

На правах рукопису

Міліх Володимир Іванович

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
У МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ  
З ВИСОКИМИ ПИТОМИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ**

05.09.01 - електричні машини

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук



Харків - 1995

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в  
політехнічному університеті

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761570 (Q)

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор  
Данько Володимир Григорович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Елксніс Віктор Янович;  
доктор технічних наук  
Зозулін Юрій Васильович;  
доктор технічних наук, доцент  
Постніков Віктор Іванович

Провідна організація - Інститут електродинаміки  
НАН України (м.Київ)

Захист дисертації відбудеться 11 січня 1996 р.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.15  
Харківського державного політехнічного університету  
( 310002, МСП, м.Харків, вул.Фрунзе, 21 )

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці  
Харківського державного політехнічного університету

Автореферат розісланий "21" 11 1995 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Єгоров Б.О.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми і мета роботи. Машини постійного струму (МПС) використовуються у регульованому електроприводі найбільш відповідального призначення у різноманітних галузях промисловості та на транспорті переважно, як двигуни. Критеріями оцінки двигунів постійного струму (ДПС) служать номінальний обертальний момент, фактор граничності ( $H \cdot m \cdot x v^{-1}$ ), питомі інерційність і матеріалоемність та ін. Засобом їх поліпшення є збільшення питомих електромагнітних навантажень, що досягається удосконаленням конструкції і технології виготовлення, підвищенням комутаційної надійності, розвитком системи охолодження, застосуванням нових матеріалів, а також пошуком альтернатив традиційним рішенням, таких як немагнітний активний шар якоря, вентиляна система комутації, надпровідність, лінійна конструкція тощо.

Важливу роль у розвитку МПС відіграють нові методи розрахунку на базі більш деталізованих математичних моделей, що забезпечують точний вибір параметрів, особливо при створенні нових зразків машин, які відрізняються від попередніх аналогів підвищеними питомими навантаженнями, складною конфігурацією, нетиповим співвідношенням розмірів, гранично напружених за комутацією, нагрівом і механікою. Вимушене подолання деяких стереотипів методик, що склалися, у таких ситуаціях дає пряме визначення електромагнітних параметрів (ЕМП) МПС шляхом розв'язання польових задач.

З розвитком обчислювальної техніки цілком нові можливості для розрахунку та аналізу електромагнітних полів, і на їх основі - ЕМП та електродинамічних процесів (ЕДП) в електричних машинах надають чисельні методи.

Терміном ЕМП, для уникнення повторень, об'єднуємо такі величини, як магнітний потік, магнітна індукція, електродинамічні зусилля, індуктивні параметри - власні і взаємні індуктивності, електрорушійні сили (ЕРС), магнітні напруги та ін. До ЕДП тут відносимо такі процеси, як комутація, утворення вихрових струмів (ВС) і додаткових втрат потужності у провідниках, осердях, елементах конструкції; збудження обмоток та ін.

Чисельні методи дозволяють уточнити і деталізувати раніше досягнуті рішення, провести розрахунки, які були недоступні, чи ті, що мали лише орієнтовну оцінку. Враховується насичення сталей, анізотропія їх магнітних властивостей, а також деталізована електромагнітна геометрія машин. Чисельні розв'язання диференціальних рівнянь дозволили дійти реалістичних оцінок ЕДП.

Однак все це вимагає відповідного програмного забезпечення, підготовленості розрахувачів, їх переконаності у ефективності чисельних методів (тут ще не досягнутий критичний рівень необоротного прогресу). Як показує оглядовий аналіз, застосування цих методів часто обмежується розрахунком магнітного поля без виходу на широке коло ЕМП та ЕДП у МПС. Причому, якщо ці методи не адаптовані до конкретної структури МПС, то досить імовірно одержання неадекватних результатів. Тобто, ще не склалася цілісна система проектування на основі чисельного аналізу, і тому потенційні можливості чисельних методів ще не вичерпані, в тому числі й стосовно МПС. Роботи у цьому напрямку тривають як у теоретичному плані, так і у плані накопичення досвіду їх застосування до конкретних об'єктів. Зважаючи на все більше поширення САПР і персональних комп'ютерів, потенціал віддачі цих робіт зростає і їх роль у проектуванні в умовах проголошеного ринкового шляху розвитку України стає все більш значною, так як існуючі підходи не забезпечували необхідної швидкості опрацювання, вимагали тривалої експериментальної доводки нових зразків електричних машин.

Все обумовлене вище зробило актуальною тему поданої дисертації. Її головна мета - розвиток методології проектування МПС шляхом удосконалення і розробки методів та методик аналізу ЕМП і моделювання ЕДП, виходячи з чисельного розрахунку електромагнітних полів. Метою роботи є також проведення на цій основі досліджень ДПС з високими питомими навантаженнями, що одночасно повинно бути підтвердженням реалізації головної мети.

З головною метою роботи корелюють наступні макрозадачі.

Задача загальнонаукового характеру - показати, що створено базу і накопичено досвід розв'язання практично будь-яких задач електродинаміки в МПС, а математичний апарат і програмна реалізація доведені до рівня, доступного широкому колу розрахувачів. Тобто ефективність чисельних методів стає дуже високою, й вони, як мінімум, можуть посилити електромагнітні розрахунки, що проводяться зараз, а у перспективі - замінити методики, побудовані на ряді спрощень і умовностей.

Науково-дослідницька задача - проведення досліджень унікальних зразків МПС: потужного ДПС з немагнітним активним шаром, орієнтованого на використання надпровідної обмотки збудження (НПОЗ) - він іменується кріодвигуном (КД); малоінерційного лінійного електродвигуна (ЛЕД) з тиристорною системою електроживлення обмотки якоря (ОЯ) і природною вентиляційною комутацією (ПВК). Ці

об'єкти викликали потребу розробки і реалізації оригінальних математичних моделей - зважаючи на нетипову структуру їх елементів, а також суттєво зростаючу роль раніше незначущих параметрів і процесів з появою раніше нерозв'язаних задач. Певна частина виконаних розробок супроводжувалася перевіркою на ряді спеціальних модельних машин.

Розроблені методи, алгоритми і програми розрахунку ЕМП та ЕДП були застосовані й для розрахунку МПС промислового призначення. Це підтверджується розробкою нових зразків машин, а також проведеними дослідженнями крупних прокатних ДПС і тягових ДПС різноманітного призначення, поглиблений аналіз яких викликаний використанням високих питомих електромагнітних навантажень, що приводять до окремих критичних явищ.

З макрозадач витікають конкретні основні задачі:

1. Удосконалення і розробка засобів розрахунку магнітного поля, адаптованих до МПС з сильно насиченим неоднорідним магнітопроводом і забезпечуючих надійні за точністю результати, придатні для дослідження ЕМП та ЕДП у будь-яких можливих варіантах конструкції і співвідношення розмірів МПС.
2. Розробка системи ефективних засобів і прийомів, спрямованих на вирішення проблеми затратних ресурсів ЕОМ і розраховувача при чисельних розрахунках магнітних полів у МПС.
3. Вироблення системного підходу і розробка відповідних методів визначення ЕМП і аналізу ЕДП на основі чисельного розв'язання задач електромагнітного поля.

4. Дослідження ЕМП і ЕДП в різних типах високовикористаних МПС і розробка на цій основі ряду принципових і конструктивних рішень, спрямованих на підвищення надійності та питомого використання цих машин, на поширення експлуатаційних можливостей.

Методи досліджень - математичне моделювання на ЕОМ шляхом чисельного розв'язання просторових і часових диференціальних рівнянь, використання електричних схем заміщення і методів розв'язання колових задач на основі законів Кірхгофа з застосуванням методів векторної алгебри і символічного методу; метод планованого ортогонального експерименту; експериментальні методи досліджень та вимірювань стаціонарних параметрів і динамічних процесів. Як базовий чисельний метод прийнято метод скінченних різниць (МСР), який (при бажанні) можна замінити іншим чисельним методом, наприклад, скінченних елементів, оскільки рішення задач розрахунку ЕМП і ЕДП досить універсальні.

Характер результатів дисертації. В дисертації розроблено нові теоретичні положення, а також викладено науково обгрунтовані технічні рішення для перспективних напрямків розвитку МПС.

Наукова новизна роботи. До основних наукових результатів, що виносяться на захист, відносяться:

1. Методи розрахунку магнітного поля МПС з сильно насиченим магнітопроводом: в поперечному перерізі з урахуванням аксіальної неоднорідності і кінцевої довжини; в повздовжньому перерізі і торцевій зоні з урахуванням впливу будови поперечного перерізу; квазітривимірного поля на основі взаємозв'язку плоскоортогональних розрахункових моделей у різноманітних перерізах; на специфічних локальних ділянках магнітної системи (в зоні кінцевих пакетів, у станині, в зубцевопазових структурах, при наяві екранованих зон). Однією з основ цих методів є введення і реалізація оригінальних граничних умов для магнітного поля.

2. Система ефективних методів і прийомів, спрямованих на удосконалення чисельного розрахунку електромагнітних полів в МПС, які суттєво полегшують формування сіткових моделей і приводять до багатократної економії затратних ресурсів ЕОМ і розрахувача. В тому числі - алгоритми задання початкових умов в області розрахунку поля; коректування розподілу поля в процесі його ітераційного розрахунку; модифікація МСР в областях з нескоординованими границями та ін.

3. Системний підхід в одержанні ЕМП і аналізі ЕДП в МПС на основі розв'язання задач електромагнітного поля, крім того, в забезпеченні прямого переходу до інших параметрів машин (ефективних довжин, еквівалентних зазорів та ін.), а також створенні бази для розв'язання задач інших класів: теплових, міцнісних тощо.

4. Коловопольовий метод розрахунку ВС та додаткових втрат потужності в провідниках ОЯ, придатний у будь-яких режимах роботи МПС, що практично не має обмежень за структурами провідників і осердь та ураховує всі існуючі збуджуючі магнітні поля і насичення ферромагнетиків.

5. Методика аналізу магнітних втрат потужності при будь-яких структурах аксіальних вентиляційних каналів в осерді якоря МПС.

6. Методи аналізу ЕДП у електропровідних оболонках в умовах МПС з криостатованою системою збудження, що дозволяє при довільному характері збуджуючого магнітного поля досліджувати магнітопрозорі, напівпрозорі та непрозорі екрани.

7. Методи аналізу перехідних процесів в системі збудження

МПС, що враховують нелінійні магнітні і температурні характеристики, а також взаємодію з електропровідними елементами конструкції з одно- та багатовихровими структурами струмів.

8. Методи аналізу і одержані критерії здійснення ПВК в малоінерційному ЛЕД при використанні ідеалізованих математичних моделей, а також при урахуванні практично всіх реально впливаючих факторів: взаємодії комутуємих секцій, характеристик тиристорів, змінного комутуючого магнітного поля, ЕДП в конструкції неферомагнітного індуктора та ін.

9. Ідеї створення та результати проведених експериментальних досліджень унікальних зразків МПС.

Практична цінність укладається в наступних положеннях.

1. Систематизовано компактний і одночасно універсальний набір формул, побудованих на результатах чисельного розрахунку магнітного поля, що забезпечують визначення ЕМП, необхідних для проектування МПС. Представлена скінчено-різницева апроксимація цих формул.

