

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонська філія**

Енерготехнічний факультет
Кафедра автоматики та електроустаткування

Рекомендовано до захисту
Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування
_____ Михальченко П.Є.
«____» _____ 2020 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: Удосконалення обладнання водолазного комплексу на основі
спеціального виконання трансформатора електроживлення підводної
спускової камери

Виконав: здобувач VI курсу, групи 6367зм
за спеціальністю: 141 "Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма:
«Експлуатація суднових автоматизованих
систем»

(назва)

Пугачов Р.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Ставинський Р.А.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шарейко Д.Ю.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

м. Херсон – 2020 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Херсонська філія

Інститут, факультет Енерготехнічний

Кафедра Автоматики та електроустаткування

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий (магістерський)

Галузь знань 14 "Електрична інженерія"

(шифр і назва)

Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма "Експлуатація суднових автоматизованих систем"

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування**

Михальченко П.Є.

“ _____ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Пугачов Роман Олегович

1. Тема роботи: Удосконалення обладнання водолазного комплексу на основі спеціального виконання трансформатора електроживлення підводної спускової камери.

Науковий керівник: к.т.н., доцент Ставинський Р.А.

Затверджена наказом ХФНУК від _____ року № _____.

2. Строк подання студентом роботи:

3. Об'єкт дослідження: трансформатор потужністю $S_n = 4,3$ кВА, кількістю фаз $m = 3$, первинна та вторинна напруги: $U_1 = 220$ В; $U_2 = 27$ В.

4. Предмет дослідження: показники технічного рівня варіантів трансформаторів з традиційною і перетвореною структурою активних елементів.

5. Зміст пояснювальної записки (перелік задач, які потрібно вирішити):

5.1. Обладнання для засвоєння океану та підводних робіт.

5.2. Вибір системи електричного живлення та визначення потужності трансформатора спускової камери.

5.3. Трифазні трансформатори малої потужності та питання їх удосконалення.

5.4. Розрахунок трансформатора з просторовим магнітопроводом.

5.5. Охорона праці.

5.6. Охорона навколишнього середовища.

Перелік графічного матеріалу:

1. Головні частини суднового глибоководного комплексу.
2. Схеми запуску електродвигунів.
3. Склад силового електрообладнання підводної спускової камери.
4. Активна частина планарного трансформатора.
5. Класифікація симетричних просторових магнітопроводів для трифазних трансформаторів.
6. Варіант конфігурації і геометричні параметри магнітопроводу з трикутним внутрішнім контуром.
7. Трифазний трансформатор з просторовим магнітопроводом.
8. Розподіл індукції в стиковому технологічному зазорі.

Дата видачі завдання: __.__.20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання випускної роботи

Найменування розділів	Строк виконання	Відмітка про виконання
1. Обладнання для засвоєння океану та підводних робіт.		
2. Вибір системи електричного живлення та визначення потужності трансформатора спускової камери.		
3. Трифазні трансформатори малої потужності та питання їх удосконалення.		
4. Розрахунок трансформатора з просторовим магнітопроводом.		
5. Охорона праці.		
6. Охорона навколишнього середовища.		

Здобувач _____ Пугачов Р.О.
(підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н., доц. Ставинський Р.А.
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАСВОЄННЯ ОКЕАНУ ТА ПІДВОДНИХ РОБІТ	8
1.1. Основні напрямки розвитку систем та приладів освоєння океану і склад систем глибоководних комплексів.....	8
1.2. Особливості обладнання глибоководних комплексів	13
1.3. Висновки до розділу 1	21
Розділ 2. ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА СПУСКОВОЇ КАМЕРИ	22
2.1. Силове електрообладнання глибоководної водолазної камери	22
2.2. Варіанти електропостачання підводної камери та визначення потужності трансформатора	24
2.3. Висновки до розділу 2	29
Розділ 3. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПИТАННЯ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ	30
3.1. Конструктивно-технологічні рішення магнітопроводів	30
3.2. Обґрунтування зниження масогабаритних показників просторових трансформаторів	43
3.3. Визначення та обґрунтування технології виготовлення просторових магнітопроводів	48
3.4. Висновки до розділу 3	55
Розділ 4. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА З ПРОСТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ	56
4.1. Вибір електромагнітних навантажень і розрахунок головних розмірів	56
4.2. Розрахунок розподілу індукції в технологічному зазорі та струму неробочого руху	62

4.3. Визначення утрата короткого замикання та характеристик	72
4.4. Розрахунок маси активної частини планарного трансформатора	77
Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	81
5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних при експлуатації підводних апаратів	81
5.2. Розрахунок загального штучного освітлення лабораторії	86
5.3. Розробка заходів щодо забезпечення пожежобезпечності в лабораторії	88
Розділ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	89
6.1. Аналіз основних шкідливих факторів, що впливають на забруднення океану	90
6.2. Заходи щодо запобігання забруднення світового океану	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	95
ЛІТЕРАТУРА	96

ВСТУП

В загальній системі технічних засобів дослідження й освоєння морських глибин особливе місце займає порівняно нова і своєрідна техніка, призначена для підготовки та забезпечення життя і діяльності людей під водою. Однак розглядати цю техніку потрібно в комплексі з іншими технічними засобами, з якими вона взаємодіє в рішенні загальних задач підводних досліджень [1].

Може виникнути питання, чи варто витрачати сили і засоби на забезпечення безпосереднього проникнення людини в морські глибини для життя і роботи? Чи не простіше віддати перевагу автоматам, телекерованим маніпуляторам і роботам? Вони не вимагають дорогих систем життєзабезпечення, не стомлюються, переносять будь-які гідростатичні тиски і не мають потребу в процедурах тривалої і неекономічної декомпресії. Але при більш глибокому міркуванні стає очевидною обмеженість можливостей «неживої» техніки там, де людина, оснащена необхідними приладами і робочими інструментами здатна швидко реагувати на обстановку, що змінюється, діє дуже ефективно.

Але для перебування людини в іншому життєвому середовищі, потрібні зовсім нові технічні засоби, які відмінні від застосовуваних на загальному виробництві, та які за складністю можуть бути порівнянні з космічною технікою.

Актуальність теми. В електротехнічних системах і комплексах різноманітних галузей промисловості використовуються трифазні трансформатори малої та середньої потужності, дроселі і реактори. До вказаних електромагнітних пристроїв, призначених для використання на транспортних засобах, особливо морського і авіаційно-космічного призначення, ставляться особливі вимоги. Вказаними вимогами є: мінімальні масогабаритні та підвищені енергетичні показники, а також висока надійність. У цілому на виробництво електромагнітних пристроїв щороку витрачаються тисячі тонн дорогої електротехнічної сталі та обмоткової міді. Тому розробка та виробництво трифазних трансформаторів зі зниженими габаритами та матеріалоемністю є дуже важливими і актуальними [2].

Проблему підвищення технічного рівня трифазних трансформаторів можна розв'язати, застосувавши симетричний просторовий магнітопровід. Існуючі схеми просторових магнітопроводів використовуються для трифазних трансформаторів підвищеної потужності і за своїми конструктивно-технологічними особливостями не задовольняють вимоги, які ставляться до трансформаторів спеціального призначення та трансформаторів малої і середньої потужності масового випуску. З метою поліпшення масогабаритних показників шляхом використання просторової схеми активної частини, у виробництві малих трифазних трансформаторів можуть бути використані конструкції магнітопроводів із шестигранним або трикутним внутрішнім контуром зі стержнями конфігурації, яка вписується в секторну форму ярма. При цьому стержні можуть виконуватися зі стрічкових заготовок із трикутним внутрішнім контуром, з концентричних заготовок з круглим внутрішнім контуром або мати іншу конфігурацію.

Мета і задачі дослідження. Метою дипломної роботи є аналіз та обґрунтування засобів електропостачання спускової підводної камери і, головне, розробка та порівнювальний аналіз варіантів трансформатора вказаної системи.

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

- аналіз обладнання барокамери і підводної спускової камери водолазного комплексу;
- удосконалення конструктивних і схемотехнічних рішень обладнання камер водолазного комплексу;
- аналіз структурних схем трифазних силових трансформаторів;
- обґрунтування конструкторсько-технологічних рішень трансформатора спеціального виконання;
- розрахунок варіантів трифазного трансформатора класичної та нетрадиційної конструкції.

Також в роботі розглянуті екологічні питання та питання охорони праці при виробництві та експлуатації трифазних трансформаторів.

Об’єкт дослідження – просторові електромагнітні системи трифазних трансформаторів загальнопромислового призначення.

Предмет дослідження – показники технічного рівня варіантів електромагнітних систем трифазних трансформаторів з традиційною і перетвореною структурою і конфігурацією активних елементів.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач були використані теорія електромагнітних перетворювачів, метод експертної оцінки, метод побудови математичних моделей з узагальненими цільовими функціями, що містять безрозмірні показники технічного рівня та універсальні відносні геометричні керовані змінні.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено вплив заміни силового трифазного трансформатора системи електроживлення підводної спускової камери класичного виконання на просторовий з шестиграним внутрішнім контуром.

Розділ 1. ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАСВОЄННЯ ОКЕАНУ ТА ПІДВОДНИХ РОБІТ

1.1. Основні напрямки розвитку систем та приладів освоєння океану і склад систем глибоководних комплексів

В даний час у зв'язку з практичним освоєнням океану, тобто підводному видобутку нафти, газу й інших корисних копалин, збільшенням обсягу підводних будівельно-монтажних робіт виявилася потреба створення й інтенсивного удосконалення спеціальних підводних технічних засобів.

За призначенням розрізняють наступні технічні засоби: для профілювання морського дна, добору проб і натурних іспитів ґрунтів; розробки ґрунтів і твердих корисних копалин; видобутки і транспортування нафти і газу; підводних будівельно-монтажних робіт; виконання підводно-технічних робіт загального призначення [3].

У створенні та розвитку підводних комплексів намітилося два напрямки: переустаткування існуючої наземної і плавучої техніки і розробка принципово нових засобів. Як у тім, так і в іншому випадку в основу розробок покладені відомості про особливості їхньої роботи в умовах значного гідростатичного тиску.

Найбільш перспективною для практичного освоєння частиною дна Світового океану є “шельф”. У перекладі з англійської мови „шельф” означає полку, обмілину, виступ. Під шельфом мають на увазі мілководні зони навколо материків, що простираються від берега до різкого перегину поверхні дна, де воно, круто знижуючи, досягає області великих глибин материкового підніжжя і ложа океану. Середня ширина шельфу 70 км, середня глибина 140 м, а середній ухил 0,08'. Фактична ширина шельфу може коливатися в межах від 1 до 1500 км.

Іноді границя шельфу умовно визначається ізобатою 200 м. Однак у ряді випадків, наприклад в Охотському морі, зовнішній край шельфу лежить на глибинах порядку 2000 м [4].

Шельф є зоною найбільш активної взаємодії океану с континентами. У зв'язку с цим речовинний склад його донних опадів безпосередньо залежить від геологічної будівлі континентів. Відкладення мілководної частини шельфу звичайно представлені пухкими, порівняно мелними й однорідними опадами. За певних умов відбувається концентрація корисних компонентів, що приводить до утворення розсипних родовищ. В районі шельфу маються також значні запаси нафти, газу, будівних матеріалів, добрив, металоносних ілов і т.д. Незважаючи на те, що площа шельфу складає менш 8% від площі Світового океану, на ньому добувається близько 30-35% загальної кількості споживаної нафти [3].

В загальній системі технічних засобів дослідження й освоєння морських глибин особливе місце займає порівняно нова і своєрідна техніка, призначена для забезпечення життя і діяльності людей під водою і для підготовки їх до цього. Однак розглядати цю техніку потрібно в комплексі з іншими технічними засобами, з якими вона взаємодіє в рішенні загальних задач підводних досліджень.

Може виникнути питання, чи варто витрачати сили і засоби на забезпечення безпосереднього проникнення людини в морські глибини для життя і роботи, чи не простіше віддати перевагу автоматам, телекерованим маніпуляторам і роботам? Вони не вимагають дорогих систем життєзабезпечення, не стомлюються, переносять будь-які гідростатичні тиски і не мають потребу в процедурах тривалої і не економічної декомпресії. Але при більш глибокому міркуванні стає очевидної обмеженість можливостей «неживої» техніки там, де людина, оснащена необхідними приладами і робочими інструментами і здатний швидко реагувати на обстановку, що змінюється, діє дуже ефективно.

Рука людини, надзвичайно еластична і реактивна, миттєво виконуючої команди мозку, випереджає маніпулятори. Якщо вона до того ж озброєна робочим інструментом, то водолаз по своїй робочій ефективності, силі і витривалості практично не уступає машині. Головна задача при цьому - розумно організувати роботу і найбільше доцільно розподілити її між людиною і що знаходяться в його розпорядженні механізмами. Уже тепер людина може в принципі досить тривалий час жити і працювати на глибинах порядку 200-300 м, тобто, власне кажучи, здатний

освоїти весь континентальний шельф. Більш того, є підстави думати, що в недалекому майбутньому люди почнуть «обживати» континентальний шельф до 600 м, освоєння якого відкриває широкі перспективи.

Звичайно, якщо прийдеться іти на ще великі глибини, вимірювані тисячами метрів, - наприклад для промислової розробки родовищ залізомарганцевих конкрецій, - то людина повинна буде поступитися місцем автоматам, роботам і маніпуляторам, керованим на відстані. До того часу, імовірно, маніпуляторна техніка вийде з нинішнього ембріонального стану і досягне універсальності, властивій людській руці.

На рис. 1.1 подано діаграму [3-6], яка дає деяке представлення о можливостях людини і техніки в освоєнні морських глибин.

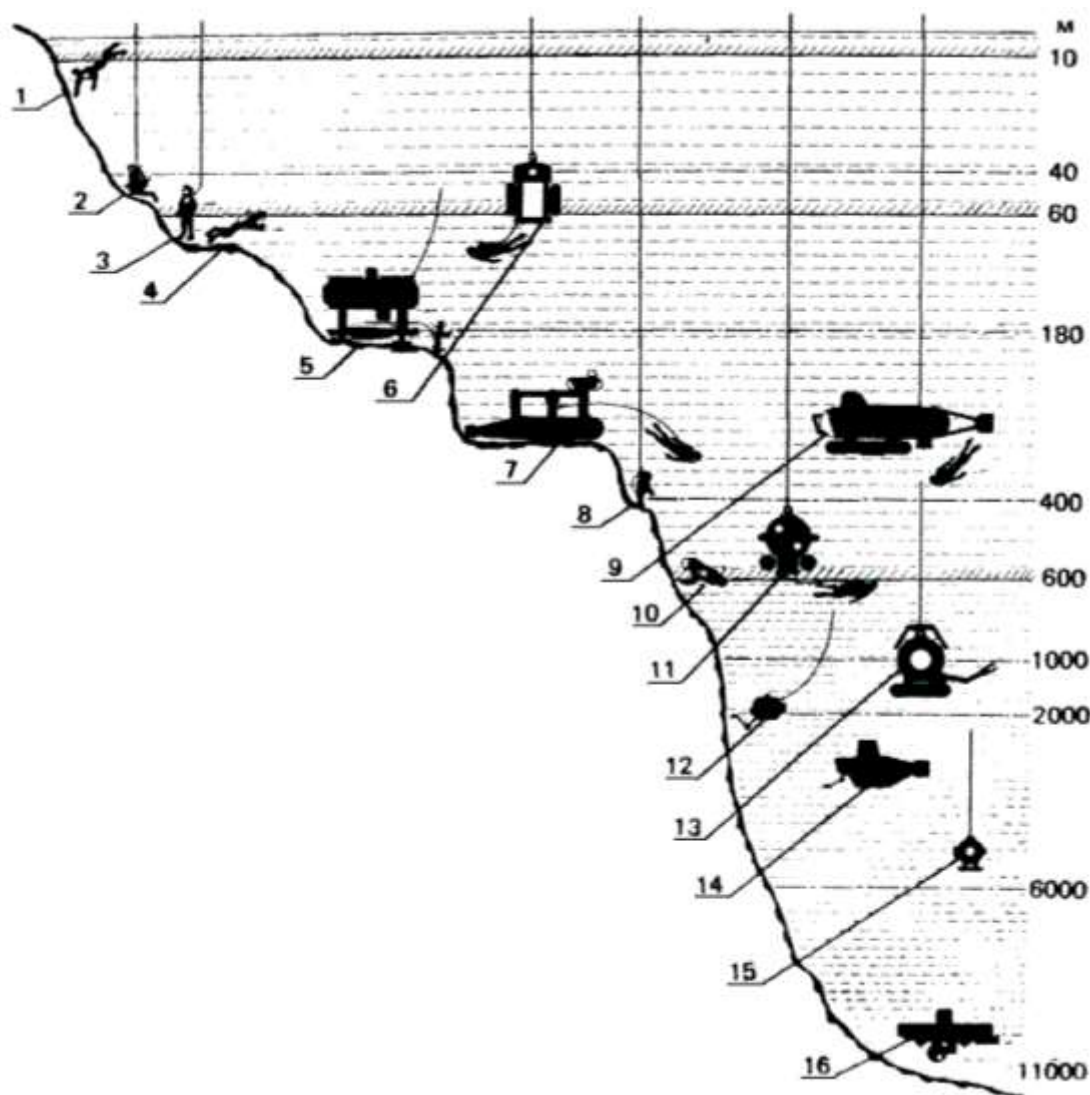


Рис. 1.1. Людина і техніка в морських глибинах

На рис. 1.1. позначено: 1 – водолаз з кисневим дихальним апаратом (можливо багатогодинне перебування до глибини 10 м); 2 – водолаз з дихальним апаратом на стисненому повітрі що надходить з поверхні по шлангу (можливо багатогодинне перебування до глибини 40 м); 3 – водолаз з дихальним апаратом на стисненому повітрі що надходить з поверхні по шлангу (можливо короткочасне перебування до глибини 60 м); 4 – водолаз з дихальним апаратом на стисненому повітрі (можливість спуску без фізичних навантажень на глибини більш 60 м); 5 – підвідні будинки (лабораторії), що забезпечують багатогодинне перебування людей на глибинах до 200 м; 6 – водолазний дзвін з повітряними балонами і шлангами газопостачання (багатогодинне перебування до глибини 60 м); 7 – робочі підводні апарати з водолазними відсіками (тривале перебування на глибинах до 300 м. На менших глибинах можливий вихід людей у воду); 8 – водолази у твердих скафандрах типу “Джим” і “Сем”, пов’язаних з поверхнею (можлива робота на глибині 400 м); 9 – робочі підводні апарати з водолазними відсіками (вихід людей у воду можливий на глибині до 300 м); 10 – антропоморфні одномісні самохідні підводні апарати типу “Уосп” (робота на глибині до 500 м); 11 – герметичні занурювальні камери для глибин до 600 м; 12 – керовані по кабелю компактні апарати із телевізійними системами і робочими маніпуляторами для глибин до 2000 м; 13 – робочі снаряди типу “Армис” з робочими маніпуляторами для глибин до 1000 м; 14 – населені апарати з маніпуляторами для глибин до 6000 м; 15 – спостережливі камери с екіпажем для глибин до 6000 м; 16 – батискафи, розраховані на граничні глибини Світового океану.

Умовимося вважати, що мілководні занурення в межах 50 м досить добре освоєні до дійсного часу, і по тому не будемо зупинятися на них докладно. Інша справа глибини 100, 200, 300 м. для їх «обживанія», крім професійної підготовки водолазів, потрібні спеціальні технічні засоби забезпечення занурення – це насамперед апаратура і системи, що створюють прийнятні умови життєдіяльності. Вони доповнюються великими і складними інженерно-технічними спорудженнями: декомпресійними установками, імітаторами підводних умов, глибоководними камерами, підводними лабораторіями і підводними апаратами.

Швидкий розвиток підводної техніки обумовлено, крім інших факторів, також постійним удосконалюванням різних глибоководних комплексів. Вони, як правило, є частиною складних підводних систем, до складу яких входять барокамери, дихальні апарати, пристосування для підводного плавання, різноманітні «периферійні» пристрої й устаткування (балони, системи газопостачання, лебідки, допоміжні механізми і т.д.). У зв'язку з цим під водолазними камерами, звичайно розуміються герметичні камери, які у більшості випадків не мають пристроїв для руху. Подібні камери опускаються під воду кранами або лебідками, з яких водолаз виходить на дно для роботи [7].

Невиключно, що в деяких випадках такі камери можуть мати гребні гвинти або водометні рушії з електроприводами, що забезпечують їм обмежене горизонтальне переміщення. Камери служать для водолазів засобом доставки їх на дно і повернення на поверхню й у той же час є базою, де вони готуються до роботи під водою та місцем відпочинку в безпосередній близькості від району підводних робіт.

Широке використання герметичних камер, що занурюються, стало можливим головним образом у зв'язку з освоєнням методу занурення людей за умови «насичення» організму штучною газовою сумішшю під тиском (так називаний «насичений» метод). Він дозволяє опускати і піднімати водолазів при будь-якому бажаному тиску усередині камери незалежно від зовнішнього тиску.

Герметична камера служить для водолазів надійним притулком, у якому підтримуються достатня температура, мінімальна вологість і створені відносні зручності.

Можливість установки камери в безпосередній близькості від місця підводних робіт знімає з водолазів додаткові фізичні і психологічні навантаження. Як правило, при невеликих відстанях штучна газова суміш для подиху та електроенергія для обігрівання скафандрів подається водолазам по шлангах прямо з камери.

Звичайно камери мають ілюмінаторні засоби непрямого спостереження, що забезпечують можливість візуального контролю і підстрахування працюючих водолазів персоналом зсередини камер.

Найбільш економічна експлуатація глибоководних камер, пристосованих для «насичених» занурень, особливо якщо групи водолазів впливають одна за іншою. Однак і у всіх інших випадках використання глибоководних камер, дає значний економічний ефект, оскільки підвищується безпечність роботи водолазів.

В даний час більшість підводних робіт на глибинах понад 50м (на морських нафтопромислах, підводних будівельно-монтажних робіт у затонулих кораблів) виконується з використанням глибоководних камер, причому в багатьох випадках це вважається обов'язковим. Можливість спуска глибоководних камер, прямо з берега, з кораблів, чи плотів плавучих бурових платформ перевірена багаторазово, і завжди ці спуски завершувалися успішно.

Варто особливо підкреслити таку обставину, що за допомогою глибоководних камер, здійснюється цілком безпечна доставка людей до місця підводних робіт навіть у штормову погоду й в умовах сильних течій, коли звичайний спуск водолазів сполучений з великим ризиком. Оскільки усередині камери легко регулюється тиск, у будь-який момент гарантується проведення надійної декомпресії.

1.2. Особливості обладнання глибоководних комплексів

Системи водолазного глибоководного комплексу призначені для безпечної доставки водолазів на потрібну глибину та проведення ними глибоководних робіт, а так само для їх безпечного повернення на судно-носії і проведення потрібної декомпресії [5,1]. Основні складові частини суднового водолазного комплексу показано на рис. 1.2. Комплекс складається з лебідки призначений для спуску і підйому водолазної камери; кабель-троса, який служить для електричного і механічного зв'язку підводної камери із судном-носієм; палубної декомпресійної установки, призначеної для проходження декомпресії водолазів; центрального пульта керування, призначеного для керування і контролю за функціонуванням систем життєзабезпечення глибоководного комплексу; установка підготовки гелієво – кисневої дихальної суміші.

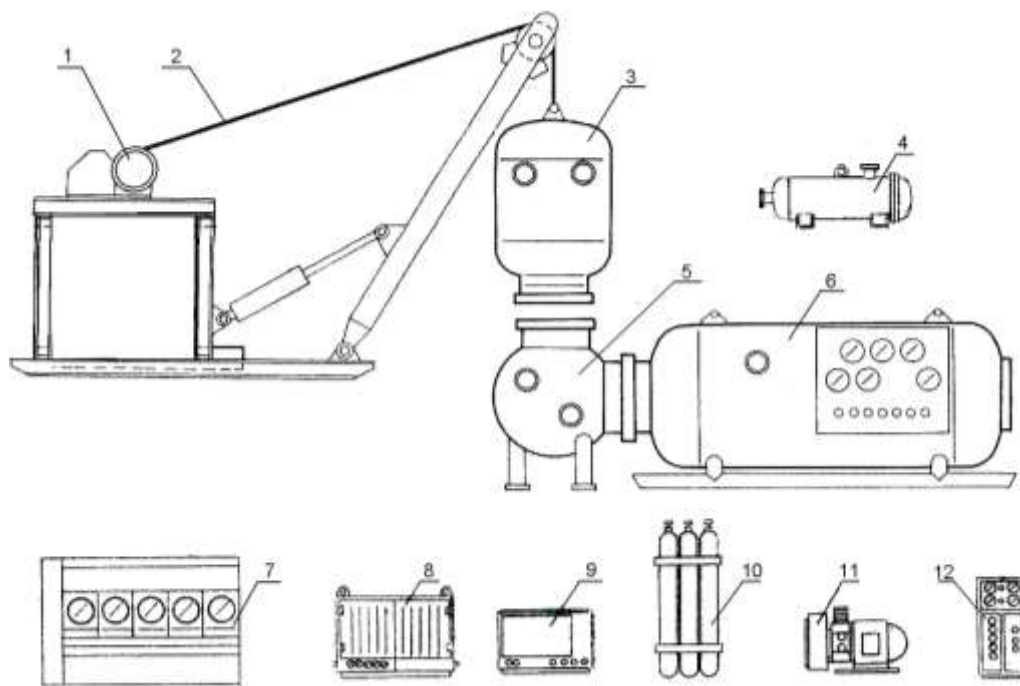


Рис. 1.2. Головні частини стаціонарного суднового глибоководного комплексу:
 1 – лебідка; 2 – кабель-трос; 3 – глибоководна водолазна камера; 4 – устаткування водопостачання і водостоку; 5 – шлюзовий перехідний відсік; 6 – палубна декомпресійна установка; 7 – пост центрального керування; 8 – водонагрівач; 9 – установка кондиціонування повітря; 10 – газові балони; 11 – компресор; 12 – установка підготовки гелієво-кисневої дихальної суміші.

