

**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
_____ Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)
«___» _____ 20__ року

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Розробка оптимальної за втратами електроенергії системи керування
синхронними двигунами з постійними магнітами»

Здобувач 6 курсу, групи 6367зм
за спеціальністю: 141 «Електроенергетика
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)
Освітньо-професійна програма:
«Експлуатація суднових автоматизованих
(назва)
систем»

	<u>Будігай О.Л.</u>	_____
	(прізвище та ініціали)	(підпис)
Керівник	<u>Костюченко В.І.</u>	_____
	(прізвище та ініціали)	(підпис)
Рецензент	<u>Білюк І.С.</u>	_____
	(прізвище та ініціали)	(підпис)

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

Херсонська філія

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Енерготехнічний

Кафедра, циклова комісія Автоматики та електроустаткування

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий, (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Освітньо професійна програма «Експлуатація суднових автоматизованих систем»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматики
та електроустаткування**

Михаліченко П.Є.

“___” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Будігай Олександр Леонідович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка оптимальної за втратами електроенергії системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами

Керівник роботи: к.т.н. Костюченко Віталій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу

від “___” _____ 20__ року №___

2. Строк подання здобувачем роботи _____

3. Вихідні дані до роботи системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз впливу втрат в сталі на роботу системи векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами; 2. Синтез системи на основі уточненої моделі об'єкту, що враховує втрати в сталі; 3. Охорона праці; 4. Охорона навколишнього середовища

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
презентація в електронному виді

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
-	-		
-	-		
-	-		
-	-		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами	вересень 2019 р.	
2	Розробка оптимальної системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами	лютий 2020 р.	
3	Аналіз роботи системи оптимального керування при урахуванні існуючих обмежень на напругу і струм статора	травень 2020 р.	
4	Підготовка розділів з охорони праці та охорони навколишнього середовища	вересень 2020 р.	
5	Оформлення магістерської роботи	листопад 2020 р.	

Здобувач

(підпис)

Будігай О.Л.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Костюченко В.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Об'єм пояснювальної записки становить 124 аркуші, вона містить 4 розділи, 71 рисунок, 4 таблиці, 67 найменувань в списку використаної літератури. Мультимедійна презентація представлена на 10 слайдах.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є електромеханічні, електромагнітні та енергетичні процеси в системах електропривода на основі синхронних двигунів з постійними магнітами.

Предметом досліджень є системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

Метою роботи є розробка оптимальної за втратами електроенергії системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

В роботі представлено нові рішення в області систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами, які дозволять поліпшити енергетичні показники системи електроприводу. В роботі розроблено алгоритми, що реалізують оптимальні за втратами в двигуні закони керування. Удосконалено систему векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами, шляхом регулювання складових не повного струму статора, а їх частин, які беруть участь у створенні електромагнітного моменту, що дозволило підвищити енергетичні показники системи електроприводу. Визначено максимальні рівні керованих координат при урахуванні існуючих обмежень на напругу та струм в системі електропривода. Результати моделювання показали, що застосування запропонованої системи дозволяє підвищити ефективність приблизно на (0,5-3)%.

Також розглянуто положення міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 по запобіганню забруднення з суден.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами, оптимальне керування, теплові втрати, система полеорієнтованого керування.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	
1.1. Основні відомості про синхронні двигуни з постійними магнітами	11
1.2. Огляд систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами	14
1.3. Аналіз оптимальних стратегій керування, спрямованих на мінімізацію втрат в синхронному двигуні з постійними магнітами.....	18
1.4. Математичний опис в системі координат dq з урахуванням втрат в сталі...	23
1.5. Аналіз системи полеорієнтованого керування при урахуванні втрат в сталі ...	26
1.6. Синтез удосконаленої системи векторного керування.....	31
1.7. Порівняння традиційної та удосконаленої системи полеорієнтованого керування	35
Висновки до розділу 1	39
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	
2.1. Загальний підхід до оптимального керування СДПМ.....	40
2.2. Синтез стратегій оптимального керування СДПМ	44
2.3. Аналіз запропонованих стратегій керування.....	57
2.4. Система оптимального керування з урахуванням існуючих обмежень на струм і напругу електропривода	65
2.5. Робота системи оптимального керування при урахуванні існуючих обмежень на напругу і струм статора.....	68
2.6. Експериментальна перевірка системи оптимального керування	76
Висновки до розділу 2	89
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	
3.1. Загальні положення	90
3.2. Аналіз умов праці вахтового електромеханіка в приміщенні ЦПУ	91

3.2.1. Електробезпека при експлуатації електростанції	92
3.2.2. Заходи щодо захисту рідких і газоподібних речовин від статичної електрики.....	93
3.2.3. Небезпеки механічного та теплового травматизму	95
3.2.4. Пожежна безпека	95
3.2.5. Мікроклімат і шкідливі домішки в приміщенні ЦПУ	97
3.2.6. Вібрація і шум.....	97
3.2.7. Освітлення.....	98
3.2.8. Шкідливі випромінювання.....	99
3.3. Розрахунок освітлення в ЦПУ	100
РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ДО ОБЛАДНАННЯ І ПРИСТРОЇВ СУДЕН ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ СТИЧНИМИ ВОДАМИ	
4.1. Загальні положення	102
4.2. Установки і обладнання для збирання, зберігання, обробки і видалення стічних вод.....	107
4.3. Контрольно – вимірювальні пристрої	113
4.4. Вимоги до суден, які експлуатуються у межах акваторії порта, і при плаванні на внутрішніх водних шляхах	114
ВИСНОВКИ.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	118

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун;
АІН – автономний інвертор напруги;
ЕРС – електрорушійна сила;
МВМ – мінімізація втрат в міді;
МВС – мінімізація втрат в сталі;
ММА – максимальний момент на ампер;
ММВ – максимальний момент на вольт;
МСВ – мінімізація сумарних втрат;
ПЗ – перехресні зв'язки;
ПКМ – пряме керування моментом;
РС – регулятор струму;
РШ – регулятор швидкості;
СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами;
СРД – синхронний реактивний двигун;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Перспективним напрямком розв'язання проблеми енергозбереження є підвищення ефективності споживання електроенергії, тобто зменшення її втрат. Відомо, що від 50% до 60% споживаної енергії приходить на живлення систем електроприводу, енергоефективність яких в значній мірі залежить від типу електричного двигуна. В останні роки все більшого розповсюдження знаходять синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ), які характеризуються високими значеннями коефіцієнту корисної дії, коефіцієнту потужності та покращеними масогабаритними показниками. Даний тип машин отримав значний розвиток у зв'язку з прогресом в області магнітних матеріалів і напівпровідникової техніки. Їх потужність може варіюватися від ват до кількох сотень кіловат. Електропривод на базі СДПМ знаходить застосування в багатьох сферах життєдіяльності людини.

Отже, аналіз і синтез оптимальних за втратами електроенергії систем керування СДПМ з метою підвищення їх ефективності є актуальною задачею, розв'язання якої дозволить покращити енергетичні показники системи електроприводу.

Для регулювання координат СДПМ найчастіше використовується система векторного керування. Дана система може використовуватися як основа для побудови систем керування оптимальних з точки зору енергоспоживання. Відомо, що за рахунок використання певних стратегій (алгоритмів), можливо оптимізувати бажані показники електроприводу. До найбільш розповсюджених стратегій керування належать «Максимальний момент на ампер» (ММА), «Максимальний момент на вольт» (ММВ) і «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ). Застосування перших двох дозволяє опосередковано зменшити теплові втрати в обмотках двигуна (втрати в міді) та частинах магнітної системи (втрати в сталі) за рахунок мінімізації струму та напруги статора відповідно. Їх використання найчастіше пов'язують з робочим діапазоном швидкості двигуна. Найбільшої ефективності системи електроприводу можливо досягти за рахунок стратегії

керування МСВ, яка дозволяє одночасно мінімізувати як втрати в міді, так і втрати в сталі.

Однак, більшість оптимальних систем керування, які спрямовані на підвищення енергоефективності, побудовані на основі моделі об'єкта регулювання, яка не враховує втрати в сталі, що знижує ефективність використання зазначених алгоритмів. У разі врахування цих втрат залежність між складовими струму статора, що відповідає умовам оптимізації, визначається у чисельному вигляді та закладається в алгоритм керування у вигляді таблиць. Такий підхід потребує виконання попередніх розрахунків для кожного двигуна та не дозволяє адаптувати цю залежність при зміні параметрів, що її визначають. Алгоритми керування можливо уніфікувати та зробити здібними до адаптації, якщо отримати закони оптимізації в аналітичній формі.

Відтак, питання аналізу та синтезу систем оптимального керування СДПМ ще потребують удосконалення.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є електромеханічні, електромагнітні та енергетичні процеси в системах електропривода на основі синхронних двигунів з постійними магнітами.

Предметом досліджень є системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

Цілі та задачі дослідження:

- проаналізувати вплив втрат в сталі на роботу загальновідомої системи векторного керування СДПМ;
- синтезувати систему на основі уточненої моделі об'єкту, що враховує втрати в сталі;
- розробити оптимальні стратегії керування СДПМ з урахуванням втрат в сталі;
- узагальнити отримані стратегії з метою їх уніфікації та зручності використання шляхом отримання аналітичних залежностей;
- синтезувати оптимальну систему керування з урахуванням існуючих обмежень на струм і напругу електропривода.

Методи дослідження: методи теорії оптимального керування для розробки алгоритмів керування СДПМ, методи теорії автоматичного керування та координатних перетворень при синтезі удосконаленої системи векторного керування, метод математичного моделювання для аналізу систем керування на математичних моделях, експериментальні дослідження для перевірки адекватності математичних моделей та результатів, одержаних аналітичними методами.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено систему векторного керування СДПМ, шляхом регулювання складових не повного струму статора, а їх частин, які беруть участь у створенні електромагнітного моменту, що дозволило підвищити енергетичні показники системи електроприводу;
- удосконалено методи оптимального керування СДПМ «Максимальний момент на ампер» і «Максимальний момент на вольт» шляхом урахування втрат в сталі, що дозволило підвищити ефективність оптимізації;
- вперше отримано аналітичний вираз залежності між частинами складових струмів статора, який забезпечує реалізацію стратегії керування «Мінімізація сумарних втрат» для СДПМ, що створює передумови до адаптації системи при зміні параметрів об'єкту керування;
- вперше доведено, що всі розглянуті алгоритми керування СДПМ можливо узагальнити, подавши їх у вигляді єдиного математичного виразу, в якому зміна одного параметра дозволяє обрати бажану стратегію оптимізації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

1.1. Основні відомості про синхронні двигуни з постійними магнітами

В даний час великий інтерес представляють електроприводи на основі синхронної машини з постійними магнітами. Такий двигун являє собою машину змінного струму з трифазною обмоткою на статорі та постійними магнітами, встановленими на роторі.

