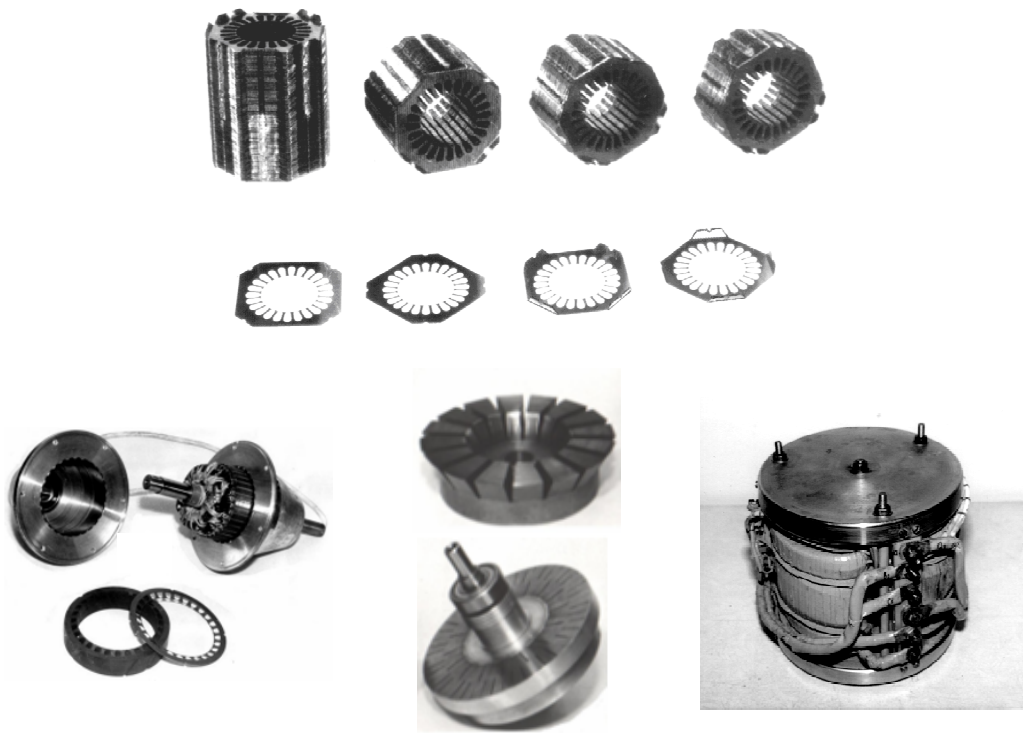


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов

**ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
І ПРИКЛАДИ РІШЕННЯ ВІНАХІДНИЦЬКИХ,
ПОЛЬОВИХ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**
МОНОГРАФІЯ



МИКОЛАЇВ

2023

Авторський колектив:

А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов.

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету протокол № 4 від "07" 12. 2023р.

Рецензенти:

Вовченко А.І. – д-р техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки, член-кореспондент НАН України, директор Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України.

Рябенський В.М. – д-р техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри електроніки, електротехніки та телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Ставинський А. А., Авдєєва О. А., Ставинський Р. А., Циганов О. М.

С77 Основи наукових досліджень і приклади рішення винахідницьких, польових та оптимізаційних задач електромеханіки : монографія / за ред. А. А. Ставинського. Миколаїв : МНАУ, 2023. 168 с.

В монографії викладено загальні основи постановки і вимог виконання наукових досліджень, а також приклади та пропозиції інноваційного рішення деяких проблемних питань електромеханіки. Наведено теоретичні основи і приклади польових електромагнітних розрахунків та структурно-параметричної оптимізації трансформаторів, реакторів і асинхронних двигунів.

УДК 621.3:001.89:167

© Миколаївський національний аграрний університет, 2023

© А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов, 2023

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
Частина перша	
ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1. НАУКА І ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС	
1.1. Основні ознаки, головна функція науки і значення науково-технічної творчості.....	11
1.2. Наукові поняття і термінологія.....	12
1.3. Закономірності і тенденції розвитку техніки	14
1.4. Основні можливості підвищення ефективності науки і науково-технічного прогресу, науково-інженерне мислення.....	16
2. НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1. Визначення і мета наукового дослідження, типи дослідницьких задач.....	18
2.2. Теоретичні і прикладні дослідження та розробки.....	19
2.3. Тема, етапи виконання і класифікація дослідницьких робіт.....	20
2.4. Науково-технічна інформація.....	21
3. КВАЛІФІКАЦІЙНІ І ЯКІСНІ ОЗНАКИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	
3.1. Формулювання теми наукового дослідження.....	23
3.2. Оцінка перспективності і формулювання мети наукового дослідження.....	24
3.3. Наукова новизна і достовірність одержаних результатів.....	25
3.4. Наукове значення і практична цінність дослідницької роботи.....	26
4. ЗМІСТ ПОНЯТЬ І СКЛАДОВИХ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	
4.1. Вимоги до назви і вступу дослідницької роботи.....	28
4.2. Поняття об'єкту і предмету дослідження.....	28
4.3. Структура вступу.....	29
4.4. Композиція основного змісту наукового звіту (дисертації).....	31
5. РОЗГОРТАННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ	
5.1. Аналіз стану об'єкту і постановка задачі дослідження.....	32
5.2. Специфіка дослідження.....	32
5.3. Обґрунтування головного результату.....	33
5.4. Вимоги до висновків (заклучення).....	34
6. ВИКОРИСТАННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ НАУКОВИХ ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
6.1. Втілення результатів наукових досліджень.....	36
6.2. Критерії ефективності досліджень.....	36

6.3. Шляхи підвищення ефективності досліджень.....	38
6.4. Визначення ефекту використання досліджень.....	39
7. МЕТОДОЛОГІЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
7.1. Прийоми та стадії творчого процесу.....	40
7.2. Загальні методи досліджень.....	41
7.3. Способи спрощення рішень складних задач.....	42
7.4. Методологія моделювання.....	43
8. Виконання теоретико-експериментальних досліджень	
8.1. Особливості теоретичних досліджень.....	45
8.2. Особливості експериментальних досліджень.....	46
8.3. Методологія експериментальних досліджень.....	47
8.4. Основні сучасні методи прикладних досліджень.....	48
9. ЕВОЛЮЦІЯ І ФАКТОРИ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	
9.1. Ієрархія розвитку технічних об'єктів.....	50
9.2. Критерії і умови розвитку технічних об'єктів.....	52
9.3. Показники якості і перелік недоліків технічного об'єкту.....	53
9.4. Ретроспективний аналіз закономірностей розвитку і ієрархічний опис інноваційного об'єкту.....	54
10. НАУКОВО-ІНЖЕНЕРНА ТВОРЧІСТЬ	
10.1. Розробка нових науково-технічних рішень	56
10.2. Постановка творчої інженерної задачі і визначення аналогів її рішення	57
10.3. Формулювання поняття ідеального технічного рішення	58
10.4. Евристичні та інші прийоми рішення наукової задачі	59
11. МЕТОДОЛОГІЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	
11.1. Значимість математичного моделювання і оптимізаційних розрахунків технічних об'єктів і систем.....	61
11.2. Задача параметричної оптимізації	62
11.3. Задача структурно-параметричної оптимізації	63
11.4. Пошук глобального екстремуму	65
12. ПОСТАНОВКА І АНАЛІЗ ЗАДАЧІ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ	
12.1. Застосування системної методології дослідження	68
12.2. Особливості системного підходу	68
12.3. Системне обрання глобально-оптимального технічного рішення...69	
12.4. Функціонально-вартісний аналіз	70

Частина друга

ПРИКЛАДИ І ПРОПОЗИЦІЇ ІННОВАЦІЙНОГО РІШЕННЯ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

13. ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ВИРОБНИЦТВА І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАШИН	
13.1. Проблеми підвищення енергоефективності і зниження відходів електротехнічної сталі виробництва магнітопроводів машин змінного струму.	72
13.2. Способи зниження відходів електротехнічної сталі на основі витих і комбінованих стикових магнітопроводів.....	75
13.3. Нетрадиційні конструкції шихтованих магнітопроводів статорів з стиковими частинами.....	79
13.4. Безкорпусне виконання електромашин змінного струму з переривчастим оребренням аксіально-тангенціального охолодження.....	81
14. ПРОПОЗИЦІЇ УДОСКОНАЛЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУР АКТИВНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	
14.1. Безкорпусне виконання асинхронного двигуна з багато-площинним магнітопроводом статора.....	87
14.2. Технологічні можливості виготовлення багатоплощинних магнітопроводів	90
14.3. Зменшення матеріалоємності короткозамкненого ротора і підвищення надійності двигуна класичної схеми.....	92
14.4. Короткозамкнені двигуни з покращеними пуско-регульованими властивостями	97
15. КОНСТРУКТИВНО-СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РІЗНОВИДІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	
15.1. Фактор інерційності ротора двигуна рухомого об'єкту	104
15.2. Зниження моментів інерції і удосконалення двигунів з аксіальним зазором та зовнішнім ротором	108
15.3. Вплив розташування ротора і конфігурації активної поверхні на використання конструктивного об'єму і надійність.....	111
15.4. Технічні рішення двигунів біротативного обертання	
16. СТАН РОЗВИТКУ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ	
16.1. Особливості традиційних структур і конструкцій електромагнітних систем трансформаторів і реакторів.....	120
16.2. Методи оптимізаційних розрахунків статичних електромагнітних систем.....	124
16.3. Перетворення структур і конфігурацій активних елементів.....	127
16.4. Вплив конструктивно-технологічних чинників на механічну міцність і стійкість обмоток.....	135
16.5. Пропозиції удосконалення шихтованих текстурованих магнітопроводів.....	138

16.6. Цільові функції, вихідні данні та припущення оптимізаційного проєктного синтезу варіантів електромагнітних систем	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

АД – асинхронний двигун
ЕТС – електротехнічна сталь
ТО – технічний об'єкт
ЕМС – електромагнітна система
ФПД – фізичний принцип дії
ТР – технічне рішення
ММ – математична модель
НДР – науково-дослідна робота
ДКР – дослідно-конструкторська робота
ПТР – показник технічного рівня
ТФ – технічна функція
ФС – функціональна структура
СПО – структурно-параметрична оптимізація
ЦФ – цільова функція
КЗ – керована змінна
ФВА – функціонально-вартісний аналіз
ККД – коефіцієнт корисної дії
ТАД – торцевий асинхронний двигун
ВАХ – віброакустичні характеристики
НРН – надпровідний регулятор напруги
АДЗР – асинхронний двигун з зовнішнім ротором
УК – утворюючий контур

ВСТУП

Важливим завданням подальшого розвитку цивілізації є створення і освоєння виробництва техніки нових поколінь, яка дозволяє знизити енергетичні і матеріальні витрати та підвищити продуктивність праці і покращити її умови, забезпечити екологічну безпеку та нормальні умови існування людства, подолати наявні проблеми і у подальшому освоїти глибини світового океану, близький та далекий космос. Розвиток науково-технічного прогресу підвищує вимоги до якості підготовки фахівців, їх творчого розвитку і необхідності отримання навичок визначення максимально раціональних конструктивних, технологічних і організаційно-економічних рішень. Навчальний процес інженерних спеціальностей в основному побудований на вирішенні відомих задач для яких створені постановка і спосіб рішення, методи, методики і алгоритми розрахунків, а також є приклади рішення і відомі правильні відповіді. Певні розрахунки уявляють рутинну працю, яка не потребує творчого мислення. Важливим додатком до вивчення способів рішення типових інженерних задач, якими повинен володіти кожен випускник установ вищої технічної освіти, є зобов'язання володіння фахівцями певними знаннями і навичками вирішення творчих задач, для яких невідомий спосіб і результат рішення. Забезпечення виконання названих вимог можливо на основі освоєння студентами і інженерно-технічними співробітниками певних знань методології наукових досліджень та інноваційної діяльності. Зобов'язання засвоєння основ технології наукових досліджень сприяє розвитку творчого мислення та дослідницького потенціалу. Для можливості успішної науково-технічної діяльності фахівець повинен засвоїти методологію і методику наукових досліджень та отримати уміння обрання і аналізу необхідної інформації, формулювати мету і задачі, об'єкт і предмет дослідження, розробляти теоретичні положення, методи і методики розрахунків, виконувати експерименти та формулювати висновки, складати звіти, доповіді і статті по результатам досліджень за нормативними вимогами.

Зростання технологічного прогресу і подальше забезпечення потреб людства в XXI-XXII століттях неминуче будуть супроводжуватися зростанням обсягів виробництва і споживання електроенергії. Вказана обставина визначає особливу роль електромеханічної науки, яка забезпечує дослідження в напрямках подальшого удосконалення електромагнітних і електромеханічних перетворювачів енергії. Необхідно створення та втілення інноваційних конструкторсько-технологічних рішень, що вирішують проблемні питання в першу чергу електромеханічних пристроїв масового виробництва, тобто номенклатур єдиних серій асинхронних двигунів (АД) і

трансформаторів малої потужності та силових розподільчих трансформаторів I-III габаритів. Принципові структурні схеми активних частин і конструкції шихтованих магнітопроводів вказаних пристроїв, що перебувають у виробництві, створені в кінці XIX та на початку XX століть і не зазнали суттєвих змін. Покращення масоваргістних і енергетичних показників електрообладнання відбувалося в першу чергу застосуванням досягнень електроматеріалознавства, а також створенням і використанням методик оптимізаційних розрахунків та більш досконалих технологічних процесів. Зокрема у другій половині 20 віку здійснено перехід з листової гарячекатаної електротехнічної сталі (ЕТС) виробництва магнітопроводів на більш досконалі рідновиди рулонної холоднокатаної ЕТС, а саме ізотропної в електромашинобудуванні та анізотропної в трансформаторобудуванні. Крім того в кінці XX віку створена і з початком XXI віку отримала промислове застосування при виготовленні витих магнітопроводів аморфна ЕТС. Однак до нашого часу невирішеними є питання зниження відходів виробництва магнітопроводів обертових машин змінного струму. Виникли інші проблемні питання зниження кутових втрат планарних шихтованих анізотропних магнітопроводів та втрат несинусоїдальності контурних магнітних потоків трифазних витих трисекційних магнітопроводів.

Крім підвищення технічного рівня загальнопромислового електрообладнання є необхідним і відбувається розширення застосування та удосконалення спеціальних регульованих АД, двигунів оберненого і аксіального виконань, вентильних двигунів постійного струму та інших спеціальних електромашин і трансформаторів. Актуальним також є удосконалення систем охолодження і підвищення електродинамічної стійкості та межі потужності генеруючих і трансформуючих агрегатів електричних станцій і підстанцій, а також підвищення потужностей АД з литими короткозамкненими обмотками.

Запорукою рішення названих проблемних питань є інтенсифікація теоретичних і прикладних досліджень електромеханічної науки. Напрямами таких досліджень є евристичні інноваційні удосконалення окремих складових та у цілому активних і конструктивних частин, польові електромагнітні розрахунки і оптимізаційний проектний синтез різновидів електромеханічних пристроїв.

В першій частині колективної монографії розглянуто основні загальні відомості постановки, інноваційного виконання і відображення результатів наукових досліджень. В другій та третій частинах наведено деякі приклади інноваційно-дослідницької діяльності авторів.

Монографія орієнтована на широкий загал фахівців – дослідників, а також викладачів і студентів електромеханічної спеціалізації.

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. НАУКА І ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС

1.1. Основні ознаки, головна функція науки і значення науково-технічної творчості

В процесі еволюції на основі повсякденної діяльності людство отримувало і отримує знання про особливості і властивості явищ, об'єктів і предметів та можливості їх застосування і перетворення з метою досягнення користі і можливостей подальшого розвитку. Тому під поняттям наукового знання розуміється перевірений практикою результат пізнання дійсності та вірного її відображення у свідомості людини. Процес пізнання включає отримання, осмислення і аналіз сукупності фактів і факторів. Результатом їх систематизації і узагальнення є створення наукового знання, що характеризується можливістю його зіставлення з деякою об'єктивною реальністю. Вірність наукового знання визначається не тільки здібностями його логічного осмислення але і можливостями його практичної перевірки творчим застосуванням. Процес отримання нових наукових знань деякими представниками людства, тобто дослідниками, має назву наукового дослідження.

Наука – це система знань об'єктивних законів природи, суспільства і мислення та теоретичних положень, що безперервно розвиваються та доповнюються, а також перетворюються у виробничу силу технічного прогресу і розвитку людства як результат спеціальної діяльності окремих освічених та мотивованих членів суспільства – вчених. Основною ознакою і головною функцією науки є пізнання об'єктивного світу. Науку можна визначити як процес пізнання закономірностей і особливостей існування та розвитку об'єктів всесвіту при певному розділенні суспільної праці. Наука є специфічною формою суспільного розвитку у вигляді системи знань і важливим фактором виробництва знань та їх використання. Важливе значення має прискорення освоєння нововведень з метою отримання віддачі від морально і технічно застарілих інновацій, тобто скорочення інтервалу часу між зміною поколінь науково-технічної продукції.

Інтенсифікація науково-технічної праці і скорочення витрат часу між створенням та дослідженням інноваційних пропозицій, а також проектуванням і освоєнням на їх основі виробництва нових матеріально-

технічних та інших виробів є життєво важливою умовою прискорення та підвищення ефективності науково-технічного прогресу. Подальший розвиток науки надає можливість автоматизації не тільки фізичної, але і розумової рутинної (нетворчої) праці, прискореного доступу до джерел та оновлення науково-технічної інформації, що в свою чергу створює подальший імпульс прискорення прогресу і розвитку людства.

Прискорення науково-технічного прогресу, економічна потужність держави знаходяться в прямій залежності від її людського творчого потенціалу, тобто від наявності достатнього числа творчо працюючих вчених, конструкторів, технологів. Широке залучення молоді до інженерної творчості багатократно збільшує творчий потенціал держави.

1.2. Наукові поняття і термінологія

Мета науки – пізнання законів розвитку природи і суспільства та створення на основі отриманих знань штучних інноваційних об'єктів та технічних і економіко-організаційних систем для досягнення суспільством корисних результатів. Поки певні закони не визначені, людина спроможна лише описувати явища, збирати та систематизувати факти, однак вона не може їх пояснити і завбачити. Шлях пізнання визначається від живого огляду до абстрактного мислення і від нього до практики. Без систематизації і накопичення фактів, їх узагальнення, без логічного осмислення не існує наука. Факти систематизують і узагальнюють за допомогою простих абстракцій – понять (визначень), які є важливими інформаційними елементами науки. Найбільш широкі та значні поняття мають назву категорій. Головними є філософські категорії про форму та зміст явищ. Важливою формою знань є принципи (постулати) та аксіоми. Під принципами розуміють вихідні положення певної галузі науки. Вони є початковою формою систематизації знань (аксіоми геометрії, постулати Бора в квантовій механіці, тощо). Важливою складовою знань є наукові закони, що відображають найбільш суттєві, повторні та стійкі і об'єктивні внутрішні зв'язки в природі, суспільстві та мисленні. Звичайно закони виступають у формі певного співвідношення понять і категорій. Максимально високою формою узагальнення і систематизації знань є теорія. Під теорією розуміється вчення про узагальнений досвід, що формулює наукові принципи і методи, які дозволяють пізнати процеси і явища, що існують, та забезпечують аналіз впливу на них різних факторів, а також дозволяють їх практичне використання в науковій, виробничій і соціальній діяльності на користь людству. Визнана наукова теорія, що протягом певного часу задає

модель наукової діяльності і уявляє пануючу концептуальну систему та стиль мислення в науці має назву парадигми.

Наука включає в себе також методи дослідження. Під методом розуміється шлях теоретичного дослідження або практичного здійснення будь яких явищ, процесів, фізико-технічних систем або об'єктів природнього або штучного походження та їх розрахунків. Також під поняттям "метод" розуміється спосіб пізнання та здійснення певної діяльності з досягненням конкретного результату. Метод наукового пізнання уявляє сукупність певних правил, прийомів, способів пізнання досліджуваного явища, об'єкту та предмету дослідження. В свою чергу термін "спосіб" уявляє систему дій при виконанні будь якої процедури або роботи. Метод є інструментом рішення головної задачі науки - відкриття об'єктивних законів дійсності, математичного і фізичного моделювання об'єктів і процесів, а також виконання експериментів. Основними в сучасному технічному прогресі є евристичні методи удосконалення виробів усіх галузей промисловості і матеріального та сировинного виробництва. Також головними на даний час в природничих і технічних науках є математичні методи дослідження, які дозволяють кількісно розрахувати та вивчити явища, фізичні об'єкти і процеси та окремі технічні об'єкти, а також системні сполучення технічних комплектуючих компонент, далі технічні об'єкти (ТО). При цьому дуже важливим є експериментальний метод дослідження, який дозволяє здійснювати відкриття та забезпечити перевірку адекватності теорії, методів і методик розрахунків.

Якщо відсутні фактичні та експериментальні данні або матеріали, засобом досягнення наукових результатів є гіпотеза – науково обґрунтоване припущення. Припущення висувається для пояснення будь якого процесу, яке після перевірки може з'явитися правильним або неправильним. Гіпотеза це попередній і не завжди остаточний варіант опису законів і теорій.

В цілому методи наукового пізнання поділяються на загальні філософські, загальнонаукові, дисциплінарні і міждисциплінарні, а також окремо наукові відповідних галузей природніх і технічних наук. Прикладами загальних методів електротехніки є методи суперпозиції (накладання), застосування функцій комплексної змінної, гармонічного аналізу, симетричних складових. Загальними в польових розрахунках є аналітичні та чисельні методи рішення рівнянь Лапласа і Пуансона на основі поняття скалярного і векторного потенціалів. Базою спеціальних досліджень електромеханіки є методи питомої провідності робочого зазору, зустрічних обертових полів, двох реакцій, зубцевих контурів та інше.

Фундаментальною основою наукового дослідження є методологія. Поняття "методологія" уявляє систему положень і способів організації і

побудови теоретичної та практичної діяльності, а також вчення про цю систему. Методологія наукового пізнання визначає сукупність засобів, методів та прийомів наукового дослідження з використанням яких дослідник одержує нові знання. Загальна методологія науки визначає закони розвитку наукового пізнання в цілому, однак ґрунтується на теоретичних уявленнях, методах досліджень і законах окремих наук.

Завданням методології науки є розвиток методів наукового пізнання на основі яких складаються моделі і дослідницькі, розрахункові та експериментальні методики.

Модель – віртуальний математичний або фізичний аналог, що містить основні властивості оригіналу та складає основу наукових методів моделювання.

Поняття "методика" визначає комплекс або сукупність прийомів і дій, що дозволяють аналізувати факти та створювати моделі, які призводять до одержання очікуваного результату. Методика базується на науково обґрунтованих методах.

Наукові факти – відображені людською свідомістю тобто зафіксовані, перевірені і осмислені факти дійсності, які фіксуються відповідними науковими, зокрема математичними мовами та емпіричними судженнями.

1.3. Закономірності і тенденції розвитку техніки

Виявлення і визначення тенденцій та закономірностей науково-технічного прогресу і інженерної творчості [1] сприяє пошуку більш досконалих і ефективних конструкторсько-технологічних рішень виробів різноманітних галузей промисловості.

Аналіз історичного розвитку промисловості, енергетики і транспорту виявляє закономірність прогресивної еволюції технічних виробів, згідно якої в різновидах продукції з однаковими функціями перехід з попередніх до нових поколінь такої продукції обумовлений циклічною зміною конструктивно-технологічних особливостей в напрямках усунення дефектів попередніх конструкцій. Перехід до більш раціональної конструкції в межах попередньої загальної структури і сучасний подальший розвиток здійснюється рішенням задач оптимізації і наближення кожної з поступових циклічних змін внутрішніх структурних особливостей до межі удосконалення в рамках загальної структури [2]. Прикладом вказаної зміни внутрішньої структури при збереженні застосованих протягом більш ніж 130 років різновидів загальної планарної структури електромагнітних систем (ЕМС) трансформаторів є перехід з шихтовки "вперепліт" з прямими стиками прямокутних пластин на складання магнітопроводу з малим зсувом косих

стиків стрижневих і яремних пластин, що змінюються в довжині (технології "step lep" і "malty step lep") [3, 4]. Подальший розвиток без зміни принципу дії виробу певного призначення є можливим при поступовому визначенні можливості і необхідності, після внутрішніх повторних циклічних перетворень та оптимізаційних розрахунків, переходу до іншої загальної структури. При досягненні межі структурних перетворень подальший прогрес забезпечується зміною фізичного принципу дії (ФПД) технічної або технологічної системи, об'єкту або комплексу. Прикладом змін ФПД є перехід від парових рушіїв на двигуни внутрішнього згорання та перехід від них на електричний рух. Якщо принцип дії є остаточно незмінним, зокрема всесвітній електромагнітний принцип, прогрес розвитку техніки можливий тільки загальними евристичними, наприклад структурними і геометричними перетвореннями конструкцій, схемних топологій і технологічних композицій різноманітного промислового обладнання, зокрема електромеханічних пристроїв і систем [2].

В раціонально спроектованому технічному виробі кожен з елементів і конструктивних ознак мають певне призначення по забезпеченню функціональних можливостей, залишкові елементи відсутні. В зв'язку з цим існує залежність між якістю або можливістю функціонування ТО від єдиної цілісності його елементів. Така залежність уявляє закон відповідності між функцією і структурою ТО.

Також існує закономірність мінімізації компоновочних витрат конструкторсько-технологічних рішень ТО. Така закономірність проявляється в тому, що функціональні елементи, що здійснюють певні перетворення потоків речовини, енергії або сигналів, розташовані в просторі таким чином, що компоновочні витрати, які не включають вартість елементів, є мінімальними.

Прогрес технічної діяльності людства супроводжується певними революційними змінами, що відбуваються в процесі розвитку техніки. Вказаними змінами були поява і розвиток парових двигунів та початковій теплоенергетики в другій половині XVIII і початку XIX століть, поява електромеханіки і трифазної електроенергетики в кінці XIX і початку XX століть, а також розвиток мікропроцесорної електронної техніки, нанотехнологій та інформаційних технологій в кінці XX і початку XXI століть. В зв'язку з цим існує гіпотеза закону стадійного розвитку ТО від стадій виконання ТО технологічної і енергетичної функцій до стадій управління процесами і планування. Стадійні переходи розвитку ТО відбуваються при вичерпанні можливості виконання певних функцій попередніми способами і засобами та при наявності необхідного науково-технічного рівня і соціально-економічної доцільності.

Крім вище перелічених, уявляє теоретичну і практичну значимість аналіз доцільності застосування при виконанні нових розробок законів симетрії, гомологічних рядів та розширення множинності потреби-функцій [1].

1.4. Основні можливості підвищення ефективності науки і науково-технічного прогресу, науково-інженерне мислення

Сучасна наука уявляє собою найбільш динамічну та рухоми виробничу силу суспільства. Наука є суспільною за своїм походженням, розвитком і використанням. При цьому наукові досягнення можуть ефективно використовуватися тільки при наявності суспільного характеру виробничих сил та при достатньому розвитку суспільної праці.

Існують три групи основних можливостей підвищення ефективності науки і науково-технічного прогресу. Перша група визначає можливості творчої діяльності дослідників, які уявляються в підвищенні методологічного рівня наукової роботи, в висуванні нових ідей і підходів та засвоєнні перспективних методів досліджень. Друга група визначає можливість підвищення якості управління науковим процесом і створення максимально доброзичливих умов для якісної праці усіх категорій працівників науки. Можливості третьої групи уявляються в удосконаленні суспільного, у першу чергу економічного механізму, що сприяє швидкодії і ефективності здобутку та освоєння наукових результатів у виробництві і суспільній практиці.

Підвищення ефективності і створення нових методологій наукових досліджень також можливо пошуком і прогнозуванням закономірностей технічного прогресу та тенденцій розвитку традиційних і виникнення нових галузей матеріального виробництва, а також соціальних явищ.

В теперішній час науково-технічна революція безпосередньо впливає на техногенні і суспільні процеси. Поряд з прогресивними явищами і досягненнями людства зростають тенденції небезпеки виснаження паливно-енергетичних ресурсів і екологічної небезпеки забруднення повітряного, водяного і земляного середовищ. В зв'язку з цим виникає задача формування нового сучасного типу науково-інженерного мислення, а також створення кваліфікованих дослідників і інженерів, що здібні мислити у відповідності з концепціями екологічної безпеки і всебічного енергоресурсозбереження. Рішення проблеми формування нового типу мислення і цілісності системи знань передбачає подальше удосконалення і розвиток діалектичного методу мислення науково-технічного робітника і інженера. Такий метод дозволяє аналізувати наявні досягнення, синтезувати нову інформацію і створювати інноваційні об'єкти, засоби і технологічні процеси. Наукова і інженерна

творчість сприяє перетворенню науки в засіб вищого орієнтування людини в навколишньому середовищі і суспільстві.

Праця наукового співробітника переважно характеризується розробкою загальних ідей і методів перетворення природи і суспільства та розвитку і створення умов та ТО подальшого технічного прогресу. Інженер, в свою чергу, призваний здійснювати практичну реалізацію теоретичних розробок. В зв'язку з цим інженерів можна поділити на три категорії. До першої категорії відносяться інженери-теоретики, що вирішують задачі творчого характеру і праця яких відповідає праці наукових співробітників. При цьому інженери, які використовують традиційні способи удосконалення відомих технічних рішень (ТР) і засобів їх застосування, є раціоналізаторами, а інженери, як і наукові співробітники, що володіють творчими здібностями та реалізують їх інноваційними досягненнями, є дослідниками і винахідниками. До другої категорії відносяться інженери-організатори, головним змістом роботи яких є організація ефективної праці робітничого і інженерно-технічного персоналу. До третьої категорії відносяться інженери-виконавці, що займаються практичною роботою відновлення відомих або втілення нових ідей інших творчих інженерів.

В цілому науковий і промислово-виробничий потенціал держави залежить від якісного складу наукових співробітників і інженерних працівників першої та другої категорій, складова яких повинна бути достатньою.

2. НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Визначення, методи і поняття методології наукового дослідження, типи дослідницьких задач

Формою існування і розвитку науки є наукове дослідження, тобто вивчення, при застосуванні наукових методів, явищ, процесів та певних предметів, аналіз впливу на них різноманітних факторів, а також вивчення взаємодії між явищами з метою отримання доказаних і корисних для науки і практики результатів з максимальним корисним ефектом.

Метою наукової роботи в технічних науках є дослідження фізичних, хімічних і техногенних процесів штучного походження в ТО і всебічне та достовірне вивчення структури, зв'язків елементів та характеристик таких ТО на основі розроблених наукових принципів і методів пізнання. Також до мети дослідження входить завдання отримання нових корисних для діяльності людини наукових результатів та втілення їх в виробництво з максимальним ефектом.

Як вже визначалося вище, основою кожного дослідження є методологія, тобто сукупність способів, прийомів та послідовностей його виконання. В певній мірі методологія, або технологія досліджень є схемою (планом) рішення поставленого науково-дослідницького завдання.

Дослідницькі задачі поділяються на емпіричні, теоретичні та експериментальні.

Емпіричні задачі направлені на виявлення, точний опис і прискіпливе вивчення факторів, явищ і процесів, що розглядаються. Такі задачі вирішуються, в першу чергу, за допомогою спостереження та експерименту.

Спостереження – метод пізнання, згідно якому сутність дослідження пізнається без втручання. Фіксуються і вимірюються лише параметри та властивості процесу або предмету, що вивчається, аналізується характер його змін.

Теоретичні задачі ґрунтуються, в фізико-технічних науках, в першу чергу на створенні математичних моделей (ММ), що дозволяють дослідити властивості та чисельно визначити характеристики фізичного явища або ТО.

Експериментальні задачі відносяться до емпіричного методу пізнання, однак в таких задачах додатково до спостережень і вимірів здійснюється перерозташування, зміна режимів роботи або інший вплив на явище, процес або предмет, що досліджується.

В рішенні емпіричних і теоретичних завдань дослідження важлива роль належить логічному способу отримання знань на основі розумово-заключних трактовок пояснень явищ або процесів та висування певних ідей та шляхів

вирішення питань. Цей спосіб базується на результатах емпіричних досліджень.

Одною з важливих вимог, що пред'являються до наукового пізнання, є наукове узагальнення, яке дозволяє встановити залежності і зв'язки між певними сторонами фізичних явищ, процесів або ТО і створити наукові висновки.

2.2. Теоретичні і прикладні дослідження та розробки

За цільовим призначенням наукові дослідження поділяються на теоретичні і прикладні.

Теоретичні дослідження направлені на створення нових підходів та принципів. Це звичайно фундаментальні дослідження. Їх мета – розширення знань суспільства і можливостей поглибленого розуміння законів природи і форм існування матерії. Прикладні дослідження направлені на створення нових методів і засобів, структурно-конструктивних, схемотехнічних і технологічних рішень. На основі цих досліджень створюються нові речовини, матеріали, способи виробництва і організації робіт, а також нові типи і конструкції машин і механізмів та системи обладнання, що задовольняють вимогам розвитку конкретних галузей виробництва.

Крім прикладних науково-дослідних робіт (НДР) на основі дослідно-конструкторських робіт (ДКР) виконуються прикладні розробки. Метою прикладних НДР і ДКР є перетворення результатів теоретичних і прикладних досліджень в технічні пропозиції з подальшою організацією робочого проектування (рис 2.1).



Рис. 2.1. Схема інноваційного удосконалення технічних об'єктів

На стадіях НДР і ДКР виконується ескізне проектування, при якому здійснюється розробка ескізної конструкторсько-технологічної документації та виготовляються і досліджуються (випробуються) так звані макетні зразки, які є першими спробами матеріальної реалізації нових розробок ТО. За результатами НДР (ДКР) і ескізного проектування виконується технічний

проект. При цьому розробляється, за вимогами держстандартів, робоча конструкторська і технологічна документація на виробництво та виготовляються і випробуються дослідні зразки. Після випробування цих зразків виконується робочий проект в якому ТО остаточно доводиться і коригується конструкторська та технологічна документація. Здійснюється постановка виробництва результату розробки. Постановка виробництва, тобто втілення результатів НДР (ДКР) здійснюється при підтвердженні вимог технічного завдання на виконану роботу або ефективності розробки.

2.3. Тема, етапи виконання і класифікація дослідницьких робіт

Кожне наукове дослідження має тему. Темою можуть бути різні питання науки і техніки. Обґрунтування теми – важливий етап в виконанні наукового дослідження. Процес виконання дослідницької роботи складається, як правило, з виконання певних етапів, а саме: визначення і формулювання теми, формулювання мети і задач, об'єкту і предмету дослідження, здійснення теоретичних досліджень, експериментальних досліджень, аналізу і оформлення результатів наукових досліджень. Інколи також виконується техніко-економічне обґрунтування, тобто попереднє визначення техніко-економічного ефекту втілення результатів дослідження.

Наукові дослідження класифікують за різновидами зв'язку з суспільним виробництвом та за ступенем важливості для народного господарства. Першими є дослідження, що направлені на створення нових процесів, машин, конструкцій, які використовуються для підвищення ефективності виробництва і досліджень, а також направлені на покращення виробничих відношень і підвищення рівня організації виробництва. Також до першої групи відносяться теоретичні роботи в галузі суспільних, гуманітарних та інших наук, що використовуються для удосконалення суспільних відношень та підвищення рівня духовного життя людини. Друга класифікаційна група визначає ступінь важливості для народного господарства. Це роботи, що виконуються по завданню міністерств і відомств та роботи, що виконуються за державними планами науково-дослідницьких організацій. В залежності від джерела фінансування НДР і ДКР поділяються на держбюджетні, що фінансуються за кошти держбюджету та госпдоговірні, що фінансуються у відповідності із договорами, що укладені з підприємствами замовниками. Такі підприємства використовують результати досліджень у подальшій виробничій діяльності.

За тривалістю виконання НДР (ДКР) поділяються на довготривалі, що розробляються протягом декількох років та короткотривалі, що виконуються у межах року.

2.4. Науково-технічна інформація

Характерною рисою розвитку сучасної науки є бурний потік нових наукових даних, що отримуються в результаті досліджень. Кожен рік у світі видаються сотні тисяч наукових книг, журналів і збірників. Інформація має властивість «старіння» і пошук новітньої інформації, необхідної для виконання конкретного завдання, інколи є складною задачею. Відсутність або закриття інформації призводить до дублювання досліджень, що в межах окремої держави є економічно недоцільним.

У цілому до носіїв інформації відносяться: книги (монографії, підручники, навчальні посібники), первинні видання (журнали, збірники, матеріали наукових симпозіумів і конференцій, бюлетені), нормативні документи (стандарти, технічні умови, інструкції, вказівники, довідники), каталоги, звіти з НДР і ДКР, дисертації та їх автореферати, аналітичні та реферативні огляди. Окремим важливим видом інформації є патентна документація.

Джерела інформації систематизуються за допомогою універсальної десятичної класифікації інформаційних документів (УДК). УДК поділяють усі області знань на 10 відділів, кожен з яких поділяється на 10 підрозділів, а підрозділи складаються кожен з 10 частин. Частини деталізуються. Структура УДК складається з груп основних індексів і визначників. Групи поділяються на підгрупи загальних і спеціальних визначників. УДК спрощує пошук інформації, однак така система є у певній мірі громіздкою. Тому розробляються автоматизовані системи пошуку інформації. Сучасним засобом пошуку інформації є інтернет. Останнім часом для пошуку інформації застосовується цифровий ідентифікатор об'єкта DOI (Digital Object Identifier), який присвоюється науковим збірникам, журналам, монографіям та підручникам, окремим статтям, розділам наукової книги тощо.

Творцями названої інформації є науково-технічні і науково-педагогічні співробітники, які створюють названі джерела в плановому та ініціативному порядкух. При цьому публікація отриманих науково-технічних результатів і досягнень є обов'язком наукових і науково-педагогічних працівників та ознакою високої кваліфікації і творчої праці інженерно-технічних працівників.

Наукові матеріали, що публікуються в періодичних виданнях повинні мати певні обов'язкові елементи. Такими елементами є: постановка проблеми в загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими або практичними задачами; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких висвітлені попередні результати розглядання або початку рішення даної проблеми і на

які опирається автор, виділення невіршених частин загальної проблеми, які розглядаються в роботі, що публікується; формулювання мети (постановка задачі); викладання основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з виконаного дослідження і перспективи його подальшого розвитку.

Кандидатські і докторські дисертації та стислі змісти кожної з них, тобто автореферати, є спеціальними "рукописними" видами інформації, що характеризують підвищення кваліфікації науковця та його власний внесок в науково-технічний прогрес.

3. КВАЛІФІКАЦІЙНІ І ЯКІСНІ ОЗНАКИ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Формулювання теми наукового дослідження

В науково-технічних розробках розрізняються наукові напрямлення, проблеми і теми. Під науковим направленням розуміється сфера наукових досліджень наукового колективу, що вирішує значну теоретично-експериментальну задачу в певній галузі науки. Структурними одиницями направлення є комплексні проблеми, теми і питання. Комплексна проблема включає в себе декілька проблем. Проблемою є складна і невирішена наукова задача, що охоплює значну область дослідження і має перспективне значення. Необхідність рішення комплексних проблем ставить загальні завдання – розробити відкриття, вирішити комплекс задач, що забезпечують високий технічний рівень певних об'єктів і систем та розвиток суспільства. Проблема складається з ряду тем. Тема – це наукова задача, що охоплює певну область наукового дослідження. Вона базується на багаточисельних дослідницьких питаннях. Під науковими питаннями розуміються менш об'ємні та значні наукові задачі, що відносяться до конкретних фізичних явищ, процесів та ТО певних областей наукового дослідження. Результати рішення цих задач мають не тільки теоретичне, але й головним чином, і практичне значення. При розробці теми або питання висувається конкретне завдання в дослідженні, тобто створення нової конструкції, або розробки прогресивної технології, нової методики тощо.

Перед постановкою теми здійснюється ретельне ознайомлення з вітчизняними і зарубіжними науково-технічними інформаційними джерелами на основі якого визначається конкретний стан питань в досліджуваній області та суміжних областях, що відносяться до тематики наукової роботи.

Постановка, тобто вибір проблеми або теми є складною та відповідальною задачею, що включає певні етапи. Перший етап – формулювання проблеми. На основі аналізу протиріч та невирішених питань напрямку, що досліджується, формулюється основне проблемне питання і визначається в загальному вигляді результат, що очікується. Другий етап включає в себе розробку структури проблеми. Виділяють тему, підтеми, питання. Композиція цих компонентів повинна складати так зване дерево проблеми (тобто структуру і сутність). На третьому етапі встановлюють актуальність проблеми, тобто її цінність на сучасному етапі розвитку науки і техніки.

Тема досліджень повинна бути актуальною, тобто важливою та такою, що потребує рішення у теперішній час. Ця вимога є однією з головних. Тема

повинна вирішувати нову наукову задачу, тобто таку задачу, що ще не розроблялася і не розробляється, тобто дублювання повинно бути виключено. Дублювання можливо лише по завданню керівних установ з метою створення конкуренції колективів для якісного вирішення найважливіших державних завдань в короткий термін.

3.2. Оцінка перспективності і формулювання мети наукового дослідження

Необхідно розрізняти наукову задачу, яка має ознаки наукової новизни, від інженерно-економічної задачі. Наукова новизна повинна бути дійсно науковою, а не інженерною, тобто принципово новою. Крім того тема і отримані результати повинні бути економічно ефективними і повинні мати значимість, тобто використання результатів повинно дати економічний, або інший позитивний ефект.

При розробці теоретичних досліджень вимога економічної ефективності може поступатися вимоги значимості. Значимість, як головний критерій теми, є головною при виконанні досліджень, які визначають престиж вітчизняної науки, або складають фундамент для подальших прикладних досліджень.

Тема досліджень повинна відповідати профілю наукового колективу, який має певні спеціалізацію, компетенцію та досягнення. Однак не можна допускати монополію, яка знижує якість досліджень.

Для оцінки перспективності тем використовують два методи – розрахунковий та експертних оцінок. За першим використовується показник перспективності, який розраховується за формулою:

$$P_n = E_z(1 - V_p)/V_z,$$

де E_z – очікуваний загальний економічний ефект;

V_p – вірогідність ризику;

V_z – загальні витрати.

При використанні експертного методу заплановану тему оцінюють фахівці–експерти. Кожному експерту надається оціночна базова шкала, за допомогою якої встановлюються бали. Результати оцінки експертів обробляються. Кращою є тема з максимальним балом.

Кожне наукове дослідження після обрання теми починається з ретельного вивчення науково-технічної інформації. Метою пошуку, проробки та аналізу інформації є всебічне визначення стану питання та обґрунтування мети і задач дослідження. Складається бібліографічний перелік джерел інформації. Літературні джерела підлягають ретельному

критичному аналізу при якому визначаються найбільш актуальні питання, формується уявлення про напрямки рішення поставлених задач. Керівною ідеєю аналізу інформації є обґрунтування актуальності і перспективності мети дослідження. По результатам аналізу інформації розробляються висновки. В висновках відображають актуальність і новизну, останні роботи та розробки за тематикою дослідження. На основі висновків формується загальна мета і конкретні завдання дослідження.

Мета дослідження – коротке, але більш повне, ніж назва, формулювання проблеми (головної задачі), яка вирішується для досягнення головного результату. Мета формується таким чином, щоб її висловлювання чітко і остаточно пояснювало сутність задачі. Формулювання мети повинно точно і однозначно відповідати головному результату в узагальненому виді та створювати можливість визначення конкретних задач дослідження і їх практичної цінності.

Після формулювання задач обираються методи дослідження і досягнення поставленої мети. Використання поряд з математичними і фізичними методами рішення конкретних завдань загальних методів (кібернетичних, системних, тощо) постановки і рішення наукової проблеми сприяє цілісності роботи в методологічному сенсі.

3.3. Наукова новизна і достовірність одержаних результатів

Рішення окремих задач дослідження дозволяє формулювати наукові результати, а узагальнення наукових результатів дозволяє формулювати наукове положення. Коротке, але якісне відображення вчиненого у вказаних формулюваннях надає більшу чіткість окреслення цілей і досягнутих результатів.

Науковий результат дослідницької роботи – це раніше невідомі закономірність, кількісне співвідношення, аналітична залежність, а також новий технологічний процес або матеріал тощо.

Наукове положення уявляє собою узагальнення результатів, яке вирішує головну задачу та мету дослідження цілком або частково та відображає в формі тезису вперше встановлену неочевидну, а інколи несподівану закономірність, що збагачує теорію (науку) і є корисною для практики, або встановлює принципово нові якості предмету дослідження, фізичних та інших процесів і явищ. Наукове положення може бути сформульоване у вигляді закону або закономірності, концепції або гіпотези, методу рішення наукової проблеми і тому подібне.

Наукові результати та положення повинні бути принципово (в теоретичному плані) новими, бути достовірними (тобто теоретично і

експериментально підтвержені), мати теоретичне значення і практичну цінність.

Особливо важливими показниками якості наукового дослідження є достовірність отриманих результатів. Достовірність повинна бути підтверджена вірною постановкою головної наукової задачі, цілі і окремих задач дослідження, обґрунтуванням гіпотез, результатів та висновків логічними, фізичними, математичними і експериментальними засобами, адекватністю ММ. Важливим фактором якості наукової роботи є позитивні результати порівняльного аналізу запропонованих та відомих технічних рішень, а також практичне використання отриманих теоретичних результатів. Повинна бути доведена істинність отриманих теоретичних результатів. Додатковим сучасним засобом підтвердження достовірності є застосування спеціальних сертифікованих програмних продуктів, що адекватно моделюють певні фізичні процеси та ТО чисельними методами на комп'ютерних симуляторах.

3.4. Наукове значення і практична цінність дослідницької роботи

Наукове і практичне значення наукової дослідницької роботи визначається розвитком конкретного наукового напрямку на основі отриманого наукового результату. Необхідно показати перспективу подальшого розвитку і практичного застосування отриманих наукових результатів.

Практична цінність наукової роботи характеризується ефектом (науково-технічним, економічним, соціальним) від використання її конкретних прикладних результатів в практиці проектування і експлуатації (методики і розрахункові програми, конструкторсько-технологічні рішення, виробничі і технологічні процеси, режими роботи, матеріали...).

Підтвердженням практичної цінності і перспективності наукових робіт зокрема таких, що містять вперше створені методи теоретичних, експериментальних, або прикладних чисельних досліджень, а також створення нових методів складання ММ фізичних процесів та ТО, є застосування здобутих результатів в розширені різновидів ТО з новими ТР і властивостями та покращеними показниками технічного рівня (ПТР). Також свідченням практичної цінності наукових робіт є використання їх результатів в забезпеченні держави складом вчених і педагогічних працівників фахівцями з науковими ступенями.

Певні результати виконаних наукових досліджень оформлюються як дисертаційні роботи. Дисертація на здобування науковою ступеню кандидата або доктора наук є кваліфікованою науковою роботою, що виконана особисто у виді спеціально підготовленого рукопису, або опублікованої наукової монографії. Автор висуває для публічного захисту науково

обґрунтовані теоретичні або експериментальні результати, наукові положення, що характеризуються єдністю змісту і свідчать про особистий внесок здобувача в науку. При цьому наявність хоча б одного наукового положення в докторській дисертації є обов'язковою.

4. ЗМІСТ ПОНЯТЬ І СКЛАДОВИХ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Вимоги до назви і вступу дослідницької роботи

Всі розділи звіту з НДР або дисертації повинні бути побудовані за певними правилами та логічно взаємопов'язані. До головних елементів звіту (дисертації) відносяться: назва, вступ, головний зміст і заключення (висновки).

Назва – це подане у стислій формі головне питання, рішення якого присвячена виконана та складена дисертація (звіт). Головний результат і головне питання, на досягнення та вирішення яких направлена робота, повинні бути пов'язані з назвою, очевидними і викладеними загальними ключовими словами. Ключовими словами є терміни, що визначають сутність дослідження і забезпечують логічний зв'язок назви роботи з її результатом. Такий зв'язок є обов'язковим. Назва роботи в цілому визначає поняття об'єкту і предмету дослідження.

Вступ є дуже відповідальним елементом звіту з НДР або дисертації та містить усі кваліфікаційні ознаки наукової роботи: актуальність, постановку наукової проблеми (задачі), об'єкт і предмет дослідження, мету і задачі, методи дослідження, значення і новизну наукових положень і результатів, підтвердження їх достовірності, наукове значення і практичну цінність. В дисертаціях, додатково до перелічених положень вступу, вказується власна участь здобувача наукового ступеню в отриманих результатах та повнота наукових публікацій. Науковий звіт відображає результати та дисертаційна робота виконується відповідно для отримання результату наукового дослідження. Необхідність рішення наукової проблеми обумовлена наявністю проблемної ситуації, яка повинна бути актуальною. Актуальність теми обґрунтовується визначенням необхідності створення нових теорій та теоретичних і конструктивно-технологічних (у галузі технічних наук) рішень, що забезпечує подальший розвиток науки і техніки та вирішення протиріч і недоліків, що існують.

4.2. Поняття об'єкту і предмету дослідження

З формулювання наукової проблеми повинен випливати логічний зв'язок цієї роботи з назвою теми, об'єктом і предметом, метою і основними задачами дослідження. Формулювання наукової проблеми вказує на об'єкт і предмет дослідження як область наукових притязань та відображає наукову новизну. Також наукова проблема повинна відображати ціль дослідження.

В процесі формулювання наукової проблеми (задачі) визначається область (об'єкт) дослідження і обґрунтовується напрям (предмет) дослідження в певній області. Об'єкт і предмет дослідження відносяться між собою як ціле та часткове. Предмет досліджень визначає тему дослідження.

Об'єкт дослідження уявляє узагальнене формулювання понять, проблем і інших елементів, які розглядаються в науковому дослідженні. Об'єкт дослідження відноситься до області наукового пошуку, в межах якої виявлена і існує досліджувана проблема. Це система закономірностей, зв'язків, відношень, видів діяльності, в межах якої існує проблема. Також об'єктом дослідження уявляється сфера пізнавальної діяльності дослідника, а саме конкретний предмет, поняття, процес або явище, що породжує "проблемну ситуацію" і тому обрано для дослідження. Об'єкт дослідження повинен характеризуватися непізнаними властивостями на час виникнення проблемної ситуації. Як правило об'єкту дослідження притаманні декілька або безліч властивостей, тому його комплексне дослідження може вирішуватись окремими завданнями та різними методами і засобами дослідження.