2. Розроблені методи і прийоми реалізовані в алгоритмах та програмах, підтримуючих системний підхід в розв'язуванні задач електромагнітного поля, в одержанні ЕМП і аналізі ЕДП в МПС.

3. Проведено аналіз магнітних полів, ЕМП і ЕДП в різноманітних типах високовикористаних МПС, у тому числі в прокатних та тягових, а також в унікальних експериментальних зразках МПС: КД потужністю 10 МВт і малоінерційному ЛЕД з ПВК.

Конкретно виконані дослідження:

- функцій результуючих ЕРС секцій ОЯ, а також внутрішньоконтурних і розподілених ЕРС безпосередньо в її провідниках;

- електродинамічних зусиль в обмотках і елементах ДПС звичайної і експериментальних конструкцій;

- зосереджених і розподілених індуктивних параметрів ОЯ традиційної конструкції, а також нової - з трикутньопрофільованою поверхнею осердя якоря;

- комутаційних параметрів і комутаційного процесу в ОЯ кріодвигуна при оригінальній будові активного шару якоря;

- аспектів прикладення коловопольового методу розрахунку ВС у провідниках ОЯ в режимах холостого ходу та навантаження;

- ВС та додаткових втрат потужності в умовах крупного прокатного ДПС для різних конструкцій секцій ОЯ;

- різноманітних структур аксіальних вентиляційних каналів в осерді якоря ДПС на основі магнітно-теплового аналізу;

- ЕДП в системах збудження кріодвигуна і малоінерційного ЛЕД при їх увімкненні, в режимі навантаження, а також при анормальному режимі виводу накопиченої енергії.

4. На базі цих досліджень наведено приклади вибору параметрів електромагнітної системи МПС, що відповідає заданим критеріям. Показано засіб визначення ефективних зазорів та розрахункової довжини МПС в звичайних і неординарних варіантах конструкцій безпосередньо за чисельним розрахунком магнітного поля, проведено відповідний аналіз цих величин з урахуванням насичення осердя та представлено приклад побудови багатofакторної поліномної функції розрахункової довжини з урахуванням кінцевого пакету якоря.

5. Комплекс розрахункових і експериментальних досліджень умов і критеріїв здійснення ПВК в малоінерційному ЛЕД, а також дослідження його ЕМП і ЕДП на основі єдиного польового підходу.

6. Розробка схемних і конструктивних рішень МПС та їх елементів, що забезпечують подальший розвиток таких машин.

**Реалізація результатів роботи.** Розроблені методи, алгоритми і програми для ЕОМ, а також технічні рішення елементів конструкції знайшли застосування при проектуванні і дослідженні високовикористаних тягових і прокатних ДПС, та при створенні унікальних експериментальних зразків МПС. Відповідні розробки виконувалися автором як відповідальним виконавцем і керівником НДР, що проводились ХПІ (нині - ХДПУ) за госпдоговорами з НДІ харківських промислових об'єднань "Електроважмаш", "Електромашина", ХЕМЗ, а також за державними науково-технічними програмами України (5.1.6. Ресурсозберігаючі електромеханічні системи, 1991 р.) і (раніше) СРСР (0.14.02. Створити види електротехнічного обладнання з використанням явища надпровідності, 1980 р.). Ряд розробок впроваджено з підтвердженням економічним ефектом.

**Вірогідність основних положень.** Критерієм адекватності розроблених методів, математичних моделей і розрахункових досліджень служать дослідні дані, одержані на експериментальних і промислових зразках МПС, а також дані, що їх підтверджують, отримані альтернативними апробованими методами у тій частині розв'язуваних задач, що виявляються ще доступною їм.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертації та окремі розділи доповідалися і обговорювалися на:

республіканських науково-технічних конференціях (НТК) "Перспективи розвитку електромашинобудування в Україні" (Харків, 1983,

1988); "Підвищення ефективності і надійності електромашин" (Київ, 1985, 1989); "Комутація електричних машин" (Харків, 1984); "Удосконалення судових і автономних електромеханічних систем" (Севастополь, 1990, 1992);

всесоюзних НТК "Динамічні режими роботи електричних машин..." (Грозний, 1982; Дніпродзержинськ, 1985, Бішкек, 1991); "Питання проектування, дослідження і виробництва потужних турбо-, гідрогенераторів і крупних електричних машин", "Проблеми електромашинобудування" (Ленінград, 1991, 1988); "Стан і перспективи розвитку електровозобудування в країні" (Новочеркаськ, 1991);

міжнародних, республіканських і всесоюзних НТК з криогенних електричних машин і використання надпровідності в електромеханіці (Київ, 1977, Братіслава, 1977; Харків, 1978, 1989, Ленінград, 1981, 1983; Вроцлав, 1981; Москва, 1984, 1985, Житомир, 1986; Кошице, 1990);

секціях Наукової Ради АН СРСР "Теоретичні і електрофізичні проблеми електротехніки" (Ленінград, 1976, 1987; Київ, 1979); всесоюзних НТК з теоретичної електротехніки (Ташкент, 1987; Вінниця, 1991); IV НТК "Проблеми нелінійної електротехніки" (Київ, 1992);

міжнародних НТК "Електромеханічні системи з комп'ютерним управлінням на автотранспортних засобах ..." (Суздаль, 1993); "Комп'ютер: наука, техніка..." (Харків, 1993, 1995); "Приладобудування і нові інформаційні технології" (Миколаїв, 1993) та ін.

**Публікації.** Основний зміст роботи викладено у 105 друкованих роботах, у тому числі в 33 статтях у наукових журналах, 10 - в наукових збірках, 18 - у Віснику ХПІ, 8 авторських свідоцтвах, 1 препринті, 7 депонованих статтях, 28 тезисах доповідей.

**Структура роботи.** Дисертація загальним обсягом 402 сторінки складається із вступу, шести глав, висновку, списку літератури (250 найменувань) і додатку, в тому числі 251 сторінки основного тексту, 172 рисунків і 48 таблиць.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **ВСТУПІ** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані її цілі, поставлені основні задачі, представлені об'єкти дослідження - конкретні зразки МПС.

**Перша глава** називається ЗАГАЛЬНИЙ СТАН МПС ТА ПРИНЦИПИ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ ПОЛЬОВИХ ЗАДАЧ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ. Вона має оглядово-установчий характер і орієнтована на узагальнену підготовку до проведення досліджень, описаних у

наступних главах.

Технічний рівень МПС розглянуто на основі їх загальнопромислових та спеціалізованих серій, тягових ДПС, крупних прокатних ДПС та інших їх варіантів, які випускаються вітчизняними і зарубіжними фірмами. Відмічено досвід створення МПС з вентиляційною комутацією, з немагнітним шаром якоря, в лінійному виконанні, а також з використанням надпровідників. Проаналізовано межі створення МПС і досягнутий рівень факторів і параметрів, що обмежує їх розвиток.

Виявлено, що при розрахунку електромагнітних полів у високовикористаних МПС з чисельних методів переважають МСР та метод скінченних елементів. При орієнтації на широке коло розраховувачів перевага віддається МСР, який відрізняється відносно простими математичними основами і програмним забезпеченням, економною підготовкою розрахункових моделей, зручністю використання результатів розрахунку. Проте залишається нагальною задачею мінімізація витратних ресурсів ЕОМ, що можливо на основі адаптації МСР до особливостей розрахункових об'єктів, тут - МПС.

При використанні чисельних методів у МПС розв'язуються задачі розрахунку магнітного поля практично для будь-якої геометричної структури з урахуванням властивостей феромагнетиків. Але, як правило, розглядається плоска модель - у поперечному перерізі машини. Задачі з урахуванням осьової неоднорідності магнітної системи, а також поля в торцевих зонах не знаходили ще належного вирішення, що обмежувало точність розрахунку (інколи надмірно) і в поперечному перерізі машин.

Визначено області розрахунку поля і відповідні граничні умови у використаних режимах МПС, обумовлено прийняті допущення, наведено вихідні рівняння в різних системах координат для чисельного розв'язання польових задач. Викладено принципові положення МСР і визначено його ключові складові, як необхідний мінімум для залучення широкого кола розраховувачів. Подано сіткові розрахункові моделі і показано відомі прийоми прискорення ітераційного процесу розв'язання польової задачі, критеріїв його контролю.

Виходячи з сіткового рішення задачі розрахунку магнітного поля, сформульованого через векторний магнітний потенціал, наведено уніфіковані формули і подано їх скінченно-різницеві аналоги для ЕМП, що фігурують в розрахунках МПС. Цілий ряд ЕМП знаходиться безпосередньо на основі чисельного інтегрування або диференціювання вузлових розподілів векторного магнітного потенціалу без використання складного математичного апарату і громіздких аналі-

тичних перетворень. Необхідний набір формул виявляється на подив коротким, але придатним практично для будь-яких ситуацій, що трапляються у розрахунках електричних машин, тоді як звичайні емпіричні та аналітичні методи розрахунку не можуть обійтися без значно більшої кількості формул, крім того, придатних у вузько обмежених випадках.

**Друга глава - УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.** Спочатку викладаються розроблені та реалізовані у вигляді автоматично працюючих алгоритмів методи, що у сукупності багаторазово підвищують швидкість чисельного розрахунку магнітного поля. Серед них способи задання початкових умов при ітераційному розв'язанні системи різницевих рівнянь, що відразу забезпечують в області розрахунку польові параметри, інтегрально близькі до кінцевого рішення, а також модифікація багатоконтурного лавинного коректування поля, прискорюючого безпосередньо ітераційний процес.

До ефективного нововведення належить модифікація МСР при польових розрахунках в областях з нескоординованими внутрішніми границями  $\Gamma$ , що типово у МПС для бічних граней прямокутних пазів, осердя полівсів та інших елементів у разі використання полярних координат  $(r, \phi)$  і відповідних сіткових моделей (фрагмент показаний на рис.1). Модифікація дозволяє економно та без додаткової похибки апроксимувати границю розподілу координатно орієнтованими лініями  $L_1$  замість  $L$ . Ефект досягається за рахунок економії ресурсів ЕОМ та витрат часу розраховувача, через істотне зменшення кількості ліній сітки, що підтверджено порівняльними розрахунками магнітних полів у різних ситуаціях (показані пунктиром лінії сітки стають зайвими).

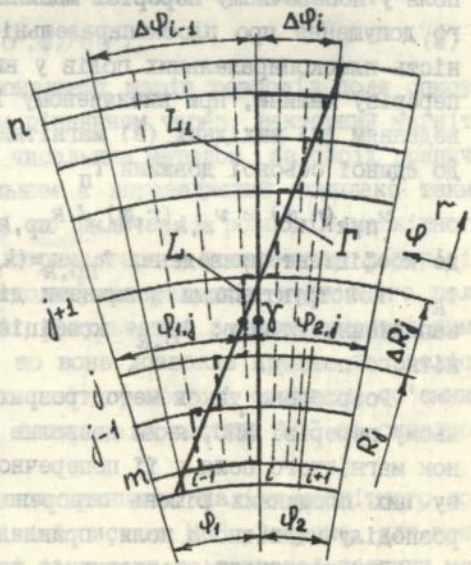


Рис.1. Багатосхідчаста  $L$  і економна  $L_1$  апроксимація границі  $\Gamma$

Основою модифікації є введення функцій деформації середовища  $f_\phi$  і  $f_r$  у рівняння двовимірного магнітного поля

$$\oint_l \left[ \nu r \frac{d_r A}{dr} \frac{f_\phi}{f_r} d\phi - \frac{1}{r} \nu \frac{d_\phi A}{d\phi} \frac{f_r}{f_\phi} dr \right] = - \int_S J_z r dr f_\phi f_r d\phi, \quad (1)$$

де  $A$ ,  $J_z$  - осьові складові векторного магнітного потенціала і густини струму;  $\nu$  - питомий магнітний опір.