СДПМ отримали значний поштовх у розвитку завдяки появі нових рідкоземельних матеріалів, які використовуються в якості постійних магнітів.

У наш час виготовляються двигуни в діапазоні малих і середніх потужностей. Основними сферами застосування даного типу двигунів є:

- промисловість (турбомеханізми, транспортне обладнання, підйомники, верстати, автоматика, робототехніка і т.д.);
- комунальна сфера (насоси, вентилятори, компресори, обладнання підприємств громадського харчування, пральні машини і т.д.);
- домашній побут (кухонне обладнання, іграшки і т.д.);
- транспортні засоби малої та середньої потужності (ліфти, ескалатори, тролейбуси, електромобілі, гібридні автомобілі, сігвеї, інвалідні візки);
- військова та космічна промисловість, медичне обладнання, інструмент, поновлювані джерела енергії, дослідницьке устаткування.

У порівнянні з асинхронними та двигунами постійного струму двигуни з постійними магнітами мають ряд переваг. Основні з них наступні:

- висока щільність потоку в повітряному зазорі;
- високе відношення потужність / вага;
- велике співвідношення електромагнітного моменту до моменту інерції;
- малий рівень пульсацій моменту у всьому діапазоні регулювання швидкості;
- можливість регулювання моменту при нульовій швидкості;

- висока перевантажувальна здатність за моментом;
- високий ККД завдяки малим втратам в роторі;
- покращені масогабаритні показники.

Двигуни з постійними магнітами бувають декількох видів і їх можна класифікувати кількома способами, в залежності від конструкції (рис. 1.1) [10].

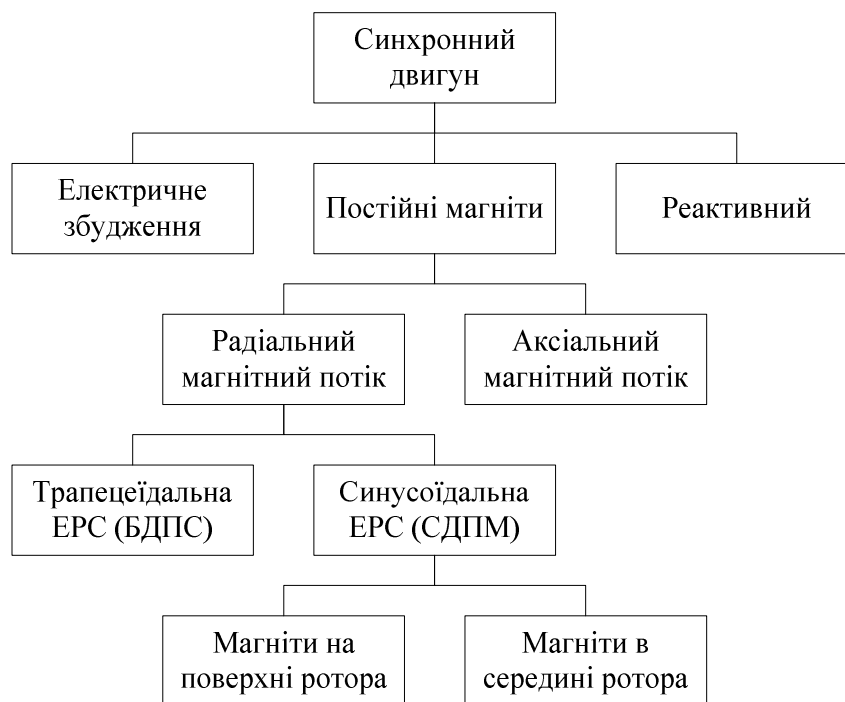


Рисунок 1.1. - Різновиди електричних машин на основі синхронного двигуна

За розташуванням ротора бувають двигуни з внутрішнім і зовнішнім ротором. Найбільш поширеними є двигуни з внутрішнім ротором. Зовнішнє розташування ротора найчастіше використовується для механізмів, які вимагають сталості швидкості, наприклад, вентилятори та повітрорудки. В даному випадку високий момент інерції ротора є перевагою.

За напрямком магнітного потоку розрізняють двигуни з радіальним полем, тобто поле спрямоване уздовж радіуса машини, і аксіальним (осьовим) полем, коли поле направлено вздовж осі ротора. Найбільш часто використовують машини з радіальним полем, які мають витягнутий циліндричний ротор, але двигуни з аксіальним полем мають свою нішу внаслідок своєї дисковидної форми, компактної конструкції та високої питомої потужності. Вони набули поширення в електромобілях, насосах, вентиляторах, ліфтах, верстатах, роботах. Виготовлення

машин з аксіальним полем вимагає більших витрат у порівнянні з машинами з радіальним полем.

За формою проти-ЕРС двигуни з постійними магнітами, розташованими на поверхні ротора, можна розділити на: безщіткові двигуни постійного струму (БДПС), які характеризуються трапецеїдальною формою проти-ЕРС і синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ), які мають синусоїдальну форму проти-ЕРС.

БДПС це двигуни з постійними магнітами, розташованими на поверхні ротора, і трифазною обмоткою статора, яка забезпечує трапецеїдальну форму проти-ЕРС і струмів статора. У порівнянні з СДПМ вони мають більший на 15% момент при тих же розмірах, меншу вартість і більш просту конструкцію. Недоліком даного типу машин є значні коливання моменту.

В свою чергу СДПМ можна розділити на двигуни з поверхневим і внутрішнім розташуванням магнітів на роторі.

При установці магнітів на поверхні ротора збільшується повітряний зазор і зменшується реакція якоря, сталі часу статора, практично відсутня електрична асиметрія ротора (індуктивності за подовжньою і поперечною осями приблизно однакові).

Установка магнітів всередині ротора призводить до підвищення механічної міцності ротора, що дозволяє працювати на високих швидкостях. Також при цьому, внаслідок нерівномірності повітряного зазору (магнітна проникність повітря і постійних магнітів приблизно однакова), виникає електромагнітна асиметрія. Даний ефект призводить до появи поряд з основною складовою моменту (результат взаємодії поперечної складової струму статора і потоку постійних магнітів) додаткової реактивної складової, за рахунок використання якої можна отримати більше відношення потужність / вага в порівнянні з раніше розглянутим варіантом.

В літературі найбільшого розповсюдження отримали БДПС та СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора. Однак можна спостерігати тенденцію все більшої популяризації СДПМ з магнітами встановленими

всередині ротора. Це, насамперед, пов'язано з більшою ефективністю таких двигунів та найкращими масогабаритними показниками. В даній роботі буде розглядатися саме останній тип СДПМ, який з точки зору об'єкта керування являє собою найбільш загальний випадок. Таким чином, отримані результати можуть бути розповсюджені на весь клас двигунів без електричного збудження.

1.2. Огляд систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами

Для керування СДПМ найчастіше використовується перетворювач частоти з ланкою постійного струму. Формування необхідного рівня і частоти живлячої напруги в такій системі виконує автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Серед систем керування можна виділити три основні варіанти [9, 15]: система скалярного (вольт / герц) керування, система полеорієнтованого (векторного) керування і система прямого керування моментом.

Найбільш простою системою керування, є система скалярного керування, також іноді звана U/f або Вольт/герц [15]. Ця система аналогічна добре відомій системі, що використовується для асинхронних двигунів, і може застосовуватися для регулювання швидкості як двигунів з постійними магнітами, так і для реактивних синхронних двигунів і двигунів з'єднаних паралельно. Зміна швидкості двигуна відбувається за рахунок зміни частоти напруги, що підводиться до статора двигуна (рис. 1.2).

Причому частота напруги (f) визначається бажаною швидкістю, а амплітуда (U) змінюється в залежності від швидкості відповідно до застосованого методу скалярного керування (наприклад $U/f = const$, $U/\sqrt{f} = const$, $U/f^2 = const$).

Така система забезпечує високі статичні характеристики і може дозволити роботу в режимі послаблення поля. Існує можливість використання скалярного

керування в якості альтернативи бездатчиковому векторному керуванню в діапазоні середніх і високих швидкостей.

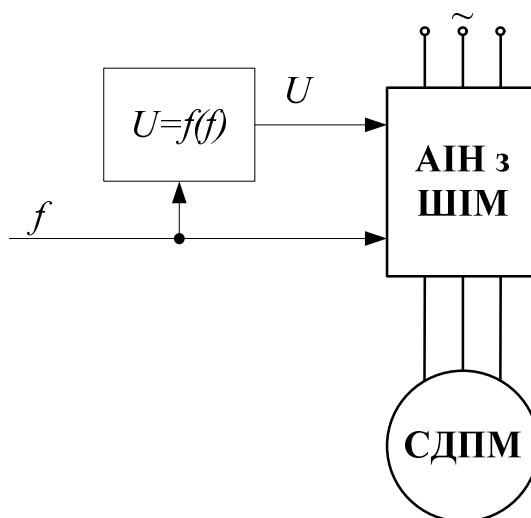


Рисунок 1.2. - Функціональна схема скалярного керування

Однак основними проблемами при використанні скалярного керування для СДПМ є складність забезпечення стабільної роботи (синхронізму) при зміні швидкості або навантаження та досягнення високих енергетичних показників.

Таким чином, зважаючи на свої недоліки, система скалярного керування СДПМ не набула великого поширення та в основному застосовується для механізмів, що не пред'являють високих вимог до якості перехідних процесів [23].

В останні десятиріччя все більший розвиток отримала система прямого керування моментом (ПКМ), яка поряд із використанням для асинхронних двигунів знаходить застосування і для СДПМ. Пряме керування моментом засноване на ідеї безпосереднього регулювання моменту двигуна за рахунок вибору потрібного вектора напруги, виходячи з поточного стану вектора потоку статора двигуна (рис. 1.3).

Основними елементами системи є релейні регулятори електромагнітного моменту (M) і потоку статора (ψ_s), а також таблиці вибору векторів напруги статора. У порівнянні з полеорієнтованим (векторним) керуванням, пряме керування моментом забезпечує низьку чутливість до зміни параметрів об'єкта регулювання.

