\Pi_{ПТ}^*$, $\Pi_{ПК}^*$, В.О.

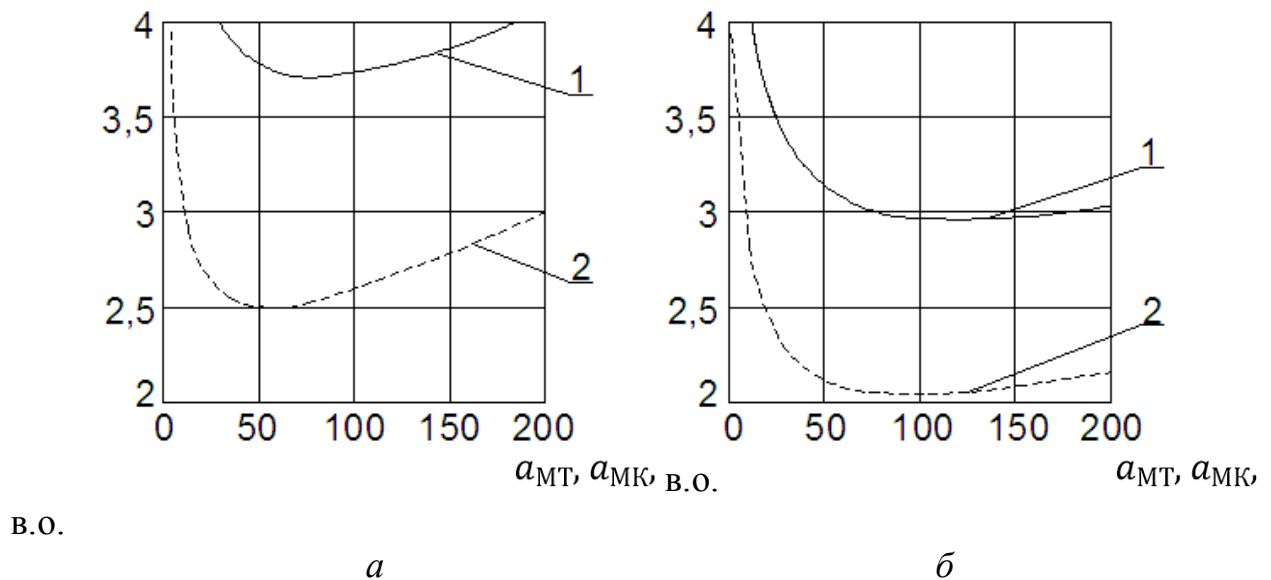


Рис. 3.15 – Залежність показників втрат восьмиполюсних варіантів електромагнітних систем асинхронних двигунів: торцевого (1) і класичного (2) виконання при використанні електротехнічної сталі 2013 (а) і 2412 (б)

3.5. Висновки до розділу 3

1. Показана можливість об'єктивного (при дотриманні принципів електромагнітної еквівалентності та ідентичності КЗ) порівняльного аналізу різних структур і оптимізації геометричних співвідношень АД на основі методу відносних показників і узагальнених геометричних КЗ.

2. Функціональні залежності мас і вартості активних частин КАД з $2p = 2$ і ОАД з $2 \leq 2p \leq 8$ не містять поєднань КЗ $a_{MK(3)E}$ і $\lambda_{\delta K(3)E}$, що забезпечують явно виражені екстремуми. Масовартісні показники ЕМС таких АД поліпшуються зі зменшенням значень КЗ $a_{MK(3)}$ і при конкретних значеннях $a_{MK(3)}$ характеризуються певними екстремальними значеннями $\lambda_{\delta K(3)E}$.

3. Можливості мінімізації $a_{MK(3)}$ і $D_{K(3)}$ КАД (ОАД) обмежені (цільові функції не існують в деяких областях малих $a_{MK(3)}$) від'ємними значеннями підкорінних доданків функціональних співмножників $f_{K2}(\lambda_{\delta K(3)}, a_{MK(3)})$ і $f_{31}(K_{зп}, \lambda_{\delta K(3)}, a_{MK(3)})$, тобто обмежені конструктивно-технологічної складністю виконання в межах D_{RK} і D_3 зубцово-пазових структур, а

мінімізація $a_{мз}$ і D_3 ОАД додатково обмежена можливістю розміщення лобових частин обмотки статора.

4. Функціональні залежності маси і вартості ЕМС КАД $2p \geq 4$ від K_3 $a_{мк}$ і $\lambda_{\delta k}$ є унімодальними функціями і характеризуються конкретними екстремальними значеннями $a_{мке}$ і $\lambda_{\delta ке}$.

5. При $2p > 2$ і в діапазоні можливих змін значень коефіцієнтів γ_1 ; γ_2 ; K_{Bz} ; K_{Ba} ; $K_{рш}$; K_D , ОАД відрізняється від електромагнітно-еквівалентного КАД поліпшеними на 3...15 % показниками вартості активної частини.

6. При $2p \geq 2$ та в зонах зміни γ_1 , близьких до граничним значень 2,785 і 1,338; показники маси ЕМС ОАД відповідно поліпшуються до 11 % і погіршуються до 15,6 % щодо електромагнітно-еквівалентного КАД. В області середнього значення γ_1 показники маси ЕМС зазначених АД, в залежності від прийнятих величин γ_2 ; K_{Bz} ; K_{Ba} ; $K_{рш}$; K_D можуть відрізнятися в межах ± 6 %.

7. Функціональні залежності маси і вартості активної частини ТАД є унімодальними функціями і характеризуються узгодженими з екстремальними значеннями $a_{мте}$ і $\xi_{те}$, а також узгодженими з результатами розробки ТАД з $2p=4$ [13].

8. Встановлено, що ЕМС ТАД з трапецієподібними перерізами ярма відрізняються від електромагнітно-еквівалентних ЕМС КАД при $p=2$, $p=3$ і $p=4$ покращеними показниками маси і вартості відповідно на (15...23)% і (20...27)%, (23...28)% і (19...23)%, (24...29)% і (20...27)%, а при $p=1$ показник маси покращується на (15...24)%, а показник вартості погіршується на (1...7)%.

9. Функціональні залежності втрат активної потужності ТАД представляються унімодальними функціями з відповідними екстремумами втрат значеннями $a_{мте}$ і $\xi_{те}$, які зростають при використанні ЕТС з меншими питомими втратами.

10. Встановлено, що ЕМС ТАД з трапецієподібними перерізами ярма відрізняються від електромагнітно-еквівалентних ЕМС КАД при $p=1$, $p=2$, $p=3$ і $p=4$ покращеними (зниженими) показниками втрат активної потужності відповідно на 8...12%, 21...24%, 28...30% і 31%, що обумовлено меншими об'ємами ЕТС ярма статорів ТАД.

МОЖЛИВОСТІ ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ БЕЗКОРПУСНОГО ВИКОНАННЯ І НЕТРАДИЦІЙНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Для виготовлення КАД і синхронних ЕМ потужністю до 250 кВ·А кожен рік електротехнічним виробництвом провідних держав витрачається сотні тисяч тон ЕТС, міді, алюмінію і конструкційних металів. Традиційна технологія виробництва магнітопроводів КАД штампуванням листів пакетів статора і ротора забезпечує коефіцієнт використання ЕТС, що складає у середньому 0,53, тобто більше 40% усієї вартісної ЕТС іде у відходи [9, 10, 13]. При традиційній будові статора в оребренних корпусах з чавуну, алюмінієвого сплаву або сталі застосовуються екологічно шкідливі технології повторного ливарного використання заготівельних відливок для виготовлення оболонок. При виробництві магнітопроводів синхронних ЕМ малої і середньої потужності виштамповки внутрішніх діаметрів статорів застосовуються для виготовлення побутового електрообладнання (з відходами) або ідуть у відходи.

Намагання створення у 70...80-х роках минулого століття маловідходних технологій магнітопроводів з застосуванням способів деформації стрічок (смуг) ЕТС не забезпечили необхідні ПТР ЕМ. Практичне використання таких технологій потребує розробки і виготовлення спеціального складного виробничого обладнання. Крім того їх використання при виробництві ЕМ передбачає застосування традиційної металомісткої конструктивної частини.

До нашого часу традиційні будова і технологія виробництва КАД та інших ЕМ не перетерпіли змін.

В розділі 4 аналізуються питання раціонального використання прокату ЕТС і нетрадиційні конструктивно-технологічні рішення підвищення екологічності і зниження витрат металу при виробництві конструктивної частини, а також інтенсифікації охолодження АД класичної схеми.

4.1. Проблеми і способи зниження відходів електротехнічної сталі при виробництві магнітопроводів

На протязі всього XX століття у промислово розвинених державах здійснювалися спроби повністю або частково усунути основний недолік КАД – значні відходи ЕТС при виробництві циліндричних штамповано-шихтованих магнітопроводів. В 30-х роках минулого століття була запропонована конструкція витого циліндричного магнітопроводу і спосіб його виготовлення навивкою на ребро стрічки ЕТС з виштампованими пазовими виїмками (рис. 4.1, *а*). Даний спосіб забезпечує, в залежності від числа полюсів p_i відповідно висоти ярма h_{as} , коефіцієнт використання ЕТС (відношення маси витраченої ЕТС до маси магнітопроводу) $K_v = 0,6...0,7$. Також в 50...60 роках виникло виробництво аксіальних магнітопроводів ТАД з коефіцієнтом використання ЕТС $K_{вп} = 0,65...0,75$, який забезпечується штамповкою пазових виїмок зі змінним кроком t_{zn} і спіральною навивкою плашмя стрічки ЕТС (рис. 4.1, *б*). Подальшим розвитком пропозицій (рис. 4.1, *а, б*) є виготовлення витих магнітопроводів з заготовок, що мають пазові просічки, та які поділяються на дві частини (рис. 4.1, *в*), а також стикуванням окремо навитого ярма і закритого на активній поверхні зубцово-пазового шару (рис. 4.1, *г*). Спосіб (рис. 4.1, *в*) підвищує використання ЕТС до $K_{вр2} = 0,75...0,85$, а конструкція, яку характеризує рис. 4.1, *г* при використанні ЕТС з $K_{вс} = 0,7...0,8$ спрощує укладання обмотки у відкриті зовні пази. Виті аксіальні магнітопроводи застосовуються у виробництві спеціальних ТАД [12, 23-25], а виті на ребро магнітопроводи були випробувані тільки в експериментальних зразках АД. Головна задача технологічної реалізації способу навивки ЕТС на ребро з пазами – керована деформація плоскої стрічки в суцільно витий магнітопровід або його активний шар з допустимим розшихтуванням зубців в пазах (шорсткість їх стінок) на протязі минулого часу не була вирішена.

Технологічні складнощі забезпечення необхідної для практичної реалізації якості витих на ребро магнітопроводів обумовили появу досліджень та дослідно-конструктивних робіт створення АД з ЕМС, що містять аксіальні (рис. 4.2) та радіальні (рис. 4.3) стикові магнітопроводи з ортогональним розташування шарів ЕТС в ярах і зубцях.