Функція  $f_\phi$  залежить від  $r$  і використовується при апроксимаційній деформації по  $\phi$ , як на рис.1;  $f_r$  - навпаки. У роботі розкрито суть цих функцій, загальні принципи та характерні для МПС варіанти аналітичного і чисельного визначення. Розглянуто заміну рівняння (1) скінченно-різницевиими аналогами і знайдено зручну форму реалізації модифікації, що полягає у введенні до деформованих комірок сітки двокомпонентної величини питомого магнітного опору (для прикладу, за рис.1 це виглядає так:  $\nu_r = \nu / f_\phi$ ;  $\nu_\phi = \nu \cdot f_\phi$ ).

Ще одним удосконаленням, яке обумовлено практикою розрахунків насичених МПС і підтверджено експериментами, став метод урахування кінцевої довжини магнітопроводу при розрахунку магнітного поля у поперечному перерізі машини. Це вирішено заміною загально-го допущення про плоскопаралельність поля допущенням про сукупність плоскопаралельних полів у виділених  $n$  ділянках поперечного перерізу машини, при визначеному їх зв'язку. А реалізовано приведенням (п) вихідних (в) магнітних властивостей у цьому перерізі до єдиної осьової довжини  $l_{II}$

$$\nu_{II,k}(r,\phi) = \nu_{B,k}(r,\phi) / k_{пр,k}, \quad (k=1,2,\dots,n). \quad (2)$$

де коефіцієнт приведення  $k_{пр,k} = (k_{з,k} l_k) / (k_{\sigma,k} l_{II})$  визначається за  $l_k$  - конструктивними довжинами ділянок;  $k_{з,k}$  - коефіцієнтами їх заповнення сталлю;  $k_{\sigma,k}$  - коефіцієнтами торцевого розсіяння магнітного потоку.

Розроблено також метод розрахунку магнітного поля у поздовжньому перерізі МПС, який дозволив ще більше удосконалити розрахунок магнітного поля у її поперечному перерізі, і на основі синтезу цих площинних рішень створено методику формування об'ємного розподілу магнітного поля, приклад якого поданий на рис.2.

При чергуванні розрахунків полів у двох взаємноортогональних перерізах, кожний з них проводиться з урахуванням поля в іншому перерізі, що несе у собі в неявній формі інформацію про розміри та форми свого перерізу. Наприклад, переріз  $abc$  розглядається як поздовжній шар змінної товщини  $\omega(r)$ , обмежений у площині  $abcd$

двома сусідніми еквіпотенціалами. Такий шар приводиться за допомогою функції приведення  $\xi(r) = \omega(r) / \Omega$  до плоского шару завтовшки  $\Omega$  зміною його магнітних властивостей - розподілу питомого магнітного опору

$$v_{\Omega}(r, z) = v_{\omega}(r, z) / \xi(r), \quad (3)$$

причому, з анізотронією за осями  $r$  і  $z$  на шихтованих ділянках.

Даючи закінчене рішення, розрахунок у поздовжньому перерізі дозволяє ще повернутися до поля у поперечному перерізі й уточнити його. А вже за картиною поля у поздовжньому перерізі виділяється тонкий шар змінної товщини  $\lambda(r)$ , орієнтований за площиною  $r\phi$  (рис.2).

За допомогою введеної функції приведення  $\eta(r) = \lambda(r) / \Lambda$  цей шар деформується до плоского завтовшки  $\Lambda$ :

$$v_{\Lambda}(r, \phi) = v_{\lambda}(r, \phi) / \eta(r), \quad (4)$$

У кожному з взаємноортогональних шарів розподіл поля описується відповідним двовимірним рівнянням через векторний магнітний потенціал та вирішується чисельним методом за своїх граничних умов. При цьому оригінальним є впровадження комплекс таких умов у поздовжньому перерізі, що включає і розподіл магнітного поля на спільній осі  $ab$ , який отримується у поперечному перерізі.

Розроблену і наведену методику розрахунків магнітного поля МПС перевірено зіставленням їх результатів з експериментальними даними. Таким чином показано, що вона дозволяє прийти до реалістичного урахування насичення магнітопроводу і отримати об'ємний розподіл поля в активній зоні і торцевій частині МПС зі складною структурою магнітної системи.

Поряд з цим розроблені також принципи аналізу магнітного поля на локальних ділянках магнітної системи МПС. Зокрема, для зони поздовжнього перерізу на виході із зазору до торцевої частини машини з еквівалентним урахуванням структури зубцевої зони. Це проілюстровано на моделі, що відповідає тяговому ДПС середньої потужності, картиною поля на рис.3.

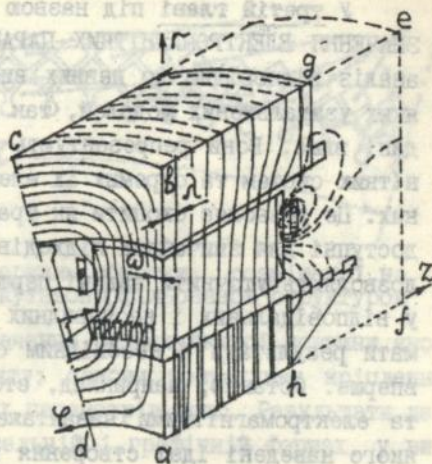


Рис.2. Об'ємна модель магнітного поля МПС

У **третій главі** під назвою ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ МПС виконано розрахунковий аналіз відповідно до певних визначених цілей роботи, як для деяких узагальнених моделей, так і для конкретних МПС, що були згадані вище. Вони репрезентують спектр варіантів конструкцій магнітних систем та окремих їх елементів - від унікальних до класичних. Це дозволяє охопити як традиційно розв'язувані, так і важкодоступні для звичайних підходів задачі дослідження. Подані методи дозволяють уточнити задачі першого типу чи підтвердити їх рішення у відповідальних і неочевидних випадках, а для інших задач отримати результати з необхідним ступенем наочності та вірогідності вперше. Останнє, наприклад, стосується унікального за виконанням та електромагнітними навантаженнями КД потужністю 10 МВт, для якого наведені ідеї створення і особливості його конструкції, що відрізняється значними немагнітними зазорами, трикутнопрофільованою структурою поверхні якоря (рис.4), застосуванням НПОЗ.

Польові задачі розв'язуються для магнітних систем МПС у їх поперечному перерізі в межах половини, одного і двох полюсних поділів, а також у поздовжньому перерізі в різноманітних розрахункових режимах. Потім наводяться рішення на локальних ділянках машин, наприклад, у станині, у зубцево-пазовому шарі якоря, у торцевій зоні (рис.3).



Рис.3. Розрахункова модель магнітного поля у поздовжньому перерізі кінцевої зони МПС

МПС: магнітних потоків, індукції, електродинамічних зусиль, ЕРС та ін. Ряд даних орієнтовано на дослідження більш складних параметрів і процесів, що подаються у наступних главах, а деякі результати показано відразу. Зокрема, наведено принципи визначення ефективного зазору для нетипової і

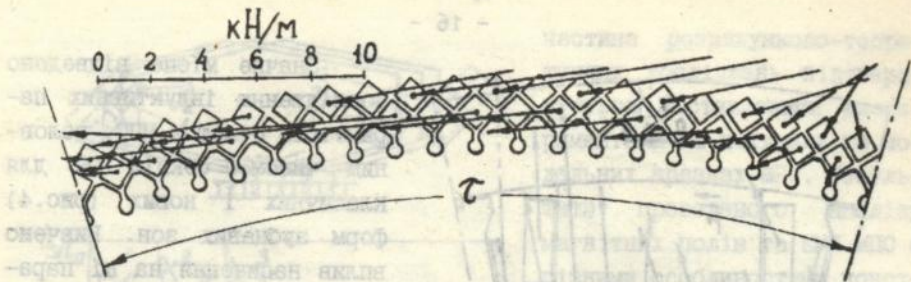


Рис.4. Розподіл зусиль по стержням обмотки, розміщеної на поверхні осердя якоря з трикутньо-профільованою структурою

традиційної структури якоря; визначення розрахункової довжини якоря з урахуванням кінцевого ефекту; основи розрахунку кріплення стержнів ОЯ КД та її комутаційних параметрів тощо. Результати демонструються безпосередньо у чисельній і графічній формах, у вигляді поліномів на базі планованого експерименту та ін.

Ось деякі приклади ілюстрацій. Для крупного прокатного ДПС на рис.5 наведено зміни складових магнітної індукції  $B_r, B_\phi$  і потенціалу (координатні  $\dot{A}(\phi)$ , вони ж часові  $\dot{A}(t)$  функції) в окремих точках паза якоря при його обертанні, а на рис.6 подана діаграма електродинамічних зусиль, діючих на обмотки в режимі номінального навантаження. Докладно зусилля досліджено для КД, де вони є вирішальними для вибору конструктивних рішень системи збудження і ОЯ.

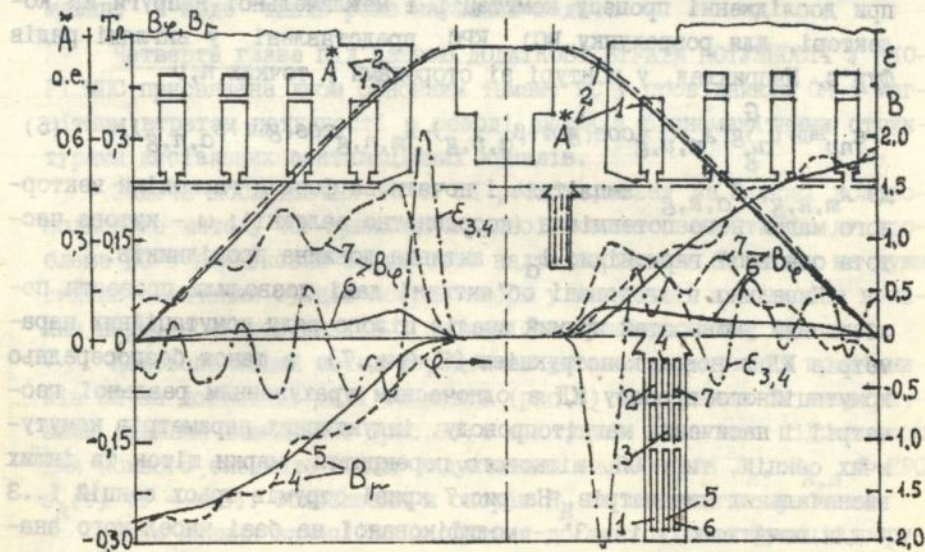


Рис.5. Змінювання потенціалу, складових магнітної індукції і вихрової ЕРС у провідниках паза якоря

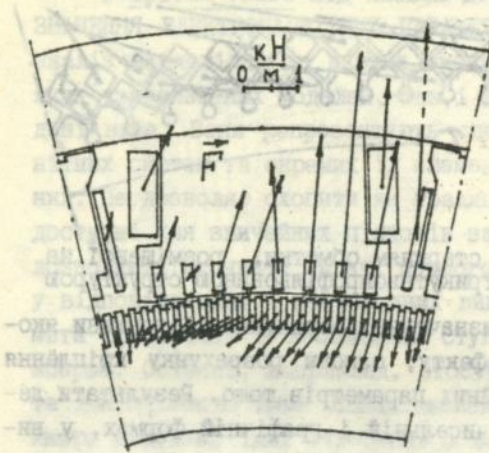


Рис.6. Зусилля, діючі на обмотки крупного прокатного ДПС

вихрових контурів, так і розподілені за перерізами для умовної множини елементарних провідників.