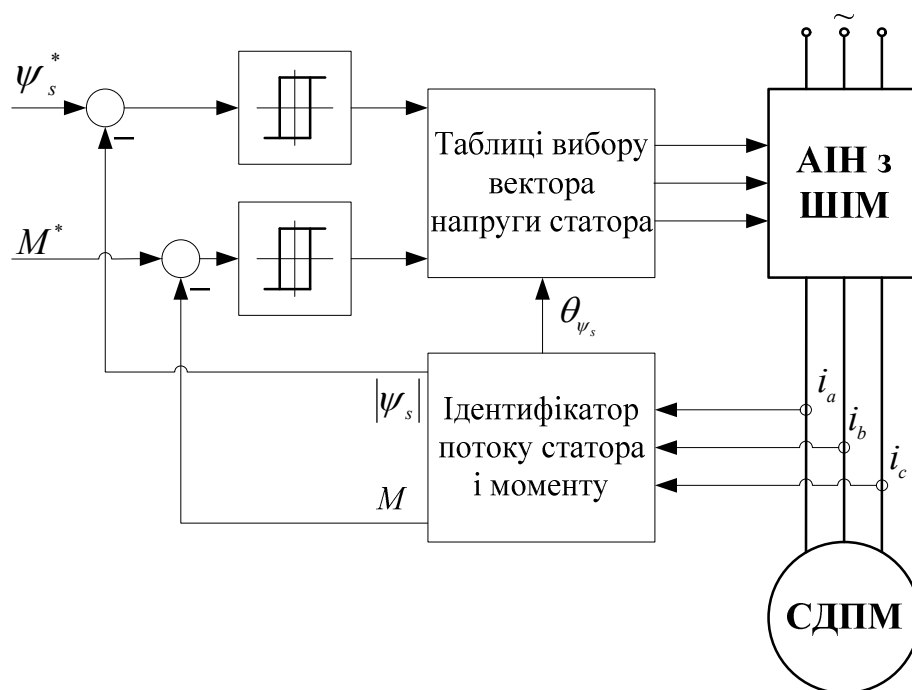


Рисунок 1.3. - Функціональна схема системи прямого керування моментом

Основний недолік при застосуванні ПКМ – наявність коливань в електромагнітному моменті. Перспективним способом їх зменшення є застосування просторово-векторної модуляції замість релейних регуляторів [57], проте таке рішення, разом з поліпшенням, помітно ускладнює систему. Ще одним недоліком такої системи, у випадку її використання для СДПМ, є необхідність інформації про вектор потоку статора [65], що приводить до ускладнення системи, а неточність його ідентифікації погіршує якість регулювання.

Найбільшого поширення серед систем керування СДПМ отримала система полеорієнтованого керування [67]. Основною ідеєю є використання системи координат, яка обертається синхронно з вектором потоку ротора. Стосовно до СДПМ, швидкість обертання системи координат відповідає електричній швидкості ротора. Це пов'язано з тим, що потік ротора створюється магнітами, нерухомо встановленими на роторі. Таке перетворення дозволяє спростити математичний опис і, при виконанні певних умов, побудувати систему керування аналогічну двигуну постійного струму з незалежним збудженням (рис. 1.4).

На цьому рисунку прийняті такі позначення: u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і повного струму статора на осі d і q ; $\omega_e = Z_p \omega$ – електрична кутова частота ротора; Z_p – кількість пар полюсів; ω – механічна кутова швидкість ротора. Символом «*» позначені завдання на відповідні величини.

Для забезпечення високих динамічних та статичних характеристик, система полеорієнтованого керування в великій мірі вимагає достовірної інформації про об'єкт регулювання.

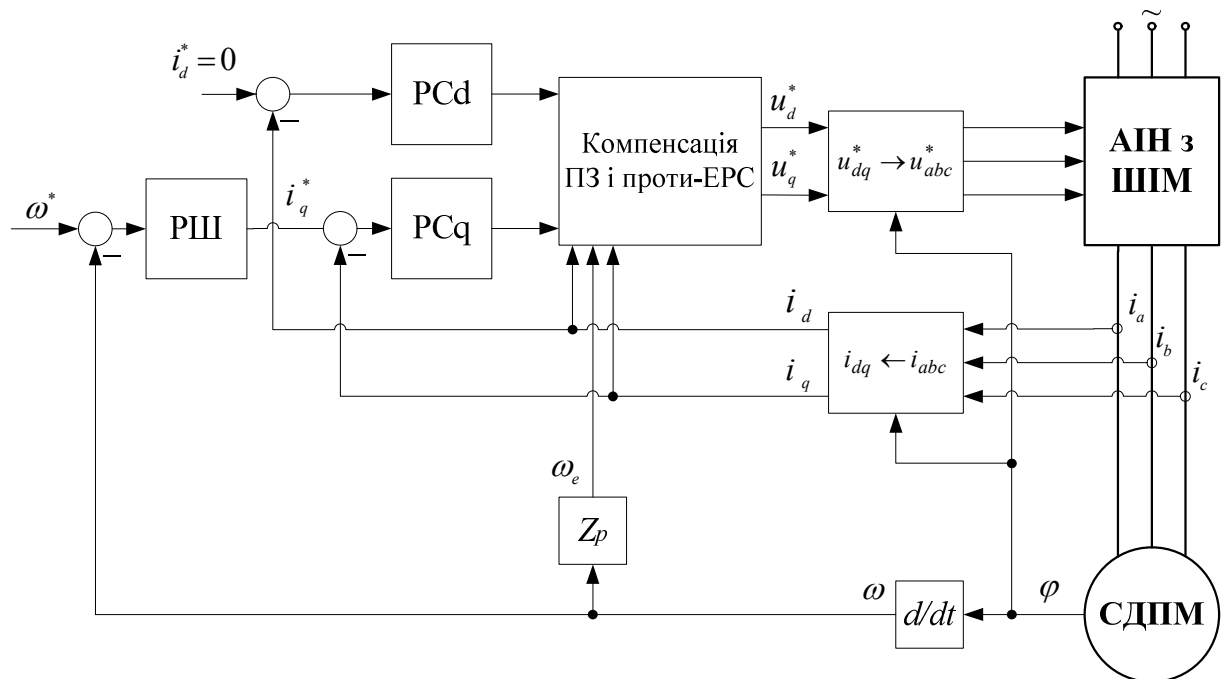


Рисунок 1.4. - Функціональна схема традиційної системи полеорієнтованого керування СДПМ

Таким чином, у зв'язку з найбільшим розповсюдженням в наш час, в подальшому буде розглядатися тільки система векторного керування. Слід відзначити, що саме на її основі найчастіше будуються системи оптимального керування. Однак це не виключає можливості застосування оптимальних стратегій керування для всіх розглянутих систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

1.3. Аналіз оптимальних стратегій керування, спрямованих на мінімізацію втрат в синхронному двигуні з постійними магнітами

У роботі під стратегією (алгоритмом) керування розуміється спосіб регулювання, який забезпечує екстремум цільової функції за умови створення необхідного електромагнітного моменту. Значення бажаного електромагнітного моменту може задаватися безпосередньо для систем, що керуються силою, або бути виходом регулятора швидкості. В ідеальному випадку, виходячи із заданого моменту, необхідно отримати завдання на поздовжню і поперечну складові струму статора. Однак на практиці таке перетворення найчастіше є досить складним і не завжди піддається реалізації. Тому в більшості випадків знаходять залежність між складовими струму статора, виконання якої дозволить реалізувати обрану стратегію керування. Іноді може бути застосована фазова залежність, тобто знайдений кут між вектором струму статора і поперечною віссю, як, наприклад, це зроблено в [66].

У літературі можна зустріти застосування стратегій керування для досягнення оптимальних показників системи не тільки для СДПМ, але і для асинхронних [16] і синхронних реактивних двигунів [9]. Однак найчастіше різні стратегії керування асоціюють саме з системами побудованими на базі СДПМ, що може бути пов'язано з первісною сферою застосування таких машин, а саме – в відповідальних механізмах, які вимагають найкращих показників від системи електроприводу.

Традиційна система векторного керування заснована на спрощеному математичному описі СДПМ. Зокрема синтез системи виконано у припущенні відсутності втрат в сталі, які насправді можуть становити суттєву частку сумарних втрат. Серед основних видів втрат у СДПМ можна виділити наступні: втрати в міді, втрати в сталі, механічні і паразитні втрати.

Паразитні втрати обумовлені такими ефектами як ефект близькості і скін-ефект [26]. Даним видом втрат найчастіше нехтують.

Механічні втрати залежать тільки від швидкості двигуна. На них не можна вплинути засобами електропривода.

Втрати в міді, обумовлені падінням напруги на активному опорі обмотки статора. Даний тип втрат добре вивчений і практично завжди враховуються при синтезі систем електроприводу.

Втрати в сталі обумовлені наявністю вихрових струмів і магнітного гістерезису. Однак втрати в сталі для СДПМ можуть становити значно більшу частину сумарних втрат, у порівнянні з асинхронним двигуном. Аналіз впливу конструкції СДПМ на величину втрат показує, що зменшення втрат в сталі можна ще на етапі проектування двигуна. В [31] проаналізована зміна втрат в сталі при ослабленні поля і зміні коефіцієнта модуляції. Для моделювання даного типу втрат можуть використовуватися різні методи. Однак найбільш зручним, з погляду математичного опису, є підхід, де втрати в сталі представляються у вигляді фіктивного опору, який під'єднаний паралельно потокоутворюючому контуру електричної схеми заміщення. Введення цього опору призводить до того, що на створення потоку, а, отже, і моменту двигуна йде не весь струм статора, а лише його частина. У загальному випадку даний опір змінний і залежить від робочої швидкості двигуна.

Присутність втрат в сталі також повинна позначитися на якості регулювання струмів статора і компенсації перехресних зв'язків і противо-ЕРС, яка необхідна для усунення взаємного впливу каналів регулювання за поздовжньою і поперечною осями. У літературі можна зустріти різні способи реалізації контурів регулювання струму: використання ПІ- або гістерезисних регуляторів, прогнозуючих або адаптивних, однак при аналізі цих систем не розглядався вплив і компенсація втрат в сталі. Різними авторами пропонуються багато способів розв'язки контурів регулювання, але і даному разі все виконано в припущенні відсутності втрат в сталі.