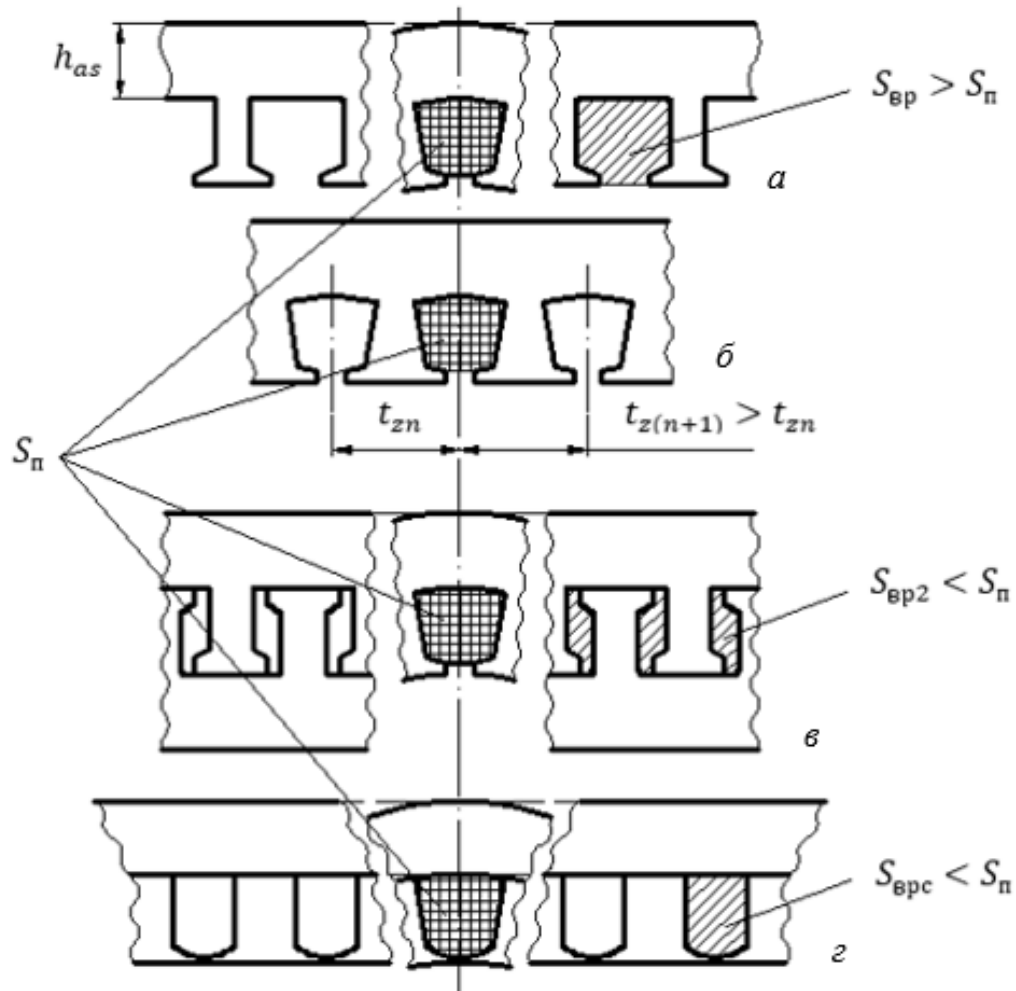


Рисунок 4.1 – Конструктивно-технологічні рішення витих зі стрічки електротехнічної сталі магнітопроводів способом навивки на ребро (а, в, г) і навивки плашмя (б): $S_{п}$ – площа пазового отвору; $S_{вр}$, $S_{вр2}$ і $S_{врс}$ – площі пазових виїмок при різних способах штамповки і навивки стрічки.

Також пропонувалось структурне роздібнення зубцово-пазового шару [26] з метою зменшення амплітуд зубцевих гармонік розподілу магніторушійної сили та покращення теплового стану обмотки. Активний розподілений шар (рис. 4.2) дозволяє застосовувати в зубцях анізотропну

ЕТС та підвищувати густину струму, однак потребує його ізоляційного відокремлення в зоні стику від ярма, що збільшує намагнічувальний струм.

Технологічним розвитком циліндричного стикового магнітопроводу з ортогональними шарами ЕТС зубців і ярма є варіанти виготовлення зубцово-пазового шару статора (рис. 4.3, *а*) і ротора (рис. 4.3, *б*) гофрируванням полоси рулонної ЕТС (рис. 4.3, *в*). Однак незалежна від патентних подробиць, гофрована зона в АД перетинається $2p$ разів головним магнітним полем і є джерелом «екранних» витрат. Розмикання закріплень гофри механічною обробкою призводить до втрати конструктивної жорсткості і потребує попереднього укладання та капсулювання обмотки. Виготовлені зразки АД з гофрованим активним шаром циліндричного маловідходного магнітопроводу показами погіршені енергетичні характеристики відносно КАД. Промислове застосування магнітопроводів, варіанти яких показані на рис. 4.1, *а, в, г* – 4.3 не відбулося, але результати робіт по їх створенні систематизовані, зокрема в [13].

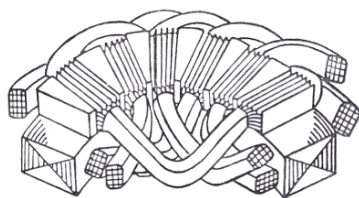


Рисунок 4.2 – Торцевий статор з активним розподіленим шаром

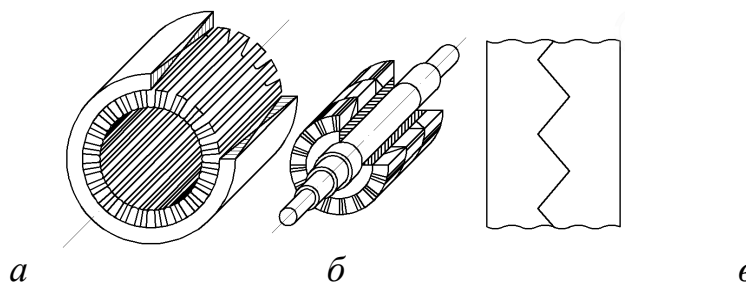


Рисунок 4.3 – Магнітопроводи статора (*а*) і ротора (*б*) з гофрованими зубцово-пазовими шарами та розділенням рулону електротехнічної сталі (*в*) для крайніх секцій активного шару ротора

Складність рішення конструкторсько-технологічної задачі створення маловідходних ЕМ змінного струму стимулювала розробку компромісних пропозицій і використання резервів класичної технології виробництва.

Компромісними пропозиціями є: повертання в циліндр плоского шихтованого пакету, подрібнення кутових відходів і пресування з них зовнішньої частини складеного ярма, тобто доповнення середньої квадратної частини магнітопроводу до циліндричної [10, 13]. Відомим також є напрямок розробки і виробництва магнітопроводів мікромашин з феромагнітного композиційного матеріалу (магнітодіелектрика) [12]. Однак зразки АД з вказаними пропозиціями мають погіршені енергетичні показники.

Резерви класичної технології уявляються в маловідходному розкроєні прокату ЕТС. Витрата смуги площею S'_c , площа зовнішніх відходів $S'_в$ і коефіцієнт використання ЕТС без враховування внутрішніх відходів $K_{зв}$ при максимально досконалій однорядній штамповці з нульовими перемичками за довжиною і шириною (рис. 4.4, а) складають:

$$S'_в = 4R_{асз} - \pi R_{асз}^2 \approx 0,858R_{асз}^2;$$

$$K_{зв} = (S'_c - S'_в)/S'_c \approx 0,785. \quad (4.1)$$

Витрати ЕТС, що відповідають (4.1), можуть бути знижені при попередньому розкроєні ЕТС на фігурні смуги (рис. 4.4, б) або при криволінійному розкроєні для багаторядної «шахматної» штамповки. В такому ідеальному випадку мінімальні відходи штампування круглих пластин з фігурної полоси ЕТС, боки якої визначають дуги окружностей радіусу $R_{асз}$, відповідають площі S_{KMN} криволінійного трикутника з центральними кутами $\pi/3$ (рис. 4.4, в)

$$S_{KMN} = S_{ABC} - 3S_{AKLM} = (\sqrt{3} - \pi/2)R_{асз}^2, \quad (4.2)$$

де S_{ABC} і S_{AKLM} – площі рівностороннього трикутника і секторів з центральними кутами $\pi/3$ (рис. 4.4, б).

Площа поверхні зовнішніх відходів S''_B , витрати смуги S''_Π на одну пластину (рис. 1.4, б) і коефіцієнт мінімальних зовнішніх відходів $K''_{ЗВ}$ визначаються з врахуванням (4.2) виразами:

$$\begin{aligned} S''_B &= 2S_{KMN} = 2R_{as3}^2(\sqrt{3} - \pi/2) \cong 0,3225R_{as3}^2; \\ S''_\Pi &= \pi R_{as3}^2 + S''_B = 2\sqrt{3}R_{as3}^2 \cong 3,464R_{as3}^2; \\ K''_{ЗВ} &= (S''_\Pi - S''_B)/S''_\Pi \cong 0,907. \end{aligned} \quad (4.3)$$

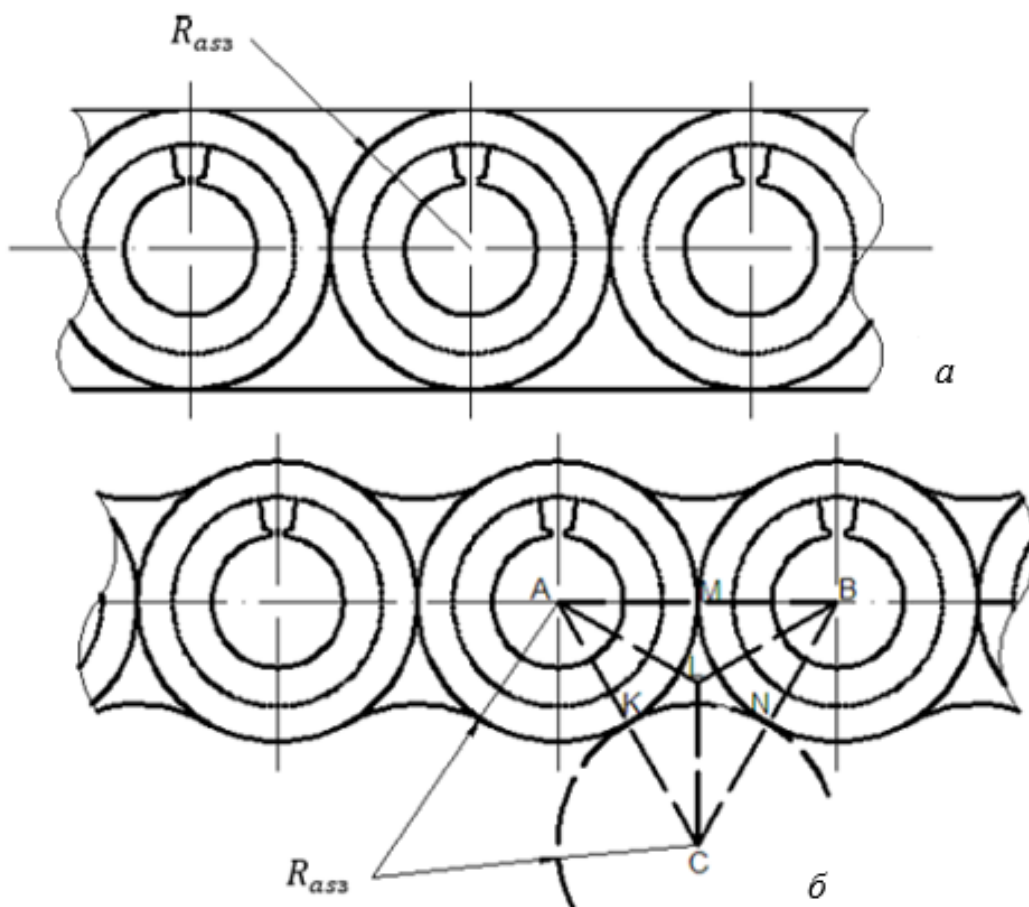


Рисунок 4.4 – Кутові відходи і варіанти конфігурацій пластин електротехнічної сталі: *a* – однорядне розкroєння стрічки з нульовими перемичками; *б* – маловідходне фігурне розкroєння.