У таких ож варіантах визначалися ЕРС в ОЯ. Так, розрахована для конкретного контура в пазі якоря ЕРС у режимі холостого ходу (XX) зображена на рис.5 -  $e_{3,4}$ , а аналітично (для використання при дослідженні процесу комутації і межламельної напруги на колекторі, для розрахунку ВС) ЕРС представлені у вигляді рядів Фур'є. Наприклад, у контурі зі сторонами у точках  $n, v$

$$e_{nv} = \omega \cdot l_a \sum_g [A_{m,v,g} \cos(g\omega t + \beta_{a,v,g}) - A_{m,n,g} \cos(g\omega t + \beta_{a,n,g})], \quad (5)$$

де  $A_{m,k,g}$ ,  $\beta_{a,k,g}$  - амплітуда і початкова фаза  $g$  гармоніки векторного магнітного потенціала (координатно залежні);  $\omega$  - кутова частота основної гармоніки;  $l_a$  - активна довжина провідників.

Чисельно підготовані об'єктивні дані дозволили провести порівняльний умовностей прямий аналіз цілого ряду комутаційних параметрів КД з новою конструкцією ОЯ (рис.7), а також безпосередньо комутаційного процесу КД з одночасним урахуванням реальної геометрії і насичення магнітопроводу, індуктивних параметрів комутуючих секцій, типу ОЯ, щіткового перекриття, марки щіток та інших визначальних параметрів. На рис.7 криві струмів трьох секцій 1..3 - для початкової, 1'..3' - модифікованої на базі чисельного аналізу магнітної системи КД.

Далі показано принципи вибору параметрів магнітних систем МПС шляхом аналізу ЕРС, зусиль, комутаційних та інших ЕМП. Значна

Значне місце відведено дослідженню індуктивних параметрів обмоток МПС, головним чином, секцій ОЯ для класичних і нових (рис.4) форм зубцевих зон. Вивчено вплив насичення на ці параметри, розміщення пазів відносно полюсної структури статора, вибрано обмежуючі зони поширення потоків розсіювання секцій. Причому, індуктивності та взаємні індуктивності розглядались як зосереджені для цілісних перерізів секцій і внутрішніх

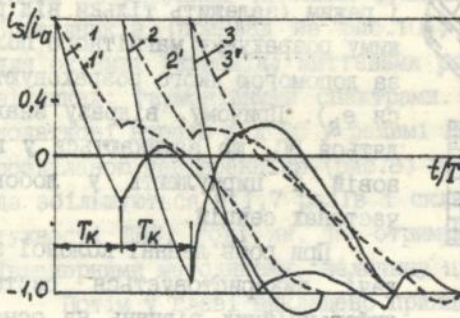
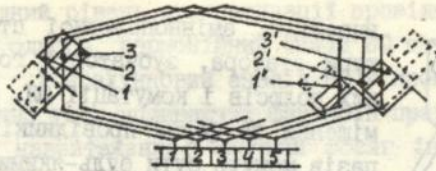


Рис.7. Схема і розміщення секцій ОЯ і графіки струмів  $i_k$  комутації

частина розрахунково-теоретичних досліджень підтверджується поставленими експериментами на натурних та модельних зразках МПС. Результати проведеного аналізу магнітних полів та ЕМП МПС з різними особливостями конструкції дозволяють стверджувати: чисельний розрахунок цих полів може і повинен бути основою єдиного підходу в електромагнітних розрахунках МПС, оскільки придатний у практично будь-яких їх конструкціях, як класичних, так і нововпроваджуваних, дозволяє відмовитись від цілого

ряду спрощень і умовностей традиційних методик, здатний замінити існуючий спектр цих методик, пристосованих для розрахунків окремих типів машин. Ця основа, як єдиний, але з широкими можливостями інструмент, зробить розраховувача універсальним і щодо типів машин, і щодо типів розв'язуваних задач.

**Четверта глава** під назвою ДОДАТКОВІ ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ У ЯКОРІ МПС присвячена двом основним темам: ВС у провідниках ОЯ і магнітним втратам потужності в осерді якоря з різноманітними структурами аксіальних вентиляційних каналів.

Задача дослідження ВС в ОЯ розв'язується на основі коловопольового методу на прикладі крупної компенсованої МПС, де проблема ВС і додаткових втрат стає надто серйозною зважаючи на дуже сильне насичення зубців осердя якоря у поєднанні з відносно великим періодом провідників і зубчатістю головних полюсів.

Коловопольовий метод передбачає умовне подріблення провідників ОЯ на достатньо малі елементи (рис.8) та подання їх електричними схемами заміщення (рис.9) з наступною польовою підготовкою для кожного елемента-нитки індуктивних параметрів  $L_k$ ,  $M_{k,z}$  й ЕРС  $e_k(t)$  ( $t$  - час). Обчислення ж опорів  $R_k$  не становить проблеми.

Розв'язання задачі ВС зводиться до знаходження функцій струмів ниток  $i_k(t)$ . Воно по суті є всеосяжним - без розділення змінного магнітного поля на різнопричинні складові, що з'являються

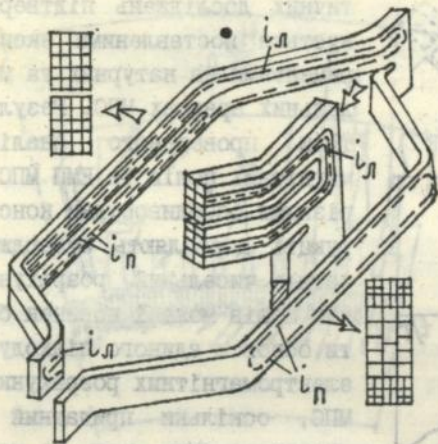


Рис.8. Розрахункова схема ВС у секції ОЯ

контурні ЕРС типу (5) диктують її розв'язання у вигляді гармонійних струмових рядів. Рішення отримується для кожної  $g$  гармоніки символічним методом переходом до алгебраїчних комплексних аналогів

$$j\omega g \sum_{y=1}^N M_{x,y} I_m, y, g^{-1} m, x-1, g^{R_k+1} m, x, g^{(R_k+R_{k+1})-1} m, x+1, g^{R_{k+1}} = j\omega g^l (\Delta_{m,k+1, g} - \Delta_{m,k, g}), \quad (6)$$

- це для контура  $x$  (рис.9),  $M_{x,y}$  - взаєміндуктивність контурів  $x$  та  $y$  (у перебирає усі  $N$  контурів).

Формування матриці комплексних коефіцієнтів систем рівнянь виду (6) алгоритмізовано і рішення досягалося на ЕОМ. Одержані струми ниток дозволили перейти до інших даних, у тому числі і додаткових втрат. Комплексом розрахунків виявлено необ-

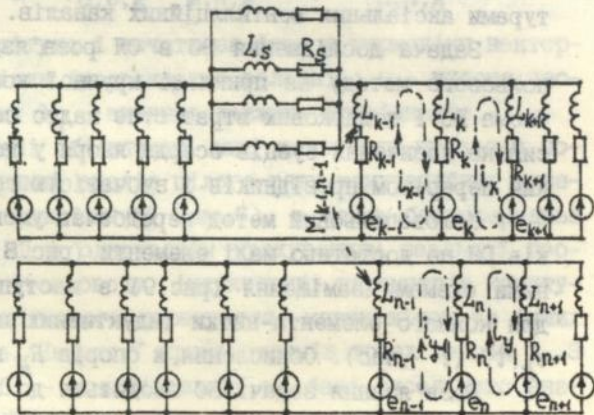


Рис.9. Схема заміщення подрібненого і суцільного провідників ОЯ

внаслідок зміннополюсної структури статора, зубчатості головних полюсів і комутації ОЯ. Розміщення та форма провідників та пазів можуть бути будь-якими, як і режим (залежить тільки від режиму розрахунку магнітного поля, за допомогою якого розраховується  $e_k$ ). Причому, відразу знаходяться ВС, що замикаються у пазовій і циркулюють у лобових частинах секцій.

При розв'язанні колової задачі використовується система диференціальних рівнянь на основі законів Кірхгофа та методу контурних струмів. При цьому кон-

хідний рівень дискретизації провідників та їх взаємний вплив один на одного, гармонійний склад ВС та ін.

Розрахунковий аналіз ВС у провідниках ОЯ з урахуванням практично усіх впливаючих факторів проведено в режимах холостого ходу та навантаження. Значний обсяг інформації подано у таблицях, а також на рисунках часовими функціями ВС в окремих точках різних провідників (приклад на рис.10); векторними діаграмами струмів для окремих гармонік; миттєвими розподіленнями густини ВС у провідниках; гармонійними спектрами. Так, наприклад, визначено, що додаткові втрати від ВС у режимі навантаження для варіанта з підрозділеною напівсекцією (рис.8) порівняно з режимом холостого ходу збільшуються в 1,7 разів і складають майже 1% номінальної потужності ДПС, тоді як, не отримуючи достовірних результатів за інженерними методиками, величину цих втрат приймають рівною 0,5%.

Потім у главі викладено принцип розрахунку магнітних втрат в осерді якоря та проведено порівняльний магнітно-тепловий (на основі зіставлення електромагнітних та теплових параметрів) аналіз різноманітних структур аксіальних вентиляційних каналів (до поняття структури входять кількість, розміри, форма та розміщення). Порівнювальними параметрами прийняті магнітні втрати, індукція, падіння магнітної напруги і температурні перепади в осерді якоря.