Предмет дослідження – конкретне питання або властивість заявленого об'єкту, що розглядається в НДР. Предмет більш вузький і конкретний, завдяки його формулюванню з загальної системи, що є об'єктом дослідження. Виділяється частина системи або процес, що відбувається в системі. Така складова є безпосередньо предметом дослідження. Здійснюється дознання властивостей, зв'язків і відношень, що належать досліджуваному предмету і підлягають безпосередньому вивченню. Предметом дослідження можуть бути причини виникнення процесу або явища, його різноманітні властивості, показники та закономірності розвитку.

4.3. Структура вступу

Вступ уявляє найбільш відповідальну частину роботи, тому що містить в стислій формі усі положення, обґрунтування яких наведено в НДР (дисертації). Вступ доцільно складати після виконання усіх розділів і заключення наукової роботи. Також вступ доцільно починати з передмови, де коротко визначаються сутність і стан питань досліджуваної проблеми, її значність в сучасних умовах, необхідність вирішення.

Після передмови визначається актуальність наведенням положень і доводів, що свідчать про наукову і прикладну значущість НДР. Актуальність знаходиться в єдності з проблемними питаннями, що досліджуються та вирішуються. При обґрунтуванні актуальності корисно надати певні

посилання на інформаційні джерела з яких випливає, що тема до виконання НДР як що і досліджувалась, однак була не розроблена остаточно.

Наступним кроком є опис зв'язку НДР з науковими планами, програмами, державними постановами. В дисертації вказується номер держреєстрації базових НДР в яких автор приймав участь та зробив відповідний внесок.

Далі вказуються мета і задачі дослідження, що містять формулювання головної цілі, яка відповідає рішення основної проблеми НДР. У відповідності з головною ціллю виділяються окремі задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення. Лаконічно, однак достатньо до розуміння описуються об'єкт і предмет дослідження та визначаються застосовані методи. В методах дослідження надається короткий опис методів, що застосовані при виконанні дослідження. В технічних і фізико-математичних науках застосовуються математичні аналітичні та чисельні, а також експериментально-лабораторні методи досліджень.

Характеризується наукова новизна виконаної НДР. До ознак, що характеризують новизну, відносяться: постановка нової наукової проблеми; введення нових наукових понять, термінів і категорій; розкриття нових закономірностей протікання природних і суспільних процесів; використання нових методів, інструментів і апарату досліджень; розробка і наукове обґрунтування пропозицій про оновлення об'єктів, процесів і технологій, що застосовуються в техніці, економіці і управлінні; розвиток та створення ММ нових предметів дослідження, тобто оригінальних та інноваційних ТР ТО, а також наукових уявлень про навколишнє середовище, світ, природу і суспільство. Наукова новизна не повинна бути зведена до простого перелічення установлених фактів, факторів, ідей, закономірностей, а повинна розкривати головну наукову концепцію НДР, визначати наукове пояснення сутності досліджень в якісному і кількісному аспектах.

Надається характеристика практичної значності НДР, яка визначається ефектом (науково-технічним, економічним, соціальним...) від використання її конкретних прикладних результатів в практиці проектування і експлуатації (методики і розрахункові програми, ТР обладнання та технологічних процесів, режими роботи, матеріали...) і масштабами втілення або рівнем технічної готовності до використання.

Результати НДР оформлені як дисертація, містять додаткові відомості, а саме про особистісний вклад дисертанта в виконанні дослідження і колективні публікації, про апробацію результатів (доповіді на наукових семінарах, конференціях і симпозіумах) та публікації здобувача наукового ступеню.

Підрозділ вступу «Апробація результатів досліджень» також повинен містити відомості про практичну перевірку основних положень і результатів дисертаційної роботи, а також про сфери наукової, прикладної, навчальної діяльності, в яких результати були застосовані, а також про перспективи подальших розвитку та використання. Вказується де і коли доповідалися результати досліджень (на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо).

4.4. Композиція основного змісту наукового звіту (дисертації)

Після вступу, складаються розділи текстового відображення результатів виконаної НДР або дисертації. Зміст цих розділів дозволяє визначити головне питання і доказати вирішення наукової проблеми (задачі). Незважаючи на безліч наукових питань, що вирішуються, вимоги логічної цілісності тексту звіту з НДР (дисертації) є обов'язковими для дотримання. Тому існує формалізація процедури побудови відповіді на головне питання на основі відповідей на сукупність питань дослідження. Традиційною вважається вказана нижче наступна композиція основного змісту роботи. Перший розділ є постановочним. В цьому розділі на основі інформаційних джерел аналізується стан розвитку та можливості вирішення наукової проблеми (задачі) на основі наявного теоретичного знання в певній області науки. Обґрунтовується об'єкт і предмет дослідження, виконується постановка мети і задач дослідження. У другому розділі здійснюється обґрунтування вибору гіпотези (інноваційних конструктивно-технологічних пропозицій) вирішення наукової проблеми, визначається та обґрунтовується метод (методи) досліджень. В наступних розділах в технічних і фізико-математичних науках обираються, обґрунтовуються та розробляються нові методи та ММ рішення окремих задач, тобто частин предмету дослідження. Прогнозуються (розраховуються) результати. На основі отриманих ММ створюються практичні розрахункові та експериментальні методики. В останньому розділі здійснюється аналіз і узагальнення наукових результатів, а в технічних, фізичних і хімічних науках також наводиться експериментальна частина. Установлюється адекватність ММ об'єкту і предмету дослідження. Наводяться відомості про практичну реалізацію наукових результатів в технічних рішеннях, розрахункових і експериментальних методиках, технологіях, а також при підготовці майбутніх фахівців. Кожен з розділів роботи закінчується висновками. Кінцевими частинами роботи є висновки (заключення), перелік літератури і додатки (при необхідності).

5. РОЗГОРТАННЯ НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ

5.1. Аналіз стану об'єкту і постановка задачі дослідження

Планування виконання НДР обумовлено можливістю рішення науково-прикладної проблеми (задачі) застосуванням наявних теоретико-практичних знань з попереднього стану розвитку об'єкту і предмету дослідження на основі вивчення відповідних інформаційних джерел, тобто необхідністю отримання нового знання. Неможливість рішення проблеми традиційними шляхами визначається на основі аналізу інформаційних літературних і патентних джерел і визначення проблемних питань об'єкту і предмету дослідження. При аналізі вказаних питань є недостатніми статистичне узагальнення і систематизація технічних рішень, методів і методик іншого наявного наукового продукту, що існує і стосується проблематики НДР. Необхідно прослідкувати історичний розвиток питань проблеми та її становлення. Завдяки вказаному аналізу об'єкту і предмету дослідження та перспектив і можливостей рішення наукової проблеми визначаються вихідні посилення на вирішення схожих задач та попередніх аналогів проблеми. Визначаються методологічні підходи до постановки проблеми і методів її рішення. Успіх рішення проблеми НДР є залежним від якості і вірності її постановки, що потребує пізнання структури і сутності проблеми. Якість постановки також залежить від визначення явищ, протиріч та недоліків, які є джерелом проблеми.

В цілому концепція рішення наукової проблеми є не тільки кінцевим результатом НДР, а і уявляє підхід до постановки проблеми (задачі). Тому таку постановку доцільно остаточно формулювати після отримання кінцевих результатів і складання основного тексту та висновків по роботі.

5.2. Специфіка дослідження

Задача обґрунтування достовірності гіпотези або інноваційної привабливості нових і нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень та заходів удосконалення у відповідності з об'єктом і предметом дослідження повинна вирішуватись шляхом математичних та експериментальних доказів в природних і технічних науках та логічних і історичних доказах в суспільних науках та побудови розумових заключень, що наводяться в основних розділах звіту з НДР (дисертації). Обґрунтуванням вірності гіпотези та ефективності результатів, здобутки роботи перетворюються в теорію або певну теоретичну систему. Засобами доказу є науково обґрунтовані і визнані та перевірені аналітичні і розрахункові способи, теорія логічного доказу та

методи аналогії, альтернатив, порівняльного аналізу. Після постановки проблеми і визначення методу і шляхів її вирішення здійснюється створення доказів досягнення поставленої мети. В фізико-математичних і технічних науках математичним і експериментальним шляхами здійснюється вирішення поставлених, відповідно до мети, об'єкту і предмету, окремих задач дослідження. На окремі задачі складаються висновки по розділам. На основі доказів і формулювання розумових заключень обґрунтовується головний результат і його істинність, яка є властивістю мислення.

Поняття «істинність» Аристотель визначав як єдине у відношенні до безлічі варіантів. Він ототожнював процес пізнання істини з доказом гіпотез. Докази гіпотези утворюють систему наукового знання, теорію або концепцію. Поняття «теорія» уявляє цілісну систему логічного зв'язку пов'язаних між собою положень, що відображають суттєві зв'язки і відношення до дійсності явища, що визначається цією теорією. Термін «концепція» визначає систему поглядів. Отримані теорія і концепції відображають становлення, розвиток і усування внутрішніх протиріч об'єкту і предмету дослідження, тобто розкривають його сутність в цілісності (єдності протилежних сторін).

Концепція формується виходячи з наукових положень, що охоплюють усі суттєві ознаки об'єкту і предмету дослідження в їх логічній єдності. Основу наукового положення також складає гіпотеза, однак меншого рівня загальності, ніж для концепції. Її логічним розгортанням відкриваються причинно-наслідкові зв'язки в наукових положеннях і інших результатах, що отримані в роботі. Таким чином забезпечується цілісність і безпротирічність та логічний зв'язок окремих результатів, гіпотеза є об'єднуючим початком наукового положення.

5.3. Обґрунтування головного результату

При відносно рівномірному розподіленні об'єму звіту з НДР (дисертації) по розділам, часто існує головний розділ, який демонструє максимальну обґрунтованість наукових результатів та несе максимальне змістовне навантаження. Наводяться теоретичні доказові досягнення, на основі яких прогнозуються практичні результати. Такий розділ є найбільш насиченим висновками. Для підтвердження достовірності положень цього та інших розділів задіюють як теорію математичного або логічного доказу так і порівняння отриманих прикладних результатів у виді технічних або інших рішень і методик з кращими аналогами.

Якщо теоретичне обґрунтування об'єкту і предмету дослідження НДР виконано, питання його практичної реалізації є не науковим, а технічним.

Виникає можливість плутанини і підміни наукових результатів прикладними розробками. При представленні головного наукового результату необхідно надати коротке визначення його теоретичної сутності і обґрунтування достовірності та показати його принципову новизну порівнянням з попередніми досягненнями, практичну значність і реалізацію та перспективу розвитку.

При обґрунтуванні достовірності результатів недостатньо посилань на задовільне узгодження розрахункових і дослідних результатів. Помилковим є підміна вказаного обґрунтування посиленням на актуальність і важливість практичних результатів. Необхідно дати розгорнуте обґрунтування головного результату розпочавши з постановки і визначення методів теоретичного та експериментального досліджень і далі синтезу головних досягнень роботи індуктивним узагальненням проміжкових та допоміжних результатів. Також необхідне порівняння отриманих здобутків з відомими теоретичними і прикладними попередніми досягненнями, що стосуються об'єкту і предмету дослідження.

5.4. Вимоги до висновків (заключення)

Заключення (висновки по роботі) є логічним підсумком звіту з НДР (дисертації), в якому констатується, що поставлене в роботі завдання досягнене. Висновки складаються з пунктів. В першому пункті надається коротка оцінка стану питання з розкриттям сутності проблемної ситуації (теоретичного протиріччя) і формулюванням наукової проблеми (задачі). Сутність рішень наукової задачі розкривається коротким визначенням достовірності і новизни, порівняльним аналізом з відомими рішеннями та визначенням з теоретичних здобутків конкретних практичних результатів, їх втіленням. Розгорнута характеристика рішень наукової проблеми (задачі) повинна показати їх значення для розвитку конкретних областей науки і техніки.

Складання заклчення – це не механічний підсумок найбільш значних результатів розділів, а їх узагальнення з розкриттям причинно-наслідкових зв'язків, коли з головного результату більш високого рівня узагальнення логічно випливають результати меншого ступеню загальності. В такому порядку вони і повинні бути подані як і в заклченні по роботі, так і в її ввідній частині. В заклченні головний результат повинен бути поданий в розвитку, тобто повинен визначати тенденцію подальшого удосконалення та теоретичного і практичного використання. Повинні бути вказані нові наукові задачі, які доцільно вирішувати в розвиток результатів виконаного дослідження.

Необхідним є чітке логічне відпрацювання усіх етапів НДР, починаючи з стану питання, тобто з аналізу емпіричних і теоретичних протиріч, що визначають наявність проблемної ситуації, і далі, на етапах розробки фізичної моделі або ММ предмету дослідження, аналізу достовірності відображення властивостей і характеристик реальних ТО такими моделями. Також логічне обґрунтування отриманих ТР і досягнень сприяє чіткому формулюванню наукових положень і результатів, їх наукової новизни, теоретичного значення і практичної цінності виконаних досліджень.

При складанні заключення (висновків по роботі) необхідна побудова цілісного ланцюга причинно-наслідкових зв'язків між підходом до постановки, методами, засобами і результатами рішення проблемних питань НДР.

Всі висновки доцільно поділяти на дві групи: наукові і виробничі. При виконанні НДР отримуються інноваційні результати, які є показником її рівня, якості і конкурентоспроможності. Обов'язковим є необхідність захисту державного пріоритету на винаходи і відкриття. Певні результати НДР і винахідницької діяльності можуть «закриватись», з метою світового пріоритетного освоєння виробництва, або підсилення обороноздатності держави, тобто відобразатись в звітах «для службового використання», або під грифом таємності.

6. ВИКОРИСТАННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ НАУКОВИХ ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1. Втілення результатів наукових досліджень

Втілення завершених наукових досліджень у виробництво є заключним етапом НДР (ДКР) і уявляє передачу виробництву науково-технічної продукції (звіти, розрахункові формуляри, інструкції, тимчасові вказівки, технічні умови, технічні проекти...) в придатній до реалізації формі, яка забезпечує техніко-економічний ефект. НДР перетворюється в продукцію лише після початку її споживання виробництвом. Замовниками на виконання НДР (ДКР) є технічні управління міністерств і відомств, виробничі підприємства, науково-дослідні і конструкторські організації.

Підрядчик – науково-дослідна організація, що виконує НДР, у відповідності з двухсторонньою угодою, формулює пропозиції до втілення. Відповідно до умов угоди, пропозиції містять документацію: технічне завдання, звіт (проектну складову), технічні умови, вказівки тощо.

Як би ретельно не виконувалась НДР в науково-дослідних установах, фахівці цих установ не в змозі всебічно враховувати різні, часто випадкові фактори, що діють в умовах виробництва. Тому процес втілення складається з двох етапів: дослідно-виробничого втілення і серійного втілення. Будь-яка наукова розробка на першому етапі втілення потребує дослідної перевірки в виробничих умовах. Після дослідно-виробничої перевірки нові конструкції, технології, розрахункові формуляри, рекомендації або методики застосовують в промисловому проектуванні і серійному виробництві. На цьому етапі науково-дослідні організації не приймають участі, однак можуть здійснювати консультативну і налагоджувальну науково-технічну підтримку. Втілення досягнень науки і техніки фінансуються організаціями, які його здійснюють.

6.2. Критерії ефективності досліджень

Під економічною та іншою ефективністю наукових досліджень розуміються наступні досягнення: зростання національного доходу, підвищення продуктивності, енергоресурсозбереження і зниження витрат на виробництво та наукові дослідження, а також зростання технічного рівня і номенклатури виробів промисловості та підвищення обороноздатності держави. Існує також поняття соціально-економічної ефективності: ліквідація тяжкої праці, покращення санітарно-гігієнічних умов, очищення навколишнього середовища, престиж вітчизняної науки.

Наукові дослідження потребують значних витрат, тому економне виконання НДР також є показником ефективності. Дуже велике значення надається питанням прискорення розвитку і підвищенню ефективності застосування досягнень науково-технічного прогресу. Наука і система її додатків є значною виробничою силою та потужним фактором ефективного розвитку виробництва і суспільства.

Існує два протилежних напрями розвитку економіки – екстенсивний та інтенсивний. Шлях екстенсивного розвитку – розширення заводських площ, збільшення числа верстатів та працівників без змін організації праці, технології та без застосування технічних інновацій. Інтенсивний шлях передбачає підвищення обсягу та покращення технічного рівня продукції і виробництва з кожної виробничої одиниці без збільшення кількісних показників елементів виробничого потенціалу. Інтенсивний шлях забезпечується використанням науково-технічних досягнень: нових засобів праці, технологій, конструкцій, методик оптимізаційних розрахунків, підвищенням якості освіти і кваліфікації працівників, підвищенням ефективності організаційних та економічних способів позитивного впливу на виробництво і суспільство. Інтенсивний шлях забезпечується підвищенням ефективності роботи наукових установ і колективів та капіталовкладень в освоєння та втілення результатів НДР (ДКР) у виробництво.

Для оцінки ефективності досліджень застосовують критерії результативності.

Фундаментальні дослідження створюють прибуток та економічний ефект інколи у далекій перспективі і їх важко оцінювати кількісно. Тому застосовуються якісні критерії: можливість використання в різних галузях виробництва, новизна явищ, відкриттів та винаходів, міжнародне визнання, пріоритет, створення напрямків прикладних досліджень.

Прикладні дослідження оцінюються кількісними критеріями. Ефективність наукової установи або колективу оцінюється такими критеріями: середньорічного виробітку НДР, числом втілених тем, економічним ефектом втілення НДР (ОКР), кількістю публікацій та патентів, кількістю проданих ліцензій та валютної виручки.

Ефективність праці наукового співробітника оцінюється наступними критеріями: публікаційним, новизною розробок (на рівні винаходу), економічним, цитуванням робіт. Публікаційний критерій визначає підсумкову кількість друкованих робіт, їх загальний обсяг в друкованих аркушах, кількість монографій, підручників, навчальних посібників. Публікаційний критерій не є дуже об'єктивним. Відбуваються випадки більш значної якості та віддачі певних одиничних робіт, що опубліковані в другорядних виданнях, відносно значної кількості друкованих робіт в

провідних виданнях. Економічний критерій – наробка науковцем частини кошторисної вартості НДР. Суттєвим є критерій новизни, що визначається числом створених винаходів (отриманих патентів). Критерій цитування – число посилань на друковані праці науковця.

6.3. Шляхи підвищення ефективності досліджень

Одним з шляхів підвищення ефективності наукових досліджень є використання проміжних результатів установ і виробництв максимально наукоємних галузей для підвищення якості радіо-телев'язку, синоптичної інформації, промислового та медичного приладобудування, транспортних засобів.... Такими галузями є електронно-мікропроцесорна, ракетно-космічна, атомно-енергетична, авіаційна, кораблебудувальна і морська підводно-технічна, бронетанкова та інші військові.

Іншими шляхами є доступність і оперативність наукових видань та зменшення терміну відпрацювання наукових статей в редакційних колегіях провідних періодичних видань. Також важливо удосконалення системи оплати та заохочення праці науковців.

Однак головними напрямками підвищення ефективності є достатність капіталовкладень в науку, підвищення якості освіти та кадрового складу і потенціалу науковців, а також застосування сучасного дослідницького приладного обладнання, електронно-обчислювального, вимірювального та іншого спеціального дослідницького обладнання.

В сучасній науковій діяльності якість кадрів наукових установ визначається наявністю та числом науковців з науковими ступенями докторів і кандидатів наук, та їх наявністю, крім вищих навчальних закладів і дослідних інститутів, в галузевих проектних і заводських лабораторно-дослідницьких підрозділах. Для отримання наукового ступеню необхідно підготувати і захистити дисертацію.

Докторська дисертація повинна містити нові і не захищені раніше наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати певної галузі науки, які в сукупності уявляють новий науковий напрям або вирішують важливу наукову або науково-прикладну проблему. Кандидатська дисертація повинна містити нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують конкретну наукову задачу, яка має важливе значення для певної галузі науки. Також передбачена можливість отримання наукового ступеню за особисто підготовлену та видану у типографському вигляді наукову монографію відповідного рівня. А саме за створення нових знань та рішень наукових проблем науковець отримує науковий ступінь.

Підвищення ефективності наукових досліджень досягається розвитком творчих здібностей здобувачів вищої освіти, а також удосконаленням системи підготовки та атестації наукових кадрів.

6.4. Визначення ефекту використання досліджень

Ефективність використання результатів НДР (ДКР) може бути визначена критеріями втілення і економічної ефективності.

Критерій втілення K_B закінчених тем визначається наприкінці календарного року підсумком виконаних та використаних робіт m_B при загальній кількості m_T тем, що знаходяться в стадії розробки.

$$K_B = m_B / m_T.$$

Критерій економічної ефективності є основним показником і визначається

$$K_E = E_B / B_B,$$

де E_B і B_B – ефект від втілення теми і витрати на її виконання і втілення.

Крім визначених вище критеріїв, застосовується ще критерій рівня новизни досліджень і розробок, тобто число завершених робіт, за яким отримані патенти на винаходи та свідоцтва про наукові відкриття. Застосовуються відносні показники – кількість патентів і свідоцтв, що віднесені до кількості наукових працівників колективу та відношення кількості патентів і свідоцтв до числа тем, що розроблені та в яких повинні бути створені захищені охоронними документами інновації.

Якщо науковий колектив виконав розробки, які продані за кордон, то їх ефективність оцінюється відносним ліцензійним показником:

$$K_L = D_B / \sum P_B,$$

де D_B – валютний дохід держави, $\sum P_B$ – підсумкові витрати на виконання НДР (ДКР) та на оформлення і продаж ліцензії.

Високі показники K_B , K_E і K_L визначають високу якість праці наукового колективу. Однак максимально достовірним показником ефективності НДР (ДКР) є фактична економія від втілення отриманих результатів в виробництво або суспільну практику, підвищення промислово-економічного, науково-технічного та обороно-військового потенціалу держави.

7. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

7.1. Прийоми та стадії творчого процесу

Творчість це створення по задуму нових цінностей. Наукова і науково-технічна творчість проявляються у створенні нової та корисної для людства інформації, встановленні невідомих раніше наукових фактів, створенні та розробці відкриттів, винаходів нових предметів, методів, способів і методик. Творчість не можлива без теоретичного творчого мислення. Завдяки такому мисленню можливо спростувати наукові гіпотези, що існують, або створити нові наукові гіпотези, надати глибокі пояснення процесів або явищ, які раніше були незрозумілими або недостатньо вивченими, пов'язати сумісно різні явища, тобто знайти стрижень процесу, що вивчається, науково обґрунтувати значну кількість дослідних даних.

В теперішній час на основі творчого процесу здійснюється удосконалення відомих рішень. Удосконалення є процесом перетворення об'єкту і предмету дослідження, тобто об'єкту мислення в оптимальному напрямку. Результат вказаного перетворення є продуктом розумової праці.

При певних умовах процес удосконалення призводить до оригінального та інноваційного конструкторського, технологічного або іншого рішення. Оригінальність проявляється у своєрідному та неповторному погляді на об'єкт і процес або явище.

Творчий характер мислення при розробці теоретичних аспектів наукового дослідження заключається в створенні уявлень, що відповідають новим комбінаціям відомих елементів або додані нетрадиційних і доповнюючих елементів, а також здійсненні нових зв'язків між елементами, які утворюють позитивний результат.

Фундаментальною основою творчого процесу і наукового пізнання є методологія, яка являє собою систему принципів і способів організації та побудови теоретичної і практичної діяльності дослідника, а також є вченням про таку систему. Наукова методологія визначає об'єкт, предмет і компоненти дослідження та сукупність засобів і послідовність дій, що необхідні для успішного вирішення поставленої задачі.

Загальна методологія науки досліджує закони розвитку наукового пізнання в цілому, однак ґрунтується на законах і досягненнях окремих наук. Методологія науки є системою методів і методик наукового пізнання та їх розвитку. Методом є спосіб досягнення позитивного результату здійсненням певних дій і є шляхом пізнання. Науковий метод є комплексом певних способів, правил, прийомів і норм та базою створення методології дослідження заданого процесу або явища, а також ТО. Спосіб уявляє собою

систему дій, що призводять до очікуваного та корисного результату будь-якої роботи. Методика – послідовна сукупність прийомів досягнення необхідного результату на основі відповідного теоретично обґрунтованого і визнаного методу.

Творчий процес базується на наступних прийомах: збирання, аналізу і узагальнення інформації; постійному зіставленні та порівняному аналізу предмету дослідження з відомими аналогами; аналізу пропозицій і способів удосконалення варіантів ТР; критичному осмисленні, чіткому формулюванні та викладенні нових уявлень і положень.

Творчий процес теоретичного дослідження має декілька стадій: Перша стадія – знайомство з відомою інформацією, зокрема в технічних науках, з відомими конструктивно-технологічними рішеннями, методами і методиками розрахунків. Друга стадія – відмова від традиційних і відомих шляхів рішення аналогічних задач. Третя стадія – розбір і зіставлення різних варіантів рішення задач. Четверта – обрання на основі певних методу і розроблених ММ максимально раціонального варіанту рішення задачі. В технічних науках таким варіантом є глобально-оптимальне ТР.

Якщо є значна кількість типових рішень, задача утворення оригінального та більш досконалого рішення є значно складною. Творчий процес уявляє розрив традиційних поглядів на предмети і явища та розгляд їх з іншої, нетрадиційної точки зору.

7.2. Загальні методи досліджень

Успішне виконання наукового дослідження залежить, крім здібностей і працездатності дослідника, від володіння дослідником методами дедукції і індукції. Дедуктивний метод – це спосіб дослідження, при якому власні окремі положення виводяться із загальних. Індуктивний метод визначає можливість дослідження, при якому по окремим (частковим) факторам і явищам встановлюються загальні принципи і закони. Індуктивний метод є розповсюдженим, подібним методом на основі властивостей окремих елементів. Менделєєв сформулював періодичний закон хімічних елементів.

При теоретичних дослідженнях використовують як дедукцію, так і індукцію. Обґрунтування гіпотези дослідження у відповідності до фізичних законів і діалектики природознавства здійснюється шляхом дедукції. При цьому гіпотезу формулюють на основі окремих фактів (індукції).

В теоретичних дослідженнях також застосовуються логічний та історичний методи. Логічний метод складається з гіпотетичного і аксіоматичного підходів.

Гіпотетичний підхід оснований на розробці гіпотези, тобто наукового припущення, що містить елементи новизни і оригінальності. Гіпотеза повинна у певній мірі пояснити явище або об'єкт і предмет дослідження та мати експериментальне підтвердження. Цей підхід є основним і у певній мірі розповсюдженим в прикладних і технічних науках. Гіпотеза уявляє сутність, методичну основу, теоретичне передбачення. На стадії формування гіпотези теоретичну частину необхідно поділити на окремі питання, що дозволяє спростити їх проробку. На її основі та критичного аналізу науковець формує власні пропозиції і здійснює розвиток теоретичних положень, що існують, або пропонує нове, більш раціональне рішення задачі.

Аксіоматичний підхід оснований на очевидних положеннях, що приймаються без доказів. За цим підходом теорія розробляється на основі дедуктивного методу, більш широке розповсюдження цей підхід отримав в фізико-математичних науках.

Історичний метод дозволяє дослідити виникнення, формоутворення та розвиток процесів і об'єктів та подій в хронологічній послідовності, що дозволяє виявити внутрішні та зовнішні зв'язки, закономірності та протиріччя. Такий метод дослідження використовується головним чином в суспільних і історичних науках. В прикладних науках такий метод застосовується для вивчення розвитку і формування різних галузей науки і техніки.

Між логічним і історичним методами існує єдність, яка ґрунтується на тому, що будь-яке логічне пізнання повинно розглядатися в історичному аспекті.

Основні методи дедукції і індукції доповнюються методом відповідності досліджень діючої системи законів і закономірностей техніки, яким повинен відповідати новий ТО. При цьому основою інженерної творчості є евристичний метод. Цей метод в останні десятиріччя доповнюється комп'ютерними методами інженерної творчості. Системне використання евристичного і комп'ютерного методів обумовлює наявність систем пошуку і обробки інформації, у вигляді баз даних та застосування засобів обчислювальної техніки і програмування. У процесі подальшого розвитку та поєднання евристичного та комп'ютерного методів досліджень можливо створення корисних систем штучного інтелекту, які забезпечать нові можливості розвитку та прогресу людства.

7.3. Способи спрощення рішень складних задач

Особливу роль в теоретичних дослідженнях виділяють способи спрощення рішень складних завдань. Основними способами таких рішень є

аналіз і синтез, абстрагування і формалізації, а також конкретизації і сходження від абстрактного до конкретного.

Аналіз – спосіб наукового дослідження, при якому природне, фізичне, інколи техногенне явище або фізичний чи ТО розділяється на окремі частини. Синтез – протилежний аналізу спосіб, що уявляється в дослідженні вказаних явищ або об'єктів в цілому на основі об'єднання пов'язаних один за іншим елементів в одне ціле. Синтез дозволяє узагальнити поняття, закони, теорії та об'єднати окремі елементи предмету дослідження в єдине ціле. Методи аналізу і синтезу взаємопов'язані, їх однаково застосовують в дослідженнях.

При аналізі процесів і явищ виникає необхідність розглядання значної кількості фактів та ознак. Необхідно уміти виділяти головне, тобто виключати усе другорядне, що суттєво не впливає на відображення процесу або явища, що розглядається. Тому для спрощення рішення задачі приймаються певні припущення, які не викликають появ значних погрешностей та зниження якості дослідження. Застосовується метод абстрагування, тобто відволікання від другорядних фактів або чинників з метою зосередження на найважливіших особливостях явища, що вивчається.

У більшості досліджень застосовується метод формалізації, який уявляється в тому, що основні наукові положення, що описують процеси і явища, подаються у вигляді ММ, тобто формул та рівнянь. На основі ММ встановлюються закономірності між фактами та чинниками, що вивчаються та створюється. Таким чином здійснюється об'єктивне відображення фізичних процесів і можливостей впливу на них та можливостей проектних розрахунків ТО.

Метод конкретизації уявляється в дослідженні предмету з урахуванням різноманітності та багатогранності його особливостей і властивостей. Сходження від абстрактного до конкретного уявляє двохетапний метод переходу від конкретизації до абстрагування з подальшим сходженням від абстрактних визначень до конкретних уявлень.

7.4. Методологія моделювання

В прикладних і технічних науках для виконання досліджень створюють моделі, зокрема математичні та фізичні, а інколи мисленні, інтуїтивні.

Як вже вказано вище, модель – штучно-створений аналог об'єкту дослідження. Під моделлю уявляється система, що відображає основні властивості такого об'єкту. Модель – зображення в зручній формі багаточисельної інформації про природній об'єкт або ТО чи явище, що вивчається. Вона знаходиться в певній відповідності з вказаним об'єктом, або

явищем і дозволяє отримати необхідну інформацію. Метод моделювання, тобто вивчення явищ, процесів, систем, об'єктів за допомогою моделей, є основним в сучасних дослідженнях.

Фахівці високої кваліфікації, які мають певні здібності, знання і досвід, можуть виконувати експертну оцінку об'єктів і предметів дослідження і здійснювати мисленні експерименти та створювати інтуїтивні моделі певних об'єктів.

Основним є спосіб математичного моделювання за допомогою ММ у вигляді систем рівнянь, алгоритмів, розрахункових формул. Розширення можливостей математичного моделювання забезпечується застосуванням досягнень прикладної математики, тобто приблизних та чисельних методів та методів комп'ютерного програмування і при застосуванні пристроїв електронно-обчислювальної техніки. При математичному моделюванні фізика явищ може відрізнитись, при цьому математичні залежності можуть бути однаковими. Наприклад розподіл в просторі, як теплового так і магнітного полів, в залежності від наявності та відсутності в досліджуваній області польових джерел, визначаються відповідно рівняннями Пуасона і Лапласа. Математичне моделювання має особливу цінність при вивченні дуже складних процесів і явищ.

При фізичному моделюванні фізика явищ в об'єкті і натурної моделі та їх математичні залежності є однаковими. Фізичні моделі дозволяють наочно уявити процеси, що протікають натурно. За допомогою фізичних моделей можна вивчати вплив окремих параметрів на течію фізичних процесів. Натурні моделі уявляють собою об'єкти, що змінюються (у більшості зменшуються) масштабно, однак дозволяють дослідити процеси, що існують в натурних умовах.

Стандартних рекомендацій по обранню методології побудові і застосуванню моделей не існує. Обрання методу і методології моделювання є виключною компетенцією дослідника. Модель повинна відображати сутність явища, процесу, ТО. Незначні фактори, значна деталізація, другорядні явища значно ускладнюють модель, тому обґрунтовано відкидаються. При цьому модель повинна бути адекватною, тобто вірно відображати явище, процес та об'єкт і предмет дослідження у цілому.

8. ВИКОНАННЯ ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

8.1. Особливості теоретичних досліджень

Будь-яке теоретичне дослідження починається з аналізу стану теорії і практики об'єкту і предмету наукової роботи. На цьому етапі за даними вітчизняної і закордонної літератури, науково-технічних звітів, дисертацій, патентної документації та інших матеріалів виявляється сучасний стан, перспективи розвитку і практичного застосування досліджуваних питань. Об'єм науково-технічної інформації зростає вдвоє кожні 10 років. При значному об'ємі різновидів інформації важко визначити напрям успішного вирішення поставлених задач. Узагальнення аналізу і висвітлення стану питання дозволяє створити висновки, в яких наводиться конструктивна критика відомих рішень і методик та їх характеристик. Вказуються причини, внаслідок яких отримані раніше результати розвитку предмету дослідження певної галузі науки не задовольняють сучасним вимогам практики. Визначається коло проблемних питань, що розглядаються і задач, які необхідно вирішити. Наукова робота повинна містити головну нову наукову ідею і отримані на її основі та маючи з нею внутрішню єдність нові наукові і практичні результати. Крім ТО все більш суттєве значення мають дослідження з питань прогнозування і економічного обґрунтування, а також організації виробництва, оптимізації структур підприємств, інформаційних і управлінських процесів.

В технічних науках до нових наукових результатів відносяться: удосконалення і розробка нових методів аналізу, синтезу, оптимізації та підвищення технічного рівня предмету дослідження; розробка ММ аналізу, синтезу, оптимізації ТО, їх статичних і динамічних режимів і характеристик; пропозиції нових та удосконалення відомих критеріїв оцінки досліджуваних параметрів ТО з урахуванням показників їх енергетики, швидкодії, надійності, технічних характеристик; конкретні рівняння і формули розрахунку параметрів та характеристик ТО.

До нових практичних результатів можуть бути віднесені: розробка проектів та їх втілення; розробка методик і алгоритмів розрахунків та керівних матеріалів.

Нові наукові і практичні результати обов'язково повинні бути пов'язані причинно-наслідковим зв'язком.

Безліч технічних, фізичних, економічних та інших процесів досліджують математичними методами, які поділяються на основні групи.

Аналітичні методи з застосуванням як елементарної так і вищої математики (алгебра, геометрія, тригонометрія, диференціальне, інтегральне та варіаційне обчислення, векторний аналіз ...). Такими методами визначаються математичні залежності між параметрами ММ. Аналітичний шлях дозволяє визначати точні кількісні зв'язки між аргументами і функціями, здійснити глибокий аналіз предмету дослідження. Недоліком аналітичних методів є виникнення інколи складності або відсутності можливості окремого рішення, що притаманне конкретному ТО, процесу або явищу та виникнення складнощів визначення умов однозначності у виді межових умов. Визначення межових умов потребує проведення достовірного досліді і ретельного аналізу експериментальних даних. Невірне визначення межових умов призводить до створення неадекватних ММ. При певній складності фізико-технічних процесів і ТО інколи неможливо визначити аналітичне рішення деяких задач. В таких випадках застосовуються методи математичного аналізу з використанням експериментів (теорія тотожності, метод розмірності, метод планування експерименту...), а також чисельних методів. Комбінацією математичного аналізу, експерименту і комп'ютерного моделювання отримуються нові дані про функціональні зв'язки і властивості предмету дослідження і ММ.

8.2. Особливості експериментальних досліджень

Експериментальні методи дозволяють глибоко вивчити процеси та явища в межах точності техніки дослідів і концентрації уваги на параметрах, що мають максимальний вплив і уявляють головний інтерес. Однак з експерименту дуже складно та інколи неможливо остаточно визначити, які з параметрів є основними і як буде протікати процес, якщо усі параметри змінюються одночасно. Експериментальні методи дозволяють отримати залежності між окремими змінними об'єкту або процесу оптимізації та управління в певних межах їх змін і інтервалів зміни режимів функціонування, що досліджуються. Аналіз зміни характеристик за вказаними межами і інтервалами без додаткових експериментів призводить до помилок.

Експеримент є дуже важливим способом отримання нових наукових знань, що уявляє науково поставлений досвід або спостереження явищ та функціонування певних ТО в точно визначених умовах. Такі умови дозволяють слідкувати за ходом експерименту і керувати ним та відтворювати при необхідності. Від звичайного пасивного спостереження експеримент відрізняється активним впливом дослідника на явище або ТО, що вивчається.

Експерименти поділяються на природні і штучні. Штучні експерименти ставляться в природних і технічних науках, а природні виконуються в гуманітарних науках і дослідженні соціальних явищ. Також експерименти поділяються на лабораторні і виробничі. Лабораторні дослідження виконують з застосуванням типових приладів, моделювальних стендів і пристроїв та іншого обладнання. Надається можливість доброякісного вивчення впливу певних параметрів і характеристик на предмет дослідження з мінімальними витратами. Виробничі експерименти вивчають процес в реальних умовах з обґрунтуванням впливу випадкових факторів виробничого середовища.

В залежності від теми дослідження об'єми експериментів є різними. Іноді достатньо одного лабораторного експерименту, а часто необхідна серія експериментів, тобто попередніх пошукових, лабораторних дослідницьких і доводочних та остаточних виробничих або полігонних. На основі експериментальних досліджень надається можливість отримання емпіричних діаграм і графіків, які є важливими для практичного застосування.

8.3. Методологія експериментальних досліджень

В залежності від теми наукового дослідження об'єм експериментів може бути різним. Іноколи для підтвердження теорії або гіпотези достатньо одного експерименту, а іноколи необхідна серія експериментів. На їх обробку необхідні значні витрати часу та певні інші витрати. Іноколи визначається, що виконано непотрібні та зайві експериментальні дії. Також іноколи тривалі експериментальні дії не підтверджують робочу гіпотезу дослідження, або необхідну адекватність теорії і методики розрахунку. Тому перед експериментами необхідно розробити методологію експерименту.

Методологія експерименту – загальна структура, тобто постановка і послідовність виконання експериментальних досліджень. Методологія експерименту включає наступні основні етапи: розробка плану-програми; оцінка вимірів і обрання засобів виконання; проведення експерименту; обробка і аналіз отриманих даних. Наведені етапи є традиційними. В останній час застосовують математичну теорію експерименту, яка дозволяє підвищити точність і знизити об'єм експериментальних робіт. Основа плану-програми визначає методику експерименту та визначає його мету і задачі. Для конкретного експерименту оптимальними є 3-4 задачі, для комплексного експерименту 8-10 задач.

Необхідно вірно обрати фактори, що варіюються, визначити основні і другорядні характеристики, які впливають на процес. Аналізуються схеми

процесу, обираються основні і другорядні взаємні впливи і залежності між ними. Інколи виконують попередній пошуковий експеримент.

8.4. Основні сучасні методи прикладних досліджень

Постійне та зростаюче збільшення різноманітності розробки і виробництва ТО та пропозицій їх нових ТР обумовили появу системних досліджень. При цьому виникло поняття і наукова категорія структури, яка властива ТО довільної фізичної природи. Актуальність рішення питань вивчення і узагальнення структурної різноманітності складних ТО обумовила інтенсивний розвиток структурно-системних досліджень. Їх основною метою є виявлення характерних законів організації, функціонування та розвитку складних еволюціонуючих ТО різних науково-виробничих галузей. Виник науковий напрям, що має назву "Загальна теорія систем", що вивчає системні закони, які проявляються в ТО різної фізичної природи, тобто законів, які є формально ідентичними, але діють в абсолютно різних явищах та технічних галузях.

Структурно-системні дослідження дозволяють виявити раніше невідомі зв'язки та аналоги між явищами і об'єктами різної фізичної природи. Це відкриває можливості застосування ідей і підходів певної більш дослідженої науково-технічної галузі в іншу галузь з початковою стадією досліджень.

Особливого значення структурно-системні підходи набувають при системному проектуванні складних об'єктів нової техніки, наприклад комплект – електропривод в складі регульований асинхронний двигун – напівпровідниковий перетворювач – мікропроцесорний регулятор – складові контролю і захисту.

Структурно-системні дослідження мають безпосереднє відношення до проблеми побудови узагальнених моделей системного аналізу та визначення меж їх коректного застосування щодо існуючих структурних видів і класів ТО.

Велика різноманітність ТО, зокрема електромеханічних, може розглядатись як цілісний еволюціонуючий клас природно-антропогенних систем, наділених власною генетичною структурою. Це надає можливість систематизації існуючих та передбачення їх нових структурних різновидів.

Системний аналіз уявляє сукупність прийомів і методів вивчення складних процесів, а також ТО, в яких відбувається складна взаємодія комплектуючих елементів. Взаємодія цих елементів здійснюється застосуванням прямих і зворотних зв'язків різної фізичної спрямованості, наприклад електро, гідро, пневмо, тепло різновиди автоматики у відповідності з технічною системою. Сутність системного аналізу складається в визначенні

можливостей ефективного впливу на предмет дослідження та здійснювати такий вплив шляхом оптимізації процесів управління і обрання ефективних варіантів та засобів керування у відповідності з критеріями оптимізації.

В останні десятиліття створені нові можливості наукових досліджень на основі досягнень прикладної математики і обчислювальних методів та побудови комп'ютерних пристроїв. В теперішній час отримали поширене застосування методи системного аналізу (дослідження операцій, теорія управління, теорія множин...) з застосуванням чисельних методів прикладної математики, програмування і обчислювальної техніки. Одним з комплексних методів дослідження випадкових процесів є вірогідностно-статистичний. Для дослідження складних процесів вірогіднісного характеру застосовується метод Монте-Карло, який є чисельним та інші чисельні методи [5].

9. ЕВОЛЮЦІЯ І ФАКТОРИ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

9.1. Ієрархія розвитку технічних об'єктів

Результатами наукових досліджень в галузі промисловості, енергетики і транспорту є нові інноваційні більш досконалі і ефективні ТО та технології.

Кожен ТО і будь-яка технологія можуть бути представлені у системному виді описами, що мають ієрархічну упорядкованість. Ієрархія в загальній теорії систем означає розташування частин або елементів цілого в порядку від вищого до нижчого. Ієрархічні описи характеризують наступні поняття: потребу, або функцію ТО, технічну функцію (ТФ), функціональну структуру (ФС), фізичний принцип дії (ФПД), ТР, проект [1].

Ієрархію цих описів характеризує рис. 9.1.

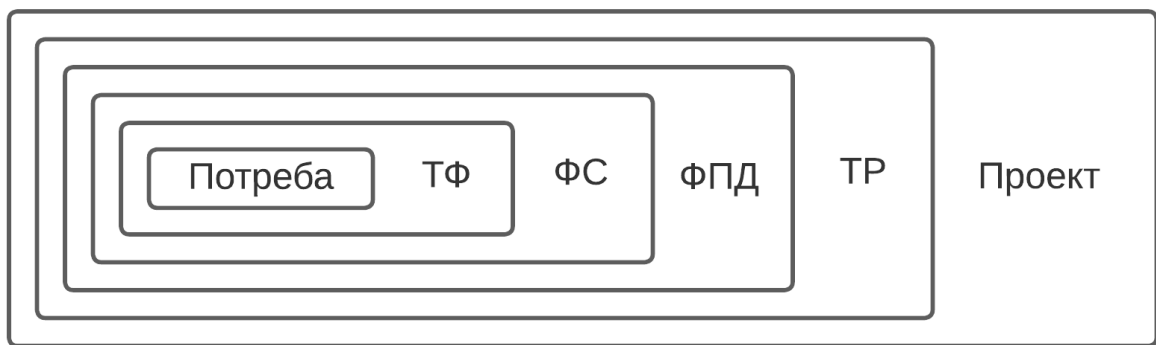


Рис. 9.1. Ієрархія опису технічного об'єкту

Поняття потреби визначає призначення ТО або мети його створення та відповідає на питання, що бажано визначити. Опис потреби можливо формулювати у вигляді трьох компонент [1]:

$$P = (D, P, O),$$

де D – вказівка дії, що виконує ТО при отриманні бажаного результату;

P – вказівка об'єкту, або предмету праці, на яку направлена дія D;

O – вказівка обмежень і особистих умов, при яких виконується дія D.

Поняття ТФ містить інформацію потреби, яку може задовільнити ТО та фізичну операцію, що реалізує потребу

$$F = (P, Q),$$

де P – задовольняєма потреба;

Q – фізична операція, що уявляє фізичне перетворення заданого вхідного потоку, або фактора, у вихідний потік, або фактор.

Опис фізичної операції формалізовано визначається трьома компонентами:

$$Q = (A \rightarrow B \rightarrow V),$$

де A і B – відповідно вхідний і вихідний потоки (фактори) речовини, енергії або сигналів;

Б – найменування операції перетворення А в В.

Відповідно до компоненту Q фізична операція є фізичним перетворенням заданих вхідних факторів. Приклад опису фізичних операцій наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Приклади опису фізичних операцій

Найменування технічного об'єкту	А	Б	В
Електричний освітлювач	Електричний струм	Перетворення	Світловий потік
Електрична піч	Електричний струм	Перетворення	Тепло
Електричний індукційний двигун	Електричний струм	Перетворення	Обертання механізму
Електричний генератор	Механічна енергія обертання та джерело магнітного поля	Перетворення	Електричний струм

Більшість ТО складаються з декількох або багатьох елементів (вузлів, агрегатів, блоків). Тому ТО можуть бути поділені на частини, що виконують певні функції та фізичні операції. Такі частини утворюють конструктивну ФС, що поєднана функціональними зв'язками. Крім таких зв'язків, між елементами ТО існують потокові енергетичні та інформаційно-керуючі зв'язки, що об'єднують і пов'язують вказані елементи та їх фізичні операції і утворюють потокову ФС. Таким чином існують і взаємодіють ФС двох видів – конструктивна ФС і потокова ФС, які взаємодоповнюють одна другу [1].

Опис ФПД містить принципову схему ТО з основними елементами, що забезпечують реалізацію його призначення і функціонування, а також напрямку вказаних вище потоків. Така схема полегшує наступну розробку (конструювання) ТО з раціональним вибором складових частин.

Термін ТР уявляє конструктивне і технологічне оформлення ФПД та конструктивної і потокової ФС. ТР характеризується ознаками: переліком основних та допоміжних елементів, взаємним розташуванням сукупності елементів в просторі та способами і засобами з'єднання та зв'язків цих елементів, послідовністю їх взаємодії, а також особливостями конструктивного виконання елементів (геометрична форма, матеріал) і співвідношення параметрів ТО в цілому та його окремих важливих елементів. ТР конкретного ТО доцільно описувати у виді ієрархічного набору, тобто спочатку пристрою (системи) в цілому, потім кожного елемента (блоку), потім кожного вузла елемента і так далі. Описи доповнюються кресленнями. ТР є загальним «безрозмірним» описом ТО, яке

може мати різні параметри та кількісні характеристики (потужність, маса, габарити, частота обертання, продуктивність тощо).

На відміну від ТР в проекті задаються параметри і бажані показники ТО та надається інформація про виготовлення і експлуатацію. Проект включає компоненти конструкторської і технологічної документації, яка дозволяє створити ТО та здійснити його виготовлення на відповідному виробництві.

9.2. Критерії і умови розвитку технічних об'єктів

Серед параметрів і інших даних, що характеризують будь-який ТО, є показники, що визначають міру досконалості і прогресивності та суттєво впливають на розвиток окремих різновидів ТО і техніки в цілому. Такі параметри і показники мають назву критеріїв розвитку ТО. Оскільки будь-який ТО, як правило, має декілька критеріїв розвитку, то головним фактором прогресивного розвитку ТО є покращення одного або декількох основних критеріїв без погіршення інших менш значних критеріїв.

Критерії розвитку ТО в цілому є однаковими і поділяються на чотири групи: функціональні, що характеризують важливі показники реалізації функцій ТО; технологічні критерії, що пов'язані з можливістю і простотою виготовлення ТО; економічні критерії, що визначають економічну доцільність реалізації певної функції за допомогою ТО; антропологічні та екологічні критерії, що пов'язані з питаннями людського фактору, або впливу позитивних і негативних факторів на людину та навколишнє середовище, які обумовлені ТО.

Систематику критеріїв розвитку надано на рис 9.2.



Рис. 9.2. Систематика критеріїв розвитку техніки

Критеріям розвитку ТО (рис. 9.2) відповідають нижчеперелічені умови, за допомогою яких для будь-яких ТО різних галузей техніки можливе виділення певних критеріїв [1].

Умова вимірності. За критерії розвитку можуть бути прийняті тільки такі показники ТО, які допускають можливість якісної оцінки по одній з певних шкал вимірів, а саме шкал відношень, шкал інтервалів, шкал порядку.

Умова співставленості. Критерій повинен мати такі одиниці вимірів, які дозволяють порівнювати аналогічні ТО різних структурно-конструктивних виконань і вихідних даних, різних років виготовлення та різних держав. Співставлення доцільно виконувати на основі безрозмірних або питомих показників, які дають можливість узагальнення результатів та висновків та здійснювати порівняння аналогічних ТО без впливу фактору певних вихідних даних, зокрема потужності.

Умова винятковості. За критерії винятковості можуть бути прийняті параметри ТО, які в першу чергу характеризують його ефективність і значно впливають на його розвиток. При відсутності уваги до таких параметрів можливі безперспективні (тупікові) шляхи та пригнічення розвитку.