Основні конструктивні типи глибоководних камер розглянуто у [4, 7]. У глибоководних камерах, подібно стаціонарним барокамерам, при збереженні основного конструктивного принципу спостерігається розмаїтість конструктивних форм і варіантів обслуговуючих систем. Очевидно, що створення й експлуатація камер з одним відсіком вимагають найменших матеріальних витрат. Їхні розміри і маса порівняно невеликі. Таким чином, одновідсічний конструктивний тип розглянутих камер є, безперечно, дуже привабливим для експлуатаційників. Правда, він має недолік, що полягає в тому, що допоміжний персонал у таких камерах повинний знаходитися під тим же тиском, що і водолази. Але, з іншого боку, ця обставина гарантує водолазам у разі потреби негайну й ефективну допомогу.

Основні конструктивні типи камер з одним відсіком представлені на рис. 1.3.

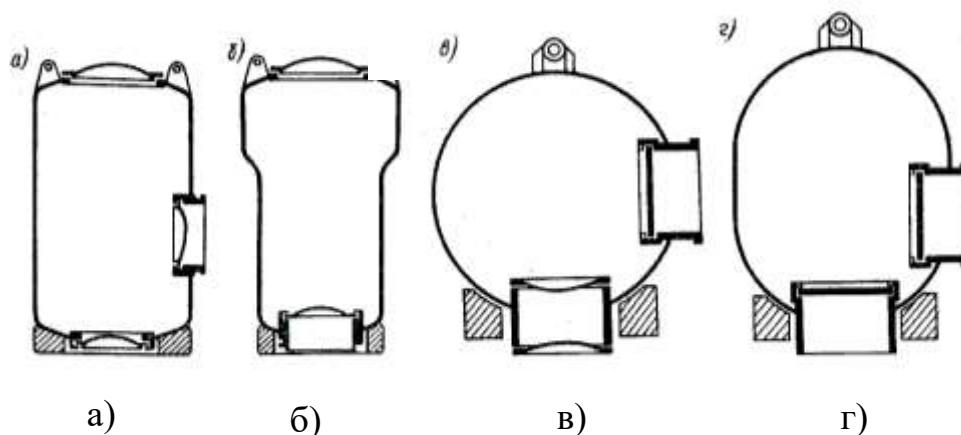


Рис. 1.3. Основні конструктивні типи одновідсічних камер:

а – циліндрична камера с робочою глибиною занурення 200 м; б – циліндрична камера с стовщенням у верхній третини висоти; в – сфера (можлива установка бічного сполучного фланця); г – корпус овальної форми.

Для малих робочих тисків найбільше підходить конструкція, показана на малюнку 1.3 а, що являє собою вертикальний циліндр із кінцевими напівсферичними перебираннями. В такої конструкції можливий пристрій бічного фланця для стикування зі стаціонарною барокамерою і верхнім входом. Найпростіші конструкції мають тільки нижній вихід (без бічного стикувального фланця) з люком, розрахованим на одnobічне навантаження.

Мінімально припустимий діаметр циліндричної камери 1300 мм. В цьому випадку для водолаза і його помічника мається тільки самий необхідний мінімум зручностей. Подальше зменшення діаметра приведе до зниження надійності і безпеки використання встановлених у камері приладів і пристроїв. Оптимальний діаметр циліндричної камери близько 1500 мм. В цьому випадку в ній можуть досить вільно розміститися два чоловіки, а при необхідності без особливих утрудненні навіть три. Висота камери вибирається таким чином, щоб людина могла в ній стояти випрямившись. С обліком висловлених розумінь маса циліндричної камери, цілком готової до використання, складає 2,5-5 т. Максимальний тиск, що витримує корпус циліндричної камери з високоякісних конструкційних сталей при зазначених габ-

ритах (у першу чергу мається на увазі зовнішній тиск), дорівнює приблизно 2,5 МПа. За рахунок підкріплення корпусу шпангоутами величину цього тиску можна підвищити. Однак у зв'язку з тим, що після скидання баласту камера повинна знайти позитивну плавучість, цей додатковий конструктивний захід, що збільшує масу, має природні обмеження. Складніше по конструкції і дорожче у виготовленні водолазна камера, показана на рисунку 1.3, б. Однак у такій камері краще використовується внутрішній об'єм, оскільки у верхній частині, що розширюється, можливо, розміщення всіх необхідних для підводних робіт інструментів, приладів і арматури. Зовнішня поверхня камери цілком звільнена від арматури, але в ній відсутні ілюмінатори, що виключає можливість спостереження за водолазами зовні, і весь запас штучної газової суміші знаходиться усередині (природно, він не може бути досить великим). У зв'язку з цими дуже істотними недоліками такі конструкції не одержали поширення.

У відношенні витримування барометричних навантажень (як зсередини, так і зовні) безумовна перевага повинна бути віддана корпусам сферичної форми (рис. 1.3, в), тим більше що саме сфера при мінімальній площі поверхні і найменшій товщині стінок дає максимальний внутрішній обсяг. Так, наприклад, сферична камера діаметром 2000 мм і внутрішнім обсягом $4,67 \text{ м}^3$, виготовлена зі сталі котлової марки та з товщиною стінок 15 мм. Циліндрична камера з аналогічною масою при тім же зовнішньому тиску мала би діаметр 1500 мм, висоту 2000 мм, внутрішній обсяг $3,5 \text{ м}^3$ і товщину стінок 18 мм. Таким чином, при зовнішньому тиску понад 2 МПа доцільно розглядати можливість застосування саме камер зі сферичний формою корпусу. На жаль, виготовлення сферичних камер у порівнянні з циліндричними більш трудомістко і вимагає великих технологічних витрат. Вартість виготовлення корпусів у вищенаведеному прикладі співвідноситься як 1,4:1. Сферичні корпуси, як правило, збирають із двох півсфер (виготовлення яких досить складно). При великих діаметрах сферичні корпуси можна збирати із сегментів.

Палубні декомпресійні установки розглянуто у [7]. Учасники глибоководних занурень тривалий час (доба і навіть тижні) змушені проводити в палубних декомпресійних установках під порівняно високим тиском. Приміщення, де люди

проходять декомпресію, являють собою свого роду кают-компанії, або спальні каюти, які створені не тільки за всіма правилами інженерного мистецтва, але і відрізняються достатньою комфортабельністю. Велике значення мають правильно обрані розміри цих приміщень. Так, якщо барокамера має форму горизонтального циліндра, то її діаметр повинний бути не менш 2200 мм, щоб людина середнього росту міг випрямитися в камері і навіть потягнутися.

Чимале значення для формування сприятливого психофізіологічного стану водолазів має внутрішнє устаткування палубних декомпресійних установок.

Розглянемо особливості системи газопостачання. До систем газопостачання відносяться системи гелію і подачі кисню, система газовідводу, аварійна дихальна система. Усі вони комплектуються контрольно-вимірювальними приладами і запобіжними клапанами, які спрацьовують у випадку відхилень від нормального експлуатаційного режиму.

При наявності несправності, або аварії системи газопостачання та формування заданої внутрішньої атмосфери, використовуються чотири комплекти індивідуальних дихальних апаратів, що знаходяться в постійній готовності.

Підтримка заданих параметрів внутрішньої атмосфери у палубній декомпресійній установці здійснюється у кожному відсіку окремою системою життєзабезпечення.

Кабель троси розглянуто у [4]. Кабель-троси служать для електричного і механічного зв'язку підводної глибоководної водолазної камери із судном-носієм. Вони сполучають функції буксирного троса (передача механічних зусиль) і електричного кабелю (передача енергії й інформації). Конструктивно вантажонесучі функції кабель-троса забезпечуються центральним вантажонесучим елементом, поміщеним у гнучку оболонку (рис. 1.4,а), зовнішніми вантажонесучими елементами з дротів двостороннього навівання (рис. 1.4, б) і зовнішньої вантажонесучою опліткою (рис. 1.4, в).

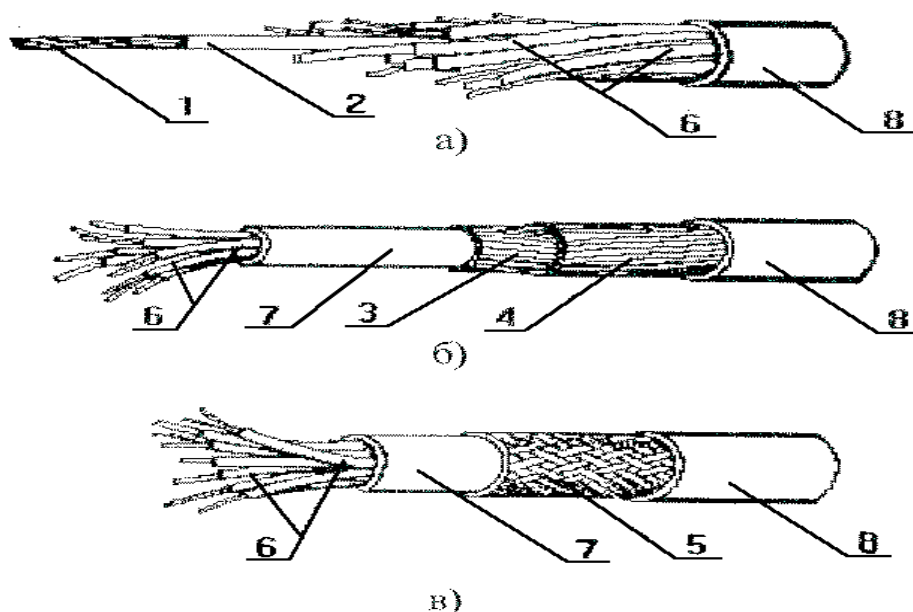


Рис. 1.4. Конструкція кабель – тросу:

1 – центральний вантажонесучий елемент; 2 – гнучка оболонка; 3 – зовнішній вантажонесучий елемент; 4 – зовнішній вантажонесучий елемент; 5 – зовнішня вантажонесуча оплітка; 6 – струмоведачі елементи; 7 – гнучка оболонка; 8 – пластмасова оболонка.

Струмоведачі елементи 6 кабель-троса при цьому розташовуються або навколо центрального елемента, або в центрі кабель-троса усередині гнучкої оболонки. Усі перераховані елементи кабель-троса містяться в зовнішню пластмасову оболонку, що служить для їхнього захисту від ушкоджень.

Радіальна і подовжня герметичність струмоведачих елементів забезпечує високу надійність роботи кабель-троса як електротехнічного виробу при ушкодженні ізоляції струмоведачих жил. Вона досягається заповненням межпровідного простору кабель-троса спеціальними полімерними речовинами – пастообразними діелектриками.

Електротехнічні вимоги до кабель-троса включають наступні параметри: робоча електрична напруга; кількість, перетини і питомі електричні опори струмоведачих елементів; характеристики загасання високочастотних інформаційних сигналів і перешкодозахищеність інформації. Робоча електрична напруга визначається

характеристиками ізоляційних матеріалів, застосовуваних у проводах кабель-троса. Для зниження втрат енергії і зменшення перетину струмоведучих жил прагнуть вибрати кабель-трос з більш високою робочою напругою.

Однак, з ростом напруги збільшується товщина ізоляції проводів і, відповідно, діаметр кабель-троса в цілому [4]. Крім того, вибір напруги більш 1 кВ переводить устаткування глибоководного комплексу в клас високовольтного, що накладає ряд особливостей на його експлуатацію. На практиці в більшості випадків для каналізації електроенергії на сверхмали глибини (до 130-150 м) застосовують кабель-трос з робочою напругою до 0,6 кВ, на малі глибини (до 600 м) застосовують кабель-трос з робочою напругою до 1,0 кВ, на середні глибини (до 2000 м) застосовують кабель-трос з робочою напругою до 1,2 кВ, на великі глибини (до 6000 м) застосовують кабель-трос з робочою напругою до 3,3 кВ.

Струмоведучі елементи кабель-троса поділяються на силові (передача електроенергії) і керуючі (передача інформації). Кількість силових провідників у кабель-тросі визначає фазність електроживлення глибоководного комплексу і можливість одночасної передачі на глибоководний комплекс електроенергії різних номіналів, що важливо при рішенні конструктором питання про кількість вторинних джерел живлення і, відповідно, про масу глибоководного комплексу в цілому. Звичайне число силових провідників лежить у межах від 2-х до 4-х, рідше - 6-ти. Кількість керуючих провідників лежить у межах 4-50 і більш. Наявність великого числа провідників керування спрощує побудову системи інформаційного обміну між судном-носієм і глибоководним комплексом, однак, як і велика кількість силових провідників, приводить до обваження кабель-троса, збільшенню його діаметра і погіршення його експлуатаційних характеристик.

Прототипом системи, що розглядається у дипломній роботі, є комплекс занурення до 300 м на судні-носії "Аюдаг" (рис. 1.5), яке будувалось Миколаївським суднобудівним заводом "Імені 61 комунара" у началі 90-х років минулого віку та порізано, сумісно з обладнанням глибоководного водолазного комплексу, у зв'язку з розпадом Радянського Союзу, на металобрухт, при готовності 80%.

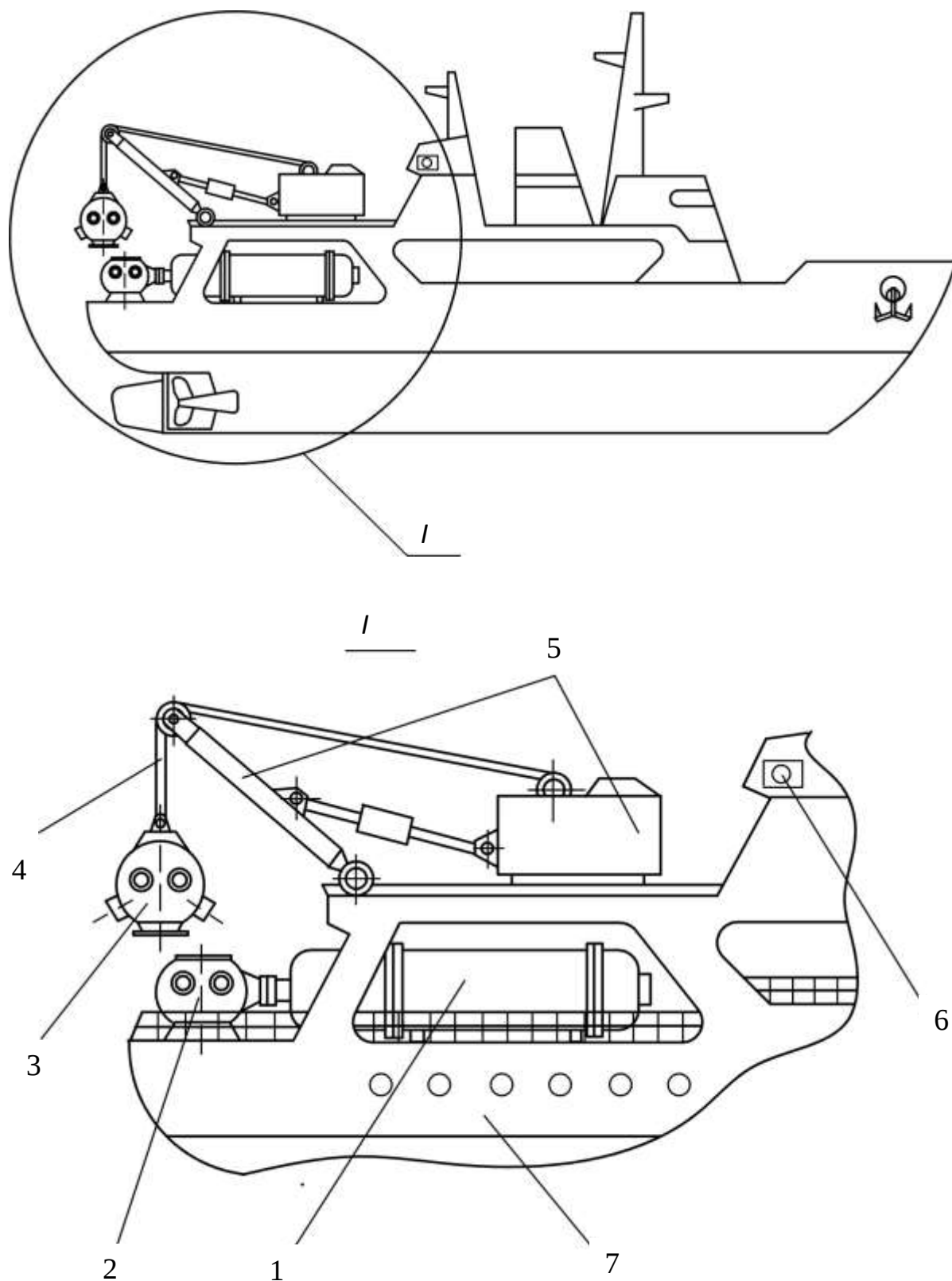


Рис. 1.5. Головні складові частини водолазного комплексу:

1 – палубна барокамера; 2 – перехідний відсік; 3 – водолазна камера;
 4 – кабель-шланг-трос; 5 – кран; 6 – пост центрального управління підводним
 комплексом; 7 – кормова частина судна-носія.

Головне обладнання глибоководного водолазного комплексу (ГВК) складається із стаціонарної палубної барокамери компресії та декомпресії, підводної спускової камери (ПСК), спуско-під'ємного пристрою (СПП), блока автоматики (системи управління) з постом управління і зв'язку. Барокамера (декомпресійна камера) призначена для відносно тривалої поступової адаптації людини до дихально-газової суміші (ДГС) з підвищеним тиском (компресії), а також до наступної (після завершення підводних робіт) поступової адаптації до нормальних атмосферних умов (декомпресії). У якості ДГС на глибинах до 500 м використовується повітряно-гелієва суміш, або кіснево-гелієва суміш, а на більших глибинах – кіснево-водородна суміш. Застосування кіснево-гелієвої суміші (гримучий газ) вимагає вибухозахищеного внутрішнього обладнання водолазних камер. ПСК (водолазний "дзвін") призначена для спуску та підйому акванавтів, а також тимчасового їх перебування на глибині. Після компресії та перед декомпресією акванавтів барокамера та ПСК з'єднуються герметично перехідним відсіком (комінгсом). У робочому стані спуску, підйому, та праці акванавтів елементи обладнання ГВК пов'язані багатofункційним механічним зв'язком – підводним тросом. Спуск та підйом акванавтів здійснюється за сигналами управління з центрального посту комплексу на судні, або посту управління ПСК, з використанням електроприводів обладнання СПП.

1.3. Висновки до розділу 1

1.3.1. На основі аналізу обладнання барокамери і підводної спускової камери водолазного комплексу встановлено, що використовується технічно застаріле обладнання, яке потребує модернізації.

1.3.2. Для можливості підвищення технічного рівня системи електрообладнання доцільно використання нетрадиційних технічних рішень електромеханічних та статичних індукційних пристроїв, що відповідають сучасним вимогам енергозбереження.

Розділ 2. ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА СПУСКОВОЇ КАМЕРИ

2.1. Силове електрообладнання глибоководної водолазної камери

Система електроустаткування глибоководного водолазного дзвону складається зі знижуючого трансформатора напруги, електродвигунів агрегату підігріву та очищення дихально-газової суміші в основному та аварійному режимі, (рис. 2.1), а так само апаратура пуску і відключення. Крім того, у глибоководній камері ("дзвоні") передбачені комплекс аварійного живлення від акумуляторної батареї через перетворювач та контрольно-вимірювальна апаратура для здійснення індексації параметрів дихально газової суміші (поз. 1 на рис. 2.1), а також апаратура управління електродвигунами в основному й аварійному режимах. Додатково у глибоководній камері можуть бути встановлені система зовнішнього освітлення, телевізійна камера усередині корпусу, водонагрівач для обігріву водолазних костюмів, зовнішня телевізійна камера; електроприводи робочих інструментів; власні рушії для обмеженого переміщення. В водолазній камері застосовано два способи енергопостачання – зовнішня через кабель-трос та внутрішня від акумуляторної батареї. Більш краща автономна система, однак через велику потребу в електроенергії це технічно у теперішній час не може бути здійснено. Однак у найпростіших конструктивних схемах автономна система енергопостачання можлива; у таких випадках акумуляторні батареї можуть бути встановлені як зовні, так і усередині. Но у наслідок властивих глибоководним камерам обмежень, по масі і габаритам запаси енергії при автономній системі будуть дуже незначними. Якщо батареї встановлюються усередині, необхідно цілком виключити виділення шкідливих газів при їхній роботі, тому більш переважно використовувати нікель-кадмієві акумуляторні батареї. Звичайно акумуляторні батареї застосовуються як аварійні джерела енергії. В існуючих конструкціях з експлуатації камер, що занурюються, обов'язково потрібно, щоб у випадку припинення подачі енергії з поверхні при аварійному обриві кабель-троса усі життєво важливі споживачі продовжували функціонувати не менш 24

години. Необхідні для цього акумуляторні батареї великих габаритів, як правило, встановлюються зовні камери в міцних боксах. На рисунку 2.1 схематично показані основні споживачі електроенергії в камері, що занурюється. Як уже вказувалося, автономне енергопостачання глибоководних камер, зв'язано з великими технічними труднощами. Тому в даний час практично всі глибоководні камери, одержують електроенергію з поверхні по кабель-тросу. У залежності від умов експлуатації ця електроенергія має або низьку напругу, (що спричиняє дуже відчутні втрати при передачі на великі відстані), або високе, що вимагає установки понижуючих трансформаторів. Однак найчастіше напруга складає 42 або 27 В.

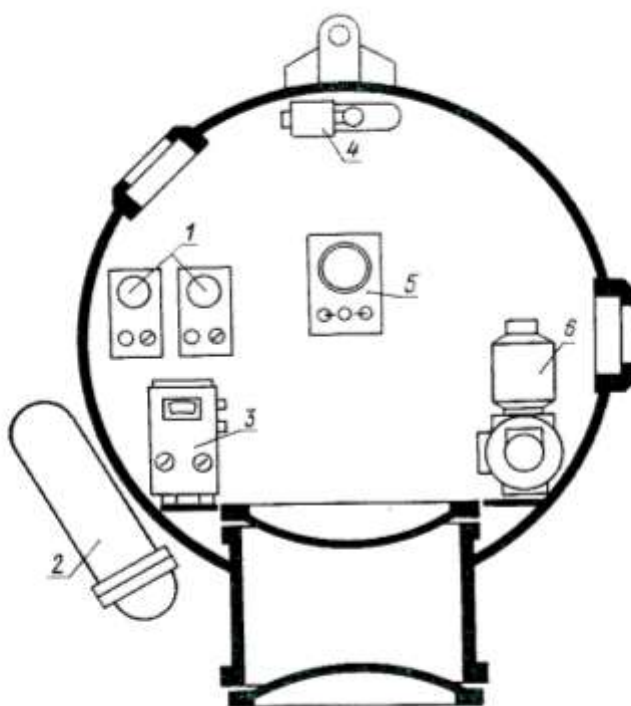


Рис. 2.1. Основні споживачі електроенергії в камері, що занурюється:

- 1 – контрольно-вимірювальні прилади, системи контролю фізіологічних параметрів і система зв'язку і сигналізації; 2 – агрегати очищення дихально газової суміші в основному режимі; 3 – обігрівач; 4 – система внутрішнього освітлення;
- 5 – апаратура пуску і відключення електроприладів;
- 6 – агрегат очищення дихально газової суміші в аварійному режимі.

Загальні потреби камери, що занурюється, в електроенергії залежать від конкретних умов експлуатації. При розрахунку кількості енергії, що живить систему

електрообладнання, для кожного конкретного випадку необхідно складати, можливо, більш точний енергетичний баланс.

2.2. Варіанти електропостачання підводної камери та визначення потужності трансформатора

Для живлення комплексу на судні носії глибоководного водолазного комплексу призначена мережа трифазного струму напругою 220 В и частотою 50 Гц. Живлення основних двигунів комплексу здійснюється від мережі трифазного змінного струму напругою 27 В, 50 Гц тобто на лінії судно-носій – водолазний комплекс необхідно перетворення напруги в комплексі системи електроустаткування. Двигун аварійного режиму водолазного комплексу і барокамери живиться однофазною напругою 27 В через перетворювач від акумуляторної батареї напругою 24...29 В. Двигун нагрівального агрегату барокамери зовнішньої установки живиться напругою ~ 3 , 220В, 50 Гц.

Існує два способи подачі живлення у водолазний комплекс.

Перший спосіб характеризується схемами (рис. 2.2 і рис. 2.3) та полягає в перетворенні напруги до необхідного значення на судні-носії і передачі її у водолазний комплекс.

Згідно другому способу перетворення напруги можливо заглибним трансформатором водолазного комплексу (рис. 2.4).

Відповідно до першого варіанта на судні-носії влаштовується трансформатор, що перетворює напругу 220 В в напругу 27 В, яка необхідна для роботи електроустаткування водолазного комплексу ($U > 27\text{В}$ в водолазному комплексі не допускається через електробезпечність). Труднощі передачі такої напруги складаються в значному спаданні напруги в живильному кабелі (при $U = 27\text{В}$). Так для електродвигунів потужністю 250 Вт, напругою живлення 27В, 50Гц струм у номінальному режимі складає $I_n \approx 10\text{А}$.