При використанні сучасного обладнання, що забезпечує економічне розкroєння ЕТС (рис. 4.4), величина коефіцієнту зовнішніх відходів знаходиться в залежності від числа рядків розкroєння, між (4.1) і (4.3):

$$0,8 \geq K_{ЗВ} \geq 0,785. \quad (4.4)$$

В наш час загальні зовнішні відходи ЕТС відповідають (4.4) і в сукупності з внутрішніми відходами штампування пазів і центральних отворів складають 40...50%.

4.2. Асинхронні двигуни з безкорпусним статором

Розкроєння ЕТС з нульовими перемичками також може забезпечити тільки внутрішні відходи ($K_{зв} \approx 1$) у випадку вирубки гранених або квадратних пластин (рис. 4.5). Подібна форма не відповідає круглому корпусу і застосовується в малих ЕМ побутового призначення. При безкорпусному виконанні ЕМ підшипникові щити фіксуються в отворах кутових зон, а вказані зони (рис. 4.5, а) є «прихованими» відходами. Огранена форма зовнішнього контуру магнітопроводу утворює зміну висоти ярма і пульсацію амплітуди головного магнітного поля, а кути граней в електромагнітному відношенні недовикористані. В [10, 13] з метою економії ЕТС, як вже згадувалося, пропонується наближення граней до дна пазів та їх доповнення до круга феромагнітними (штампованими або пресованими з подрібнених відходів) накладками. При цьому суттєво ускладнюються конструкція і технологія виготовлення та не усувається повністю вплив на характеристики періодичної зміни магнітного опору ярма вздовж кутової координати.

Для збільшення поверхні охолодження статора і послаблення впливу зміни висоти ярма на показники безкорпусної ЕМ пропонується зсув на кут $\gamma_{зс}$ («веєрне» складання) суміжних шарів ЕТС при формуванні магнітопроводу (рис. 4.5, б) [113].

В цілому корпус статора (станина) і підшипникові щити створюють необхідні для нормального функціонування ЕМ шорсткість будови та поверхню охолодження, а також захист ЕМС від зовнішнього середовища, рух ротора та при наявності фланців – установку елементів механізму

(приводу). Удосконалення станини з метою покращення теплового стану та зниження матеріалоємності конструктивної частини КАД припускає підвищення теплопровідності зменшенням товщини і удосконалення оребрення цієї станини [44, 45]. Актуальним завданням є розробка нових рішень конструктивної частини ЕМ, таких, що забезпечать значну економію чорних і кольорових металів та усунення шкідливого і енергоємного ливарного виробництва, наприклад заміною більш прогресивним та екологічно чистим штампованим виробництвом. Більш ефективним рішенням задачі підвищення ефективності охолодження і зниження матеріаломісткості ЕМ є певна відмова від оболонки, що охоплює ярмо статора як в захищеному, так і в закритому виконаннях АД.

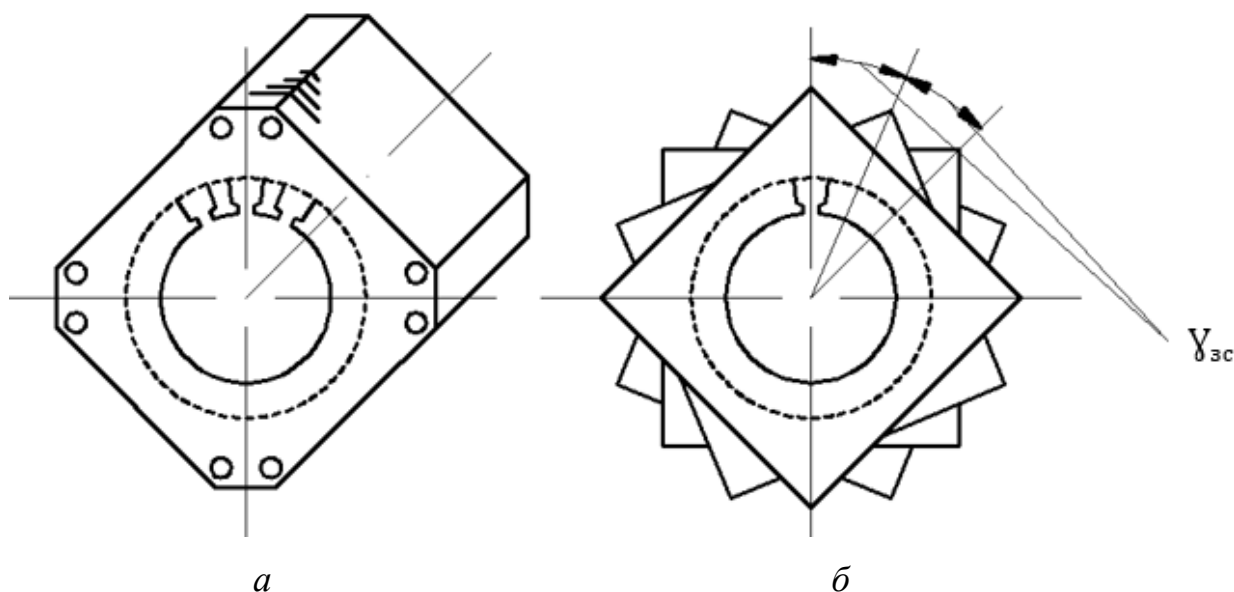


Рисунок 4.5 – Варіанти магнітопроводу статора з пластин електротехнічної сталі граненої форми (а) та прямокутних пластин (б) з тангенціальним зсувом при складанні

З точки зору забезпечення вологозахисності внутрішня порожнина корпусу з активною частиною повинна бути або пов'язана з зовнішнім середовищем, або герметична, тому що накопичений при зміні температурних режимів конденсат призводить до швидкого виходу з ладу КАД, наприклад шахтного виконання. Герметизація внутрішньої порожнини

суттєво подорожчує АД і застосовується в спеціальних, наприклад занурених ЕМ [61]. Тому відсутність зовнішнього корпусу при закритому виконанні АД не знижує надійність, така деталь забезпечує віброударостійкість та покращує охолодження. В зв'язку з цим, при конструктивному забезпеченні захищеності і стійкості (жорсткості) будови ЕМ станина може бути вилучена або замінена легким кожухом. Проблема захисту ЕМС від впливу зовнішнього середовища повинна вирішуватись на основі якісного просочення і довготривало стійких, наприклад епоксидних покриттів магнітопроводів [9].

В [9] на основі аналізу стану електромашинобудування констатується «глухий кут» подальшого розвитку КАД і пропонується вихід з застою в удосконаленні на основі розробки «інтелектуальних» безкорпусних ЕМ змінного струму. Пропонується складання з повертанням на $\pi/2$ пакетів пластин (рис. 4.6, а) маловідходного розкроєння (рис. 4.6, б) з метою інтеграції теплообміннику з магнітопроводом статора.

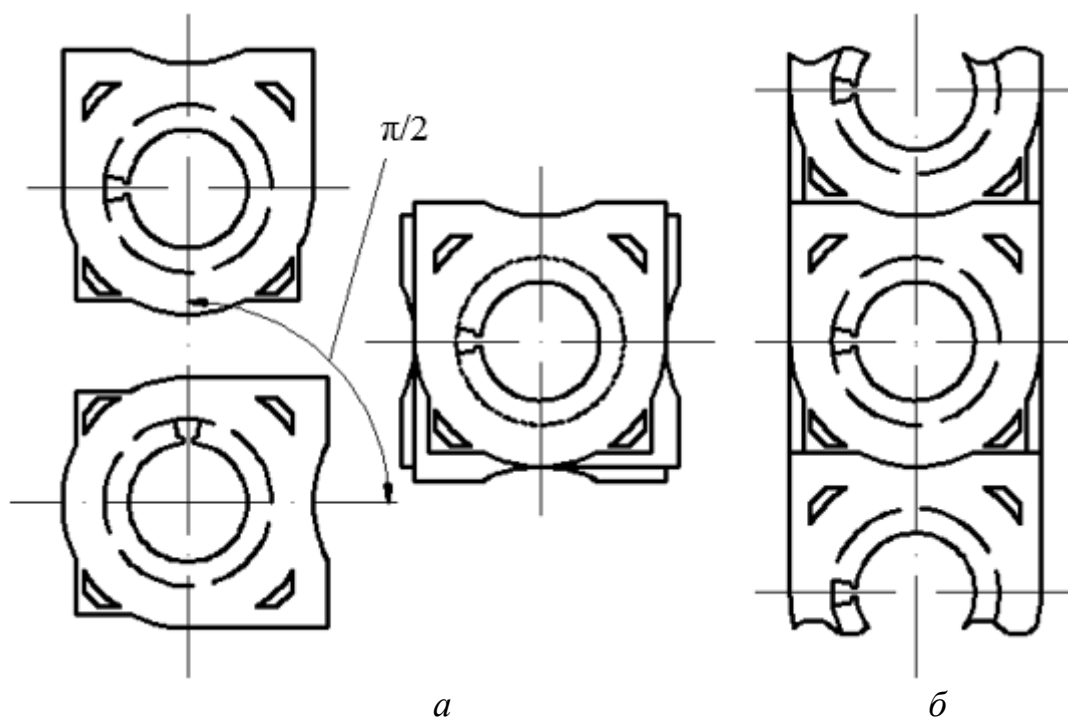


Рисунок 4.6 – Магнітопровід статора з ребрами тангенціального охолодження: а – формоутворення зовнішнього контуру; б – розкрій смуги електротехнічної сталі.

Застосуванням розкroєння ЕТС (рис. 4.6) утворюються виступи переривчатого oreбрення на зовнішній поверхні статора, що надає можливість створення так званого тангенціального охолодження ЕМ (рис. 4.7). Складовими конструктивної частини ЕМ з тангенціальним охолодженням є наявність легкого зовнішнього кожуху кругової (рис. 4.7, *а*) або прямокутної (рис. 4.7, *б*) форми з отворами виходу повітряного потоку охолодження, а також торцеві трубчаті опорні елементи та наскрізні планки. Опорні елементи стягують магнітопровід статора в аксіальному напрямку, а опорні планки проходять крізь отвори в виступах та закріплені на торцевих елементах, що замінює скріплюючу дію станини.

Додатково до зниження зовнішніх відходів розкroєння ЕТС, підвищення екологічності та енергоресурсозбереження, відмовою від металевих ребристих корпусів знижуються додаткові втрати в місцях торкання металу з поверхнею магнітопроводу. Ергономічним є поєднання форми ЕМ (рис. 4.7, *б*) з будовою сучасних верстатів. Також згідно [9] метод тангенціального охолодження є альтернативою більш коштовним способам (трубчатого, рідинного та термосифонного) охолодження [13] аж до потужностей порядку МВт.