Умова постійності. За критерії постійності можуть бути прийняті такі параметри ТО, для яких завжди виконується умова винятковості.

Умови мінімальності і незалежності. Сукупність критеріїв розвитку повинна містити тільки такі ознаки, які не можуть бути логічно отримані з інших критеріїв і не є їх прямими наслідками.

Для виділення набору критеріїв дослідник або розробник ТО повинен уявити та врахувати наступні фактори: сутність критерія, час і причини його виникнення; формулу або спосіб виміру критерію, що включає шкали або одиниці вимірів; діапазон і характер виміру значень критерію в часі; оцінку ступеня загальності критерія.

9.3. Показники якості і перелік недоліків технічного об'єкту

Крім критеріїв розвитку, існує поняття критеріїв (показників) якості або ПТР ТО, які дозволяють виконати зіставлення альтернативних варіантів та визначити кращий варіант при ідентичності інших критеріїв (показників). До показників якості відносяться в першу чергу параметри (характеристики), зміна яких призводить до покращення якості і ефективності ТО. Відповідно під ПТР (якості) розуміється фізико-технічний, економічний або інший показник (маса, вартість, енергетичний показник, точність, швидкодія ...) по значенню якого з будь-яких ТР або структур можна обрати кращу.

У будь-якого ТО в процесі виготовлення і експлуатації відразу або з часом утворюються певні недоліки (дефекти), які виникають з наступних

нижчеперелічених причин. Знижені (недостатність теплового запасу або переважувальної здатності...) або завищені (черезмірний запас міцності, матеріалоємності...) вимоги, що закладені в технічному завданні, або недосконалість методики та похибки проектування. В технічне завдання можуть бути не включені певні суттєві умови (надійності, наявності пристроїв захисту...), або включені залишкові умови (певної форми та компактності при відсутності вимоги вбудованого розташування...). В технічному завданні визначені значення деяких параметрів або показників на рівні, що знижені відносно аналогів кращого світового рівня, або невраховані вимоги деяких показників якості. Вказані недоліки повинні бути вилучені в подальших розробках. Тому для кожного ТО, що використовується, доцільно формулювати перелік недоліків, який є основою створення вимог модернізації та майбутнього удосконалення при розробці та постановці виробництва нового покоління даного ТО. Виявлення і усунення недоліків ТО, що перебувають у виробництві і експлуатації, уявляє важливу науково-інженерну задачу. Однак нові розробки (покоління) відомих ТО обов'язково повинні мати кращі ПТР відносно попередніх аналогів.

9.4. Ретроспективний аналіз закономірностей розвитку і ієрархічний опис інноваційного об'єкту

Будова і історичний розвиток кожного ТО та технічний прогрес у цілому підпорядковуються певним законам і закономірностям, що вказують на стійкі якісні та кількісні причино-наслідкові зв'язки і відношення, що існують в кожних галузі і різновидах виробів промисловості. Їх врахування і аналіз дозволяє визначити нові структурно-конструктивні властивості і можливості удосконалення ТО, що перебувають у виробництві та створення їх нових поколінь.

Закономірності будови і розвитку техніки мають відношення до ТО з однаковими або близькими функціями. Закони техніки мають відношення до будь якого ТО і до багатьох класів ТО, що мають різні, або суттєво відмінні функції. До законів і закономірностей будови ТО відносяться стійкі ознаки в конструктивній та потоковій ФС, в ФПД і ТР, які існують та залишаються незмінними на протязі багатьох поколінь в історичному розвитку ТО. До законів і закономірностей розвитку техніки відносяться певні стійкі зміни деякого критерію розвитку (ПТР) або деякої кількісно визначаємої конструктивної ознаки протягом багатьох поколінь ТО. Крім того, існують і діють закони розвитку, які для багатьох класів ТО з різними функціями відображають аналогічні зміни в конструктивній і потоковій ФС, в ФПД і ТР.

Для можливості розробки ТО на рівні кращих світових взірців доцільно, відповідно до рис. 9.1, виконати нижчеперелічену ієрархічну послідовність задач обрання проектно-конструкторських рішень. 1. Складається або уточнюється опис потреби. Якісний опис доповнюється кількісними характеристиками Д, П, О (9.1). 2. Обирається певна перспективна фізична операція з альтернатив, що існують. Інколи є доцільним історичний аналіз попередніх ТР, які можуть скласти альтернативу при застосуванні нових сучасних матеріалів і технологій. 3. Для реалізації однієї і тієї ж ТФ з врахуванням потреби і фізичної операції визначається декілька альтернативних ФС з яких обирається максимально раціональна. 4. У одній і тієї ж потокової ФС складові елементи ТО можуть мати різні і альтернативні ФПД, з яких також визначається максимально раціональний і ефективний. 5. Один і той же ФПД може бути реалізований декількома, а інколи значним числом практично прийнятих варіантів ТР, з яких необхідно обрати краще рішення. 6. Вирішується послідовність підзадач пошуку і обрання оптимальних параметрів ТО і його елементів на основі ітераційних процедур структурно-параметричної оптимізації (СПО).

Викладена ієрархія за п.п. 1-6 може скласти основу розробки ефективних методів обрання проектно-конструкторських рішень і систем автоматизованого проектування з оптимізаційними розрахунками, що надає можливість розробки ТО кращого світового рівня.

10. НАУКОВО-ІНЖЕНЕРНА ТВОРЧІСТЬ

10.1. Розробка нових науково-технічних рішень

Якісно виконана наукова робота повинна містити дійсно нові наукові результати і відповідати критерію «наукова новизна». Одним із показників якості дослідження є захист хоча б одного створеного в роботі ТР винахідницьким патентним документом, що свідчить про визнання створеного в роботі ТО дійсно новим.

Згідно законодавству, винаходом визначається ТР, що задовольняє критеріям охороноздатності (патентоздатності): винахід повинен уявляти рішення, яке є новим на дату подачі заявки (потребується світова новизна), повинен володіти технічним рівнем, який перевищує рівень техніки, що існує (критерій «суттєві відміни») та бути корисним суспільству. Творча новизна виникає, якщо виготовлена не просто нова річ, а коли людиною створена належна матеріальному світу здібність, що розширює межі людських можливостей. Винахідницька діяльність заключається у виявленні та створенні в предметах, явищах та способах невідомих раніше потенціалів і здібностей, тобто в творчій новизні. При створенні нового ТО (ТР) винахідник використовує відомі матеріальні засоби («із нічого» творити неможливо), тобто перетворює їх структуру або розташовує їх в іншому середовищі, замінює деякі засоби на інші, оснащує додатковими засобами або застосовує інші дії і прийоми. Ці зміни перетворюють попередню сутність об'єкту або процесу і обумовлюють нові та корисні властивості. Створюється нова сукупність ознак як умова признання в технічній пропозиції суттєвих відмін, тобто визнання її винаходом.

Існує три різновиди винаходу: конструкція, спосіб виготовлення, речовина. Для підтвердження новизни і визнання ТР винаходом за спеціальними правилами готується текстовий документ з необхідним описом і кресленнями, які у лаконічній, однак в достатній мірі пояснюють сутність і забезпечують можливість практичного використання інноваційної пропозиції. Заявка на винахід направляється до державного патентного закладу, що здійснює державну патентну експертизу і при позитивному результаті видає державний патентний документ, тобто патент. Такий документ, крім літерно-цифрових ознак міжнародної класифікації винаходів та нумерацій держреєстрації заявки і патенту, містить відомості про автора (авторів) і заявника (заявників) та містить так звану формулу і опис винаходу. Формула уявляє словесне висловлення сутності винаходу у вигляді одного загального речення. Перша частина формули містить загальні з прототипом ознаки ТР, а друга частина розкриває сутність винаходу

висловленням суттєвих відмін. Перед типографським виданням патенту ідентифікаційні відомості і формула винаходу публікуються в офіційному виданні-державному патентному бюлетні.

Якщо автору (авторам) необхідна прискорена публікація відомостей про інноваційне ТР, замість заявки на винахід може бути подана заявка на корисну модель, яка розглядається без експертної перевірки на світову новизну, однак публікується аналогічно винаходу. Отримується, з можливістю повторного патентування і подальшої експертизи на світову новизну патент на корисну модель. Також якщо діяльність автора (авторів) по зміні прототипу зводиться до уточнення змісту інгредієнтів речовини, режимів або операцій в відомому способі, або взаємозв'язку елементів чи параметрів відомої структури або конструкції, то подібна інновація меншого рівня оригінальності також може бути захищена патентом на корисну модель

Правила складання і змісту заявок на винахід і корисну модель ідентичні. Заявка повинна містити наступні складові.

1. Назва.
2. Опис області техніки до якої відноситься ТР.
3. Опис відомих аналогів ТР, що патентується, та загальних з ним ознак, що присутні в інновації, а також конструктивна критика аналогів.
4. Опис найближчого аналога-прототипу з вказівкою загальних ознак і його конструктивна критика.
5. Формулювання ознак та суттєвих відмін винаходу (моделі), які відрізняють інноваційне ТР від прототипу.
6. Пояснення ефекту, який досягається завдяки ознакам та суттєвим відмінням винаходу відносно прототипу.
7. Короткий опис переваг винаходу (моделі).
8. Розширений опис винаходу (моделі) з поясненням сутності по кресленням.
9. Опис роботи (дії) винаходу (моделі).
10. Опис можливого техніко-економічного ефекту від використання винаходу (моделі).
11. Формула винаходу (моделі).
12. Креслення (графічні пояснення) винаходу (моделі).
13. Реферат.
14. Заява про подання заявки з відомостями про автора (авторів) та заявника (заявників).
15. Супроводжувальний лист.

10.2. Постановка творчої інженерної задачі і визначення аналогів її рішення

Раціональна і ефективна постановка наукової і винахідницької задачі та обрання дослідницької теми передбачають аналіз певних питань, а саме: в чому складається проблемна ситуація і яка її передісторія, які фактори перешкоджають усуненню проблемної ситуації, які можливості створює рішення задачі. Також вказана постановка передбачає визначення аналогів рішення схожих задач при аналізі стану теми або ТО, що розробляється. Такі аналоги складають основу пошуку ефективного рішення проблеми.

Аналогами є ТР, які є кращими на рівні світових взірців і визначаються ознаками, які присутні у ТО, що розглядається. Кращий з аналогів, який максимально наближений за ознаками, що присутні та вимогами, що пред'являються до досліджуваного ТО є прототипом. При обґрунтуванні прототипів, крім кращих зразків, обов'язково аналізуються патентні описи світових винаходів, у першу чергу за останні 5-10 років, які відповідають предмету дослідження та об'єкту розробки. Якісне уявлення функцій та вимог до таких предмету і об'єкту надає можливість створення якісного технічного завдання на нову розробку.

Аналоги об'єкту розробки мають певні недоліки, які частково усунені в прототипі. Необхідним є виявлення всіх недоліків прототипу. Усунення цих недоліків забезпечує отримання покращеної модифікації предмету дослідження і розробки ТО на рівні винаходу та технічний прогрес у певній галузі. Необхідно визначити критерії розвитку предмету дослідження та показники, які необхідно покращити, а також фактори впливу на такі показники. Перелік критеріїв і показників з їх якісною оцінкою повинен відповідати недолікам прототипу. Виявляються напрямки перетворення складових прототипу, що надають можливість усунення його недоліків. Інколи доцільно виконати аналіз причин виникнення недоліків прототипу, що сприяє можливості їх вилучення шляхом усунення таких причин. Також покращення властивостей і характеристик предмету дослідження пов'язано з подоланням протиріч розвитку. Наприклад покращення деякого показника об'єкту розробки призводить до суттєвого погіршення одного або декількох інших важливих показників (підвищення вартості, трудомісткості виробництва...). Можливе інше обмеження розвитку, обумовлене фізичними властивостями, наприклад підвищення потужності турбогенератора обмежено з механічних причин діаметром і довжиною ротора, незважаючи на нелінійне збільшення потужності електричної машини з зростанням розмірів і маси.

10.3. Формулювання поняття ідеального технічного рішення

Документальними результатами інтелектуальної інженерної творчості є патенти при створенні описів яких використовується поняття прототипу та здійснюється аналіз недоліків прототипу. При цьому відповідно до методу ідеалізації доцільне уявлення ідеального технічного рішення прототипу.

Технічне рішення є ідеальним, якщо воно має одне або декілька наступних властивостей. 1. В ідеальному прототипі втрати наближаються до нуля, а коефіцієнт корисної дії наближається до 100%. 2. Усі частини прототипу виконують корисну роботу в певній мірі своїх функціональних

призначень і можливостей. 3. Ідеальний прототип функціонує безкінечно або тривалий час без пошкоджень і зупинок. 4. Ідеальний прототип функціонує без втручання, або з мінімальною участю людини. 5. Ідеальний прототип повністю не є шкідливим для людини, природи і навколишнього середовища. 6. Матеріаломісткість елементів прототипу наближається або відповідає їх матеріальним заготовкам, тобто відходи виробництва мінімальні, або відсутні.

При формуванні ідеального ТО не слід брати до уваги неможливість в процесі досягнення повного ідеалу, а також яким чином здійснюється реалізація його створення. Формулювання ідеалу дозволяє в багатовимірному просторі визначити раціональні і перспективні напрямки пошуку.

У відповідності з прагненням до ідеалу визначаються вимоги до уточнення прототипу і можливості їх виконання. Інколи доцільно послабити несуттєві вимоги, якщо така дія призведе до більш значного виграшу по максимально важливим показникам.

Перетворення прототипу починають за допомогою обраних прийомів. Фіксуються ідеї покращення ТР у виді короткого опису, або спрощеної схеми. Набором прийомів отримуються певні ТР. Якщо вони не задовольняють умові удосконалення, то доцільно кращий з отриманих варіантів обрати прототипом. Такий прототип підлягає аналізу і перетворенню за допомогою певних евристичних прийомів. При цьому варіанти покращених припустимих ТР необхідно отримувати тільки з врахуванням головного недоліку або головного протиріччя розвитку. В подальшому такі рішення використовуються як прототипи для пошуку нових покращених ТР, що враховують інші недоліки і протиріччя розвитку. В результаті отримують нову множинність покращення допустимих технічних рішень.

10.4. Евристичні та інші прийоми рішення наукової задачі

З стародавніх часів перед людиною виникала ситуація, що наявні засоби праці, або озброєння не задовольняють новим вимогам, або мають недоліки, які з часом стають неприпустимими. Людина намагається отримати покращені ТР на основі логічного аналізу і застосування засобів усунення недоліків або шляхом пошуку і пристосування для досягнення бажаного результату певного рішення, що існує в природі або в іншій області техніки, або шляхом цілеспрямованих або випадкових змін прототипу. Вказані шляхи мають назву методу проб та помилок. Такий метод є самим стародавнім і на його основі виник метод евристичних прийомів, що передбачає певні дії і перетворення, які наведені в табл.10.1.

Більш ефективний пошук інноваційного рішення за допомогою евристичних прийомів здійснюється на основі уточненої постановки завдання і вірного обрання прототипу та визначення його недоліків, які необхідно усунути. Виходячи з наявної інформації обирається певний евристичний прийом (табл.10.1). За допомогою інтуїтивних і інтелектуальних власних можливостей, винахідник обирає та здійснює прийом, який максимально корисний для рішення поставленої задачі. Фіксуються ідеї покращення ТО у виді коротких описів та схем. Набором прийомів і їх комбінацій отримують певні ТР та здійснюється логічне обґрунтування їх переваг та доцільності застосування. Якості винахідницьких пропозицій залежать від навичок, досліду, кваліфікації та здібностей фахівця.

Таблиця 10.1. Група основних евристичних прийомів

№ групи	Найменування складової групи
1	Перетворення руху і сили
2	Перетворення форми
3	Перетворення структури
4	Перетворення в просторі
5	Введення нових функціональних елементів
6	Суміщення функцій або фізичних операцій декількох елементів загальною конструктивно-функціональною одиницею
7	Розділення функцій або операцій функціональних елементів і введення замість одного двох і більше елементів
8	Перестановлення фізичних операцій елементів з одночасним аналізом можливих результатів варіантів перестановки
9	Корисне використання відходів виробництва
10	Визначення та використання прихованих резервів
11	Перетворення в часі
12	Перетворення матеріалу і речовини
13	Здійснення диференціації
14	Перетворення по аналогії
15	Застосування або створення комплектуючих елементів з взаємною конструктивною пристасованістю

Активізації інноваційних здібностей фахівця сприяють наступні методи: «контрольних питань», «мозкового штурму», «морфологічних таблиць», «алгоритму рішення винахідницьких задач» та інші [1, 6, 7].

Метод контрольних питань уявляється в складанні переліку питань, які дозволяють зосередити основну увагу дослідника на окремих сторонах предмету дослідження, що сприяє виявленню нових ідей і рішень шляхом цілеспрямованої постановки питань, прикладами таких питань є можливість

виконання елементами будови ТО подвійних функцій, що дає можливість вилучення певних елементів прототипу, а також можливість перетворення частини металевих технологічних відходів виробництва в конструкційні елементи.

Метод мозкового штурму уявляється в генеруванні нових ідей за допомогою груп фахівців різного профілю, що запрошуються на спеціальні наради, які проводяться під певним керівництвом за регламентованими правилами (заборона критикування та орієнтування на максимальну кількість ідей, що пропонуються, заохочення комбінування і використання ідей, що висуваються іншими учасниками наради ...).

Сутність методу морфологічних таблиць, або морфологічного методу складається в тому, щоб подолати упередженість розглядання проблеми в певних аспектах та в забезпеченні аналізу повної сукупності структурних, тобто морфологічних взаємозв'язків і взаємовідношень між елементами ТО, основними та додатковими об'єктами і елементами великих систем та технологічних процесів, явищами і науково-технічними поняттями. Створюються передумови отримання усіх можливих варіантів рішення будь-якої проблеми. Така можливість забезпечується складанням так званих морфологічних таблиць. В першу чергу надається точне формулювання проблеми, потім вивчаються усі головні функції і досліджуються можливості виконання цих функцій, тому що кожна з них володіє певним числом незалежних властивостей або виконань. Морфологічна таблиця уявляє n -мірну матрицю, в якій рядок характеризує функцію предмету дослідження, а стовбець – варіант її виконання. Таблиця дає уявлення всіх можливих виконань функцій ТО, що розглядається. Усі отримані рішення аналізуються і оцінюються з позиції покладеної мети. Результатом є обрання конкретного кращого технічного рішення.

Метод алгоритму рішення винахідницьких задач орієнтується на пошук ідеальної пропозиції виявленням причин і протиріч, що перешкоджають досягненню ідеалу.

11.МЕТОДОЛОГІЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

11.1. Значимість математичного моделювання і оптимізаційних розрахунків технічних об'єктів і систем

Прискорення ефективного розвитку і покращення життєвих умов людства пов'язані з всебічною інтенсифікацією виробництва при підвищенні якості та номенклатури продукції без антропологічної і екологічної шкоди. Вказане прискорення уявляє зростаючу кількість завдань науково-інженерної творчості. Кожен науковець і кожен творчо працюючий інженерно-технічний співробітник при рішенні науково-практичних задач здійснює пошук не просто нового покращеного або більш ефективного ТР, а намагається отримати максимально раціональний, найефективніший і кращий у світі результат рішення поставленої задачі. Такий кращий з кращих результат визначається математичним терміном глобального оптимального рішення.

Більшість завдань, що потребують науково-інженерної творчості, неможливо вирішити за допомогою тільки евристичних підходів та методів. Після отримання нової творчої пропозиції рішення наукового або інженерного завдання існує необхідність виконання рутинних розрахунків, що обумовлені практичними задачами реалізації задумок і продуктів інженерної творчості. Створюються сучасні надскладні технічні об'єкти і комплекси, об'єктивний аналіз і розрахунок яких методами алгебри, геометрії і математичного аналізу викликає значні складнощі і інколи уявляє непосильну для людського інтелекту задачу. В зв'язку з цим необхідне доповнення творчого пошуку і традиційного математичного забезпечення комп'ютерною підтримкою та застосуванням досягнень прикладної математики і програмування. Тому використовується інший вид науково-інженерної творчості, що пов'язаний з розробкою ММ та методик створення і експериментальних досліджень нових пристроїв, систем і технологій. Особливе значення в рішенні задач забезпечення подальшого науково-технічного прогресу уявляє побудова ММ, які надають можливість оптимізаційного проектного синтезу ТО. Такі ММ містять рівняння цільових функцій (ЦФ) залежностей показників або характеристик ТО від геометричних, енергетичних, функціональних або інших параметрів, які також називаються координатами або керованими змінними (КЗ). Оптимізація уявляє розрахунок екстремуму ЦФ при варіюванні та визначенні екстремальних значень КЗ, які сумісно з даними та вимогами технічного завдання на розробку є основою подальшого якісного проектування ТО. Оптимізаційні можливості також пов'язані з пошуком та складанням спеціальних методів і алгоритмів чисельних розрахунків та комп'ютерних програм, а також в цілому з розвитком систем автоматизованого проектування ТО конкретних галузей інженерії.

Інноваційне створення і математичне визначення на основі ЦФ структурно-параметричного синтезу глобально-оптимальних ТР уявляє вищий рівень науково-технічної діяльності та основу розробки кращих у світі і конкурентноспроможних виробів.

11.2. Задача параметричної оптимізації

Параметричною оптимізацією називається пошук екстремуму ЦФ заданого ТР (заданої структури і конструкції) ТО при заданих ФПД, ТФ, а також технічному завданні. Будь-яке окреме ТР, або його певний технічний показник можливо визначити єдиним набором \check{x}_i КЗ x_i [1, 5]

$$\check{x}_i = (x_1, \dots, x_k). \quad (11.1)$$

Значення \check{x}_i можуть змінюватись в деякому гіперпросторі з координатами, тобто КЗ:

$$\alpha_i \leq x_i \leq \beta_i; i=1, \dots, k. \quad (11.2)$$

Прикладом проектних обмежень оптимізації електромеханічних ТО є перевищення температури обмотки, кратності пускового струму і моменту, напруга короткого замикання і інші.

Повна ММ або її складова уявляє собою ЦФ $F_{ц}(\check{x}_i)$, що є деяким критерієм якості, тобто ПТР проектованого виробу. На КЗ (11.1) і екстремум $F_{ц}(\check{x}_i)_e$ вказаної ЦФ часто накладаються проектні обмеження, які представляються певними умовами:

$$M'_{pi}(\check{x}_{ie}) \geq M_{pmin}; M''_{pi}(\check{x}_{ie}) \leq M_{pmax}; i = 1, \dots, l, \quad (11.3)$$

де \check{x}_{ie} – екстремальні значення КЗ.

Задача пошуку оптимальних параметрів ТО складається в визначенні такого набору (11.1), який задовольняє нерівностям (11.2), (11.3) і забезпечує єдиний глобальний екстремум, наприклад мінімум ПТР, зокрема мінімум маси або вартості.

Існує деякий простір p_i пошуку допустимих рішень, які задовольняють нерівностям (11.2), (11.3). Екстремум уявляє точку, що відповідає набору екстремальних значень КЗ \check{x}_{ie} в k – мірному просторі:

$$F_{ц}(\check{x}_{ie}) = \min F_{ц}(\check{x}_i); x_i \in p_i. \quad (11.4)$$

На усі оптимізаційні КЗ або частку з них можуть накладатись умови цілочисельності, або дискретності. В такому випадку область пошуку S_i є багатопов'язаною, а оптимізаційна задача багато екстремальна [1]. При розширеної області S_i обмеження α_i, β_i відсутні. При цьому у цілому задачі пошуку екстремумів ЦФ часто є багатопараметричними і багатоекстримальними. Однак функціональні обмеження (11.3) визначають допустимі і малі відносно гіперпростору (11.2) області змін КЗ, що дає можливість раціонального пошуку екстремуму і рішення задачі оптимізації ПТР будь-якого заданого ТР.

11.3. Задача структурно-параметричної оптимізації

Згідно енциклопедичному визначенню поняття структура означає будову, розташування, порядок, тобто сукупність стійких зв'язків об'єкту, що забезпечують його цілісність і тотожність самому собі, тобто збереження основних властивостей при різних зовнішніх і внутрішніх змінах.

З інженерної точки зору різні технічні структури відрізняються числом елементів, що виконують ідентичні функції, а також відрізняються формою і компоновкою елементів, особливостями з'єднань і зв'язків цих елементів та іншими відмінностями. При параметричній оптимізації ЦФ різних структурно-конструктивних рішень ТО з однаковими ФПД і ТФ мають різні індивідуальні набори КЗ і відрізняються особливостями побудови та складу оптимізаційних рівнянь. Такі набори КЗ і види ЦФ є раціональними для обраного варіанту структури певного ТО та неприйнятні для інших структур і ТР цього ТО. Також при параметричній оптимізації складаються ЦФ, що уявляють критерії якості (ПТР), які розраховуються, як правило, в одиницях вимірів техніко-економічних характеристик ТО (маса, втрати, вартість...). Однак вказані характеристики залежать від конкретного технічного завдання на розробку ТО, що включає вихідні дані, умови застосування і експлуатації (потужність, продуктивність, частота обертання або струму, типи виконання або охолодження...). Тому результати параметричної оптимізації різновидів заданого ТО, що відрізняються структурними рішеннями при використанні різних загальних видів і послідовностей (порядків) створення ММ і наборів КЗ не надають можливості узагальненого порівняльного аналізу застосованих варіантів структур.

В зв'язку з наведеними вище твердженнями існують дві обов'язкові умови рішення задачі структурної оптимізації [1]. Першою є наявність ММ з ЦФ універсального виду і порядку складання з однаковим набором КЗ для будь-яких відомих і нових ТР певного ТО. Другою є відповідність ММ вимогам співставленості критеріїв розвитку, яка стосується одиниць виміру, тобто результати розрахунків критеріїв оптимізації, а саме ПТР, повинні визначатися у безрозмірних або питомих (відносних) одиницях.

Якщо поставлена задача структурної оптимізації ТО, то здійснюється інформаційний пошук усіх відомих ТР вказаного ТО та евристичним або іншим способами здійснюються структурні перетворення з метою удосконалення наявних ТР. Отримується певна множність $(S_1 \dots S_m)$ раціональних m варіантів структур, у яких існує хоча б один набір значень параметрів, що задовольняють заданим проектним обмеженням. Для будь-якої структури S_j цієї множинності ($j=1, \dots, m$) можна вирішити задачу параметричної оптимізації при застосуванні єдиного виду ЦФ та єдиних

набору і простору варіювання незалежних КЗ $\check{x}_{ij} (i = 1, \dots, n_j)$. При структурних перетвореннях числа елементів структур і КЗ можуть змінюватись. Якщо для опису деяких структур необхідні додаткові КЗ, то вони повинні бути залежними, тобто такими, що визначаються через незалежні КЗ. Тоді задача структурної оптимізації визначається наступним формулюванням. Мається задане число m n_j – мірних просторів як з безперервним, так і з дискретним характером змін координат \check{x}_{ij} :

$$\alpha_{ij} \leq \check{x}_{ij} \leq \beta_{ij}; i=1, \dots, n_j; j=1, \dots, m. \quad (11.5)$$

Для кожного з просторів (11.5) задана по єдиному оптимізаційному критерію ЦФ $F_{цj}$ і система обмежень $M_s(\check{x}_{ij})$:

$$\begin{aligned} F_{цj} &= f(\check{x}_{ij}); M'_s(\check{x}_{ije}) \geq M_{smin}; \\ M''_s(\check{x}_{ije}) &\leq M_{smax}; S = 1, \dots, S_j; j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (11.6)$$

де \check{x}_{ije} – екстремальні значення КЗ.

Необхідно знайти точку, що визначається набором координат \check{x}_{ije} , та належить до j простору, для якої виконуються умови:

$$\left. \begin{aligned} S &= 1, \dots, S_j; \\ F_{цje} &= f(\check{x}_{ije}) = \min f(\check{x}_{ije}); \\ 1 &\leq j \leq m. \end{aligned} \right\} \quad (11.7)$$

Таким чином задача структурної оптимізації заключається в знаходженні глобально-оптимальної структури і глобального оптимального набору \check{x}_{ije} КЗ всередині цієї структури при виконанні умови (11.7), тобто таку задачу можна називати також задачею СПО, або структурно-параметричного синтезу [1, 5].

11.4. Пошук глобального екстремуму

Пошук глобально-оптимального рішення здійснюється за алгоритмом, що включає чотири процедури (рис. 11.1) [1].

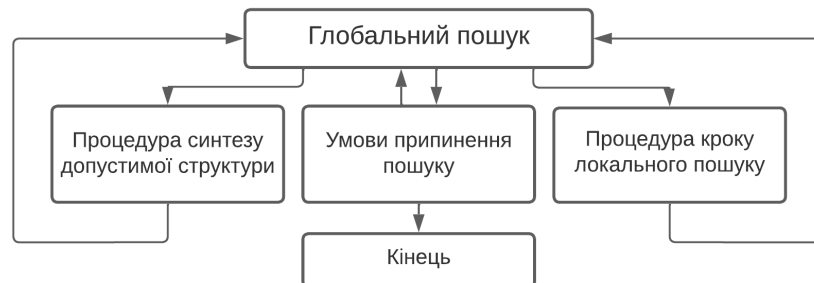


Рисунок 11.1. Блок-схема пошуку глобального екстремуму

Першою процедурою є синтез допустимої структури, що забезпечує обрання допустимого рішення з будь-якої підобласті усієї області пошуку. Другою процедурою забезпечується крок локального пошуку, тобто перехід від одного

рішення до іншого допустимого рішення, як правило тієї ж структури, але з покращеним значенням критерію. Під кроком локального пошуку можна розуміти деякий умовний крок по деякому алгоритму пошуку локального екстремуму, наприклад одна ітерація по методу спрямованого по координатного спуску (найшвидшого спуску). За третьою процедурою здійснюється глобальний пошук, що керує роботою перших двох процедур. Четвертою процедурою здійснюється перевірка умов припинення пошуку та визначається необхідність завершення рішення оптимізаційної задачі.

Для певних складних і маловивчених задач проектування складно побудувати процедуру синтезу допустимих структур, що забезпечує отримання дійсно таких структур. В такому випадку вказана процедура повинна включати операції перетворення недопустимих структур в допустимі застосуванням зручних для перетворення евристичних прийомів. Можливе застосування діалогового режиму роботи з використанням цієї процедури проектувальником. В цілому при синтезі допустимих структур способи вибору значень КЗ повинні містити правила, що відсікають нераціональні і недопустимі їх значення. Проектні обмеження також повинні бути упорядковані з забезпеченням відсутності вірогідності їх порушення. Подібна упорядкованість повинна бути забезпечена автоматично в процесі рішення задачі.

Процедура кроку локального пошуку є залежною від чисельного методу рішення оптимізаційної задачі. Перелік основних чисельних оптимізаційних методів наведено на рис.11.2 [5].

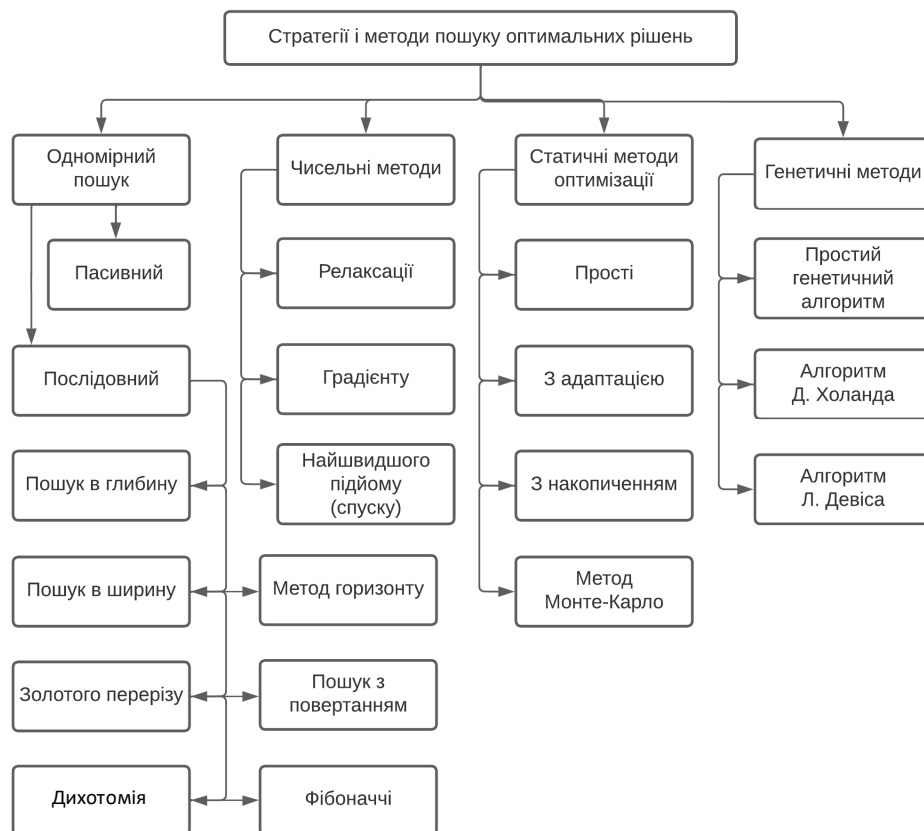


Рисунок 11.2. Основні стратегії і методи пошуку оптимальних рішень

Можливість розробки алгоритмів і програм рішення оптимізаційних задач пов'язана з створенням і розвитком систем автоматизованого проектування. Однак в останні десятиліття застосовується розрахункове програмне забезпечення, зокрема Mathcad, що надає можливість виконання, крім рутинних інженерних, також і більш складних оптимізаційних розрахунків. Тому вилучається необхідність власноручного програмування, або використання послуг фахівців-програмувальників. Однак для рішення задач параметричної або більш складної СПО повинні бути створені і введені в комп'ютерне обладнання відповідні оптимізаційні ММ заданих ТО, що надають можливість розрахунків ПТР при системах обмежень (11.6), (11.7) для будь-якого синтезованого ТР.

12. ПОСТАНОВКА І АНАЛІЗ ЗАДАЧІ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

12.1. Застосування системної методології дослідження

При дослідженні і розробці складних явищ та об'єктів використовується системний аналіз, основу якого становить принцип системності, що поєднує систему понять, а саме: цілісності, співвідношення часткового і цілого, структурності і конструктивної відокремленості елементів об'єкту [1, 8].

Система – грецьке слово, що означає організовані зв'язки (відношення) між будь-яким набором компонент для досягнення певної загальної мети. Між компонентами системи існують взаємозв'язок і взаємозалежність. Мета і функціонування системи мають більш високий пріоритет відносно мети і дії компонент. Система характеризується сукупністю властивостей. Першою є властивість організації, яка передбачає структурування і порядок, розташування і послідовність дії компонент, що дозволяє досягнути задану мету. Другою є властивість взаємодії, що означає порядок співпраці компонент. Третьою є властивість взаємозалежності, тобто взаємного впливу компонентів. Останніми є властивості інтегрування і центральної мети, які означають взаємозв'язок і сумісність праці та загальне прагнення досягнення центральної мети. Приклад діаграми зв'язків основних елементів інформаційної системи, що діють за системним принципом, наведений на рис. 12.1.

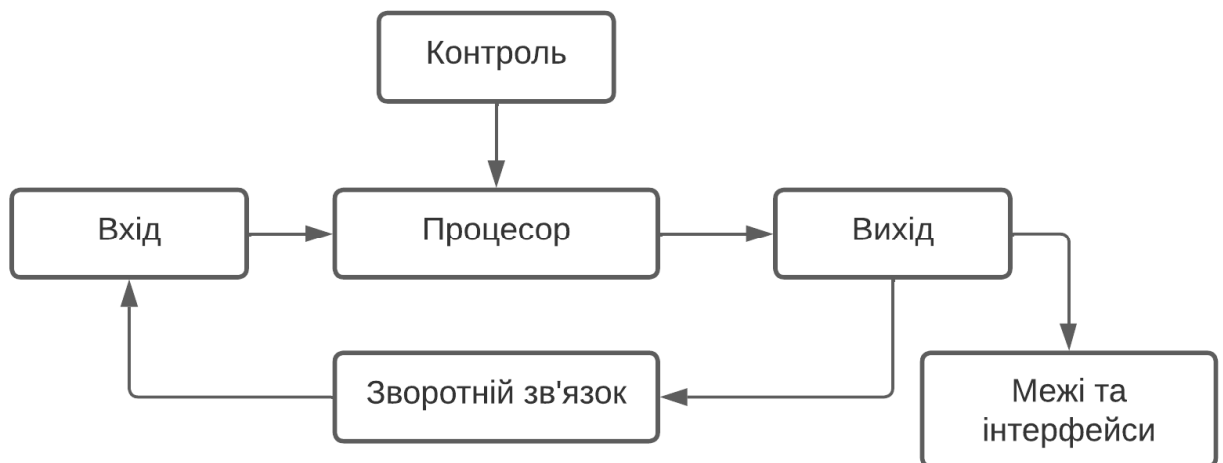


Рис. 12.1. Елементи системи

12.2. Особливості системного підходу

Принцип системності застосовується в понятті системного підходу, тобто методології розглядання об'єкту розробки та предмету дослідження як системи, тобто цілісного комплексу взаємопов'язаних елементів. Це підхід,

при якому будь-який ТО розглядається як сукупність взаємопов'язаних елементів (компонентів), що має вихід (мету), вхід (ресурси), зв'язок із зовнішнім середовищем, зворотній зв'язок. Системний підхід уявляє форму прикладення теорії пізнання і діалектики до дослідження процесів, що відбуваються в природі, суспільстві, мисленні, техніці і виробництві. Його сутність полягає в реалізації вимог загальної теорії систем, згідно якої кожен об'єкт в процесі його дослідження повинен розглядатися як складна система і як елемент більш складної системи.

Розгорнуте визначення системного підходу включає обов'язковість застосування певних його аспектів. Такими аспектами є: 1. системно-елементного або системно-комплексного, що складається в виявленні елементів, які складають дану систему; 2. системно-структурного, що уявляється в визначенні внутрішніх зв'язків і залежностей між елементами даної системи, що дозволяють отримати уявлення про внутрішню організацію (будову) системи, яка досліджується; 3. системно-функціонального, що передбачає виявлення функцій для встановлення яких створені і існують відповідні системи; 4. системно-цільового, який означає необхідність наукового визначення функцій цілей і підцілей системи та їх взаємоув'язання між собою; 5. системно-ресурсного, що заключається в ретельному виявленні ресурсів, які необхідні для функціонування системи і вирішення системою заданої проблеми; 6. системно-інтеграційного, що складається в виявленні сукупності властивостей якості системи, що забезпечує її цілісність і особливість; 7. системно-комунікаційного, що означає необхідність виявлення зовнішніх зв'язків даної системи з іншими, тобто її зв'язок з навколишнім середовищем; 8. системно-історичного, що означає виявлення часових умов виникнення та етапів становлення, а також сучасного стану і перспектив розвитку.

Застосування системного підходу є доцільним при проектуванні окремих електромеханічних пристроїв і обов'язковим при розробці складних електромеханічних систем (автоматизовані електроприводи, генеруючі агрегати...) та електротехнічних комплексів.

Максимально системний підхід застосовується при дослідженні складних об'єктів, що розвиваються, наприклад: багаторівневих, ієрархічних... .

12.3. Системне обрання глобально-оптимального конструкторсько-технологічного рішення

При розробці будь-якого виробу, до якого пред'являються вимоги технічного рівня, що перевищує рівень кращих світових взірців-аналогів,

розробнику необхідно виконати проектні дослідження, які уявляють послідовність системних дій проектного синтезу з визначенням на основі винахідництва і СПО глобально-оптимального науково-технічного та конструктивно-технологічного рішення. Застосовується методологія сукупності евристичних або інших методів винахідництва та складання ЦФ СПО ТО в сполученні з системною послідовністю рішення задач пошукового проектування. Така послідовність включає певні етапи. На першому етапі для заданої ТФ обирається ФПД. При наявності апріорного кращого ФПД відразу визначаються варіанти структур ТО, що є другим етапом. Наприклад для більшості виробів електричної інженерії апріорним є електромагнітний принцип дії. При розробці багатокомпонентного ТО (автоматизований електропривід, технологічний комплекс...) визначаються його найбільш ефективні варіанти функціональної структури. Для обраних варіантів структур визначаються найбільш ефективні принципи дії складових елементів (інколи в тандемі з електромеханічними елементами доцільно застосовувати гідравлічні або пневматичні елементи автоматики). На третьому етапі здійснюється пошук максимально раціональних ТР елементів конструкцій ТО або кращих комплектуючих виробів (елементів) для обраних принципів дії.

На четвертому етапі складається ММ і виконується СПО варіантів реалізації обраних ФПД і ТР. На основі співставлення ПТР оптимізованих проектних варіантів визначається глобально-оптимальне конструкторсько-технологічне або схематехнічне рішення. Визначаються параметри і характеристики нової розробки ТО.

Методологія системного ієрархічного визначення глобально-оптимального результату розробки технічного виробу вилучає можливість обрання окремого проміжкового покращеного рішення, зокрема в рамках традиційної структури і конструкції. Традиційні ТР на протязі багатьох років застосування і модернізації як правило практично вичерпали можливості подальшого удосконалення. Головна увага приділяється вивченню і аналізу усіх можливих варіантів і шляхів удосконалення ТО. Якщо при цьому кожен варіант розглядається з достатньо повним інформаційним забезпеченням та моделюється з визначенням глобально-оптимального ТР, то досягається гарантування розробки нової версії певного виробу на рівні кращих світових досягнень. При цьому у випадку отримання інноваційних варіантів на рівні винаходів, попередній світовий рівень виробу може бути перевершений.

12.4. Функціонально-вартісний аналіз

Оптимізація співвідношення між споживчими властивостями і витратами на створення, виробництво і використання (експлуатацію) нової

продукції при її високої якості, корисності і довговічності, може бути досягнута на основі використання, на додаток до СПО ТО, методу функціонально-вартісного аналізу (ФВА) [9].

Складовими об'єктами ФВА можуть бути: конструкторсько-технологічна документація на виробництво певного ТО, втілення засобів механізації і автоматизації, управління якістю, фондами, матеріалами і трудовими ресурсами, фінансово-господарча діяльність. До основних принципів ФВА відносяться дотримання системного і функціонально-комплексного підходів до вивчення предмету дослідження. Предмет дослідження розглядається як система, тобто як обмежений певними рамками інтегрований комплекс елементів, що дозволяє виконання його всебічного аналізу. Функціонально-комплексний підхід уявляється також у розгляданні предмету дослідження у виді комплексу функцій. Функції поділяються на головні, для здійснення яких ТО є обов'язковим, та допоміжні, що сприяють надійному та ефективно-економічному здійсненню основних функцій. Некорисні та непотрібні функції повинні бути вилучені.

Важливим принципом ФВА є відповідність корисності функцій суспільно необхідним витратам на їх здійснення відповідно до вартісного фактору, тобто грошової оцінки витрат на здійснення функцій. Системність та функціональна комплексність ФВА також складається в тому, що усі питання конструювання ТО, забезпечення його надійності, довготривалості використання і утилізації, а також розробки технології і організації його виробництва, забезпечення видами ресурсів на стадіях як розробки так і освоєння виробництва та організації продажу, розглядаються сумісно.

При виконанні ФВА необхідно дотримуватися нижчезазначених принципів. 1. Принцип раннього діагностування, що уявляється в залежності можливостей удосконалення ТО або виявлення їх резервів від життєвого циклу виробу. Обсяг ефекту застосування ФВА залежить від терміну його виконання. 2. Принцип пріоритету, що визначає першочергове виконання ФВА виробів і процесів, що знаходяться в стані розробки і будуть реалізовані в значних об'ємах. 3. Принцип оптимальної деталізації, який визначає, що процес виділення функцій ТО повинен бути обмежений їх оптимальною кількістю та повинен бути поетапним. 4. Принцип послідовності, що передбачає виконання ФВА по схемі від загального до часткового. 5. Принцип виділення основної ланки, який передбачає виконання ФВА ТО починаючи з елементів, що забезпечують основні функції та утворюють максимальний ефект дії.

Виконання ФВА здійснюється етапами, що відображені в табл. 12.1.

Таблиця 12.1. Етапи функціонально-вартісного аналізу

Найменування етапу	Мета виконання етапу
1	2
Підготовчий	Уточнення та вивчення об'єкту аналізу.
Інформаційний	Пошук інформації про призначення, технічні можливості, якість, собівартість аналогів.
Аналітичний	Вивчення функцій предмету дослідження і витрат на їх забезпечення.
Дослідницький	Аналіз і оцінка ідей і варіантів рішень, що визначені на попередніх етапах з метою вилучення невідповідності функцій і витрат.
Рекомендаційний	Визначення найбільш прийнятих варіантів удосконалення виробу (предмета дослідження) для певного виробництва.
Втілення	Заключне втілення у виробництво або експлуатацію обраного варіанту удосконалення виробу на основі результатів розроблених рекомендацій.

В цілому ФВА дозволяє визначати рекомендації удосконалення ТО на етапі проектування при запобіганні необґрунтованих і зайвих матеріальних і часових витрат та забезпечити рентабельність проектів.

Створення і використання інновацій сумісно з застосуванням при проектуванні нових виробів системних методологій СПО та ФВА є потужним імпульсом розвитку конкурентоздатних і кращих у світі ТО певної галузі науки і техніки.

ПРИКЛАДИ І ПРОПОЗИЦІЇ ІННОВАЦІЙНОГО РІШЕННЯ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

13. ЗНИЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ВИРОБНИЦТВА І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАШИН

13.1. Проблеми підвищення енергоефективності і зниження відходів електротехнічної сталі виробництва магнітопроводів машин змінного струму

Низьковольтні (до 1000 В) АД загального призначення потужністю 0,25...400 кВт складають основу силових електроприводів, що застосовуються у всіх галузях людської діяльності. В залежності від складу обладнання і особливостей технологічних процесів доля енергоспоживання, що приходить на АД і синхронні двигуни, складає відповідно 60...80% і 6...8%. Решта електроенергії споживається пристроями електротехнологій, колекторними двигунами та електроосвітленням. Збільшення вартості енергії призвело до зростання вимог енергоефективності і регламентування підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) електромашин, в першу чергу АД загального призначення. За кордоном (США, Германія, Канада ...) прийняті національні стандарти енергоефективності АД. Також прийнятий міжнародний європейський стандарт ІЕС60034-30:2008, що встановлює чотири класи енергоефективності АД: ІЕ1 – нормальний (стандартний), ІЕ2 – підвищення, ІЕ3 – преміум, ІЕ4 – супер-преміум. Підвищення ККД досягається, в першу чергу, зниженням густини струму обмоток і магнітної індукції елементів магнітопроводу в рамках "традиційної" ("класичної") будови АД (рис. 13.1). При цьому суттєво підвищуються витрати ЕТС, загальна матеріалоемність і габаритні розміри та на 15...30% підвищується вартість АД [10, 11] загальноприйнятої конструкції (рис. 13.1), яку також називають "класичною", або "традиційною" [12-15].

"Класична" конструкція активної частини АД і статорів синхронних машин, що базується на створеній в кінці ХІХ і початку ХХ століть традиційній технології штамповки листів магнітопроводів, характеризується наявністю 50-60% відходів ЕТС. Штамповка листів супроводжується внутрішніми (вирубка пазів, вентиляційних отворів, отворів для валів) і зовнішніми (різниця між площею заготовки і загальною площею вирублених кругових листів ЕТС, що включає внутрішні відходи) відходами (рис. 13.2.). Кількість зовнішніх відходів оцінюються коефіцієнтом розкroєння

$$K_{pз} = \pi R_{асз}^2 i / (b_c H_k), \quad (13.1)$$

де $R_{асз}$ – радіус зовнішнього кола магнітопроводу статора; i – число рядків розкроєння; b_c – ширина смуги (рулону) ЕТС; H_k – крок вирубки листів.

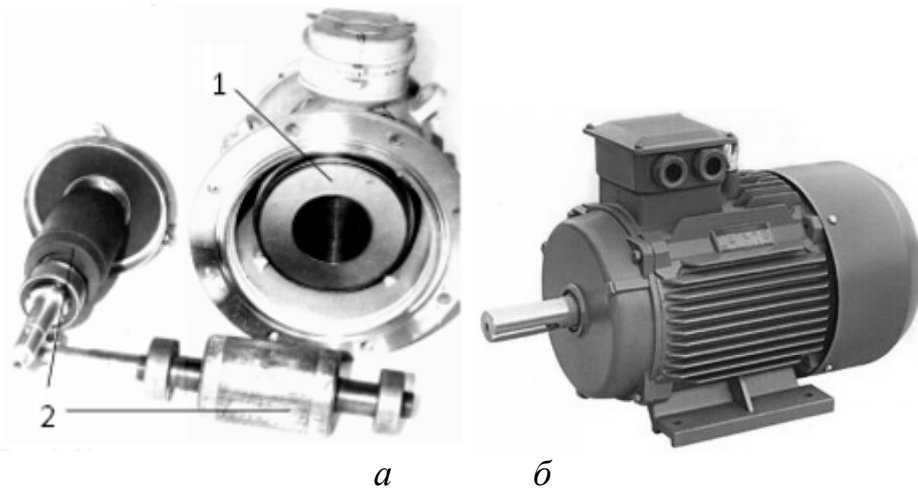


Рис. 13.1 – Активна і конструктивна частина (а) і загальний вид (б) асинхронних двигунів вибухозахищеного та загальнопромислового виконань:
1 – статор в корпусі; 2 – короткозамкнені ротори.

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, тобто ідеальній однорядній штамповці з нульовими перемичками за довжиною і шириною (рис. 13.1, а) складають [12]:

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

$$K_{зв} = (S'_c - S'_в) / S'_c \cong 0,785. \quad (13.2)$$

Витрати ЕТС, що відповідають (13.2), можуть бути знижені при попередньому розкроєні ЕТС на фігурні смуги (рис. 13.1, б) або при криволінійному розкроєні при багаторядної «шахматної» штамповці. 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. 13.1, б)

$$S_{KMN} = S_{ABC} - 3S_{AKLM} = (\sqrt{3} - \pi/2)R_{асз}^2, \quad (13.3)$$

де S_{ABC} і S_{AKLM} – площі рівностороннього трикутника і секторів з центральними кутами $\pi/3$ (рис. 13.1, б).