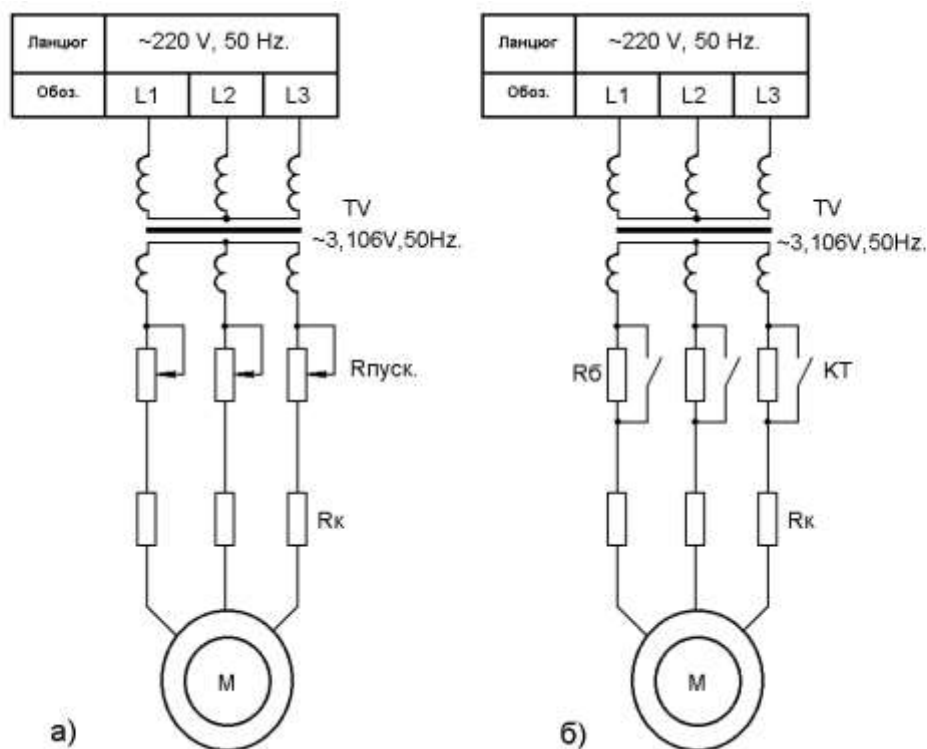


Рис. 2.2. Схеми запуску електродвигуна за допомогою баластних опорів:
а) – за допомогою реостатів; б) – за допомогою баластних опорів та реле часу.

Пусковий струм I_n дорівнює:

$$I_n = K_I I_H = 5 \cdot 10 = 50, \text{ А} \quad (2.1)$$

де $K_I = 5$ – кратність пускового струму I_n / I_H .

Втрати в кабелі (3×5) довжиною 500м складають;

$$\Delta U_n = I_n L_k R_k = 50 \cdot 0,5 \cdot 4 = 100, \text{ В} \quad (2.2)$$

$$\Delta U_H = I_H L_k R_k = 10 \cdot 0,5 \cdot 4 = 20, \text{ В} \quad (2.3)$$

де $\Delta U_n(n)$ - відповідно спадання напруги в кабелі в пусковому (номінальному) режимі, В; L_k - довжина кабелю, км; R_k - омичний опір 1 км довжини мідних суднових кабелів за ДСТ 22438-80, для заданого кабелю з перетином 5мм^2 складає 4 Ом.

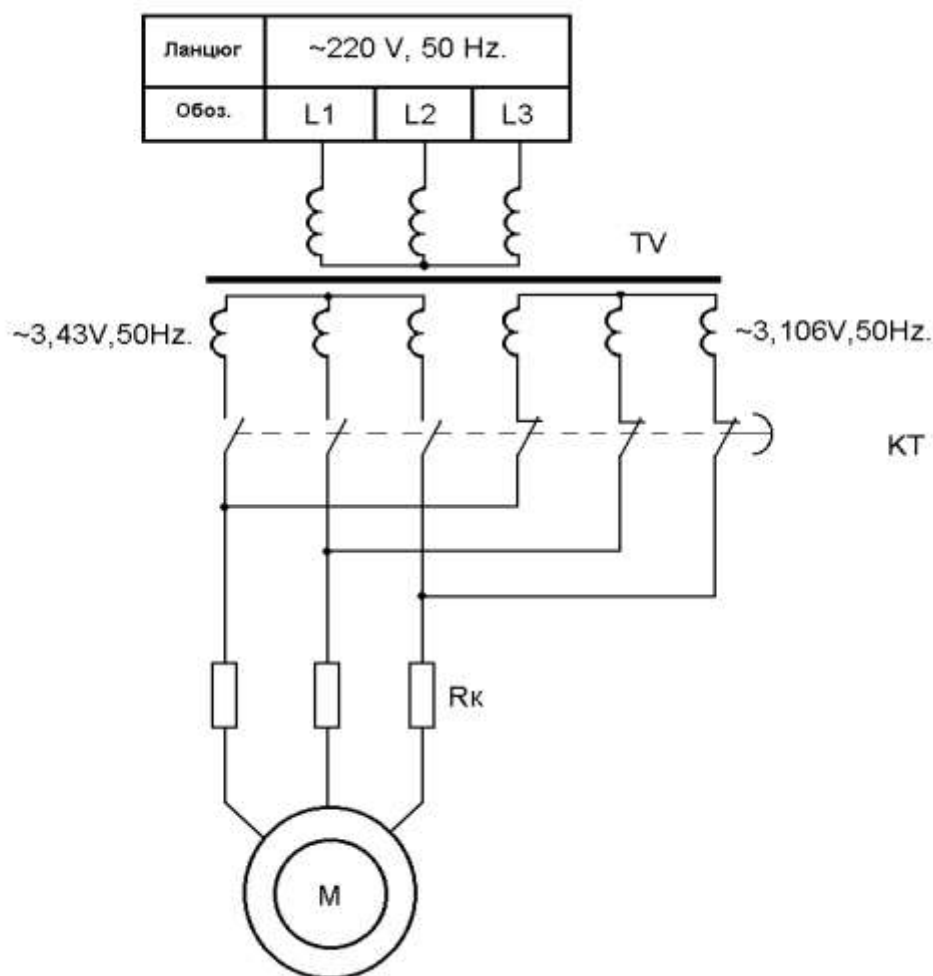


Рис. 2.3. Схема запуску електродвигуна за допомогою трансформатора та реле часу

В момент запуску на клеммах вторинної обмотки трансформатора напруга повинна бути:

$$U_n = U_c + \Delta U_n = 27 + 100 = 127 \text{ В}, \quad (2.4)$$

де U_c - напруга мережі (27 В), В.

Для роботи двигуна в номінальному режимі необхідна напруга:

$$U_n = U_c + \Delta U_n = 27 + 20 = 47 \text{ В}, \quad (2.5)$$

Розглянемо особливості схем вмикання електродвигунів (рис. 2.2 – 2.4). У схемі на рис. 2.2 запуск електродвигуна здійснюється, коли баластні опори вимкнені. Після виходу електродвигуна на номінальний режим вводяться пускові опори реостата (рис. 2.2, а) або розмикаються контакти реле КТ (рис. 2.2,б) (час уставки реле - час запуску). В обох схемах живлення здійснюється через баластові опори $R_{\text{пуск}}$ і R_6 , на яких відбувається спадання напруги мережі до номінального.

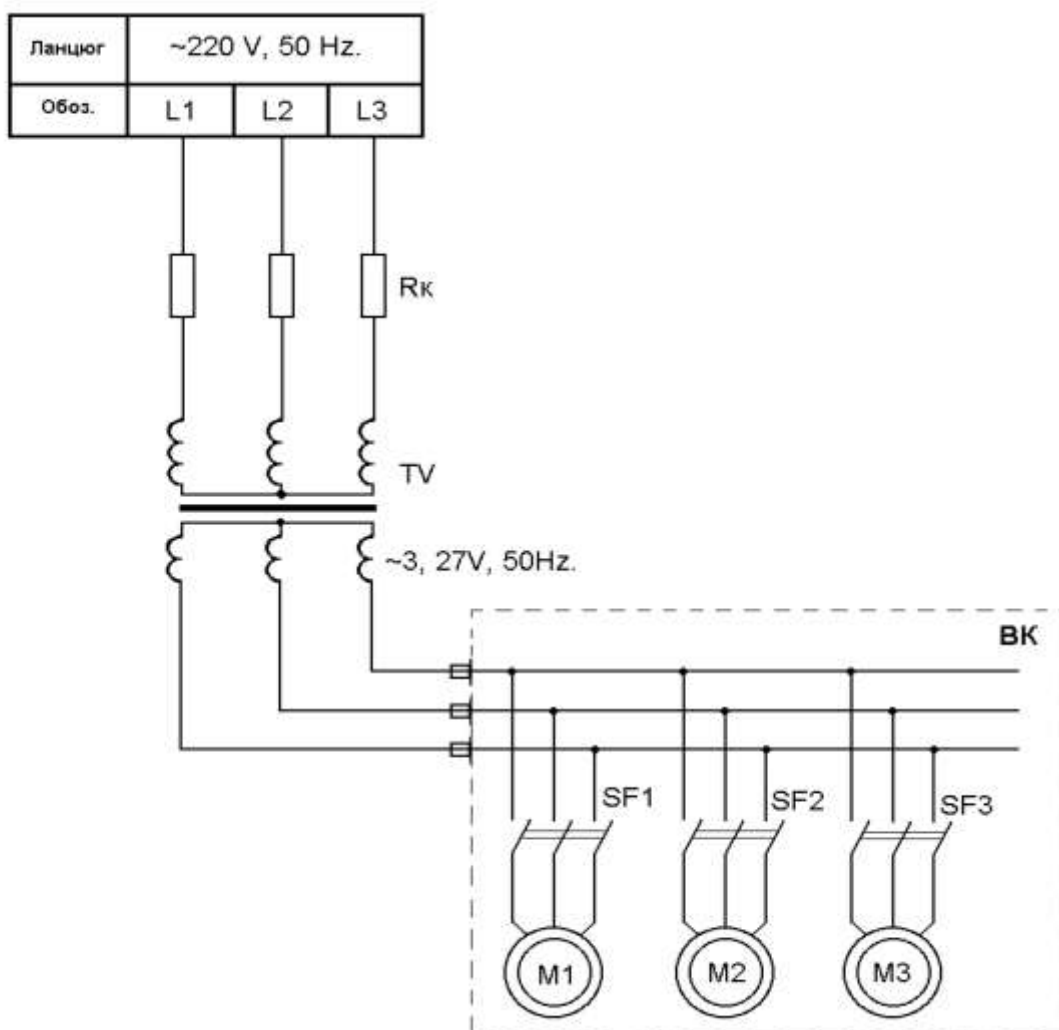


Рис. 2.4. Схема запуску електродвигуна за допомогою заглибного трансформатора

У схемі на рисунку 2.3 при запуску електродвигуна включаються реле часу КТ і живлення подається від пускової обмотки трансформатора 127 В. При виході електродвигуна на номінальний режим реле часу відключає обмотку 127 В и включає обмотку 47 В. Кожна з запропонованих схем (рис. 2.2 – 2.4) мають свої переваги і недоліки, але в цілому способи по першому варіанті характеризуються великими втратами енергії в живильних кабелях і баластових опорах, необхідності подачі живлення до кожного електродвигуна окремо, складністю включення (баластові опори, реле часу).

Зазначені недоліки усуваються при використанні другого варіанта живлення водолазного комплексу через заглибний трансформатор (рис. 2.4). На первинну об-

мотку трансформатора подається трифазний перемінний струм напругою 220 В, частотою 50 Гц, із вторинної обмотки знімається також трифазний перемінний струм напругою 27 В, частотою 50 Гц. Сумарний максимальний струм вторинної обмотки $I_{\Sigma II}$ трансформатора:

$$I_{\Sigma II} = I_{H1} + I_{H2} + I_{II3} = 10 + 10 + 50 = 70 \text{ А} , \quad (2.6)$$

де I_{H1}, I_{H2} – номінальні струми електродвигунів М1 і М2, А;

Активна потужність P , Вт та повна потужність S , В·А трансформатора:

$$P = I_{\Sigma II} U \sqrt{3} = 70 \cdot 27 \cdot \sqrt{3} = 3273,5 \text{ Вт}, \quad (2.7)$$

$$S = P / \cos \varphi = 3273,5 / 0,76 = 4300 \text{ В·А}.$$

Струм первинної обмотки трансформатора I_I , А:

$$I_I = \frac{P}{\sqrt{3} U_I} = \frac{4300}{\sqrt{3} \cdot 220} = 11,28 \text{ А}, \quad (2.8)$$

Спадання напруги в кабелі:

$$\Delta U'_n = I_I l_k R_k = 11,28 \cdot 0,5 \cdot 4 = 18 \text{ В}, \quad (2.9)$$

Зменшення спадання напруги в кабелі

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta U'_n} = \frac{100}{18} = 5,56. \quad (2.10)$$

З (2.10) слід, що спадання напруги повинно знижуватися у 5...6 разів, що не впливає на пуск і подальшу роботу електродвигунів спускової підводної камери.

На рис. 2.5 подано принципову схему системи електрообладнання підводної спускової камери.

Силове електрообладнання ГВК складається з електродвигунів морського виконання стандартної трифазної напруги до 1 кВ та електродвигунів низької напруги, а також трансформаторів перетворення напруги. Низька напруга 27 В, 50 Гц трифазного змінного струму використовується для живлення внутрішнього обладнання барокамери (електровентілятори, електроосвітлення, комутаційна та пуско-захистна апаратура). Живлення ГВК забезпечуються вище згаданими трансформаторами – блочним та занурюваним, що підключені відповідно до суднової мережі

та вихідним клемам кабель-шланг-тросу ПСК. До вказаних клем також підключена силова апаратура зовнішнього підводного освітлення.

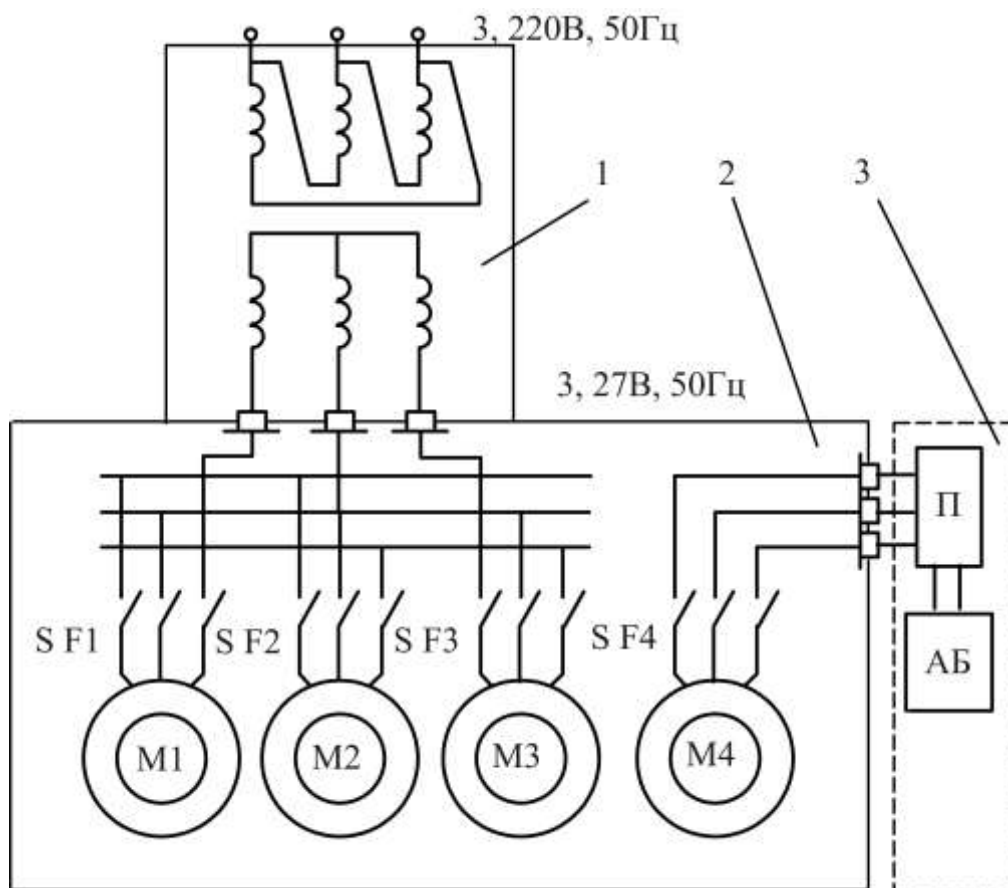


Рис. 1.3. Склад силового електрообладнання підводної спускової камери:
1 – занурювальний трансформатор; 2 – водолазний дзвін; 3 – блок перетворювача напруги П та акумуляторної батареї АБ; M1...M3 – електродвигуни агрегатів нагріву і очищення дихально-газової суміші; M4 – електродвигун агрегату аварійного очищення; SF1... SF4 – автоматичні вимикачі пуску двигунів.

2.3. Висновки до розділу 2

2.3.1. Електропостачання водолазного комплексу може бути здійснено через кабель-трос стандартної напруги до 1 кВ та палубний трансформатор.

2.3.2. Виходячи з вимог енергоресурсозбереження у системі ГВК більш доцільним є використання занурювального трансформатора та теплопостачання через кабель-шланг-трос.

Розділ 3. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПИТАННЯ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

3.1. Конструктивно-технологічні рішення магнітопроводів

Відомі електромагнітні системи (ЕМС) сучасних силових, вимірювальних і інших спеціальних трансформаторів, реакторів і дроселів [9 - 14] складаються з концентричних чи дискових обмоток і магнітопровода. Магнітопровод містить стрижні, на яких розташовуються обмотки, а також ярма, що служать для замикання магнітного потоку в межах магнітного ланцюга. При цьому конструктивною і механічною основою активної частини (АЧ) і трансформатора в цілому є його магнітопровод. Конструктивна схема, геометричні форма і співвідношення параметрів елементів магнітопровода визначають не тільки витрати електротехнічної сталі, але й експлуатаційні показники, масу і вартість обмотувальних матеріалів, що йдуть на виробництво трансформаторів [10].

Практикою трансформаторобудування протягом десятиліть були визначені дві основні схеми розташування окремих частин магнітопровода: планарна і просторова. В планарній системі подовжні осі всіх стрижнів і ярем розташовуються в одній площині. При цьому в трансформаторах різної потужності магнітопроводи виконуються з аркушів і пакетів стали, які відрізняються шириною (рис. 3.1).

У зазначених трансформаторах (рис. 3.1) зміна ширини пакетів стали забезпечує стрижні зі східчастою формою поперечного переріза, уписаної в окружність, охоплену циліндричними обмотками. Ширина пластин, що визначає ширину і товщину пакетів, що утворюють східчастий перетин (вид А на рис. 3.1), вибирається з умови одержання найбільшого коефіцієнта заповнення описаної окружності стрижня при мінімальних відходах листової чи рулонної сталі. Для зниження неробочого струму зменшенням технологічних зазорів у стиках і підвищення механічної міцності кістяка, зборка магнітопровода ведеться з чергуванням шарів пластин у плетіння, а також з косими стиками.

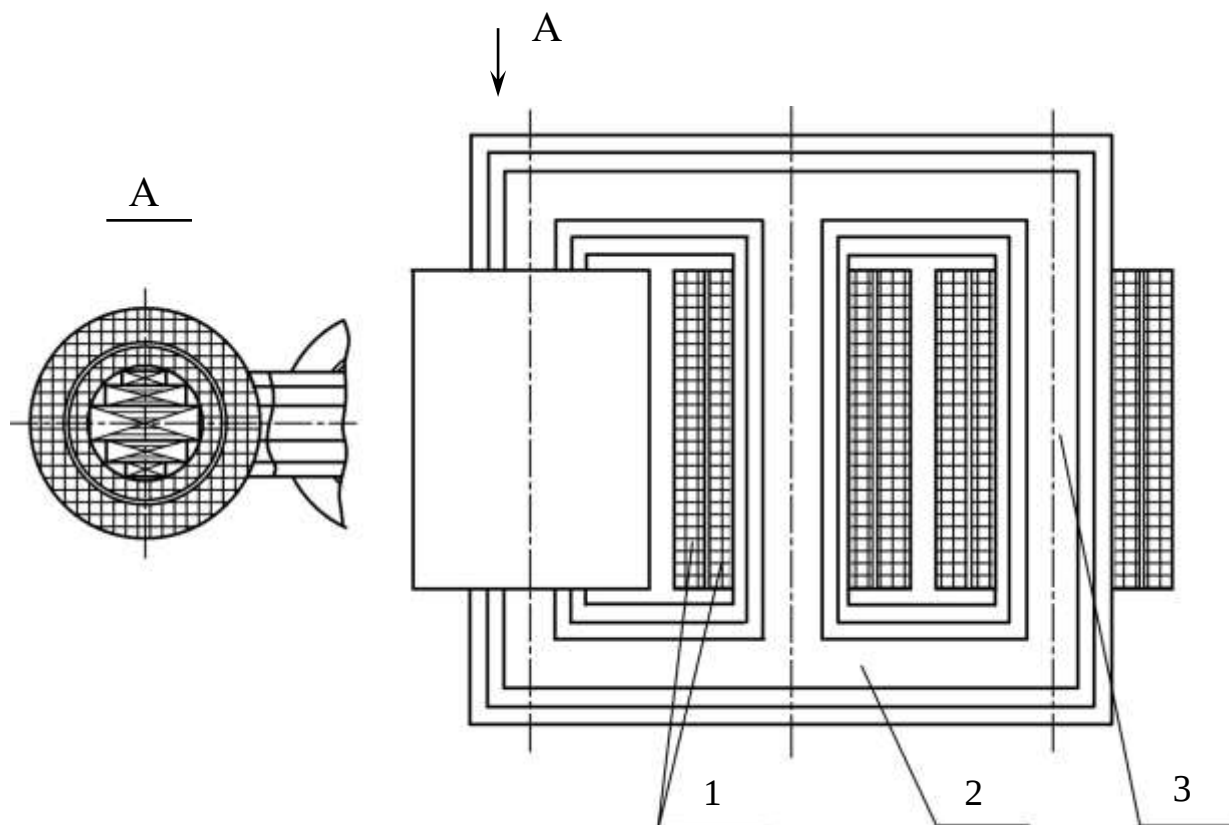


Рис. 3.1. Активна частина трансформаторів середньої і великої потужності:

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

Магнітопроводи малих трифазних трансформаторів (ТТ) і початкових габаритів ТТ середньої потужності виконуються способом штампування звичайно з двох конфігурацій пластин (прямокутних і Ш-образних, рис. 3.2, а) чи способом намотування (навивки) зі стрічки електротехнічної сталі (рис. 3.2, б).

Особливістю плоскої стрижневої схеми шихтованого магнітопровода (рис. 3.1, рис. 3.2) є магнітна несиметрія і рівність магнітних потоків ярем і крайніх стрижнів. Тому площа поперечного переріза ярма повинна бути чи більше дорівнює площі перетину стрижня.

При використанні конструкції (рис. 3.1) у трансформаторах малої і середньої потужності масового випуску різко здорожується виробництво (зазначені технічні рішення складні для масового й автоматизованого виробництва). Тому використовуються стикові магнітопроводи (рис. 3.2, а) шихтовані з прямокутних і

Ш-подібних пластин і розрізні стикові магнітопроводи (рис. 3.2, б) кручені зі стрічки електротехнічної сталі.

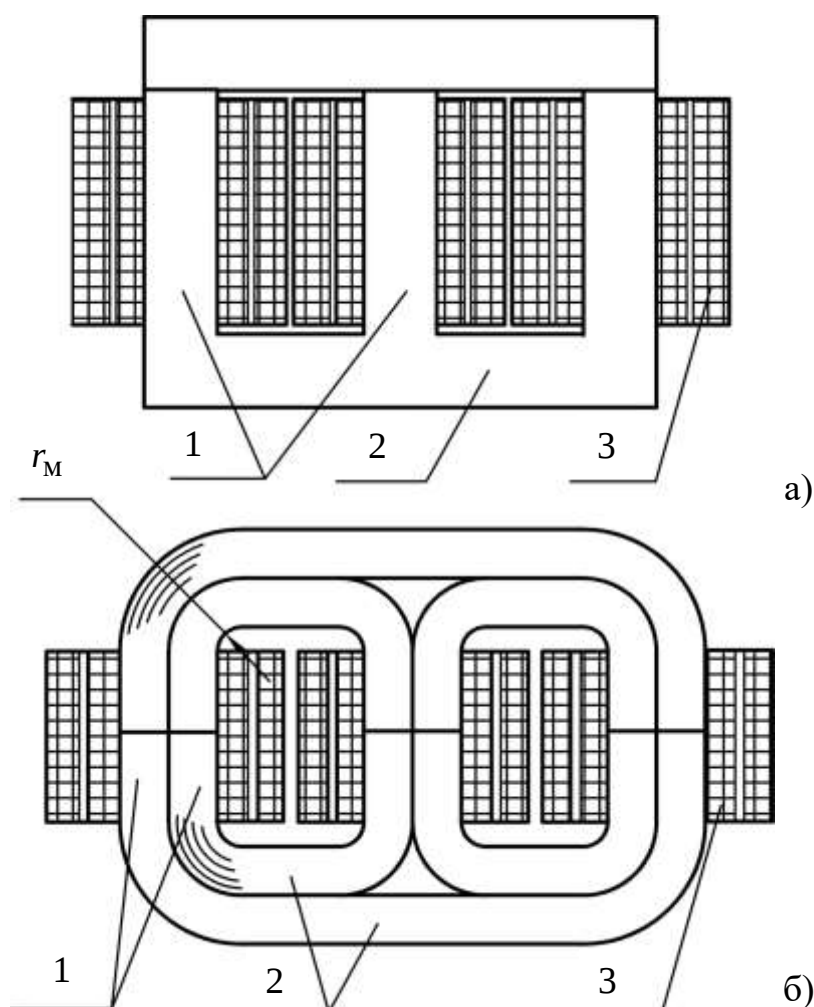


Рис. 3.2. Штампованно-шихтована (а) і кручена (б) планарні електромагнітні системи трансформаторів малої потужності:

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

Однак істотним недоліком магнітопроводов (рис. 3.2, а) шихтованих із пластин, що виготовляються способом штампування з чи аркушів стрічки, є наявність штампувальних відходів електротехнічної сталі при виробництві.