Поряд з нехтуванням втратами в сталі в традиційній системі векторного керування формування потрібного моменту відбувається тільки за рахунок поперечної складової струму статора, яка є аналогом струму якоря в системі

керування двигуна постійного струму з незалежним збудженням. В свою чергу поздовжня складова струму статора підтримується на нульовому рівні. Таке рішення відрізняється своєю простотою і дозволяє забезпечити мінімальний струм статора. Причому, оскільки втрати в міді пропорційні струму статора, імовірно, повинна виконуватися і мінімізація втрат в міді. Такий спосіб регулювання не отримав спеціальної назви, але його можна вважати найпростішим і найпоширенішим алгоритмом оптимального керування СДПМ.

При підтримці поздовжньої складової на нульовому рівні все наведене справедливо лише в разі СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора, і відсутністю втрат в сталі. Якщо магніти встановлено всередині ротора можна збільшити результуючий момент за рахунок використання реактивної складової, обумовленою наявністю електромагнітної асиметрії. Для цього необхідно зменшувати подовжню складову в від'ємному напрямку. Така стратегія керування добре відома в літературі і отримала назву «Максимум моменту на ампер». Для реалізації даного способу керування пропонується використовувати попередньо розраховані табличні залежності між поздовжньою і поперечною складовими струму статора, які потім апроксимуються за допомогою ступеневих поліномів. Такий підхід відрізняється своєю простотою, однак у випадку зміни параметрів об'єкта регулювання не в змозі забезпечити бажаних результатів.. У даному випадку навіть при варіації параметрів існує можливість забезпечення бажаної стратегії керування, шляхом використання поточних значень, за умови їх ідентифікації. Однак при синтезі даної стратегії ні одним з авторів не враховувалися втрати в сталі, існуючі в реальній системі.

Внаслідок специфіки сфери застосування СДПМ до такої системи електроприводу часто висувається вимога роботи на швидкостях, що перевищують номінальну. У діапазоні високих частот переважну роль відіграють втрати в сталі. Тут доцільно використовувати стратегію керування «Максимум моменту на вольт» (ММВ), яка забезпечить максимум моменту при заданій напрузі або необхідний момент при мінімальній напрузі статора. Дана стратегія керування менш поширена в літературі зважаючи на специфіку області її

застосування. Зважаючи на те, що в результаті застосування даного алгоритму керування буде виконуватися мінімізація напруги статора, від якої залежать втрати в сталі, робиться припущення, що останні також будуть мінімальні, проте при отриманні ММВ втрати в сталі не враховувалися.

Найбільш ефективною, з точки зору енергозбереження, стратегією керування є стратегія «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ). Основною ідеєю алгоритму керування МСВ є мінімізація сумарних втрат, тобто втрат у міді і сталі двигуна, при забезпеченні заданого моменту двигуна. Найчастіше для знаходження залежностей між струмами статора, які дозволили б реалізувати дану стратегію, виконують попередні розрахунки або експериментальні вимірювання і отримані дані представляють у вигляді таблиць або апроксимують поліноміальними залежностями аналогічно ММА. Такий підхід відрізняється своєю простотою в плані реалізації, однак буде неприйнятний в разі зміни параметрів об'єкта регулювання.

Всі зазначені залежності для реалізації стратегій керування отримано для сталого режиму та без урахування існуючих фізичних обмежень на струм і напругу в електроприводі. Для коректної роботи системи в цілому необхідно забезпечити обмеження координат на допустимих рівнях. Для цього найбільш часто використовують обмеження завдань на координати, що регулюються. Однак у зв'язку з тим, що при цьому не враховувалися втрати в сталі, це призводить до неточності розрахунку допустимих рівнів, а, отже, і до виходу обмежуваних сигналів за допустимі межі в динамічних і статичних режимах. Отже, ці питання потребують доопрацювання.

Для реалізації тієї чи іншої стратегії необхідно знати значення параметрів СДПМ, більшість яких може бути отримано з паспортних даних двигуна. Однак робота реальної системи супроводжується варіаціями параметрів, які обумовлені зміною температури та/або навантаження. Тож актуальну інформацію можна отримати, використовуючи різні способи ідентифікації параметрів. У даній роботі робиться припущення про наявність достовірної інформації про об'єкт регулювання.

Основну частину втрат в СДПМ становлять втрати в міді, втрати в сталі та механічні втрати. Схематично перетворення потужності в СДПМ наведено на рис. 1.5.

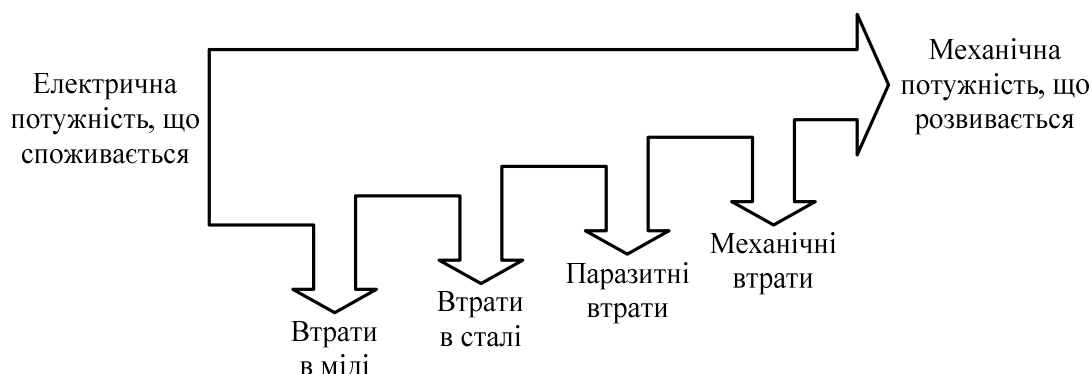


Рисунок 1.5. - Види втрат в СДПМ

Втрати в міді обумовлені активним опором обмотки статора та пропорційні квадрату повного струму статора. Внаслідок відсутності обмоток на роторі, даний тип втрат характерний тільки для статора.

Втрати в сталі обумовлені наявністю вихрових струмів і магнітного гистерезиса. Втрати в сталі залежать від швидкості та напруги, яка підводиться до статора двигуна. Даний тип втрат переважає в діапазоні високих швидкостей.

Механічні втрати визначаються тертям в підшипниках і опором повітря. Даний тип втрат залежить тільки від робочої швидкості, тобто на нього не можна вплинути засобами електропривода.

Іноді виділяють ще один тип втрат в СДПМ – так звані паразитні втрати, які обумовлені скін-ефектом і ефектом близькості. Дані втрати залежать від навантаження. В даній роботі зроблено припущення, що цей тип втрат зневажливо малий.

Отже, виходячи з аналізу літературних джерел, видно, що системи керування СДПМ потребують удосконалення, спрямованого на поліпшення енергетичних показників. Такого удосконалення можна досягти шляхом врахування втрат в сталі при синтезі системи векторного керування і стратегій оптимального керування, спрямованих на мінімізацію втрат в двигуні.

1.4. Математичний опис в системі координат dq з урахуванням втрат в сталі

Найбільш поширеним математичним описом синхронних двигунів з постійними магнітами є опис в ортогональній системі координат, орієнтованій за потоком ротора (d, q). Схеми заміщення за каналами d і q з урахуванням втрат в сталі наведено на рис. 1.6 [28].

Такі схеми заміщення відрізняються від загально прийнятих наявністю додаткового опору, моделюючого втрати в сталі. Введення цього опору паралельно потокоутворюючому контуру призводить до розділення проекцій струму статора на дві частини. Одна частина йде на створення потоку, а інша – на втрати в сталі.

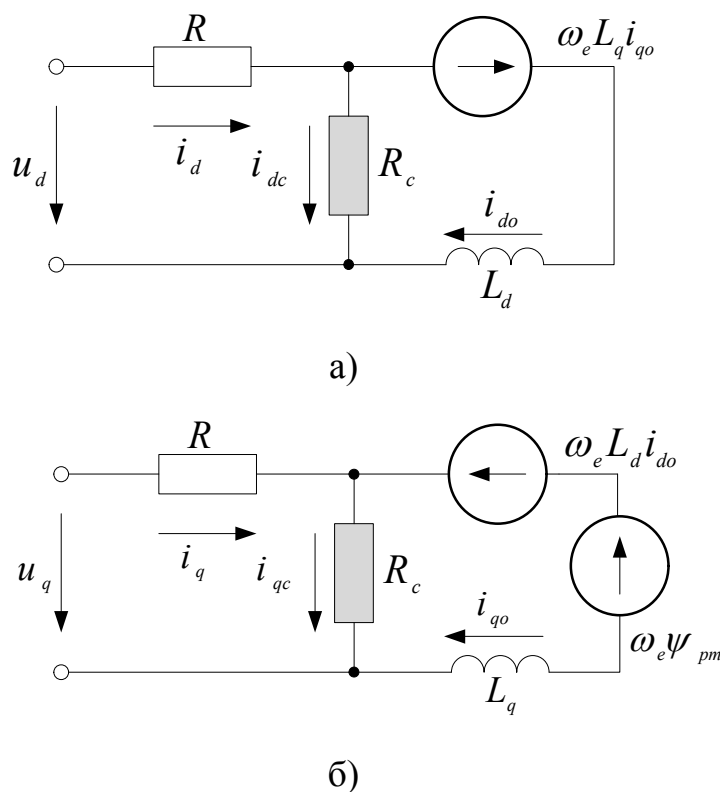


Рисунок 1.6. - Схема заміщення за каналами d (а) і q (б)

На цьому рисунку прийняті такі позначення:

u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і повного струму статора на осі d і q ; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; R, R_c – активний опір статора і опір, що характеризує втрати в сталі; i_{do}, i_{qo} – частини ортогональних складових

струму статора, які створюють магнітний потік; i_{dc}, i_{qc} – частини складових струму статора, які імітують втрати в сталі; $\omega_e = Z_p \omega$ – електрична кутова частота ротора; Z_p – кількість пар полюсів; ω – механічна кутова швидкість ротора; ψ_{pm} – потік постійних магнітів.

Математичний опис, отриманий за схемами заміщення, наведеними на рис. 1.6, має вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & -\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \\ \omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & R + pL_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix}; \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p \frac{L_d}{R_c} & -\frac{\omega_e L_q}{R_c} \\ \frac{\omega_e L_d}{R_c} & 1 + p \frac{L_q}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \psi_{pm}}{R_c} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

де p – оператор Лапласу; ψ_d, ψ_q – магнітний потік за каналами d і q , відповідно.