Площа поверхні зовнішніх відходів S_B'' , витрати смуги S_C'' на одну пластину (рис. 13.1, б) і коефіцієнт мінімальних зовнішніх відходів K_{3B}'' визначаються з врахуванням (13.3) виразами [11]:

$$S_B'' = 2S_{KMN} = 2R_{as3}^2 (\sqrt{3} - \pi/2) \cong 0,3225R_{as3}^2;$$

$$S_{\Pi}'' = \pi R_{as3}^2 + S_B'' = 2\sqrt{3}R_{as3}^2 \cong 3,464R_{as3}^2;$$

$$K_{3B}'' = (S_{\Pi}'' - S_B'')/S_{\Pi}'' \cong 0,907. \quad (13.4)$$

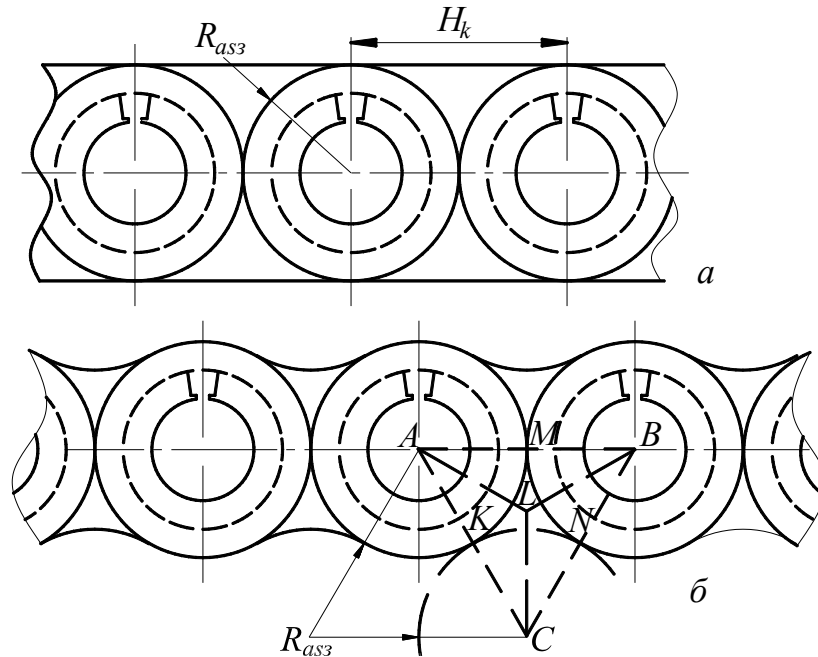


Рис. 13.2 – Кутові відходи і варіанти конфігурацій смуг електротехнічної сталі: *a* – однорядне "ідеальне" розкроєння смуги з нульовими перемичками; *б* – маловідходне фігурне розкроєння.

При використанні сучасного обладнання, що забезпечує економічне розкроєння ЕТС (рис. 13.1), величина коефіцієнту зовнішніх відходів знаходиться в залежності від числа рядків розкроєння, між (13.2) і (13.3):

$$0,8 \geq K_{3B} \geq 0,785. \quad (13.5)$$

Для реалізації способу штампування з фігурних стрічок і досягнень значення (13.4) потребується спеціальне технологічне обладнання, тобто складні багаторядні штампи і автоматичні лінії.

Середній коефіцієнт розкроєння (13.1) для АД серії 4АМ з висотою вісі обертання 71-100 мм складав 0,863, а для АД з висотою вісі обертання 280-355 мм – 0,892.

В наш час загальні зовнішні відходи ЕТС виробництва магнітопроводів АД відповідають (13.5) і в сукупності з внутрішніми відходами штампування пазів і центральних отворів складають 40...50% [12 - 14].

З викладеного випливає, що задачі зниження витрат і загальної матеріалоемності АД, а також зниження витрат ЕТС при виробництві магнітопроводів, є дуже складними, актуальними і поки остаточно не вирішеними.

13.2. Способи зниження відходів електротехнічної сталі на основі витих і комбінованих стикових магнітопроводів

Протягом всього ХХ століття у промислово розвинених державах здійснювалися спроби повністю або частково усунути основний недолік масового продукту електромашинобудування – АД класичної будови – значні відходи ЕТС при виробництві циліндричних штамповано-шихтованих магнітопроводів [13]. В 30-х роках минулого ХХ-го століття на фірмах "Дженерал Електрик" і "Вестингауз" були запропоновані конструкція витого циліндричного магнітопроводу і спосіб його виготовлення навивкою на ребро стрічки ЕТС з виштампованими пазовими виїмками (рис. 13.3, *а*). Даний спосіб забезпечує, в залежності від числа полюсів p_i і відповідно висоти ярма статора $h_{ас}$, коефіцієнт використання ЕТС (відношення маси витраченої ЕТС до маси магнітопроводу) $K_B = 0,6...0,7$. Також в 50...60 роках виникло виробництво аксіальних магнітопроводів торцевих асинхронних двигунів (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. 13.2, *б*). Подальшим розвитком пропозицій (рис. 13.3, *а*, *б*) є виготовлення витих магнітопроводів з заготовок, що мають пазові просічки та поділяються на дві частини (рис. 13.3, *в*), а також магнітопроводів, в яких виконується стикування окремо навитого ярма і закритого на активній поверхні витого зубцево-пазового шару (13.3, *г*). Спосіб (рис. 13.3, *в*) підвищує використання ЕТС до $K_{вр2} = 0,75...0,85$, а стикова конструкція, яку характеризують рис. 13.3, *г* і рис. 13.4 при використанні ЕТС з $K_{вс} = 0,7...0,8$ спрощує укладання обмотки у відкриті зовні пази.

Недоліком способів виготовлення суцільно витих на ребро магнітопроводів, що відповідають (рис. 13.3, *а*, *в*) є виникнення значної деформації і наклепу стрічки, що погіршує магнітні властивості та знижує заповнення осердя ЕТС. Загальна деформація зменшується локальною деформацією стрічки в зоні ярма (рис. 13.3, *а*). Структура стикового магнітопроводу (рис. 13.3, *г*) також дозволяє безперервну стрічку поділяти на дві заготовки з зубцями прямокутної форми (рис. 13.4, *а*), що додатково зменшує відходи ЕТС. Скріплення витих ярмних і зубцево-пазових

стикуємих ділянок здійснюється горячою посадкою та феромагнітним клеєм (рис. 13.4, б).

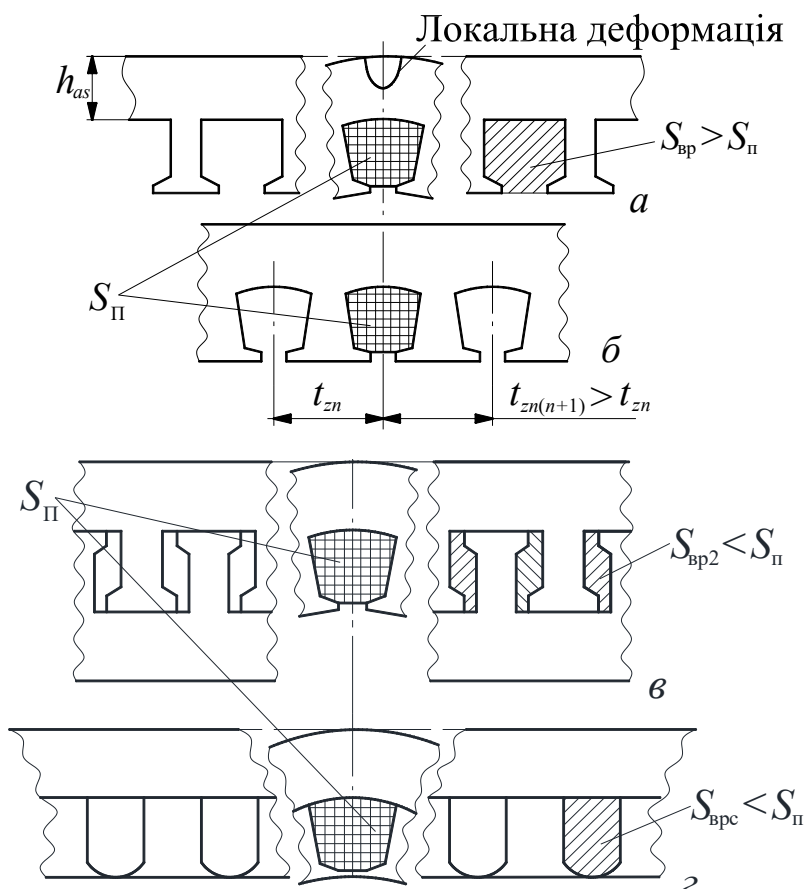


Рис. 13.3 – Конструктивно-технологічні рішення витих зі стрічки електротехнічної сталі магнітопроводів способом навивки на ребро (а, в, г) і навивки плашмя (б): $S_{П}$ – площа пазового отвору; $S_{вр}$, $S_{вр2}$ і $S_{врс}$ – площі пазових виїмок при різних способах штамповки і навивки стрічки.

Виті аксіальні магнітопроводи (рис. 13.5, а, б) застосовуються у виробництві спеціальних аксіальних (торцевих) АД. Для їх виготовлення застосовується обладнання штамповки стрічки ЕТС зі змінним кроком (рис. 13.3, б, рис. 13.5, в). 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. Практичного серійного застосування магнітопроводів (рис. 13.3, а, в, г і рис. 13.4, б) не відбулось.

Технологічні складнощі забезпечення необхідної для практичної реалізації якості витих на ребро магнітопроводів обумовили появу

досліджень та дослідно-конструкторських робіт створення АД з активними частинами, що містять аксіальні (рис. 13.6) та радіальні (рис. 13.7) стикові магнітопроводи з ортогональним розташуванням шарів ЕТС в ярмах і зубцях. Також на основі ортогональних структур пропонувалось структурне роздрібнення зубцово-пазового шару з метою зменшення амплітуд зубцевих гармонік розподілу магніторушійної сили та покращення теплового стану обмотки. Активний розподілений шар (рис. 13.6) дозволяє застосовувати в зубцях анізотропну ЕТС та підвищувати густину струму, однак потребує його ізоляційного відокремлення в зоні стику від ярма, що збільшує намагнічувальний струм [13].

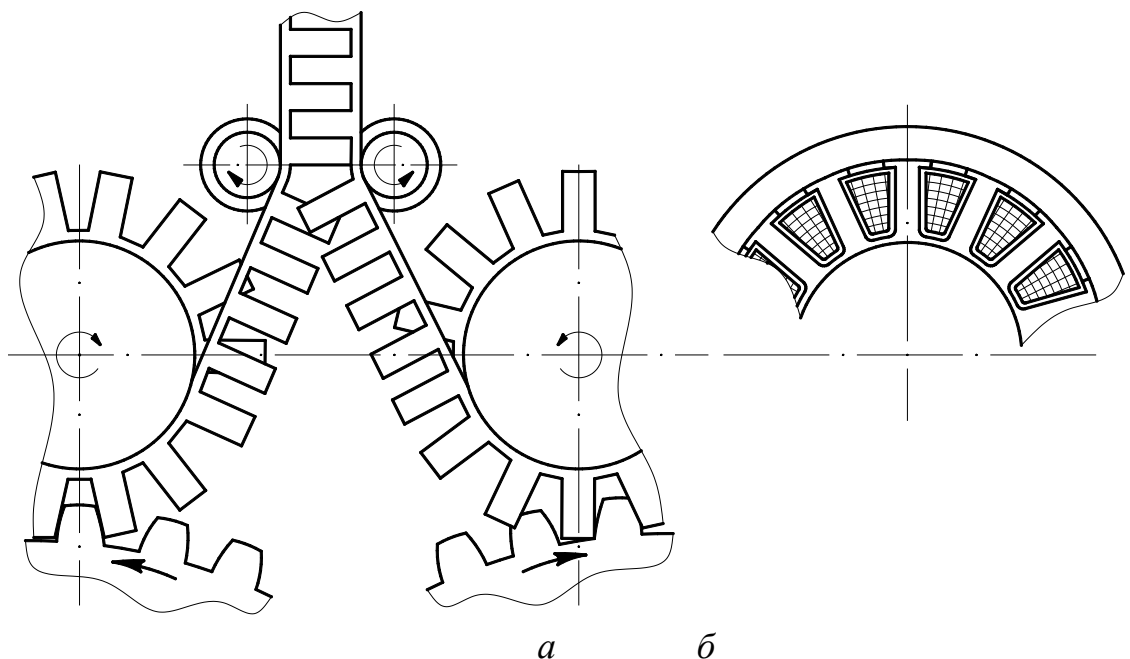
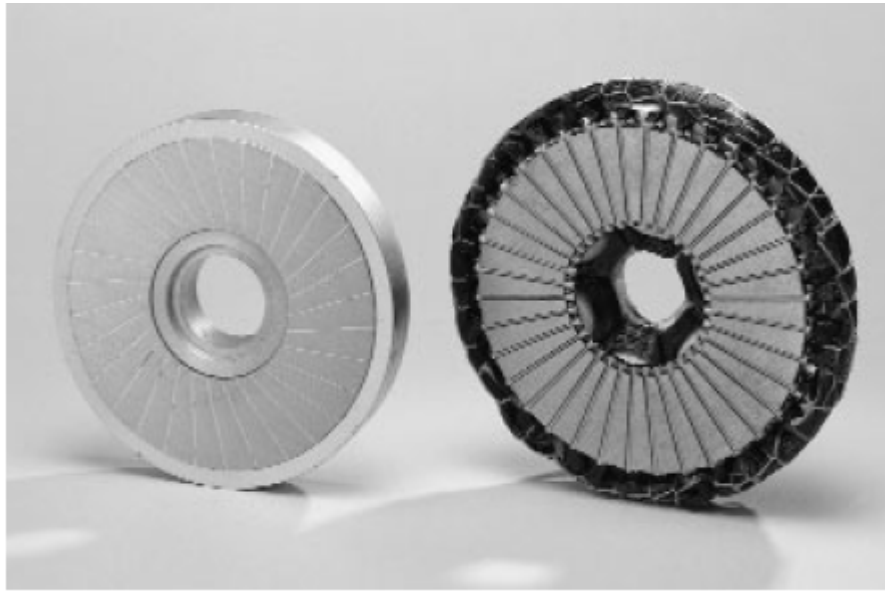
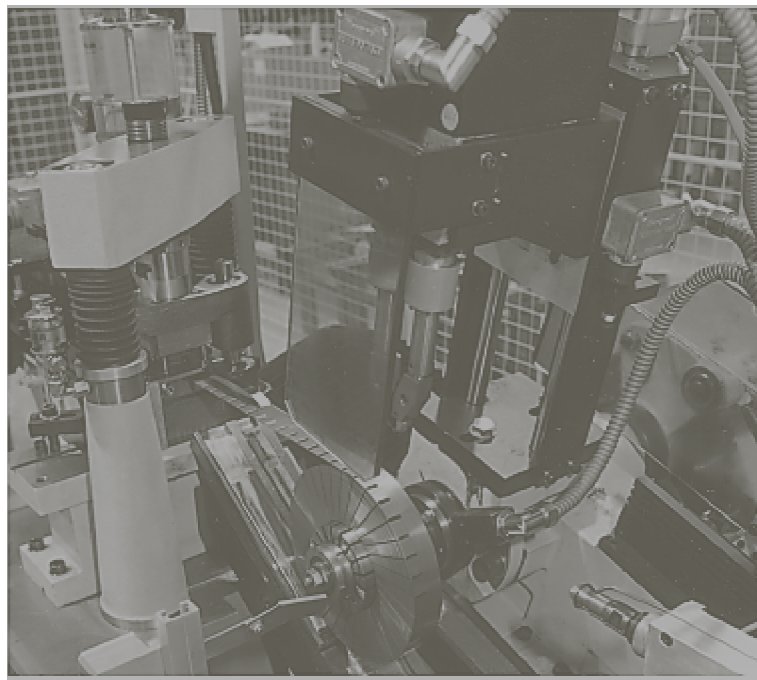


Рис. 13.4. Навивка суцільного магнітопроводу (а) з гребінчастою локально деформованою стрічки та складання "обернених" зубцевих зон (б) стикового магнітопроводу з додатковим зниженням відходів

Технологічним розвитком циліндричного стикового магнітопроводу з ортогональними шарами ЕТС зубців і ярм є варіанти виготовлення зубцово-пазового шару статора (рис. 13.7, а) і ротора (рис. 13.7, б) гофрируванням полоси рулонної ЕТС (рис. 13.7, в). Однак незалежно 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 гофрованими активними шарами циліндричних маловідходних магнітопроводів показали погіршені енергетичні характеристики відносно аналогів класичного виконання.



a *б*



в

Рис. 13.5. Аксиальні магнітопроводи в складі ротора (*a*) і статора (*б*) та технологічний пристрій штампування пазових виємків при формуванні витого осердя магнітопроводу (*в*)

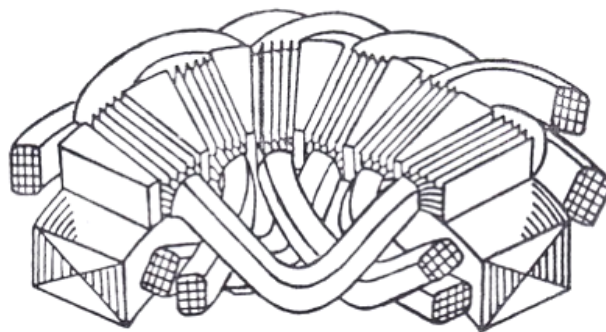


Рисунок 13.6. Торцевий статор з активним розподіленим шаром

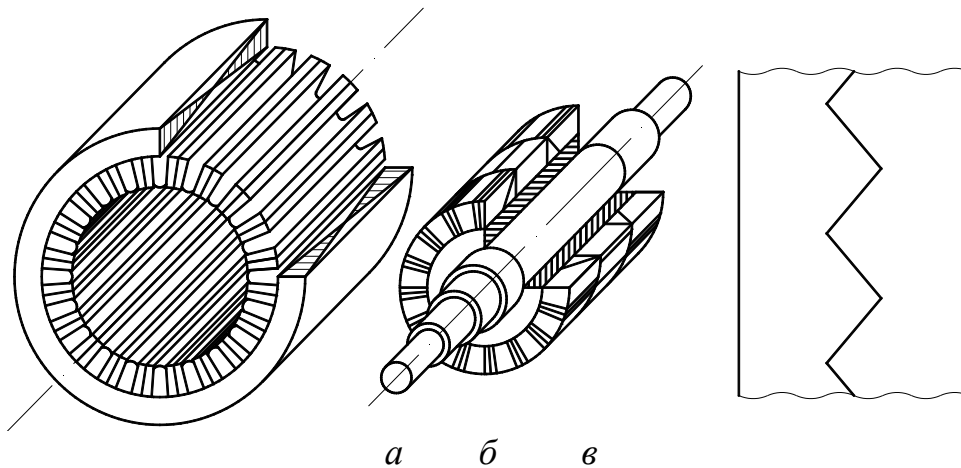


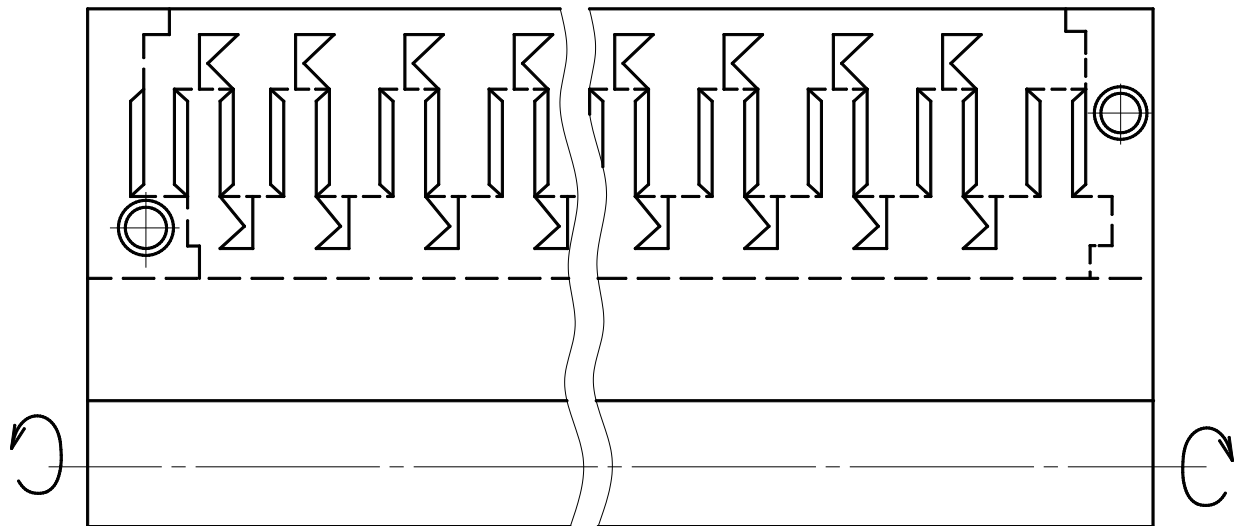
Рисунок 13.7. Магнітопроводи статора (*а*) і ротора (*б*) з гофрованими зубцово-пазовими шарами та розділенням рулону електротехнічної сталі (*в*) для крайніх секцій активного шару ротора

13.3. Нетрадиційні конструкції шихтованих магнітопроводів статорів з стиковими частинами

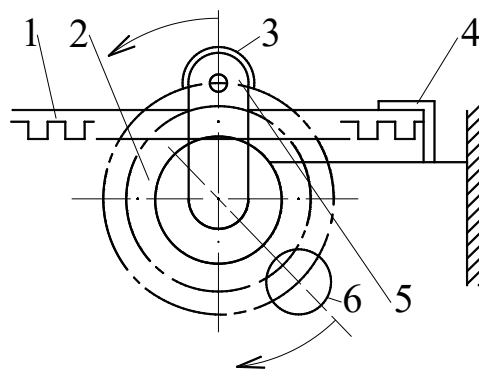
Складність рішення конструкторсько-технологічної задачі створення маловідходних магнітопроводів електромашин змінного струму стимулювала розробку компромісних пропозицій і використання резервів класичної технології виробництва [12 - 15].

Компромісними пропозиціями є: скручення в циліндр плоского шихтованого пакету (рис. 13.8), подрібнення кутових відходів і пресування з них зовнішньої частини складеного ярма, тобто доповнення середньої квадратної частини магнітопроводу до циліндричної. В пропозиції скручення плоскої шихтованої заготовки в циліндр пакет шихтують з зубчастих гребенок (рис. 13.8, *а*) і закручують на пристосуванні (рис. 13.8, *б*). В процесі скручення впливають на перемички яремних ділянок гребенок до повного сопряження кромek просічок, що зсунуті у суміжних шарах (шихтовка з стиками "вперепліт"). Пакет 1 заготовки (рис. 13.8, *б*) розташовують між оправкою 2 і обкаточним роликом 3 до упору в обмежувач 4. Повертанням рычага 5 частину пакету обжимають навколо оправки і після фіксації її прижимним роликом 6 рычаг повертають у вихідний стан. Подальшим повертанням в протилежному напрямку деформують іншу частину пакету. Отриманий циліндр проварюють в площині стику двох крайніх напівзубців.

Відомим також є напрямок розробки і виробництва магнітопроводів мікромашин з феромагнітного композиційного матеріалу (магнітодіелектрика). Однак зразки АД, що створені та випробувані з вказаними пропозиціями мали значно погіршені енергетичні показники [13].



a



б

Рис. 13.8. Схема вирубкы гребенок з зсунутими просічками в зоні ярма (*a*) і пристосування для згортання плоских шихтованих пакетів в циліндричні пакети (*б*)

Для зменшення відходів ЕТС також запропоновано статорні листи вирубати з значними, близько до дна пазів, діаметрально розташованими лисками (рис. 13.9, *a*). Пакети таких листів доповнюються до циліндрів сегментами (рис. 13.9, *б*), що виштамповані в кряях полоси між пластинами (рис. 13.9, *a*). В іншому варіанті маловідходного магнітопроводу листи ЕТС мають форму, що наближається до квадрата, а сегментні частини, які їх доповнюють до кола, штампуються з малими відходами розкроєння зі стрічки ЕТС. При цьому в ярмах замість двох (рис. 13.9, *б*) виникають чотири стикових зазора (рис. 13.9, *в*). Сегментні пакети приєднуються до основних зубцевих пакетів статора зварюванням. Ускладнюється технологія виготовлення і, в зв'язку з круговою неоднорідністю, створюється тангенціальна періодична несиметрія ярма. Наслідком є погіршення гармонічного складу обертового магнітного поля та виникнення додаткових втрат і підсилення магнітних складових вібрації і шуму.

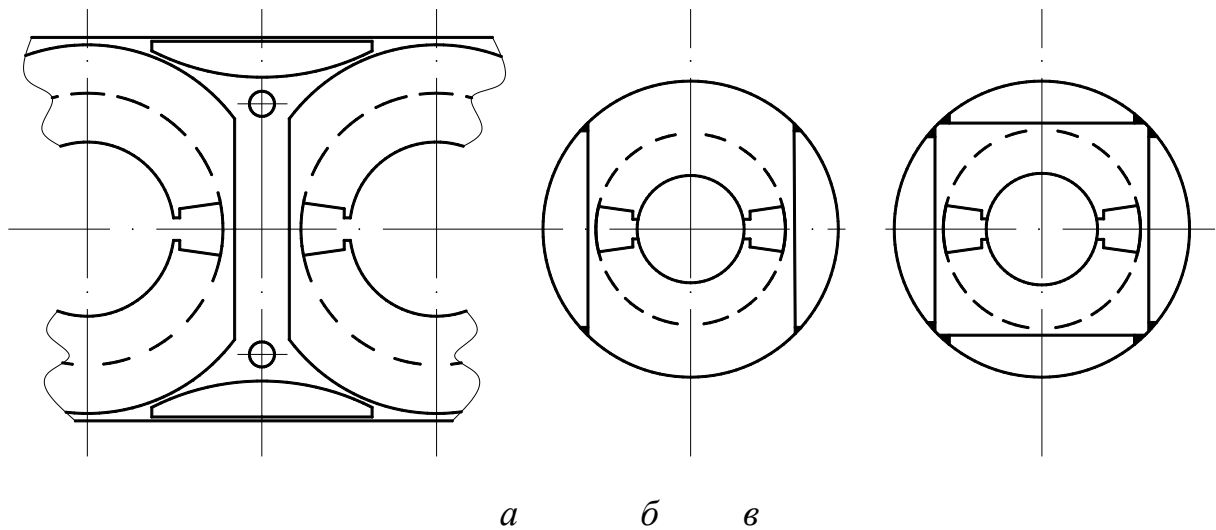


Рис. 13.9. Схеми розкroення смуги зі зниженням витрат сталі (а) і варіантів маловідходного магнітопроводу з накладними сегментними частинами (б, в)

Таким чином вказані спроби зниження відходів (рис. 13.8, рис. 13.9), як і спроби створення нетрадиційних конструкцій магнітопроводів (рис. 13.3 – рис. 13.7) не є вдалим в зв'язку з ускладненням технології виготовлення та погіршенням енергетичних характеристик створених зразків відносно АД традиційної конструкції (рис. 13.1).

13.4. Безкорпусне виконання електромашин змінного струму з переривчастими ребрами аксіально-тангенціального охолодження

Для виготовлення АД класичної будови і синхронних машин потужністю до 1000 кВт (кВ·А) кожен рік електротехнічним виробництвом провідних держав витрачається сотні тисяч тон ЕТС, міді, алюмінію, конструктивних металів. Традиційна і незмінна протягом більш 120 років технологія виробництва магнітопроводів вказаних машин штампуванням і шихтуванням кругових листів ЕТС (рис. 13.2) крім незадовільного коефіцієнту використання ЕТС, потребує застосування металоємкої оболонки. При традиційній будові статорів, що встановлені в оребренних корпусах (станинах) з чавуну, алюмінієвого сплаву або сталі, застосовуються екологічно шкідливі технології повторного ливарного використання заготівельних відливок для виготовлення елементів оболонок.

Конструкція і технологія виготовлення магнітопроводів статорів визначає три найважливіші напрямки комплексної економії в електромашинобудівному виробництві, а саме напрямки зменшення відходів сталі, зниження металоємності елементів корпусу, а також інтенсифікації

теплообміну електричної машини з навколишнім середовищем або холодоагентом при зовнішньому охолодженні статора.

Основна частина теплової енергії, що виділяється в статорі закритого АД, передається через тепловий опір, що визначається відомим, в тому числі з [14] виразом:

$$R_{\theta} \frac{h_{aS}}{\lambda_c \Pi_a} + \frac{\delta'_k}{\lambda'_k \Pi_a} + \frac{\delta_k}{\lambda_k S_m} + \frac{1}{\alpha_v S_m}, \quad (13.6)$$

де λ_c – теплова провідність сталі 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 теплова провідність матеріалу корпусу; S_m і α_v – зовнішня поверхня тепловідведення і коефіцієнт тепловіддачі охолоджуючому середовищу.

Традиційними засобами поліпшення теплового стану АД, обумовленими (13.6), є: збільшення S_m і зменшення δ_k при збереженні жорсткості оболонки шляхом оребріння корпусу, збільшення α_v шляхом, наприклад, зовнішнього обдуву і зменшення δ'_k [12-14]. Однак, у відповідності з [12-14] найбільш ефективним і, згідно (13.6), найбільш радикальним рішенням завдання підвищення інтенсивності охолодження і зниження металоємності є повна відмова від охоплюючої ярмо і прилеглої до нього оболонки як в захищеному, так і закритому виконаннях АД.

В цілому корпус статора і підшипникові щіти створюють необхідні для нормального функціонування машини жорсткість будови, площу поверхонь охолодження та захист ЕМС від зовнішнього середовища, а також рух ротора та установку елементів приводу. Актуальним завданням є розробка нових рішень активної і конструктивної частин електромашини, таких, що забезпечать усунення або зменшення енергоємного і шкідливого ливарного виробництва та забезпечення енергоресурсозбереження. Ефективним рішенням задач зниження матеріаломісткості і підвищення ефективності охолодження при покращенні екологічності виробництва є повна відмова від оболонки, що охоплює ярмо статора як в захищеному, так і в закритому виконанні машини. При конструктивному забезпеченні захищеності і стійкості (жорсткості) загальної будови, станина може бути вилучена і замінена, при необхідності спрямування обдуву, легким кожухом. Проблема захисту ЕМС і зовнішньої поверхні машини від впливу навколишнього середовища може вирішуватися якісним просоченням і нанесенням довготривало стійких покриттів.

Розкрій ЕТС з нульовими перемичками по довжині і ширині може забезпечити тільки внутрішні відходи в разі вирубки квадратних пластин гранованого магнітопроводу (рис. 13.10, а, б) або пластин з напівкруглим

вирізом (рис. 13.10, в). При цьому в разі збереження розкрою смуги (стрічки) штампування круглих пластин пунктирні контури (рис. 13.10, а) кутові ділянки гранованих пакетів при невиправданому збільшенні маси декілька знижують намагнічувальний струм АД, але по суті є прихованими відходами. У разі зниження витрати смуги (стрічки) при забезпеченні середньої висоти ярма на рівні круглого магнітопроводу (рис. 13.10, б), в гармонійному спектрі індукції АД з гранованим магнітопроводом присутні вищі низькочастотні складові, що погіршують енергетичні показники і віброакустичні характеристики. Тому, в зв'язку з насиченням зони $h_{s \min}$, такі магнітопроводи не можуть бути застосовані.

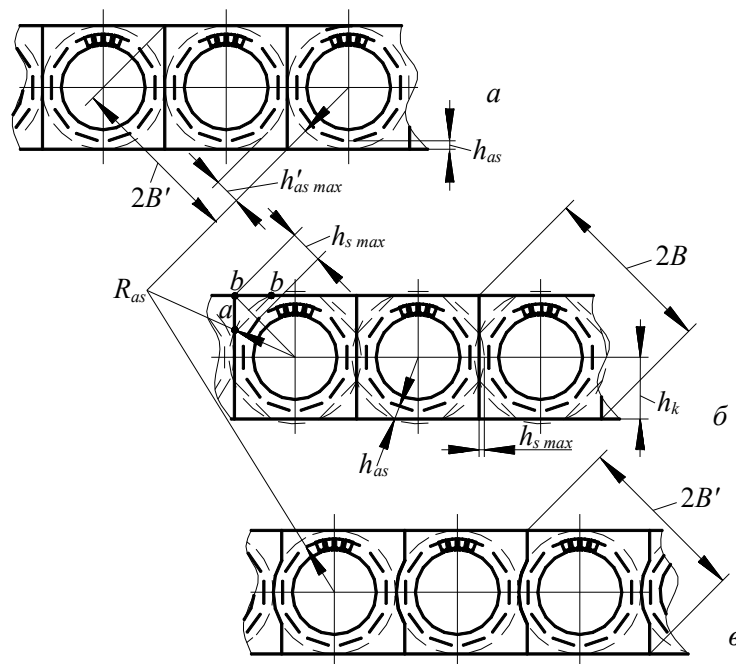


Рис. 13.10 – Конфігурація зовнішнього контуру ярма та розкрій пластин електротехнічної сталі без зовнішніх відходів: а – розкрій квадратних пластин для гранованого та тангенціального магнітопроводів; б – розкрій квадратних пластин з зонами насичення по довжині та ширині; в – розкрій з напівкруглим вирізом для утворення ребер тангенціального охолодження.

Енергоресурсозбереження при виробництві АД можливо на основі розробки безкорпусних конструкцій з магнітопроводами статора з некруглих тангенціально зсунутих пластин. По суті пропонується використовувати приховані відходи розкроїв сталі (рис. 13.10, а) для розвитку поверхонь і інтенсифікації охолодження магнітопроводів (рис. 13.11). Для цього запропонована «віярна» збірка пластин (або секцій у вигляді груп пластин) з утворенням гвинтоподібного оребрєння (рис. 13.11, а). Однак на основі теплових досліджень АД з тангенціальним магнітопроводом схеми (рис.

13.11, *a*), що містить 24 модуля по 4 пластини, які зсунуті на кут $\gamma_{\Pi}=\pi/6$, встановлено [15], що збільшення поверхні охолодження не призводить до помітного зниження температури. Тому зроблено висновок про необхідність підвищення тепловідводу з поверхні магнітопроводу (рис. 13.11, *a*) інтенсивним зовнішнім обдувом.

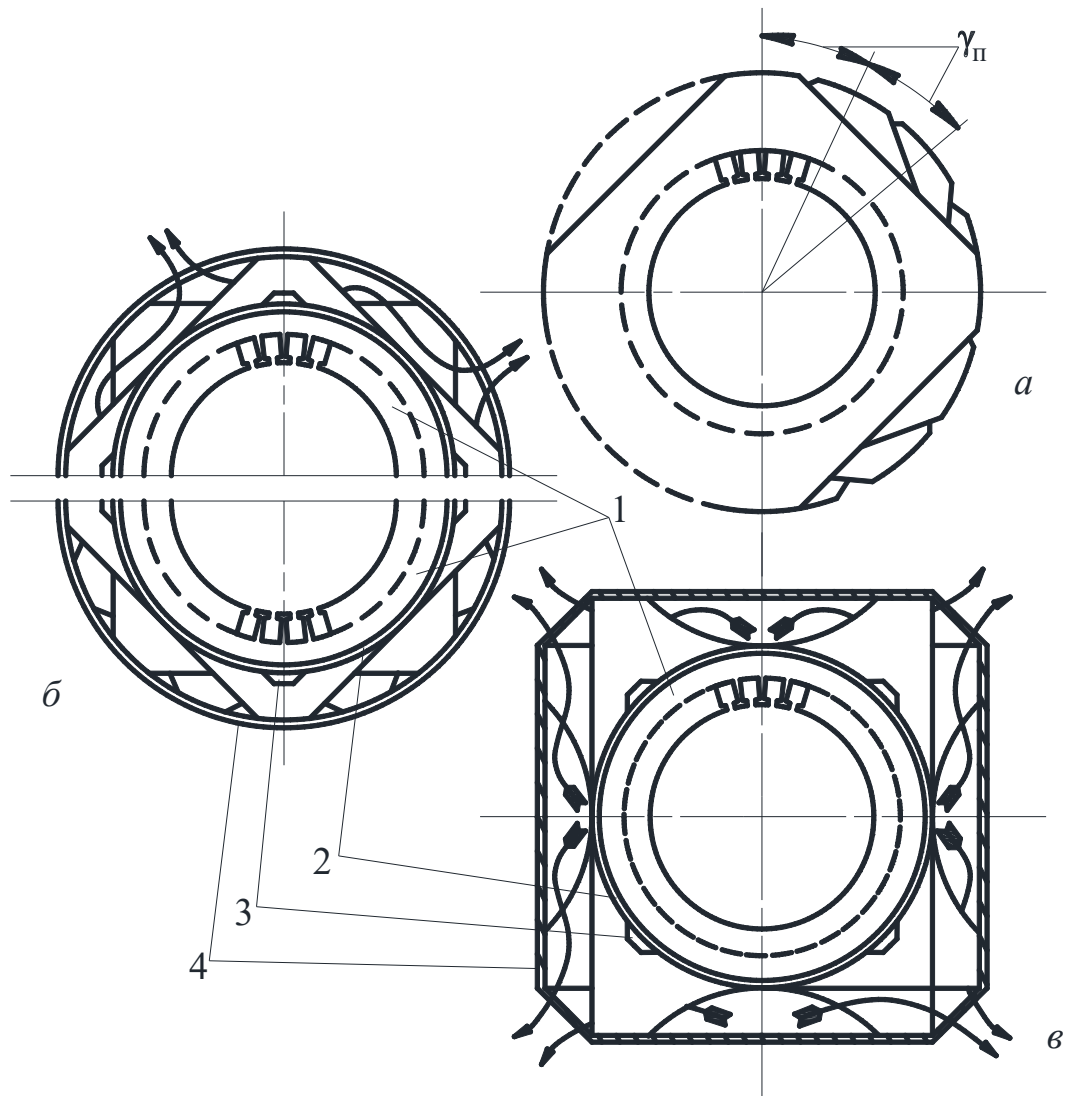


Рис. 13.11. – Магнітопроводи зі збільшеною поверхнею охолодження: *a* – з віяльним складанням (тангенціально-віяльний) та з тангенціальним зсувом і з ребрами тангенціального охолодження, що утворені кутковими зонами пластин прямокутної форми (*б*) і з пластин, що мають напівкруглий виріз; 1 – магнітопровід; 2 – стягуючий циліндр; 3 – ребра жорсткості; 4 – кожух.

На основі аналізу стану електромашинобудування констатується "глухий кут" подальшого розвитку АД традиційної конструкції і пропонується вихід з застою в удосконаленні на основі розробки "інтелектуальних", згідно [14], безкорпусних машин схеми (рис. 13.11, *б*, *в*). Такі машини місять секційний магнітопровід (рис. 13.12, *a*), який складається з поверненням на $\pi/2$ пакетів

пластин маловідходного розкроєння з напівкруглим вирізом (рис. 13.12, б). Закритий безкорпусний АД з подібним статором вперше представлений в 1985 році на Ганноверській "ярморці", а французька фірма «Індастрі Юнісерв» випустила на ринок нову серію АД вказаної будови з примусовою вентиляцією і інтеграцією теплообмінника з магнітопроводом статора. Конструкція (рис. 13.12, а) характеризується розвиненим переривчастим орєбренням і аксіально-тангенціальним рухом повітря, що підвищує коефіцієнт α_v та підсилює тепловідвод. Складовими конструктивної частини машин з магнітопроводами статора (рис. 13.11, б, в, рис.13.12, а) є торцеві циліндричні опорні елементи, наскрізні планки, що проходять крізь отвори в виступах – ребрах магнітопроводу і легкий зовнішній кожух. Опорні елементи і планки зтягують магнітопровід, що замінює скріплюючу дію станини. Серія відрізняється поліпшеною системою повітряного аксіально-тангенціального охолодження з повертанням потоку повітря. Збільшення інтенсивності теплообміну дозволило знизити розміри і підвищити ефективність АД з пластин магнітопроводу статора, маловідходного розкроєння (рис. 13.12, б). Однак спільними недоліками тангенціальних магнітопроводів (рис. 13.11, рис. 13.12, а) є відсутність можливості перерозподілу магнітного поля з високо використуваної зони ярма $h_{S \min}$ в недовикористану зону $h_{S \max}$ (зрівняльний потік перпендикулярний площинам пластин) і збільшення габаритного розміру магнітопроводів (рис. 13.10, б, в) з $2R_{aS}$ до $2B$ ($2B'$).

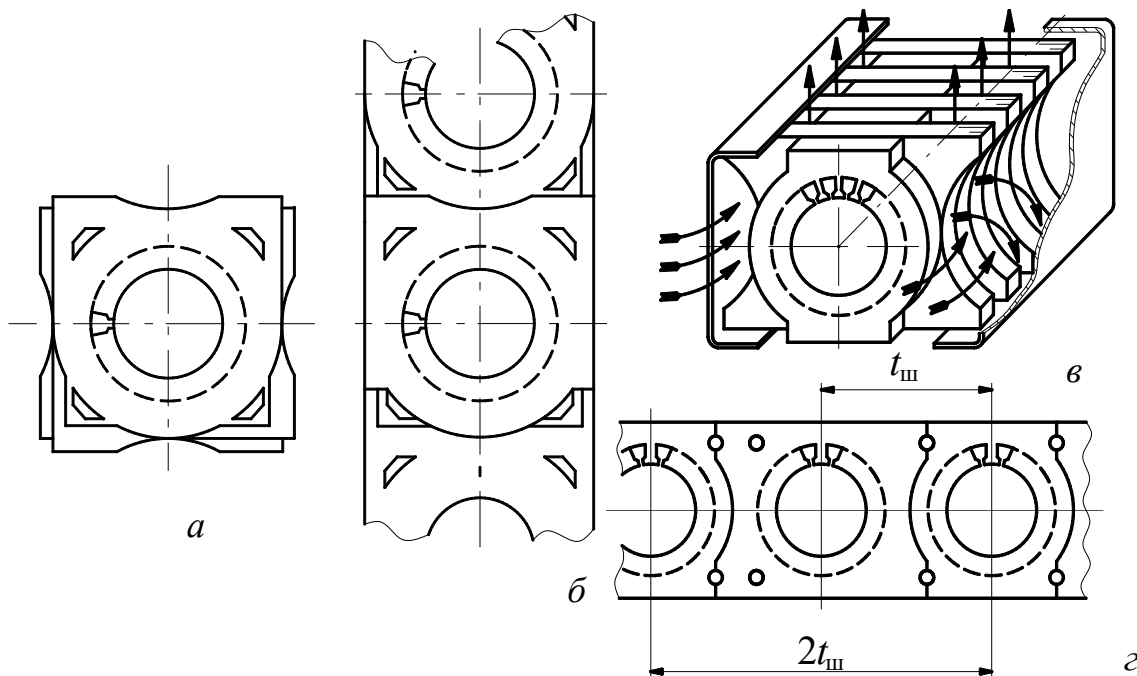


Рис. 13.12. – Принципові схеми варіантів складання пакетів і розкроєння пластин магнітопроводу статора безкорпусної електромашини з аксіально-тангенціальним охолодженням з восьмирядним (а, б) і чотирирядним (в, г) переривчастим орєбренням

Подальший розвиток конструкції (рис. 13.12, *a*) є можливим складанням магнітопроводу статора (рис. 13.12, *в*) без повороту пакетів ЕТС на основі зміни порядку руху смугової заготовки і змінного силового впливу на цю заготовку, тобто при поперечному розділі смуги (рис. 13.12, *г*) з подвійним кроком $2t_{ш}$ по відношенню до кроку $t_{ш}$ штампування пазових і допоміжних отворів [2, 16, 17]. При цьому також досягається зниження металоємності і відсутність зовнішніх відходів розкроєння пластин ЕТС.

14. ПРОПОЗИЦІЇ УДОСКОНАЛЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ МАГНІТОПРОВОДІВ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУР

14.1. Безкорпусне виконання асинхронного двигуна з багато площинним магнітопроводом статора

Іншим рішенням задачі зниження металоемкості і інтенсифікації тепловідводу при безкорпусному виконанні АД є зміна конфігурації і заміна плоских шарів пакетів на просторову багатоплощинну структуру шихтованого магнітопроводу статора (рис. 14.1, *a*) [2, 12, 18]. Просторова структура вказаного магнітопроводу утворюється тангенціальним зсувом пластин квадратної форми і вигином їх кутових зон на 60° по лініям граней восьмигранника (рис. 14.1, *б*). На вершинах кутів суміжні шари ЕТС зсуваються на $b_{зс}$ (рис. 14.1, *в*). Виникає шорсткість і підвищення площі зовнішньої поверхні ярма, що покращує охолодження і суттєво знижує заготівельний об'єм ЕТС [17, 19-22].

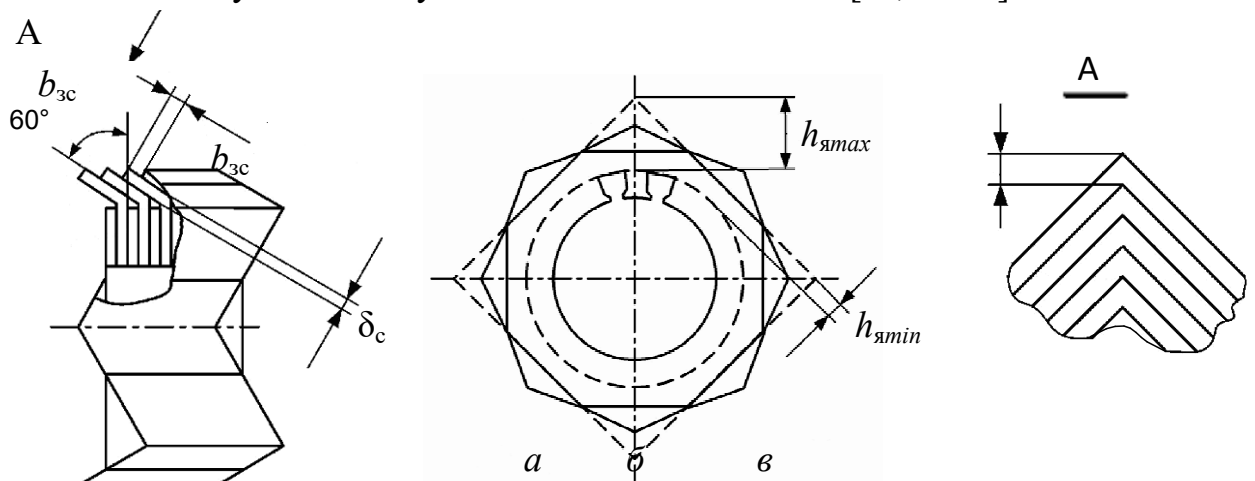


Рис. – 14.1. Багатоплощинний магнітопровід (*a*) і конструктивно-структурні особливості просторових шарів електротехнічної сталі і зовнішньої поверхні ярма (*б*, *в*)

В закритому безкорпусному АД (рис. 14.2, *a*) магнітопровід статора (рис. 14.1, *a*, рис. 14.2, *б*) з пластин і шарів ЕТС (рис. 14.2, *в*, *г*) зтягнутий несучими опорними елементами. Просторова структура ярма в 1,5 – 2 рази (і більше при формуванні зубчастих кутових зон пластин) збільшує площу зовнішньої поверхні тепловідводу магнітопроводу відносно зовнішньої циліндричної поверхні вищезгаданого класичного аналогу. Операція вигину граней і суміщення торцевих зон магнітопроводу з нажимними елементами (рис. 14.2, *a*) виконується в складеній заготовці і суміщується з операцією пресування пакету з подальшим закріпленням зварюванням в кутових зонах через пластину [2, 23].

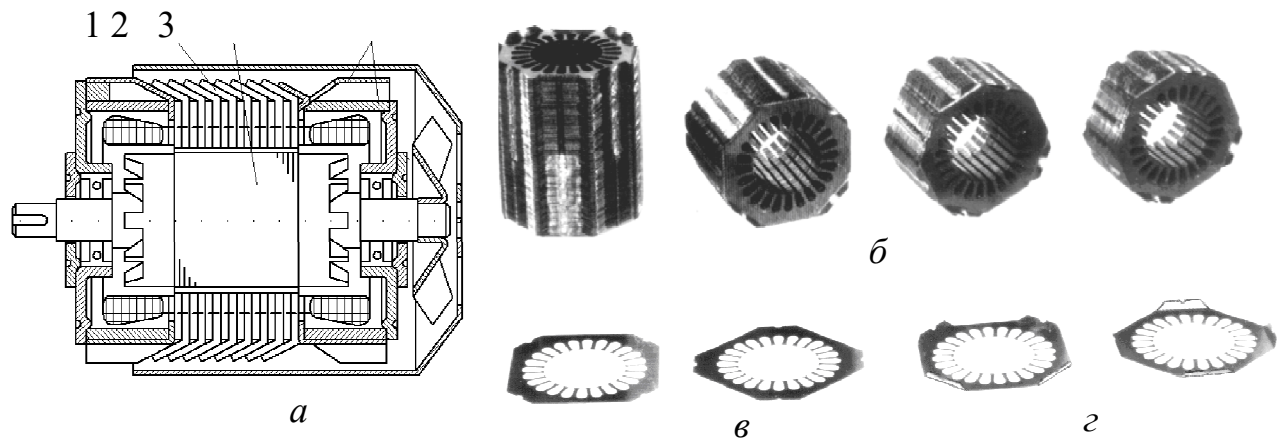


Рисунок 14.2 Конструктивна схема закритого безкорпусного асинхронного двигуна (*a*) з магнітопроводом статора (*б*), плоскі заготовки (*в*) і елементарні шари (*г*) електротехнічної сталі просторової структури: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – опорно-стяжний елемент.