Трифазні плоскі кручені магнітопроводи (рис. 3.2, б) є дуже технологічними [10], однак магнітний потік стрижня є геометричною сумою потоків двох навитих не пов'язаних магнітно кільцевих контурів прямокутної форми (перехід магнітного

потіку з одного контуру в іншій практично неможливий). Тому магнітний потік і індукція в кожному кільці збільшуються щодо аналогічних величин стрижня трифазного стрижневого шихтованого магнітопровода [10]:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{я}} &= 2 \cdot \Phi_{\text{с}} / \sqrt{3} ; \\ B_{\text{я}} &= 2 \cdot B_{\text{с}} / \sqrt{3},\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $\Phi_{\text{я}}$ і $\Phi_{\text{с}}$ - магнітні потоки відповідно в ярах і стрижнях;

$B_{\text{я}}$ і $B_{\text{с}}$ - амплітуди середніх значень індукції відповідно в ярах і стрижнях.

Крім того, коефіцієнт заповнення обмотувального вікна (через наявність технологічних заокруглень радіусом $r_{\text{м}}$) трансформатора (мал. 3.2, б) трохи нижче.

За зазначеними причинами варіант трифазного трансформатора з плоским крученим магнітопроводом по питомій металеємності і втратам короткого замикання уступає штампованому аналогу [14].

З [9 – 13] відомі також конструкції трифазних просторових ЕМС. У симетричній просторовій ЕМС осі стрижнів і ярем розташовуються в трьох площинах під 120° [4]. Крім того, відомі також конструкції трансформаторів із крученими і шихтованими просторовими несиметричними магнітопроводами [13], а також з обертовим магнітним полем і шихтованим магнітопроводом з розподіленими обмотками [13].

Класифікація трифазних СПМ по типі конструкції і технології виготовлення (рис. 3.3) представлена в [13].

У симетричних просторових ЕМС взаємне розташування кожного зі стрижнів однакової форми стосовно всіх ярем ідентично. Подібні магнітопроводи запропоновані винахідником трифазного трансформатора М.О. Доливо-Добровольським [9]. Слід зазначити, що деякі конструкції СПМ [13] вимагають відмовлення від використання холоднокатаної анізотропної сталі. Однак у зв'язку з новими досягненнями електроматеріалознавства й освоєнням виробництва холоднокатаних ізотропних, а також аморфних, мікро- і монокристаличних сталей [13] зазначений недолік стає менш значимим.



Рис. 3.3. Класифікація симетричних просторових магнітопроводів для трифазних трансформаторів

Стиковий симетричний просторовий магнітопровід (СПМ) (рис. 3.4), згідно [10], застосовується в трансформаторах потужністю до 6300 кВА, а також реакторах і складається зі стрижнів, зібраних з пакетів плоских пластин (вид А на рис. 3.1), чи з вигнутих по евольвентної формі пластин одного розміру (вид А на рис. 3.4). Ярма трикутної форми намотуються зі стрічкової електротехнічної сталі.

Магнітний потік і площа поперечного переріза стали ярма в такій системі, згідно [10]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{я}} &= \Phi_{\text{с}} / \sqrt{3} ; \\ \Pi_{\text{я}} &= \Pi_{\text{с}} / \sqrt{3}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де $\Pi_{\text{я}}$ і $\Pi_{\text{с}}$ – площі поперечного переріза ярма і стрижня у випадку рівності в них середніх значень індукції.

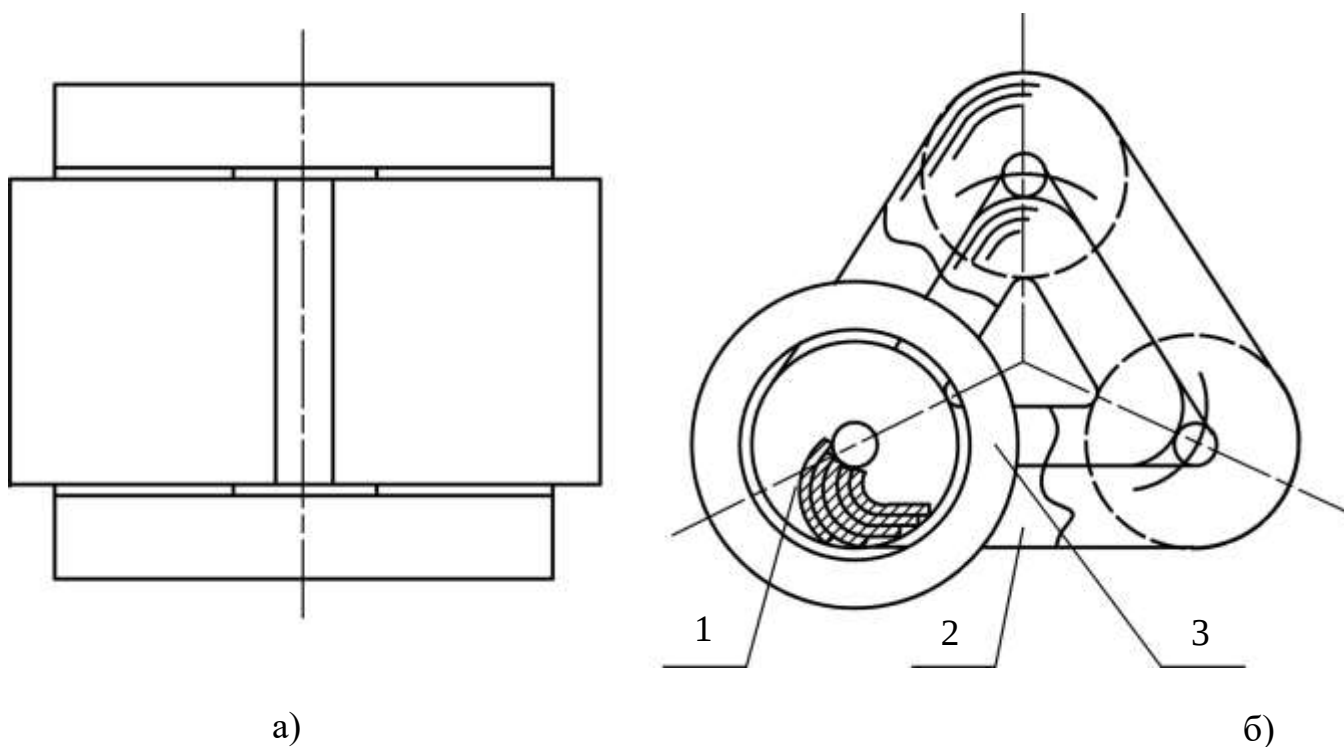


Рис. 3.4. Вид збоку (а) і схема активної частини (б) стикової просторової електромагнітної системи силових трифазних трансформаторів:

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

Однак у магнітопроводі (рис. 3.4) стрижні з'єднані шістьма ярмовими ділянками, а в магнітопроводі (рис. 3.1) чотири ділянки ярма. Тому, згідно [10], з урахуванням збільшення загальної довжини ярма, маса активної сталі і втрати неробочого режиму знижуються не відповідно до $\sqrt{3}$, згідно (2.2), а на 12÷15 %. У зв'язку з наявністю двох стиків на фазу, Струм неробочого ходу зростає на 50...90% для трансформаторів потужністю 630...160 кВА і на 90...140% для трансформаторів потужністю 100...25 кВА в порівнянні із системою (рис. 3.1).

Особливістю робочого процесу ЕМС (рис. 3.4) є наявність у замкнутих ярмах 2 третьої гармонічної складової магнітного потоку, а також вищих гармонік, кратних трьом [10]. При цьому в [10] поява і наявність подібних гармонік порозумівається способом з'єднання (гармоніки відсутні при з'єднанні первинної обмотки в трикутник).

Існує також навита безстикова симетрична ЕМС із трьома роздільними кільцевими контурами замикання магнітного потоку [13]. Обмотки намотуються після зборки системи на стрижні на спеціальному верстаті. Магнітопровід такої системи в 2...3 рази знижує струм неробочого режиму трансформатора, однак індукція в кожному контурі відповідає (3.1), що обумовлює підвищену матеріалоємність активної частини (АЧ).

Зниження питомої матеріалоємності просторової триконтурної ЕМС шляхом виключення недоліку, яке характеризується виразом (3.1), можливо при створенні магнітного зв'язку кручених контурів. З [10] відомо, що одержання зазначеного зв'язку можливо конструктивно-технологічним забезпеченням стиків контурів по осях симетрії просторової ЕМС (осям результуючих перетинів стрижнів).

Згідно [10], для забезпечення стиків стрижневої частини кожного із суміжних контурів і збільшення коефіцієнта заповнення описаної окружності навколо стрижнів, кільця виконуються складеними і піддаються деформації – згинаються по кривій радіуса R_k (рис. 3.5) і віджигаются.

Згідно [10], для стикового зіткнення складових частин стрижнів, кожен з контурів кручений просторової електромагнітної системи утвориться з декількох ділянок. Зазначені ділянки намотуються їхніх стрічок із шириною, що змінюється, з їхнім осьовим зсувом по визначеній закономірності (функції забезпечення площини стику).

Використання в ЕМС малій потужності кручених замкнутих стрічкових сердечників (рис. 3.5), що забезпечують, у межах окремого контуру, малий магнітний опір основному потоку, а також магнітний зв'язок сусідніх контурів у зоні стику, нетехнологічно через необхідність вмотки котушок [10] і складності технологічного процесу забезпечення стиків.

Згідно [11], у США застосовувався несиметричний просторовий одностиковий магнітопровід (рис. 3.6) утворений способом шихтовки плоских Т-подібних пластин з наступним їхнім загином у пакеті за допомогою опресовки.

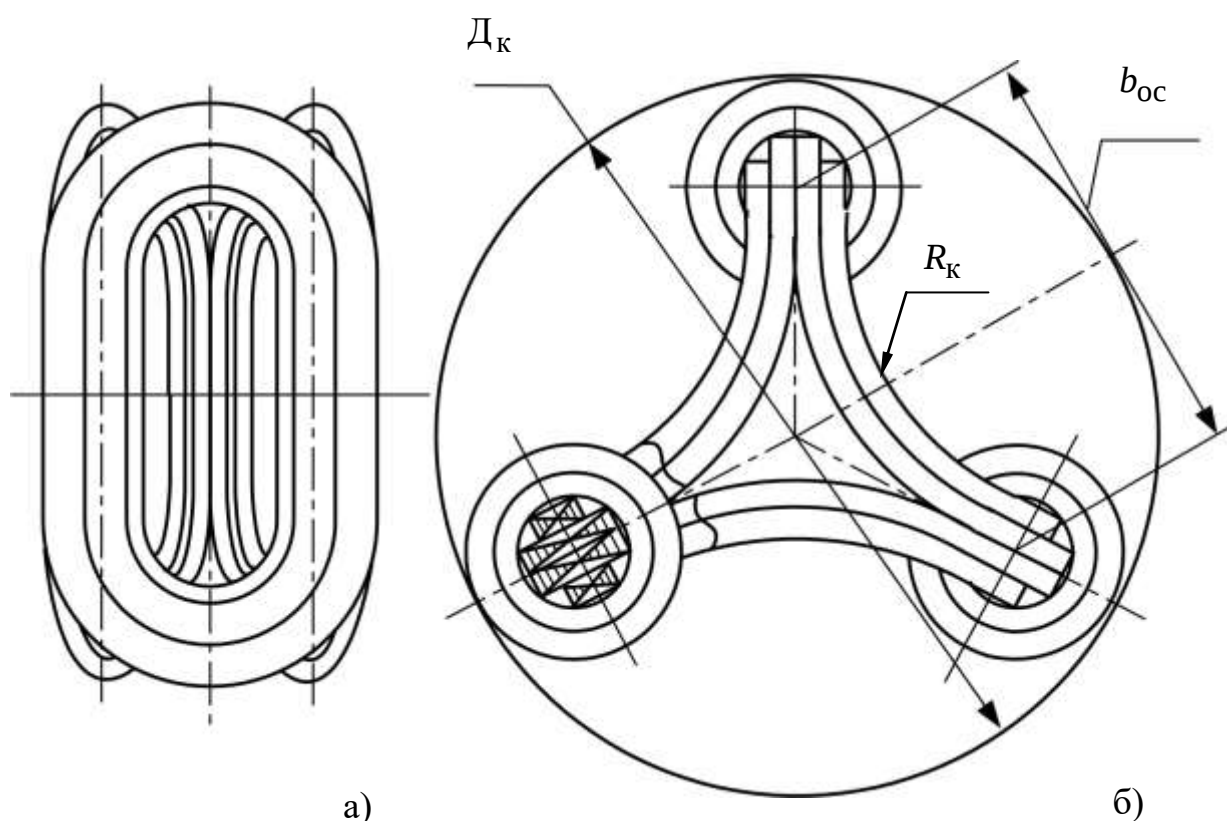


Рис. 3.5. Навита просторова електромагнітна система трифазних силових трансформаторів:

а – магнітопровід (вид збоку); б – схема активної частини.

Переваги конструкції магнітопровода (рис. 3.6) полягають у наявності одного стику (замість двох) і збігу напрямків шихтовки елементарних шарів електротехнічної сталі стрижнів і ярма. Однак недоліками є значні відходи стали при штампуванні Т-подібних пластин і необхідність обрізки утворених обпресовуванням кутових ділянок у зонах стикових поверхонь.

У трифазних трансформаторах також можуть застосовуватися СПМ із з'єднаними зіркою стрижнями, симетрично розташованими щодо центральної осі (мал. 3.7, а і б). Стрижні збираються з ідентичних пластин і мають прямокутний перетин. Ярма шестигранної форми виконуються також шихтованими. Різновидами подібної схеми магнітопровода (рис. 3.7) є СПМ [13], у яких ярма із шестигранним контуром набираються впереплет із пластин трапецієвидної конфігурації (рис. 3.7, б)

чи утворюють трипроменеву зірку у виді суміжних пакетів з вигнутих під кутом 120° смуг стали.

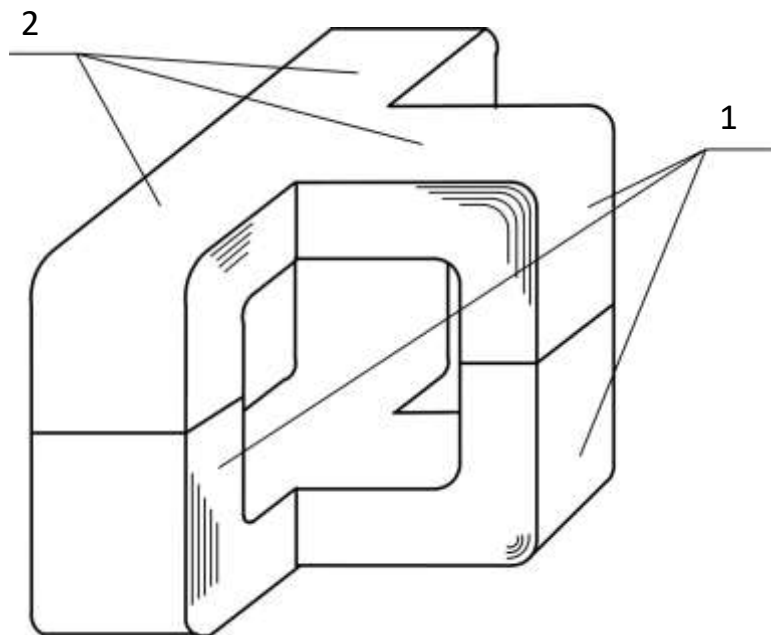


Рис. 3.6. Одностиковий шихтовано-пресований магнітопровід:

1 – стрижні; 2 – ярма.

Істотним недоліком конструкцій схеми (рис. 3.7) є перпендикулярність напрямків шихтовки і, відповідно, взаємне закорачивання елементарних шарів стали стрижнів і ярма. Згідно [10] розбіжність напрямків шихтовки зазначених шарів обумовлює необхідність ізолювання стиків і збільшення стикового технологічного зазору.

Крім аксіальних схем з осьовим напрямком потоку в стрижнях і стиках відомі також СПМ із радіальним напрямком потоку зазначених ділянок [13]. Такі СПМ можуть ґрунтуватися на технології штампування і шихтовки (рис. 3.8) у сполученні з навивкою (напівярма кручені зі стрічки, стрижні шихтовані з вигнутих смуг електротехнічної сталі) і містять у магнітному ланцюзі один чи два стики. У зоні зазначених стиків, у випадку кручених чи вигнутих елементів магнітопровода, також утвориться взаємне перетинання напрямків елементарних шарів стали.

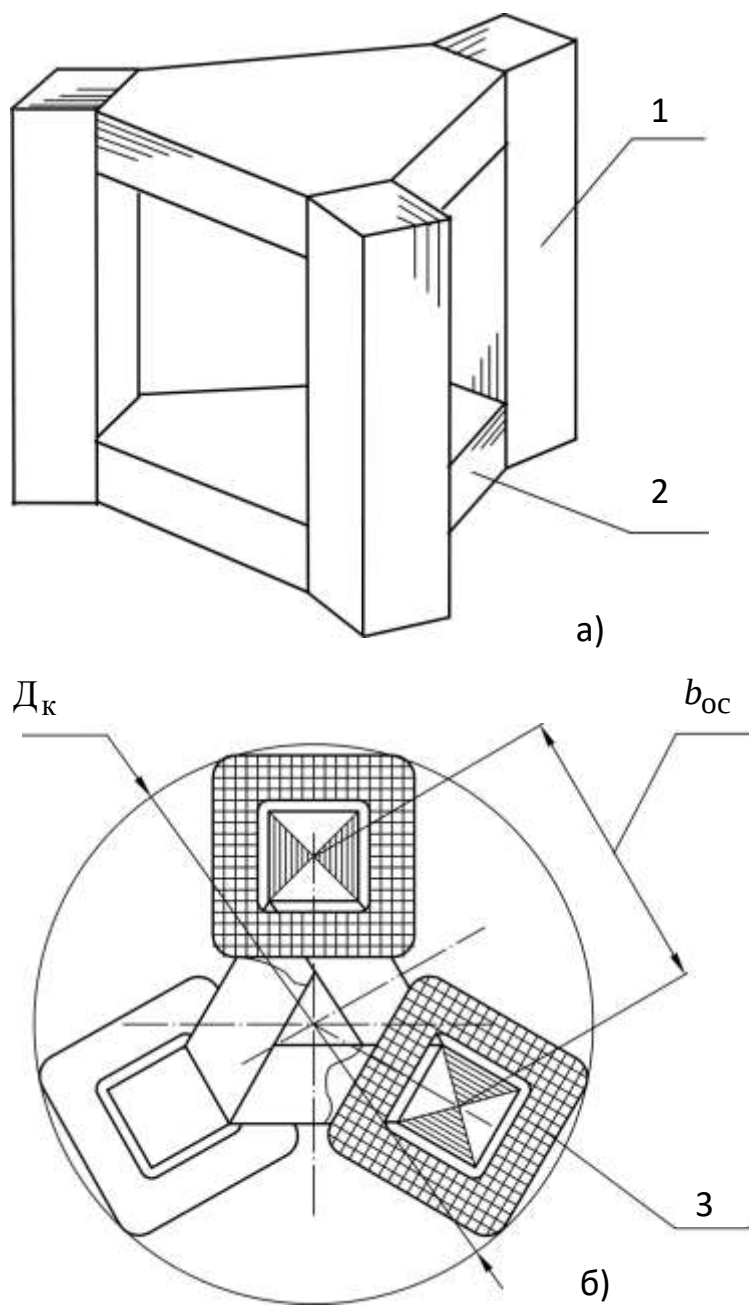


Рис. 3.7. Шихтований магнітопровід (а) і поперечний розріз (б) активної частини двохстикової просторової електромагнітної системи:

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

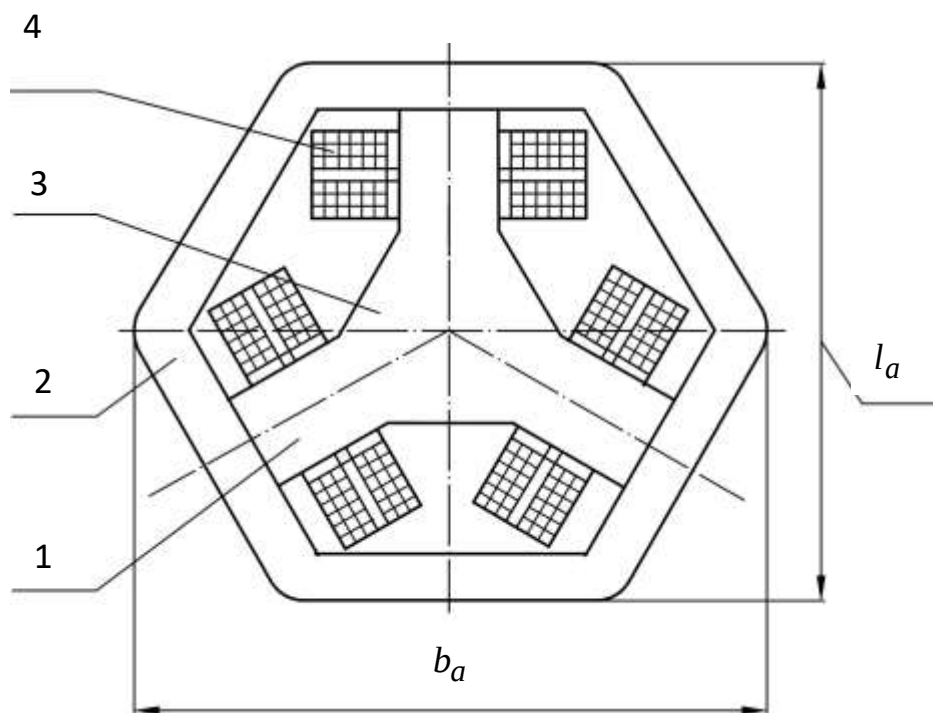


Рис. 3.8. Електромагнітна система з просторовим одностиковим штампованим радіальною магнітопроводом:

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

Незважаючи на меншу питому металоємність стикових симетричних просторових ЕМС найбільше промислове застосування одержали плоскі системи стрижневого типу (рис. 3.1, рис. 3.2).

Згідно [15] розроблені нові конструкції кручених стрижневих магнітопроводов з поліпшеними техніко-економічними характеристиками. У зазначених конструкціях підвищення технічного рівня багатострижневого стрічкового магнітопровода досягається шляхом забезпечення магнітного зв'язку стрічкових контурів введенням додаткових двох чи чотирьох стрічкових навитих П-подібних сплюснених сердечників однакових геометричних розмірів, розміщених по середині на бічних поверхнях верхнього і нижнього ярем із фронтальних сторін. Можливий також оригінальний варіант зазначеного магнітопровода з елементів утримуючих однакові підковообразні частини з рівними квадратними поперечними

переріз стрижнів і ярем. У конструкцію також уведені два додаткових кручених пакети однакових геометричних розмірів, розміщених по середині на бічних поверхнях верхнього і нижнього ярма. Магнітний зв'язок частин кручених стикових контурів і поліпшення техніко-економічних показників трифазних трансформаторів досягаються за рахунок бічного чи відгалуження зигзагоподібного замикання частини магнітного потоку. Тому по своїй суті вони є несиметричними просторовими, однак мають, відносно планарних трифазних трансформаторів із шихтованими магнітопроводами, збільшені масу, розміри, а також число технологічних стикових зазорів і складених елементів, що відрізняються формою і розмірами. Для зниження магнітного опору в [15] пропонується заповнювати стики між основними і додатковими пакетами компаундом з феромагнітного композиційного матеріалу.

Загальним недоліком існуючих технічних рішень АЧ ТТ із планарної і просторової ЕМС (рис. 3.2, а і б, рис. 3.6, рис. 3.7, рис. 3.8) є підвищена питома витрата міді. Котушки обмоток таких трансформаторів у поперечному перерізі мають форму прямокутника з внутрішніми кутами, округленими радіусом r_0 (рис. 3.9). При цьому, у випадку перегину проводу по окружності малого радіуса r_0 , погіршується електрична міцність ізоляції, а при збільшенні r_0 різко знижуються заповнення простору усередині котушки і механічна міцність обмотки при короткому замиканні, зростають середня довжина витка котушки і маси провідного, ізолювального і конструкційного матеріалів.

На основі викладеного, а також виражень (3.1) і (3.2), можна висновити, що найменшою питомою і технологічною матеріалоемністю відрізняється трансформатор із просторовим стиковою магнітопроводом (рис. 3.4).

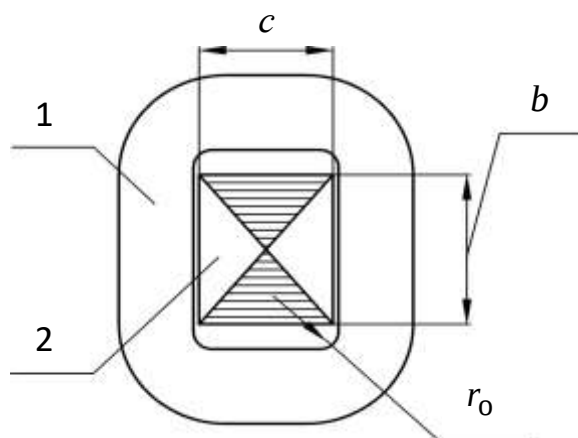


Рис. 3.9. Фрагмент активної частини трансформатора малої потужності:

1 – котушка; 2 – стержень.

Однак виконання стрижнів у виді набору пакетів шихтованих пластин різної ширини нетехнологічно при виробництві малих трансформаторів, а стрижні з евольвентно вигнутих пластин обумовлюють наявність проміжків у кутових зонах (рис. 3.4) ярма через наявність центрального технологічного отвору діаметром d_1 . Зазначені проміжки збільшують обсяг і масу ярма, а при малій потужності трансформатора величина d_1 порівнянна з діаметром d стрижня і знижує коефіцієнт заповнення внутрішнього контуру обмотки. Крім того, поверхні елементів, що сполучаються, повинні ізолюватися і для зменшення стикових зазорів при малій потужності трансформатора повинні бути піддані механічній чи обробці встановлюватися на ФМКМ-пасте чи феромагнітному клейовому складі [10].