У загальному випадку вираз для електромагнітного моменту містить дві складові: момент від постійних магнітів та реактивний момент, і може бути записано у вигляді:

$$M = M_{nm} + M_p = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} + \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}, \quad (1.3)$$

де M – електромагнітний момент; M_{nm} , M_p – складові електромагнітного моменту зумовлені наявністю постійних магнітів і електромагнітною асиметрією, відповідно.

Швидкість ротора може бути знайдена з основного рівняння електроприводу:

$$Jp\omega = M - M_c, \quad (1.4)$$

де M_c – момент статичного опору; J – сумарний момент інерції двигуна та механізму.

Наведений вище математичний опис є найбільш загальним і відповідає синхронному двигуну з магнітами розташованими всередині ротора.

Окремими випадками такого математичного опису є рівняння, що відповідають синхронному двигуну з магнітами, встановленими на поверхні ротора, і синхронному реактивному двигуну (СРД). Так для СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора, характерна рівність індуктивностей за поздовжньою і поперечною осями: $L_d = L_q = L_s$. Дана особливість призводить до того, що в рівнянні моменту відсутня реактивна складова ($L_d - L_q = 0$), а момент пропорційний тільки частині поперечної складової струму статора i_{qo} .

Особливістю СРД є відсутність постійних магнітів на роторі ($\psi_{pm} = 0$), що призводить до наявності лише реактивної складової моменту.

Миттєві втрати в міді та сталі можуть бути описані наступними виразами:

$$\Delta P_{cu} = \frac{3}{2} R (i_d^2 + i_q^2) = \frac{3}{2} R \left[\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right)^2 \right]; \quad (1.5)$$

$$\Delta P_{fe} = \frac{3}{2} \frac{u_o^2}{R_c} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_e L_q i_{qo})^2}{R_c} + \frac{3}{2} \frac{(\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}))^2}{R_c}. \quad (1.6)$$

Як видно з (1.5), втрати в міді пропорційні квадрату повного струму статора. В свою чергу втрати в сталі пропорційні квадрату напруги намагнічуючого контуру та зворотно пропорційні величині еквівалентного опору R_c . Цей еквівалентний опір можна розглядати як опір з постійним значенням, але у загальному випадку, його величина залежить від робочої швидкості та може бути представлена в наступному вигляді:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{co}} + \frac{1}{L_c \omega_e}, \quad (1.7)$$

де R_{co} – складова, що відповідає за втрати від вихрових струмів;

L_c – складова, що відповідає за втрати на перемагнічування.

1.5. Аналіз системи полеорієнтованого керування при урахуванні втрат в сталі

На рис. 1.7 наведено функціональну схему традиційного варіанта системи векторного керування СДПМ.

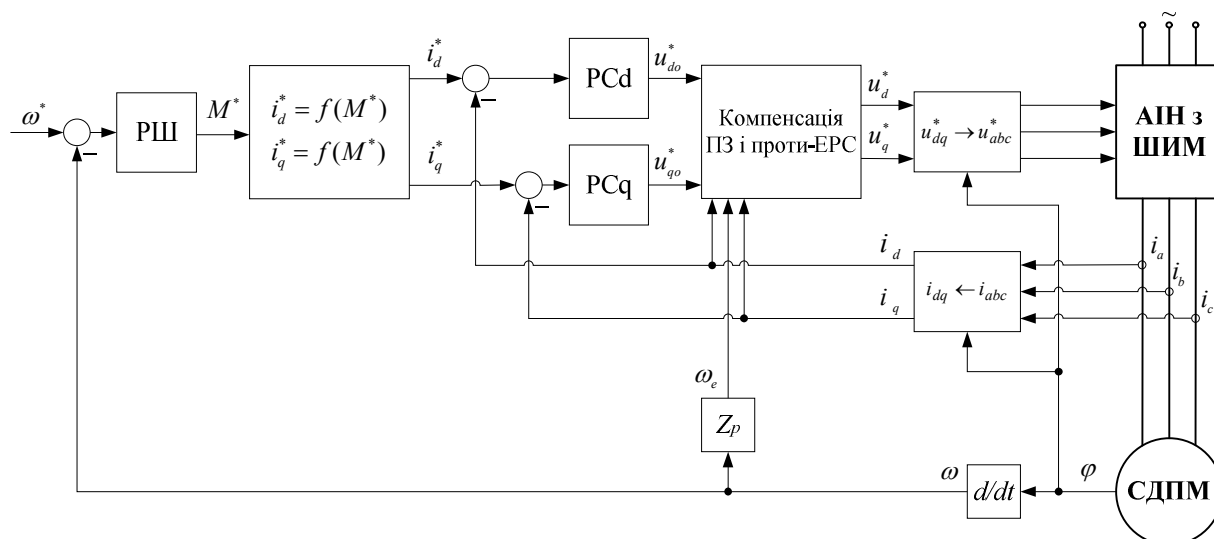


Рисунок 1.7. - Функціональна схема традиційної системи векторного керування СДПМ

Як відомо, для орієнтації системи керування необхідна інформація про кутове положення ротора двигуна в кожен момент часу. В даній роботі передбачається, що двигун матиме вбудований давач положення ротора, що є найбільш розповсюдженим рішенням в наш час. Значення кутового положення ротора використовується для виконання координатних перетворень ($abc-dq$ та $dq-abc$) і отримання сигналу кутової швидкості, який, в свою чергу, слугує для організації контуру регулювання швидкості та приймає участь у формуванні заданих значень струмів у відповідності до обраного алгоритму керування. В системі існують два канали регулювання складових струму статора. В якості регуляторів складових струму статора найбільше поширення отримали ПІ-регулятори, вихідні сигнали яких, після декомпозиції каналів і компенсації проти-ЕРС, являють собою завдання на автономний інвертор напруги (АІН). В якості способу керування АІН найчастіше використовується принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [21].

Завдання на складові струму статора в загальному випадку формуються виходячи зі значення потрібного електромагнітного моменту, яке може бути задано безпосередньо (системи, які керуються зусиллям) або бути виходом регулятора швидкості (системи регулювання швидкості), у відповідності до обраної стратегії керування. В даному розділі обрано найбільш просту та розповсюджену стратегію керування – підтримка поздовжньої складової струму статора на нульовому рівні ($i_d^* = 0$), чого достатньо для аналізу впливу втрат в сталі на систему векторного керування. В цьому випадку завдання на поперечну складову струму статора розраховується як:

$$i_q^* = \frac{M^*}{\frac{3}{2} Z_p \psi_{pm}}.$$

Використання інших стратегій керування детально розглянуто в наступному розділі.

Синтез традиційної системи керування засновано на спрощеній структурній схемі об'єкта керування, яку можна отримати з математичного опису (1.1), (1.4) при припущенні $R_c = \infty$ (рис. 1.8).

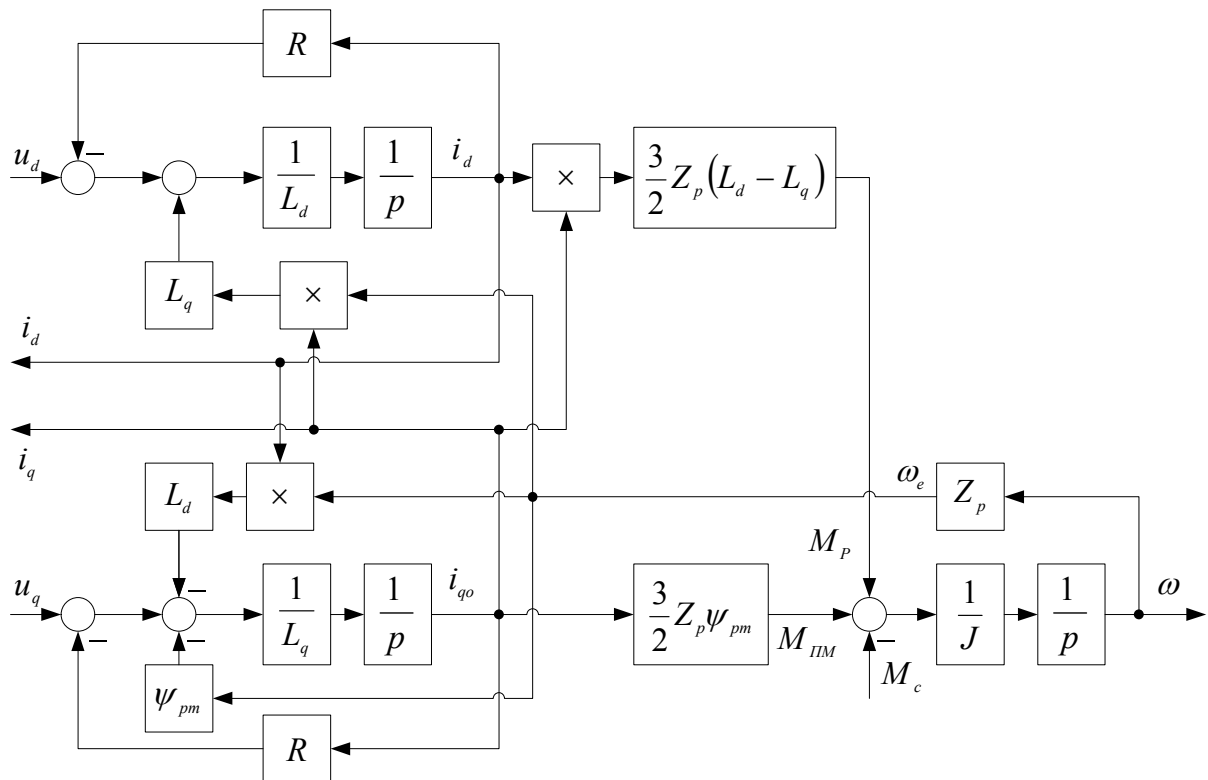


Рисунок 1.8. - Спрощена структурна схема СДПМ

Як можна побачити з рис. 1.8 між двома каналами керування існують перехресні зв'язки та зворотний зв'язок за проти-ЕРС. Синтез системи проводять без урахування цих збурень, вважаючи, що вони компенсуються. Найбільш поширеним способом компенсації є заведення цих сигналів з протилежним знаком на вхід перетворювача частоти. Отже вирази для компенсації мають вигляд

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{do} \\ u_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

За умови декомпозиції каналів регулювання та компенсації проти-ЕРС можна отримати незалежні контури регулювання поздовжньої та поперечної складових струму статора (рис. 1.9).