Зубцьово – пазовий шар магнітопроводу (рис. 14.1, *a*) з зовні відкритими пазами може бути відокремлений від ярма, що спрощує обмотково-ізоляційні роботи (рис. 14.3, *a*). Також ярмо магнітопроводу статора (рис. 14.1, *a*) може бути розділено на зовнішню багатоплощинну частину, що виконує функцію станини і внутрішню кільцеву частину з зубцевопазовим шаром на внутрішній поверхні (рис. 14.3, *б*). Крім того можливо створення штампувального обладнання з поворотним пуансоном (рис. 14.3, *в*). Вказані рішення усувають операцію повертання зубцево-пазової зони на 45° в кожній парі суміжних пластин.

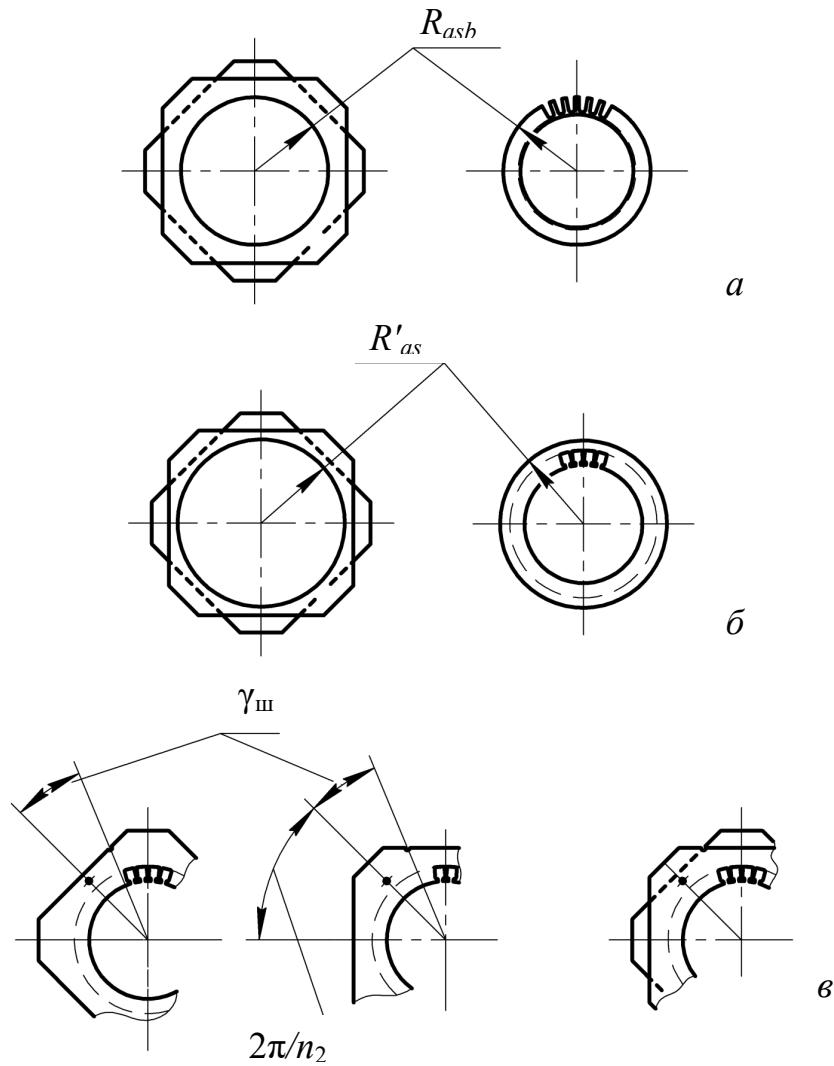


Рис. 14.3. Способи виготовлення тангенціальних та багатоплощинних магнітопроводів при зниженій точності штампованого інструменту:
a – відокремлення зубців від ярма; *б* – розділення ярма на дві зони;
в – використання штампу з поворотним пуансоном

Багатоплощинний магнітопровід (рис. 14.1 – рис. 14.3) має зовнішню поверхню з шорсткістю, що дозволяє інтенсифікувати теплообмін при турбулентній течії охолоджувача. Теплообмін підвищується, як що відношення параметрів шорсткості (кроку $t_{\text{ш}}$ і висоти $h_{\text{ш}}$) складає $t_{\text{ш}}/h_{\text{ш}} \geq 1$. Вказаної умові задовольняють параметри зсунутих ділянок кутових зон пластин на поверхнях охолодження (рис. 14.1, *a*) [17]:

$$t_{\text{ш}} = \delta_c / \sin(\pi/6); h_{\text{ш}} = \delta_c \sin(\pi/3); t_{\text{ш}}/h_{\text{ш}} = 2,31. \quad (14.1)$$

Якщо в зонах кутових відходів (рис. 14.4, *a*) виконати виступи висотою $h_{\text{в}}$, можливо отримати магнітопровід з багатоплощинною структурою виступів ЕТС, тобто ребер (рис. 14.4, *б*). На периметрах цих ребер утворюється штучна шорсткість з параметрами (14.1). При вигині периметри виступів $FBCD$ зсуваються в положення $F'B'C'D'$ на величину $b_{\text{зс}}$, при цьому

суттєво підвищується поверхня охолодження [17]. Додаткова штампувальна деформація гранених пластин по лініям ac , $a'c'$... кутових зон abc , $a'b'c'$... зменшує магнітний опір магнітопроводу (рис. 14.4, ν , ζ).

14.2. Технологічні можливості виготовлення багатоплощинних магнітопроводів

Додаткова особливість багатоплощинних магнітопроводів – просторова структура сталі пов’язана з формоутворенням елементарних шарів. Завдання забезпечення заданої форми окремого шару магнітопроводу (рис. 14.2, ν , ζ) технологічних труднощів не представляє, але передбачається наявність додаткового згинального штампа і додаткової операції відгину утворених гранями виступів в кожній окремій пластині. Зазначений недолік усувається на основі способу інтегрального формоутворення багатоплощинного магнітопроводу [23].

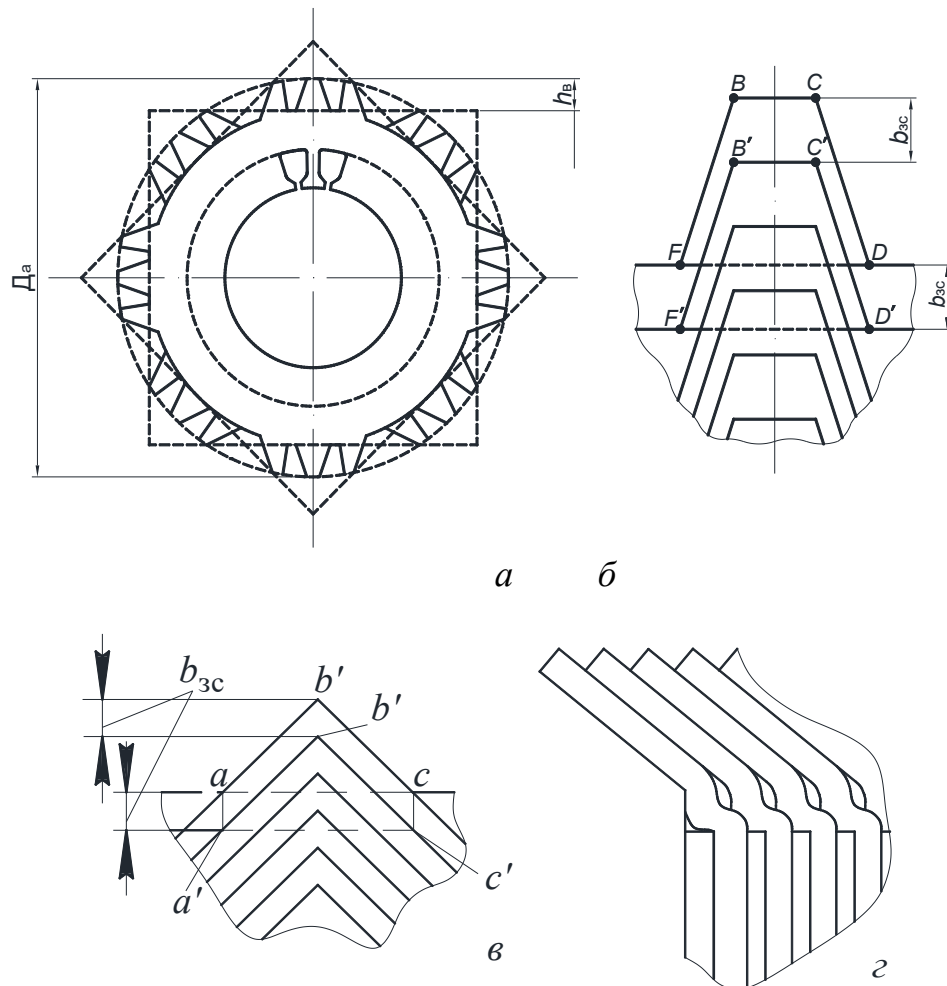


Рисунок 14.4. Особливості конфігурації (a), зсув зубчастих (δ) і деформація в зонах стиків ділянок (ν , ζ) шарів електротехнічної сталі варіантів багатоплощинного магнітопроводу

Такий спосіб включає набір заготовки у вигляді пакету кільцевих гранених пластин з виступами, що зсунуті в тангенціальному напрямку на половину кута граней в кожній парі суміжних пластин, установку заготовки на оправку-основу інструменту (рис. 14.5, *a*) і формування магнітопроводу відгином виступів переміщенням інструменту на оправці уздовж активної довжини l_δ магнітопроводу (рис. 14.5, *б*). Формування магнітопроводу здійснюється послідовним впливом на заготовку деталей оснастки (використовується стандартний прес подвійної дії) – циліндрів обжимання та згинальних виступів пуансона. Особливістю способу є те, що внутрішня (щодо відгинаємих ділянок заготовки) кромка поверхні впливу на заготовку кожного виступу пуансона розташовується на відстані h від координати осі OO' магнітопроводу, що дорівнює відстані від цієї осі кромки відігнутих ділянок елементарних шарів, які утворені після відгину виступів. Деталі пуансона при відгинанні переміщуються уздовж осі OO' на відстань l_n , що перевищує довжину l_δ магнітопроводу ($l_n \geq l_\delta$).

Описаний спосіб дозволяє отримати за одну операцію (одне переміщення пуансона) задану форму і конфігурацію багатоплощинного магнітопроводу (рис. 14.1, *a*, рис. 14.2, *б*).

Для забезпечення суміщення поверхонь сполучення пластин ЕТС і нажимних елементів перед відгинанням виступів на оправку з боку торців магнітопроводу встановлюються нажимні елементи (рис. 14.5, *в*) у вигляді об'ємних штампованих деталей чашоподібної форми.

Формування магнітопроводу здійснюється тиском і деформаційним вигином кутових зон ЕТС до сполучення торцевих поверхонь виступів крайніх пластин з ділянками похилих поверхонь нажимних елементів (рис. 14.5, *б*). Можна використовувати нажимні елементи (рис. 14.5, *в*) з виштампованими виїмками на похилих поверхнях і відігнутими ділянками між виїмками. В цьому випадку відгин виступів магнітопроводу здійснюється спільно з відгином на 60° ділянок нажимних елементів між виїмками [24].

Після формування магнітопроводу і нажимні елементи в опресованому стані з'єднуються один з одним і скріплюються зварними швами через аксіальні пази в виступах пуансона. Таким чином, без додаткових опорно-зміцнюючих і стяжних елементів можна забезпечити виробництво багатоплощинних магнітопроводів досить жорстких і міцних статорів без корпусної установки як в захищених, так і закритих АД (рис. 14.2, *a*) з мінімальною металоємністю.

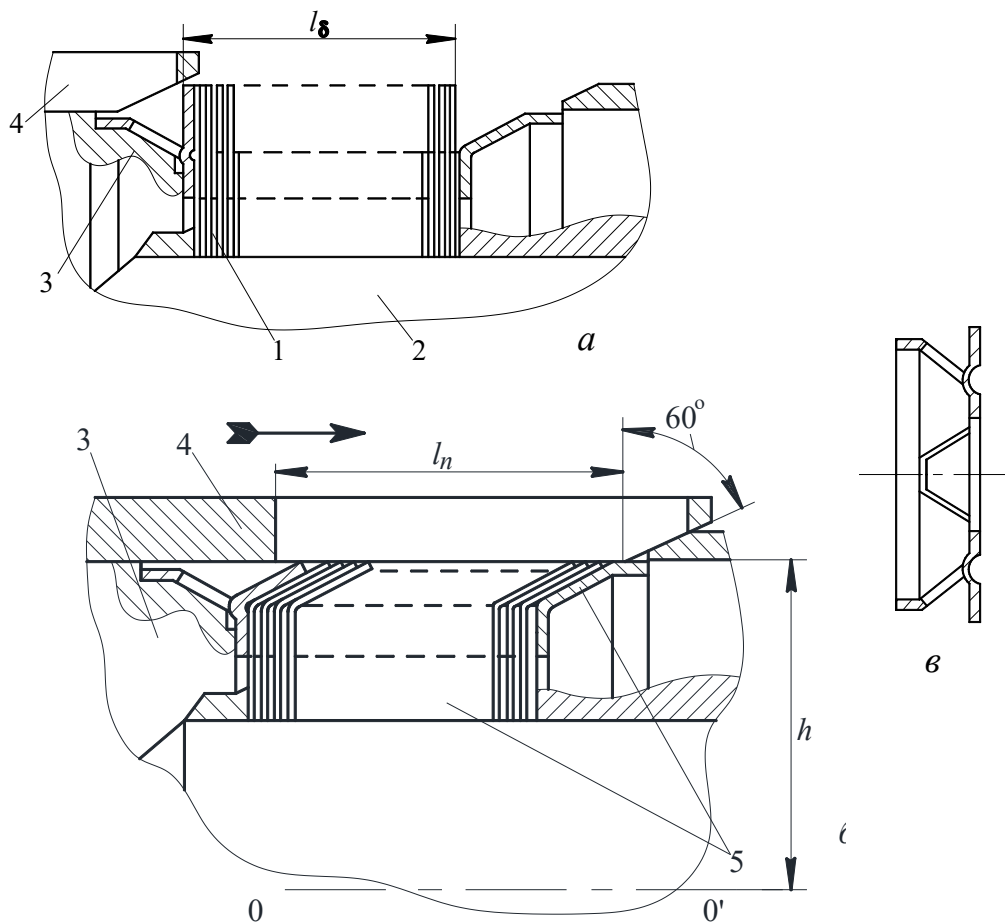


Рис. 14.5. – Пристрій для опресування та зкріплення багатоплощинного магнітопроводу статора: *a* – вихідне положення; *б* – кінцеве положення; *в* – нажимний елемент (в зменшеному масштабі); 1 – заготовка магнітопроводу; 2 – оправка; 3 – циліндр обжиму; 4 – виступ пуансона; 5 – магнітопровід у зборі з нажимними елементами.

14.3. Зменшення матеріалоемності короткозамкненого ротора і підвищення надійності двигуна класичної схеми

Металоемність, віброакустичні характеристики (ВАХ), втрати і показники надійності АД, крім конструктивно-технологічних особливостей статора, суттєво залежать від будови ротора.

Зниження механічних обертових складових вібрацій і шуму АД визначається якістю врівноваження ротора, яка характеризується відношенням [25]

$$P_H/m_p = \Omega^2 e_H, \quad (14.2)$$

де P_H – сила небалансу; m_p – маса ротора; e_H – параметр механічної балансності ротора.

Величина параметру e_H визначається похибками обробки і неоднаковою щільністю ротора, прогином валу, зсувом елементів обмотки при обертанні і теплової деформації активних і конструктивних елементів при нагріванні при виникненні різниці температур в діаметрально протилежних точках. Причини небалансу, що пов'язані з похибками технологічних обробок і відхилень від ідеалу та відповідно неоднаковою щільністю ротора компенсуються при його балансуванні у власних підшипниках. Для компенсації впливу прогину валу, теплової деформації і зсуву елементів обмотки врівноваження виконується в зібраній машині при робочій швидкості обертання і температурі. Однак якість балансування (14.2), величина e_H і ексцентриситет маси ротора не є стабільними. Тому повинні використовуватися конструктивні і технологічні заходи забезпечення стабільності ротора на всіх режимах. Традиційна контрукція ротора з запресованим валом обумовлює наявність внутрішніх залишкових напружень, дефектів напресівки і вигину вісі. Крім того, при використанні шихтованого магнітопроводу, наявність центрального отвору під вал збільшує відходи при штампуванні пластин. Гаряча посадка і збільшення діаметра середньої частини вала підсилюють жорсткість ротора. Однак при цьому знижується критична частота обертання і підсилюється вигін вісі від наявності залишкових напружень, що максимальні на внутрішньому діаметрі пакету пластин магнітопроводу і визначаються виразом [26]

$$\tau = D_R(n_{max}/1000)^2 N(x, j) 10^5, \quad (14.3)$$

де D_R і n_{max} (об/хв) – зовнішній діаметр і максимальна частота обертання ротора; N – відомий коефіцієнт, який є функцією конструктивних параметрів x і j [26].

Параметри x і j визначаються виразами:

$$x = d_b / (D_R - 2h_{ZR}); \quad (14.4)$$

$$j = h_{PR} / D_R \quad (14.5)$$

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

З (14.3)-(14.5) виходить, що зменшення діаметру центрального отвору призводить до зниження механічних напруг в магнітопроводі і дозволяє збільшити критичну частоту обертання ротора. Крім того, збільшується висота ярма ротора, знижується намагнічувальний струм і втрати в пусковому режимі при відгалуженні частини магнітного потоку в масивний вал.

Виключення або зменшення залишкових напруг запресовки і відходів вірубки центрального отвору під вал можливо використанням різновидів конструкції з опорними осьовими елементами (нажимними хвостовиками),

тобто конструкції з переривчастим валом. Особливо ефективним є застосування цього технічного рішення в роторах АД маломагнітного і тропічного виконання, де застосовується більш дорога немагнітна корозійно стійка сталь (рис. 14,6, а). В цілому звичайна конструкція класичного ротора з суцільним потовщеним в середній частині валом не є доскональною, збільшує металоємність виготовлення і знижує надійність АД.

Зазначений недолік в транспортних АД частково усунутий з підвищенням трудомісткості і металоємності виробництва в роторах з складовим валом з зварних секцій (рис. 14.6, а), що містять середню секцію з феромагнітної сталі і вихідні секції з корозійно-стійкої сталі. В конструкціях ротора з литою обмоткою вихідні кінці, що зтягують магнітопровід, містять аксіальні виступи, які фіксовані в торцях магнітопроводу і радіальні виступи, що охоплені (облиті алюмінієм) кільця обмотки (рис. 14.6, б) [27]. Вказаний ротор може бути підсилений стрижнем (рис. 14.6, б, в), що утворений заповненням центрального отвору при заливці обмотки алюмінієм або апресованим у вказаний отвір.

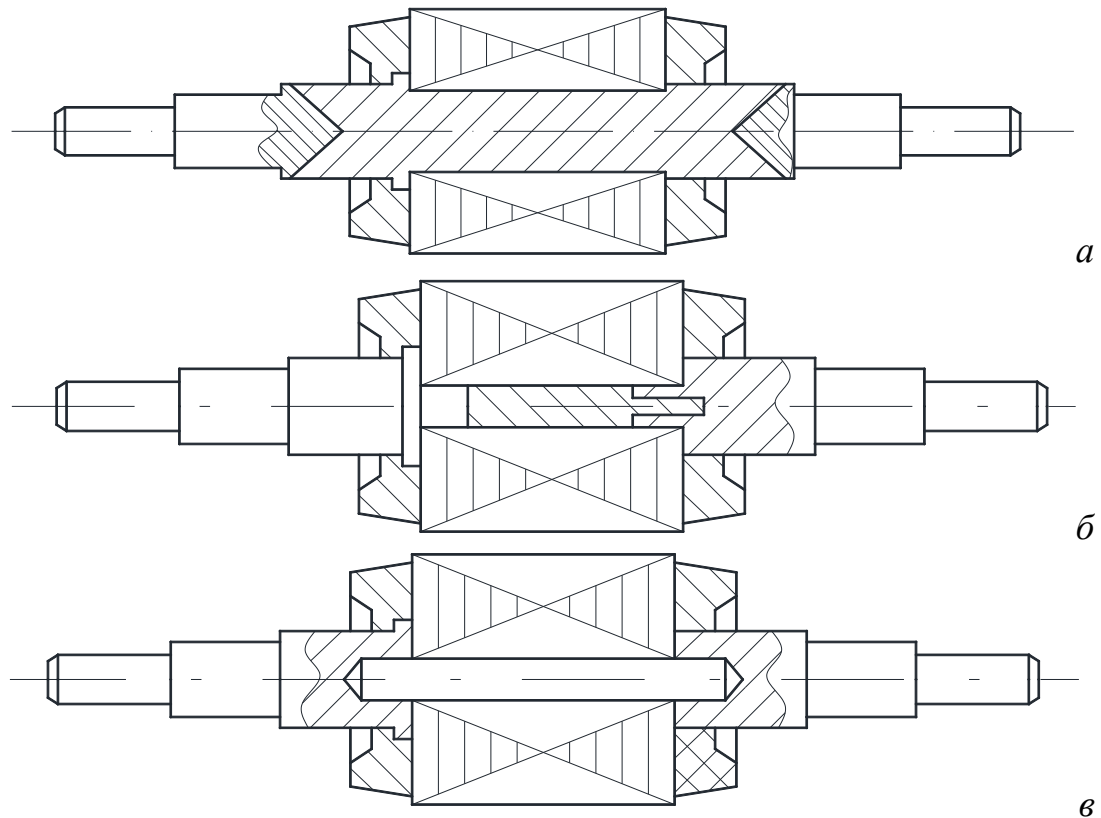


Рис.14.6. Схеми короткозамкненого ротора: *а* – традиційної конструкції з секціонованим зварним валом; *б* – *в* з секціонованим валом, що містить зтяжні хвостовики і заповнений центральний осьовий отвір

Подальшим розвитком конструкцій (рис. 14.6, б, в) є ротор з конусно-площинним магнітопроводом і радіальними конусними поверхнями секціальних виступів хвостовиків (рис. 14.7). В варіантах вказаної

конструкції конусно-площинна структура магнітропроводу може бути забезпечена тарільчастою формою шарів ЕТС в зоні ярма (рис. 14.7, а, б) [28], або конусною формою зубцевого шару (рис. 14.7, в) [29]. 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 [17, 22].

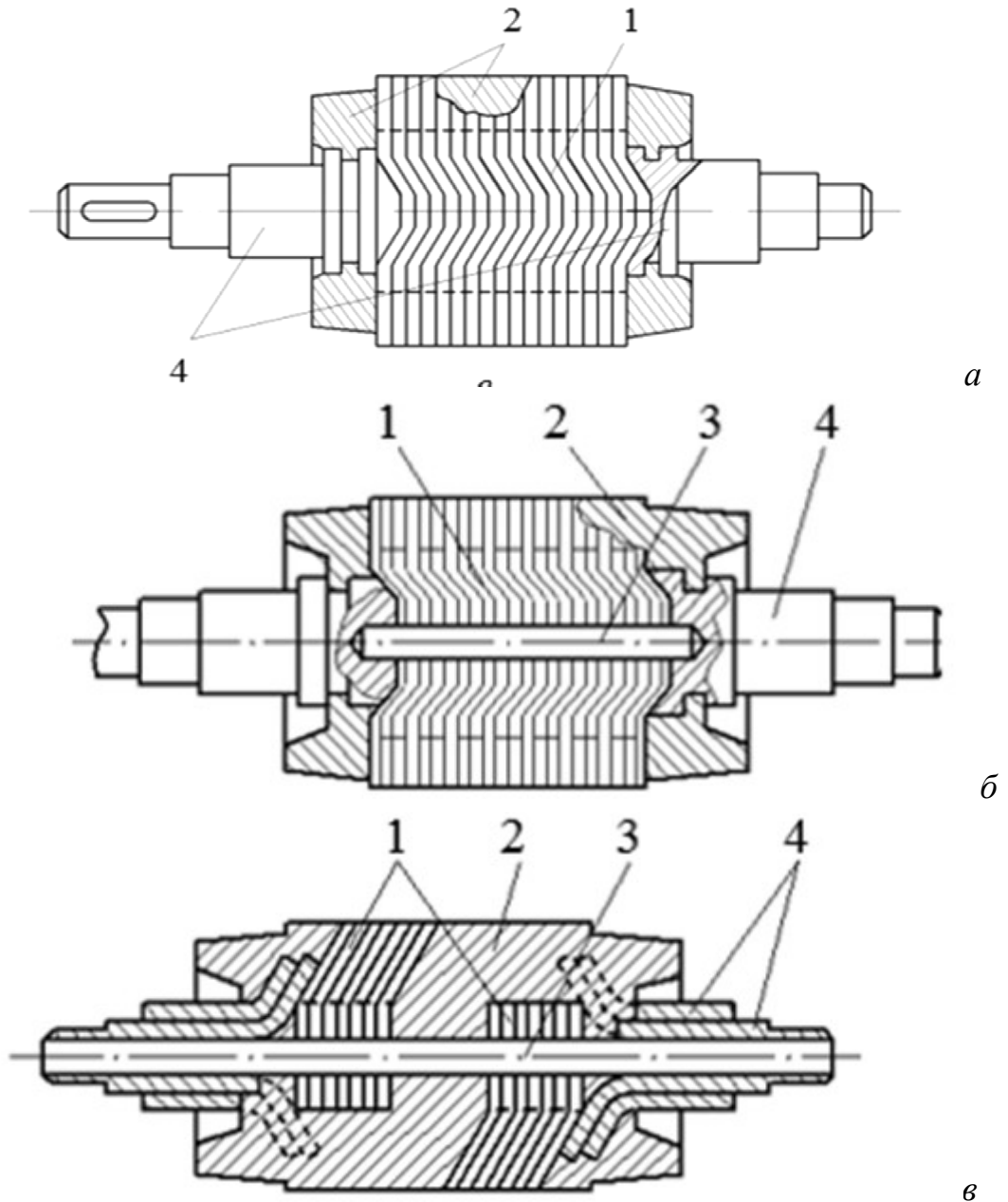
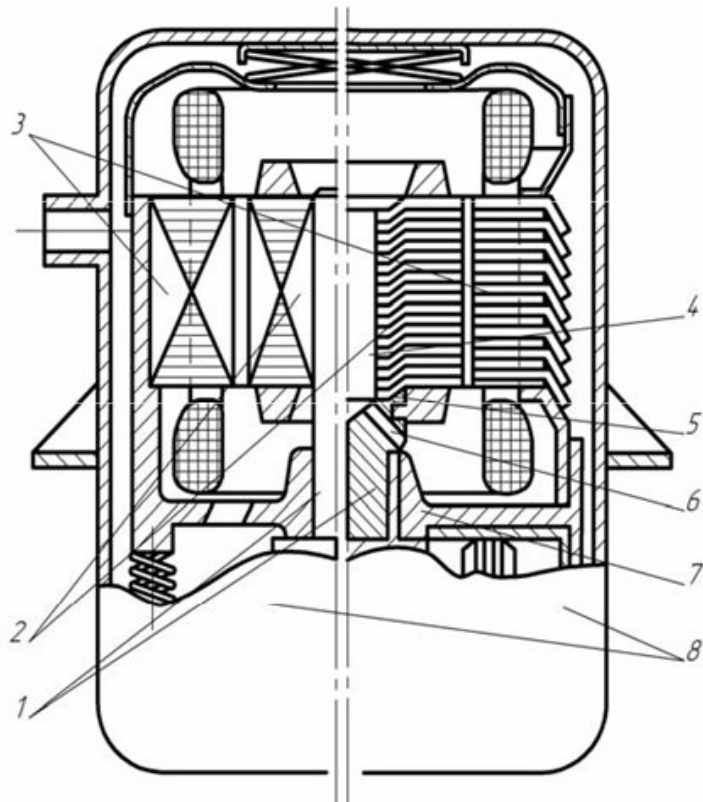


Рис.14.7. Варіанти конструктивних схем короткозамкненого ротора з конусно-площинною структурою ярма а, б, і зубців (в): 1 – магнітровід; 2 – обмотка; 3 – центруючий стрижень; 4 – опорно-нажимний елемент.

Конструкції ротора (рис.14.6, рис.14.7.) 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 зкорочуються на (3...8)% відходи ЕТС. Вихідні хвостовики можуть бути складені з трубчастих елементів з виступами, що створені вигіном ділянок між прорізами на торцях цих труб (рис. 14.7. в) [30]. При вилученні з конусно-площинного магнітопроводу центрального отвору та центрального стрижня конструкція ротору спрощується (рис. 14.7. а).

Застосування безкорпусної будови статора з багатоплощинним магнітопроводом (рис. 14.2, а) і конусно-площинної структури магнітопроводу ротора (рис. 14, , а) дозволяє удосконалити насосно-компресорне обладнання з вбудованими АД. Активна частина цих АД охолоджується робочими потоками відповідно рідини та газу [31-33]. Наприклад при застосуванні традиційної будови двофазного АД з ротором консольної горизонтальної або вертикальної (рис. 14.8, а) установки в герметичному компресорі необхідно підвищення міцності консольної частини валу і збільшення внутрішнього діаметру магнітопроводу ротора. Статор вбудованого АД (рис. 14.8, а) установлений вертикально в циліндричному корпусі, який є продовженням блок-картеру компресора. Статор і ротор через зовнішню поверхню корпусу і робочий зазор АД (рис. 14.8, а) охолоджуються всмоктуваними парами холодоагента. Лобові частини обмоток статора і ротора, що віддалені походу холодоагента, охолоджуються гірше, ніж на вході всмоктуваного газу в зону активної частини. Це призводить до різниці температур зовнішніх і внутрішніх лобових частин та зниження надійності АД. Малий переріз шляху руху газу крізь зазор обумовлює великий аеродинамічний опір на всмоктуванні і підвищення енерговитрат. Зниження цього опору вентиляційними каналами в ярмі магнітопроводу погіршує показники двофазного АД (рис. 14.8, а). Використання замість вказаної традиційної конструкції вбудованого АД ЕМС з багатоплощинним магнітопроводом статора і ротора з опорним хвостовиком в торці конусноплощинного магнітопроводу [28] покращує тепловідвод з зовнішньої поверхні статора, збільшує переріз ірма і радіальну жорсткість ротора та суттєво зменшує металоємність і масу блок-картеру компресора (рис. 14.8, б). В зоні внутрішніх лобових частин в хвостовику виконані отвори, що поєднані з центральним отвором ярма [28].



а б

Рис. 14.8. Варіант конструктивної схеми герметичного холодильного компресора з вбудованими асинхронними двигунами, що відрізняються площиною (*а*) і просторовою (*б*) структурами шарів електротехнічної сталі магнітопроводів статора і ротора:

1 – вал; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – осьовий канал; 5 – хвостовик; 6 – нагнетательний отвір; 7 – блок картер; 8 – кожух.

При роботі компресора (рис. 8, *б*) пари холодоагента, крім робочого зазору АД поступають в центральний отвір ярма ротора і крізь наклонні отвори хвостовика, що є певними лопотями, викидаються на найбільш нагріту нижню лобову частину обмотки статора. Ці пари мають меншу температуру відносно парів, що проходять крізь зазор, тому інтенсифікується тепловідвод з нижньої лобової частини статора і підвищується надійність вбудованого АД. Зниження аеродинамічного опору тракту охолодження АД також покращує показники компресора.

14.4. Короткозамкнені двигуни з покращеними пуско-регульованими властивостями

В просміслово розвинених державах установлена потужність нерегульованих АД не досягає 50%, а економія електроенергії за рахунок збільшення парку регульованих АД зростає з кожним роком.

На додаток до частотнорегульованих широко використовуються більш системно та комплектно прості асинхронні електроприводи з напівпровідниковими регуляторами напруги (НРН). В залежності від специфіки регулювання певних механізмів системи НРН-АД можуть успішно конкурувати з частотними електроприводами. Однак резерв удосконалення електроприводів НРН-АД закладається в рішенні задач енергозбереження при зміні режимів їх роботи [34, 35]. Асинхронний електропривод з НРН надає можливість енергозбереження на режимах недовантаження при тривалій роботі на "штучних" характеристиках з втратами в АД меншими відносно ділянки недовантаження "природної" характеристики. Такі режими потребують регулювання механічної характеристики з забезпеченням мінімуму втрат активної потужності.

Системи з НРН також застосовуються для обмеження пускових струмів АД, що неприйнятно для частини механізмів з важкими умовами пуску. Міжнародний стандарт NFC15-100 визначає допустиме падіння напруги при включенні АД різної потужності з пусковими струмами, що багатократно перевищують номінальні значення. Тому застосуванням системи НРН-АД вирішуються задачі керованого плавного пуску.

Останнім часом підсилюється тенденція виробництва комплект-електроприводів з створенням і використанням замість серійних машин спеціальних АД, що пристосовані до особливостей приводу і регулятора. Таким чином досягається підвищення технічного рівня регульованих електроприводів [36, 37].

Енергоефективність і мінімум втрат активної потужності електромашини визначаються відповідно підсумком і рівністю постійних втрат неробочого ходу P_0 і змінних втрат навантаження P_K

$$P_{\Sigma} = P_0 + (M_S/M_H)^2 P_K, \quad (14.9)$$

де M_S і M_H – режимний статичний і номінальний моменти.

При зниженні навантаження і ковзання S відносно зони номінального ковзання S_H зростають активні втрати і зменшуються ККД і коефіцієнт потужності АД. При зниженні напруги U зменшуються перевантажувальна здатність, пусковий струм I_K і момент M_K :

$$I_K = U / \sqrt{(R_1 + C_1 R_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}; \quad (14.10)$$

$$M_K \equiv U^2 R_2' / [(R_1 + C_1 R_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2], \quad (14.11)$$

де R_1 , x_1 , R_2' , x_2' – відповідно активні та індуктивні параметри статора і ротора; C_1 – коефіцієнт перетворення заступної схеми.

При регулюванні напруги АД складові втрат (14.9) змінюються, причому P_K залежить від моментна і ковзання, а P_0 знижується з зменшенням U . Алгоритми мінімізації втрат дією системи керування НРН ґрунтовані на

залежностях (14.9) – (14.11) і повинні забезпечити постійність деякої оптимальної величини ковзання S_0 .

$$S_0 = S_H \sqrt{P_0/P_K}. \quad (14.12)$$

З (14.9) і (14.12) випливає, що енергозбереження при регулюванні АД досягається підтриманням оптимального співвідношення постійних і змінних втрат і зниженням нелінійності штучних механічних характеристик. При цьому управління зниженням U відносно номіналу виконується на основі припущень лінійності магнітного кола і лінійності робочої ділянки механічної характеристики [34, 35]. Тому зниження нелінійності вказаної характеристики підвищує точність регулювання.

Відповідно до (14.10), (14.11) величини I_K і M_K відповідно знижуються і зростають з збільшенням R'_2 . В зв'язку з цим короткозамкнені ротори виконуються з регульованими параметрами. Зміна параметрів досягається витисканням струму в елементах короткозамкненої обмотки при зміні S . Ефект витискання струму і залежності параметрів елементів АД від частоти мережі f_1 і S визначається глибиною проникнення магнітного поля в провідниковий матеріал.

$$\Delta_M = \sqrt{\rho_M / (\pi f_1 S M_m)}, \quad (14.13)$$

де ρ_m і μ_m – питомий опір і магнітна проникливість матеріалу. Тому ротори виконуються, по можливості, з поглибленими пазами, а також в спеціальних АД двохклітковими або масивними двохшаровими. У АД з масивними роторами незадовільні робочі характеристики.

Застосування глибоких пазів і подвійної клітки частково покращує пускові характеристики. Однак "форма" механічної характеристики при зниженні перевантажувальної здатності таких АД відповідає загальнопромисловим машинам (крива 1 на рис. 14.9, а). Для покращення енергетики відносно АД з масивними роторами при забезпеченні механічних характеристик виду 2 (рис. 14.9, а) і зменшення пускових струмів (криві 1, 2 на рис. 14.9, б) використовуються варіанти ротора з екранованими короткозамикаючими кільцями і з так званою феромагнітною "зірочкою" [38].

При роботі АД з екранованими кільцями ротора (кільця сполучені з суцільними циліндричними феромагнітними накладками) при підвищенні навантаження або зниженні напруги збільшуються S і частота та величина струму ротора. Відповідно зростають частота і величина потоку лобового розсіяння ротора. Зростає індуктивний опір розсіяння і обмежується струм ротора [38]. В роторі АД з зірочкою кожен мідний стрижень клітки з'єднаний з феромагнітним виступом – "промінем", що з'єднаний з феромагнітним короткозамикаючим кільцем. Виступи і кільця зірочки мають товщину, що перевищує подвійну глибину (14.13) проникнення магнітного поля в сталь

при промисловій частоті. Завдяки поверхневому ефекті в ділянках зірочки параметри ротора змінюються в залежності від S в широких межах. Тому при гарних пускових характеристиках (визначаються опорами ділянок зірочки при $S=1$) отримуються відносно прийнятні робочі характеристики. Суттєвими недоліками відомих спеціальних конструкцій роторів [38] являються значні металоємність і вартість виробництва механічною обробкою точених фігурних екрануючих накладок і фрезерованих зірочок. Крім того, з метою виключення суттєвого погіршення робочих характеристик рекомендується часткове екранування кілець (наприклад, відповідно до зображення фрагменту ротора на виносці кривих 1 на рис. 14.10).

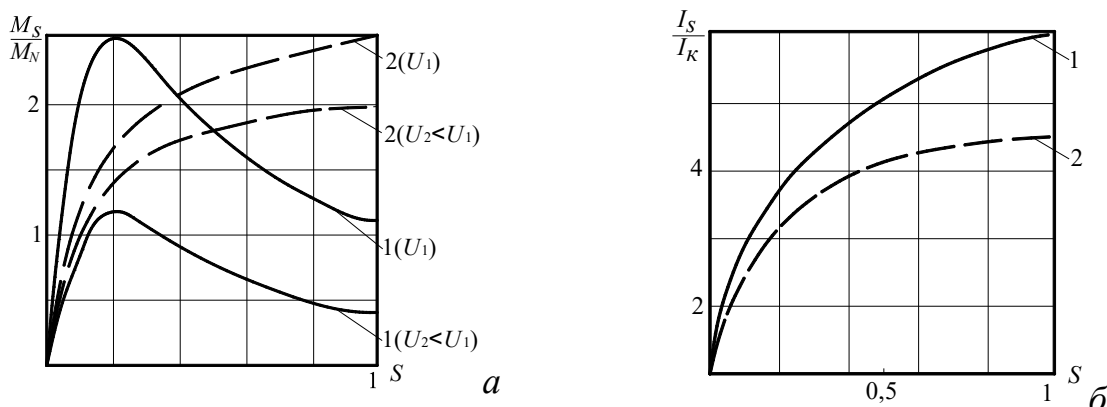


Рис. 14.9. Електромеханічні характеристики варіантів асинхронного двигуна: залежності моменту (а); залежності струму статора.

В [30, 36] запропоновані варіанти конструкції ротора з покращеними пуско-регульовальними властивостями. Кільця литої алюмінієвої обмотки між стрижнями охоплені магнітними шунтами у вигляді зігнутих смуг феромагнітної сталі (зображення фрагменту ротора на виносці кривих 2, рис. 14.10).

Для оцінки впливу часткового екранування кілець використаний АД 3ДМШ 90SB2 (1,1 кВт, 50 Гц, 2850 об/хв) з співвідношенням чисел пазів статора і ротора 24/30. В роторі були зрізані вентиляційні лопатки і балансирувальні виступи короткозамикаючих кілець. В кожному кільці перетином $\sim 13 \times 14$ мм виконані виїмки алюмінію. Виїмки являють собою просвердлені рівномірно супротив зубців 15 отворів діаметром 3,5 мм і фрезерування відповідно отворами 15 канавок глибиною 2,5 мм. В отвори були вставлені і вигнуті по канавкам з охопленням кілець внахлестку смуги сталі 3-СП товщиною 2 мм. В результаті були утворені екрануючі контури у відповідності з фрагментом ротора на виносці кривих 2 (рис. 14.10). Крім вказаного варіанту ротора названий АД випробуваний з феромагнітними циліндричними накладками кілець та без феромагнітних екрануючих елементів.

Результатами дослідів короткого замикання "модифікованого" 3ДМШ 90SB2 представлені в табл. 14.1, а дослідні механічні характеристики

наведено на рис. 14.10 [36]. В графі "тип ротора" табл. 14.1 цифрі 1 відповідає ротор з підвищеним відносно вихідного стану активним опором (виїмки в кільцях) без екрануючих елементів. Цифрі 2 відповідає ротор з екрануючими циліндричними накладками, цифрі 3 – ротор з екрануючими вставками – шунтами.

Результати випробувань показали переваги ротора з вставками – шунтами, що охоплюють кільця. При регулюванні напруги досягається зниження ковзання зони S_H і незначні не лінійності механічних характеристик екскаваторної форми, що сприяє виконанню умови постійності співвідношення (14.12). Також досягаються підвищені пускові моменти при обмежені пускових струмів.

Аналогічна [36] конструкція представлена в [37] і названа "ною", де вказано, що активний опор ротора при пуску зростає в 11 разів, а індуктивний опір знижується в 2 рази і АД з таким ротором поза конкуренцією відносно машин з кратністю пускових струмів 7-10.

Таблиця 14.1. Результатами дослідів короткого замикання асинхронного двигуна з варіантами короткозамкненого ротора

Напруга фази, В	Тип ротора	Струм, А	Споживана потужність, кВт	Кратність пускового момента, о.е.
140	1	7,50	2,40	0,850
	2	7,10	2,25	0,750
	3	7,30	2,28	0,875
180	1	10,25	4,65	1,750
	2	9,20	3,75	1,400
	3	9,50	4,10	1,800
220	1	12,75	6,9	2,275
	2	10,20	5,10	1,900
	3	11,10	5,80	2,600

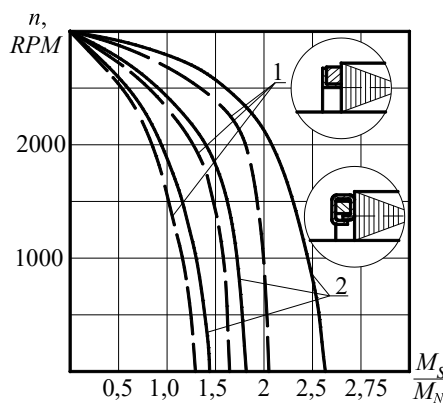


Рис. 14.9. Механічні характеристики модифікованого асинхронного двигуна ЗДМШ 90SB2 з варіантами короткозамкненого ротора

Покращення пуско-регулювальних властивостей АД з різновидами ротора [30, 36] обумовлено тим, що при $S = 1$ пусковий струм кілець $I_{кр}$ підсилює концентрований в шунтах потік $\Phi_{ск}$ лобового розсіяння (рис. 14.11, *a*). Це обумовлює суттєву зміну параметрів екранованих частин кілець і формування "екскаваторної" механічної характеристики. В стані функціонування АД на режимах навантаження досягається зниження статизму і нелінійності механічних характеристик відносно аналогів [38], що обумовлено частковим переривчастим екрануванням кілець.

Виконання ротора з шунтами-вставками [36] менш металоємно відносно конструкцій [38], однак не відрізняється технологічністю. Задача удосконалення АД з феромагнітними елементами в колі ротора може бути вирішена на основі установки на вал осьових елементів, що уявляють відрізки труб з відігнутими ділянками між прорізами на торцях [30]. "Економічне" екранування короткозамикаючих кілець досягається подвійним вигином за меншою мірою частини виступів з охопленням ділянок відливаємих кілець (рис. 14.11, *б, в*). Можлива установка двох коаксіальних трубчастих елементів – хвостовиків, що відрізняються від конструкції (рис. 14.7, *в*) різними кутами вигину виступів.

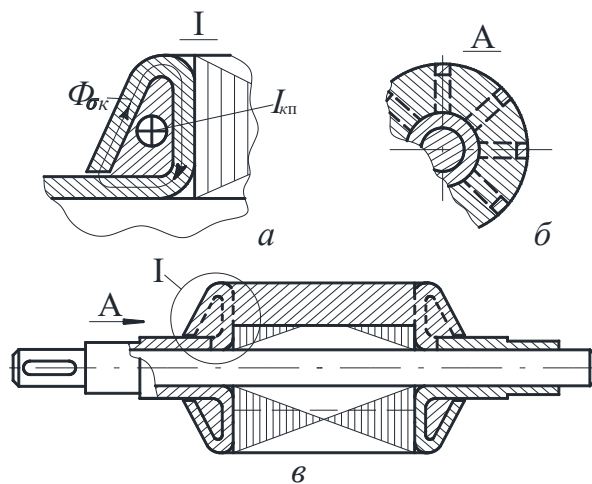


Рис. 14.11. Схеми фрагментів поздовжнього (*a*) і поперечного (*б*) розріз та конструкції ротора (*в*) з частковим екрануванням короткозамикаючих кілець вигнутими виступами опорних хвостовиків

Технологічні можливості обмежують потужності АД з литими обмотками. Якщо радіальні виступи вигину ділянок між прорізами на кінці сталеві труби з'єднати електрично з мідними стрижнями, можливо отримати технологічний і менш металоємний короткозамикаючий феромагнітний елемент (рис. 14.12) – еквівалент "зірочки" для АД великої потужності.

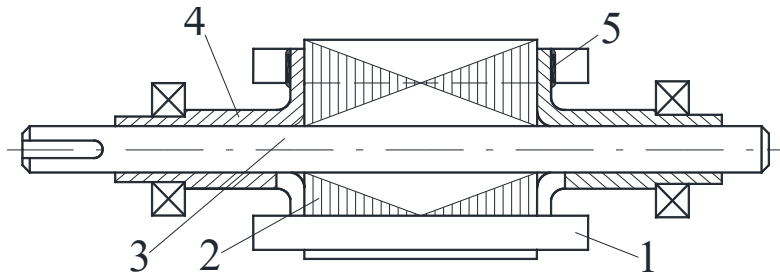


Рис.14.12. Схема ротора з феромагнітними короткозамикаючими елементами:
1 – стрижень; 2 – магнітопровід; 3 – вал; 4 – хвостовик;
5 – зварной шов.

15. КОНСТРУКТИВНО-СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РІЗНОВИДІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

15.1. Фактор інерційності ротора двигуна рухомого об'єкту

Як вже згадувалось у вступі, у ХХІ столітті поширюється розширення номенклатури і застосування спеціальних електромашин [33], в тому числі з аксіальним зазором (однороторних і двохроторних ТАД і двохстаторних АД з дисковим проміжковим ротором), а також з циліндричним зазором і зовнішнім ротором (АДЗР). Такі АД відрізняються рознесеним і консольним виконанням активно – конструктивних частин та конструктивною пристосованістю до ряду механізмів і застосовуються на транспорті в мотор-колесах і сервомеханізмах, приладах, насосно-вентиляторному обладнанні та інших технічних об'єктах. Приклади схем і конструкцій таких об'єктів наведено на рис. 15.1 – рис. 15.4 [39-46].

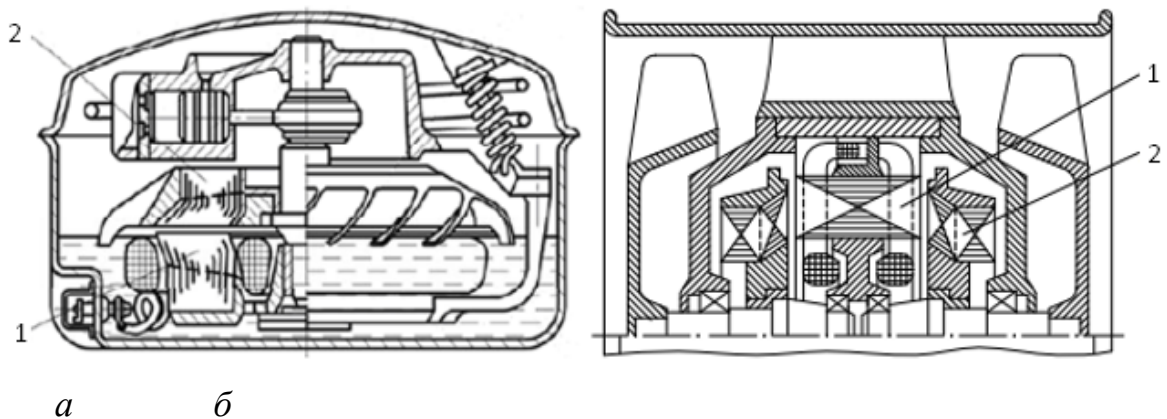


Рис. 15.1. Приклади конструктивних схем механізмів герметичного компресора і осьового вентилятора з вбудованим однороторним (а) і двороторним зустрічного обертання (б) торцевими асинхронними двигунами: 1 – статор; 2 – ротор.

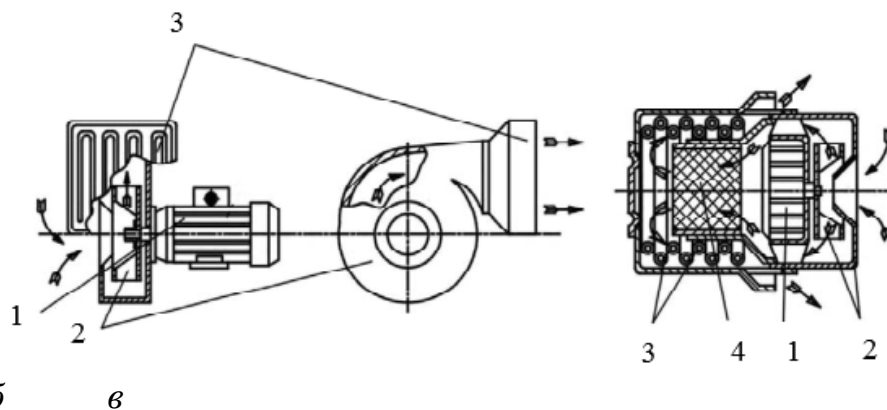


Рис. 15.2. Схеми агрегатів обробки дихально-газової суміші з відцентровим вентилятором, циліндричним електродвигуном і плоским теплообмінником (а – головний вид; б – вид збоку) і з вбудованим фільтром і аксіальним електродвигуном (в): 1 – двигун; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – теплообмінник; 4 – комплект фільтрів очищення.