У зв'язку з зазначеними особливостями і складністю конструкції, краща стосовно до трансформаторів середньої і підвищеної потужності ЕМС просторового стикового магнітопровода (рис. 3.4), технологічно неприйнятна для виробництва ТТ малої потужності і початкових габаритів ТТ середньої потужності. В даний час більшість магнітопроводов малих трифазних трансформаторів виконується в плоскому штампованому (рис. 3.1) і крученому (рис. 3.2) варіантах і згідно, наприклад [9], по питомій і технологічній матеріалоемності не задовольняє сучасним вимогам.

Іншим загальним недоліком усіх розглянутих варіантів просторових ЕМС (мал. 3.4 – 3.9) є невисокі коефіцієнти використання геометричного обсягу, обмеженого контурною окружністю, описаної щодо периферійних поверхонь, а також контуром габаритних розмірів АЧ [13]:

$$\begin{aligned} k_{\text{ко}} &= \Pi_{\text{ас}} / \Pi_{\text{ко}} ; \\ k'_{\text{ко}} &= \Pi_{\text{ас}} / \Pi_{\text{гр}} , \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $\Pi_{\text{ас}}$ - площа активних перетинів (обмежена контурами периферійних поверхонь магнітопровода й обмоток); $\Pi_{\text{ко}}$ - площа обмежена контурною окружністю діаметром D_K (рис. 3.7, б); $\Pi_{\text{гр}}$ - площа контуру розмірів b_a і l_a габаритів АЧ (рис. 3.8).

Даний недолік обумовлений як прямокутною (рис. 3.7, рис. 3.9), так і круглою (рис. 3.4, рис. 3.5) формою котушок обмотки.

У цілому загальноприйнятими характеристиками якості ЕМС трансформаторів є питома і технологічна матеріалоемність, габаритні розміри, трудомісткість виготовлення, особливості розташування шарів сталі стрижнів і ярем у площинах стиків і кількість складених елементів магнітопровода, а також інші показники [10].

Комплексна оцінка якості СПМ можлива при проведенні структурної оптимізації просторових ЕМС. Однак коефіцієнти (3.3), разом з питомою масою АЧ, є найбільш важливими показниками ТТ із просторовою ЕМС для електротехнічних комплексів транспортних засобів, особливо морських підводних і авіаційно-космічних. Зазначені коефіцієнти визначаються міжосьовою відстанню b_{oc} (рис. 3.7, б) геометричних центрів перетинів стрижнів.

Серед розглянутих ЕМС мінімальною кількістю активних елементів і збігом напрямків шихтовки і прокату шарів електротехнічної сталі зон стрижнів і ярем відрізняється ВПМ (рис. 3.5). Однак його особливістю є максимальна величина b_{oc} і найбільш низькі значення ($k_{ко} = 0,3...0,4$) коефіцієнтів (3.3), обумовлені необхідністю вмотування котушок обмотки в зібраний магнітопровод.

Коефіцієнти (3.3) і компактність просторових ЕМС можуть бути підвищені способом зменшення відстані b_{oc} на основі нетрадиційних конфігурацій стрижнів, ярем і котушок обмотки, що забезпечують паралельність стінок обмоткових вікон [9, 11].

3.2. Обґрунтування зниження масогабаритних показників просторових трансформаторів

Конструкція трансформатора характеризується схемою АЧ, конструктивними особливостями магнітопровода й обмоток. Удосконалення ТТ можливо шляхом зміни конструкції і конфігурації стрижнів і ярем магнітопровода.

Розробка удосконалених ТТ малої і середньої потужності можлива на основі просторового стикового магнітопровода [2, 14] з паралельними стінками обмоткових вікон і технологічних способів їхнього виготовлення [16]. Перший варіант (рис. 3.10) конструкції і конфігурації зазначеного магнітопровода містить кільцеві

кручені ярма із шестигранним внутрішнім контуром і стрижні, виконувані з кручений заготовлі з тригранним внутрішнім контуром. У трансформаторі з крученим СПМ зазначеного типу перетин кожного з трьох стрижнів складається з двох секторів abc і $a'b'c'$ утворених радіусом, рівним довжині $l_{\text{я}}$ ярма і центральних кутів 60° , а також розташованим між секторами прямокутником $abb'a'$ з довжиною, рівної $l_{\text{я}}$ і шириною, рівній ширині b_c грані ярма на стику зі стрижнем. Конструктивно стрижні замкнуті з торців кільцевими навитими ярмами з конфігурацією внутрішнього контуру у виді симетричного шестигранника з трьома гранями шириною b_c і трьома гранями шириною b_o обмоткового вікна. Для можливості укладання котушок фаз магнітопровід повинний містити стик з технологічним зазором і виконуватися з двох ідентичних деталей, або повинний містити два стики між ярмами, що роздільно виготовляються, і стрижнями.

Другий варіант конструкції і конфігурації стикового магнітопровода (рис. 3.11) може бути використаний для виготовлення електромагнітних пристроїв не тільки малої, але і середньої потужності. Розширення технологічних можливостей виробництва забезпечується трикутним внутрішнім контуром ярма з округленими вершинами граней і складених стрижнів із заготовель у виді коаксіальних ділянок кручених кілець.

Конструкція трифазного просторового «сухого» трансформатора з витим просторовим магнітопроводом (ВПМ) (рис. 3.11, а) представлена на рис. 3.12.

Основою конструкції трансформатора є магнітопровід. Його конфігурація визначає головні розміри АЧ, геометрію обмоток і показники всього електромагнітного пристрою. Головними геометричними параметрами магнітопровода і трансформатора у цілому є площа перетину Π_c стали стрижня і площа перетину Π_o обмоткового вікна [10]. Однієї і тієї ж Π_c можуть відповідати різні співвідношення ширини b_o і висоти h_o обмоток, а також середньої довжини $l_{\text{вср}}$ витків обмоток [10].

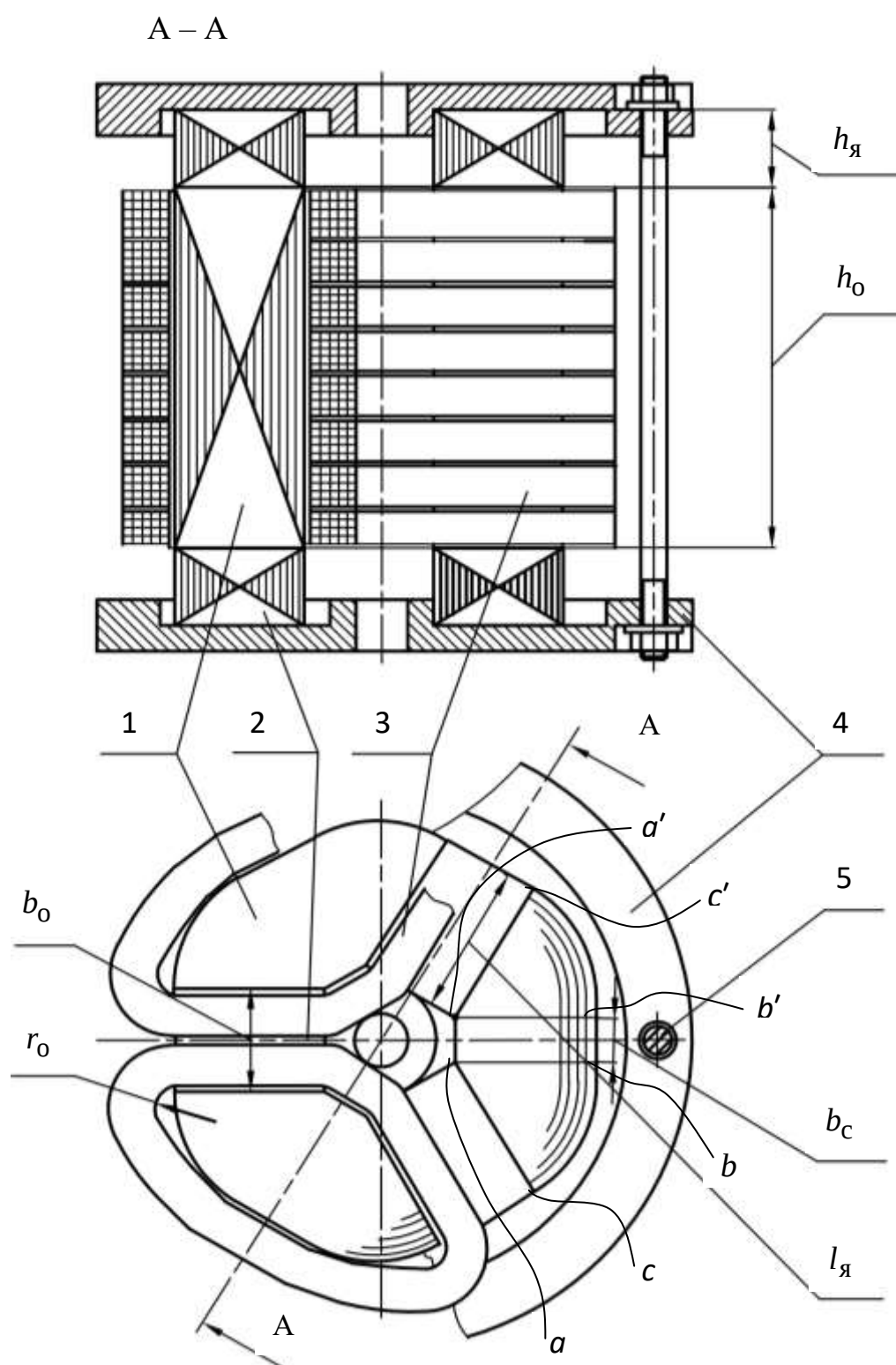


Рис. 3.10. Схема трифазного трансформатора малої потужності з шестиграним внутрішнім контуром магнітопровода:

- 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки; 4 – підстава кістяка;
5 – шпилька стяжки.

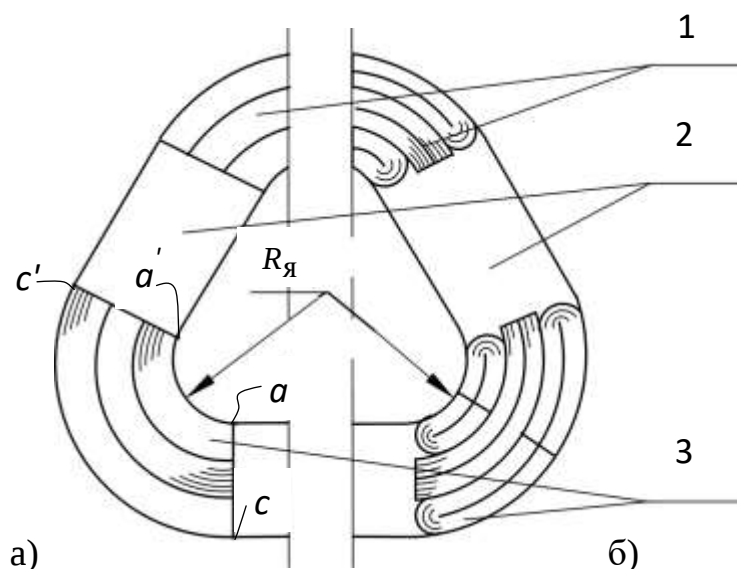


Рис. 3.11. Конструкції і геометрія крученого просторового магнітопровода з складеними стрижнями з концентрично намотаних розрізних а) і розрізних і сплюснених б) заготівель:

1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – заготівля стрижня.

Замість параметра β_0 в ТТ малої і середньої потужності може використовуватися відношення λ_0 висоти і ширини обмоткового вікна [10]

$$\lambda_0 = h_0 / b_0 .$$

Згідно [10] меншим β_0 (і, відповідно великим λ_0) відповідає менша маса сталі і велика маса обмоток. Зі збільшенням β_0 маса стали збільшується, а маса міді зменшується. β_0 Чи вибір λ_0 істотно впливає на співвідношення розмірів і мас активних матеріалів трансформатора і, відповідно, на всі техніко-економічні показники: напруга короткого замикання U_k [10], утрати, коефіцієнт корисної дії (ККД), струм неробочого режиму і тепловий режим, а також вартість і рівень магнітного шуму.

Відмінною рисою запропонованих у даній роботі конструкцій просторових трансформаторів є більш складна (щодо прямокутника й окружності) конфігурація і можливість забезпечення розрахункової площі перетину стрижня P_c при різних

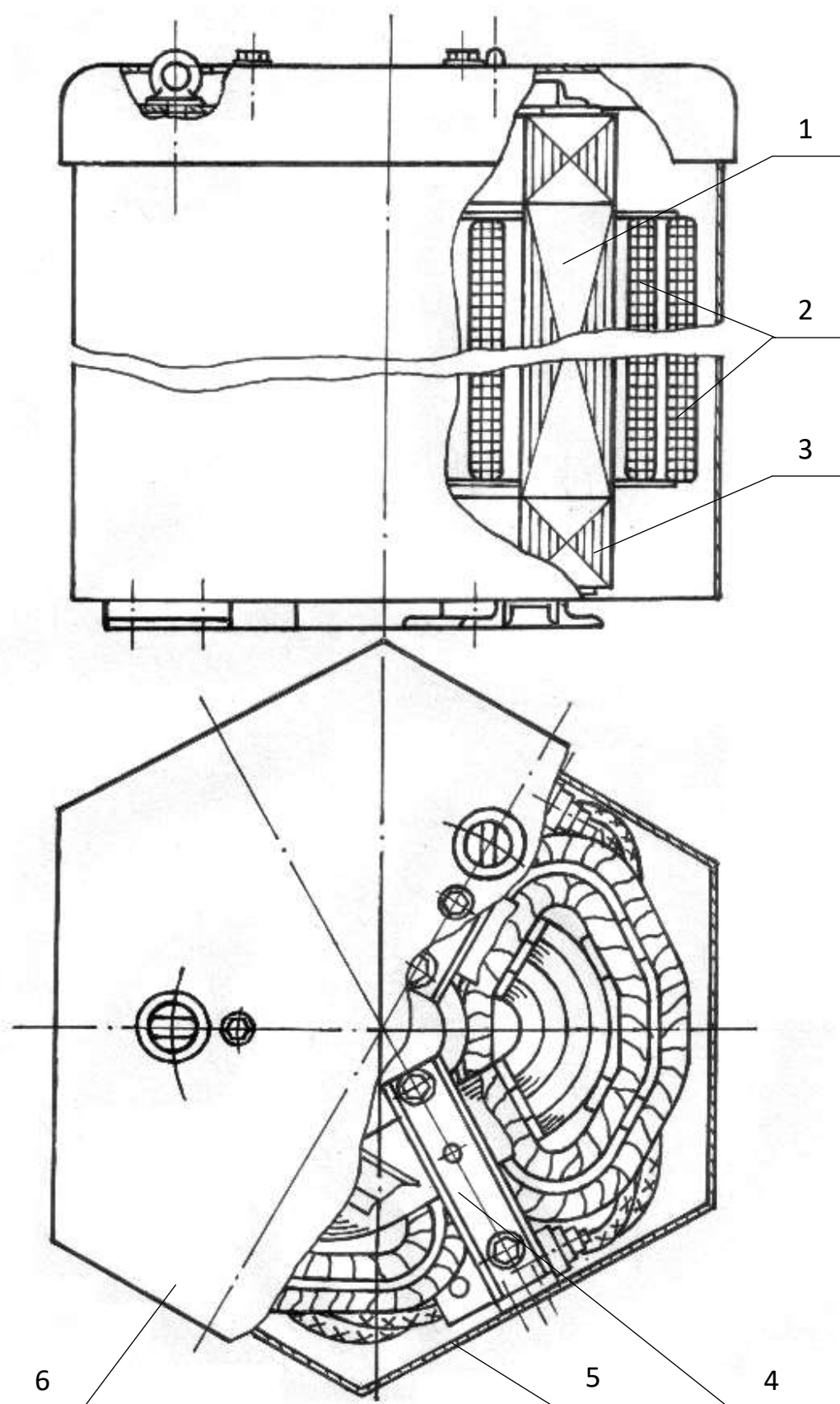


Рис. 3.12. Трифазний трансформатор середньої потужності з ВПМ і складеними стрижнями:

1 – стрижень; 2 – обмотка; 3 – ярмо; 4 – остов; 5 – кожух; 6 – кришка.

співвідношеннях елементів геометрії стрижнів і ярма. У конструкції АЧ (рис. 3.10) геометрія магнітопровода й обмоток визначається величинами зовнішнього D_H і внутрішнього D_B діаметрів окружностей, описаних навколо відповідно зовнішнього і внутрішнього контурів ярма і стрижнів. Геометричні співвідношення АЧ також залежать від відношення величин граней b_c і b_o внутрішнього контуру магнітопровода (рис. 3.13), центральних кутів стрижня α_c і α_o обмотувального вікна.

Аналогічно, у конструкції АЧ із ВПМ (рис. 3.11) геометричні співвідношення елементів магнітопровода й обмоток також залежать від величин D_H і D_B діаметрів контурних окружностей (рис. 3.14), а також секторних відрізків b_c і b_o внутрішнього контуру магнітопровода і кутів α_c і α_o .

Відомо також, що техніко-економічні показники індукційних перетворювачів із просторовою структурою замикання електромагнітного поля в сталі й аксіальному напрямку силових ліній у робочому чи стиковому зазорі в значній мірі залежать від геометричних співвідношень зовнішнього і внутрішнього контурів магнітопровода [2].

3.3. Визначення та обґрунтування технології виготовлення просторових магнітопроводів

Організація технологічного процесу автоматизованого виробництва нетрадиційних ВПМ для ТТ (рис. 3.13, рис. 3.14) малої і середньої потужності, реакторів і дроселів можлива на основі двох принципово різних технологічних способів виготовлення кручених магнітопроводов електричних машин з аксіальним робочим зазором [16].

Один зі способів розглянутих у [16] можна використовувати для виготовлення циліндричних одностикових ВПМ шляхом формування заготівель за схемою рис. 3.15 за допомогою намотування стрічки з одночасним штампуванням виїмок відповідних половині площі обмоткового вікна.

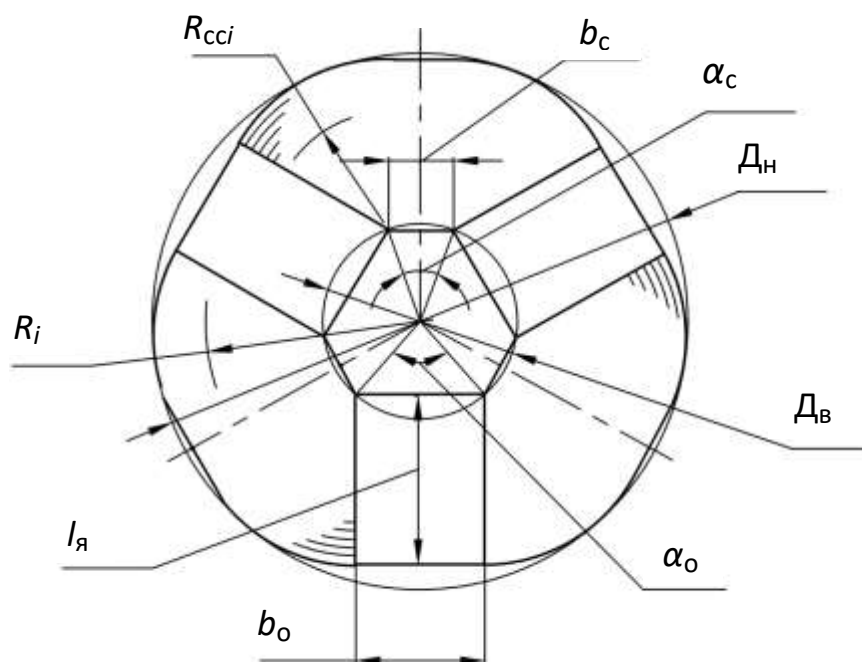


Рис. 3.13. Варіант конфігурації і геометричні параметри магнітопровода із шестиграним внутрішнім контуром

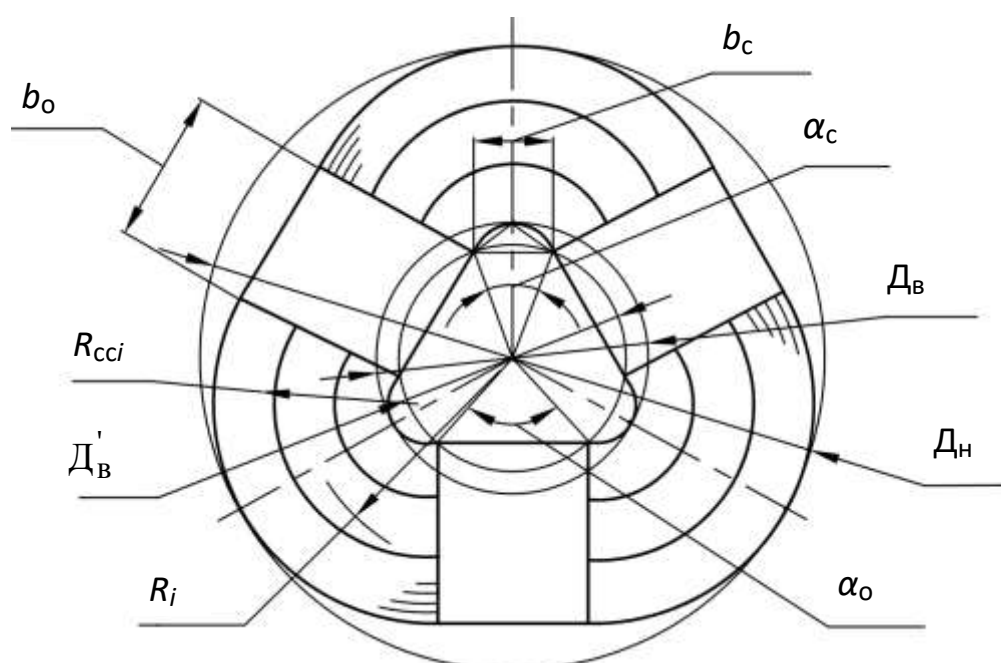


Рис. 3.14. Варіант конфігурації і геометричні параметри магнітопровода з трикутним внутрішнім контуром

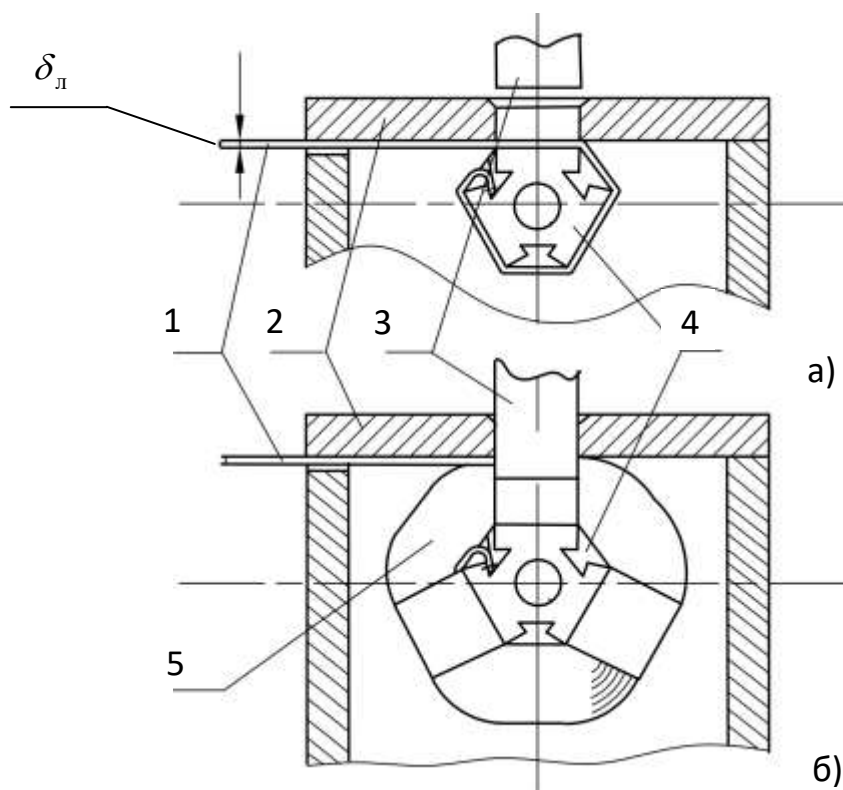


Рис. 3.15. Схема пристрою в початковому (а) і кінцевому (б) положеннях вирубки виїмки при виготовленні магнітопровода зі штампованими обмотковими вікнами:

1 – стрічка стали; 2 – притиск; 3 – пуансон; 4 – оправлення; 5 – заготівля магнітопровода.

Відповідно до опису способу [16] стрічка електротехнічної сталі намотується на обертову оправлення з отворами по числу виїмок, а матриця і пуансон розташовані усередині намотуваного спірального пакета. В міру намотування пакета пуансон пробиває виїмки, а матриця відсувається на відстань, яка дорівнює товщині стрічки. Однак подібна реалізація розглядімого способу через обмеженість простору зони внутрішнього контуру ярма для виробництва описаних вище ВПМ трансформаторів неприйнятна.

Для можливості штампування виїмок при намотуванні зі стрічки електротехнічної сталі заготівель (половинок ВПМ) із шести чи тригранним внутрішнім контуром у [16] запропоновано також пристосування схеми (рис. 3.15) у який пуансон

розташований зовні заготівлі, а функцію матриці виконує притиск і обертова оправлення з трьома отворами штампування половин віконних виїмок. Після кожного удару пуансона оправлення і заготівля повинні повернутися на 120° і зміститися вниз (разом з опорною платформою, на малюнку не показана) на товщину $\delta_{\text{л}}$ стрічки електротехнічної сталі.

Другий спосіб [16] маловідхідного виготовлення складених симетричних ВПМ електромашин включає операції намотування, ізолювання шарів чи обволіканням просоченням з наступним скріпленням витків електротехнічної сталі термічним отвердінням ізолюючого сполучного, а також розрізки заготівель і шліфування стикових торцевих поверхонь. Одна з заготівель призначена для формоутворення пазової зони і розрізається на задане число зубців. Зубці встановлюються на оправлення і з'єднуються з кільцевим крученим ярмом в опресованому стані, наприклад склеюванням клейовим складом, що містить феромагнітний композиційний матеріал.