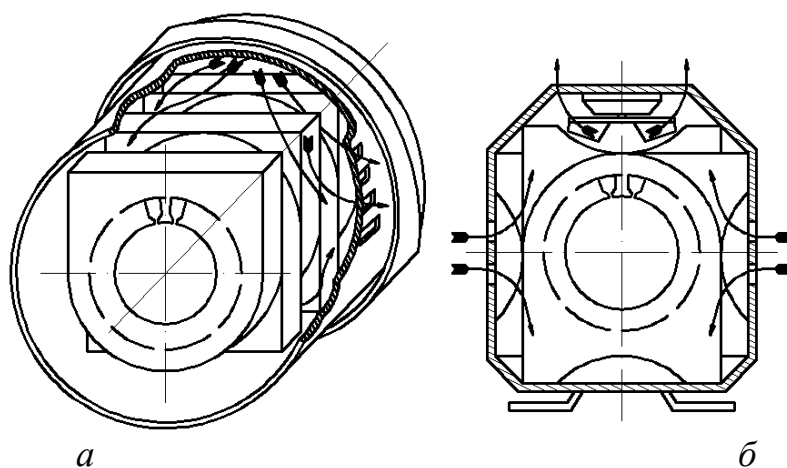


Рисунок 4.7 – Принцип руху повітря в електричній машині з аксіально-тангенціальним охолодженням (*а*) та з тангенціальним охолодженням і застосуванням незалежної вентиляції з вбудованим електровентилятором (*б*)

В статорах АД з багатоплощинним магнітопроводом (рис. 1.10, *а*) зона ярма з розміщених між гранями суміжних шарів, що вигнуті на кут 60° та накладені один на другий і з'єднані зварюванням, виконує функції жорсткого корпусу. Це обумовлено тим, що внутрішні або зовнішні поверхні похилих зон ярма можуть бути елементами опори статора (з'єднання з конструктивними деталями). Вузлами спряження з підшипниковими щитами можуть служити нажимні елементи чашовидної форми [3, 77], що опираються на внутрішні поверхні виступів похилих зон ярма, з'єднані з ними зварюванням та виготовляються способом об'ємної штамповки. Для забезпеченого заданого рівня віброударостійкості і можливості вентиляції каналів між накладеними ділянками (рис. 1.10, *а*), стінки нажимних елементів виконуються гофрованими, а при складанні протилежні елементи зсуваються на кут $\pi/4$. Дно кожного з елементів прилягає до торцю магнітопроводу, а центральний отвір може бути з зубцями, які запобігають від розпушення зубці статора.

Головна особливість багатоплощинних магнітопроводів (рис. 1.10, *б*) – просторова структура шарів ЕТС пов'язана з їх формоутворенням. Забезпечення необхідної форми окремого шару технологічних труднощів не уявляє однак додає нову (зайву) операцію. Недолік окремого формоутворення кожного шару усувається способом інтегрального вигину [3, 77] ділянок пластин заготовки з одночасним опресуванням пакету подібного магнітопроводу (рис. 4.8). Виконується складання пакету заготовки плоских пластин (рис. 4.8, *а*) і його встановлення на оправку – основу згинального пристосування. Формування магнітопроводу (рис. 4.8, *б*) здійснюється послідовною дією на заготовку деталей оснастки. Використовується стандартний прес подвійної дії з циліндром обтиску і згинальними виступами. Для повного співпадіння поверхонь активної і конструктивної частин, формування магнітопроводу доцільно здійснювати з встановленими в пристосування (рис. 4.8) нажимними елементами (рис. 4.8,

в). Другою особливістю багатоплощинних магнітопроводів є тангенціальний зсув суміжних шарів або груп шарів ЕТС. Згідно [3, 32] стандартне штампувальне обладнання необхідно доповнити укладальником, який періодично після кожного шару або секції (пакету) шарів повертає заготовку пакету на кут $\pi/4$. Також пред'являються сучасні вимоги до допусків кутових і лінійних розмірів пазових отворів шарів ЕТС магнітопроводу. Послаблення вимог до точності розмірів можливо відділенням в кожному шарі ЕТС зубцевої та основної частини яремної ділянок додатковою вирубною операцією. В цьому випадку багатоплощинна частка магнітопроводу з нажимними елементами є своєрідною станиною.

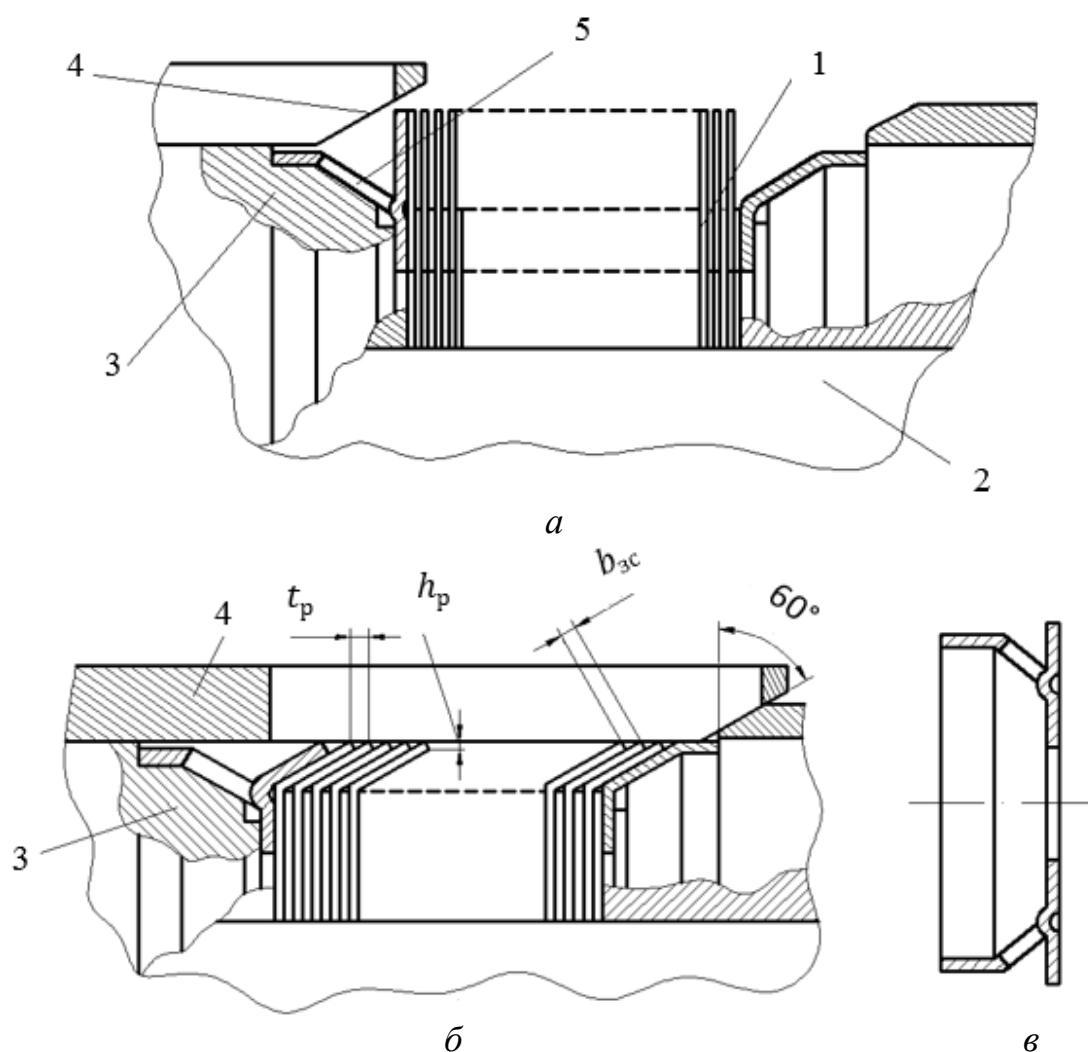


Рисунок 4.8 – Пристосування формування багатоплощинного магнітопроводу:

a – вихідна позиція; $б$ – кінцева позиція; 1 – пакет заготовки; 2 – основа;

3 – циліндр обтиску; 4 – згинальні виступи; 5 – нажимний елемент (в).

Підвищення екологічності і зниження матеріалоємності виробництва АД можливе також при заміні ливарного виготовлення з алюмінієвого сплаву робочих коліс вентиляторів зовнішнього обдуву на штамповані з алюмінієвого або сталевого прокату [114]. Послідовність операцій вказаного способу показана на рис. 4.9 і містить штамповку плоскої заготовки з кутовими виїмками (рис. 4.9, а), формування лопатей вигином на $\pi/2$ ділянок частин заготовки між виїмками (рис. 4.9, б) і формовку модулів (рис. 4.9, в) вигином ділянок заготовок між лопатями на заданий гострий кут. Робоче колесо (рис. 4.9, г) формується накладанням і скріпленням (точковим зварюванням) за меншою мірою двох тангенціально зсунутих модулів.

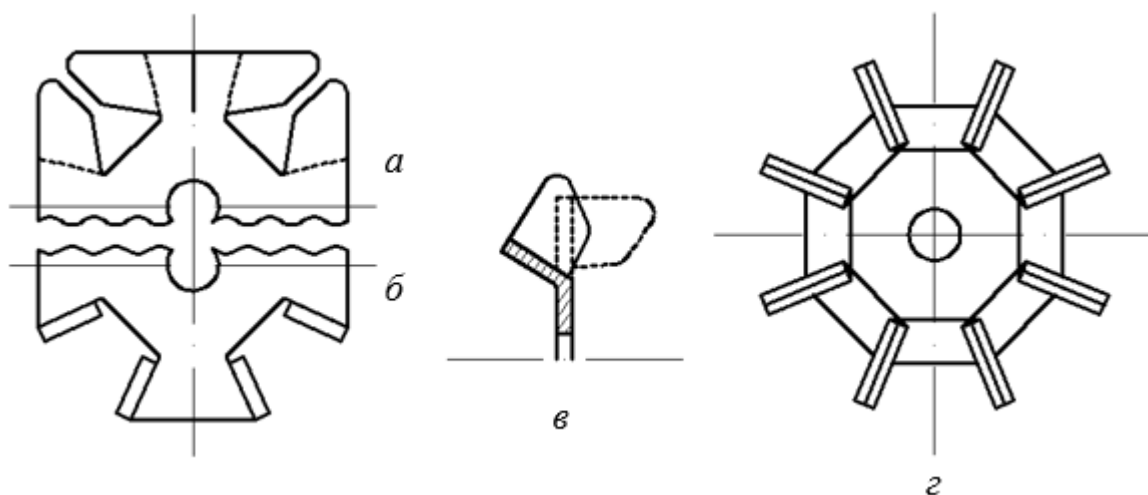


Рисунок 4.9 – Спосіб виготовлення штампованого робочого колеса вентилятора зовнішнього обдуву статора: а – плоска заготовка; б – заготовка з вигнутими лопатями; в – формування модулів вигином ділянок плоскої заготовки між лопатями; г – робоче колесо вентилятора з двох накладених тангенціально зсунутих модулів.

При цьому забезпечується високий коефіцієнт розкроснення металу і зниження маси вентилятора (товщина подвоєних лопатей є меншою мінімально можливої товщини стінок відливку).

4.3. Варіанти конструктивного і теплоаеродинамічного удосконалення безкорпусних статорів

Важливим способом енергоресурсозбереження є інтенсифікація теплообміну ЕМ з зовнішнім середовищем або холодоагентом.

Основна частина теплової енергії, що виділяється в статорі закритого АД, передається через тепловий опір, що визначається виразом [115]

$$R_{\theta} = h_{as}/(\lambda_c \Pi_a) + \delta'_k/(\lambda'_k \Pi_a) + \delta_k/(\lambda_k S_T) + 1/(\alpha_v S_T), \quad (4.5)$$

де λ_c – теплова провідність ЕТС в напрямку шихтовки; Π_a – площа поверхні контакту ярма з корпусом; δ'_k і λ'_k – величина і теплова провідність контактного зазору між ярмом і корпусом; δ_k і λ_k – товщина і провідність матеріалу корпусу; S_T і α_v – площа зовнішньої поверхні тепловідводу і коефіцієнт тепловіддачі охолоджуючому середовищу.

Традиційними засобами покращення теплового стану АД, що визначаються (4.5) є: збільшення S_T і зменшення δ_k при збереженні жорсткості оболонки оребренням корпусу, збільшення α_v , шляхом, наприклад зовнішнього обдуву і зменшення δ'_k [115]. Більш радикальним засобом зменшення R_{θ} є часткова або повна відмова від оболонки, що прилягає до ярма, при цьому в (4.5) вилучаються середні складові.