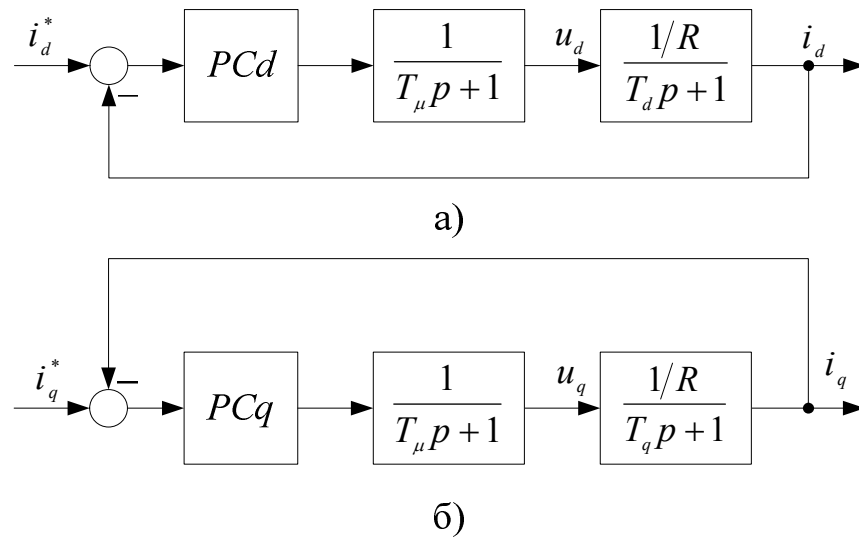


Рисунок 1.9. - Структурні схема контуру регулювання поздовжньої (а) і поперечної (б) складових струму статора

Регулятори струму доцільно приймати ПІ-типу. Передавальні функції будуть мати такий вигляд:

$$W_{PCd}(p) = \frac{T_d p + 1}{1/R \cdot T_i p}; \quad W_{PCq}(p) = \frac{T_q p + 1}{1/R \cdot T_i p},$$

де $T_\mu = 1/f_{\text{ШМ}}$ – мала стала часу, що не компенсується; $f_{\text{ШМ}}$ – частота комутації ШІМ; $T_i = 2T_\mu$ – стала часу контурів регулювання струму; $T_d = L_d/R$, $T_q = L_q/R$ – сталі часу за поздовжнім і поперечним каналами відповідно.

Передавальна функція регулятора швидкості П-типу, у випадку формування завдання на момент, має вигляд:

$$W_{PII}(p) = \frac{J}{T_{\omega}},$$

де $T_{\omega} = 2T_i = 4T_{\mu}$ – стала часу контуру регулювання швидкості.

Виконаємо аналіз системи електропривода методом математичного моделювання в додатку Simulink пакету Matlab [4, 5]. Для моделювання використовувався СДПМ з магнітами встановленими всередині ротора, основні параметри якого наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні параметри СДПМ

Параметр	Значення
Номінальна швидкість n_n , об/хв	4000
Номінальний момент M_n , Нм	1,8
Номінальний струм статора I_n , А	3,6
Сумарний момент інерції J , кгм ²	0,00045
Кількість пар полюсів	3
Активний опір фази статора R , Ом	2,21
Опір, що характеризує втрати в сталі R_c , Ом	640
Індуктивність за поздовжньою віссю L_d , мГн	9,77
Індуктивність за попередньою віссю L_q , мГн	14,94
Потік від постійних магнітів ψ_{pm} , Вб	0,0844

На рис. 1.10, 1.11 наведено перехідні процеси при відпрацюванні заданого моменту, рівного номінальному, у разі регулювання повних складових струму статора (традиційна система).

Як можна бачити з рис. 1.10 контури регулювання струмів забезпечують відпрацювання заданих значень з мінімальними похибками.

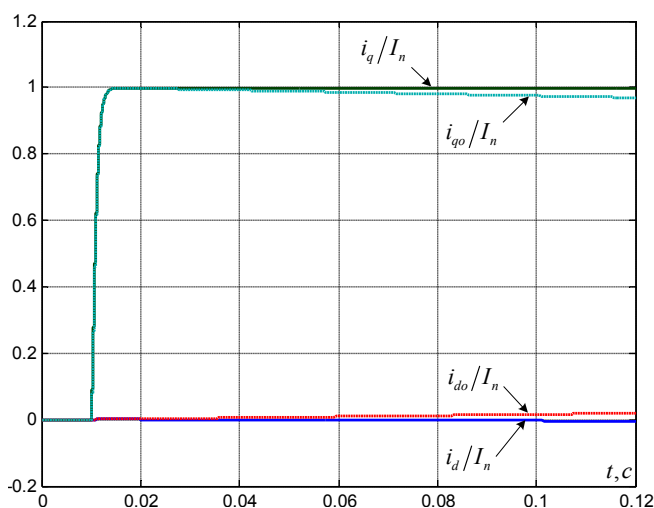


Рисунок 1.10. - Графіки складових струму статора при відпрацюванні заданого моменту в класичній системі

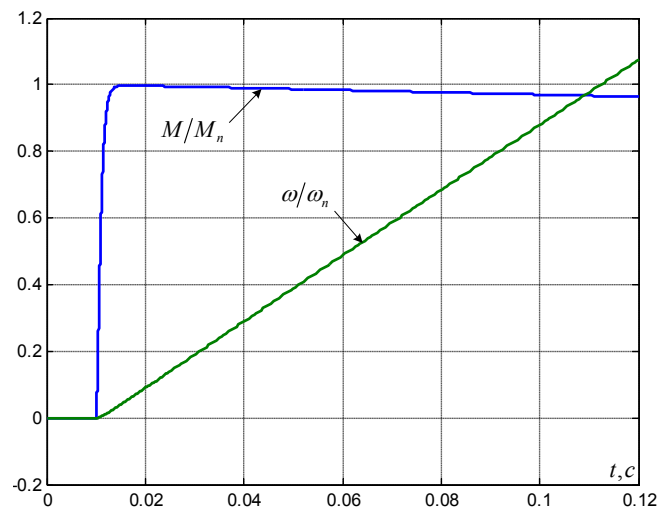


Рисунок 1.11. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості ротора при відпрацюванні заданого моменту в класичній системі

Однак електромагнітний момент не підтримується на заданому рівні (рис. 1.11), причому зі збільшенням швидкості похибка збільшується. Основним чинником, що зумовлює зменшення електромагнітного моменту, є те, що регулювання dq складових не є рівноцінним регулюванню dqo складових, які безпосередньо беруть участь у створенні моменту. Причому поряд зі зниженням поперечної складової струму (рис. 1.10), що на пряму призводить до зниження моменту, поздовжня складова збільшується в додатному напрямку, а це, в свою чергу, створює реактивну складову моменту, яка спрямована назустріч складовій електромагнітного моменту від постійних магнітів.

Отже виходячи з аналізу основних чинників виявленого недоліку більш доцільно перейти від керування повних складових струму статора до керування тільки їх частин, які безпосередньо приймають участь у створенні електромагнітного моменту.

1.6. Синтез удосконаленої системи векторного керування

На рис. 1.12 наведено функціональну схему удосконаленого варіанта системи векторного керування СДПМ.

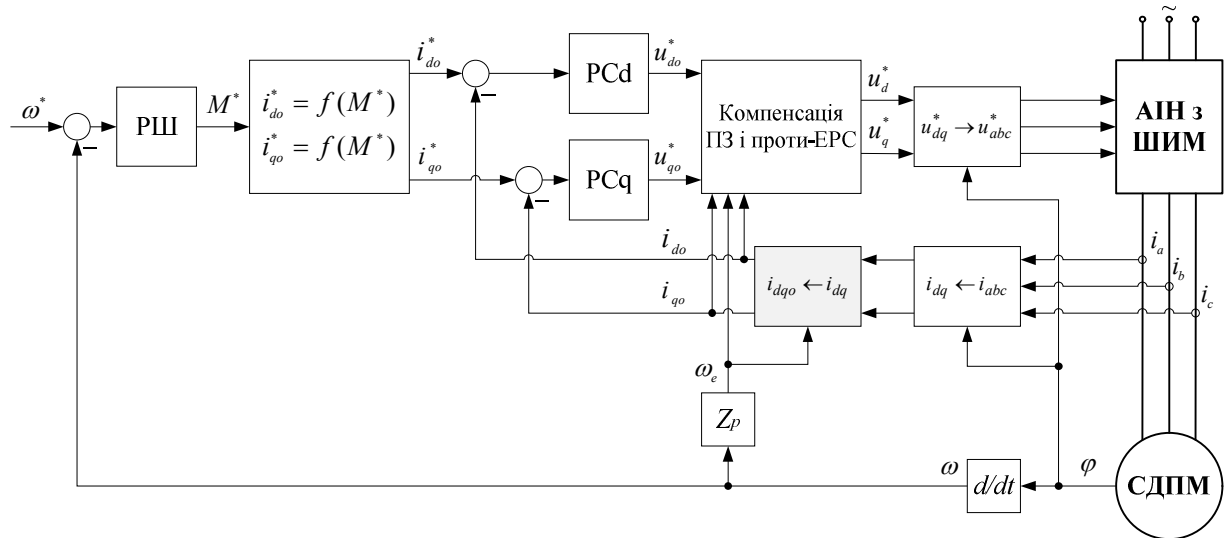


Рисунок 1.12. - Функціональна схема удосконаленої системи векторного керування СДПМ

Основною відмінністю запропонованої системи керування від класичної є те, що в якості внутрішніх контурів регулювання використовуються контури тільки тих частин складових струмів статора, що приймають участь у створенні магнітного потоку (i_{do}, i_{qo}). Аналогічно традиційній системі керування завдання на ці складові формується виходячи з потрібного моменту відповідно до обраної стратегії керування.

Для реалізації запропонованої системи необхідно знайти залежності між складовими струму статора (i_d, i_q) та їх частинами (i_{do}, i_{qo}), що дозволить організувати зворотні зв'язки та уточнити передаточні функції регуляторів струму у відповідності до об'єкта керування.

Структурна схема об'єкта керування (рис. 1.13) заснована на рівняннях (1.1)-(1.4). Основною відмінністю її від загальновідомої є присутність додаткових

коефіцієнтів R_c та $\frac{1}{R_c + R}$.