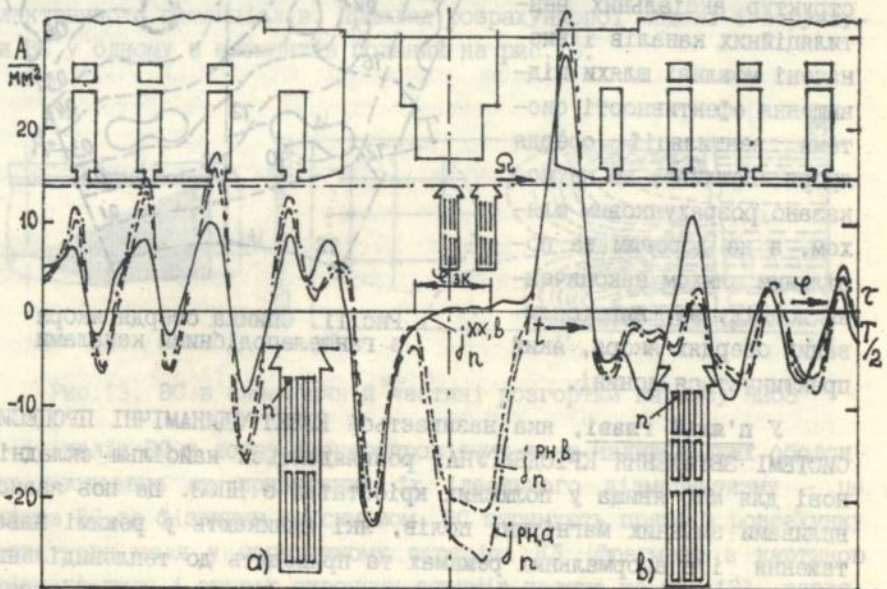


Рис.10. Функція густини ВС  $f(t)$   $n$ -елемента провідника (а, б- варіанти заповнення; ХХ, РН - режими холостого ходу та навантаження)

При визначенні магнітних втрат опиралися на розподіл амплітуд магнітної індукції  $B_m(r, \varphi)$  в осерді якоря, який готується за запропонованою методикою, а також на експериментально апробовані формули питомих магнітних втрат. Оцінка умов теплопередачі в осерді якоря проводилась у польовій постановці в поперечному перерізі осердя якоря чисельним розв'язанням стаціонарного рівняння теплопровідності при заданні типових і введених граничних умов.

Проведені розрахунки для тягового ДПС підтверджені експериментальними даними по магнітній індукції, магнітним втратам і розподілу температур. Це дозволило перейти до варіювання структурами аксіальних вентиляційних каналів і розглянути як круглі, так і інші їх форми: овальні, прямокутні, а також запропоновані і захищені авторським свідоцтвом. Зразок розміщення каналів для однієї з перспективних форм подано на рис.11 разом з картинами магнітного і температурного полів.

Подальшими дослідженнями виявлені тенденції зміни магнітних і теплових параметрів осердя якоря залежно від структур аксіальних вентиляційних каналів і визначені можливі шляхи підвищення ефективності системи вентиляції осердя якоря. Важливо, що це показано розрахунковим шляхом, а не дорогим та повільним шляхом накопичення досвіду на виготовлюваних осердях якоря, який практикується донині.

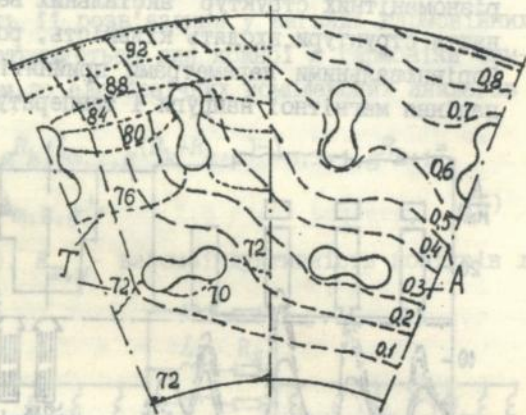


Рис.11. Спинка осердя якоря з гантелеподібними каналами

У п'ятій главі, яка називається ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У СИСТЕМІ ЗБУДЖЕННЯ КРІОДВИГУНА, розглядаються найбільш складні і нові для МПС явища у полюсних кріостатах з НІОЗ. Це пов'язано з впливами змінних магнітних полів, які виникають у режимі навантаження і в аномальних режимах та приводять до тепловиділень у надпровідниках і оболонках кріостата (рис.12), а також до зусиль, які діють на них.

Дослідження ЕДП у системі кріостатування побудовані на роз-

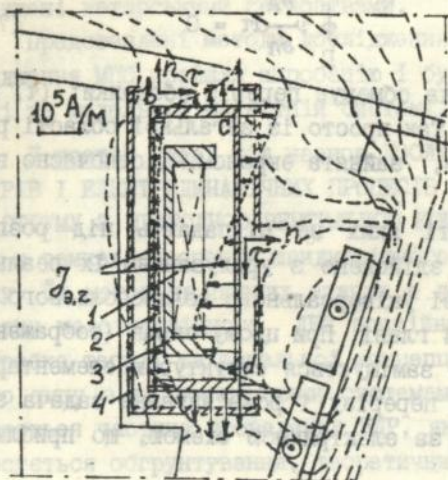


Рис.12. Переріз кристата у міжпольському вікні КД:  
1 - НПОЗ; 2 - екран;  
3 - каркас; 4 - корпус

рахунках ВС у різних ситуаціях, коли оболонки можуть розглядатися магнітно прозорими, або ідеально діамagnetними, або з урахуванням реальної реакції ВС.

Першій ситуації відповідають тонкі оболонки з нержавіючої сталі при низькій частоті реверсів КД. Так отримується оцінка ВС за математичним максимумом на основі роздільного рішення першого і другого рівнянь Максвелла. Спочатку готується збуджуваче магнітне поле, що може мати довільне змінювання у просторі і в часі, а потім розпо-

діл ВС у оболонці, що розглядається, одержується з використанням сполучень МСР, гармонійного аналізу, векторного магнітного і електричного потенціалів. Приклад розрахункової моделі і структури ВС у одному з елементів поданий на рис.13.

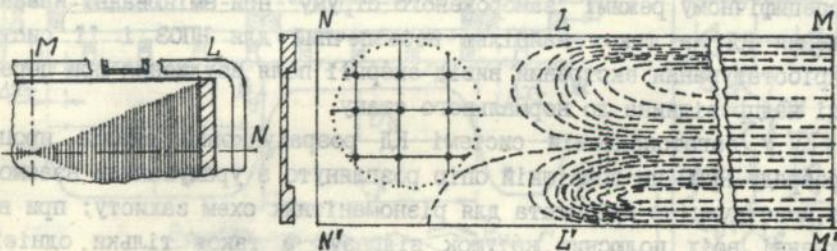


Рис.13. ВС в симетричній частині розгортки каркасу НПОЗ

Аналіз ВС у добре електропровідних та у надпровідних оболонках засновано на припущенні їх ідеального діамagnetизму - це оцінка ВС за фізичним максимумом. ВС отримують прямо з розрахунку магнітного поля у поперечному перерізі КД (фрагмент з картиною змінного поля і епірок екранних струмів подано на рис.12), завдяки введенню сукупної умови

$$A_{\Gamma} = \text{const};$$

$$\oint_{\Gamma} v \frac{\partial A}{\partial n} d\tau = 0 \quad (7)$$

для потенціала на лінії  $\Gamma$ , яка обмежує переріз оболонки; ( $\tau$ ,  $n$  - пов'язані з нею координати). Так просто із загальної області розрахунку поля вилучається зона, зайнята екраном, і одночасно враховуються його струми.

Для екранів, властивості яких не підпадають під розгляд крайніх ситуацій, аналіз ВС здійснено з урахуванням їх реальної реакції. Це зроблено на основі універсального коловопольового методу, який розглянуто вже у 4 главі. При цьому екран (зображений, наприклад, на рис.12) умовно заміщується структурою елементарних провідників достатньо малого перерізу і розв'язувана задача зведена до розрахунку процесів за електричною схемою, що приблизно відповідає рис.8.

Комплексом досліджень на базі представленої теорії визначено, що у КД при змінах його навантаження ВС в оболонках кріостата із нержавіючої сталі достатньо слабкі, але якщо є мідний чи надпровідний екран, то ВС можуть створити серйозні проблеми. Шляхи їх подолання рекомендовано на основі розроблених методик і конструктивних рішень.

Далі вивчено нестационарні процеси безпосередньо у НПОЗ, які пов'язані зі зміною її струму і впливом на надпровідники змінного магнітного поля. Конкретно розглянуто флуктуації струму НПОЗ у специфічному режимі "замороженого струму" при змінюванні навантаження КД, а також найбільш небезпечний для НПОЗ і її системи кріостатування екстремний вивід енергії поля збудження при переході надпровідника до нормального стану.

У багатополісній системі КД розрахунковий аналіз процесу розряду НПОЗ на зовнішній опір розглянуто з урахуванням взаємодії з конструкцією кріостата для різноманітних схем захисту: при вимкненні всіх полюсних котушок відразу, а також тільки однієї з них. При цьому враховано нелінійні магнітні характеристики, змінювання теплофізичних параметрів оболонок кріостата і НПОЗ. Рішення отримано чисельним інтегруванням досить великих нелінійних систем диференціальних рівнянь при використанні запропонованих сполучень, електричних і магнітних схем заміщення.

У підсумку аналізу аномальних режимів виводу енергії визначено їх безпечні умови і допустимі схеми, обрано супутні параметри і видано рекомендації щодо виконання елементів кріостата, які

захищені авторськими свідоцтвами.

Представлені методи дослідження ЕДП у криостатованій системі збудження МПС пройшли апробацію і були експериментально підтверджені на модельній магнітній системі.

У шостій главі під назвою ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ І ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНОМУ ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПРИРОДНОЮ ВЕНТИЛЬНОЮ КОМУТАЦІЄЮ подано цикл розробок у рамках створення швидкодіючого лінійного приводу розгонного типу. Їх метою на перших етапах є дослідження експериментального зразку малоінерційного ЛЕД постійного струму і на цій основі - розробка теорії та загальної концепції конструювання двигунів такого типу з різноманітними системами комутації ОЯ. В дисертації подається частина проведених НДР, яка відповідає її темі та яка стосується обґрунтування, теоретичних і експериментальних досліджень за використанням ПВК у ЛЕД зазначеного типу, а також наводяться результати досліджень характерних для нього ЕМП і ЕДП.

Принцип ПВК і аналіз її умов у ЛЕД спочатку подано по розрахунковій моделі на рис.14 та виділений на рис.15 ланці комутації. Секція ОЯ  $L_s$  повинна перемикатися з вітки зі струмом  $I_{ан}$  у вітку зі струмом  $I_{ac}$  за допомогою комутації керованих напівпровідникових вентилів - тиристорів, з'єднуючих ОЯ з джерелом живлення  $U_a$ .