Суттєвим резервом зниження матеріаломісткості АД інтенсифікацією теплообміну є підвищення α_v . На основі теплових досліджень АД з тангенціальним магнітопроводом схеми (рис. 4.5), що містить 24 модуля по 4 пластини, які зсунуті на $\pi/6$, встановлено [113], що збільшення поверхні охолодження не призводить до помітного зниження температури. Тому зроблено висновок про необхідність підвищення α_v зовнішнім обдувом. Однак аксіальний обдув каналів гвинтоподібного оребрення пов'язаний з підвищеними витратами потужності на вентиляцію при подоланні аеродинамічного опору подібних ребер.

Величина α_v залежить від стану потоку охолодження і властивостей поверхонь охолодження. Недоліком загальноприйнятого в КАД способу аксіального охолодження зовнішнім обдувом є гладка поверхня тепловіддачі і значна довжина у порівнянні з поперечними розмірами поздовжніх ребер охолодження в аксіальному напрямку. Така конструктивна особливість ламінеризує початково турбулентний потік охолодження і відповідно знижує α_v за довжиною вентиляційних каналів [9, 31, 115]. У випадку трьох варіантів активної довжини статора втрати, що відводяться станиною середнього пакету на 40% перевищують втрати, що відводяться станиною короткого пакету, де суттєву роль відіграють підшипникові щити [9]. Крім того, повітря при русі вздовж ребер охолодження нагрівається і піднімається до верху до досягнення краю станини. Вказані недоліки знижують ефективність даного способу охолодження.

Тангенціальний зсув пакетів секціонованого магнітопроводу з метою інтенсифікації теплообміну при зовнішньому обдуві безкорпусного АД вперше запропоновано в [116]. В такому магнітопроводі пакети ЕТС з виштампуваними виступами на зовнішньому діаметрі ярма зсунуті один відносно другого тангенціально з утворенням переривчатих ребер охолодження статора (рис. 4.10, а, б). Конструкція забезпечує турбулізацію при зсуві повітряного потоку в зоні спряження пакетів і підвищення α_v , а також стабілізацію тепловіддачі статора при зміні активної довжини варіантів АД з уніфікацією поперечної геометрії магнітопроводу (рис. 4.10, в, г). Збільшується площа S_t на загальну величину торцевих поверхонь ребер зсунутих пакетів. Однак діаметр описаного навколо ребер кола, заготівельний об'єм і відходи ЕТС виготовлення магнітопроводів (рис. 4.10, а, б) суттєво зростають.

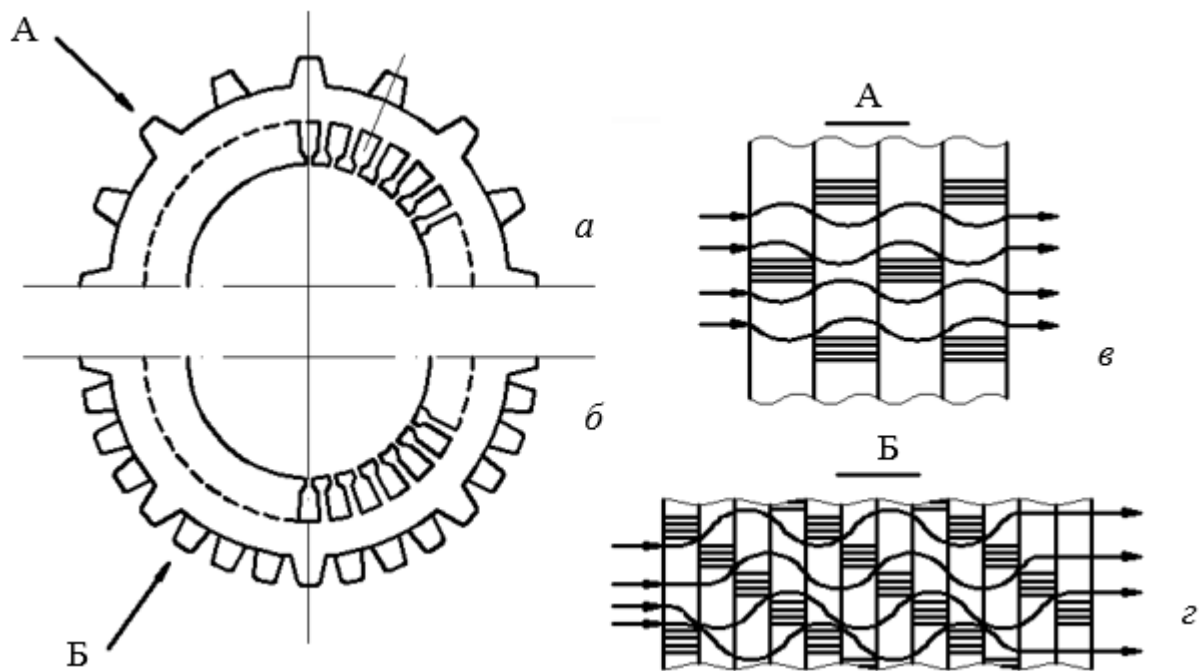


Рисунок 4.10 – Спосіб інтенсифікації тепловідводу з оребреного магнітопроводу підвищенням коефіцієнту тепловіддачі і площі поверхні в короткому (а) і довгому (б) секціонованих пакетах та зміна турбулізації потоку охолодження регулюванням довжин і куту зсуву секцій (в, з)

Аналогічно конструкції (рис. 4.10) інтенсифікація теплообміну зі стабілізацією α_v в аксіальному напрямку досягається аксіально-тангенціальним (рис. 4.7, а) або тангенціальним (рис. 4.7, б) охолодженням ребер та поверхонь пакетів (рис. 4.6, а), що створені з маловідходним розкромленням ЕТС [9].

Важливою особливістю технічних рішень [9, 116] є можливість регулювання, в залежності від активної довжини, ширини пакетів $\Delta_{cs1(2)}$, величин еквівалентного прохідного перерізу вентиляційних каналів та α_v і S_T . Це надає можливість збільшення числа потужностей в заданій висоті вісі обертання при коротких (рис. 4.11, а) та довгих (рис. 4.11, б) активних довжинах магнітопроводів ($\Delta_{cs1} < \Delta_{cs2}$).

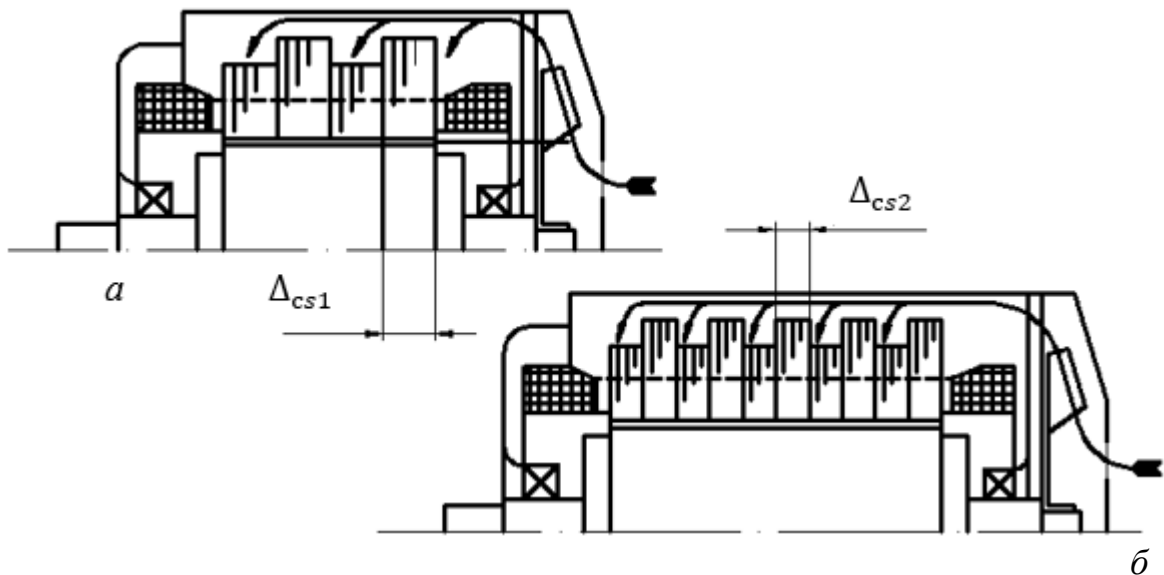


Рисунок 4.11 – Інтенсифікація охолодження електричної машини тангенціальним обдувом:

a – короткий пакет статора; *б* – довгий пакет статора.

Подальшим розвитком конструкцій (рис. 4.7, 4.10) є магнітопровід (рис. 4.12, *a*), який реалізує спосіб тангенціального або аксіально-тангенціального охолодження (рис. 4.11) при відсутності зовнішніх відходів розкриття ЕТС та спрощенні технології виготовлення [3, 117]. Технологія спрощується вилученням операцій повертання пакетів, а зовнішні відходи відсутні при вирубанні пластин ЕТС (рис. 4.12, *б*) з формою зовнішнього контуру, що відрізняється та чергується в суміжних пакетах магнітопроводу. Вказана форма (рис. 4.12, *a*) утворюється поперечним розділом смуги ЕТС з подвійним кроком штампування $2t_{\text{ш}}$ по відношенню до кроку $t_{\text{ш}}$ для пазових і допоміжних отворів.

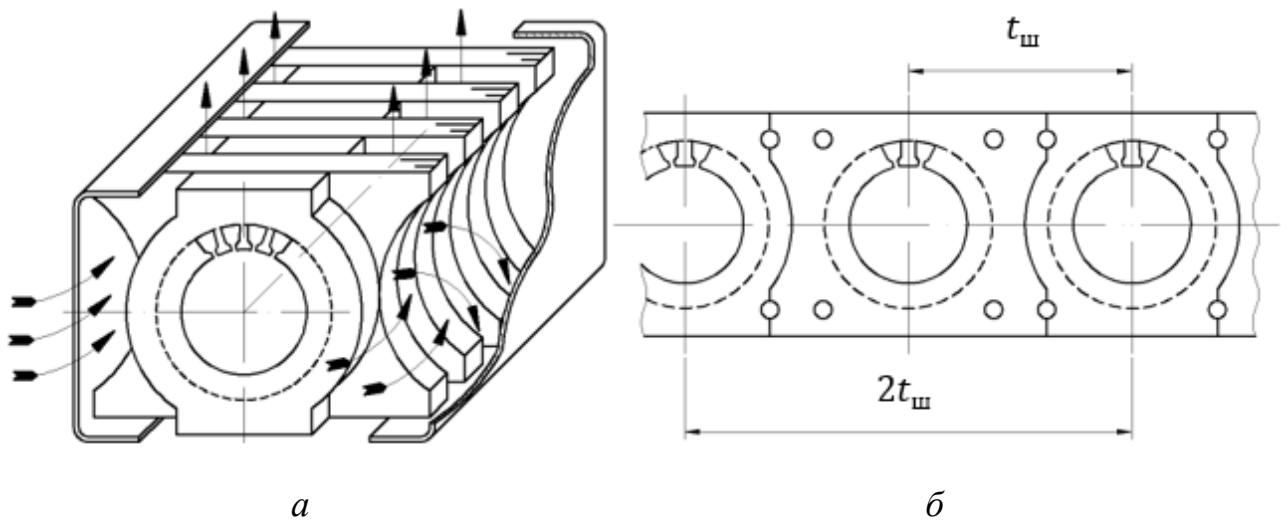


Рисунок 4.12 – Конструктивна схема (а) і розкросення смуги (б) електротехнічної сталі для виготовлення магнітопроводу безкорпусного статора з аксіально-тангенціальним охолодженням