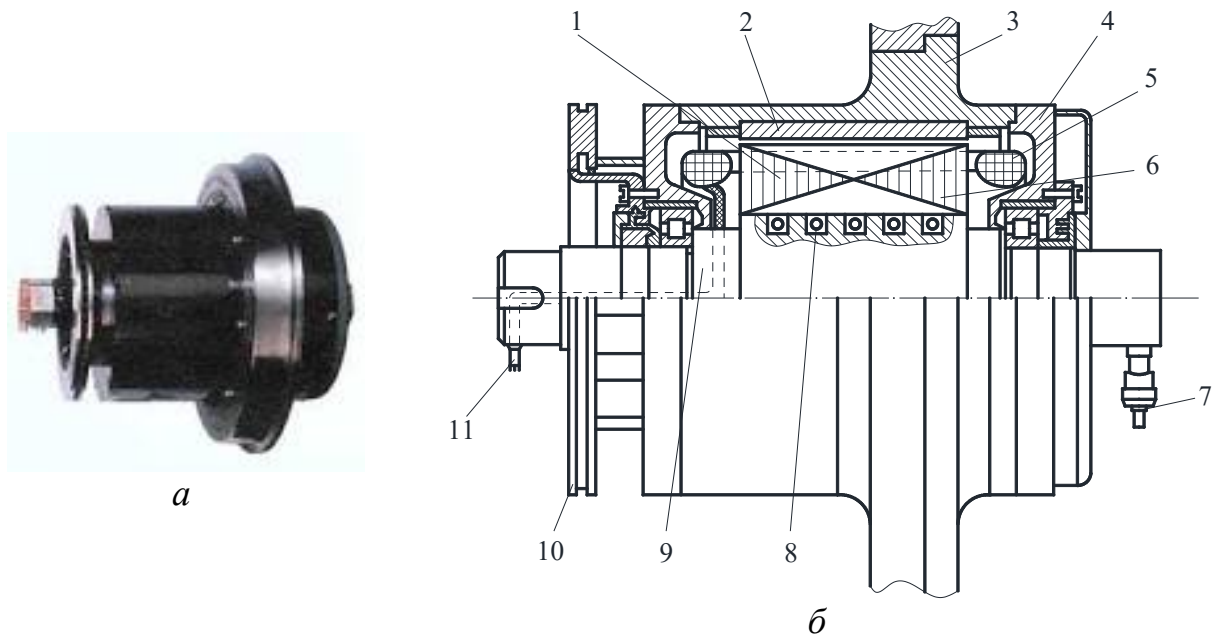


Рис. 15.3. Загальний вид (а) і конструктивна схема (б) асинхронного двигуна з зовнішнім ротором для приводу колес електротранспорту:

- 1 – статор; 2 – ротор; 3 – циліндр-корпус маточини;
 4 – обертовий підшипниковий щіт; 5 – обмотка статора; 6 – магнітопровід статора; 7 – штуцер системи охолодження; 8 – спіраль охолодження;
 9 – вісь; 10 – гальмівний диск; 11 – електричний роз'єм.

Застосування ТАД і АДЗР на транспорті зменшує габарити і масу різних транспортних агрегатів та механізмів, що обумовлено будовою названих спеціальних АД, а також збільшує "життєвий простір" і потенційно створює можливість зниження металоємкості транспортних пристроїв, зокрема електровентильаторів (рис. 15.4).

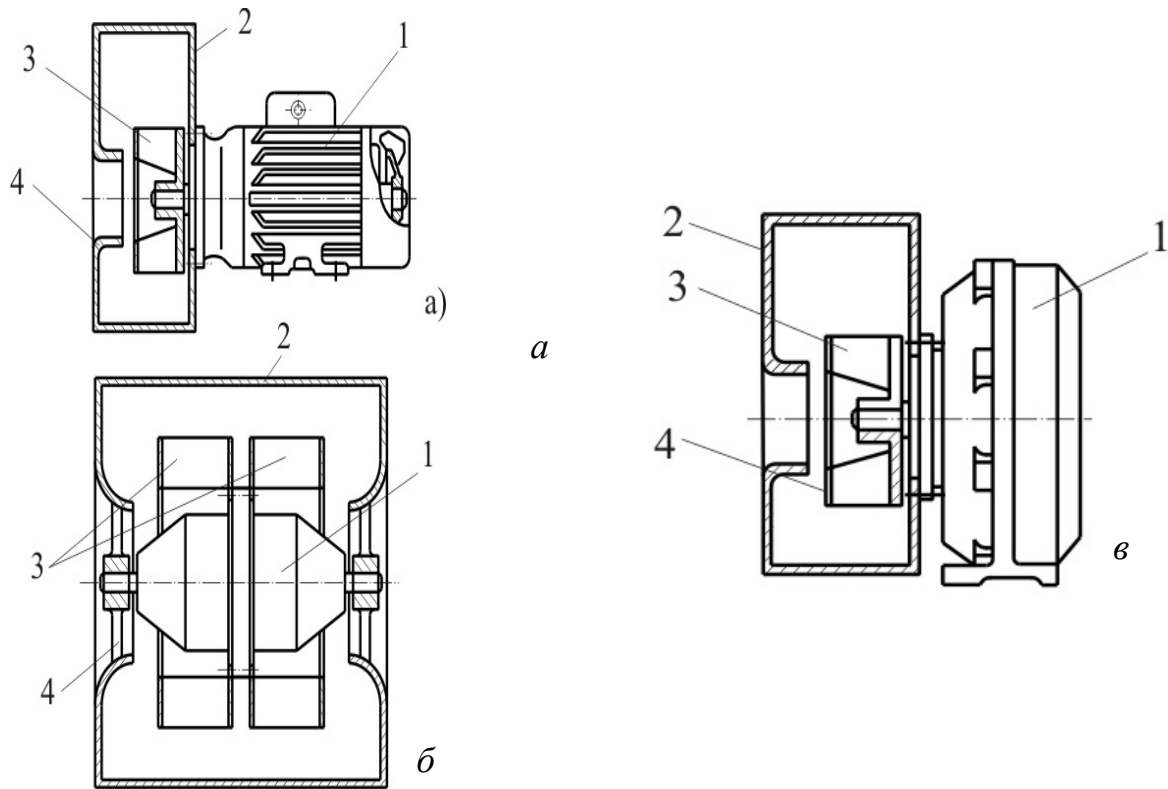


Рис. 15.4. Різновиди відцентрових електроventиляторів, що відрізняються застосуванням двигунів з циліндричними активними поверхнями при внутрішньому (а) і зовнішньому (б) розташуванні роторів та плоскими активними поверхнями (в)

Конструктивну особливість ТАД і АДЗР уявляє велика інерційність ротора. Недоліком застосування таких двигунів в транспортних мотор-колесах, сервоприводах, вентиляторах та інших пристроях, є підвищений момент інерції ротора. При хитавиці і маневруванні транспортних засобів елементи будови механізмів з обертовими вузлами отримують додаткове гіроскопічне навантаження, величина якого визначається виразом [48]

$$P_{\Gamma} = M_{\Gamma} / l_{on} = J_R \Omega_M \omega_R / l_{on}, \quad (15.1)$$

де M_{Γ} – гіроскопічний момент, що намагається повернути ротор навколо вісі BB' (рис. 15.5) таким чином, щоб вісь AA' найкоротшим шляхом сумістилась з віссю CC' примусового переміщення двигуна (електромеханізму); l_{on} – відстань між опорними підшипниками ротора; J_R – момент інерції ротора; Ω_M – кутова частота переміщення (повертання) в просторі механізму і ротора; ω_R – частота обертання ротора.

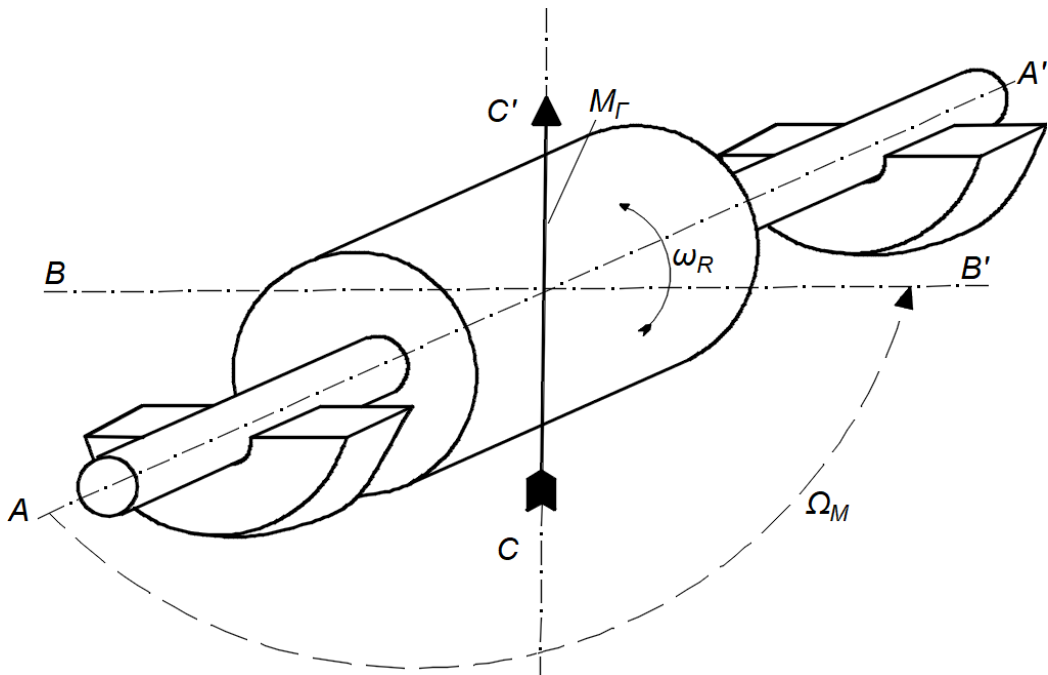


Рис. 15.5. Дія гіроскопічного моменту на ротаційний механізм

Момент інерції ротора визначається радіусами інерції R_{iR} і масами m_{iR} активних і конструктивних елементів ротора

$$J_R = \sum_{i=1}^{i=K} m_{iR} R_{iR}^2. \quad (15.2)$$

В зв'язку з підвищеними масами і діаметрами елементів торцевих і зовнішніх роторів аксіальних і обернених АД навантаження, що сприймають конструктивні елементи вказаних двигунів спеціального, зокрема морського використання при хитавиці і маневруванні плаваючих засобів, є значно вищими, ніж у елементів класичних двигунів з внутрішнім ротором. Вказаний недолік обумовлює необхідність підсилення конструктивної частини, тобто підвищення металомісткості і маси спеціальних транспортних АД. В зв'язку з цим фактором удосконалення транспортних електроагрегатів є забезпечення зниження P_Γ , яке згідно (15.1) і (15.2) досягається зменшенням числа і середніх радіусів та мас елементів ротора. Зменшення можливо збільшенням індукції в ярмі, а також щільності струму в стрижнях і короткозамикаючих кільцях обмотки при зменшенні висоти зубців магнітопроводу ротора. Однак такі заходи збільшують намагнічувальний струм і погіршують пускові і енергетичні характеристики (глибокі пази і подвійна клітка збільшують в обернених та торцевих АД відповідно радіальний і аксіальний розміри та підвищують J_R). Тому є актуальними аналіз і конструктивні перетворення активних і конструктивних частин різновидів спеціальних АД, що надає можливість вирішення задач підвищення їх ККД, надійності і зниження металоемності.

15.2. Зниження моментів інерції і удосконалення двигунів з аксіальним зазором та зовнішнім ротором

Перевагами ТАД і АДЗР щодо електромагнітно еквівалентних АД єдиних серій традиційної будови є менша металоємність і більш великі частоти власних коливань статора, що позитивно впливає на ВАХ. Однак недоліками є погіршення використання активного об'єму і завищена металоємність відповідно торцевого і зовнішнього роторів. За питомою металоємністю елементів і вартістю ЕМС реальні ТАД з $2p \leq 6$ і АДЗР з $2p \leq 4$ поступаються «традиційним» АД [49, 51]. Рішення задач зниження J_R , підвищення технічного рівня і конкурентоспроможності ТАД і АДЗР можливо структурними перетвореннями магнітопроводів. Доцільна заміна спірально-циліндричної структури шарів ЕТС витих аксталейних магнітопроводів (рис. 13.5, а, б рис. 15.6, а) на конусно-циліндричну структуру (рис. 15.6, б-г) відповідно до конструкцій і способів виготовлення [29, 51-52].

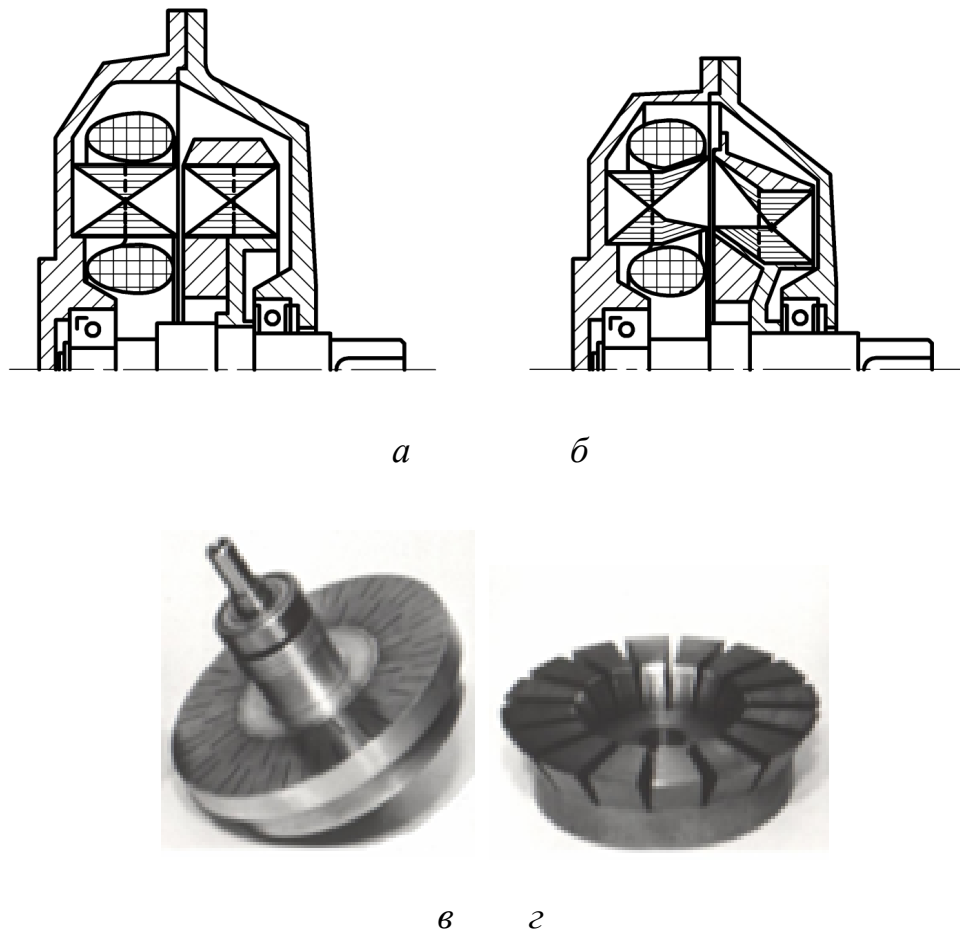


Рис. 15.6. Варіанти конструктивної схеми торцевого асинхронного двигуна з традиційними спірально-циліндричними (а) і конусно-циліндричними магнітопроводами статора і ротора; короткозамкнутий ротор (в) і магнітопровід (г) конусно-циліндричної структури

Крім зниження серединних діаметрів і мас елементів магнітопроводу знижуються довжина струмових контурів і об'єм лобових частин обмоток. Таким чином зниження маси і металоємності ТАД (рис. 15.6, б) відносно аналога (рис. 15.6, а) досягається з деяким покращенням енергетичних показників.

Також удосконалення АДЗР невеликої потужності можливо використанням замість традиційної конструкції ротора з магнітопроводом з плоских шарів ЕТС (рис. 15.7, а) будови ротора з секціонованим магнітопроводом та просторовою конусно-площинною структурою шарів ЕТС (рис. 15.7, б) []. Відносно аналога з окремими підшипниковими щітами і фланцем кріплення механізму на серединні зовнішньої поверхні ротора (рис. 15.7, а), в роторі (рис. 15.7, б) підшипникові щіти і фланець кріплення відливаються сумісно з відливкою стрижнів і кілець окремих короткозамкнених обмоток напівроторів. Досягається зниження металоємності і трудоемності виробництва, підвищуються рівномірність робочого зазору, надійність і енергетичні показники, покращуються ВАХ АДЗР (рис. 15.7, б) відносно аналогів з загальноприйнятою будовою магнітопроводів [].

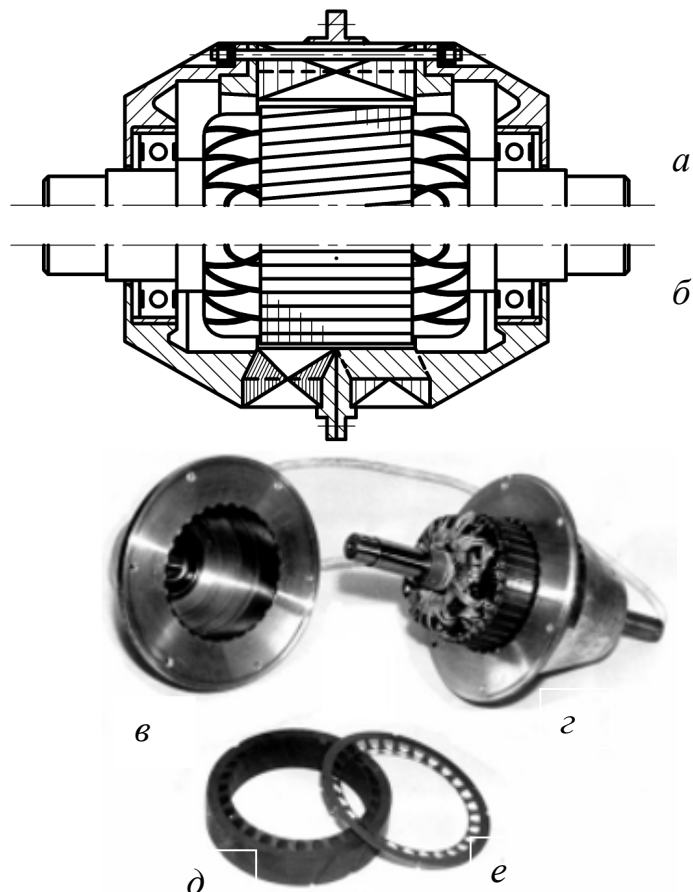


Рис. 15.7. Варіанти конструктивних схем асинхронного двигуна з зовнішнім ротором та традиційним (а) і конусно-площинним (б) магнітопроводами ротора; зразок такого двигуна з секціонованим ротором (в, z) і конусно-площинним магнітопроводом (д, e)

Іншим технічним рішенням зниження металоємності і J_R АДЗР є зміна конфігурації шліцевої зони паза при зменшенні висоти зубця і збереженні площі перерізу стрижня обмотки ротора. Як відомо і вже згадувалось, пускові властивості АД при умові збереження площі перерізу стрижня обмотки ротора покращується при збільшенні висоти зубця, що обумовлено підвищенням інтенсивності пазового розсіяння ротора при пуску. Зовнішнє положення ротора викликає, в зв'язку з зростанням діаметру розташування пазів, збільшення розміру зубцевого кроку і зниження магнітної індукції зубців відносно традиційного аналогу. При глибоких пазах (збільшеної h_{zR}) в оберненому виконанні АД (рис 15.8, а) додатково зростає зовнішній діаметр D_R , відповідно зростають металоємність і електромагнітне недовикористання зубців ротора та його маси і інерційність.

Зміна традиційної симетричної конфігурації шліцевої зони (рис 15.8, а) на несиметричну зі зсувом пазового відкриття до стінки поверхні зубця при збільшенні ширини паза (рис 15.8, б), викликає в момент пуску насичення зубців на ширині b'_{zR} і проходження частини магнітного потоку крізь шліци і переріз стрижня з витисканням струму в зонах I, II (рис 15.8, в). Це забезпечує покращення пускових характеристик. При заданій висоті ярма h_{aR} досягається зменшення зовнішнього діаметру D'_R , металоємності і моменту інерції ротора (рис. 15.8, б):

$$h'_{zR} < h_{zR}; b'_{zR} < b_{zR}; D'_R < D_R; Y_R < Y'_R.$$

Технічні рішення (рис. 15.6, б, рис. 15.7, б-е, рис. 15.8, б) також знижують середні діаметри короткозамикаючих кілець і металоємність та втрат в короткозамкнених обмотках, що підвищує ККД.

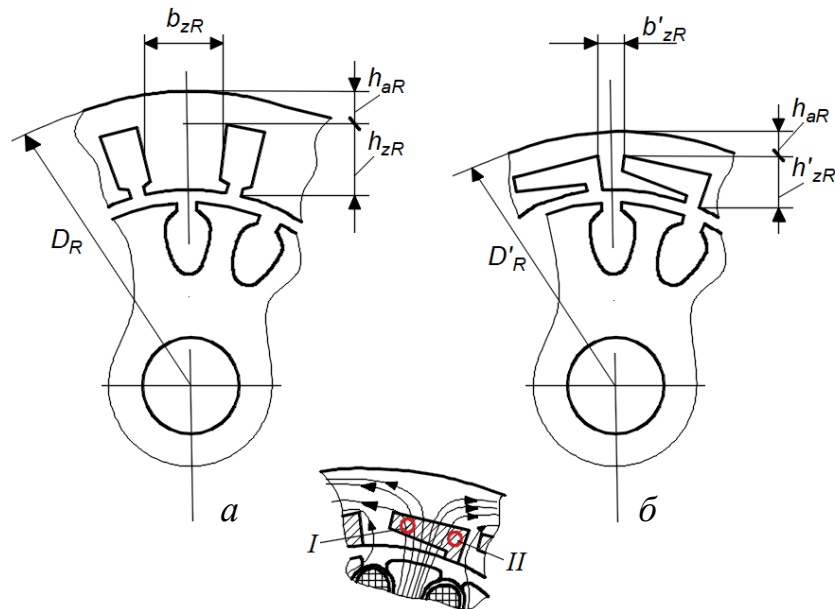


Рис. 15.8. Фрагменти зубц⁶-пазових структур варіантів магнітопроводу ротора оберненого асинхронного двигуна при традиційній (а) і асиметричній (б) конфігураціях шліцевих зон та умовний розподіл силових ліній магнітного поля при пуску (в)

15.3. Вплив розташування ротора і конфігурації активної поверхні на використання конструктивного об'єму і надійність

Для можливості раціонального конструювання спеціальних АД в залежності від загальних і специфічних вимог є необхідним аналіз впливу конструктивної схеми активної частини на техніко-економічні показники.

Конструктивна схема електромашини визначається формою робочого зазору, взаємним розташуванням і числом активних та конструктивних елементів статора і ротора. Одними з головних факторів, що визначають надійність машини, є механічна і теплова стабільність робочого зазору та ВАХ. Якісний аналіз залежності ВАХ АД від схеми і структури відповідно конструктивної і активної частин може бути виконаний на основі визначення впливу розташування ротора і форми активної поверхні на рівномірність робочого зазору і частоту власних коливань статора.

Нерівномірність, тобто статичний і динамічний ексцентриситети робочого зазору δ (рис. 15.9) АД є одним з найгірше впливаючих на тепловий стан, ВАХ і в цілому на надійність факторів і повинна бути зведена до раціонального мінімуму усіма можливими конструктивними і технологічними прийомами. Причиною виникнення ексцентриситету зазору є функціональні і технологічні чинники. Функціональні чинники викликають вигін вісі і деформацію циліндричної форми валу та періодичні деформації активних поверхонь під дією змінних електромагнітних і механічних сил та теплових навантажень. Технологічними і експлуатаційними (виробітка ресурсу працездатності) причинами ексцентриситету є зсув вісей замкових і посадочних поверхонь підшипникових щитів, втулок та валу відносно геометричної вісі статора, люфт підшипників та технологічні допуски і відхилення від ідеальних розмірів.

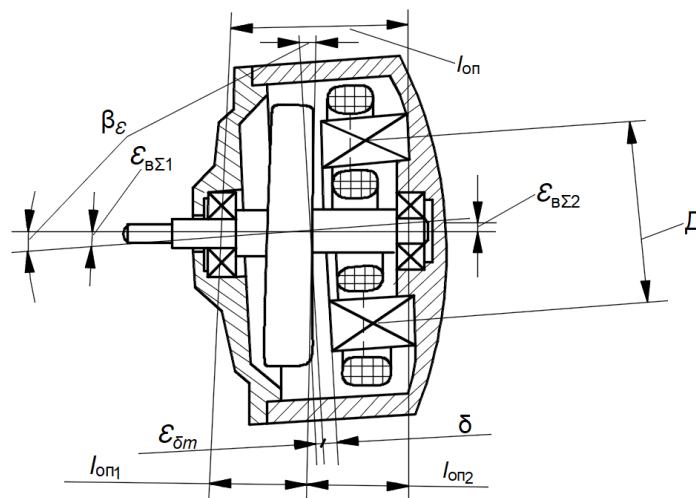


Рис. 15.9. Аксіальний ексцентриситет робочого зазору торцевого асинхронного двигуна.

Величина відхилення зазору від номіналу або величина амплітуди коливань зазору при відповідно статичному і динамічному ексцентриситетах на середньому діаметрі D активної поверхні ТАД (рис.15.9) визначається:

$$\varepsilon_{\delta m} = 0,5D \operatorname{tg} \beta_{\varepsilon}, \quad (15.3)$$

де β_{ε} – кут ексцентриситету, що залежить від підсумкових радіальних ексцентриситетів $\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1}$ і $\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 2}$ вісі валу в площинах центрів підшипникових кульок

$$\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon} = \varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1} / l_{on1} = \varepsilon_{\varepsilon\Sigma 2} / l_{on2}, \quad (15.4)$$

де $l_{on1(2)}$ – осьова відстань від площини активної поверхні ротора до площини центрів кульок підшипників,

$$l_{on1} + l_{on2} = l_{on} \quad (15.5)$$

З врахуванням (15.4), відстань (15.5), кут β_{ε} і відхилення зазору (15.3) можливо уявити в виді:

$$l_{on} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1}}{\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon}} + \frac{\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 2}}{\operatorname{tg} \beta_{\varepsilon}};$$

$$\beta_{\varepsilon} = \operatorname{arctg} (\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1} + \varepsilon_{\varepsilon\Sigma 2}) / l_{on}; \quad (15.6)$$

$$\varepsilon_{\delta m} = 0,5D (\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1} + \varepsilon_{\varepsilon\Sigma 2}) / l_{on}. \quad (15.7)$$

Максимально можливий підсумковий радіальний ексцентриситет вісі валу в площинах центрів кульок підшипників можливо визначати, як підсумок основних погрішностей виготовлення

$$\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1(2)} = \varepsilon_{\varepsilon l1(2)} + \varepsilon_{\varepsilon n1(2)} + \varepsilon_{\varepsilon ms1(2)} + \varepsilon_{\varepsilon mR1(2)}, \quad (15.8)$$

де $\varepsilon_{\varepsilon l1(2)}$ і $\varepsilon_{\varepsilon n1(2)}$ складові $\varepsilon_{\varepsilon\Sigma 1(2)}$, що викликані люфтами підшипників і погрішностями неспіввісності їх посадкових місць; $\varepsilon_{\varepsilon ms1(2)}$ і $\varepsilon_{\varepsilon mR1(2)}$ – складові, що обумовлені торцевим механічним биттям погрішностей механічної обробки і деформаціями від електромагнітних сил та теплових викривлень активних поверхонь статора і ротора.

Неточності обробки і центрування посадочних місць залежать від якості технологій виготовлення активно-конструктивних елементів та складання машини. Величина $\varepsilon_{\varepsilon l1(2)}$ залежить від класу точності підшипника, його діаметру, якості монтажу і розташування. Відповідно до рис. 15.9 з подоби трикутників ΔABC , $\Delta A'B'C'$ і $\Delta A'B''C''$ впливає залежність відхилень зазору $\varepsilon_{\delta m}$, $\varepsilon_{\delta m}''$ від діаметрів D , D' активної поверхні статора і розташування центрів кульок підшипників []:

$$\frac{\varepsilon_{\delta m}}{D} = \frac{\varepsilon_{\delta m}''}{D'} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon l1}}{D_{un}};$$

$$\varepsilon_{\delta m}^{(')} = \varepsilon_{\varepsilon l1} D' / D_{un}, \quad (15.9)$$

де $\varepsilon_{\varepsilon l1}$ і D_{un} – аксіальна складова люфта і діаметр центрів кульок підшипника.

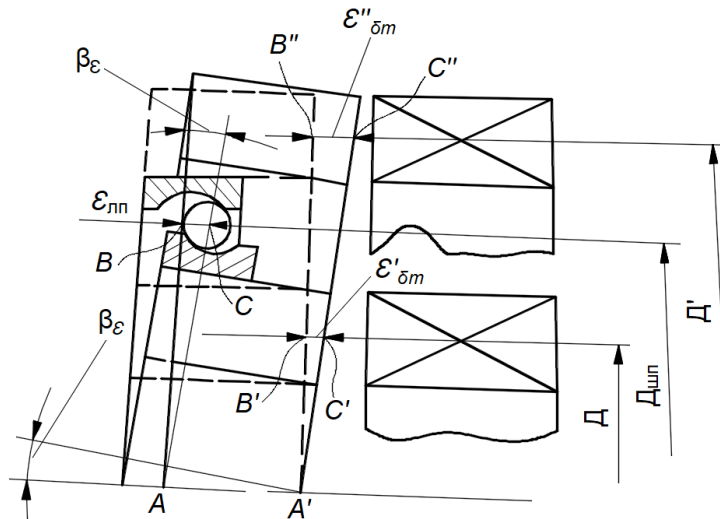


Рис. 15.10. Вплив люфту та розташування підшипника на ексцентриситет робочого зазору торцевого асинхронного двигуна

В електромашині з циліндричним зазором, зокрема оберненому АД (рис. 15.11), величина ексцентриситету вісі валу або робочого зазору $\epsilon_{\delta e}$, відносно положення вісі в середині довжини статора не залежить від діаметру активної поверхні і визначається тільки погрішностями, які обумовлюють $\epsilon_{\delta \Sigma 1}$ і $\epsilon_{\delta \Sigma 2}$. Амплітуда коливань циліндричного зазору $\epsilon_{\delta e}$ зростає з збільшенням β_{ϵ} і її максимум досягається на довжині $l_{\delta}/2$ від центру статора, тобто на краях магнітопроводу, що є причиною підсилення нагріву ділянок обмотки статора в зоні торців магнітопроводу. З (рис. 15.4), випливає, що величина β_{ϵ} для АД з зовнішнім або внутрішнім ротором визначається співвідношенням (15.6).

Вирази (15.3-15.9) показують можливість зниження ексцентриситету робочого зазору, а також, що нерівномірність зазору суттєво залежить від конструктивної частини АД. У відповідності з (15.8) зменшення числа підшипників сприяє зниженню β_{ϵ} , однак з (15.9) випливає, що в випадку одноопорної установки ротора на валу або ротора з валом в корпусі при $D_{un} \ll D'$ (рис. 15.9) аксіальна електромашина є непрацездатною, тому що величина ексцентриситету зазору $\epsilon_{\delta m}$ може бути співвимірною з величиною номінального зазору δ . Виключенням може бути одноопорна конструкція торцевого АД з ротором, який вбудований в внутрішню обмотку підшипника великого діаметру [].

$$D_{un} \gg D; \epsilon'_{\delta m} \ll \epsilon_{lm}.$$

Загальний вид зразка ТАД з одноопорним ротором, що встановлений у внутрішню обійму підшипника та який призначений для приводу вентилятора пристрою підігріву та очистки повітря (рис. 15.2, в) подано на рис. 15.12.

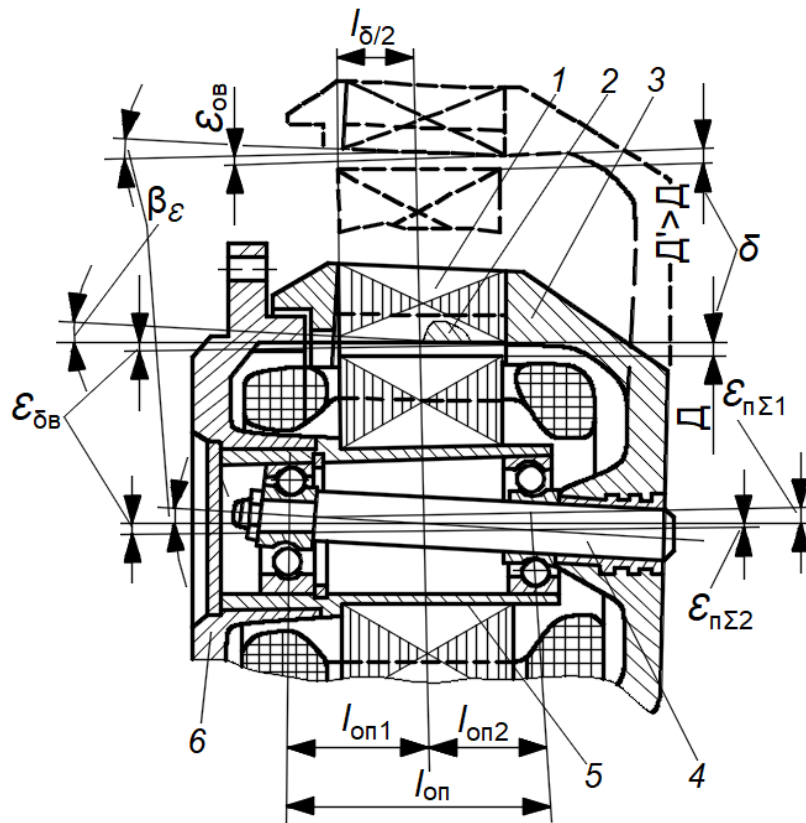


Рис. 15.11. Конструктивна схема та ексцентриситет зазору АДВР із чешевидним ротором консольної установки: 1 – ротор; 2 – короткозамкнена клітина; 3 – корпус ротора; 4 – вал; 5 – маточина; 6 – корпус статора.

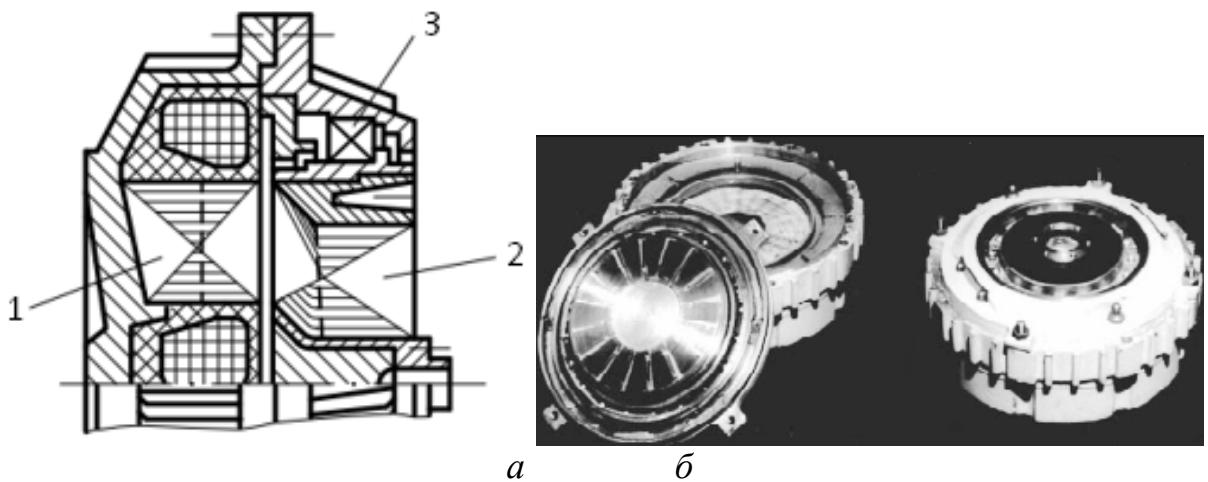


Рис. 15.12. Особливості конструкції (а) і зразок (б) дво полюсного торцевого асинхронного двигуна потужністю 0,15 кВт з одноопорною установкою ротора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – підшипник.

З виразів (15.1) і (15.6), (15.7) також впливає, що збільшення довжини $l_{\text{оп}}$ рознесення підшипників підвищує надійність АД при умові достатньої теплової і механічної стабільності вісі опорного елемента (валу, маточини).

Динамічні коливання статора АД з циліндричним зазором під дією радіальних віброобурюючих сил відбуваються в площинах елементарних шарів сталі [] з частотою власних коливань ярма, що визначається

$$\omega_{as} = k_r \frac{h_{as}}{R_{as}^2 \sqrt{m_{as} + m_{zs} + m_{ws}/m_{as}}}, \quad (15.10)$$

де k_r – коефіцієнт що залежить, у відповідності до числа пар полюсів, від порядку коливань r []; h_{as} і R_{as} – висота і середній радіус ярма, зубців і обмотки статора; m_{zs} і m_{ws} – відповідно маса ярма, зубців і обмотки статора.

В двигунах з внутрішнім ротором малої і середньої потужності зі зниженням частоти (15.10) підвищуються рівні магнітних вібрацій і шумів [], при чому зростання R_{as} збільшує число вібронебезпечних частот (можливість резонансів).

Частота (15.10) при дії вібраційних магнітних сил порядку $r \geq 2$ також визначається виразом []

$$\omega_{as} = \frac{h_{as}}{R_{as}^2} \frac{r(r^2-1)}{\sqrt{r^2+1}} \sqrt{\frac{E_a}{12\rho_a}}, \quad (15.11)$$

де E_a – модуль пружності поперечного перерізу ярма статора; ρ_a – об'ємна щільність ярма магнітопроводу з врахуванням приєднаних мас зубців і обмотки.

При гіпотетичній ідентичності діаметрів D активних поверхонь при середніх радіусах $r_{ask}, r_{asz}, R_{asm}$ статорів АД відповідно з класичним внутрішнім, зовнішнім та дисково-торцевим роторами, у випадку електромагнітної еквівалентності можна визначити вказані радіуси:

$$R_{ask} = 0,5D + 2h_{zs} + 2h_{as}; \quad (15.12)$$

$$R_{asz} = 0,5D - 2h_{zs} - 2h_{as} - \delta; \quad (15.13)$$

$$R_{asm} = 0,5D. \quad (15.14)$$

У вказаному випадку (ідентичність D і складових (15.12) – (15.14)) з (15.10) – (15.14)) впливає, що частоти власних коливань $\omega_{ask}, \omega_{asz}$ і ω_{asm} АД з внутрішнім, зовнішнім та торцевим (жисковим) ротором є мінімальними в обернених АД, що надає можливість забезпечення кращих ВАХ. Однак в реальних конструкціях діаметри D наближені лише при числі полюсів $2p \geq 6$, а при $2p < 6$ діаметри статорів АД з зовнішнім ротором та торцевих АД збільшені відносно класичних машин, що викликано складнощами розміщення лобових частин і виконання внутрішніх ділянок зубцево-пазових зон магнітопроводів статорів ТАД і АДЗР [].

З визначених вище особливостей рознесеної, з установкою ротора на нерухомій вісі в обертових підшипникових щитах (рис. 15.7, а-г) і консольної з обертовим валом (рис. 15.11) конструктивних схем впливає, що мінімальним числом конструктивних елементів і максимальним рознесенням підшипників та

відповідно підвищеною віброударостійкістю і надійністю та покращеними ВАХ відрізняються ТАД і АДЗР рознесеної будови (рис. 15.7, *a, б*, рис. 15.9). При цьому суттєве спрощення будови, покращення ВАХ і підвищення надійності АДЗР забезпечує рознесена конструкція [], що містить два практично однакових напівротора, в яких підшипникові щити і фланці кріплення приводу відливаються заодно з короткозамкненою обмоткою (рис. 15.7, *б, в, з*).

Рівномірність робочого зазору загальноприйнятої класичної (традиційної) конструкції АД з внутрішнім ротором (рис. 15.13, *a*), крім класу точності підшипників, залежить від точності обробки і коаксіальності посадкових поверхонь *A, B* підшипникових щитів, посадкових поверхонь станини *C, D* і коаксіальності поверхонь зовнішнього і внутрішнього діаметрів статора, а також коаксіальності зовнішньої поверхні ротора і поверхонь *E* галтелей валу.

З точки зору трудомісткості виготовлення і металоємності конструктивних елементів, а також можливості забезпечення рівномірності робочого зазору конструкція (рис. 15.13, *a*), значно поступається АД з зовнішнім ротором безкорпусного використання (рис. 15.7, *б-з*).

Відомо, що в заданому квалітеті (класі точності) механічної обробки технологічні відхилення посадкових поверхонь вузлів і деталей залежать від їх габаритів і розмірів. Тому удосконалення закритого АД з внутрішнім ротором можливо на основі заміни корпусної станини з підшипниковими щитами (рис. 15.13, *a*) двома ідентичними (в заготовках) напівкорпусами з замковими поверхнями *F, G*, що обробляються з однієї установки.

Посадкова поверхня *F* дорівнює діаметру статора. Ротор установлюється і закріплюється в корпусі за допомогою підшипникових маточин (рис. 15.13, *б*).

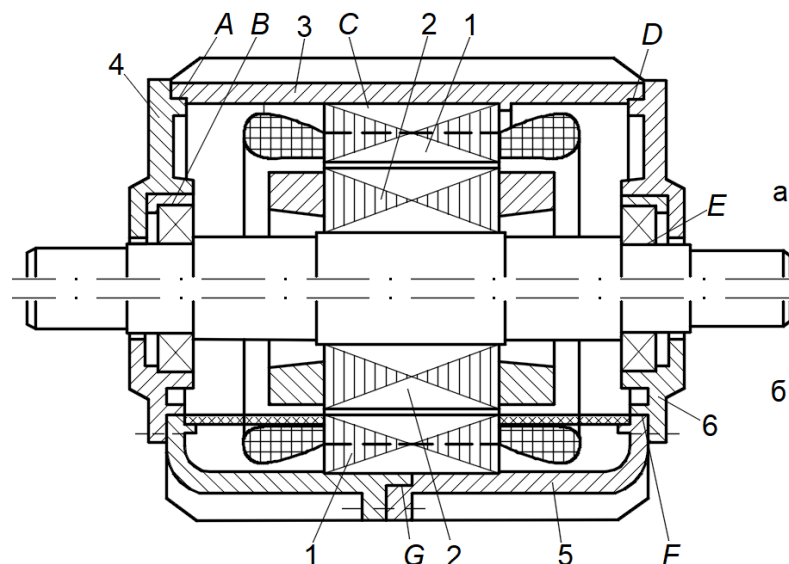


Рис. 15.13. Варіанти конструктивних схем асинхронного двигуна з установкою статора і ротора в підшипникових щитах (*a*) та в двох напівкорпусах з підшипниковими маточинами (*б*): 1 – статор; 2 – ротор; 3 – станина; 4 – щит; 5 – напівкорпус; 6 – маточина.

15.4. Технічні рішення двигунів біротативного обертання

Серед низки ТО технологічного і транспортно-пересувного призначень відомі механізми з тандемними біротативними вихідними виконавчими або проміжковими конструктивними ланками. Прикладами таких механізмів є контрроторні гребні рушії і осьові насоси та вентилятори []. Біротативним обертанням механізмів з подвійними робочими органами, наприклад гвинтами гребних рушіїв і лопатевими колесами осьових насосів та вентиляторів досягається підвищення відповідно пропульсивного і аеродинамічного ККД на 10...15% []. При конструктивному забезпеченні ідентичності моментів інерції і співвісності обертання біротативних частин взаємно компенсуються гіроскопічні моменти та вилучається додаткове гіроскопічне навантаження (15.1) []. Таким чином крім підвищення ККД можливе зниження маси і металоємності та підвищення надійності біротативного механізму рухомого ТО.

Відомо трисекційне виконання осьового вентилятора з двома крайніми робочими колесами прямого обертання і середнім колесом зворотнього обертання подвійної продуктивності []. Для привода застосований АД з внутрішнім короткозамкненим ротором і обертовим статором, що обумовлює наявність щітково-контактної групи. Вказаний електромеханізм відрізняється зниженою масою і габаритами в зв'язку з електромеханічною редукцією частоти обертання. Це обумовлено тим, що наприклад, дво полюсній ЕМС АД відповідає частини, тобто обертових чотириполюсні кутові частоти зустрічного обертання зовнішньої та внутрішньої частин, тобто обертових статора і ротора. Також ККД дво полюсного АД є підвищеним відносно чотириполюсного.

Однак додатковим до контактів ковзання недоліком вказаного виконання електровентилятора є відмінність махових мас внутрішнього короткозамкненого ротора і зовнішнього обертового статора, що викликає специфіку і ускладнює протікання перехідних процесів. Більш раціональним є внутрішнє розташування статора при зовнішній двосекційній будові ротора з окремими секційними короткозамкненими обмотками [41]. Двосекційна будова зовнішньої частини спрощує кінематичну схему агрегату, а застосування алюмінієвої короткозамкненої обмотки додатково сприяє рішення задачі інерційного симетризування обертових мас ротора і статора з ваговою витковою мідною обмоткою (рис. 15.4 ...).

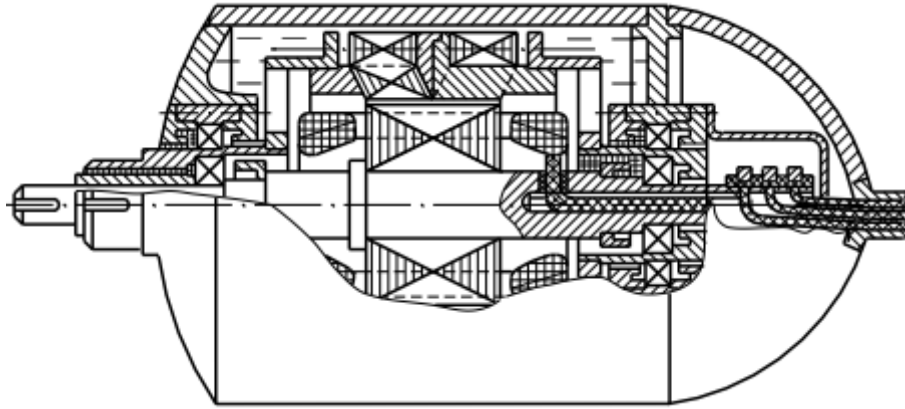


Рис. 15.14. Гребний контрроторний асинхронний двигун зануреного виконання

Двохроторне виконання ТАД з плоскопаралельними робочими зазорами (рис. 15.1, б) або двохсекційне – двухроторне виконання циліндричного АД обертової системи при застосуванні двохсекційного статора (рис. 15.) забезпечують контрроторне обертання безконтактної електромеханічної частини біротативного ТО [].

Для здійснення біротативності циліндричного АД (рис. 15.) роторна система містить два вали, що сполучені середніми вихідними частинами кульковим контактом додаткового підшипника з внутрішньою і зовнішньою обертовими обоймами, що встановлені відповідно в коаксіальних посадкових поверхнях внутрішніх вихідних частин валів [].

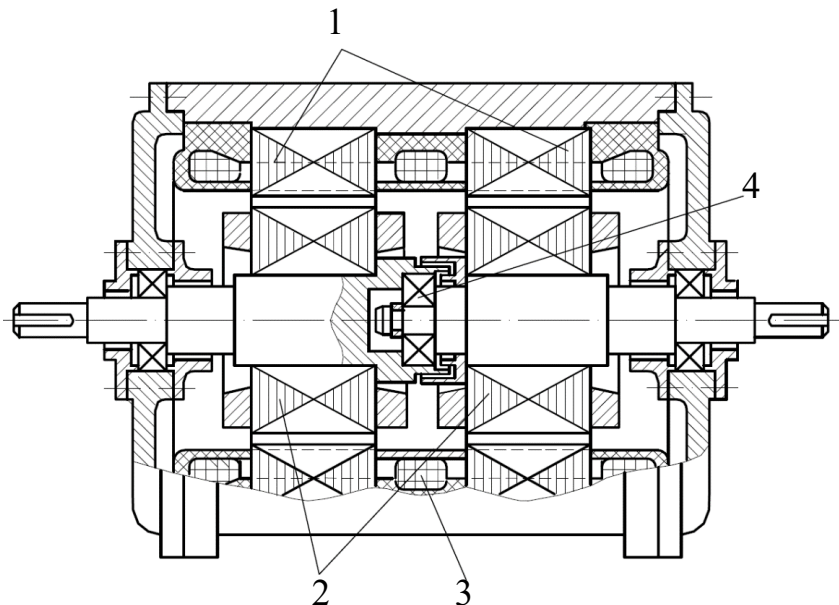


Рис. 15.15. Конструктивна схема секційованого асинхронного двигуна зустрічного обертання: 1 – секційований статор; 2-ротор; 3 – міжсекційна ділянка обмотки статора; 4 – підшипник подвійного обертання.

Зустрічне обертання роторних секцій обумовлено створенням зустрічних обертових полів на основі зміни чергування фаз статорних частин спеціального АД []. Можлива двохваріантна зміна чергування фаз обмотки статора з 60-градусною фазною зоною (рис. 15.). Можлива двохваріантна зміна чергування фаз обмотки статора з 60 - градусною фазною зоною з метою утворення зустрічного обертання магнітного поля секційних частин АД. Першому варіанту відповідає чергування фаз обмотки статора секційованого АД контробротання: $U1W2V1U2W1V2 - U1V2W1U2V1W2$ (рис. 15. ,*a*). Другому варіанту відповідає чергування $U1W2V1U2W1V2 - U2V1W2U1V2W1$ (рис. 15. ,*б*).