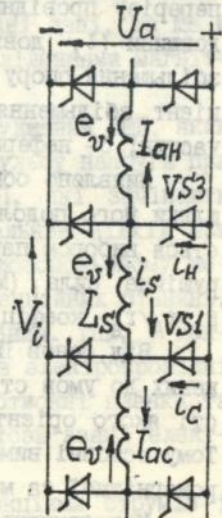
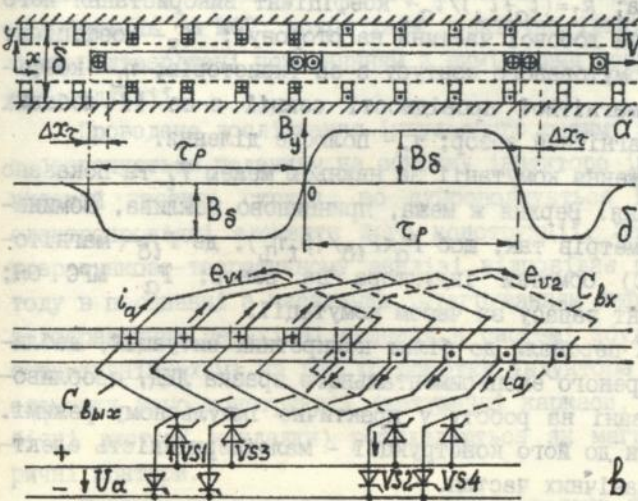


Рис.14. Розрахункова модель ЛЕД з ПВК;  
а - структура ЛЕД; б - магнітне поле індуктора; в - ділянка струму ОЯ

Рис.15. Фрагмент схеми ОЯ з ПВК

Відмикання тиристорів вирішується тривіально і докладно не розглядається, закриватися ж вони повинні під впливом власної ЕРС секцій  $e_{v\delta}$ , збуджуваної магнітним полем індуктора, який рухається зі швидкістю  $V_t$ , що і складає основний інтерес. Умовою комутації є досягнення струмом секції  $I_{ac}$  значення  $I_{ac}$ , причому за час  $t_k$ , що є меншим за допустимий  $t_d = b_z/V_t$  ( $b_z$  - міжсекційний крок ОЯ).

Математичним аналізом отримано вирази комутаційного струму для поодинокі та групової комутації секцій. На цій основі виведено співвідношення величин, що забезпечують ПКВ, а також критерії, що її обмежують. Так, допустимі значення струму паралельної вітки, а також час комутації

$$I_{a.пред} < \frac{2 l_a w_s V_t B_\delta [1 - \exp(-t_d/\tau_\theta)]}{R_l [1 + \exp(-t_d/\tau_\theta)]}; \quad (8)$$

$$t_k = \frac{\eta_L w_s \tau_p q_{np} \mu_0}{2 \xi_R \rho_T k_l \delta} \ln \frac{\beta_t + 1}{\beta_t - 1}, \quad (9)$$

де  $l_a, w_s$  - активна довжина і число витків секції;  $B_\delta$  - індукція поля збудження у зазорі;  $\tau_\theta = L_\Sigma/R_l$  - постійна часу контуру комутації;  $R_l = R_s + 2R_{vd}$ ;  $L_\Sigma, R_s$  - повна індуктивність і опір секції;  $R_{vd}$  - диференціальний опір тиристора;  $\beta_t = e_{v\delta}/(R_l I_{ac})$  - коефіцієнт запасу за струмом комутації;  $\rho_T$  - питомий опір та  $q_{np}$  - площа поперечного перерізу провідника;  $k_l = (l_a + l_{\lambda})/l_a$  - коефіцієнт використання його довжини ( $l_{\lambda}$  - довжина лобової частини на сторону);  $\xi_R$  - коефіцієнт збільшення опору комутуваного контуру з-за тиристорів;  $\eta_L$  - коефіцієнт збільшення магнітної провідності секції з-за її лобових частин;  $\delta$  - неферомагнітний зазор;  $\tau_p$  - полюсне ділення.

Виявлено обмеження комутації за нижньою межею  $V_t$  та показано шляхи його подолання. Верхня ж межа, принципово можлива, обминається вибором параметрів так, щоб  $F_a < F_{t\delta}/(\beta_t \eta_L)$ , де  $F_{t\delta}$  - магніто-рушійна сила (МРС) обмотки індуктора на зазор;  $F_a$  - МРС ОЯ;  $\beta_t = t_k/t_d$  - коефіцієнт запасу за часом комутації.

Від основ ПКВ перейшли до більш конкретних ситуацій, наближених до умов створеного експериментального зразка ЛЕД, особливості якого орієнтовані на роботу у практично імпульсному режимі. Тому основні вимоги до його конструкції - малоінерційність електромагнітної та механічних частин.

Конструктивна схема ЛЕД подана на рис.16. Плоский неферомагнітний індуктор розміщений у зазорі двобічного статора (його середня симетрична половина не показана) і направляє підшипни-

ками ковзання. Обмотка індуктора живиться через ковзний контакт і складається з двох основних - силових котушок та однієї допоміжної (більш вузької), що полегшує комутацію ОЯ. ОЯ є двоходовою двобічною і її секції кріпляться на поверхні осердя статора. Конструкція ЛЕД дозволяє використовувати як меха-

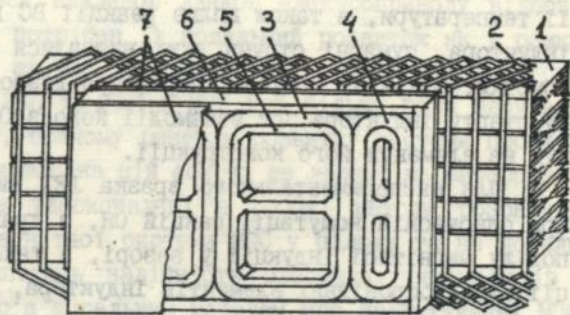


Рис.16. Конструктивна схема експериментального зразку ЛЕД;  
1 - осердя статора; 2 - секції ОЯ;  
3 - основні та 4 - допоміжна котушки індуктора; 5 - каркаси, 6 - обтискні планки; 7 - обшивка індуктора.

нічну, так і тиристорну системи комутації. Принцип дії ЛЕД описано в обох варіантах, розглянуто взаємодію ЛЕД з системами управління та енергозабезпечення.

У роботі представлено методику та результати розрахунку об'ємного розподілу магнітного поля ЛЕД, індуктивних параметрів його обмоток, електродинамічних зусиль та інших ЕМП. За основу прийнято два методи розрахунку магнітного поля: метод дзеркальних відображень та МСР, котрі дали практично ідентичні дані, та ще й були підтверджені порівнянням з вимірними розподіленнями магнітної індукції.

Проведено дослідження імпульсного режиму збудження ЛЕД, який забезпечується поданням на обмотку індуктора імпульсу напруги при високій густині струму, що супроводжується ЕДП, які зачіпають електропровідні елементи його конструкції. Загальний підхід при розрахунково-теоретичному аналізі відповідає коловопольовому методу в поєднанні з чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь, відображаючих перехідні процеси в системі збудження. Так, у конструктивній схемі на рис.16 обмотка індуктора та електропровідні елементи його конструкції (котушечні каркаси, обтискні планки та бічні листові накладки) розглядаються як магнітозв'язані електричні контури.

Результати розрахунку ЕДП представлено функціями струмів і температури, підтвердженими добре узгодженими з ними експериментальними даними ЛЕД. Було виявлено допустима за нагріванням гус-

тина струму у обмотці індуктора, вплив на процес збудження зміни її температури, а також вплив реакції ВС в елементах конструкції індуктора, сумарні струми яких виявилися близькими до МРС самої обмотки. Одержані струмові параметри дозволяють визначити динаміку старту індуктора при взаємодії його з ОЯ, а також сили, що діють на елементи його конструкції.

Для експериментального зразка ЛЕД виконані дослідження ПВК при одночасній комутації секцій ОЯ, з урахуванням реального розподілу магнітної індукції у зазорі, а також при урахуванні реакції електропровідних елементів індуктора, що чинять демпфуючу дію на комутуючі секції. У загальному випадку проводилося чисельне розв'язання досить великої системи рівнянь комутації і виявлено конкретні чисельні співвідношення та представлено комплект наочних ілюстрацій. Виявлено, що у всіх ситуаціях основні умови комутації зберігають силу, а взаємодія комутуваних секцій призводить до сповільнення комутації приблизно у 2 рази, але реакція ВС у каркасах котушок індуктора та у його обшивці багатократно збільшує швидкість, істотно полегшуючи умови комутації та створюючи передумови для ефективного використання магнітного поля індуктора для утворення тягового зусилля.

Поряд з розрахунково-теоретичним аналізом подано осцилограми цілого ряду експериментально знятих величин і характеристик: магнітні поля, індуктивні параметри, струми індуктора та якоря в імпульсному робочому режимі, комутаційні струми ОЯ та ін. До головних підсумків експериментів, разом з іншими важливими даними, можна віднести те, що ПВК успішно реалізується, а у діючому зразку ЛЕД знайшли підтвердження розрахунки ЕМП та ЕДП. Також була підтверджена можливість використання в умовах короткочасного режиму старту ЛЕД густини струму в обмотках, що більш ніж на порядок перевищує величину, прийняту при довготривалих режимах.

Розрахунково-експериментальні дослідження показали можливість розробки та створення малоінерційного ЛЕД з тиристорною системою комутації, що може бути ефективно використаний в пристроях розгонного типу для стартового прискорення різних об'єктів. Ефективний шлях проектування ЛЕД такого типу повинен будуватись на основі чисельного аналізу його ЕМП та ЕДП.

## ВИСНОВКИ

1. МПС залишаються важливою ланкою електроприводу відповідального призначення, потрібен їх подальший розвиток як у рамках конструктивної схеми, що вже склалася, так і за рядом інших напрямків. При аналізі ЕМП та ЕДП в МПС усе більшу роль набувають чисельні методи і ЕОМ, причому резерви розвитку системи проектування та удосконалення МПС на цій основі ще далеко не вичерпано.
2. Розроблені та удосконалені в роботі методи розрахунку магнітних полів для магнітної системи МПС у цілому та на локальних її ділянках гарантують надійність одержаних результатів і створюють основу довір'я чисельним методам при проектуванні МПС. Проведена адаптація МСР до конструкції МПС і запропоновані його модифікації дозволяють багатократно економити затратні ресурси ЕОМ і час людини та зробити цей метод інструментом широкого кола проектувальників.
3. З метою підвищення точності та поширення можливостей розрахунку магнітного поля МПС розроблено і впроваджено метод урахування кінцевої довжини магнітопровода при розрахунку поля у їх поперечному перерізі, а також метод розрахунку поля у поздовжньому перерізі. Ці методи і їх подальший взаємозв'язок дозволяють прийти до реалістичного урахування насичення магнітопровода та отримати об'ємний розподіл поля в активній зоні і торцевій частині МПС зі складною будовою магнітної системи.
4. Подано комплекс прямих переходів від чисельно розрахованого поля до ЕМП та ЕДП, які розглядаються при проектуванні МПС, причому, цей комплекс позбавлений ряду умовностей і наближень методів, що традиційно використовуються. Це показано для всіх основних параметрів і процесів такого роду, як, наприклад, магнітні потоки, електродинамічні зусилля, індуктивності та взаємоіндуктивності, ЕРС, вихрові струми, магнітні втрати, величини ефективного зазору і активної довжини якоря, комутаційний процес у ОЯ, процеси збудження обмоток та гасіння їх поля та ін., причому в умовах як звичайних, так і нетипових конструктивних форм.
5. Проведено різнобічні дослідження унікальної електромагнітної системи потужного КД, що характеризується дуже високим рівнем електромагнітних навантажень, значними немагнітними зазорами, новою структурою обмоточного шару якоря та ін. На основі розрахункового аналізу за допомогою запропонованих методів і конструктивних рішень показано шляхи подолання як відомих, але істотно загострившихся, так і вперше виявлених у МПС проблем.

6. Подано комплекс розв'язання задач ЕДП в електропровідних елементах конструкції МПС, таких, як провідники ОЯ, оболонки кріостатованої системи збудження КД, елементи конструкції індуктора ЛЕД.