Стосовно до виготовлення способом [16] ВПМ із шестигранним внутрішнім контуром заготівля нарізки стрижнів намотується у виді спірального пакета шириною $l_{\text{я}}$ (мал. 3.16) на тригранне оправлення з формою перетину у виді рівностороннього трикутника з округленими радіусом $r_{\text{с}}$ вершинами граней. Ширина $b_{\text{с}}$ кожної грані між скругленнями дорівнює ширині грані ярма на стику зі стрижнем.

Розрізка заготівлі на три частини (мал. 3.16) виконується під кутами 120° по осях вершин граней. Інструментом може служити нитка електрода електроерозійного пристрою, що ріже диск електрообразивного пристрою, а також корундовий чи алмазний диск, що забезпечують мінімальні відходи електротехнічної сталі при розрізанні, а також відсутність (нитка електрода) чи мінімальні додаткові втрати в сталі, обумовлені розрізанням [16]. Зазначені відходи стали малі у випадку ширини $b_{\text{пр}}$ прорізу, що задовольняє умові

$$b_{\text{о}} \gg b_{\text{пр}} \approx 2r_{\text{с}} \geq \delta_{\text{л}} .$$

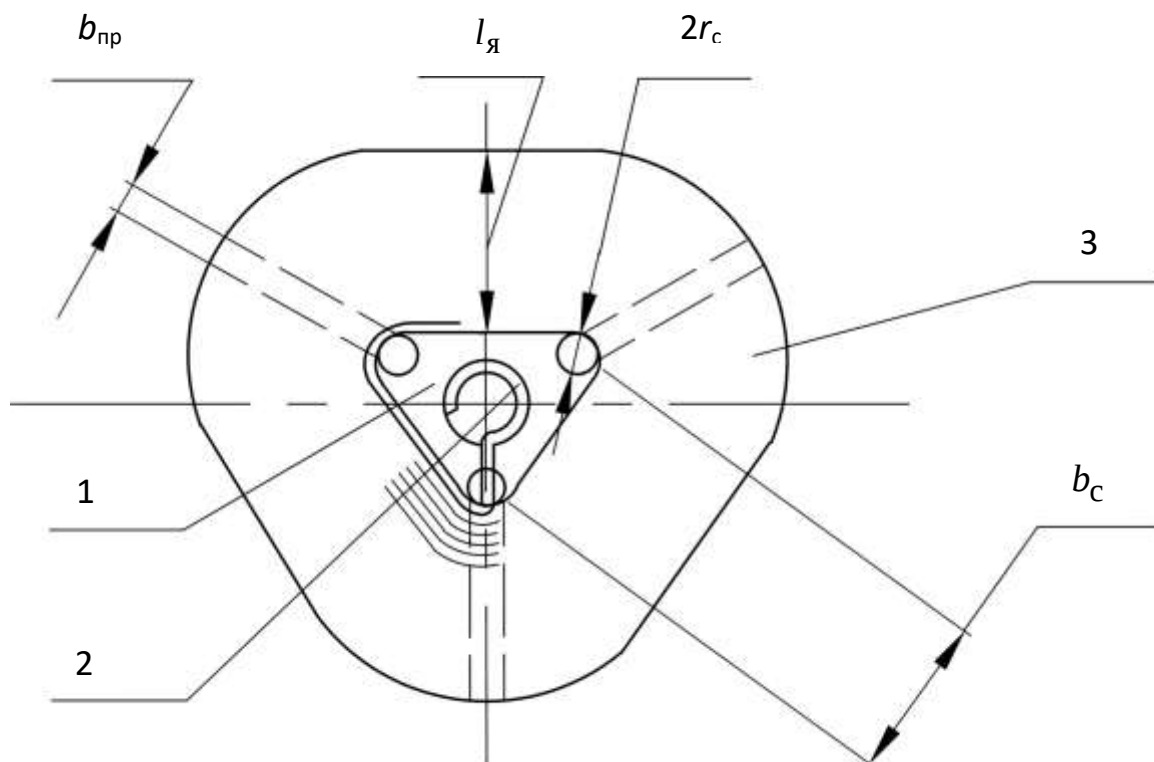


Рис. 3.16. Спосіб і заготівля розрізання стрижнів:

1 – оправлення; 2 – стрічка стали; 3 – заготівля.

Кожне з ярем намотується на грановане оправлення (рис. 3.17) і зовнішній контур заготівлі шириною $l_{\text{я}}$ приймає шестигранну форму з округленими радіусом $R_{\text{ян}} \approx l_{\text{я}}$ вершинами

$$R_{\text{ян}} \approx r_{\text{я}} + n_{\text{с}} \delta_{\text{л}} / k_{\text{зс}},$$

де $n_{\text{с}}$ - число витків стрічки електротехнічної сталі на довжині $l_{\text{я}}$ ярма;

$r_{\text{я}}$ - радіус скруглення грані оправлення ярма ($r_{\text{я}} \geq \delta_{\text{л}}$).

Забезпечується практичний збіг ділянок контурів трьох стрижнів між площинами розрізів заготівлі стрижнів з відповідними їм ділянками зовнішнього і внутрішнього контурів ярма при обмотувальних вікнах з рівнобіжними стінками.

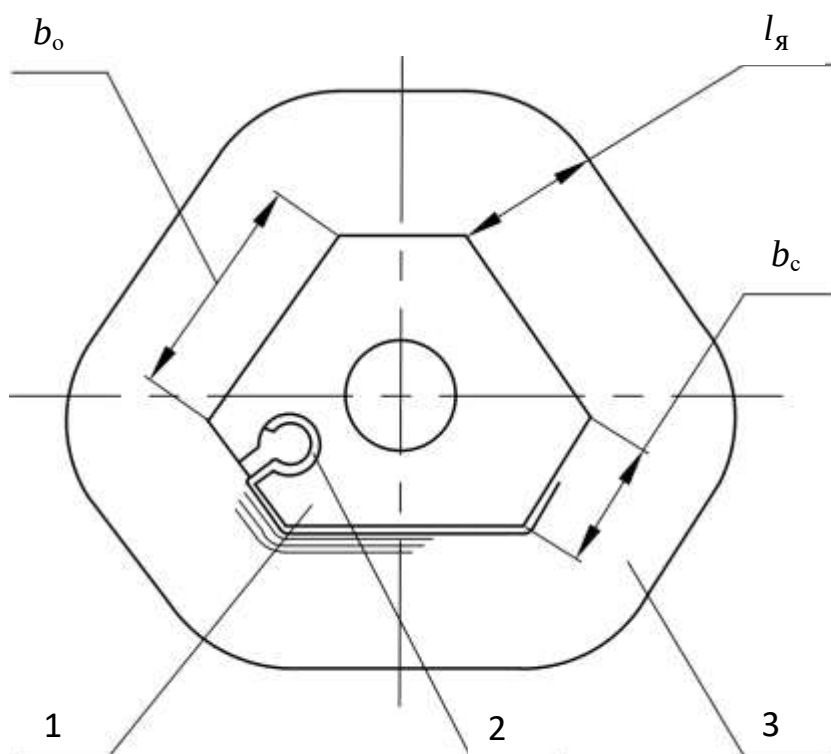


Рис. 3.17. Намотування ярма:

1 – оправлення; 2 – стрічка стали; 3 – заготівля ярма.

Відходи електротехнічної сталі при використанні технології відповідно до рис. 3.15 складають 25...35...35 %, а при виробництві двохстикових магнітопроводів відповідно до рис. 3.16 і рис. 3.17 обсяг відходів знижується до 5...8...8 %. Однак намотування стрічки на оправлення трикутного перетину можливі при $\delta_{л} < 0,35$ мм, а розміри заготівель ВПМ (рис. 3.16) обмежені різальним інструментом до 150...200мм по діаметрі описаної окружності (діаметр корундового чи алмазного диска, що ріже, дорівнює 150...300 мм при товщині 1...2 мм).

Виробництво розрізних стикових ВПМ із розмірами більш 200 мм по діаметрі описаної окружності для електромагнітних пристроїв малої і середньої потужності може бути організоване на основі ЕМС зі складеними стрижнями (рис. 3.12). Складені стрижні ВПМ можуть виконуються зі стрічки електротехнічної сталі одним із трьох можливих технологічних варіантів.

Відповідно до першого варіанта складові частини стрижнів (рис. 3.11, а) виконуються з кручених кільцевих концентричних заготівель (рис. 3.18) які після на-

мотування, що ізолює просочення і скріплення витків отвердінням ізоляційного сполучного розрізаються під кутами 120° описаними вище способами.

По другому варіанті технології, «сплющені» ділянки стрижня ВПМ (рис. 3.11, б) можуть пресуватися за допомогою матриці і пуансона з круглих стрічкових заготівель (рис. 3.19, а і б). При цьому необхідні наступні чи прорізання обрізка (шліфування) щонайменше однієї крайньої зони елемента стрижня, наприклад з боку протилежної скругленню радіусом $\sim r_{\text{СК}}$ утвореним на краї елемента стрижня в процесі опресовки (рис. 3.19, б).

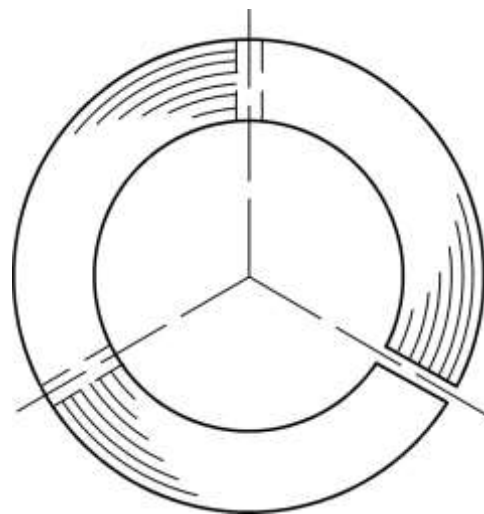


Рис. 3.18. Заготівля розрізання ділянок стрижнів

Недоліком магнітопроводов зі сплюснених за допомогою технологічного способу (рис. 3.19) ділянок стрижнів є зниження заповнення геометричного контуру $acc'a'$ (рис. 3.11, а) сталлю. Однак зазначений недолік компенсується зменшенням середніх довжин витків котушок обмотки при забезпеченні технологічного скруглення кутових зон стрижня без додаткової механічної обробки. При цьому коефіцієнт заповнення контуру $acc'a'$ сталлю, може бути підвищений до величини $k_K = 0,9...0,95$ у варіанті ВПМ (рис. 3.11, б). У зазначеному СПМ розрізні сплющені елементи утворюють зовнішню і внутрішню радіальні поверхні стрижнів. Середні частини стрижнів складаються з ділянок розрізних заготівель (рис. 3.18).

Відповідно до третього варіанта використовується відомий спосіб нарізки й обпресування пакетів смуг сталі і технологічне устаткування. Сутність способу полягає в послідовній розрізу стрічки електротехнічної сталі на відрізки різної довжини (східчасте різання). Відрізки стрічки потім пакетируються і загинаються пресом за схемою, аналогічної рис. 3.19. Послідовна східчаста нарізка стрічки виробляється за допомогою спеціальних автоматичних ліній [16]. Розгорнуті довжини крайніх заготівель після шліфування крайових зон повинні відповідати третини

довжини відповідної окружності радіусів внутрішнього і зовнішнього скруглень контурів ярма (рис. 3.11, б).

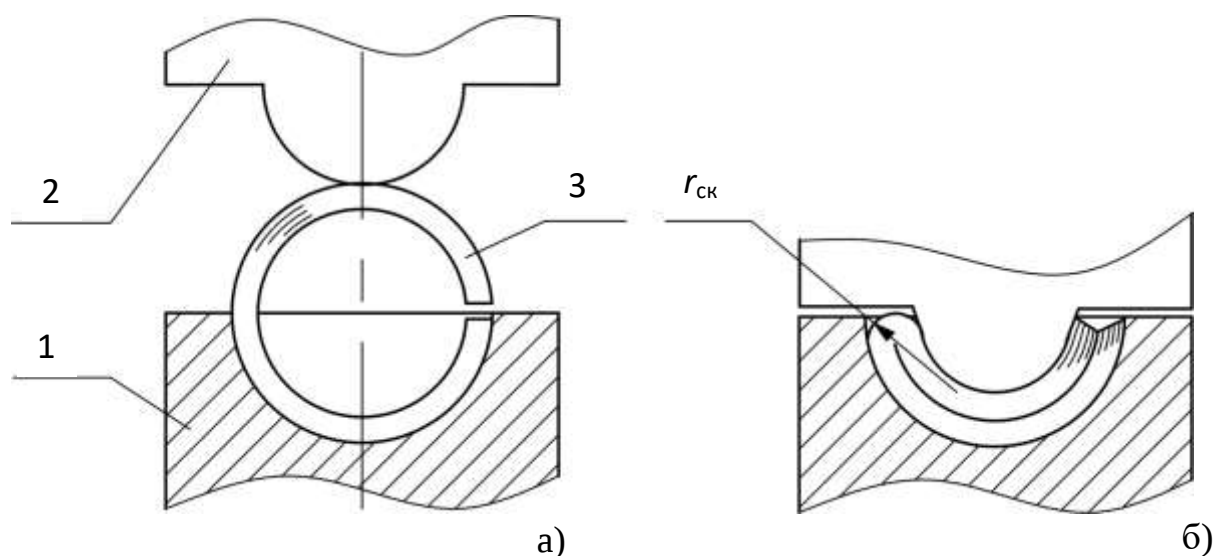


Рис. 3.19. Заготівля а) і спресована ділянка б) стрижня:

1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – заготівля.

3.4. Висновки до розділу 3

3.4.1. У теперішній час досягнута певна межа підвищення техніко-економічних показників електромагнітних і електромеханічних перетворювачів з традиційними виконаннями ЕМС.

2.4.2. Одним з напрямів удосконалення трифазних силових і спеціальних трансформаторів є використання симетричного просторового магнітопровода.

2.4.3. Зниження габаритних розмірів і підвищення компактності просторових ЕМС можливо способом зменшення міжосьової відстані геометричних центрів перерізів стержнів, що реалізується у ВПМ з паралельними твірними поверхнями.

2.4.4. Для організації виробництва ТТ малої і середньої потужності з технологією виготовлення АЧ близької до безвідходної, доцільне використання запропонованих способів виготовлення ВПМ з шестигранним і трикутним внутрішніми контурами стержнів і ярм.

4. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА З ПРОСТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ

4.1. Вибір електромагнітних навантажень і розрахунок головних розмірів

4.1.1. Проектне завдання:

$S_H = 4,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $m = 3$; $f = 50 \text{ Гц}$; $U_1 = 220 \text{ В}$; $U_2 = 27 \text{ В}$; $\cos\varphi_2 = 0,76$; $\Delta U = 1 \%$; схема і група з'єднання обмоток: трикутник /зірка; виконання – “сухий” захищений; тип магнітопроводу – витий двохстиківий з тригранним внутрішнім контуром; призначення – силовий трансформатор системи електрообладнання глибоководного дзвону; матеріал обмоток – мідь.

4.1.2. Активна потужність вторинної обмотки трансформатора

$$P_{2H} = S_H \cos\varphi_2 = 4,3 \cdot 0,76 = 3,27, \text{ кВт.}$$

4.1.3. Попередній розрахунковий лінійний струм первинної обмотки

$$\begin{aligned} I_{1H} &= P_{2H} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_e \cdot \cos\varphi'_1) = \\ &= 3,27 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,912) = 10,456, \text{ А,} \end{aligned}$$

де $\cos\varphi'_1 = 1 / \sqrt{1 + 0,45^2} = 0,912$, $\eta_e = 0,9$ - попередні розрахункові енергетичні коефіцієнти трансформатора.

4.1.4. Номінальний лінійний струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = S_2 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_2) = 4,3 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 27) = 69,924, \text{ А.}$$

4.1.5. Попередні електромагнітні навантаження приймаються рівними:

$$B_c = 1,3 \text{ Тл}; \Delta_1 = 266 \text{ А/см}^2; \Delta_2 = 296 \text{ А/см}^2.$$

4.1.6. Коефіцієнти напруг і потужностей первинної і вторинних обмоток:

$$K_{U1} = 1 - \frac{\Delta U\%}{200} = 1 - \frac{1}{200} = 0,995;$$

$$K_{U2} = 1 + \frac{\Delta U\%}{200} = 1 + \frac{1}{200} = 1,005.$$

4.1.7. Коефіцієнт початкових даних

$$K_{\text{нд}} = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot B_c} \cdot \left(\frac{K_{U1}}{\Delta_1 \eta_c \cos \varphi_1} + \frac{K_{U2}}{\Delta_2} \right) =$$

$$= \frac{3,27 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 1,3} \cdot \left(\frac{0,995}{266 \cdot 0,9 \cdot 0,912} + \frac{1,005}{296} \right) = 600,741.$$

4.1.8. Коефіцієнти кута стержня ($\alpha_c = 15^\circ \dots 30^\circ$, приймається $\alpha_c = 30^\circ$):

$$K_{\alpha 1} = \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) = \sin \frac{30^\circ}{2} \left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right) = 0,289;$$

$$K_{\alpha 2} = \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) / \left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) =$$

$$= \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{30^\circ}{2} \right) / \left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right) = 0,634.$$

4.1.9. Коефіцієнт зміни маси магнітопровода при $K_K = 1,0$ і $K_B = 1,0$

$$K_M = (a-1) \left(4\sqrt{3} / \left[\lambda_o (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) K_{\alpha 2}^2 \right] \right)^3 \times$$

$$\times \left\{ K_{\alpha 2} \lambda_o \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[\pi \left(\frac{a-1}{2} + \frac{2K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) + 3K_{\alpha 2} \right] \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) \right\} =$$

$$= (a-1) \left(4\sqrt{3} / \left[\lambda_o (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) 0,634^2 \right] \right)^3 \times$$

$$\times \left\{ 0,634 \lambda_o \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[\pi \left(\frac{a-1}{2} + \frac{2 \cdot 0,289}{\sqrt{3}} \right) + 3 \cdot 0,634 \right] \times \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) \right\}.$$

4.1.10. Коефіцієнт зміни маси обмотки

$$K_O = \lambda_o \left(4\sqrt{3} / \left[\lambda_o (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) K_{\alpha 2}^2 \right] \right)^3 K_{\alpha 2}^2 \times$$

$$\times [1,181(a-1) + 1,286K_{\alpha 1} + 0,7195K_{\alpha 2}] =$$

$$= \lambda_o \left(4\sqrt{3} / \left[\lambda_o (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) \cdot 0,634^2 \right] \right)^3 \cdot 0,634^2 \times$$

$$\times [1,181(a-1) + 1,286 \cdot 0,289 + 0,7195 \cdot 0,634].$$

4.1.11. Залежності маси АЧ від керованих змінних координат a і λ_0

$$K_a = K_m + 3\gamma_0 K_{30} K_0 / (\pi \gamma_c K_{3c}) = \\ = K_m + 3 \cdot 8900 \cdot 0,38 \cdot K_0 / (\pi \cdot 7650 \cdot 0,91),$$

де $\gamma_0 = 8900 \text{ кг/м}^3$ – щільність міді обмоткового проводу; K_{30} – коефіцієнт заповнення обмоткового вікна ($K_{30} = 0,32 \dots 0,38$) приймається рівним 0,34; $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ – щільність електротехнічної сталі 2412; $K_{3c} = 0,91$ – коефіцієнт заповнення магнітопровода сталлю.

4.1.12. Геометрична оптимізація головних розмірів.

Головні розміри и геометричні співвідношення визначимо з врахуванням критерію мінімуму маси на основі численного моделювання (з використанням ЕОМ) на основі коефіцієнта початкових даних, електромагнітних навантажень і функціональної залежності $K_a = F(a, \lambda_0)$ при зміні координат $a = 1,6 \dots 2,2$; $\lambda_0 = 2,6 \dots 3,2$, $\alpha_c = 30^\circ$ за методикою, яку наведено у роботі [2]. При цьому мінімуму маси відповідає найменший з екстремумів вказаних залежностей, які наведено на рис. 4.1 і в табл. 4.1.

Як видно з рис. 4.1. мінімуму маси АЧ проектуемого трансформатора відповідають величини $a = 1,8$ и $\lambda_0 = 3,0$ при незмінної координаті $\alpha_c = 30^\circ$. Зі зменшенням кута α_c металоємність трансформатора знижується [2], однак при величинах $\alpha_c < 20 \dots 30^\circ$ різко зростає нерівномірність радіального розподілу індукції в ВПМ і, як наслідок, зростають додаткові втрати і ухудшається використання активного об'єму. Крім того, величина α_c при товщині сталі $\delta_{\text{л}} = 0,5 \text{ мм}$ обмежена технологічним нижнім преділом $20 \dots 35^\circ$. Координати a и λ_0 во вказаних на рис. 4.1 діапазонах технологічних обмежень не мають.

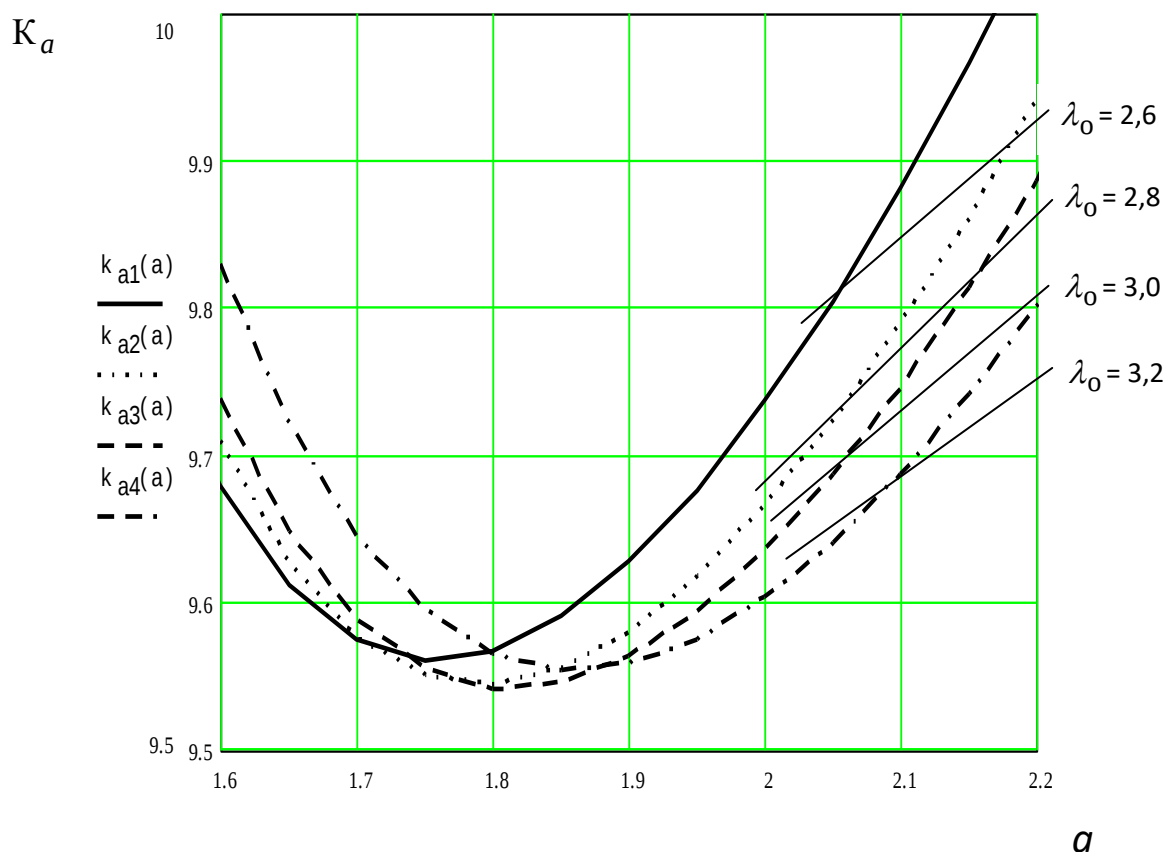


Рис. 4.1. Залежність коефіцієнта зміни маси від геометричних параметрів

Таблиця 4.1

Розрахункові значення коефіцієнта зміни маси

a	Величини K_a			
	$\lambda_0 = 2,6$	$\lambda_0 = 2,8$	$\lambda_0 = 3,0$	$\lambda_0 = 3,2$
1,6	9,68	9,71	9,739	9,831
1,7	9,575	9,545	9,59	9,646
1,8	9,568	9,545	9,564	9,566
1,9	9,628	9,581	9,564	9,559
2,0	9,737	9,666	9,637	9,604

4.1.13. Внутрішні діаметри описаного кола магнітопровода, см:

$$D_B = \sqrt[4]{\frac{3K_{пд}}{\pi K_{30} K_{3c} \lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) K_{\alpha 2}^2}};$$

$$= \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 600,741}{\pi \cdot 0,34 \cdot 0,91 \cdot 3,0(1,8-1) \cdot \left[\frac{0,289}{\sqrt{3}} + \frac{(1,8-1)}{3} \right] \cdot 0,634^2}} = 8,509;$$

$$D'_B = \frac{D_B}{\left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)} = \frac{8,509}{\left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right)} = 7,629.$$

4.1.14. Зовнішній діаметр описаного кола магнітопровода

$$D_3 = a \cdot D_B = 1,8 \cdot 8,509 = 15,316, \text{ см.}$$

4.1.15. Ширина обмоткового вікна магнітопровода

$$b_o = D_B \cdot K_{\alpha 2} = 8,509 \cdot 0,634 = 5,394, \text{ см.}$$

4.1.16. Ширина стержня

$$b_c = D_B \cdot K_{\alpha 1} = 8,509 \cdot 0,289 = 2,456, \text{ см.}$$

4.1.17. Висота обмоткового вікна магнітопровода

$$h_o = \lambda_o \cdot b_o = 3,0 \cdot 5,394 = 16,183, \text{ см.}$$

4.1.18. Площина перерізу стержня

$$P_c = \frac{\pi}{3} K_{3c} D_B^2 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) =$$

$$= \frac{\pi}{3} \cdot 0,91 \cdot 8,509^2 (1,8-1) \left(\frac{1,8-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 20,239, \text{ см}^2.$$

4.1.19. Висота ярма трансформатора

$$h_{я} = \frac{P_c K_B}{\sqrt{3} K_{3c} l_{я}} = \frac{2\pi K_B D_B}{3\sqrt{3}} \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 8,509}{3\sqrt{3}} \left(\frac{1,8-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 3,773, \text{ см.}$$

4.1.20. Довжина ярма трансформатора

$$l_{\text{я}} = \frac{(D_{\text{н}} - D_{\text{в}})}{2} = \frac{(15,316 - 8,509)}{2} = 3,404, \text{ см.}$$

4.1.21. Площини перетину витків первинної і вторинної обмоток при з'єднанні трикутник / зірка, см^2 :

$$\Pi'_{\text{еф1}} = \frac{I_{1\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot \Delta_1} = \frac{10,456}{\sqrt{3} \cdot 266} = 22,7 \cdot 10^{-3};$$

$$\Pi'_{\text{еф21}} = \frac{I_2}{\Delta_2} = \frac{69,924}{296} = 0,2362.$$

4.1.22. Діаметри та кількість елементарних провідників у ефективному:

$$n_{\text{ел1}} = \Pi'_{\text{еф1}} / S_{\text{ел1}} = 0,0227 / 0,0227 = 1;$$

$$n_{\text{ел2}} = \Pi'_{\text{еф2}} / S_{\text{ел2}} = 0,2362 / 0,0394 \approx 6.$$

Для первинної і вторинної обмоток обираються круглі мідні проводи марки ПЕТ – 155. З таблиці [19] діаметрів і площин перетинів вказаних проводів обираються кількість елементарних провідників і стандартні діаметри з площинами перетинів: $\Pi_{\text{еф1}}$; $\Pi_{\text{еф2}}$ найбільш близькими до розрахункових $\Pi'_{\text{еф1}}$, $\Pi'_{\text{еф2}}$: $d_1 = 1,7$ мм; $d_2 = 2,24$ мм; $S_{\text{ел1}} = 2,27 \text{ мм}^2$; $S_{\text{ел21}} = 3,94 \text{ мм}^2$.