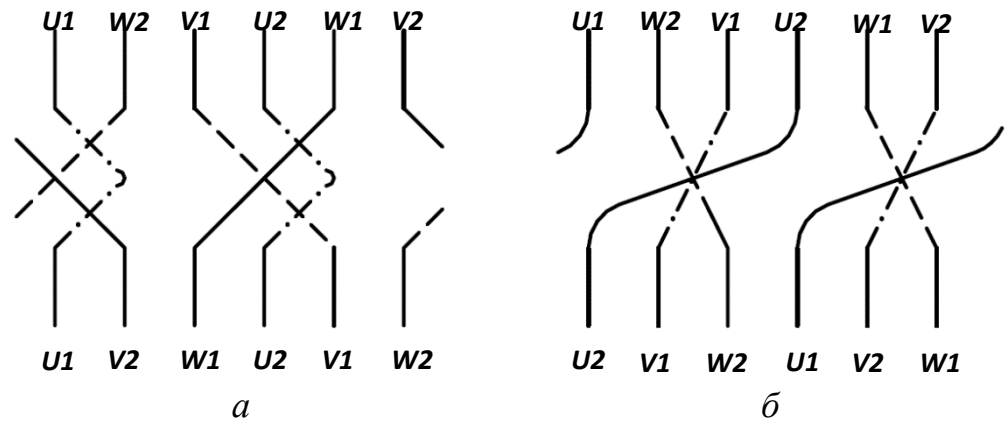


Рис. 15.16. Схеми зміни чергування котушкових груп у міжсекційному просторі $U1W2V1U2W1V2 - U1V2W1U2V1W2$ (*a*) та $U1W2V1U2W1V2 - U2V1W2U1V2W1$ (*б*): першого шару укладання (—); другого шару укладання (---); ортогонального укладання (- · -).

16. СТАН РОЗВИТКУ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

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

На вихідній стадії становлення теорії і практики електротехніки були визначені два різновиди структур ЕМС трансформаторів – просторова і планарна [4, 15, 52-58]. В процесі розвитку електроенергетики і електромеханіки виникла необхідність масового випуску ЕСП. В зв'язку з технологічними перевагами розташування в однієї площині плоских прямокутних пластин (листів) ЕТС та формування з них пакетів плоскопаралельних шарів магнітопроводів, основу більшості парку однофазних і трифазних ЕСП різної потужності складають ЕМС планарних структур (рис. 16.1, а-г). Також додатково до названих при побудові потужних трансформаторів застосовується планарна бронестрижнева структура (рис. 1.1. д), а при виготовленні ЕСП потужністю до 1000 кВ·А (кВ·Ар) додатково застосовуються просторові структури (рис. 16.1, е, ж) [6, 59-61].

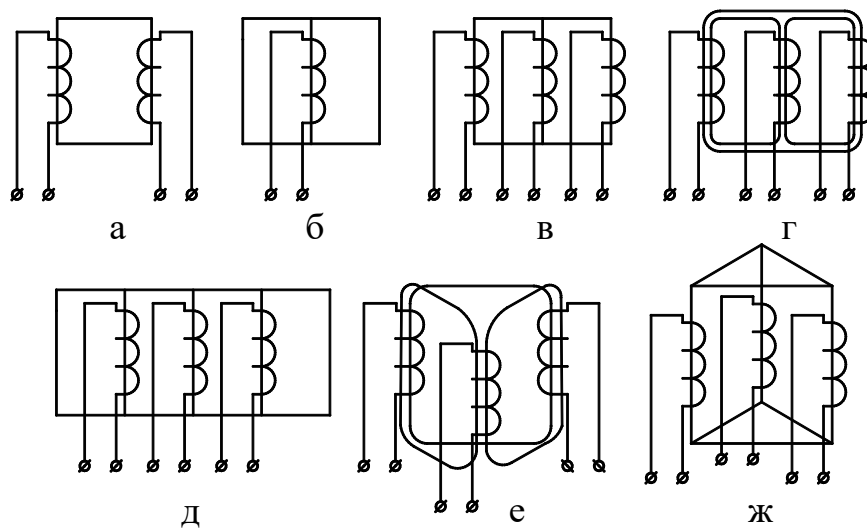


Рисунок 16.1. Структурні схеми однофазних стрижневої (а) і броньової (б) та трифазних стрижневих (в, г) і бронестрижневої (д) планарних, а також аксіальних просторових (е, ж) електромагнітних систем

В стикових магнітопроводах реакторів з конструктивними зазорами використовуються плоскопаралельні роз'єми суміжних шарів ЕТС (рис. 16.2, а, б). При складанні магнітопроводів трансформаторів для зниження намагнічувального струму і підвищення конструктивної міцності використовуються прямі ортогональні (рис. 16.2, в-д) та косі (рис. 16.2, е-з) зсуви стиків суміжних шарів ЕТС, а також їх комбінації. Структурно-

конфігураційні варіанти (рис. 16.2, д-з) зменшують об'єми зон зміни напрямку магнітного потоку відносно напрямку текстури та збільшують площу стиків ділянок магнітопроводів. Однак підвищуються додаткові втрати наклепу розділення ділянок стрижнів і ярем на частини ("рамні" магнітопроводи зі схемою кутів з прямими на рис. 16.2, д) та косими стиками) і трудомісткість виробництва та втрати зон гострих кутів косих стиків ЕТС (рис. 16.2, е-з). При формуванні косих стиків виникають скриті відходи ЕТС у вигляді виступів – "вусів" (рис. 16. 2, е), або відходи фігурного розкроєння (рис. 16.2, ж, з) [4, 6, 18, 20, 54-56]. Створено обладнання виконання косих стиків з послідовним малим зсувом в суміжних шарах, що знижує додаткові втрати. Такий зсув досягається зміною розмірів ділянок суміжних шарів ЕТС ("step-lap" і "malty step-lap" – магнітопроводи) [4, 16, 18, 20, 58]. Однак згідно [6, 18] косі стики не є ефективним рішенням удосконалення шихтованих магнітопроводів трансформаторів I-II габаритів. Також в [6] вказано, що збільшення втрат виготовлених планарних шихтованих текстурованих магнітопроводів відносно питомих втрат анізотропної ЕТС складає 37-58% незалежно від форм стиків. Задачі зниження втрат кутових зон різновидів шихтованих текстурованих магнітопроводів є дуже актуальною і проблемною.

В малих ЕСП і при потужності трансформаторів до 200 кВ·А застосовувались магнітопроводи з прямокутними перерізами стрижнів і ярем, тобто згідно класифікаціям [29, 30], з прямокутними утворюючими поверхнями або прямокутними УК (рис. 16. 3, а). Значними недоліками прямокутних УК є зниження надійності ізоляції в кутах при вигині витків малим радіусом та збільшення матеріалоємності обмоток [6, 15, 40]. Однак, як вже згадано у вступі, з початку ХХІ століття застосування прямокутних УК елементів ЕМС, з метою підвищення технологічності виробництва магнітопроводів, поширене до потужності 1000 кВ·А. При цьому відсутнє дослідницьке аналітичне порівняння показників ЕМС з прямокутними і циліндричними УК.

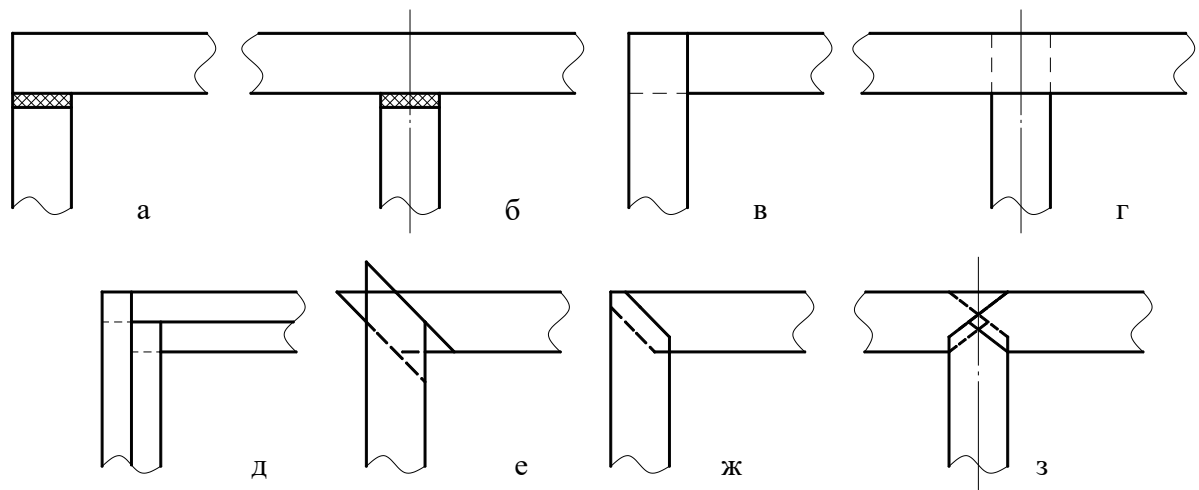


Рисунок 1.2. Варіанти складання шарів електротехнічної сталі без зсуву (а, б) та з ортогональними (в-д) і косими (е-з) зсувами стиків в бокових і центральних зонах зміни напрямку магнітного потоку відносно напрямку текстури

Циліндричні утворюючі поверхні перерізів стрижнів і обмоткових вікон при "східчастому" заповненні у більшості кругових УК пакетами пластин ЕТС різної ширини (рис. 16.3, б) застосовуються при потужності трансформатора S_H від 1 кВ·А. При 3 ($S_H \leq 16$ кВ·А), 4 ($S_H = 16-60$ кВ·А) і 16 ($S_H \geq 80000$ кВ·А) сходинках (пакетах ЕТС) в половині кола відношення площ східчастих перерізів магнітопроводів до площ кіл, тобто коефіцієнти заповнення кругових УК стрижнів контурами їх ортогональних перерізів (контурні коефіцієнти) складають $K_{\text{кк}} = 0,851$, $K_{\text{кк}} = 0,861$ і $K_{\text{кк}} = 0,931$ [15, 54-56]. Недостатнє заповнення криволінійних УК з $K_{\text{кк}} < 0,9$ підвищує матеріалоемність та втрати ЕСП, а наближення до $K_{\text{кк}} = 0,9$ та виконання ЕМС з $K_{\text{кк}} > 0,9$ суттєво підвищує трудомісткість виготовлення магнітопроводів заготовкою та складанням значного числа пакетів ЕТС, що відрізняються розмірами. Площа і конфігурації перерізів ярем у більшості ЕМС з криволінійними УК співпадають зі стрижнями. Однак інколи зовнішні поверхні ярем виконуються східчастими, а внутрішні плоскими, що згідно [15] призводить до деякого покращення показників ЕСП. Однак числове визначення вказаного покращення до нинішнього часу також невідомо. Суттєвим недоліком криволінійних УК обмоткових котушок є зниження ЕДС ЕСП в зв'язку з виникненням внутрішніх технологічних залишкових механічних напруг криволінійного вигину обмоткових провідників. Такі напруги при коротких замиканнях складаються з напругами від електромагнітних сил та підсилюють їх дію і суттєво погіршують ЕДС ЕСП [23, 24].

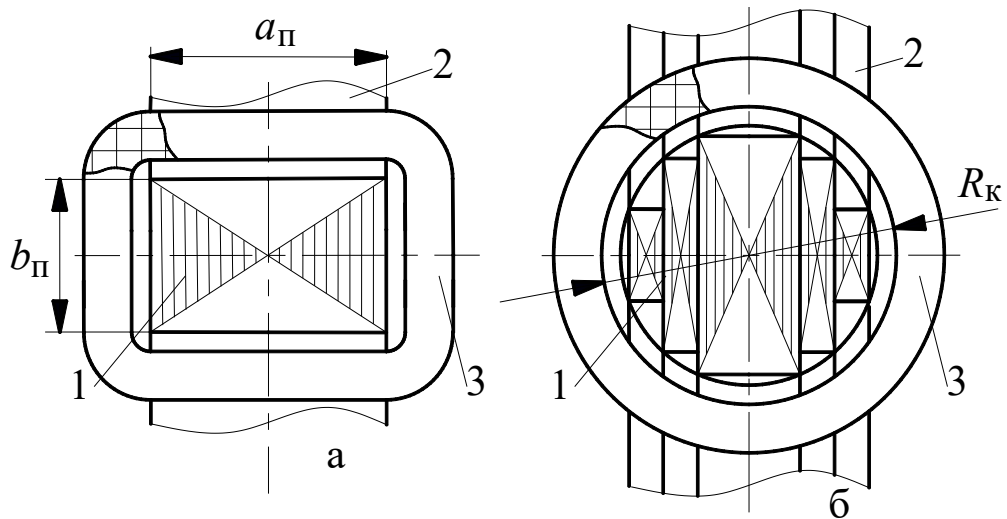


Рисунок 16.3. Фрагменти схем електромагнітних систем з прямокутними (а) і круговими (б) утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок:
1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – обмотка.

На основі освоєння виробництва рулонної ЕТС у другій половині ХХ віку крім шихтованих і витих планарних магнітопроводів в однофазних і трифазних ЕМС схем (рис. 1.1, а-д) і тороїдної схеми [53, 57], в трифазних ЕМС схем (рис. 16.1, е-ж) почалось застосування комбінованих (ярма виті, стрижні пластинчасті) і витих магнітопроводів (рис. 16.4). В однофазних варіантах з витими магнітопроводами максимально використані переваги рулонної анізотропної ЕТС відносно ізотропної трансформаторної ЕТС. Однак в трифазних ЕМС з двохконтурними фазними елементами витих магнітопроводів схем (рис. 16.1, г-ж) виникають 30-33% додаткові втрати від третіх гармонік контурних магнітних потоків окремих витих секцій [6, 15, 62]. Задача їх усунення також є проблемною. В варіантах просторових ЕМС зі стиковим комбінованим (рис. 16.4, а) та витим трисекційним (рис. 16.4, б) магнітопроводами також застосовуються кругові УК активних елементів. Це додатково до неповного заповнення контурних кіл перерізів стрижнів та зниження ЕДС призводить до збільшення порожнин між обмотковими котушками, що обумовлено різницею довжин зовнішнього і внутрішнього контурів магнітопроводів. Підвищуються маси магнітопроводів і радіуси зовнішніх контурів $R_{\text{кк(в)}}$ ЕМС (рис. 16.4) [29, 30, 35, 36, 40].

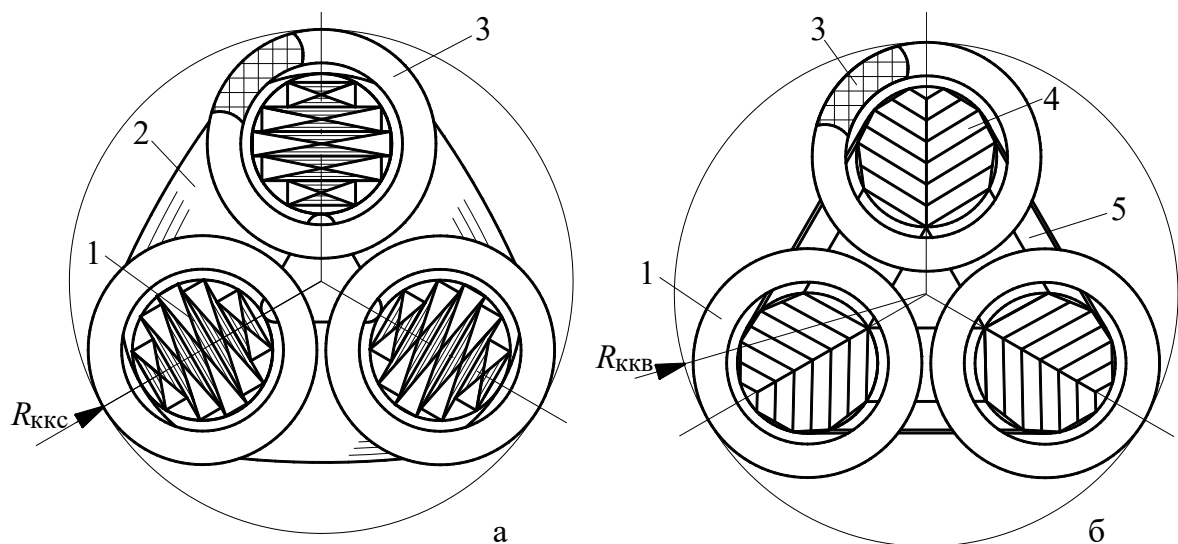


Рисунок 16.4. Конструктивні схеми в поперечних перерізах трифазних просторових електромагнітних систем з комбінованим (а) і витим (б) магнітопроводами:

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

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

16.2. Методи оптимізаційних розрахунків статичних електромагнітних систем

Масовартісні і енергетичні показники ЕСП, крім питомих та додаткових втрат застосованої ЕТС, а також міді (алюмінію) або сучасного надпровідникового композиту обмоток, в першу чергу залежать від структурно-геометричних особливостей і співвідношень розмірів активних елементів та електромагнітних навантажень (ЕМН). В свою чергу рівень ЕМН залежить від типу і призначення ЕСП та способу його охолодження. Максимально раціональне, тобто оптимальне поєднання геометричних співвідношень і ЕМН досягається проєктними оптимізаційними розрахунками шляхом знаходження екстремуму ЦФ за певним критерієм [4, 6, 63-87].

При заданих структурі ЕМС і вимогах технічного завдання проєктування оптимізаційні розрахунки уявляють параметричний синтез ЕСП при певних проєктних, зокрема теплових обмеженнях. Задачі удосконалення статичних ЕМС в рамках традиційних структур і УК (рис. 16.1 – рис. 16.4) на основі застосування покращених електроматеріалів і

математичних моделей оптимізаційного параметричного синтезу [63-83] і адекватних теплових розрахунків [4, 6, 52, 88-92] практично вирішені.

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

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

$$C_{кт(р)} = C_{т(р)} + K_{н(м)}P_{н(м)} + K_{к(о)}P_{к(о)}, \quad (16.1)$$

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

Застосовується сукупність незалежних і залежних КЗ. Основними (незалежними) КЗ ЦФ оптимізації традиційних ЕМС є геометричні параметри – висота і ширина обмоткового вікна, довжина і ширина прямокутного перерізу стрижня (рис. 16.3, а) та діаметр кругового УК перерізу стрижня (рис. 16.3, б), а також ЕМН – середнє значення амплітуди індукції стрижня B_c і середня щільність струму обмоток трансформатора (щільність струму обмотки реактора) J_o [63-67, 70-74]. Інколи як незалежні КЗ використовуються співвідношення втрат короткого замикання і неробочого руху або співвідношення вартостей системи обмоток і магнітопроводу [72, 78, 83]. При цьому залежними стають основні розміри ЕМС діаметр $D_{ікк}$ (рис. 16.3, б), висота і ширина обмоткового вікна. Для скорочення числа геометричних КЗ оптимізації ЕМС (рис. 16.3, а-в) з прямокутними УК в [94, 95] запропоновані відносні (безрозмірні) геометричні КЗ відношень n , m , e довжини $a_{п}$ перерізу стрижня, висоти $h_{в}$ і ширини $b_{в}$ обмоткового вікна до ширини $b_{в}$ перерізу стрижня:

$$n = a_{п}/b_{п}; m = h_{в}/b_{п}; l = b_{в}/b_{п}. \quad (16.2)$$

З особливостей процесу електромагнітного перетворення енергії впливає складність моделювання і оптимізації ЕСП. У більшості методик параметричного синтезу загальна математична модель ЕСП поділяється, з метою спрощення, на сукупність моделей окремих елементів ЕМС і систему рівнянь. У відповідності до рівнянь таких моделей, комп'ютерні

обчислювальні програми поділяються на окремі модельні блоки [70, 72, 78]. Пошук екстремумів ЦФ виконуються за допомогою алгоритмів, що розроблені з використанням відомих чисельних методів [68].

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

Обрання кращого технічного рішення конкретної розробки технічного об'єкта потребує визначення та порівняння показників якості оптимізованих варіантів вирішення задачі тобто структурно-параметричного синтезу. При цьому параметричний синтез є можливим тільки при заданих структурі та проєктних даних технічного завдання конкретної розробки. В зв'язку з цим, згідно [68], структурний і параметричний синтез об'єднуються в єдиному обчислювальному процесі. Поєднання структурного і параметричного синтезу нової розробки досягається методом експертної оцінки шляхом визначення "вагових" коефіцієнтів (коефіцієнтів переваг). Однак значення подібних коефіцієнтів можуть бути суб'єктивними, що ускладнює проєктний синтез ЕМС.

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

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

Для можливості структурного синтезу, тобто узагальненого об'єктивного порівняльного аналізу можливих варіантів рішення задач удосконалення ЕМС, необхідно створення та застосування ЦФ, що задовольняють умовам електромагнітної еквівалентності і інваріантності зіставлення. Такі ЦФ повинні базуватися на універсальних ідентичних і

прийнятних для будь яких структурно-геометричних рішень ЕМС КЗ та певних показників, які не пов'язані з конкретним технічним завданням проектування.

Рішення задачі структурного синтезу спрощується застосуванням в оптимізаційних ЦФ питомих значень ПТР та відносних КЗ, що запропоновані в [93, 94]. З використанням таких КЗ (16.2) в [57, 93, 94] визначено вплив зміни структури і геометричних співвідношень активних елементів на об'єм, масу і вартість варіантів одно і трифазних ЕМС малої потужності. В [95] також розглянуто вплив змін КЗ (1.2) на втрати активної потужності. Розраховані графічні залежності для обрання оптимальних геометричних співвідношень та визначено, що ЕМС з шихтованими магнітопроводами на 2-4% перевищують по матеріалоемності аналоги з витими магнітопроводами. Однак числові данні порівняльного аналізу варіантів структур ЕМС не визначені, а результати досліджень [57, 93-95], що визначаються ЦФ з КЗ (16.2), стосуються тільки ЕМС з прямокутними УК.

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

16.3. Перетворення структур і конфігурацій активних елементів

В ХХІ віці крім збільшення виробництва електроенергії, важливою задачею є її збереження при передачі, розподіленні і перетворенні, що

потребує подальшого підвищення технічного рівня та одиничної потужності елементів блочних агрегатів "генератор-трансформатор", силових розподільчих трансформаторів та елементів електроприводів. Важливе значення також має розробка високоефективних систем форсованого охолодження електрообладнання [1, 4, 5].

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

В [29, 30, 35, 36] наведено пропозиції заміни традиційних прямокутних і кругових УК активних елементів на $n \geq 6$ – гранні контури в варіантах планарної (рис. 2.1, а) і просторових (рис. 16.5, в-г) ЕМС.

Мінімальній довжині витка планарної ЕМС з прямокутними УК (рис. 16.3, а) відповідає квадрат, хоча оптимальним, з врахуванням в ЕМС об'ємів і мас міді (алюмінію) і ЕТС, є прямокутний переріз стрижня [29, 57]. Розміру боку квадрата $a_{\text{СПК}}$ відповідають величини периметру $\Pi_{\text{СПК}}$ і площі $S_{\text{СПК}}$ перерізу стрижня:

$$\Pi_{\text{СПК}} = 4a_{\text{СПК}} = 4\sqrt{S_{\text{СПК}}}; \quad (16.3)$$

$$S_{\text{СПК}} = a_{\text{СПК}}^2. \quad (16.4)$$

Розміру боку $a_{\text{СВ}}$ рівнобічного восьмигранника (рис. 16.5, а) відповідають величини периметру $\Pi_{\text{СВ}}$ і площі $S_{\text{В}}$ перерізу стрижня:

$$\Pi_{\text{СВ}} = 8a_{\text{СВ}} = 16R_{\text{К}} \sin(\pi/8) = 6,123R_{\text{К}}; \quad (16.5)$$

$$S_{\text{СВ}} = 8K_{\text{КВ}} a_{\text{КВ}} R_{\text{К}} \cos(\pi/8) = 2,829K_{\text{КВ}} R_{\text{К}}^2, \quad (16.6)$$

де $R_{\text{К}}$ – радіус контурної окружності, в яку вписаний переріз стрижня (рис. 16.5, а, в-г); $K_{\text{КВ}}$ – коефіцієнт заповнення восьмигранного УК стрижня ЕТС, який на відміну від кругового УК (рис. 16.3, б) при трьох (рис. 16.5, а) і чотирьох сходинках (пакетах) в половині восьмигранника складає $K_{\text{КВ}}=0,9$ і $K_{\text{КВ}}=0,93$, а при заповненні вказаного УК ідентичними прямокутними пластинами (рис. 16.5, г) такий коефіцієнт в стиковому магнітопроводі складає $K_{\text{КВ}} \approx 1$.

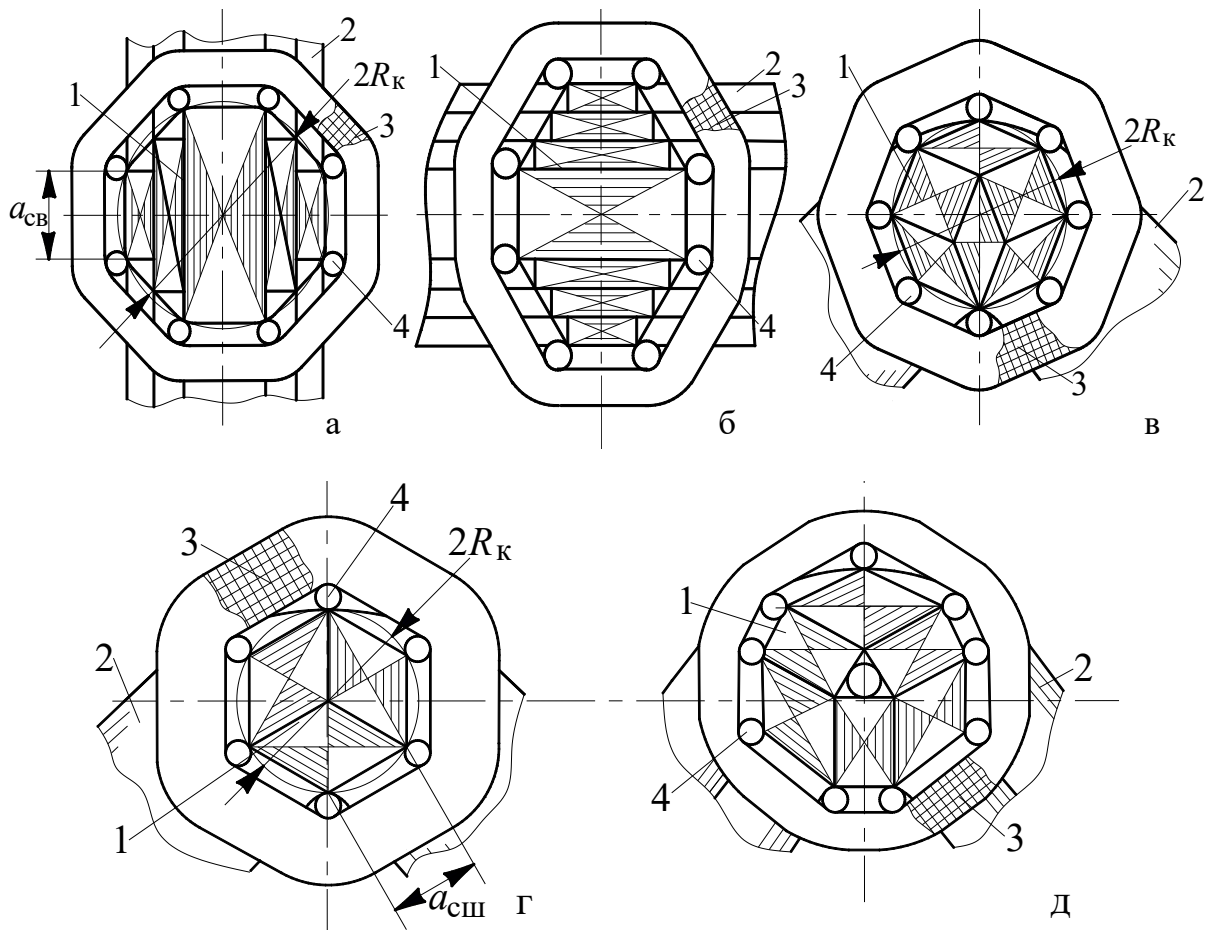


Рисунок 16.5. Фрагменти схем варіантів планарних (а, б) і просторових стикових (в-д) електромагнітних систем з багатограними утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок:

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

Розміру боку $a_{сш}$ рівнобічного шестигранника (рис. 16.5, з) відповідають величини периметру $\Pi_{сш}$ і площі $S_{сш}$ перерізу стрижня:

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

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

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

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

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

Периметр кругового УК радіусу R_k і площа східчастого перерізу стрижня з вказаним УК:

$$\Pi_o = 2\pi R_k = 6,283R_k; \quad (2.8)$$

$$S_{\text{ск}} = K_{\text{кк}}S_o = K_{\text{кк}}\pi R_k^2, \quad (2.9)$$

де S_o – площа контурної окружності.

Виходячи з виразів (2.4), (2.6) і (2.9) співвідношення величин площ восьмигранника і шестигранника до площі контурного кола радіусу R_k складають:

$$S_{\text{св}}/S_o = 2,829R_k^2/\left(\pi R_k^2\right) = 0,9; \quad (2.10)$$

$$S_{\text{сш}}/S_o = 2,6a_{\text{сш}}^2/\left(\pi R_k^2\right) = 0,83. \quad (2.11)$$

Співвідношення (2.10) і (2.11) наближаються до коефіцієнтів заповнення контурного кола східчастим перерізом стрижня при п'яти-шести, $K_{\text{кк}}=0,89-0,92$ і трьох (рис. 16.5, а), $K_{\text{кк}}=0,851$ сходинках в однієї половині контурного кола [15].

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

$$\Pi_o/\Pi_{\text{сви}} = 2\pi R_k/\left(6,123R_k\right) = 1,0262; \quad (2.12)$$

$$\Pi_o/\Pi_{\text{сш}} = 2\pi R_k/\left(6R_k\right) = 1,0472. \quad (2.13)$$

Співвідношення (2.7), (2.12) і (2.13) [29] характеризують можливість економії провідникового матеріалу і зниження втрат короткого замикання у відповідності із зменшенням величин периметрів УК стрижнів (рис. 16.5, а-в) приблизно на 7,5 % і 2,6-4,7%. При цьому збільшення площ плоских ділянок УК перерізів ярем знижує маси магнітопроводів і втрат неробочого руху. В варіанті стикового магнітопроводу ЕМС схеми (рис. 16.5, в) в межах R_k збільшується площа перерізу стрижня відносно ЕМС (рис. 16.5, а, г), що надає можливість зменшення R_k і додаткового покращення ПТР.

Конфігурація УК, що має форму симетричного багатогранника із співвідношенням напівосей 1,5 (рис. 16.1, б), в якому встановленні чотири пакети листів ЕТС різної ширини в половину перерізу стрижня, має коефіцієнт заповнення ЕТС 0,92. Така конфігурація частково зберігає переваги прямокутного УК стрижня, тобто зменшення міжосьової відстані між стрижнями, що надає можливість зменшення довжини ярма приблизно на 9,7% в порівнянні з ЕМС з круговими УК. Середня довжина витка в порівнянні з прямокутним УК зменшується на 9,8%. Все це вказує на можливість зменшення маси, вартості та втрат активної потужності в ЕМС з симетричними восьмигранними УК.

Шестигранні УК дозволяють удосконалити трифазні просторові ЕМС структур (рис. 16.1, е, ж). Перевагою названих аксіальних симетричних просторових структур над радіальними і планарними ЕМС є теоретичний мінімум (ноль) "векторного магнітного моменту" і відповідно мінімум зовнішнього магнітного поля [46, 100].

Змінні і постійні зовнішні магнітні поля призводять до збоїв і відмов магнітометричних і електронних систем і регламентуються нормами електромагнітної сумісності [101]. Тому зниження таких полів силового електрообладнання до санітарних і спеціальних норм є актуальною задачею. Також встановлено [102], що застосування в аксіальних ЕМС (рис. 16.4) кругових УК не дозволяє у достатній мірі забезпечити вимоги електромагнітної сумісності в зв'язку зі складністю симетризування мас і положень в просторі окремих пакетів стрижнів та секцій магнітопроводів.

Заміна кругових УК елементів просторових ЕМС на $n \geq 6$ -гранні (рис. 16.5, б - г) дозволяє значно спростити виробництво стикових комбінованих і витих просторових, а також шихтованих планарних магнітопроводів та підвищити ЕДС ЕСП [35, 36, 40]. Знижуються матеріаломісткість та втрати відносно традиційних аналогів просторових ЕМС з круговими УК [4, 15, 55], а також забезпечується, завдяки наявності ділянок паралельних поверхонь обмоткових вікон (рис. 16.5, в, г), можливість симетризування фазних активних елементів і мінімізація рівня зовнішнього магнітного поля просторових аксіальних ЕМС [46]. Конструкція (рис. 16.5, г) з центральними отворами стрижнів просторових аксіальних ЕМС [103] забезпечує можливість додаткового покращення основних ПТР формуванням двохконтурних ярем.

Додатковим, однак важливим обладнанням трансформаторних підстанцій і розподільчих пристроїв є одно та трифазні реактори. Вказані апарати мають структури, що аналогічні трансформаторам, однак відрізняються стиковими конструкціями магнітопроводів (рис. 16.6, а, б) та мають плоскі внутрішні поверхні ярем (рис. 16.6, в) [4, 15]. Конструктивні зазори між стиками (рис. 16.2, а, б) і площі перерізів стрижнів визначають індуктивності і реактивні потужності реакторів. ЕМС реакторів, як і трансформаторів потужністю з 16 кВ·А (кВ·Ар), виконуються з круговими УК, що при стикових зазорах є технічно і технологічно невиправданим в зв'язку з наявністю інноваційних рішень [29, 30, 35].

Заміна кругових УК (рис. 16.6, б) на шестигранні (рис. 16.6, г) ЕМС реактора (рис. 16.6, а) уявляється перспективними технічним рішенням у зв'язку з практично повним заповненням шестигранного УК ідентичними пластинами ЕТС. Також можливо використання структур стрижнів і ярем (рис. 16.6, д, е), які забезпечуються механічним розділенням під кутом пакетів з однотипних листів ЕТС, що складені із суміщенням кожного наступного листа до утворення паралелепіпеду (рис. 16.6, ж) [104]. При застосуванні автоматизованого обладнання, частини ярем (рис. 16.6, д) з пластин різної довжини формуються розділом стрічки (рулону) ЕМС з малою подачею. Подібні рішення дозволяють в повній мірі використовувати площу УК стрижня та зменшити масу і вартість елементів ЕМС реактора.

Також практично повне заповнення ЕТС восьмигранного УК перерізу стрижня ($K_{кв} \approx 1$) можливо в пропозиції планарного магнітопроводу трансформатора [104]. Такий магнітопровід (рис. 16.7, а) містить середню шихтовану вперепліт частину з прямокутними перерізами стрижнів і яремних ділянок та бокові частини (рис. 16.7, б, в), що складаються з заготовок виду (рис. 16.6, ж).

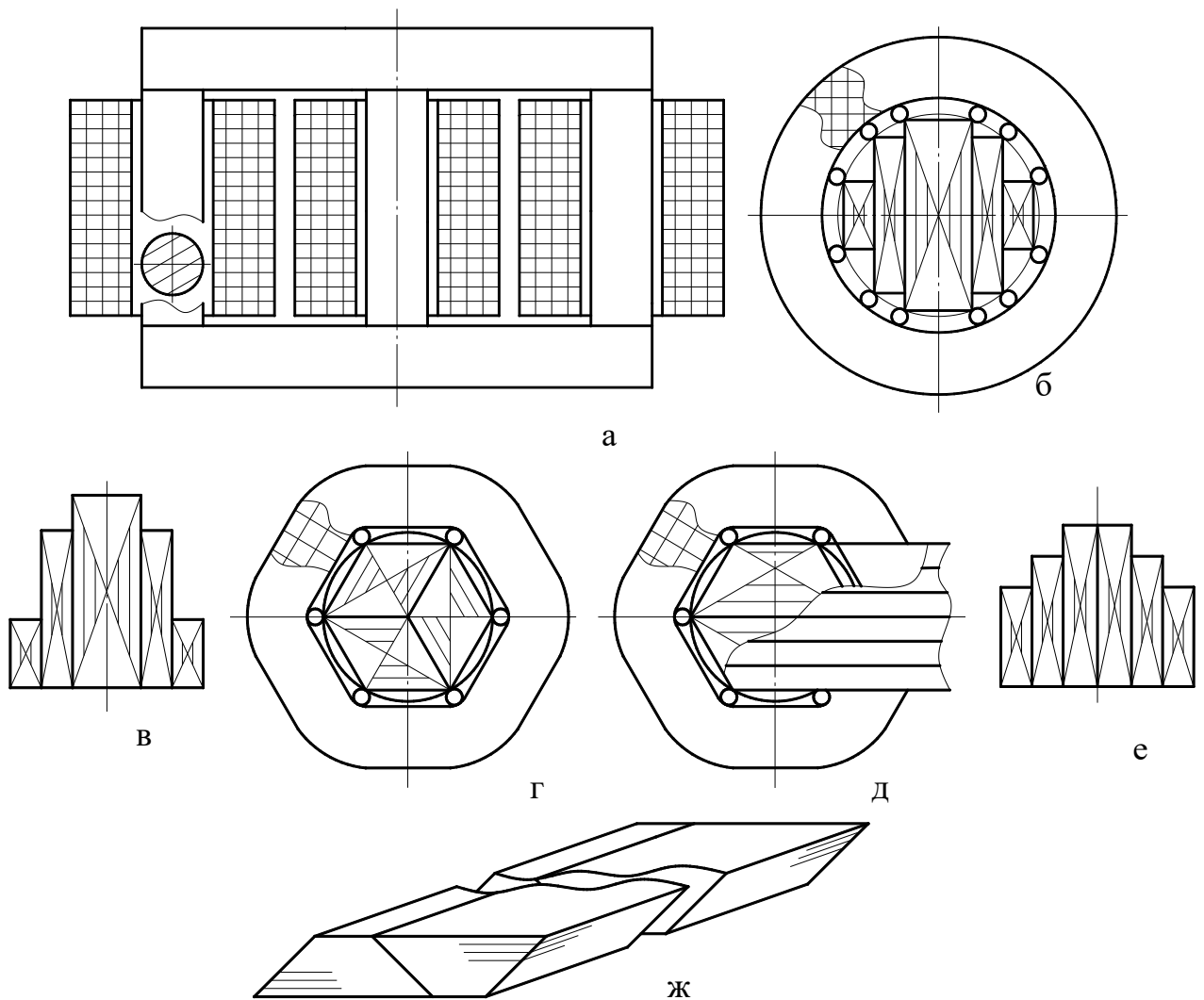


Рисунок 16.6 – Повздовжній переріз планарної стикової трифазної електромагнітної системи (а), варіанти конфігурацій перерізів стрижнів і ярем, що відповідають круговим і шестигранним (б-е) утворюючим контурам та заготовка елементів магнітопроводу (ж)

В розподільчих підстанціях потужністю до 1000 кВ·А значну частину обладнання складають однофазні трансформатори. Такі трансформатори мають структури (рис. 16.1, а, б) і прямокутні УК ЕМС та значна їх складова містить шихтовані магнітопроводи. Перетворення планарної стрижневої (рис. 16.1, а) і броньової (рис. 16.1, б) структур в радіальну просторову тристрижневу (рис. 16.8, а) з варіантами шихтованого магнітопроводу з паралелограмних (рис. 16.8, б) або шевронних (рис. 16.8, в) пластин [105] надає можливість покращення основних ПТР однофазних ЕСП.

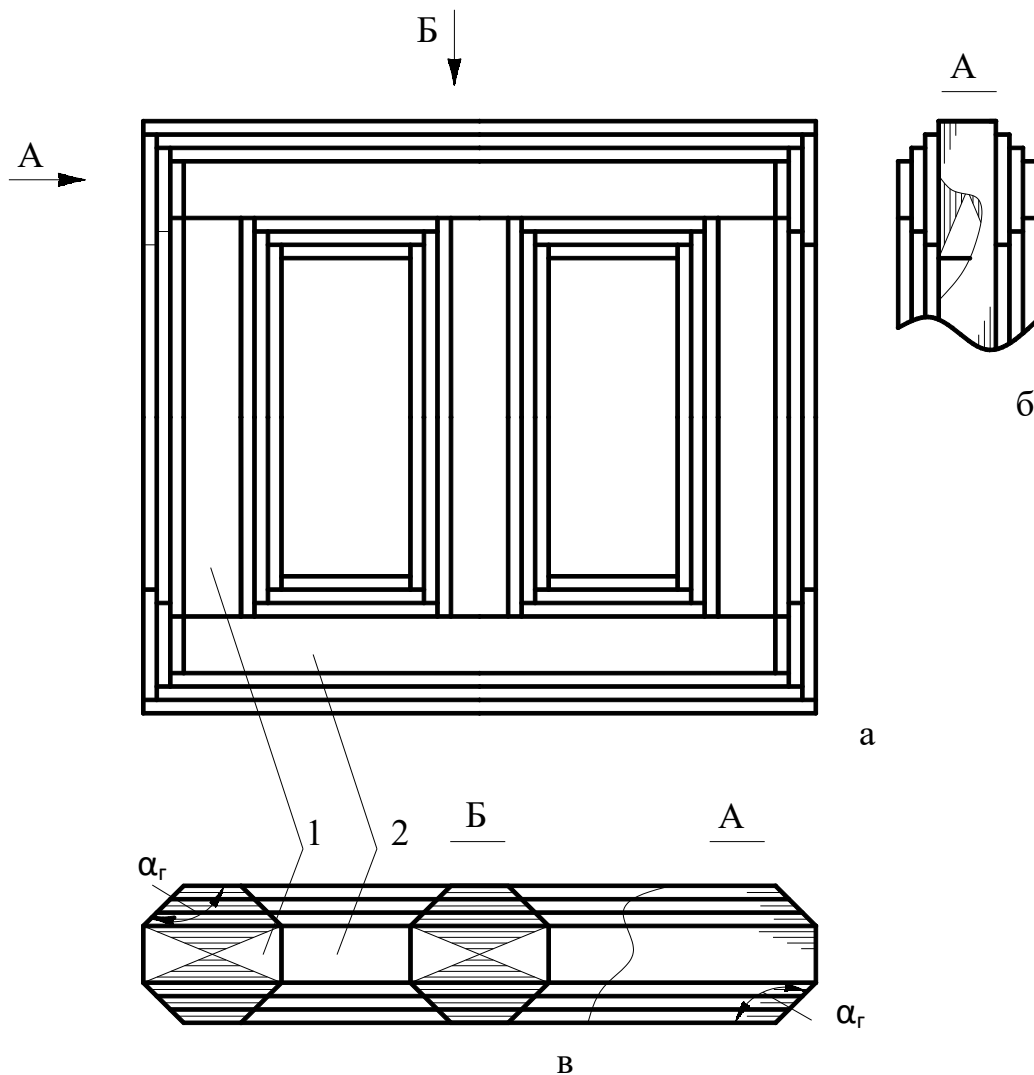


Рисунок 16.7 – Схема трифазного планарного магнітопроводу (а) з шихтованою вперепліт середньої та боковими стиковими частинами (б, в) [104]:

1 – стрижень, 2 – ярмо.

Вказана можливість в структурній схемі ЕМС (рис. 16.8, а) обумовлена зниженням числа технологічних роз'ємів в одному шарі магнітопроводу до трьох та мінімальним об'ємом кутових зон зміни напрямку магнітного потоку шихтованих текстурованих магнітопроводів відносно напрямку прокату ЕТС, а також зменшенням середньої довжини витка збільшенням стрижневих обмоткових секцій до трьох відносно еквівалентних аналогів структур (рис. 16, а, б).

Наведені в підрозділі конструктивно-технологічні рішення (рис. 16.5 – рис. 16.8) створюють передумови покращення ПТР ЕСП нетрадиційним евристичним

шляхом, однак потребують аналітичного обґрунтування наявності перелічених переваг.

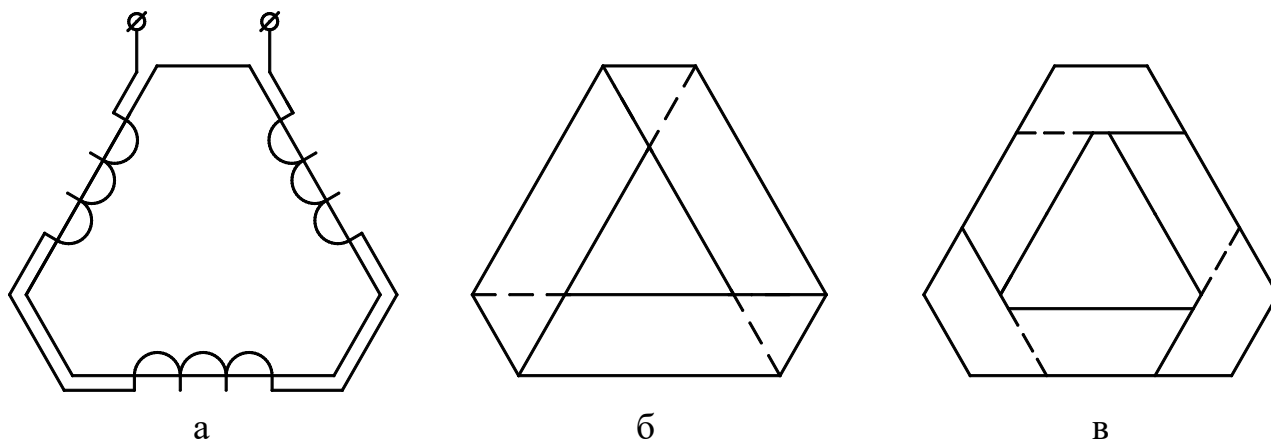


Рисунок 16.8 – Структурна схема однофазної радіальної електромагнітної системи з варіантами шихтованого магнітопроводу з паралелограмних (б) і шевронних (в) пластин електротехнічної сталі

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

Важливою складовою створення умов безперебійності і надійності електропостачання є забезпечення ЕДС силових розподільчих трансформаторів і реакторів [4, 15, 25]. Традиційними способами і конструктивними рішеннями ЕДС ЕСП є зміцнення матеріалу провідників обмоток і їх склеювання, опресування обмоткових катушок в осьовому і радіальному напрямках пресуючими кільцями і вертикальними упорно-ізоляційними (прошивними) рейками та встановлення жорстких опорно-ізоляційних циліндрів і горизонтальних прокладок. Також доцільно підвищення монолітності і симетризування витків та фазних катушок по висоті стрижня [15]. Однак число вертикальних рейок і горизонтальних прокладок обмежено необхідними перерізами каналів і площами поверхонь охолодження обмоток. Практика експлуатації ЕСП свідчить, що застосування вказаних способів і рішень повністю не гарантує ЕДС обмоток. Згідно міжнародним даним, в загальній аварійності трансформаторів частина ушкоджень, що обумовленні недостатньою ЕДС, є дуже значною [24, 25].

Складовою проектних розрахунків ЕСП є визначення механічних сил і напруг в обмотках при коротких замиканнях. Недоліком попередніх методик

розрахунків ЕДС обмоток ХХ і початку ХХІ століть була відсутність врахування технологічного фактору виготовлення обмоткових котушок, що обумовило значні погрішності. В ВАТ "ВІТ" (Запоріжжя) теоретично і експериментально встановлено, що кільцевий вигин провідників при намотуванні кругових витків котушок призводить до суттєвого зниження ЕДС, що потребує врахування при визначенні ЕДС і проектуванні обмоток [23, 24, 106].

В процесі намотування кругових або еліптичних витків обмоткових котушок ЕСП виникають деформації початкового вигину ε_B з максимумом $\varepsilon_{B\max}$ на зовнішньому контурі (рис. 16.9, а), які створюють в провіднику шириною b_n механічні напруги початкового вигину σ_B . При короткому замиканні ЕСП деформації ε_B складаються з деформаціями від електромагнітних сил, зокрема з деформаціями ε_{EMP} від радіальної сили, що стискає провідник. Максимальне значення $\varepsilon_{\Sigma\max}$ повної деформації ε_{Σ} створюється на зовнішньому радіусі контуру окружності вигину витка з середнім діаметром витка D_B [35, 106]:

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

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

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

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

де $\Delta\sigma_{EMP}$ – зростання напружень під дією деформації ε_{\max} ; $\Delta\sigma_3$ – запас напружень; σ_K – критичне значення напружень, яке для кругового витка (σ_{KK}) залежить від його геометричних параметрів і числа n_x хвиль деформаційного вигину по колу під дією електромагнітних сил, а також залежить від величини узагальненого модулю пружності матеріалу провідника $E_{n\Sigma}$ [106].