7. Розроблено та реалізовано (на прикладі зразка крупної компенсованої МПС) систему аналізу ВС та додаткових втрат потужності в провідниках ОЯ, яка практично повністю враховує умови, що відображають реальні параметри складної конфігурації магнітної системи та її насичення, не має обмежень щодо розміщення і форми провідників та пазів якоря, конструкції секцій; одночасно враховуються усі різнопричинні складові змінного магнітного поля, а також реакція ВС.

8. Запропонована методика комплексного магнітно-теплого розрахункового аналізу забезпечує об'єктивність оцінки структур аксіальних вентиляційних каналів з точки зору їх впливу на магнітні втрати та температурні перепади в осерді якоря МПС. Проведені дослідження заклали основу, що дозволяє цілеспрямовано проводити вибір оптимальних конфігурацій та перерізу вентиляційних каналів з метою підвищення ефективності системи вентиляції осердя якоря.

9. Розроблено методи розрахунку ВС в електропровідних оболонках кріостата, які дозволяють при довільному характері збуджуючого магнітного поля проводити розрахунки як без урахування реакції ВС, так і з урахуванням їх максимальної реакції при наявності ідеальних екранів, а також з урахуванням реальної реакції екранів з добре електропровідного матеріалу.

10. Запропоновані методичні підходи дозволили виявити поведінку НПОЗ кріодвигуна в режимі навантаження та в аномальних режимах, як наприклад, при різноманітних варіантах виводу енергії з системи збудження. Аналіз, проведений з урахуванням взаємодії з елементами кріостата, дозволив дати конкретні рекомендації, що можуть бути реалізовані при створенні нових КД.

11. Проведено дослідження унікального типу малоінерційного ЛЕД з тиристорною системою комутації. Різномісним теоретичним аналізом на ідеалізованих розрахункових моделях, а також з максимальним урахуванням практично всіх впливаючих факторів виявлено умови реалізації ПВК у такому ЛЕД та обмежуючі її фактори. В цілому, розрахунково-експериментальні дослідження виготовленого експериментального зразка підтвердили основні положення, прийняті при проектуванні на основі чисельного аналізу ЕМП та ЕДП, і показали можливість розробки та створення малоінерційного ЛЕД з тири-

стороню системою комутації, ферромагнітним індуктором і високою густиною струму в обмотках, що більш ніж на порядок перевищує величини, прийняті в електричних машинах у довготривалих режимах.

12. На основі проведених досліджень створених унікальних експериментальних екземплярів МПС, а також зразків виготовлених та розробляємих промислових МПС можна констатувати, що існуючі, удосконалені та вперше розроблені автором методи чисельного розрахунку електромагнітних полів, електромагнітних параметрів і електродинамічних процесів можуть і повинні стати основою розвитку методології проектування високовикористаних МПС, що знайшло підтвердження у комплексі відомих та спеціально проведених експериментів.

#### Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Данько В.Г., Милых В.И. Электродинамические усилия в обмотках электродвигателя с гладким якорем // Электротехника.- 1977.- №3.-С.24-28.

2. Данько В.Г., Милых В.И. Электродинамические усилия в электродвигателе с обмоткой якоря, вынесенной в зазор, и компенсационной обмоткой // Электротехника.-1982.-№ 1.-С.34-40.

3. Милых В.И. Анализ влияния нагрузки криодвигателя постоянного тока на м.д.с. сверхпроводящей обмотки возбуждения при ее работе в режиме с отключенным источником питания // Электромеханика.- 1982.- № 11.- С.1298-1301.

4. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Вихревые токи в низкотемпературной зоне криостата в криодвигателе постоянного тока // Электричество.-1982.-№ 11.-С.14-19.

5. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника.-1982.-№12.-С.46-49.

6. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Анализ устойчивости работы сверхпроводящей обмотки возбуждения мощного криодвигателя постоянного тока // Электромеханика.-1983.-№ 1.-С.44-47.

7. Данько В.Г., Милых В.И. Коммутационные параметры электродвигателя с обмоткой якоря, вынесенной в зазор // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1983.-№3.-С.66-75.

8. Милых В.И. Вывод энергии из сверхпроводящей системы возбуждения двигателя постоянного тока // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1984.-№4.-С.86-95.

9. Милых В.И. Исследование режима возбуждения криодвигателя при отключении одной из полюсных катушек // Электричество.-1984.-

№11.- С.30-36.

10. Милых В.И. Расчет электромагнитного поля в продольном сечении электрической машины //Электротехника.-1984.- №12.-С.41-46.

11. Милых В.И. Расчет вихревых токов в тонкой оболочке, расположенной в двигателе постоянного тока с криогенным охлаждением // Электротехника.-1985.-№ 4.-С.19-23.

12. Милых В.И. Синтез магнитного поля электрических машин на основе плоско-ортогональных расчетных моделей // Электричество.-1986.- №5.- С.27-32.

13.Гринченко Н.Г.,Милых В.И.,Третьевич Р.И. Анализ усилий в обмотке якоря,вынесенной в зазор//Электротехника.-1986.-№5.С.11-15.

14. Гринченко Н.Г.,Данько В.Г.,Кильдишев В.С.,Милых В.И. и др. Основные направления разработки и исследований криодвигателя мощностью 10 МВт //Электротехника.-1986.-№3.-С.30-33.

15. Милых В.И. Электродинамические процессы в экранах многополюсной системы возбуждения сверхпроводникового двигателя постоянного тока // Электричество.-1987.-№ 4.-С.37-42.

16. Милых В.И., Климов Ю.А. Анализ электродинамических процессов в экране системы возбуждения криодвигателя постоянного тока// Техническая электродинамика.-1987.-№ 5.-С.70-75.

17. Милых В.И. Анализ токов в сверхпроводящем экране обмотки возбуждения криодвигателя постоянного тока // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1987.-№ 5.-С.94-103.

18. Милых В.И. Метод плоско-ортогональных расчетных моделей магнитного поля со сложной электромагнитной структурой // Электромеханика.-1987.-№ 11.-С.53-57.

19. Милых В.И., Карпенко Ф.Т. Анализ коммутационного процесса мощного электродвигателя с обмоткой якоря, вынесенной в зазор // Электротехника.-1988.-№ 3.-С.40-45.

20. Мандрыка О.Р., Милых В.И., Штангеев Е.И. Расчетная длина якоря электрической машины с учетом концевой пакеты // Электротехника.-1988.-№ 8.-С.37-43.

21. Милых В.И., Третьевич Р.И. Исследование магнитного поля в мощном электродвигателе с обмоткой якоря, вынесенной в зазор // Электричество.-1989.-№ 10.-С.28-34.

22. Милых В.И. Принцип компенсации геометрических искажений при конечно-разностных полевых расчетах // Техническая электродинамика.-1989.-№ 6.-С.20-26.

23. Милых В.И., Климов Ю.А., Штангеев Е.И. Сравнительный анализ электромагнитных и тепловых параметров сердечника якоря тяго-

вого электродвигателя с различными аксиальными вентиляционными каналами // Электротехника.-1990.-№5.-С.36-42.

24. Милых В.И. Комплексное решение задачи вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока // Электромеханика.- 1991.- №3.-С.65-66.

25. Милых В.И. Электродинамические условия в пазах якоря машины постоянного тока // Электротехника.-1992.-№ 10-11. -С.36-43.

26. Милых В.И. Индуктивные параметры проводников обмотки якоря машины постоянного тока // Электротехника.-1992.- №12.-С.6-11.

27. Милых В.И. Цепнополевой метод решения задачи вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока // Электротехника.-1993.-№ 1.-С.15-23.

28. Милых В.И. Расчетный анализ вихревых токов и добавочных потерь в обмотке якоря крупной машины постоянного тока // Электротехника.-1993.-№ 3.-С.6-14.

29. Милых В.И. Расчет вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока в режиме холостого хода // Электричество.-1993.- №4.-С.30-39.

30. Данько В.Г., Милых В.И., Поляков И.В. Исследование магнитного поля и процесса возбуждения малоинерционного линейного электродвигателя // Техническая электродинамика.- 1994.-№1.-С.25-30.

31. Милых В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // Электротехника.- 1994.- №10.-С.3-9.

32. Данько В.Г., Милых В.И., Поляков И.В. Исследовательский комплекс малоинерционного линейного электродвигателя // Известия РАН. Энергетика.- 1995.- №4.- С.117-126.

33. Милых В.И. Исследование тиристорной системы коммутации в линейном двигателе постоянного тока // Электричество.1995. №6. С.33-41.

34. Данько В.Г., Милых В.И., Толкунов В.П. Индуктивности и взаимоиндуктивные связи коммутируемых секций электродвигателя постоянного тока // Криоэлектротехника и энергетика. Ч.1. Криогенные электрические машины.- Киев : ИЭД АН УССР, 1977.-С.56-61.

35. Данько В.Г., Милых В.И. Расчет магнитного поля криодвигателя с гладким якорем с учетом насыщения // Криогенная электродинамика и энергетика. -Киев: Наукова думка, 1977.- С.10-17.

36. Danko V.G., Milykh V.I. Electrodynamic forces in a cryomotor with superconducting field winding // Proc.6th Int. Conf.Magnet Technol. (MT-6).-Bratislava, 1978.-P.260-265.

37. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Анализ проблемы потерь на вихревые токи в криостате мощного криодвигателя постоян-

ного тока при работе в реверсивном режиме//Nadprzewodnikowe maszyny elektryczne. Czesc II, Wroclaw / Prace naukowe politechniki wroclawskiej.- №36.- Cjferences № 9.- 1982.- S.32-44.

38. Гринченко Н.Г., Данько В.Г., Кильдишев В.С., Милых В.И. и др. Основные направления разработки и исследований криодвигателя мощностью 10 МВт//Сверхпроводимость в технике. Тр. Второй Всесоюзной конф. по техн.использованию сверхпроводимости. Т.1. Сверхпроводниковые машины и устройства. Л.: ЛНИВЦ, 1984.-С.32-35.

39. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Исследование электродинамических процессов в сверхпроводящей обмотке возбуждения мощного криодвигателя постоянного тока // Там же.- С.132-135.

40. Данько В.Г., Милых В.И., Гринченко Н.Г. и др. Криодвигатель постоянного тока мощностью 10 МВт: проблемы создания и первые этапы экспериментальных исследований // Техническая сверхпроводимость в электроэнергетике и электротехнике.-М.: Секретариат СЭВ, 1986.-С.18-33.

41. Милых В.И., Климов Ю.А. Анализ напряженно-деформированного состояния экрана сверхпроводящей обмотки возбуждения криодвигателя//Сб.науч.тр.АН УССР. ФТИНТ.-Киев: Наукова думка, 1988.-С.87-92.

42. Кузьмин В., Третьевич Р., Гренадерова Л., Данько В., Милых В. и др. Некоторые результаты изготовления и испытаний сверхпроводящей обмотки возбуждения криодвигателя // Cryogenics'90. 1-st International conference about Technique of low Temperatures. 15-18 May 1990. -Kosice, House of Technology CSSTS.-S.137-138.