Іншим способом інтенсифікації теплообміну при зовнішньому обдуві статора є застосування магнітопроводу з багатоплощинними ділянками ярма (рис. 1.10, а) або виступами (рис. 4.13, а), що утворюють при вигині на $\pi/3$ і накладанні один на один ребра на зовнішній поверхні ярма (рис. 4.13, б) [3, 118]. Вказаний спосіб оснований на інтенсифікації теплообміну при турбулентній течії охолоджувача застосуванням поверхонь зі штучно утвореною шорсткістю, наприклад різьбою. Згідно [119] такий спосіб є ефективним при наявності гострих кромek і відношенні параметрів жорсткості (крок/висота) $t_p/h_p \geq 1$. Вказану умову задовольняє магнітопровід з параметрами «штучної» шорсткості поверхонь охолодження, що визначаються товщиною прокату ЕТС δ_c і кутом вигину на $\pi/3$ кутових зон (рис. 4.8, б) або виступів ярма (рис. 4.13, а) відносно площин зубців:

$$t_p = \delta_c / \sin(\pi/6); \quad h_p = \delta_c \sin(\pi/3); \quad t_p/h_p \approx 2,31. \quad (4.6)$$

Якщо в зонах кутових відходів (рис. 4.13, а) виконати виступи висотою h_v , суміжні пластини зсунути на $\pi/4$, можливо отримати магнітопровід з багатоплощинною структурою шарів виступів ЕТС, що утворюють ребра (рис. 4.13, б). На периметрі таких ребер утворюється штучна шорсткість з

параметром (4.6). При загальному числі ребер n_p в подібному магнітопроводі, кожен елементарний шар товщиною δ_c містить $n_p/2$ виступів, які при вигині на $\pi/3$ зсуваються на $D_{zc} = \delta_c \operatorname{tg} 60^\circ$. Згідно позначень елементів кожного виступу (рис. 4.13, б), площі поверхонь охолодження δ_p і $S_{p\delta}$, які при діаметрі зовнішньої поверхні ярма статора D_a обмежені діаметром D'_a класичних радіальних ребер, а також меншим діаметром багатоплощинних ребер, складають:

$$D'_a = D_a + 2h_b; \quad S_p = n_p l_\delta (FB + BC + CD); \quad (4.7)$$

$$S_{p\delta} = \Delta S_\delta + S_p/2 = n_p l_\delta (FB + BC + CD + FD\sqrt{3})/2, \quad (4.8)$$

де l_δ – активна довжина магнітопроводу; ΔS_δ – загальна площа збільшення поверхонь охолодження при вигину виступів, що визначається з умови ідентичності площ поверхонь торців виступів S_{FBCD} і $S_{F'B'C'D'}$ (рис. 4.13, б) виразом

$$\Delta S_\delta = (S_{FBCD} + b_{zc}FD - S_{F'B'C'D'})n_p l_\delta / (2\delta_c) = FDn_p l_\delta \sqrt{3}/2.$$

Реальної конфігурації ребер охолодження корпусу КАД відповідають ребра [44, 45] зі співвідношеннями елементів їх геометрії:

$$FB = CD \approx 1,1h_b; \quad BC \approx h_b/4; \quad FD \approx h_b/4. \quad (4.9)$$

З (4.7) – (4.9) можна отримати співвідношення:

$$S_p = 2,45n_p l_\delta h_b; \quad S_{p\delta} = 1,658n_p l_\delta h_b; \quad S_{p\delta}/S_p = 0,676. \quad (4.10)$$

З (4.10) слід, що утворена $n_p/2$ виступами площа $S_{p\delta}$ відносно площі S_p , що утворена n_p виступами, знижується на (32...34)%. При цьому загальна площа охолодження ярма з ребрами багатоплощинної структури з врахуванням ділянок між ребрами скорочується всього на (20...24)%. Однак досягаються переваги зниження зовнішнього діаметру статора, витрати прокату ЕТС і маси оребрения, що складають відповідно (6...9)%, (20...30)% і 50% [118].

Наведені цифри зниження матеріаломісткості і можливість підвищення α_v є суттєвим резервом енергоресурсозбереження на основі розробки АД з нетрадиційними конструктивно-структурними пропозиціями (рис. 1.10, *а, б*, 4.12, 4.13) при збереженні традиційної технології виробництва магнітопроводів ЕМ змінного струму.

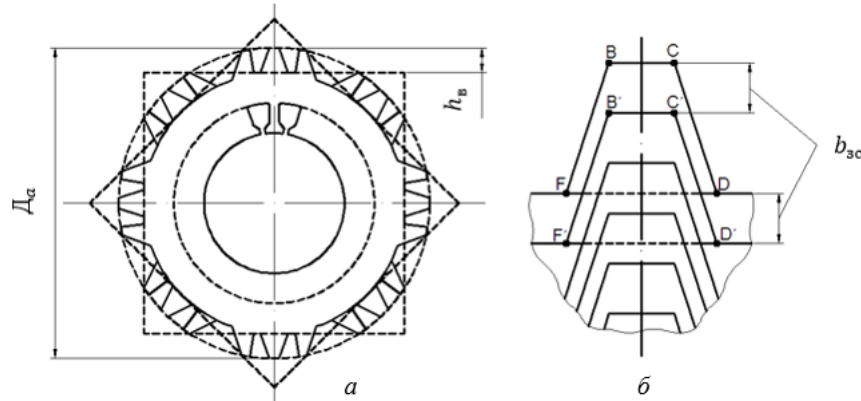


Рисунок 4.13 – Конфігурації елементарних шарів і виступів магнітопроводу з оребреною поверхнею ярма: *а* – пара суміжних елементарних шарів; *б* – радіально-аксіальний зсув виступів елементарних шарів при утворенні ребер багатоплощинної структури.

З наведених конструктивних рішень магнітопроводів (рис. 1.10, *а, б*, 4.12, 4.13) впливає, що рельєф зовнішньої поверхні ярма може змінюватися від шорсткості практично усієї поверхні (рис. 1.10, *а, б*) до каналів аксіально-тангенціального обдуву (рис. 4.12, *а*) та каналів між ребрами (рис. 4.13, *а, б*) з параметром шорсткості (4.6). При циркуляції повітря між ярмом і кожухом збільшується α_v і досягається інтенсифікація тепловідводу турбулізацією потоку охолодження [118, 119].

4.4. Короткозамкнені ротори з конусно-площинною структурою магнітопроводу

Металомісткість, ПТР, ВАХ і показники надійності АД крім статора, також суттєво залежать від особливостей короткозамкненого ротора, що

визначають такі важливі показники як ексцентричність і стабільність зазору, та інші.

Відомо, що під дією теплового розширення, магнітного притягання і відцентрових сил, при роботі АД виникає вигин валу, що викликає дисбаланс ротора і ексцентричність робочого зазору [120]. Гаряча посадка і збільшення діаметру середньої частини валу КАД підсилює шорсткість ротору, однак при цьому знижується критична частота обертання і підсилюється вигин вісі від наявності залишкових напружень, що максимальні на внутрішньому діаметрі пакету і визначаються відомим виразом [121]

$$\tau = D_R(n_{max}/1000)^2 N(\chi j) 10^5, \quad (4.11)$$

де D_R і n_{max} – зовнішній діаметр і максимальна частота обертання ротора; N – відомий коефіцієнт, який є функцією конструктивних параметрів χ і j .

Параметри χ і j визначаються виразами:

$$\chi = d_v / (D_R - 2h_{ZR}); \quad (4.12)$$

$$j = h_{PR} / D_R, \quad (4.13)$$

де d_v – діаметр центрального отвору під вал в магнітопроводі ротора; h_{ZR} – висота зубця ротора; h_{PR} – глибина пазу ротора.

З (4.11) – (4.13) виходить, що зменшення діаметру центрального отвору призводить до зниження механічних напруг в магнітопроводі і дозволяє збільшити критичну частоту обертання ротора [121, 122]. Крім того, збільшується висота ярма ротора, знижуються намагнічуваний струм і втрати в пусковому режимі.

Зниження напружень (4.11) і зменшення d_v можливо заміною закріплюючої дії запресованого валу стягуванням осердя ротора в осьовому напрямку. З метою вказаного стягування, додаткового зниження витрат ЕТС при виробництві магнітопроводів АД традиційної схеми з внутрішнім ротором, а також зменшення витрат легованої конструкційної сталі, в [122, 123] запропоновані варіанти конструкції ротора з нажимними хвостовиками, тобто ротору з

«переривчатим» валом. В конструкції ротора [122] з литою обмоткою, вихідні кінцівки, що стягують магнітопровід, містять аксіальні виступи, які фіксовані в торці магнітопроводу, а також радіальні виступи, що охоплені (облиті) алюмінієм короткозамкненої обмотки. Аксіальні виступи можуть бути пов'язані стрижнем, що утворений заповненням центрального отвору малого діаметру при заливці, або запресовані на стрижень, що центрує вихідні частини та служить для складання (рис. 4.14). Подальшим розвитком [122] є ротор [123] з конусно-площинним магнітопроводом і радіальними конусними поверхнями аксіальних виступів хвостовиків (рис. 4.14).

В варіантах ротора [123] конусно-площинна структура магнітопроводу може бути забезпечена тарілчастою формою шарів ЕТС в зоні ярма (рис. 4.14, *а*), або аналогічно ротору (рис. 1.11, *а*, *б*) конусною формою зубцевого шару (рис. 4.14, *б*) функції середньої частини валу, що скріплює осердя, виконує зона накладених один на одне та щільно стиснутих конусних ділянок кожного шару. Вказана зона передає дію механічних та електродинамічних зусиль до крайніх пластин і через виступи на опорні хвостовики.

Конструкції ротору [122, 123] дозволяють послабити вигин вісі, дисбаланс і ексцентричність зазору від внутрішніх залишкових напружень і підвищити надійність АД. При цьому економиться (20...40)% конструкційної вуглецевої сталі і скорочуються на (3...10)% відходи ЕТС. Вихідні хвостовики можуть бути складені з трубчатих елементів з виступами, що створені вигином ділянок між прорізами на торцях цих труб (рис. 4.14, *б*) [124]. При вилученні з конусно-площинного магнітопроводу центрального отвору під вал та centruючого стрижня, що досягається при підвищеній точності виробництва, конструкція ротора спрощується (рис. 4.14, *в*).

Застосування конструкцій ротора (рис. 4.14, *а*, *б*) на додаток до конструкцій статора (рис. 1.9, *а*, 4.12) надає можливість зниження відходів ЕТС виробництва магнітопроводів з 47% (рис. 4.15, *а*) до (23...26)%. Зниження відходів ЕТС супроводжується зменшенням витрат конструкційних металів виробництва елементів оболонок і валів. При

нульових перемичках розкroeння ЕТС і відсутності центрального отвору під вал (рис. 4.14, в), відходи знижуються до (17...20)%, тобто до рівня витих на ребро магнітопроводів. При цьому відсутнє погіршення енергетичних показників та надається можливість їх покращення, що підтверджено експериментально [29], та застосовуються традиційні технології виготовлення та обладнання.