4.1.23. Уточнювання електромагнітних навантажень

$$\Delta_1 = I_{1\text{н}} / (\sqrt{3} \Pi_{\text{еф1}}) = 10,456 / \sqrt{3} \cdot 0,0227 = 266, \text{ А/см}^2;$$

$$\Delta_2 = I_2 / \Pi_{\text{еф2}} = 69,924 / 0,2362 = 296, \text{ А/см}^2;$$

$$B_c = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot K_{\text{пд}}} \cdot \left(\frac{K_{U_1}}{\Delta_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{K_{U21}}{\Delta_2} \right) =$$

$$= \frac{2,155 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 600,741} \cdot \left(\frac{0,995}{266 \cdot 0,9 \cdot 0,912} + \frac{1,005}{296} \right) = 1,3, \text{ Тл.}$$

4.1.24. Числа витків обмоток:

$$w_1 = \frac{K_{U1} \cdot U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{0,995 \cdot 220 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 20,239} = 375;$$

$$w_2 = \frac{K_{U2} \cdot U_2 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 27 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 20,239} = 27.$$

4.2. Розрахунок розподілу індукції в технологічному зазорі та струму неробочого руху

Згідно до роботи [20], розрахунок магнітного кола за класичною методикою по середньому значенню індукції, яке було прийнято в початкової стадії проектування викликає значні похибки, тому що в трансформаторі просторової конструкції внаслідок радіальної зміни геометрії змінюється також індукція в цьому напрямі. Розрахунок магнітного кола виконано за методикою [20] на основі закону повного струму методом послідовних наближень, за алгоритмом, блок-схему якого наведено на рис. 4.2.

У магнітопроводі використовується стрічкова нетекстурована ($\chi_\mu = 1$) холоднокатана електротехнічна сталь марки 2412. Технологічний стиковий зазор приймається рівним 0,06 мм та забезпечується шліфовкою стикових поверхонь.

4.2.1. На середньої ділянці зазору (радіус скруглення стержня R_{ccc}) приймається індукція $B_{\delta c} = B_c = 1,45$ Тл та по кривій намагнічування [19] визначається магнітна напруженість середньої ділянці стержня $H_{cc} = 17,5$ А/см.

4.2.2. Радіус скруглення стержня на середній ділянці

$$R_{ccc} = l_{\text{я}} / 2 = 3,404 / 2 = 1,702, \text{ см.}$$

4.2.3. Еквівалентний стиковий зазор на радіусі R_{ccc}

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{ccc}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{ccc}/3} = \\ &= 0,006 \frac{10 \cdot 0,006 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,702/3}{10 \cdot 0,006 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,702/3} = 0,011, \text{ см.} \end{aligned}$$

4.2.4. Значення МРС в технологічному зазорі на середній ділянці

$$F_{\delta c} = 2B_{\delta c}\delta' \cdot 10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,45 \cdot 0,011 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 251,734, \text{ А.}$$

4.2.5. Значення МРС в стержні на середньої ділянці

$$F_{cc} = H_{cc}h_o = 17,5 \cdot 16,183 = 283,21, \text{ А.}$$

4.2.6. Поліусне ділення середньої ділянки

$$\tau_c = 1,5b_o + \pi(R_{ccc} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 5,394 + \pi(1,702 + 2,456/\sqrt{3}) = 17,893, \text{ см.}$$

4.2.7. Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для середньої ділянки

$$\zeta_c = \frac{2h_y}{(1-K_3)\tau_c} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi h_y/\tau_c\}} + \frac{K_3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi h_y/\tau_c\}} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,773}{(1-0,3) \cdot 17,893} \left[\frac{1}{\text{th}\{3,773/17,893\}} + \frac{0,3}{3 \cdot \text{th}\{3 \cdot 3,773/17,893\}} \right] = 1,101,$$

де K_3 – коефіцієнт амплітуди третьої гармоніки індукції ($K_3 = 0,2 \dots 0,3$), приймається рівним 0,3.

4.2.8. Індукція в ярмі на середній ділянці

$$B_{яc} = B_{\delta c} [2\pi(R_{ccc} + b_c/\sqrt{3})/3] / (h_y \sqrt{3}) =$$

$$= 1,45 [2\pi(1,702 + 2,456/\sqrt{3})/3] / (3,773 \cdot \sqrt{3}) = 1,272, \text{ Тл.}$$

По кривій намагнічування визначається магнітна напруженість ярма на середній ділянці: при $B_{яc} = 1,272 \text{ Тл}$, $H_{яc} = 4,86 \text{ А/см}^2$.

4.2.9. МРС ярма для середньої ділянки

$$F_{яc} = \zeta_c 2H_{яc} (h_y + b_o + b_c + 2\pi R_{ccc}/3) / \sqrt{3} =$$

$$= 1,101 \cdot 2 \cdot 4,86 \cdot (3,773 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,702/3) / \sqrt{3} = 97,039, \text{ А.}$$

4.2.10. Значення сумарної МРС середньої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F'_{\Sigma c} = F_{\delta c} + F_{cc} + F_{яc} = 251,734 + 283,21 + 97,039 = 631,983, \text{ А.}$$

4.2.11. Приймається кількість розрахункових ділянок, на які поділяється ярмо, $n=5$ та визначається довжина Δl_y і радіус R_{cc1} скруглення першого елемента ярма, см:

$$\Delta l_y = l_y / n = 3,404 / 5 = 0,681; R_{cc1} = \Delta l_y / 2 = 0,681 / 2 = 0,34.$$

4.2.12. Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc1}

$$\delta' = \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{cc1}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc1}/3} =$$

$$= 0,006 \frac{10 \cdot 0,006 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 0,34/3}{10 \cdot 0,006 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 0,34/3} = 0,015, \text{ см.}$$

4.2.13. Індукція в технологічному зазорі на першій ділянці приймається рівною $B_{\delta 1} = 1,45 \text{ Тл}$; по кривій намагнічування визначається напруженість $H_{c1} = 17,5 \text{ А/м}$.

4.2.14. МРС в технологічному зазорі на першій ділянці

$$F_{\delta 1} = 2B_{\delta 1}\delta' 10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,45 \cdot 0,015 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 338,021, \text{ А.}$$

4.2.15. Значення МРС в стержні на першій ділянці

$$F_{c1} = H_{c1}h_o = 17,5 \cdot 16,183 = 283,21, \text{ А.}$$

4.2.16. Поліусне ділення першої ділянки

$$\tau_1 = 1,5b_o + \pi(R_{cc1} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 5,394 + \pi(0,34 + 2,456/\sqrt{3}) =$$

$$= 13,616, \text{ см.}$$

4.2.17. Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для першої ділянки

$$\zeta_1 = \frac{2h_y}{(1-K_3)\tau_1} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi h_y/\tau_1\}} + \frac{K_3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi h_y/\tau_1\}} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,773}{(1-0,3) \cdot 13,616} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi 3,773/13,616\}} + \frac{0,3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi 3,773/13,616\}} \right] = 1,208,$$

4.2.18. Індукція в ярмі на першій ділянці

$$B_{y1} = B_{\delta 1} [2\pi(R_{cc1} + b_c/\sqrt{3})/3] / (h_y \sqrt{3}) =$$

$$= 1,45 [2\pi(0,34 + 2,456/\sqrt{3})/3] / (3,773 \cdot \sqrt{3}) = 0,717, \text{ Тл.}$$

4.2.19. МРС у ярмі для першої ділянки

$$F_{y1} = \zeta_1 2H_{y1}(h_y + b_o + b_c + 2\pi R_{cc1}/3) / \sqrt{3};$$

$$F_{y1} = 1,208 \cdot 2 \cdot 1,07 \cdot (3,773 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 0,34/3) / \sqrt{3} = 9,592, \text{ А,}$$

де згідно кривої намагнічування при $B_{y1} = 0,717 \text{ Тл}$, $H_{y1} = 1,07 \text{ А/см}$.

4.2.20. Значення сумарної МРС першої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma 1}'' = F_{\delta 1} + F_{c1} + F_{я1} = 338,021 + 283,21 + 9,592 = 630,823, \text{ А.}$$

4.2.21. Перевірка відносної похибки МРС першої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| (F_{\Sigma 1}'' - F_{\Sigma}') / F_{\Sigma 1}'' \right| = |(630,823 - 631,983) / 630,823| = 0,00184 \leq 0,05.$$

Похибка лежить у допустимих межах, тому індукція прийнята вірно. Якщо F_{Σ}' і $F_{\Sigma 1}''$ не збігаються, індукція $F_{\delta 1}$ корегується та розрахунок $F_{\Sigma 1}''$ повторюється.

4.2.22. Радіус елемента ярма на другій ділянці

$$R_{cc2} = R_{cc1} + \Delta l_{я} = 0,34 + 0,681 = 1,021, \text{ см.}$$

4.2.23. Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc2}

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{cc2}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc2}/3} \\ &= 0,006 \frac{10 \cdot 0,006 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,021/3}{10 \cdot 0,006 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,021/3} = 0,012, \text{ см,} \end{aligned}$$

4.2.24. Індукція в технологічному зазорі на другій ділянці приймається $B_{\delta 2} = 1,57$ Тл; по кривій намагнічування визначається напруженість $H_{c2} = 20,1$ А/см.

4.2.25. Значення МРС в технологічному зазорі на другій ділянці

$$F_{\delta 2} = 2B_{\delta 2}\delta' \cdot 10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,57 \cdot 0,012 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 286,88, \text{ А.}$$

4.2.26. Значення МРС в стержні на другій ділянці

$$F_{c2} = H_{c2}h_o = 20,1 \cdot 16,183 = 325,287, \text{ А.}$$

4.2.27. Полосне ділення другої ділянки

$$\tau_2 = 1,5b_o + \pi(R_{cc2} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 4,394 + \pi(1,021 + 2,456/\sqrt{3}) = 15,755, \text{ см.}$$

4.2.28. Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для другої ділянки

$$\zeta_2 = \frac{2h_{я}}{(1-K_3)\tau_2} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi h_{я}/\tau_2\}} + \frac{K_3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi h_{я}/\tau_2\}} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 3,773}{(1 - 0,3) \cdot 15,755} \left[\frac{1}{\operatorname{th}\{\pi 3,773/15,755\}} + \frac{0,3}{3 \cdot \operatorname{th}\{3\pi 3,773/15,755\}} \right] = 1,145 ,$$

4.2.29. Індукція в ярмі на другій ділянці

$$B_{я2} = B_{\delta 2} \left[2\pi(R_{cc2} + b_c/\sqrt{3})/3 \right] / (h_{я} \sqrt{3}) =$$

$$= 1,47 \left[2\pi(1,021 + 2,456/\sqrt{3})/3 \right] / (3,773 \cdot \sqrt{3}) = 1,008 , \text{ Тл},$$

де згідно кривої намагнічення при $B_{я2} = 1,008 \text{ Тл}$, $H_{я2} = 2,11 \text{ А/см}$.

4.2.30. МРС у ярмі для другої ділянки

$$F_{я2} = \zeta_2 2H_{я2}(h_{я} + b_o + b_c + 2\pi R_{cc2}/3)/\sqrt{3} =$$

$$= 1,145 \cdot 2 \cdot 2,11 \cdot (3,773 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 1,021/3)/\sqrt{3} = 39,819 , \text{ А}.$$

4.2.31. Значення сумарної МРС другої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma 2}'' = F_{\delta 2} + F_{c2} + F_{я2} = 286,88 + 325,287 + 39,819 = 651,986 , \text{ А}.$$

4.2.32. Перевірка відносної похибки МРС другої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| (F_{\Sigma 2}'' - F_{\Sigma}') / F_{\Sigma 2}'' \right| = |(651,986 - 631,983)/651,986| = 0,031 \leq 0,05 .$$

Похибка лежить у допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

4.2.33. Радіус елемента ярма на четвертій ділянці

$$R_{cc4} = R_{ccc} + \Delta l_{я} = 1,702 + 0,681 = 2,383 , \text{ см}.$$

4.2.34. Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc4}

$$\delta' = \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{cc4}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc4}/3};$$

$$= 0,006 \frac{10 \cdot 0,006 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 2,383/3}{10 \cdot 0,006 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 2,383/3} = 0,01 , \text{ см},$$

4.3.35. Індукція в технологічному зазорі на четвертій ділянці приймається $B_{\delta 4} = 1,32 \text{ Тл}$; по кривій намагнічування визначається напруженість $H_{c4} = 6,8 \text{ А/см}$.

4.2.36. МРС в технологічному зазорі на четвертій ділянці

$$F_{\delta 4} = 2B_{\delta 4}\delta' 10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,32 \cdot 0,01 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 210,835, \text{ А.}$$

4.2.37. Значення МРС в стержні на четвертій ділянці

$$F_{c4} = H_{c4}h_o = 6,8 \cdot 16,183 = 110,047, \text{ А.}$$

4.2.38. Полосне ділення четвертої ділянки

$$\begin{aligned} \tau_4 &= 1,5b_o + \pi(R_{cc4} + b_c / \sqrt{3}) = 1,5 \cdot 5,394 + \pi(2,383 + 2,456 / \sqrt{3}) = \\ &= 20,032, \text{ см.} \end{aligned}$$

4.2.39. Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для четвертої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_4 &= \frac{2h_{я}}{(1-K_3)\tau_4} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi h_{я}/\tau_4\}} + \frac{K_3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi h_{я}/\tau_4\}} \right] = \\ &= \frac{2 \cdot 3,773}{(1-0,3) \cdot 20,032} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi 3,773/20,032\}} + \frac{0,3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi 3,773/20,032\}} \right] = 1,07, \end{aligned}$$

4.2.40. Індукція в ярмі на четвертій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я4} &= B_{\delta 4} [2\pi(R_{cc4} + b_c / \sqrt{3})/3] / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,32 [2\pi(2,383 + 2,456 / \sqrt{3})/3] / (3,773 \cdot \sqrt{3}) = 1,41, \text{ Тл.} \end{aligned}$$

4.2.41. МРС у ярмі на четвертої ділянці

$$\begin{aligned} F_{я4} &= \zeta_4 2H_{я4}(h_{я} + b_o + b_c + 2\pi R_{cc4}/3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,07 \cdot 2 \cdot 14,2 \cdot (3,773 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 2,383/3) / \sqrt{3} = 300,539, \text{ А,} \end{aligned}$$

де згідно кривої намагнічення при $B_{я4} = 1,41 \text{ Тл}$, $H_{я2} = 14,2 \text{ А/см}$.

4.2.42. Значення сумарної МРС четвертої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma 4}'' = F_{\delta 4} + F_{c4} + F_{я4} = 210,835 + 110,047 + 300,539 = 621,421, \text{ А.}$$

4.2.43. Перевірка відносної похибки МРС четвертої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| (F_{\Sigma 4}'' - F_{\Sigma}') / F_{\Sigma 4}'' \right| = |(621,421 - 631,983) / 621,421| = 0,017 \leq 0,05.$$

Похибка лежить у допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

4.2.44. Радіус елемента ярма на п'ятій ділянці

$$R_{cc5} = R_{cc4} + \Delta l_{я} = 2,383 + 0,681 = 3,063, \text{ см.}$$

4.2.45. Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc5}

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{cc5}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc5}/3} \\ &= 0,006 \frac{10 \cdot 0,006 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 3,063/3}{10 \cdot 0,006 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 3,063/3} = 0,00943, \text{ см,} \end{aligned}$$

4.2.46. Індукція в технологічному зазорі на п'ятій ділянці приймається $B_{\delta5} = 1,13 \text{ Тл}$; по кривій намагнічування електротехнічної сталі 2412 визначаємо напруженість $H_{c5} = 3,24 \text{ А/см}$.

4.2.47. МРС в технологічному зазорі на п'ятій ділянці

$$F_{\delta5} = 2B_{\delta5}\delta' 10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,13 \cdot 0,00943 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 169,532, \text{ А.}$$

4.2.48. МРС в стержні на п'ятій ділянці

$$F_{c5} = H_{c5}h_o = 3,24 \cdot 16,183 = 52,434, \text{ А.}$$

4.2.49. Плюсне ділення п'ятої ділянці

$$\begin{aligned} \tau_5 &= 1,5b_o + \pi(R_{cc5} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 5,394 + \pi(3,063 + 2,456/\sqrt{3}) = \\ &= 22,17 \text{ (см)}. \end{aligned}$$

4.2.50. Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для п'ятої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_5 &= \frac{2h_{я}}{(1-K_3)\tau_5} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi h_{я}/\tau_5\}} + \frac{K_3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi h_{я}/\tau_5\}} \right]; \\ \zeta_5 &= \frac{2 \cdot 3,773}{(1-0,3) \cdot 22,17} \left[\frac{1}{\text{th}\{\pi 3,773/22,17\}} + \frac{0,3}{3 \cdot \text{th}\{3\pi 3,773/22,17\}} \right] = 1,047. \end{aligned}$$

4.2.51. Індукція в ярмі на п'ятій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я5} &= B_{\delta5} \left[2\pi(R_{cc5} + b_c/\sqrt{3})/3 \right] / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,13 \left[2\pi(3,063 + 2,456/\sqrt{3})/3 \right] / (3,773 \cdot \sqrt{3}) = 1,423, \text{ Тл.} \end{aligned}$$

4.2.52. МРС у ярмі для п'ятої ділянки

$$\begin{aligned} F_{я5} &= \zeta_5 2H_{я5}(h_{я} + b_o + b_c + 2\pi R_{cc5}/3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,047 \cdot 2 \cdot 17,5 \cdot (3,773 + 5,394 + 2,456 + 2 \cdot \pi \cdot 3,063/3) / \sqrt{3} = 392,602, \text{ А,} \end{aligned}$$

де згідно кривої намагнічення при $B_{я5} = 1,423$ Тл, $H_{я5} = 17,5$ А/см.

4.2.53. Значення сумарної МРС п'ятої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma 5}'' = F_{\delta 5} + F_{c5} + F_{я5} = 169,532 + 52,434 + 392,602 = 614,569, \text{ А.}$$

4.2.54. Перевірка відносної похибки МРС п'ятої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| (F_{\Sigma 5}'' - F_{\Sigma}') / F_{\Sigma 5}'' \right| = |(614,569 - 631,983) / 614,569| = 0,028 \leq 0,05.$$

Похибка лежить у допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

4.2.55. Значення середньої розрахункової індукції

$$\begin{aligned} B_{cp} &= \frac{B_{\delta 1}(b_c + 2\pi R_{cc1}/3) + B_{\delta 2}(b_c + 2\pi R_{cc2}/3) + B_{\delta c}(b_c + 2\pi R_{ccc}/3)}{n(b_c + \pi l_{я}/3)} + \\ &+ \frac{B_{\delta 4}(b_c + 2\pi R_{cc4}/3) + B_{\delta 5}(b_c + 2\pi R_{cc5}/3)}{n(b_c + \pi l_{я}/3)} = \\ &= \frac{1,45(2,456 + 2\pi \cdot 0,34/3) + 1,47(2,456 + 2\pi \cdot 1,021/3) + 1,45(2,456 + 2\pi \cdot 1,702/3)}{5(2,456 + \pi \cdot 3,404/3)} + \\ &+ \frac{1,32(2,456 + 2\pi \cdot 2,383/3) + 1,13(2,456 + 2\pi \cdot 3,063/3)}{5(2,456 + \pi \cdot 3,404/3)} = 1,327 \approx 1,3, \text{ Тл.} \end{aligned}$$

4.2.56. Перевірка відносної розрахункової похибки середньої індукції

$$\left| (B_{cp} - B_c) / B_{cp} \right| = |(1,327 - 1,3) / 1,327| = 0,02 \leq 0,05.$$

Значенню $B_{cp} = 1,3$ Тл відповідає сумарна МРС $F_{\Sigma} = 631,983$ А.

4.2.57. Реактивна складова струму неробочого руху

$$I_{op} = \frac{F_{\Sigma}}{\sqrt{2} w_1 K_v} = \frac{631,983}{\sqrt{2} \cdot 375 \cdot 1,28} = 0,851 \text{ А,}$$

де $K_v = 1,28$ - коефіцієнт, який враховує наявність в намагнічувальному струмі вищих гармонік.

4.2.58. Розрахункова величина індукції кутових зон ярма просторового стикового магнітопроводу визначається виразами, Тл:

$$B_{к1} = 0,87(B_{с1} + B_{я1})/2 = 0,87(1,45 + 0,717)/2 = 0,943;$$

$$B_{к2} = 0,87(B_{с2} + B_{я2})/2 = 0,87(1,47 + 1,008)/2 = 1,078;$$

$$B_{кс} = 0,87(B_{сс} + B_{яс})/2 = 0,87(1,45 + 1,272)/2 = 1,18;$$

$$B_{к4} = 0,87(B_{с4} + B_{я4})/2 = 0,87(1,32 + 1,41)/2 = 1,188;$$

$$B_{к5} = 0,87(B_{с5} + B_{я5})/2 = 0,87(1,13 + 1,423)/2 = 1,111.$$

4.2.59. Коефіцієнт додаткових утрат від третьої гармоніки поля у ярмі

$$K_{д3i} = 1 + 0,55 \left[(K_{Bi}/1,11)^2 - 1 \right] = 1 + 0,55 \left[(1,3/1,11)^2 - 1 \right] = 1,204,$$

де K_{Bi} – коефіцієнт форми кривої індукції, котрий для діапазону $B_{яi}$ від 1,0 до 1,5 Тл може бути прийнятим від 1,28 до 1,43.

4.2.60. Коефіцієнти об'ємних втрат елементів магнітопроводу:

$$\begin{aligned} K_{pc} &= 3h_o \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \left[\frac{2}{3} \pi \left(R_{сc1} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 1}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{сc2} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 2}^2 + \right. \\ &+ \frac{2}{3} \pi \left(R_{сcс} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta c}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{сc4} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 4}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{сc5} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 5}^2 \left. \right] = \\ &= 3 \cdot 16,83 \cdot 0,681 \cdot 1,15 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \left[\frac{2}{3} \pi \left(0,34 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,45^2 + \frac{2}{3} \pi \left(1,021 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,47^2 + \right. \\ &+ \frac{2}{3} \pi \left(1,702 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,45^2 + \frac{2}{3} \pi \left(2,383 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,32^2 + \frac{2}{3} \pi \left(3,063 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,13^2 \left. \right] = 2219; \end{aligned}$$

$$K_{pя} = 6b_o h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} K_{д3} (B_{я1}^2 + B_{я2}^2 + B_{яс}^2 + B_{я4}^2 + B_{я5}^2) =$$

$$= 6 \cdot 5,394 \cdot 3,773 \cdot 0,681 \cdot 1,15 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \times$$

$$\times 1,204 (0,717^2 + 1,008^2 + 1,272^2 + 1,41^2 + 1,423^2) = 824,514;$$

$$K_{pk} = 3h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} K_{д3} \left[\frac{2}{3} \pi \left(R_{сc1} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{к1}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{сc2} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{к2}^2 + \right.$$

$$+ \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{ccc}} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\text{kc}}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc4}} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\text{k4}}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc5}} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\text{k5}}^2 \Big];$$

$$\begin{aligned} K_{\text{pk}} &= 3 \cdot 3,773 \cdot 0,681 \cdot 1,15 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 1,204 \times \\ &\times \left[\frac{2}{3} \pi \left(0,34 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 0,943^2 + \frac{2}{3} \pi \left(1,021 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,078^2 + \right. \\ &+ \frac{2}{3} \pi \left(1,702 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,18^2 + \frac{2}{3} \pi \left(2,383 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,188^2 + \\ &\left. + \frac{2}{3} \pi \left(3,063 + \frac{2,456}{\sqrt{3}} \right) 1,111^2 \right] = 878,743, \end{aligned}$$

де $P_{1/50}$ - питомі утрати в електротехнічній сталі при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц.