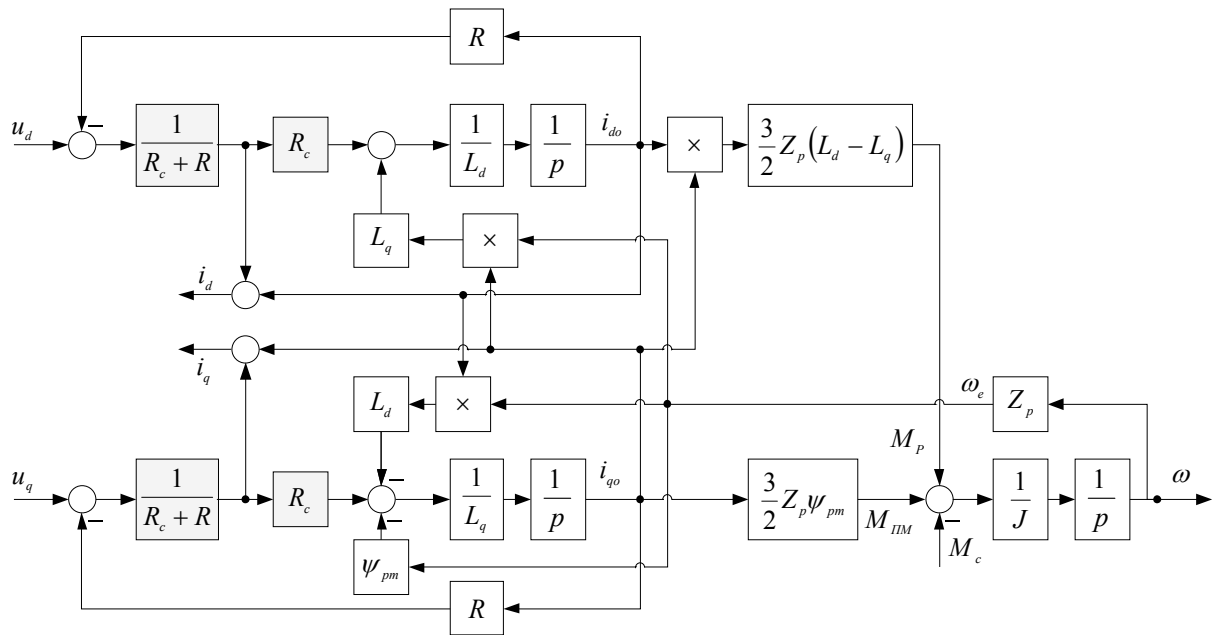


Рисунок 1.13. - Структурна схема об'єкта регулювання при врахуванні втрат в сталі

Перетворення i_{dq} на i_{dqo} виконується за рівняннями, які отримано з (2.2) для режиму статики:

$$\begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + L_d L_q (\omega_e / R_c)^2} \times \left(\begin{bmatrix} 1 & L_q \omega_e / R_c \\ -L_d \omega_e / R_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q \omega_e / R_c \\ 1 \end{bmatrix} \psi_{pm} \omega_e / R_c \right) \quad (1.9)$$

За умови компенсації перехресних зв'язків та проти-ЕРС можна отримати незалежні контури регулювання поздовжньої та поперечної складових струму статора (рис. 1.14).

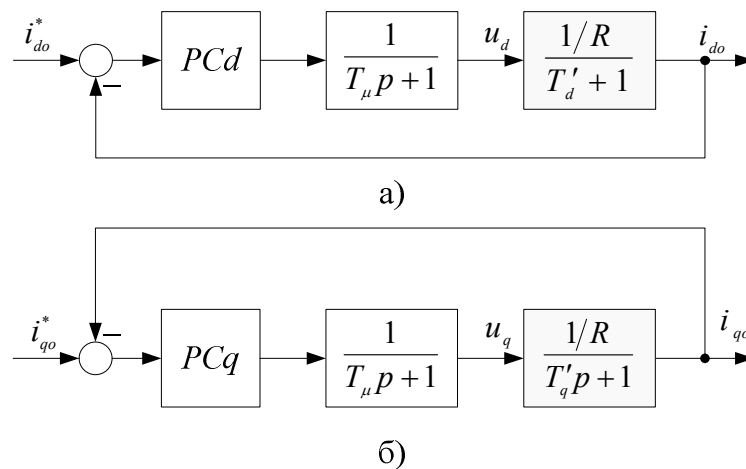


Рисунок 1.14. - Структурні схеми контурів регулювання частин поздовжньої (а) і поперечної (б) складових струму статора

В цьому разі передавальні функції регуляторів струму будуть мати такий вигляд:

$$W_{PCd}(p) = \frac{T'_d p + 1}{1/R \cdot T_i p}; \quad W_{PCq}(p) = \frac{T'_q p + 1}{1/R \cdot T_i p},$$

де $T_i = 2T_\mu$ – стала часу контурів регулювання, при настройці методом подвійних пропорцій,

$$T'_d = \frac{L_d}{R} \cdot \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) = T_d \cdot \left(1 + \frac{R}{R_c}\right), \quad T'_q = \frac{L_q}{R} \cdot \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) = T_q \cdot \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)$$

– уточнені сталі часу за поздовжнім і поперечним каналами.

Таким чином, видно, що урахування втрат в сталі, в порівнянні з класичною системою, призводить до необхідності корекції П-складової регуляторів частин складових струму статора на величину, що залежить від співвідношення активного опору статора та опору, що характеризує втрати в сталі.

Контур швидкості повністю ідентичний контуру швидкості в класичній системі.

У випадку урахування втрат в сталі компенсацію впливів перехресних зв'язків і проти-ЕРС необхідно виконувати за виразами, які отримано з рівняння (1.1).

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{do} \\ u_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e L_q (1 + R/R_c) \\ \omega_e L_d (1 + R/R_c) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} (1 + R/R_c) \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Порівняно з традиційним способом декомпозиції відповідно виразам (1.8) дані вирази відрізняються наявністю коефіцієнта $(1 + R/R_c)$ і використанням частин складових струму i_{do}, i_{qo} статора замість i_d, i_q .

На рис. 1.15, 1.16 наведено перехідні процеси при відпрацюванні заданого моменту, рівного номінальному, в удосконаленій системі векторного керування.

З рис. 1.15 видно, що контури регулювання струмів забезпечують підтримання саме тих складових, які беруть участь у створення електромагнітного моменту та не створюють зустрічно спрямований реактивний момент. В такій системі відпрацювання заданого моменту відбувається без похибки (рис. 1.16).

Як було показано раніше, урахування втрат в сталі призводить до необхідності корекції пропорційних коефіцієнтів регуляторів струму на величину, яка залежить від співвідношення активного опору обмотки статора до опору, що характеризує втрати в сталі. Але на практиці найчастіше це співвідношення велике і різниця в динаміці практично непомітна. Аналогічна ситуація складається і з компенсацією перехресних зв'язків і проти-ЕРС.

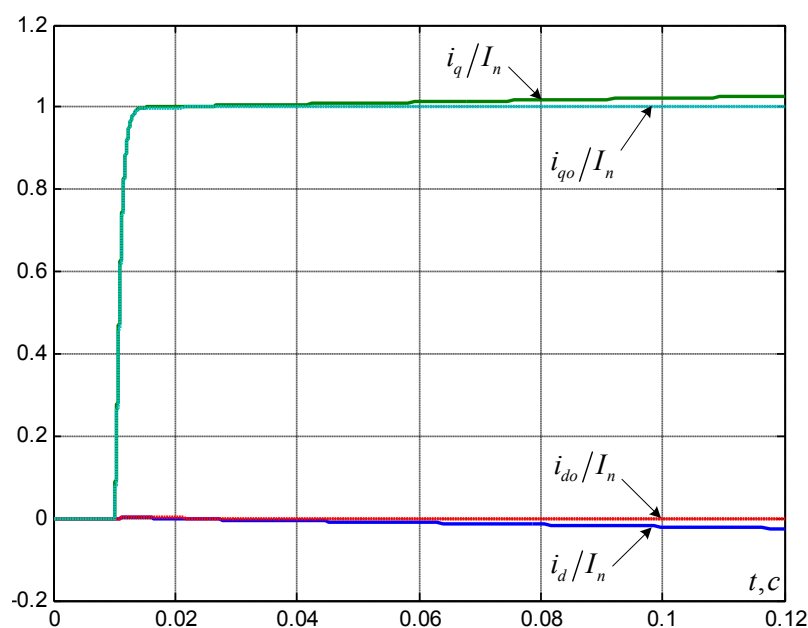


Рисунок 1.15. - Графіки складових струму статора при відпрацюванні заданого моменту в запропонованій системі

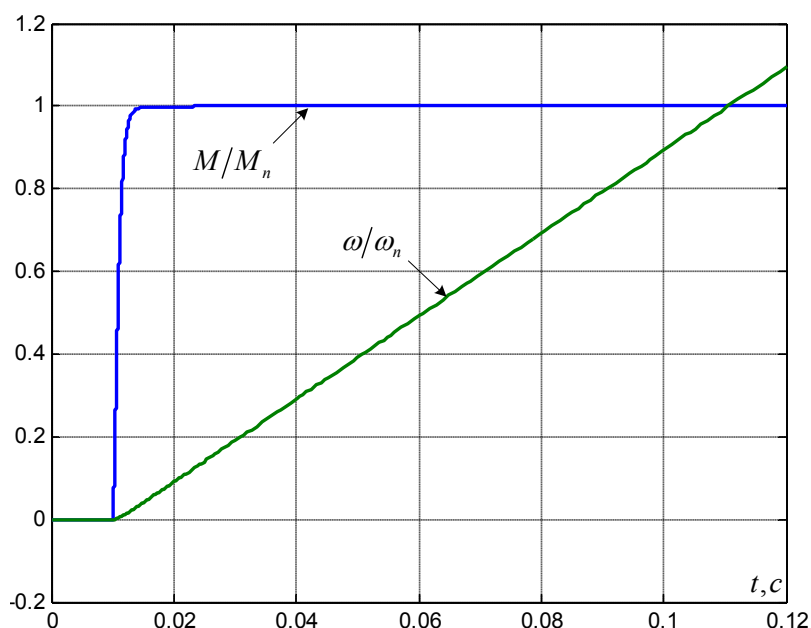


Рисунок 1.16. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості ротора при відпрацюванні заданого моменту в запропонованій системі

1.7. Порівняння традиційної та удосконаленої системи полеорієнтованого керування

Для оцінки ефективності запропонованого способу регулювання порівняно електромагнітні моменти в обох системах, що розглядаються (рис. 1.17).