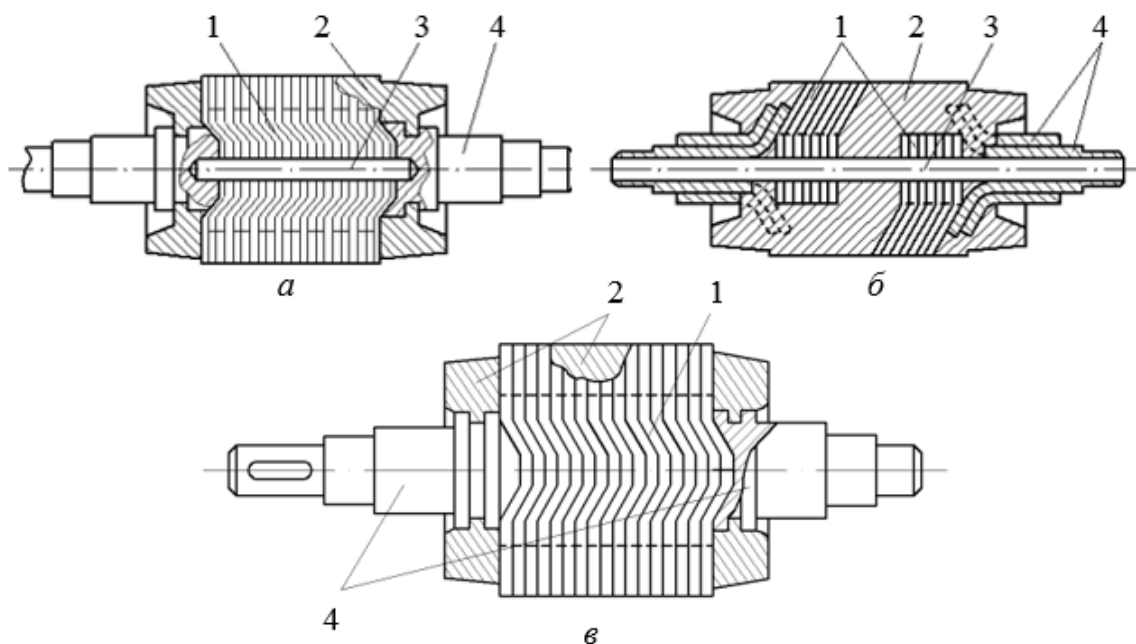


Рисунок 4.14 – Варіанти конструктивних схем короткозамкненого ротора з конусно-площинною структурою ярма (а, в) і зубців (б): 1 – магнітопровід; 2 – обмотка; 3 – центруючий стрижень; 4 – опорно-нажимний елемент.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Магнітопроводи КАД трисекційної структури з плоских кругових елементарних шарів ЕТС, що незмінні більше століття, є перешкодою в рішенні задачі подальшого енергоресурсозбереження при виробництві основного продукту електромашинобудування – АД.

2. Промислове освоєння цільно витих на ребро магнітопроводів зі стрічки ЕТС з пазами виявилось неможливим з причин складнощів забезпечення допустимих параметрів розшиховування зубців в пазу та створення нового технологічного обладнання.

3. Промислове освоєння нетрадиційних магнітопроводів, що містять виті на ребро ярма та гофровані зубцово-пазові шари є недоцільним в зв'язку з погіршенням енергетичних показників АД відносно класичних аналогів.

4. Подальший розвиток електромашинобудування пов'язаний з розробкою економічних в виробництві «інтелектуальних» ЕМ з класичною технологією виготовлення.

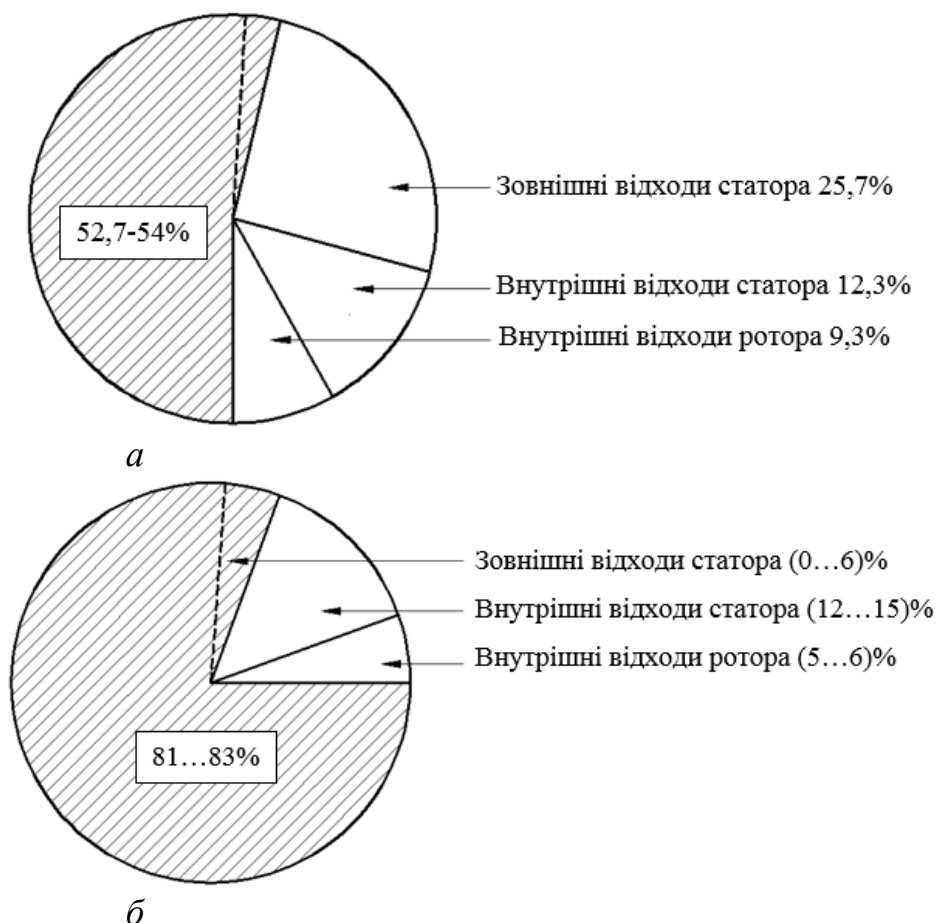


Рисунок 4.15 – Структура витрат електротехнічної сталі при виробництві магнітопроводів: *а* – асинхронних двигунів класичної конструкції одних серій; *б* – статора і ротора багатоплощинної, тангенціальної і конусно-площинної структури.

5. Комплексне підвищення технічного рівня виробництва АД без значних капіталовкладень, що обумовлені корінним перебудовуванням виробництва, можливо на основі розробки АД з маловідходними (без

зовнішніх відходів розкросення рулону ЕТС) магнітопроводами та безкорпусного виконання з інтенсифікованим охолодженням.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В роботі розглянуті питання розвитку, удосконалення і проектного синтезу індукційних перетворювачів електричної енергії та отримані наступні результати.

В розділі 1 визначені стан розвитку ЕМ та інших електричних об'єктів, а також напрямки енергоресурсозбереження та підвищення ПТР об'єктів електромашинобудування.

1.1. Показано, що можливості зниження матеріалоемності і підвищення технічного рівня АД класичної, оберненої та аксіальної конструктивних схем традиційними засобами практично вичерпані.

1.2. Намагання створення ресурсозберігаючих конструкцій, що передбачають нетрадиційні способи виготовлення навивкою стрічки ЕТС на ребро та гофрування смуги ЕТС не забезпечили рішення задачі підвищення енергетичних показників і зниження відходів ЕТС при виробництві АД.

1.3. Удосконалення одно- і трифазних трансформаторів і реакторів та асинхронних двигунів радіальної традиційної і оберненої, а також аксіальної конструктивних схем можливо евристичним способом структурних перетворень елементів активної і конструктивної частин.

В розділі 2 аналізуються сучасні методи проектування електричних об'єктів на основі оптимізаційного структурно-параметричного синтезу.

2.1. Визначено, що задача обрання певної або розробка нової структури ЕМС або електромеханічної системи (комплексу) відноситься до структурного синтезу, а оцінка якості кожної структури відноситься до задачі параметричного синтезу та їх об'єднання інколи викликає певні труднощі.

2.2. Об'єднання структурного і параметричного синтезу досягається методом експертної оцінки з призначенням коефіцієнтів значності (переваг) певних ПТР, що є у певній мірі суб'єктивним.

2.3. Традиційні методики оптимізаційних розрахунків ЕМС, що відрізняються структурами і конфігураціями активних елементів, містять електромагнітні КЗ у фізичних вимірах, величини яких залежать від виконання та способу охолодження, а також індивідуальні, геометричні КЗ, які не дозволяють здійснювати об'єктивне зіставлення проектних варіантів, що затрудняє і погіршує якість структурного синтезу.

2.4. Методика побудови оптимізаційних ММ структурного синтезу повинна забезпечувати порівняльний аналіз ЕМС при виконанні принципу ЕМЕ і універсальності (інваріантності) виду і застосування ЦФ і основних КЗ.

В розділі 3 досліджено вплив на ПТР АД заміни внутрішнього положення ротора в циліндричній ЕМС на зовнішнє та заміна циліндричного робочого зазору та радіальної структури ЕМС на аксіальний зазор та дискові осердя. Визначено наступне.

3.1. Умовам структурно-параметричного синтезу і інваріантності порівняльного аналізу відповідає універсальна ЦФ окремих критеріїв оптимізації з безрозмірними ПТР і відносними геометричними і електромагнітними КЗ.

3.2. Встановлено, що ОАД і ТАД з $2p \geq 6$ мають покращені масовартісні і енергетичні показники відносно КАД.

3.3. Показані можливості підвищення енергоефективності і ресурсозбереження, на додаток до об'єктів спеціальної техніки, ряду електроприводів загальнопромислових механізмів на систем на основі заміни КАД на ОАД і багатополюсні ТАД.

В розділі 4 розглянуті металозберігаючі конструкції і технології виробництва магнітопроводів.

4.1. Відзначимо, що застосування ресурсозберігаючих конструкцій, що базуються на нетрадиційних способах виготовлення, стримуються

необхідністю значних матеріальних витрат, а також необхідністю подолання організаційно-технологічних складнощів і корінної перебудови сучасного виробництва.

4.2. Визначено, що прискорення віддачі капіталовкладень, що витрачаються на удосконалення АД, можливе при розробці і втіленні нетрадиційних енергоресурсозберігаючих конструкцій (з тангенціальним охолодженням, багатоплощинним магнітопроводом та інші), що забезпечують їх виробництво відпрацьованими засобами на традиційному технологічному обладнанні.

4.3. Показані переваги тангенціальних і багатоплощинних магнітопроводів і способи зниження енергометалоємності при виробництві конструктивних елементів.

4.4. Розглянуті способи покращення охолодження АД традиційної схеми підвищенням коефіцієнту тепловіддачі з зовнішньої поверхні ярма при безкорпусному виконанні статора.

4.5. Розглянуто зниження питомої і технологічної металоємності короткозамкненого ротора та підвищення надійності КАД застосуванням конусно-площинної структури магнітопроводу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. №1234922 СССР. Короткозамкнутый ротор электрической машины / А. А. Ставинский, В. А. Игнатов, И. Г. Забора и др. - №3713513/24-07; Заявл. 23.03.84. Оpubл. 30.05.86. Бюл. №20.
2. А.с. №1339749 СССР. Магнитопровод электрической машины / А.А. Ставинский. №3922315/24-07; Заявл. 04.07.85. Оpubл. 23.09.87. Бюл. №35.
3. А.с. №1693685 СССР. Магнитопровод электрической машины / А.А. Ставинский. - №4647796/07; Заявл. 24.11.88. Оpubл. 23.11.91. Бюл. №43.
4. А.с. №1742946 СССР. Способ изготовления витого магнитопровода электрической машины / А. А. Ставинский. №47523610/07; Заявл. 23.10.89. Оpubл. 23.06.92. Бюл. №23.
5. А.с. №1826107 СССР. Способ изготовления магнитопровода электрической машины / А. А. Ставинский, В. А. Игнатов, И. Г. Загора и др. №4921460/07; Заявл. 27.03.91. Оpubл. 07.07.93. Бюл. №25.
6. А.с. №437176 СССР. Сердечник статора электрической машины / В. И. Васильев, Н. С. Колпенский, И. И. Припуль. Заявл. 03.01.72. Оpubл. 25.07.74. Бюл. №27.
7. А.с. №669454 СССР. Электрическая торцевая машина / А. А. Ставинский. №2561759/24-07; Заявл. 02.01.78. Оpubл. 25.06.79. Бюл. №23.
8. А.с. №936225 СССР. Электрическая торцевая машина / А. А. Ставинский. №2930999/24-07; Заявл. 26.05.80. Оpubл. 15.06.82. Бюл. №22.
9. Алексеев Б. А. , Мамиконянц Л. Г., Поляков Ф. А., Шакарян Ю. Г. Проблемы электрических машин на сессии СИГРЭ. *Электричество*. 2009. № 3. С. 60-67.
10. Бан Д., Жарко Д., Мирцевски С. Современное состояние и тенденции повышения КПД электрических машин. *Электротехника*. 2012. №1. С. 12-21.