4.2.61. Втрати в сталі трансформатора

$$\begin{aligned} P_c &= 1,2(K_{\text{pc}} + K_{\text{ря}} + K_{\text{pk}})K_{\text{zc}}\gamma_c 10^{-6} = \\ &= 1,2(2219 + 824,514 + 878,743)0,91 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 32,763, \text{ Вт.} \end{aligned}$$

4.2.62. Активна складова струму неробочого руху

$$I_{\text{oa}} = P_c / (3U_{\text{ф1}}) = 32,763 / (3 \cdot 127) = 0,086, \text{ А.}$$

4.2.63. Величина струму неробочого руху визначається виразом

$$I_o = \sqrt{I_{\text{op}}^2 + I_{\text{oa}}^2} = \sqrt{0,851^2 + 0,086^2} = 0,856, \text{ А.}$$

4.3. Визначення утрат короткого замикання та характеристик

4.3.1. Середня довжина витка галетної обмотки

$$\begin{aligned} l_w &= 2D_B [1,181(a-1) + 1,286K_{\alpha 1} + 0,7195K_{\alpha 2}] = \\ &= 2 \cdot 8,509 [1,181(1,8-1) + 1,0893 \cdot 0,289 + 0,7854 \cdot 0,634] = 29,758, \text{ см.} \end{aligned}$$

4.3.2. Маси провідникового матеріалу фаз первинної і вторинних обмоток трансформатора, кг:

$$m_{\text{o1}} = \Pi_{\text{еф1}} w_1 l_w \gamma_o = 22,7 \cdot 10^{-3} \cdot 375 \cdot 29,758 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 2,254;$$

$$m_{o2} = \Pi_{\text{эф}2} w_2 l_w \gamma_o' = 236,2 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 29,758 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1,689,$$

де γ_o' – питома маса провідникового матеріалу обмоток, для міді – $8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/см³.

Загальна маса обмоток

$$m_o = 3(m_{o1} + m_{o2}) = 3(2,254 + 1,689) = 11,83 \text{ кг.}$$

4.3.3. Утрати в фазі кожної з обмоток при 75°C, Вт:

$$\begin{aligned} P_{\text{ел}1} &= P_{\text{елу}} \Delta_1^2 \Pi_{\text{эф}1} w_1 l_{w1} \gamma_o' = \\ &= 2,4 \cdot 2,66^2 \cdot 22,7 \cdot 10^{-3} \cdot 375 \cdot 29,758 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 38,276; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{ел}2} &= P_{\text{елу}} \Delta_2^2 \Pi_{\text{эф}2} w_2 l_{w2} \gamma_o' = \\ &= 2,4 \cdot 2,96^2 \cdot 0,2362 \cdot 27 \cdot 29,758 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 35,521, \end{aligned}$$

де $P_{\text{елу}} = 2,4$ (Вт/кг) · (А/мм²) – питомі утрати міді.

4.3.4. Утрати короткого замикання

$$P_k = 3(P_{\text{ел}1} + P_{\text{ел}2}) = 3 \cdot (38,276 + 35,521) = 221,39, \text{ Вт.}$$

4.3.5. Відносні активні падіння напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора, %:

$$\Delta U_{a1} = 100 P_{\text{ел}1} / (\sqrt{3} U_1 I_1) = 100 \cdot 38,276 / (\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10,456) = 0,961;$$

$$\Delta U_{a2} = 100 P_{\text{ел}2} / (\sqrt{3} U_2 I_2) = 100 \cdot 35,521 / (\sqrt{3} \cdot 27 \cdot 69,924) = 1,086.$$

4.3.6. Активні опори обмоток трансформатора, Ом:

$$r_1 = P_{\text{ел}1} / I_{\text{ф}1}^2 = 38,276 / 6,037^2 = 1,05;$$

$$r_2 = P_{\text{ел}2} / I_{\text{ф}2}^2 = 35,521 / 69,924^2 = 0,0073,$$

де при заданій схемі з'єднань обмоток $I_{\text{ф}2} = I_2$;

$$I_{\text{ф}1} = I_{1\text{н}} / \sqrt{3} = 10,456 / \sqrt{3} = 6,037, \text{ А.}$$

4.4.7. Частини обмоткового вікна, яка займається відповідно первинною і вторинною обмоткою, см:

$$b_1 = \frac{2 \Pi_{\text{эф}1} w_1}{K_{30} h_o} = \frac{2 \cdot 0,0227 \cdot 375}{0,34 \cdot 16,183} = 3,093;$$

$$b_2 = \frac{2\Pi_{\text{еф}2}w_2}{K_{30}h_0} = \frac{2 \cdot 0,2362 \cdot 27}{0,34 \cdot 16,183} = 2,318.$$

4.3.8. Потужність первинної обмотки трансформатора

$$P_1 = P_2 / \eta_{\text{е}} = 3,27 / 0,9 = 3,633, \text{ кВт.}$$

4.3.9. Індуктивні падіння напруги окремих обмоток, %:

$$\begin{aligned} \Delta U_{L1} &= \frac{I_1 w_1 l_w b_1}{3,33 h_0 \Pi_{\text{с}} B_{\text{с}}} \cdot 10^{-2} = \\ &= \frac{10,456 \cdot 375 \cdot 29,758 \cdot 3,093}{3,33 \cdot 16,183 \cdot 20,239 \cdot 1,3} \cdot 10^{-2} = 2,546; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{L2} &= \frac{I_2 w_2 l_w b_2}{3,33 h_0 \Pi_{\text{с}} B_{\text{с}}} \cdot 10^{-2} = \\ &= \frac{69,924 \cdot 27 \cdot 29,758 \cdot 2,318}{3,33 \cdot 16,183 \cdot 20,239 \cdot 1,3} \cdot 10^{-2} = 0,919. \end{aligned}$$

4.3.10. Індуктивний опір короткого замикання:

$$x_{\text{к}} = \frac{(\Delta U_{L1} + \Delta U_{L2})U_1}{100 I_1} = \frac{(2,546 + 0,919) \cdot 220}{100 \cdot 10,456} = 0,729, \text{ Ом.}$$

4.3.11. Активний опір короткого замикання:

$$r_{\text{к}} = r_1 + r_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right) = 1,05 + 0,0073 \cdot \left(\frac{375}{27} \right) = 2,452, \text{ Ом.}$$

4.3.12. Повний опір короткого замикання трансформатора:

$$Z_{\text{к}} = \sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2} = \sqrt{2,452^2 + 0,729^2} = 2,558, \text{ Ом.}$$

4.3.13. Номінальна величина ККД трансформатора

$$\eta_{\text{н}} = P_2 / [P_2 + (P_{\text{с}} + P_{\text{к}})10^{-3}] = 3,27 / [3,27 + (32,763 + 221,39)10^{-3}] = 0,928.$$

4.3.14. Залежність ККД від навантаження ($K_{\text{н}} = 0,1 \dots 1,4$):

$$\eta = 1 - \frac{(K_{\text{н}} P_{\text{к}} + P_{\text{с}})10^3}{(K_{\text{н}} S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + K_{\text{н}}^2 P_{\text{к}} + P_{\text{с}})}.$$

Характеристика залежності ККД від навантаження представлена на рис. 4.3.

Вказана залежність отримана з використанням ЕОМ за допомогою математичного пакету Mathcad.

Програма розрахунку характеристики залежності ККД від навантаження:

$$P_2 := 3270 \quad S_H := 4300 \quad \cos\phi_2 := 0.76 \quad P_c = 32.763 \quad P_k = 221.39$$

$$K_H := 0.0, 0.025.. 1.4$$

$$\eta(K_H) := 1 - \frac{(P_c + K_H^2 \cdot P_k)}{(K_H \cdot S_H \cdot \cos\phi_2 + K_H^2 \cdot P_k + P_c)}$$

K_H	$\eta(K_H)$
0.1	0.903
0.2	0.94
0.3	0.949
0.4	0.95
0.5	0.949
0.6	0.946
0.7	0.942
0.8	0.937
0.9	0.933
1	0.928
1.1	0.923
1.2	0.918
1.3	0.913
1.4	0.907

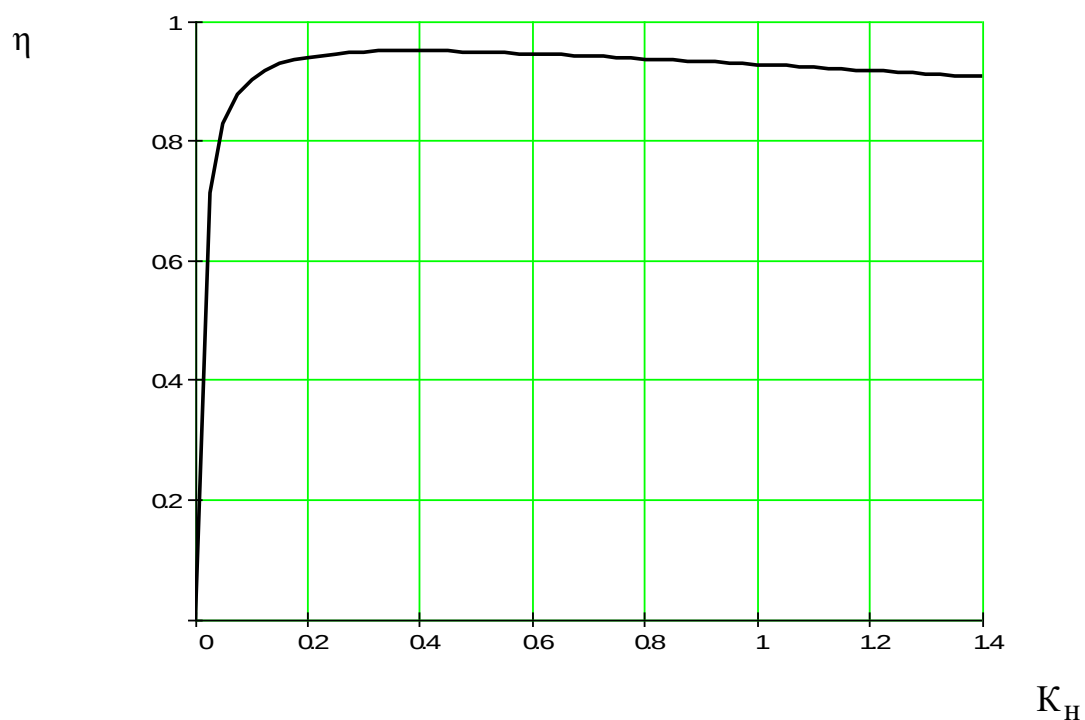


Рис. 4.3. Залежність ККД від навантаження

4.3.15. Активна і реактивна складові струму первинної обмотки:

$$I_{1a} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} \eta_H U_1} 10^3 = \frac{4,3 \cdot 0,76}{\sqrt{3} \cdot 0,928 \cdot 220} 10^3 = 9,249 \text{ (A)};$$

$$I_{1p} = I_{op} + \frac{S_2 \sin \varphi_2}{\sqrt{3} \eta_H U_1} 10^3 = 8,76 \text{ (A)}.$$

4.3.18. Величина коефіцієнта потужності

$$\cos \varphi_1 = 1 / \sqrt{1 + (I_{1p} / I_{1a})^2} = 1 / \sqrt{1 + (8,76 / 9,249)^2} = 0,726.$$

4.3.19. Визначення маси магнітопровода

Об'єм магнітопровода просторового трансформатора [14] визначається виразом

$$V_{np} = 3\Pi_c h_o + \Pi_{\text{я}}(3b_c + 3b_o + \pi l_{\text{я}}). \quad (4.1)$$

Довжина середнього (розташованого на координаті $l_{\text{я}}/2$) шару стержня витого просторового магнітопровода

$$b_{cc} = b_c + \pi l_{\text{я}} / 3. \quad (4.2)$$

Вводимо коефіцієнт перетину стрижня λ_{cc} , який являє собою відношення довжини середнього шару стрижня до довжини ярма витого просторового магнітопровода [18]

$$\lambda_{cc} = \frac{b_{cc}}{l_{\text{я}}} = \frac{b_c + \pi l_{\text{я}} / 3}{l_{\text{я}}} = \frac{b_c}{l_{\text{я}}} + \frac{\pi}{3} = \frac{2,456}{3,404} + \frac{\pi}{3} = 1,769. \quad (4.3)$$

Площина перетину стержня

$$\Pi_c = b_c l_{\text{я}} + \pi l_{\text{я}}^2 / 3. \quad (4.4)$$

З рівняння (4.3) слідує вираз ширини грані стержня

$$b_c = l_{\text{я}} (\lambda_{cc} - \pi / 3). \quad (4.5)$$

З врахуванням (4.5) вираз (4.4) перетворюється до вигляду

$$\Pi_c = l_{\text{я}}^2 (\lambda_{cc} - \pi / 3) + \pi l_{\text{я}}^2 / 3 = \lambda_{cc} l_{\text{я}}^2. \quad (4.6)$$

З виразу (4.6) визначається залежність між довжиною $l_{\text{я}}$ і площиною стержня Π_c

$$l_{\text{я}} = \sqrt{\Pi_c / \lambda_{cc}}. \quad (4.7)$$

З врахуванням (4.5), (4.7), співвідношень λ_o и λ_{cc} , а також співвідношення площин перетинів стержня и ярма вираз об'єму (4.1) перетворюється до вигляду

$$\begin{aligned} V_{\text{пр}} &= 3\Pi_c \sqrt{\Pi_o \lambda_o} + \frac{\Pi_c}{\sqrt{3}} \left[3\sqrt{\frac{\Pi_c}{\lambda_{cc}}} \left(\lambda_{cc} - \frac{\pi}{3} \right) + 3\sqrt{\frac{\Pi_o}{\lambda_o}} + \pi\sqrt{\frac{\Pi_c}{\lambda_{cc}}} \right] = \\ &= 3 \cdot 20,239 \sqrt{87,301 \cdot 3} + \\ &+ \frac{20,239}{\sqrt{3}} \left[3\sqrt{\frac{20,239}{1,769}} \left(1,769 - \frac{\pi}{3} \right) + 3\sqrt{\frac{87,301}{3}} + \pi\sqrt{\frac{20,239}{1,769}} \right] = 1381, \text{ см}^3, \end{aligned}$$

де $\Pi_o = h_o b_o = 16,183 \cdot 5,394 = 87,301, \text{ см}^2$.

Маса магнітопровода просторового трансформатора:

$$m_M = V_{\text{пр}} \gamma_c = 1381 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 10,568, \text{ кг},$$

де $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ – щільність електротехнічної сталі 2412.

4.3.21. Маса активної частини просторового трансформатора

$$m_a = m_M + m_o = 10,568 + 11,83 = 22,4, \text{ кг}.$$

4.4. Розрахунок маси активної частини планарного трансформатора

4.4.1. Основними розмірами трансформатора є геометричні параметри перетину стрижня, висота и ширина обмоткового вікна [17]. У зв'язку з цим, електромагнітно-еквівалентними визначають трансформатори з однаковим перетином стрижня Π_c , однаковими обмотковими даними (числами витків и густинами струмів), а також з однаковою площиною обмоткового вікна Π_o , при умові рівності середніх значень індукцій стержнів і ярм електромагнітних пристроїв, які порівнюються [18].

4.4.2. Згідно до роботи [15] оптимальні геометричні розміри планарного стрижневого магнітопровода трифазного трансформатора знаходяться в діапазоні співвідношень:

$$\lambda_o = \frac{h_o}{b_o} = 2,5 \dots 3,2; a = b,$$

де a і b – сторони прямокутника перетину ярма.

Оскільки визначене оптимальне значення $\lambda_o = 3,0$ просторового магнітопровода входе до вказаного діапазону, то при виконанні умови електромагнітної еквівалентності (якому відповідають ідентичні електромагнітні навантаження і перетини стрижнів трансформаторів, які порівнюються) приймаються наступні геометричні параметри стрижневого магнітопровода планарної магнітної системи.

Коефіцієнт перетину обмоткового вікна $\lambda_o = 3,0$.

Геометрія обмоткового вікна:

$$h_o = 16,182, \text{ см}; b_o = 5,394, \text{ см}.$$

Геометрія перетину стрижня (ярма)

$$a = b = \sqrt{\Pi_c} = \sqrt{20,239} = 4,499, \text{ см}.$$

4.4.3. Площини перетину витків первинної і вторинної обмоток при з'єднанні трикутник / зірка, см^2 :

$$\Pi'_{\text{еф1}} = \frac{I_{1\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot \Delta_1} = \frac{10,456}{\sqrt{3} \cdot 266} = 22,7 \cdot 10^{-3};$$

$$\Pi'_{\text{еф21}} = \frac{I_2}{\Delta_2} = \frac{69,924}{296} = 0,2362.$$

4.4.4. Діаметри та кількість елементарних провідників у ефективному:

$$n_{\text{ел1}} = \Pi'_{\text{еф1}} / S_{\text{ел1}} = 0,0227 / 0,0227 = 1;$$

$$n_{\text{ел2}} = \Pi'_{\text{еф2}} / S_{\text{ел2}} = 0,2362 / 0,0394 \approx 6.$$

Конструкція обмоток трансформатора зі стрижневим шихтованим магнітопроводом приймається еквівалентною просторовому аналогу.

Для первинної і вторинної обмоток обираються круглі мідні проводи марки ПЕТ – 155. З таблиці [19] діаметрів і площин перетинів вказаних проводів обираються кількість елементарних провідників і стандартні діаметри з площинами перетинів: $\Pi'_{\text{еф1}}$; $\Pi'_{\text{еф2}}$ найбільш близькими до розрахункових $\Pi'_{\text{еф1}}$, $\Pi'_{\text{еф2}}$: $d_1 = 1,7$ мм; $d_2 = 2,24$ мм; $S_{\text{ел1}} = 2,27 \text{ мм}^2$; $S_{\text{ел21}} = 3,94 \text{ мм}^2$.

4.4.5. Уточнювання електромагнітних навантажень

$$\Delta_1 = I_{1H} / (\sqrt{3} \Pi_{\text{еф1}}) = 10,456 / \sqrt{3} \cdot 0,0227 = 266, \text{ А/см}^2;$$

$$\Delta_2 = I_2 / \Pi_{\text{еф2}} = 69,924 / 0,2362 = 296, \text{ А/см}^2;$$

$$B_c = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot K_{\text{пд}}} \cdot \left(\frac{K_{U_1}}{\Delta_1 \eta \cos \varphi_1} + \frac{K_{U_{21}}}{\Delta_2} \right) =$$

$$= \frac{2,155 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 600,741} \cdot \left(\frac{0,995}{266 \cdot 0,9 \cdot 0,912} + \frac{1,005}{296} \right) = 1,3, \text{ Тл.}$$

4.4.6. Числа витків обмоток:

$$w_1 = \frac{K_{U_1} \cdot U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{0,995 \cdot 220 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 20,239} = 375;$$

$$w_2 = \frac{K_{U_2} \cdot U_2 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 27 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 20,239} = 27.$$

4.4.7. Середня довжина витка кожної з котушок планарної активної частини

$$l'_w = 4a + 2,283r_{\text{СК}} + 1,571b_o = 4 \cdot 4,499 + 2,283 \cdot 1,134 + 1,571 \cdot 5,394 = 29,125, \text{ см,}$$

де $r_{\text{СК}}$ – радіус закруглення обмоткової котушки в кутовій зоні перетину стрижня,

$$r_{\text{СК}} = l_{\text{я}} \text{tg}(\pi/6) = 0,333l_{\text{я}} = 0,333 \cdot 3,404 = 1,134, \text{ см.}$$

4.4.8. Маса обмоткових котушок відповідно первинної і вторинної обмотки,

кг:

$$m_{o1} = \Pi_{\text{еф1}} w_1 l'_w \gamma'_o = 22,7 \cdot 10^{-3} \cdot 375 \cdot 29,125 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 2,206;$$

$$m_{o2} = \Pi_{\text{еф2}} w_2 l'_w \gamma'_o = 236,2 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 29,125 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1,653,$$

де γ'_o – питома маса провідникового матеріалу обмоток, для міді – $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$.

4.4.9. Маса обмоток

$$m_o = 3(m_{o1} + m_{o2}) = 3(2,206 + 1,653) = 11,578, \text{ кг.}$$

4.4.10. Визначення маси магнітопровода.

Об'єм магнітопровода $V_{\text{пл}}$ трансформатора планарної конструкції визначається виразом

$$V_{\text{пл}} = \Pi_c (3h_o + 6b + 4b_o). \quad (4.8)$$

Згідно до [15] перетини стрижня и обмоткового вікна можна виразити через геометрична координати h_o , b_o , b , a , а також коефіцієнти геометрії обмоткового вікна $\lambda_o = 2,8$ и перетину магнітопровода $\lambda_c = a/b = 1$:

$$\Pi_c = ba = \lambda_c b^2; \quad (4.9)$$

$$\Pi_o = h_o b_o = \lambda_o b_o^2. \quad (4.10)$$

З виразів (4.9) и (4.10) визначаються співвідношення для h_o , b_o , b :

$$h_o = \sqrt{\Pi_o \lambda_o}; \quad (4.11)$$

$$b_o = \sqrt{\Pi_o / \lambda_o}; \quad (4.12)$$

$$b = \sqrt{\Pi_c / \lambda_c}. \quad (4.13)$$

С врахуванням співвідношень (4.11), (4.12) і (4.13) вираз (4.8) прийме вигляд

$$\begin{aligned} V_{\text{пл}} &= \Pi_c \left(3\sqrt{\Pi_o \lambda_o} + 6\sqrt{\Pi_c / \lambda_c} + 4\sqrt{\Pi_o / \lambda_o} \right) = \\ &= 20,239 \left(3\sqrt{87,286 \cdot 3} + 6\sqrt{20,239/1} + 4\sqrt{87,286/3} \right) = 1966, \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Маса планарного магнітопровода

$$m_M = V_{\text{пл}} \gamma_c = 1966 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 15,036, \text{ кг},$$

де $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ – щільність електротехнічної сталі 2412.

4.4.11. Маса активної частини планарного трансформатора

$$m_a = m_M + m_o = 15,036 + 11,578 = 26,614, \text{ кг}.$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході проведеного аналізу спеціальної науково-технічної інформації для комплектації глибоководного підводного дзвону ГВК-300 була запропонована просторова конструктивна схема активної частини трансформатора системи електрообладнання. Зроблено розрахунок просторового трансформатора з тригранним внутрішнім контуром (зі скругленими гранями) з врахуванням нерівномірності розподілу індукції в елементах магнітопровода. Також, для порівняння, був розрахований трансформатор класичної плоскої шихтованої конструкції. Розрахунок було виконано при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності (рівність потужностей, електромагнітних навантажень і умов експлуатації).

Розрахунок показав, що найбільш доцільним для використання є просторовий трансформатор завдяки меншій масі та габаритним розмірам.

Параметр	Планарний трансформатор	Просторовий трансформатор
Маса активної частини, кг	26,614	22,4
ККД, о.е.	0,929	0,928

З таблиці слідує, що варіант просторового трансформатора по основним параметрам перевершує планарний варіант. Трансформатор з просторовим витим магнітопроводом має масу на 16 % меншу ніж у планарного.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боровиков П.А. Обживание человеком морских глубин. Системы жизнеобеспечения. Проблемы исследования и освоения мирового океана. – Л.: Судостроение, 1979. – 302 с.
2. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Плахтир О.О. Геометричні співвідношення та масо-вартісні показники трифазних просторових трансформаторів малої потужності // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип.1(12). – С. 181–183.
3. Кенни Д.Б. Техника освоения морских глубин. – Л.: Судостроение, 1977. – 267 с.
4. Вишняков В.А., Меренов Н.В. Глубоководная водолазная техника. – Л.: Судостроение, 1983. – 276 с.
5. Хаукс Герхард. Подводная техника. – Л.: Судостроение, 1980 – 192 с.
6. Яздовский В.И. Искусственная биосфера. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
7. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований. Справочник под ред. Ястребова В.С. – Л.: Судостроение, 1981. – 297 с.
9. Иванов - Смоленский А.В. "Электрические машины" - М.: Энергия, 1980 с. 620.
10. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп.. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
11. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 368 с.
12. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. – Л.: Энергия, 1970. – 190 с.
13. Плахтырь О.О. Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 3. – С. 64–65.

14. Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Трехфазный трансформатор малой мощности с пониженной массой и материалоемкостью // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. научн.- техн. сб. – 1998, вып. 51 – С. 68 – 72.
15. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами / Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. и др. – Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ“ХПІ”. – 2002. – №14. – С. 86–97.
16. Ставинский Р.А. Варианты способов изготовления витых пространственных магнитопроводов с параллельными стенками обмоточных окон для трехфазных трансформаторов и дросселей // Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ. – 2003. – № 1(387). – С. 92–96.
17. Кондратенко Ю.П., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. Выбор технических решений трехфазных трансформаторов для судовых систем автоматического управления // Автоматизация судовых технических средств: Научно-технический сборник. – Одесса: ОМА. – 2002. – Вып. 7. – С. 67–73.
18. Кондратенко Ю.П., Ставинський Р.А., Плахтир О.О. Порівняльний аналіз витрат міді трифазних трансформаторів малої потужності з планарною та просторовою магнетними системами// Кораблебудування: освіта, наука, виробництво: Матеріали міжнародної конференції: В 2 т. – Миколаїв: УДМТУ. – 2002. – Т. II. – С. 234–236.
19. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Плахтир О.О. Розрахунок трифазних трансформаторів малої потужності з просторовим магнітопроводом: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.
20. Ставинский Р.А. Расчет магнитной цепи и потерь в стали трехфазного трансформатора малой мощности с витым пространственным магнитопроводом // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2000. – Вип. 55. – С. 53 – 57.
21. Справочник по охране руда на промышленном предприятии / К.Н. Ткачук, Д.Ф. Иванчук, Р.В. Сабарно. – К.: Техника, 1991. – 285 с.