43. Данько В., Милых В., Станкевич А. и др. Криодвигатель мощностью 10 МВт со сверхпроводящей обмоткой возбуждения: принятая концепция и проблемы создания // Там же. -S.139-140.

44. Милых В.И. Расчет электродинамических усилий, действующих на обмотки криогенного электродвигателя постоянного тока // Вестн. Харьк. политехн. ин-та.- Электромашиностроение и автоматизация пром. предприятий.- 1977.- № 132.- Вып.2.- С.90-92.

45. Милых В.И., Амелин В.З. Расчет основных параметров компенсационной обмотки криогенного электродвигателя // Там же.- 1977.- № 132.- Вып.2.- С.92-94.

46. Милых В.И. Начальное распределение поля обмотки гладкого якоря при его анализе конечно-разностным методом // Там же.- 1978.- № 144.- Вып.3.- С.66-68.

47. Милых В.И., Амелин В.З. Диаграмма изменений электродинамических усилий, действующих на обмотку возбуждения криодвигателя с гладким якорем // Там же.- 1978.- № 144.- Вып.3.- С.68-70.

48. Милых В.И., Толкунов В.П., Кирпилева Э.Т. Реактивная э.д.с. в мощном двигателе с немагнитным активным слоем // Там же.- 1979.- №151.- Вып.4.- С.79-81.

49. Милых В.И., Кирпилева Э.Т. Способ ускорения сходимости итерационного процесса при расчете поля возбуждения машины постоянного тока конечно-разностным методом // Там же.- 1979.- №151.- Вып.4.- С.85-87.

50. Милых В.И., Данько В.Г., Станкевич А.И., Климов Ю.А. Применение криогенного охлаждения в машинах постоянного тока с коллектором // Там же.-1981.-№180.- Вып.6. -С.74-75.

51. Милых В.И., Станкевич А.И. Анализ электромагнитного поля в мощном двигателе постоянного тока с немагнитным активным слоем и сильно насыщенным магнитопроводом // Там же.- 1982.- № 191.- Вып.7. -С.69-71.

52. Милых В.И., Станкевич А.И. Ускорение сходимости расчета конечно-разностным методом электромагнитного поля в нагруженной машине постоянного тока // Там же.- 1983.- №206.- Вып.8.-С.84-86.

53. Милых В.И., Станкевич А.И., Шевчун А.Н. Численный анализ теплового состояния обмотки возбуждения с криогенным охлаждением мощного криодвигателя постоянного тока в реверсивном рабочем режиме // Там же.- 1984.- № 214.- Вып.9. -С.80-82.

54. Милых В.И., Станкевич А.И., Климов Ю.А. Расчетные и экспериментальные исследования динамики несимметричного возбуждения двигателя постоянного тока // Там же.-1985.-№227.-Вып.10.-С.77-78.

55. Милых В.И., Климов Ю.А., Климов С.А. Численный анализ вихревых токов в тонкой длинной оболочке, расположенной в двигателе постоянного тока // Там же.- 1986.- № 236.-Вып.11.-С.87-90.

56. Милых В.И., Климов Ю.А. Экспериментальное моделирование электродинамических процессов в многополюсной магнитной системе с электропроводящими экранами//Там же.-1987.-№247.-Вып.12.-С.77-79.

57. Милых В.И., Климов Ю.А. Расчет вихревых токов в оболочке при полном экранировании магнитного поля в локальной зоне внутри электродвигателя // Там же.- 1988.- №255.-Вып.13.-С.76-78.

58. Милых В.И., Климов Ю.А. Анализ электродинамических усилий в мощном прокатном двигателе постоянного тока // Там же.- 1989.- № 272.- Вып.14.- С.94-96.

59. Милых В.И., Климов Ю.А., Тимофеева А.Ф. Анализ условий косвенного охлаждения криостатированной обмотки возбуждения //Там же.- 1990.- № 279.- Вып.15.- С.90-94.

60. Милых В.И., Климов Ю.А. Исследование магнитных потерь в

- якоре крупного прокатного двигателя постоянного тока // Там же.- 1992.- № 4.- Вып.16.- С.37-42.
61. Милых В.И., Тимофеева А.Ф., Поляков И.В. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе с большим зазором // Там же.- 1992.- № 5.- Вып.17.- С.37-42.
62. А.с. 1109002 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 9/197, 55/02. Электрическая машина со сверхпроводящей обмоткой возбуждения / В.И.Милых, А.И.Станкевич, Р.И.Третьевич.- №3580661/24-07; Заявлено 16.04.83; Опубл. 15.04.84.- 9 с.
63. А.с. 1229903 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 1/14, 3/52. Электрическая машина постоянного тока / В.Г.Данько, В.И.Милых, А.К.Черкасов, Р.И.Третьевич.- №3741332/24-07; Заявлено 16.05.84; Опубл. 07.05.86. Бюл. № 17.- 3 с.
64. А.с. 1261045 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 1/10. Добавочный полюс электрической машины постоянного тока / В.И.Милых, А.К.Черкасов.- №3867517/24-07; Заявлено 18.03.85; Опубл.30.09.86. Бюл. №36.-3 с.
65. А.с.1272944 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 55/00, 19/16. Сверхпроводниковая электрическая машина / В.Г.Данько, В.И.Милых, С.И.Скрыпин и др.- №3850519/24-07; Заявлено 01.02.85; Опубл. 22.07.86.- 5 с.
66. А.с. 1308136 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 55/00, 1/14, 9/197. Магнитная система электрической машины со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения / А.С.Дронов, В.И.Милых.- №3807222/24-07; Заявлено 05.11.84; Опубл. 15.04.84.- 6 с.
67. А.с.1369639 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 9/197, 55/00. Полюс электрической машины постоянного тока / В.И.Милых, А.И.Станкевич, Р.И.Третьевич и др.- №3873191/24-07; Заявлено 11.02.85; Опубл.22.09.87.-4 с.
68. А.с. 1480023 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 1/20, 1/32. Шихтованный сердечник электрической машины / В.И.Милых, А.К.Черкасов, Е.И.Штангеев.- №4281462/24-07; Заявлено 15.06.87; Опубл. 15.05.89. Бюл. №18.- 3 с.
69. А.с.1760935 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 К 9/197, 55/00. Полюс криогенной электрической машины постоянного тока / В.Ф.Болух, Ю.А.Климов, В.И.Милых.- №4840379/24-07; Заявлено 18.06.90; Опубл. 08.05.92.- 5 с.
70. Милых В.И., Климов Ю.А. Анализ состояния сверхпроводящей обмотки возбуждения в условиях криодвигателя.- Харьков, 1991.-12 с.- (Препринт /АН УССР. Физико-технич. ин-т низких температур; №5).
71. Милых В.И., Климов Ю.А. Задание начальных условий при численном анализе электромагнитного поля в электрических машинах постоянного тока / Харьков. политехн. ин-т.- Харьков, 1983.- 25 с. Деп. в Информэлектро, №373 эт - Д83.

72. Милых В.И., Шуба Н.П., Кирпилова Э.Т. Определение эффективного зазора в электрической машине с треугольно-профилированной структурой обмоточного слоя якоря / Харьк. политехн. ин-т.- Харьков, 1986.-18 с. Деп. в УкрНИИТИ, №2643-Ук86.

73. Милых В.И., Тимофеева А.Ф., Кирпилова Э.Т. Исследование магнитного поля, вытесняемого из зазора машины постоянного тока с неоднородной структурой концевых частей сердечников / Харьк. политехн. ин-т.-Харьков, 1987.-24 с. Деп. в УкрНИИТИ, №1313-Ук87.

74. Милых В.И., Кирпилова Э.Т. Начальное распределение магнитного поля электромашин при итерационной реализации сеточных моделей / Харьк.политехн.ин-т.-Харьков, 1987.-26 с. Деп. в УкрНИИТИ, №3107-Ук87.

75. Милых В.И., Кирпилова Э.Т. Модификация метода конечных разностей при полевых расчетах в областях с нескоординированными внутренними границами / Харьк. политехн. ин-т.- Харьков, 1987.-19 с. Деп. в УкрНИИТИ, №1743-Ук87.

76. Данько В.Г., Милых В.И., Поляков И.В. Экспериментальный образец линейного электродвигателя с тиристорной системой коммутации и первые этапы его исследований / Харьк. политехн. ин-т.- Харьков, 1994.- 24 с. Деп. в ГНТБ Украины 26.04.94, №351-Ук.94.

77. Данько В.Г., Милых В.И., Поляков И.В. Испытательный комплекс и некоторые результаты исследований малоинерционного линейного электродвигателя / Харьк.политехн.ин-т.-Харьков, 1994.-24 с. Деп. в ГНТБ Украины 20.07.94, №1397-Ук.94.

Особистий внесок. Викладені в дисертації теоретичні опрацювання, розрахункові дослідження та відповідні алгоритми і програмне забезпечення, аналіз результатів та висновки виконані автором особисто. Основна частина експериментальних досліджень виконана також особисто їм, або за його участю.

З публікацій дисертантом 21 основних виповнено особисто їм, а у публікаціях з соавторами йому належить наступне: в [1,2,4, 7,13,16,20,21,23,30,34-38,40,45,47-49,51,52,57,74] - постановва задач, побудова математичних моделей, алгоритми і програми, розрахунки та аналіз результатів; в роботах [30,32,54,56,76,77] - розробка програми експерименту; в роботах [63,64,67,68] - ідея винаходу та вирізні ознаки; тексти сумісних робіт [1,2,4,7, 13,14,16,20,21,23,32,34-38,40,43,45,47-52,57,61,71-75] написані дисертантом особисто. У інших компонентах сумісних робіт авторські права розподілені нарівно.

## Annotation

Milykh V.I. The numerical simulation of electrodynamic processes in direct-current machines with high unit loads.

The thesis (manuscript) for a doctor's degree of technical sciences, speciality 05.09.01 - electrical machines; Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1995.

97 scientific works and 8 author's certificates are defended. The development of the methodology of the direct-current machines design problem is solved in them by means of enhancement and development of methods of numerical analysis of electromagnetic fields, parameters and processes. The developments are confirmed by experimental evidence and are applied in a complex of research of machines of high usage both industrial of general purpose and such unique experimental prototypes as powerful cryomotor and quick-response linear electromotors with natural valve commutation.

## Аннотация

Милых В.И. Численное моделирование электродинамических процессов в машинах постоянного тока с высокими удельными нагрузками.

Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины; Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1995.

Защищается 97 научных работ и 8 авторских свидетельств, в которых решена задача развития методологии проектирования машин постоянного тока путем совершенствования и разработки методов численного анализа электромагнитных полей, параметров и процессов. Разработки подтверждены опытной апробацией и внедрены в комплексе исследований высокоиспользуемых машин как промышленных разного назначения, так и уникальных экспериментальных образцов: мощного криодвигателя и малоинерционного линейного электродвигателя с естественной вентильной коммутацией.

Ключові слова: машини постійного струму, електродинамічні процеси, чисельне моделювання

---

Підп. до друку 4.11.95. Формат 60x84/16. Папір друк.  
Ум. друк. арк. 2.0. Тираж 120. Зам. 12-09.

---

Редакційно-видавничий відділ  
Харківського Державного політехнічного університету  
310002, м.Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21.

1995/115



447115

AB 33.566