11. Блинцов В. С., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А., Садовый А. С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задач их усовершенствования. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 2. С. 16-21.
12. Вербовий А. П., Вербовий П. Ф., Щокін А. А. Асинхронні двигуни для регульованого і керованого електроприводів та енергозберігаючих технологій. Київ : ПЕД НАН України, 2000. 38 с.
13. Вербовой П. Ф., Сяков А. М. Конфигурации асинхронных двигателей с внешним ротором. Киев : ИЭД АИ УССР, 1985. 37 с.
14. Гловацкий А.В., Кубарев Л. П., Макаров Л. Н. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе. *Электротехника*. 2008. № 4. С. 2-8.
15. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. Київ : ЗАТ «ВІПОЛ», 2000. 688 с.
16. Закладной А. Н., Праховник А. Б., Соловей А. И. Энергосбережение средствами промышленного электропривода. Киев : ДИА. 2001. 343 с.
17. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых асинхронных двигателей. *Электричество*. 1996. №9. С. 43-48.
18. Клепиков В. Б., Розов В. Ю. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2008. № 30. С. 18-21.
19. Коновалов О. А., Подъячев В. Н. Основные требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях. *Энергетик*. 2010. № 8. С. 29-31.
20. Конохов Н. Н. Анализ концепций развития конструкций крупны взрывозащищенных электродвигателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 1. С. 47-50.

21. Конохов Н. Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 3. С. 36-38.
22. Кравченко А., Метельский В. Масляные энергосберегающие трансформаторы. *Електрик*. 2013. № 5. С. 14-17.
23. Кравченко А., Метельский В. Сухие энергосберегающие трансформаторы. *Електрик*. 2013. № 4. С. 12-15.
24. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследования по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 53-60.
25. Лупиков В. С., Середа А. Г., Крюкова И. В., Геляровская О. А. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломагнитном исполнении. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 2. С. 26-33.
26. Муравлева О. О. Концепция и пути создания энергоэффективных асинхронных двигателей. *Електричество*. 2007. № 6. С. 50-52.
27. О новой единой серии низковольтных взрывозащищенных асинхронных двигателей / Е. А. Вареник и др. *Рынок электроники*. 2010. № 1 (17). С. 68-70.
28. О первых шагах в реформированной электроэнергетике / Г. Белкин и др. *Електроцех*. 2008. № 9. С. 13-16.
29. Патент №101333 Україна. Роз'ємний магнітопровід компактної електромагнітної системи / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдеева. - №201501065; Заявл. 10.02.2015; Опубл. 10.09.2015. Бюл. №17.
30. Патент №25375 Україна. Спосіб виготовлення магнітопроводу електричної машини / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. №96052028; Заявл. 23.05.96. Опубл. 25.12.98. Бюл. №6.
31. Патент №25376 Україна. Короткозамкнений ротор / А. А. Ставинський, Р.А. Ставинський. №96052027; Заявл. 23.05.96. Опубл. 30.06.98. Бюл. №6.

32. Патент №29655 Україна. Короткозамкнений ротор / А. А. Ставинський. №96052026; Заявл. 23.05.96. Опубл. 30.06.98. Бюл. №3.

33. Патент №29656 Україна. Спосіб виготовлення магнітопроводу електричної машини / А.А. Ставинський. - №96052029; Заявл. 23.05.1996. Опубл. 30.06.1998. Бюл. №3.

34. Патент №39631 Україна. Обмотка індукційного статичного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. №200809425; Заявл. 18.07.2008; Опубл. 10.03.2009. Бюл. №5.

35. Патент №51437 Україна. Просторова магнітна система / А.А. Ставинський, В.І. Крайнюк, Р.А. Ставинський и др. №2002042583; Заявл. 02.04.2002; Опубл. 17.01.2005. Бюл. №1.

36. Патент №88883 Україна. Просторова магнітна система / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. №2006044817; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 10.12.2009. Бюл. №23.

37. Патент №91756 Україна. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. - №200813524; Заявл. 24.11.2008; Опубл. 25.05.2010. Бюл. №10.

38. Патент №99330 Україна. Спосіб виготовлення магнітопроводу трифазного статичного індукційного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдеева. - №201414188; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 25.05.2015. Бюл. №10.

39. Пашков Н. И. Торцевые асинхронные двигатели малой мощности меньшей материалоемкости и трудоёмкости изготовления. *Электротехника*. 2007. № 7. С. 8-16.

40. Петрушин В. С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе : учеб. пособ. Одесса : Наука и техника. 2006. 320 с.

41. Петрушин В. С., Еноктаев Р. Н. Использование многокритериальной оптимизации при проектировании регулируемых асинхронных двигателей. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2016. № 11 (1183). С. 11-14.

42. Пуйло Г. В., Левин Д. М., Трищенко Е. В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 1. С. 86-97.
43. Пуйло Г. В., Трищенко Е. В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов со слоевыми обмотками. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 2. С. 42-45.
44. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Киев, 1995. 42 с.
45. Ставинский А. А., Плахтирь О. О., Ставинский Р. А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трёхфазных трансформаторов, реакторов и дросселей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. № 4. С. 79-82.
46. Ставинский А. А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоёв стали статора. *Електричество*. 1996. № 9. С. 43-48.
47. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (Электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами). *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 5. С. 43-47.
48. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами). *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 6. С. 33-38.
49. Ставинский А. А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. № 2. С. 53-58.
50. Ставинский А. А. Совершенствование судовых электромеханических систем встречного вращения на основе специальных асинхронных двигателей. *Судостроение*. 2011. № 6. С. 35-38.

51. Ставинский А. А., Тищенко И. А., Зеленый Н. И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2010. № 1 (77). С. 64-69.

52. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Асинхронные двигатели с секционированными внутренними и внешними роторами для привода газовых и жидкостных нагнетателей. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2015. № 5. С. 85-90.

53. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2014. № 5. С. 37-44.

54. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Сравнительный анализ массосстоимостных показателей асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 3. С. 20-26.

55. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Сравнительный анализ потерь активной мощности асинхронных двигателей с цилиндрическим и аксиальным рабочим зазором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 5. С. 31-35.

56. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Усовершенствование тихоходных биротативных асинхронных электроприводов на основе специальных контрроторных двигателей. *Електротехнічні і комп'ютерні системи*. 2014. № 5 (91). С. 259-261.

57. Ставинский А. А., Пальчиков О. О. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 1. С. 41-45.

58. Ставинский А. А., Радченко Н. И., Радченко А. Н. Конструктивное и теплоаэродинамическое совершенствование статоров

асинхронных бескорпусных двигателей. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2000. Вип. 54. С. 49-53.

59. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А. Оптимизационный сравнительный анализ статических электромагнитных систем. 4.1. Варианты и метод оценки преобразований. *Електричество*. 2014. № 9. С. 34-43.

60. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А. Оптимизационный сравнительный анализ статических электромагнитных систем. 4.2. Примеры структур и результатов преобразований. *Електричество*. 2014. № 10. С. 28-34.

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

62. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А., Пальчиков О. О. Универсальный метод обоснованного выбора технических решений активной части электрических машин и аппаратов. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2016. № 11 (1183). С. 70-79.

63. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Плахтирь О. О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 4. С. 30-36.

64. Ставинский А. А., Шевченко В. В., Чекунов В. К. Возможности усовершенствования судовых электромеханических комплексов на основе нетрадиционных технических решений электрических машин. *Вісник Національного університету кораблебудування за 2010 рік*. Миколаїв : НУК, 2011. С. 287-293.

65. Ставинский А.А. Нетрадиционные ресурсосберегающие конструкции асинхронных двигателей с классической технологией производства. *Электротехника*. 1992. № 8-9. С. 11-14.
66. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. №1. С. 57-61.
67. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму / В. І. Ткачук та ін. Львів : ВНУ «Львівська політехніка», 2011. 288 с.
68. Ткачук В. І. Електромеханотроніка : навчальний посібник. Львів : ВНУ «Львівська політехніка», 2001. 404 с.
69. Товажнянский Л. Л. , Левченко Б. О. Энергетика на границе ХХІ столетия. Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. 200 с.
70. Хлопенко М. Я., Білюк І. С., Шевченко В. В. Оптимальне керування об'єктами : навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 2003. 172 с.
71. Шинкаренко В. Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. Київ : Наукова думка, 2002. 288 с.
72. Atsumi K., Ishizaki F., Hattory K. Lowe voltage three phase induction motors wold energy series. *Toshiba Revier*. 1985. № 152. P. 11-15.
73. Cariuhi F. Axial flux electromagnetic differential induction motor. *17-th Conf. on Electrical Machines and Drives*. 11-13 Sept. Institution of Engineering and Technology (IET), 1995. P. 1-5.
74. Flanagan W. M. Handbook of transformers design and applications. Boston : McGraw-Hill, 1993. 232 p.
75. IEC 1000-4-8:1993. «Electromagnetic compatibility. Part 4. Testing and measuring technique. Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basis EMC Publication». Edition 1.1.2001. 61 p.
76. Igelspachar J., Herzog H. G. Analytical description of a single stator axial-flux induction machines with squirrel cade. *XXI Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM 2010)*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 6-8 Sept. 2010. P. 1-6.

77. Parasiliti F., Villani M. Evolution of the design options and cost impact of improving induction motor efficiency. *Energy efficiency improvements in electric motors and drives, by Bertoldi*. Berlin, Germany : Springer-Verlag Publ, 2000. P. 514-528.
78. Petkov R. Optimum design of Higt-Power, High-Frequency Transformer. *Transaction on power electronics. IEEE*. 1996. № 11 (1). P. 33-42.
79. Profumo F., Zhang Z., Tenconi A. Axial-flux machines drives: a new viable solution for electric cars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997. Vol. 44, Issue1. P. 39-45.
80. Stavinskii A.A. Induction motors with electrical steel of multiplanar structure. *Electrical Technology*. 1992. № 2. P. 57-67.
81. Volkradt W. Neue wege in Electromashinenbau. *Elektro*. 1985. P. 29-38.
82. Weston D. A. Electromagnetic Compatibility. Methods, Analysis, Circuits and Measurement Third Edition. Boca Ration : Tailor & Francis Group CRC Press, 2016. 184 p.

Навчальне видання

Проектний синтез електромеханічних об'єктів.

Способи удосконалення структур і параметричний синтез електромеханічних пристроїв і електричних машин

методичні вказівки

Укладачі: **Ставинський Андрій Андрійович**
Циганов Олександр Миколайович
Мардзявко Віталій Анатолійович
Руденко Андрій Юрійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. ____
Тираж 20 прим. Зам. № ____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.