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

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

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

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

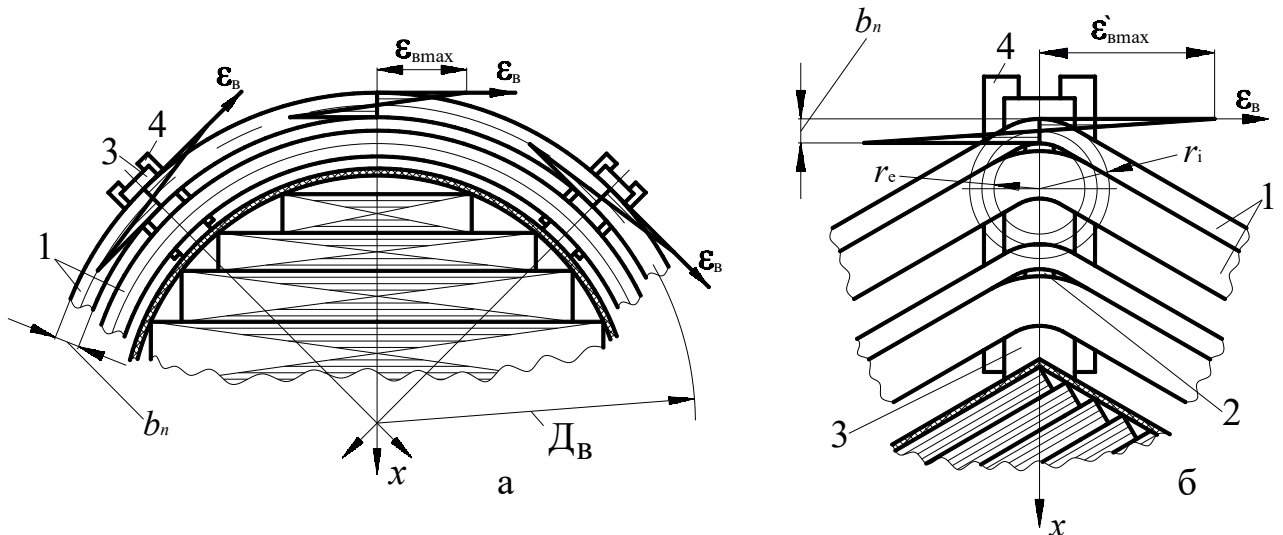


Рисунок 16.9 – Схеми вигину і деформації провідника по круговому контуру витка (а) і концентрація деформацій вигину в кутових зонах багатогранного контуру витка (б):

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

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

З (2.14) – (2.18) випливає спосіб підвищення ЕДС ЕСП, що реалізується в конструкціях і конфігураціях обмоток з $n \geq 6$ – граними УК обмоткових катушок і витків [35, 107]. Особливістю подібних обмоток є наявність ділянок витків, які сформовані прямими лініями, що перетинаються під тупими кутами вигину витків $\alpha_B \geq 120^\circ$ (рис. 16.5, рис. 16.9, б). На відміну від криволінійних витків (рис. 16.9, а), на прямих ділянках, що складають основну частину багатогранних витків, усуваються складові деформацій і напружень (2.14), (2.15), що обумовлені вигином. Такі складові, згідно (2.15) – (2.17), як і можливі пошкодження виткової ізоляції при вигині, концентруються в зонах витків на вісях вершин багатогранника. Тому в цих

зонах витків повинна бути підсилена ізоляція і зосереджені механічні кріплення обмоток, зокрема встановлені стовпи горизонтальних прокладок і прошивні рейки [107].

Для максимального підвищення електричної міцності і ЕДС обмоток, в кутових зонах граней між витками повинні бути встановлені додаткові вертикальні опорні елементи (прокладки) (рис. 16.10). Такі прокладки і рейки, а також отвори і виїмки під них в горизонтальних прокладках, можуть виконуватися за формою, яка відповідає внутрішньому r_b і зовнішньому r_3 радіусам округлення кутів обмоткових витків [107].

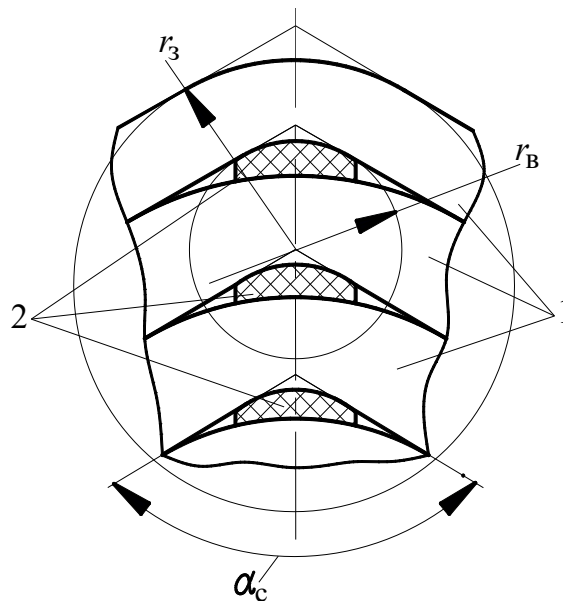


Рисунок 16.10 – Особливості будови обмотки з багатогранними утворюючими контурами витків і обмоткових котушок [107]:

1 – виток; 2 – опорний елемент.

Число граней УК витків обмотки повинно відповідати контуру УК перерізів стрижнів, що дозволяє удосконалити відомі та створити нові структури і конструкції ЕМС (рис. 16.5) [35, 36].

16.5. Пропозиції удосконалення шихтованих текстурованих магнітопроводів

Анізотропія елементів сучасних шихтованих магнітопроводів, як вже вказано вище, утворює багатократне зростання втрат зон повертання

магнітного потоку відносно напрямку прокату і текстури ЕТС. Об'єм таких зон зменшується застосуванням двохрамних магнітопроводів, в яких крім додаткових втрат наклепу і розділення ЕТС на смуги та ділянки, збільшується намагнічувальна потужність і додаткові втрати в зв'язку з появою додаткових технологічних зазорів складання листів ЕТС (рис. 16.11) [54]. Для зниження втрат зменшенням нерівномірності розподілу магнітного поля в поперечному перерізі і кутах, зовнішню частину двохрамного магнітопроводу пропонується виконувати з ЕТС з покращеними магнітними властивостями відносно ЕТС внутрішньої частини [43].

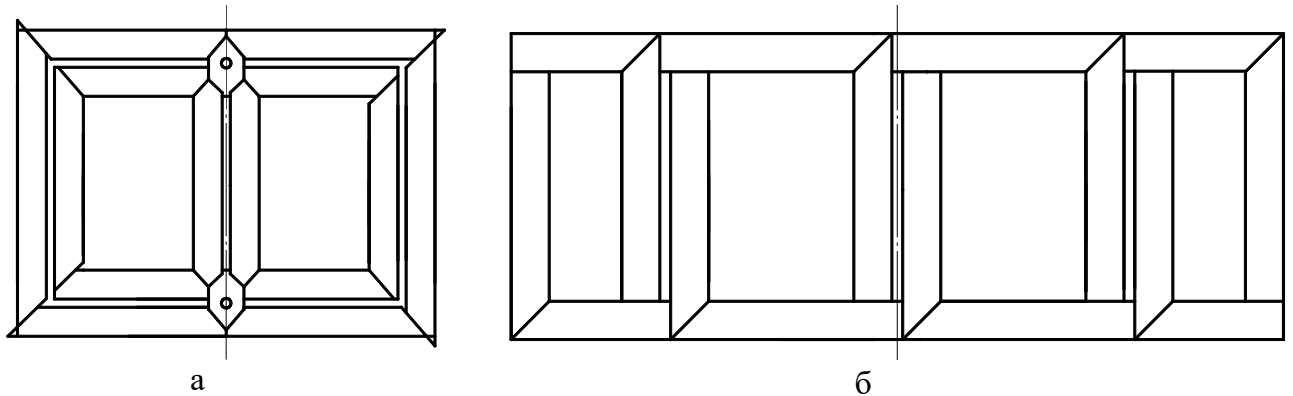


Рисунок 16.11 – Приклади схем стрижневого (а) і бронестрижневого (б) двохрамних планарних трифазних магнітопроводів [54]

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

В варіантах інноваційної, згідно [20], конструкції магнітопроводу [41] з прямокутним зовнішнім контуром і прямими стиками, комбінація ізотропної і анізотропної ЕТС в суміжних шарах чергується (рис. 16.12). Куткові зони містять тільки ізотропну ЕТС, що виключає значні додаткові втрати куткових зон. Однак приблизно половина кожного з варіантів комбінованого магнітопроводу [41] містить ізотропну ЕТС з підвищеними питомими втратами. Збільшуються основні втрати, що знижує ефективність даної інновації.

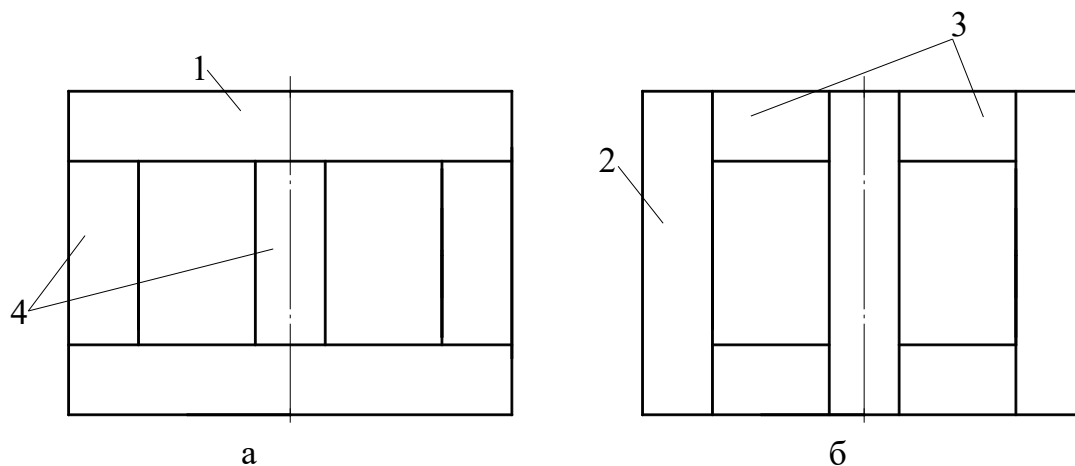


Рисунок 16.12 – Схема розташування суміжних шарів ізотропної електротехнічної сталі в ярмах (а) і стрижнях (б) варіантів пропозиції магнітопроводу [41]:

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

Подальший розвиток пропозицій нетрадиційних комбінацій елементів шихтованих комбінованих магнітопроводів уявляє розташування пластин анізотропної ЕТС в зонах ортогональної зміни напрямку потоку відносно текстури [108]. Використовуються пластини ізотропної ЕТС шевронної форми з протилежними боками різної ширини. В бічних кутах планарного магнітопроводу подібні пластини встановлюються в суміжних шарах з протилежним направленням коротких і довгих боків. В протилежних середніх кутових (Т – подібних) ділянках однофазних броньових і трифазних стрижневих (рис. 16.13, а) і бронестрижневих планарних магнітопроводів шевронні пластини устанавлюються з ортогональним положенням середніх кутів. Шевронні пластини анізотропної ЕТС бічних ділянок для зниження нерівномірності розподілу поля можуть бути виконані з закругленням середніх кутів. Радіус закруглення відповідає величині ізоляційного проміжку b_{iz} між магнітопроводом і обмоткою (рис. 16.13, б). Для зменшення числа кутових зон і стиків доцільно, як згадано в підрозділі 2.1, заміна традиційних варіантів планарного магнітопроводу однофазної ЕМС [15, 52, 57] на радіальну тристрижневу структуру (рис. 16.8, а) [108]. Яремно-кутові і стрижневі ділянки такого магнітопроводу доцільно виконувати відповідно з ізотропної і анізотропної ЕТС.

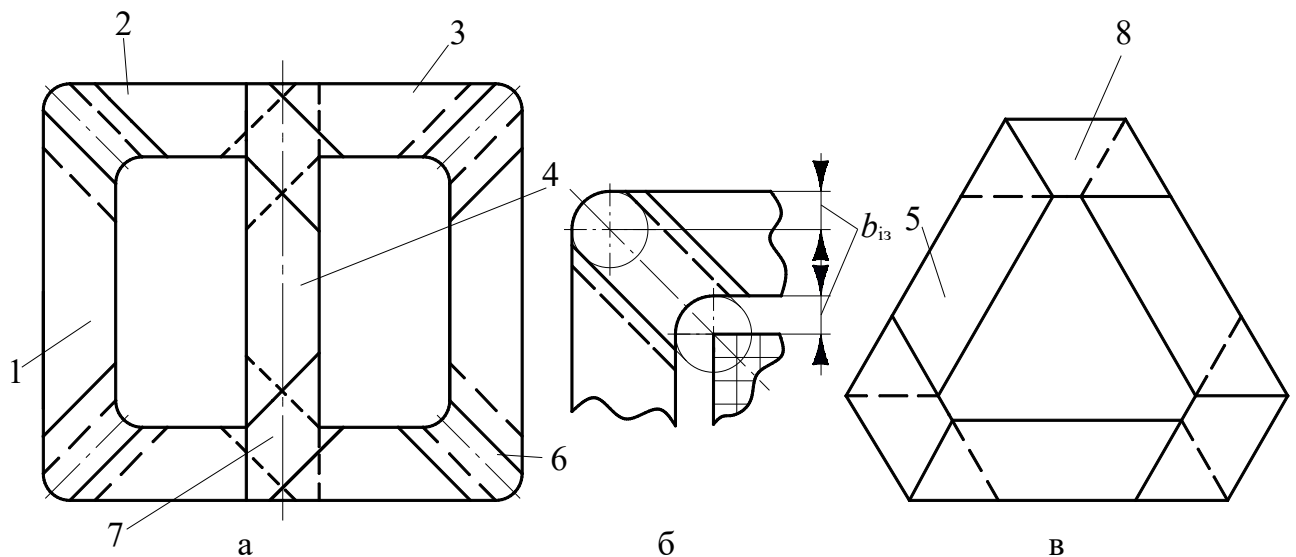


Рисунок 16.13 – Схеми трифазного стрижневого (а) з заокругленими верхівками кутів (б) і однофазного тристрижневого (в) магнітопроводів з пластинами

1-5 анізотропної і пластинами 6-8 ізотропної електротехнічних сталей
варіантів пропозиції магнітопроводу [108]

Нероз’ємне з’єднання паралелограмних стрижневих і яремно-кутових ділянок утворює шевронні елементи магнітопроводу (рис. 16.13, в) і знижує число технологічних зазорів з шести до трьох [109]. Таке з’єднання, а також з’єднання кутових шевронних ізотропних та інших анізотропних ділянок магнітопроводів схем (рис. 16.13, а, б), може бути виконано зварюванням. Для рішення задач практичного застосування конструкцій і способу (рис. 16.13, рис. 16.14) доцільно проведення досліджень можливостей використання відомих способів (лазерне, електронно-променеве, дифузійне, тертям ...), або розробки спеціальних способів зварювання пластин ЕТС в стиках. Такі способи повинні забезпечити задовільні магнітні властивості зварювальних швів та можливості розділення (штамповки) зварених заготовок ЕТС [51].

Запобігання значного ускладнення виробництва магнітопроводів з з’єднанням стиків ізотропної і анізотропної ЕТС можливо інтегральним зварюванням і поперечним розділенням заготовок. Заготовки комбінації ЕТС для поперечного розділення на комбіновані пластини магнітопроводів (рис. 16.14) утворюються суміщенням і з’єднанням по лініям стиків фрагментів смуг анізотропної (рис. 16.15, а) і ізотропної (рис. 16.15, б) ЕТС. До фрагменту (фрагментів) смуги анізотропної ЕТС можна приєднати один, два або декілька

фрагментів смуги ізотропної ЕТС. Перед з'єднанням фрагментів анізотропні компоненти розташовуються з напрямком текстури, який є паралельним лініям розділення (рис. 16.15, в). Розділенні ділянки фрагментів з двома або декількома швами розрізаються під заданими кутами на пластини (рис. 16.15, г, д) з комбінацією ЕТС [109].

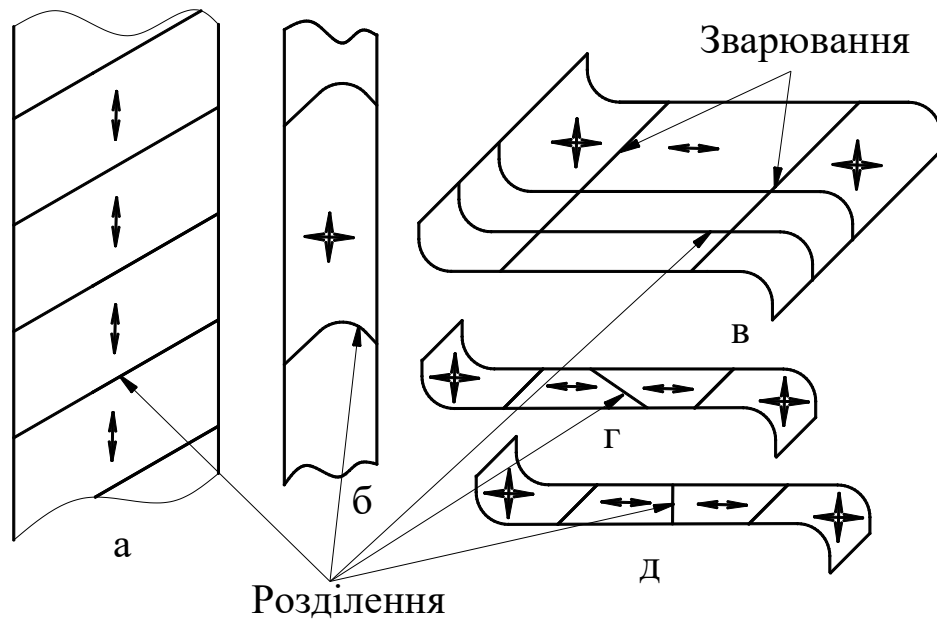


Рисунок 16.15 – Принципові схеми розкрою і з'єднання компонент згідно способу [109] виготовлення комбінованого магнітопроводу: поперечне розділення (а, б) прокату анізотропної () і ізотропної () електротехнічних сталей на фрагменти; зварювання фрагментів по лініям стиків в заготовку та її поперечний поділ на ділянки (в); розділення ділянок фрагментів на комбіновані пластини (г, д).

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

Для рішення поставлених задач структурного синтезу, тобто оптимізаційного зіставлення ПТР заданих варіантів ЕМС ЕСП універсальним узагальненим методом [7, 32, 84-87] застосовується $k \geq 3$ ЦФ окремих критеріїв оптимізації. Основними є критерії мінімумів маси ($k=1$) вартості ($k=2$) і втрат активної потужності ($k=3$), які використовуються в даній роботі для дослідження ЕМС як з мідними так і з алюмінієвими обмотками. Вказані ЦФ $F^{(n)}_{kijcu(al)}$ містять загальні складові з показниками вхідних даних і ЕМН Π_{ij} однофазного (трифазного) трансформатора або реактора з мідними (алюмінієвими) обмотками, а також оптимізаційні безрозмірні складові-

показники ЦФ $\Pi_{kijcu(al)}^*$, де латинські літери ij приймають певні позначення кирилицею (табл. 16.1), які відповідають варіантам ЕМС, що розглядаються в роботі

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

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

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

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

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

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

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

Таблиця 16.1 – Позначення показників варіантів електромагнітних систем з шихтованими магнітопроводами

Варіант магнітної системи	Позначення показника	Показники, б.о.		
		Мас	Вартос	Втрати активної

	вихідних даних	и	ті	потужнос ті
Однофазна планарна стрижнева з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	P_{1CP}^*	P_{2CP}^*	P_{3CP}^*
Однофазна планарна броньова з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	P_{1BP}^*	P_{2BP}^*	P_{3BP}^*
Однофазна просторова радіальна тристрижнева з прямокутними перерізами стрижнів і ярем	P_{OT}	P_{1PT}^*	P_{2PT}^*	P_{3PT}^*
Трифазна планарна з прямокутними утворюючими контурами обмоток і перерізами стрижнів та ярем	P_{TT}	P_{1TP}^*	P_{2TP}^*	P_{3TP}^*
Трифазна планарна стрижнева з круговими утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та ярем	P_{TT}	P_{1KK}^*	P_{2KK}^*	P_{3KK}^*
Трифазна планарна стрижнева з восьмигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів і ярем	P_{TT}	P_{1BV}^*	P_{2BV}^*	P_{3BV}^*
Трифазна планарна стрижнева з круговими утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	P_{TT}	P_{1KP}^*	P_{2KP}^*	P_{3KP}^*
Трифазна планарна стрижнева з восьмигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	P_{TT}	P_{1VP}^*	P_{2VP}^*	P_{3VP}^*
Трифазна планарна стрижнева з шестигранними утворюючими контурами обмоток і перерізів стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем	P_{TP}	P_{1TSP}^*	P_{2TSP}^*	P_{3TSP}^*

Показники маси і вартості при заданому коефіцієнті заповнення обмоткового вікна обмотковим провідниковим матеріалом K_{30} (класу напруги), є залежними від геометричних безрозмірних КЗ. Основними геометричними КЗ є

відношення висоти h_{ij} і ширини b_{ij} обмоткового вікна (рис. 16.16, а) та зовнішнього і внутрішнього діаметрів розрахункових окружностей варіанту магнітопроводу D_{1ij} і D_{2ij} (рис. 16.16, б, в). Додатковою відносною КЗ, що застосовується при побудові математичних моделей (ММ) деяких ЕМС, наприклад (рис. 16.16, б), є тригонометрична функція $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c :

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

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

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

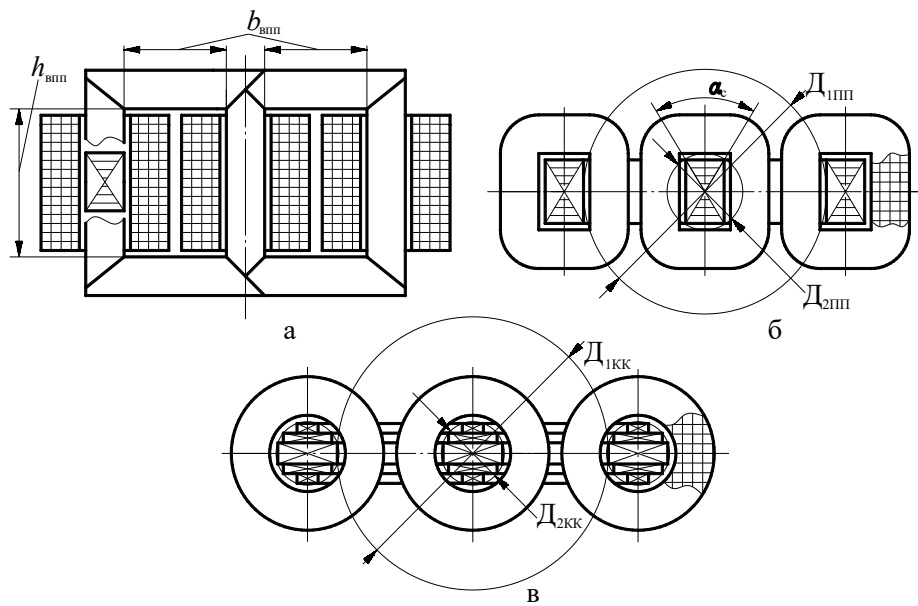


Рисунок 16.16 – Повздовжній (а) та поперечні перерізи варіантів планарної електромагнітної системи з прямокутними (б) і круговими (в) утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок

Для адекватного зіставлення варіантів ЕМС табл. 16.1 з різновидами УК, що розглядаються в роботі, приймаються ідентичними електромагнітні потужності, і відповідно показники $\Pi_{от}$, $\Pi_{тт}$ і $\Pi_{тр}$ з рівнями ЕМН, що залежать від призначення та виконання і типу охолодження ЕСП. Також відповідно приймаються однаковими електротехнічні матеріали, значення коефіцієнту K_{30} і коефіцієнту заповнення магнітопроводу ЕТС K_{3c} та середні значення амплітуд індукції, які є однаковими в поперечних перерізах стрижнів і ярем. Для спрощення ММ реальні обмотки кожної з ЕМС замінюються еквівалентними розрахунковими обмотками [84] структурно-еквівалентних реакторів. Застосування поняття еквівалентної розрахункової обмотки надає можливість створення ММ ЕМС при складності визначення координат середніх витків обмоток в вікнах магнітопроводів

нетрадиційних форм, зокрема в магнітопроводах (рис. 16.8, б, в). Розрахунки вартості виконуються з врахуванням співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників, що складає у середньому 0,85 [111] та при відношенні цін вказаних провідників C_{al} , C_{cu} до ціни ЕТС C_{st} в реальних діапазонах ($C_{al}/C_{st}=3-4,7$; $C_{cu}/C_{st}=3,5-5,5$).

Маси і вартості ЕТС магнітопроводу m_{mij} і C_{mij} та міді (алюмінію) розрахункових обмоток $m'_{oijcu(al)}$ і $C'_{oijcu(al)}$, варіантів однофазної (трифазної) ЕМС (табл. 16.1) визначаються рівняннями [84-86]:

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

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

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

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

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

Рівняння маси (вартості) (2.19) варіантів однофазної (трифазної) ЕМС (табл. 16.1) визначаються на основі (2.23) – (2.26):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Оптимізаційні складові $\Pi^*_{3ijcu(al)}$ ЦФ (2.32), як і показники маси і вартості (2.20) є залежними від основних безрозмірних геометричних КЗ λ_B і a_M та є залежними, в деяких ЕМС, від додаткової безрозмірної тригонометричної КЗ $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c (рис. 16.16, б). Крім того, оптимізаційна складова, тобто показник втрат активної потужності $\Pi^*_{3ijcu(al)}$ є залежною від однієї (двох у випадку наявності в ЕМС як мідної так і алюмінієвої обмоток) відносної електромагнітної (електромагнітних) КЗ втрат $K_{pcu(al)}$

$$\Pi^*_{3ijcu(al)} = f_{3ijcu(al)} \left[K_{zo}, \lambda_B, a_M, t(\alpha_c), K_{pcu(al)} \right]. \quad (2.33)$$

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

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

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

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

$$F'_{3ijcu}(al) = P'_{\Sigma ijcu}(al) = P_{\text{нijcu}(al)} + P'_{\text{кijcu}(al)} \equiv \Pi^*_{3ijcu}(al), \quad (2.35)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
K_{pсu3} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24; \\
K_{pal1} &\geq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,1 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 3; \\
K_{pal2} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,8 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 8; \\
K_{pal3} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (2,7 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24.
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Результати чисельних оптимізаційних розрахунків екстремумів показників маси $\Pi_{1ппсу(al)}^*$, вартості $\Pi_{2ппсу(al)}^*$ і втрат активної потужності $\Pi_{3ппсу(al)}^*$ планарної ЕМС (рис. 2.11, а, б) при значеннях $\lambda_{ве}$, $a_{ме}$, $\alpha_{се}$, що відповідають кожному окремому критерію та наведені в [21, 22], подано в табл. 16.2, – табл. 16.5. Вказані розрахунки, а також аналогічні розрахунки розділів 3, 4, 5 дисертаційної роботи, виконані при $K_{зс}=0,97$ ($\delta_c=0,35$ мм), і $K_{зо}=0,3-0,15$, (клас напруги від 1 до 110 кВ [113]) та проєктних діапазонних змінах КЗ $K_{pсу(al)}$ (2.36), (2.37).

Таблиця 16.2 – Екстремуми показника маси та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

$K_{зо}$	Екстремальні значення керованих змінних			$(\Pi_{1ппсу}^*)_e$	Екстремальні значення керованих			$(\Pi_{1ппал}^*)_e$
	$\lambda_{ве}$, в.о.	$a_{ме}$, в.о.	$\alpha_{се}$, град.		$\lambda_{ве}$, в.о.	$a_{ме}$, в.о.	$\alpha_{се}$, град.	
0,3	2,76	2,11	50,9	27,8	2,73	3,46	50,4	16,8
0,25	2,75	2,27	50,8	29,4	2,72	3,74	50,3	17,9
0,15	2,74	2,8	50,6	34,5	2,71	4,7	50,2	21,8

Таблиця 16.3 – Екстремуми показника вартості та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної обмотки

K _{зо}	Екстремальні значення керованих змінних						(Π* _{2пссу}) _e		
	C _{су} /C _{ст}								
	3,5			5,5			C _{су} /C _{ст}		
	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	3,5	4,5	5,5
0,3	2,8	1,345	51,5	2,81	1,16	51,7	51,7	59,34	66,2
0,25	2,79	1,43	51,4	2,81	1,23	51,6	53,9	61,60	68,7
0,15	2,77	1,71	51,2	2,79	1,46	51,3	60,9	69,17	76,5

Таблиця 16.4 – Екстремуми показника вартості та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

K _{зо}	Екстремальні значення керованих змінних						(Π* _{2ппал}) _e		
	C _{ал} /C _{ст}								
	3			4,7			C _{ал} /C _{ст}		
	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	3	3,8	4,7
0,3	2,76	2,19	50,9	2,77	1,85	51,0	26,6	29,65	32,8
0,25	2,75	2,36	50,78	2,76	2,01	50,9	28,1	31,26	33,8
0,15	2,74	2,91	50,5	2,75	2,42	50,8	33,2	36,63	40,1

Таблиця 16.5 – Екстремуми показника втрат та керованих змінних трифазної планарної стрижневої електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами стрижнів та котушок мідної і алюмінієвої обмоток

K _{зо}	Екстремальні значення геометричних керованих змінних при величині K _{рсu(al)}									(Π* _{3пссу(al)}) _e		
	3			8			24					
	λ _{ве}	a _{ме}	α _{се}	λ _{ве}	a _{ме}	α _{се}	λ _{ве}	a _{ме}	α _{се}	3	8	24
	в.о.	в.о.	град.	в.о.	в.о.	град.	в.о.	в.о.	град.			
0,3	2,79	1,49	51,36	2,81	1,09	51,79	2,84	0,82	52,23	64,8	110,8	215,0
0,2	2,78	1,59	51,27	2,81	1,15	2,81	2,84	0,85	52,17	67,8	114,5	219,9
0,1	2,77	1,92	51,03	2,79	1,35	51,49	2,83	0,97	51,97	77,5	126,9	236,3

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

фактично її оптимізаційної складової $\Pi_{kijcu(al)}^*$, забезпечується певним (правильним) розташуванням на схемі (кресленні) ЕМС, зокрема (рис. 16.16), розрахункових діаметрів D_{1ij} , D_{2ij} .

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

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

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

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

При оптимізаційному зіставленні варіантів ЕМС однофазного трансформатора за базову прийнята традиційна конструкція з прямокутними УК та стрижневим шихтованим магнітопроводом структури (рис. 16.1, а). При оптимізаційному зіставленні варіантів ЕМС трифазних трансформатора і реактора за базові прийняті традиційні конструкції з прямокутними і круговими УК обмоткових котушок та перерізів стрижнів і ярем стрижневих шихтованих магнітопроводів (рис. 16.16, б, в).

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

На додаток до структурно-параметричного синтезу ЕСП, на основі застосування складових рівнянь (2.19), (2.23), (2.25), (2.32), можливо визначення та співставлення їх теплового стану [87]. Застосовується рівняння перевищення температури $\Delta Q_{ijcu(al)}$ або середнього теплового навантаження $P_{wijcu(al)}$ обмоток відповідно ЕМС малопотужних і силових розподільчих ЕСП [52, 53]:

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

$$P_{wvijcu(al)} = P'_{kijcu(al)} / S_{wvijcu(al)}, \quad (2.42)$$

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

$$P_{k(n)vijcu(al)} = f_{k(n)} \left(\Pi_{ij}, K_{30}, a_M, \lambda_B, t(\alpha_c), K_{pcu(al)} \right);$$

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

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

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

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

де K_B – коефіцієнт співвідношення вартості ЕСП і його ЕМС.

В цілому основною перевагою застосованого методу складання ЦФ [84-87] є можливість узагальненого структурного синтезу ЕМС без об'єднання в єдиному обчислювальному процесі структурного і структурно-параметричного синтезу. Фактично екстремум показника $\Pi_{1(2)ijcu(al)}^*$, який є незалежним від рівня та співвідношення ЕМН, визначає оптимальні геометричні співвідношення ЕМС за критерієм мінімуму маси (вартості). Це значно спрощує параметричний синтез. Необхідність деякої зміни K_{30} в процесі розкладання обмотки при детальному проектуванні, корегування величин і співвідношень ЕМН при перевірці проєктних обмежень та врахуванні неповного завантаження ЕСП при параметричному синтезі, а також зміна вартості матеріалів в залежності від

потужності ЕСП, класу нагрівостійкості і інших чинників, не протирічить висновкам структурного синтезу. Це обумовлено тим, що показники $\Pi_{kijcu(al)}^*$ визначаються в проєктних діапазонах змін K_{zo} , співвідношень $C_{cu(al)}/C_{st}$ і рівня та співвідношення ЕМН, тобто КЗ $K_{pcu(al)}$. Іншими перевагами застосованого методу є універсальність і мінімальна кількість відносних КЗ $a_m, \lambda_b, t(\alpha_c), K_{pcu(al)}$, а також представлення ММ ЕМС у вигляді одного цілісного рівняння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А. В. Иванов-Смоленский и др. *Электропанорама*. 2001. №1. С. 14-15.
2. Шидловський А. К., Федоренко Г. М. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990-2000 р. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 1. С. 3-12.
3. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов (перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди, тема «В» совместного с Европейской комиссией проекта № STR – 1678 – 98 – BE) / пер. с англ. Е. В. Мельниковой ; под. ред. С. Ионова. *Энергосбережение*. 2003. № 6. С. 66-70.
4. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
5. Ставинский А. А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики. *Электротехника и электромеханика*. 2004. № 1. С. 57-61.
6. Белкин, Г. О первых шагах в реформированной электроэнергетике / Г. Белкин, А. Дробышев, В. Ивакин [и др.] // *Электроцех*. – 2008. – №9. – с. 13-16.
7. Ставинский А. А., Плахтырь О. О., Ставинский Р. А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. №4. С. 79-82.
8. Пуйло Г. В., Трищенко Е. В., Кокуца Н. М. Показатели конструктивной эффективности силовых трансформаторов. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2004. № 63. С. 94-98.
9. Чайковский В. П., Матухно В. А., Игнатенко С. А. Параметры энергоэффективных электромагнитных устройств при различных эксплуатационных нагрузках. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. № 66. С. 33-34.
10. Пуйло Г. В., Кузьменко И. С., Тонгалюк В. В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. №2. С. 48-52.
11. Коновалов О. А., Подячев В. Н. Основные требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях. *Енергетик*. 2010. № 8. С. 29-31.
12. Ставинский А. А., Тищенко И. А., Зеленый Н. И. Перспективы и особенности дальнейшего совершенствования индукционных

электромеханических и статических преобразователей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2010. № 1(77). С. 64-69.

13. Канарейкин А. "Умные" трансформаторы для "Умной" энергетики. *Энергетика и промышленность*. 2012. №8 (196).

14. Khatri A., Rahi O. P. Optimal design of transformer: A Compressive bibliographical survey. *International Journal of scientific Engineering Technology*. 2012. April. P. 159-167.

15. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов : учебное пособие. Москва : Альянс, 2013. 528 с.

16. Кравченко А., Метельский В. Сухие энергоберегающие трансформаторы. *Электрик. Международный электротехнический журнал*. 2013. № 4. С.12-15.

17. Кравченко А., Метельский В. Масляные энергоберегающие трансформаторы. *Электрик. Международный электротехнический журнал*. 2013. №5. С.14-17.

18. Левин М. И., Пентегов И. В., Римар С. В., Лавренюк А. В. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трансформаторов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2014. № 7. С. 40-44.

19. Amadi -Echendu J. E., Mafutsana J. M. A bibliographic review of trends in design and managment of electrical power transformers. *Proceedings of the 2016 International conference on Industrial Engineering and Operations Menegment* (Cuala Lumpur, March 10, 2016). Malaysia, 2016. P. 2010-2018.

20. Костинский С. С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкций силовых трансформаторов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. №1-2. С. 14-32.

21. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (масовартістні показники) / А. А. Ставинський та ін. *Вісник НТУ "ХПІ". Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2019. № 4 (1329). С. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295.2019.4.05.

22. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів шихтованих магнітопроводів (втрати активної потужності) / А. А. Ставинський та ін. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2019. № 4 (1329). С. 38-43. DOI: 10.20998/2409-9295.2019.4.06.

23. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследования по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 1. С. 53-60.

24. Лазарев В. І. Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення) : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Лазарев Віктор Іванович ; НАН України, Інститут електродинаміки. - К., 2006. - 37 с.
25. Лурье А. И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. *Знак*. 2005. 520 с.
26. Крюков Д. О., Манусов В. З. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками. *Электричество*. 2019. № 8. С. 4-16.
27. Пентегов И. В., Рымар С. В., Лавренюк А. В., Петриенко О. И. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами. *Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2002. № 14. С. 86-97.
28. Marketos Ph., Meydan T. Novel Transformer Core Design Using Consolidated Stacks of Electrical steel. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006. Vol. 42, №10. P. 2821-2823.
29. Ставинский А. А. , Ставинский Р. А., Плахтырь О. О., Цыганов А. Н. Направление усовершенствования индукционных статических устройств на основе электромагнитных систем с многоплоскостными образующими поверхностями и метод их структурной оптимизации. *Вісник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2008. № 40. С. 115-124.
30. Ставинский А. А., Ставинский Р. А. Классификации структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. № 2. С. 53-58.
31. Kefalas T. D. Transformers made of composite magnetic cores: An innovative design approach. *Recent Patents on Electr. Eng.* 2009. Vol 2. №1. P. 1-12.
32. Ставинский Р. А. Нетрадиционные технические решения, постановка задач и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств. *Вісник КДУ ім. М. Остроградського*. 2010. Вип. 4., Ч. 2. С. 91-94.
33. Ставинский Р. А., Цыганов А. Н. Варианты структур индукционных статических устройств с многогранными образующими контурами электромагнитных систем. *Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Севастополь : Сев НТУ, 2010. С. 30-31.
34. Матухно В. А. Методика оценки технологичности навивки магнитных систем трансформаторов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. №2(78). С. 48-54.

35. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами). *Електротехніка та електромеханіка*. 2011. № 5. С. 43-47.

36. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами). *Електротехніка та електромеханіка*. 2011. № 6. С. 33-38.

37. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Цыганов А. Н. Сравнительный анализ массостоймых показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2012. № 5 (81). С. 106-112.

38. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Цыганов А. Н. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2012. №7 (77). С. 47-52.

39. Kefalas T.D., Kladas A.G. Development of Distribution Transformers Assembled of Composite Wound Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48, no. 2, P. 775-778. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172976>.

40. 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.

41. Левин М. И., Пентегов И. В., Рымар С. В., А. В. Лавренюк. Новые подходы при построении магнитопроводов силовых трансформаторов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 1. С. 20-24.

42. Ставинский Р. А., Цыганов А. Н. Сравнительный анализ массостоймых показателей однофазных стержневых электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами. *Вісник НТУ "ХПІ". Сер: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2015. № 5 (1114). С. 91-95.

43. Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers / S. Magdaleno-Adame et al. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2015. Vol. 26, no. 8. P. 1737-1751. URL: <https://doi.org/10.1002/etep.2175>

44. Electromagnetic finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers / S. Magdaleno-

Adame et al. 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 8–10 November 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/ropec.2017.8261585>

45. Stavinskiy A., Plarhtyr O., Tsyganov A., Stavinskiy R. Possibilities of improving the transformers and reactors on the basis of multiple counters of the rods. *International Conference on modern electrical and energy systems. IEEE*. 2017. P. 176-179 (Scopus).

46. Технические решения трехфазного маломагнитного компактного трансформатора / А. А. Ставинский та ін. *Вісник НТУ "ХПІ". Сер: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. Харків : НТУ "ХПІ". 2018. № 5 (1281). С. 116-122.

47. Dependence of the Indicators of Three-phase Transformers with Planar Plate Magnetic Wires from Variants of Rod Configuration / A. Stavinskiy and etc. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES*. 2019. № 8896451. P. 102-105. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896451. (Scopus).

48. Циганов О. М. Залежність показників трифазних трансформаторів і реакторів від заповнення сталлю кругових і восьмигранних контурів стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів. *Вісник НТУ "ХПІ". Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2020. №3 (1357). С. 15-23. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.03

49. Циганов О.М. Удосконалення трифазних реакторів з планарними шихтованими магнітопроводами на основі шестигранних контурів стрижнів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 1(120) С. 160-165. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.1.160-165

50. Циганов О. М. Напрямок удосконалення трансформаторів на основі секціонування та комбінації марок сталі шихтованих магнітопроводів. *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки* : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК. 2020. С. 28-30.

51. Ставинский А. А., Цыганов А. Н. Конструктивно-технологические предложения усовершенствования однофазного трансформатора с шихтованным магнитопроводом. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. №6. С. 11-17. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.6.02. (Web of Science)

52. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. *Энергия*. 1970. 432с.

53. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. *Советское радио*, 1971. 720 с.

54. Магнітопроводи силових трансформаторов (технологія і обладнання) / А. И. Майорец и др. *Энергия*, 1973. 272 с.

55. Flanagan W. M. Handbook of transformers desing and application. Boston : Mc Graw Hill, 1993. 232 p.
56. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. Transformer Engineering: Design and Practica. New. Marcel dekker, 2004. 452 p.
57. Белопольский И. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Альянс, 2013. 400 с.
58. Arnold R., Heathcote M. J. Transformer Book. GB Elsevier Science & Technology, 2016. 1008 p.
59. Almen J., Breitholte M. Performance evolution of amorphous hexa-core for distribution transformers Department of Materials and Manufacturing Technology. *Division of High Voltage Engineering Chalmers university of Technologi*. Gothenburg. Sweden, 2012. 40 p.
60. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломощном исполнении / В.С. Лупиков, А.Г. Серeda, И.В. Крюкова [и др.] // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2004. – №2. – с. 26-33.
61. ДСТУ 2465 – 94. Сумісність технічних засобів. Електромагнітна стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. – [Чинний від 01–01–95]. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. – (Національний стандарт України).
62. Рогинская Л. Э., Гусаков Д. В. Имитационное моделирование и экспериментальное исследование трехфазного трансформатора с витыми ленточными плоскими и пространственными магнитопроводами. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика"*. Т. 14, №4. С. 76-82.
63. Пуйло Г. В., Суханов В. М., Чайковский В. П. Автоматизация проектирования силовых трансформаторов на основе поэтапной оптимизации. *Электромашиностроение и электрооборудование*. 1982. Вып. 34. С. 53-58.
64. Бородулин Ю. Б., Гусев В. А., Попов Г. В. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов. Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
65. Бородулин Ю. Б., Мостейкис В. С., Попов Г. В., Шишкин П. П. Автоматизированное проектирование электрических машин. Высшая школа. 1989. 279 с.
66. Пуйло Г. В. Построение обобщенных математических моделей трансформаторных устройств. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 1996. № 48. С.89-96.
67. Пуйло Г. В. Оптимальные соотношения размеров элементов активной части электромагнитных преобразователей. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 1998. Вип. 51. С. 25-29.

68. Андронов С.А. Методы оптимального проектирования: лекция. Санкт-Петербург : ГуАП, 2001. 169 с.
69. Пентегов И. В., Рымар С. В., Стемковский Е. П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2002. Вип. 1. С. 22-28.
70. Пуйло Г. В., Левин Д. М., Трищенко А. В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 1 С. 49-52.
71. Чайковський В. П., Матухно В. А., Трищенко О. В. Визначення властивостей оптимізаційної позіноміальної математичної моделі силових трансформаторів. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2005. Вип. 64. С. 89-91.
72. 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.
73. Amairalis E. I., Georgilakis P. S. Methodology for the Optimum Design of Power Transformers Using Minimum Number of Input. *ICEM*. 2006. №470. P. 1-6.
74. Рымар С. В. Оптимизация трехфазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 4. С. 30-32.
75. Пентегов И. В., Рымар С. В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов. *Електричество*. 2006. № 3. С. 35-47.
76. Пуйло Г. В., Кузьменко И. С. Математическая модель силового трансформатора, инвариантная к форме поперечного сечения магнитной системы. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2008. Вип. 71. С. 56-60.
77. Матухно В. А. Проектирование оптимальных трансформаторов для различных эксплуатационных нагрузок. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2009. Вип. 73. С. 97-101.
78. Пуйло Г. В., Кузьменко И. С. Концепция программного обеспечения для исследовательского проектного синтеза трансформаторов на основе инновационных технических решений. *Труды Одесского политехнического университета*. 2010. Вип. № 1(33), №2(34). С. 105-111.
79. Загирняк М. В., Прус В. В. Критерии рационального выбора электрических машин, аппаратов, трансформаторов и их серий. Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. *Наука, освіта і практика*. 2011. №1(1). С. 240-241.

80. Загирняк М. В., Прус В. В., Невзлин Б. И. Оценка трансформаторов и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера. *Электротехника и электромеханика*. 2012. № 4. С. 36-40.

81. An innovative technique for design optimization of core type 3-phase distribution transformer using mathematica / A. M. Muhammad and etc. *Global Journal of Technology and Optimization*. 2012. № 3. P. 30-35.

82. Попова Т. В., Попов С. Н. Системный многофакторный анализ расчета конструктивных параметров сварочных реакторов на основе целевых функций. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. №3/9(63). С. 19-24.

83. Пуйло Г. В., Насыпанная Е. П. Оптимальный проектный синтез трансформаторов с комбинацией обмоток из различных проводниковых материалов. *Електротехнічні і комп'ютерні системи*. 2014. № 16(92) С. 59-64.

84. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований. *Електричество*. 2014. №9. С. 34-43.

85. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 2. Примеры структур и результатов преобразований. *Електричество*. 2014. № 10. С. 28-34.

86. 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 "ХПИ". Збірник наукових праць. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2016. № 11 (1183). С.70-79.

87. Анализ целевых функций и управляемых переменных оптимизационных расчетов трансформаторов и реакторов / А. А. Ставинский и др. *Сучасні проблеми автоматики та електротехніки* : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. Миколаїв : НУК, 2018. С. 45-49.

88. Mufuta J. M., Van Den Bulck E. Modelling of the mixed convection in the windings of a disc-type power transformer. *Applied Thermal Engineering*. 2000. № 20. P. 417-437.

89. Holtshausen C. B. Transformer Thermal Modelling, Load Curve Development and Life Estimation. *R&D Journal of the South Africa institution of mechanical engineering*. 2015. Vol. 31. P. 12-16.

90. Matukhno V., Baidak Yu., Chaikovskiy V. Energy efficient transformers with various load graphics for the consumers of electric power. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. Т. 52, Вип. 2. С. 34-39.

91. Baidak Y., Matukhno V., Belikova L. Oil Movement in Closed Environment of Distribution Transformer Tank Problem Simulation. *Transylvanian Review journal*. 2016. Vol. 26. №11.

92. Матухно В. А., Байдак Ю. В., Томлейн П. Моделювання поля температури розподільчого трансформатора. *Холодильна техніка та технологія*. 2017. Т. 53, Вип. 2. С. 29-38.

93. Бальян Р. Х., Обрусник В. П. Аналитический метод геометрический оптимизации ферромагнитных устройство. *Электричество*. 1979. №9. С. 40-46.

94. Макарова А. В. Оптимальные соотношения размеров трансформаторов с магнитопроводом прямоугольного сечения. *Электротехника*. 1988. № 7. С. 2-6.

95. Баев Н. Г. Трансформаторы с оптимальной геометрией сердечников. *Электричество*. 1991. № 2. С. 74-75.

96. Плахтир О. О. Удосконалення трифазних трансформаторів з просторовими магнітопроводами : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Олег Олегович Плахтир ; Одеський національний політехнічний ун-т. Одеса, 2005. 24 с.

97. Авдєєва О. А. Трифазні трансформатори для встановлення в обмежені об'єми об'єктів підводної техніки : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.01 / Олена Андріївна Авдєєва ; Одеський національний політехнічний університет. Одеса. 2015. 21с.

98. Пальчиков О. О. Оптимізація технічного рівня індукційних електромеханічних та статичних перетворювачів з обертовим магнітним полем : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05. 09.01 / Олег Олегович Пальчиков ; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2017. 22с.

99. Садовий О. С. Структурний синтез електромагнітних систем однофазних трансформаторів і реакторів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Олексій Степанович Садовий ; Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Кременчук. 2019. 20с.

100. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Киев, 1995. 42 с.

101. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів. Електромагнітна стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Чинний від 01-01-95. Київ : Держстандарт України, 1994. 29 с. (Національний стандарт України).

102. Лупиков В. С., Середа А. Г., Крюкова И. В., Гелярская О. А. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломагнитном исполнении. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 2. С. 26-33.

103. Пат. 99327 Україна МПК H01F27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою / А. А. Ставинський та ін. ; НУК імені адмірала Макарова. №u201414182; заявл. 30.12.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10.

104. Пат. 121405 Україна МПК H01F3/00. Планарний магнітопровід індукційного статичного пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов, О. С. Циганова ; НУК імені адмірала Макарова. №u201703883; заявл. 19.04.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. №23. 8 с.

105. Пат. №100077 Україна МПК H01F27/24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. С. Садовий, О. М. Циганов ; НУК імені адмірала Макарова. №a201104987; заявл. 20.04.2011; опубл. 26.12.2011. Бюл. №21. 8 с.

106. Лазарев В. І. Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення) : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.09.01 / Віктор Іванович Лазарев ; НАН України, Інститут електродинаміки. Київ, 2006. 37 с.

107. Пат. №39631 Україна МПК H01F27/28 H01F27/30 H01F27/32. Обмотка статичного індукційного пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов ; НУК імені адмірала Макарова. №u200809425; заявл. 18.07.2008; опубл. 10.03.2009. Бюл. №5. 3 с.

108. Пат. №136570 Україна МПК H01F27/24. Магнітопровід трансформатора: / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. М. Циганов, Р. А. Ставинський, О. С. Садовий, Л. В. Вахоніна. ; Миколаївський національний аграрний університет. №u201902188. заявл. 04.03.2019 ; опубл. 27.08.2019. Бюл. № 16. 6 с.

109. Пат. №136320 Україна МПК H01F27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу індукційного статичного пристрою / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. М. Циганов, Р. А. Ставинський, О. С. Садовий, Л. В. Вахоніна. №u201902188. заявл. 13.03.2019. Бюл. 15. 9с.

110. Ермолин Н. П. Расчет трансформаторов малой мощности. Ленинград : Энергия, 1970. 190 с.

111. Зенова В. П., Лурье А. И. Об электродинамической эффективности трансформаторов с алюминиевыми обмотками. *Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях*. Знак, 2005. С. 348-355.

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

113. Рабинович С. И. Условия соразмерности и коэффициент полезного действия трансформаторов. *Электричество*. 1946. №6. С. 27-33.

114. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. ВНИИ стандартэлектро, 1989. 23 с.

Наукове видання

Ставинський Андрій Андрійович

Авдєєва Олена Андріївна

Ставинський Ростислав Андрійович

Циганов Олександр Миколайович

**ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПРИКЛАДИ РІШЕННЯ
ВИНАХІДНИЦЬКИХ, ПОЛЬОВИХ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ
ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

Монографія

Редактор: А. А. Ставинський

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.