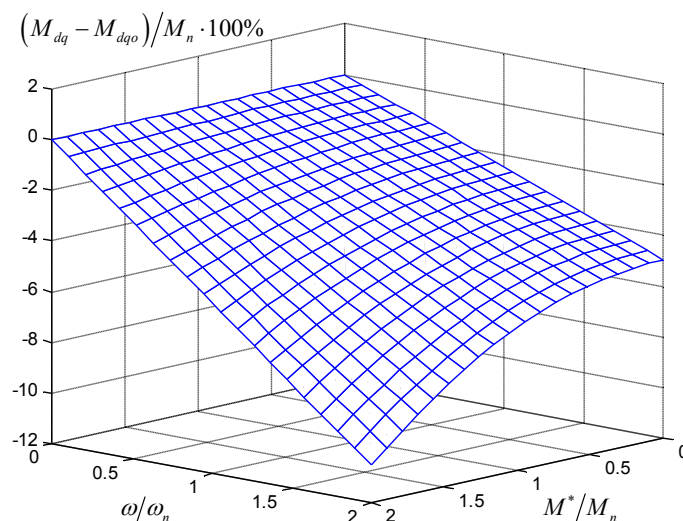


Рисунок 1.17. - Похибка відпрацювання заданого моменту при класичному способі регулювання

Залежність показує різницю між моментами, що розвиває СДПМ в класичній та запропонованій системах. Як видно з рис. 1.17 похибка відпрацювання електромагнітного моменту залежить від робочого режиму і збільшується, як зі збільшенням завдання, так і з ростом швидкості. Причому слід зазначити, що робоча швидкість в більшій мірі впливає на величину похибки.

Отже, в системах електроприводу, які вимагають керування моментом або працюють без задатчика інтенсивності (в режимі обмеження моменту), використання запропонованої системи дозволить підвищити точність регулювання моменту або скоротити час розгону та гальмування приводу.

У разі роботи електропривода від задатчика інтенсивності обидві системи забезпечать необхідний момент у всіх режимах роботи (рис. 1.18-1.21) за рахунок наявності регулятора швидкості, постійно працюючого на лінійній ділянці статичної характеристики.

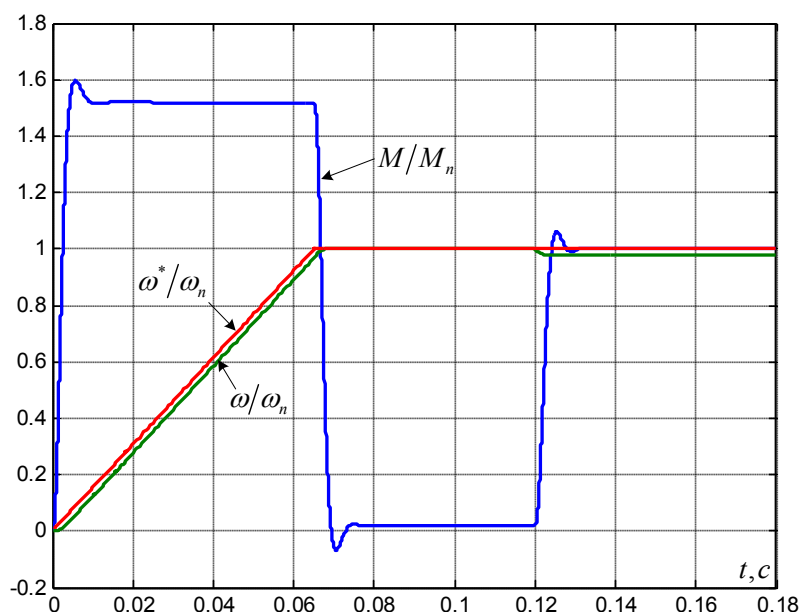


Рисунок 1.18. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості ротора при роботі від задатчика інтенсивності в класичній системі

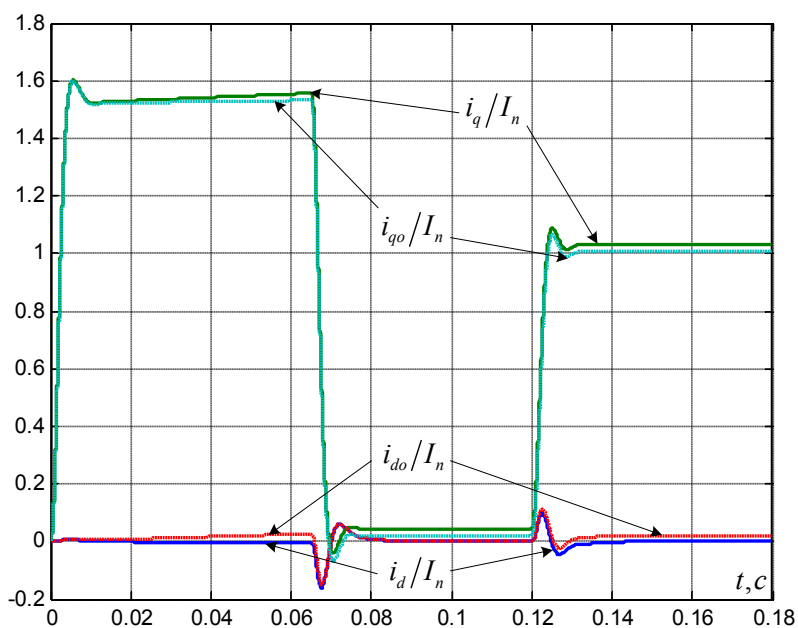


Рисунок 1.19. - Графіки складових струму статора при роботі від задатчика інтенсивності в класичній системі

Однак і в цьому випадку, регулювання струмів dq призведе до появи додатного струму i_{do} (рис. 1.19), який в свою чергу створить реактивний момент протилежно спрямований до моменту від постійних магнітів. В результаті підтримання електромагнітного моменту на заданому рівні буде проходити з підвищеним струмом, а відповідно і з підвищеними втратами в двигуні.

Робота в запропонованій системі (рис. 1.21) характеризується меншим струмом, внаслідок відсутності додатної складової поздовжньої компоненти струму статора, а, отже, і зустрічно направленою реактивного моменту.

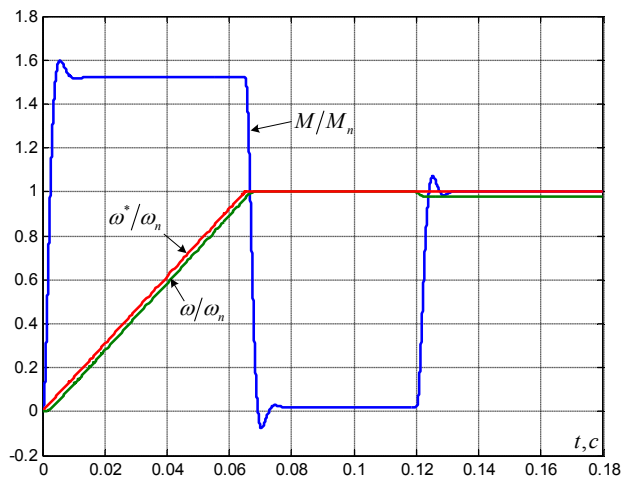


Рисунок 1.20. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості ротора при роботі від задатчика інтенсивності в запропонованій системі

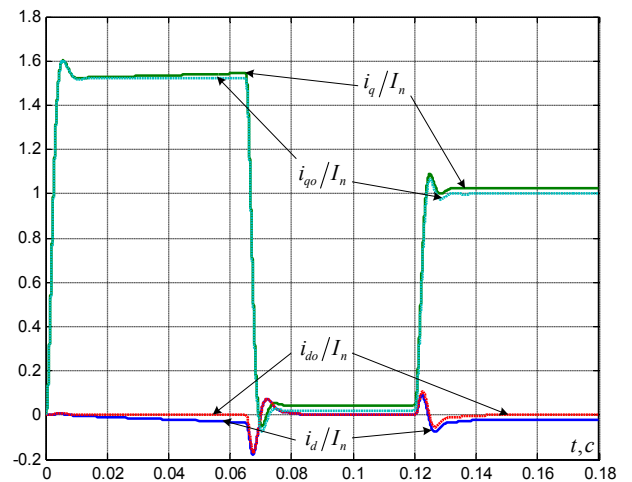


Рисунок 1.21. - Графіки складових струму статора при роботі від задатчика інтенсивності в запропонованій системі

Збільшення струму при забезпеченні бажаного моменту та швидкості в класичній системі призводить до збільшення всіх видів втрат в СДПМ (рис. 1.22).

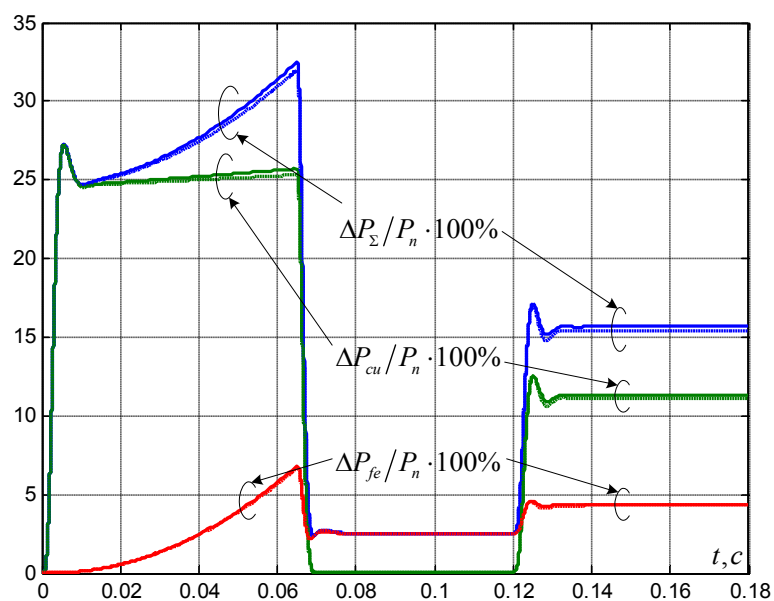


Рисунок 1.22. - Втрати в СДПМ при роботі від задатчика інтенсивності

На рис. 1.22 суцільною лінією показані втрати в класичній системі, пунктирною – втрати в запропонованій системі. Звідси видно, що перехід до регулювання моментоутворюючих частин складових струму статора дозволяє зменшити втрати в СДПМ, як в перехідних процесах, так і в статичному режимі. Наприклад, в номінальному режимі для двигуна, що розглядається, ефективність підвищується приблизно на 0,5%. Причому це зумовлено в більшій мірі за рахунок зменшення втрат в міді.

На рис. 1.23 наведена різниця між сумарними втратами в запропонованій та класичній системах.

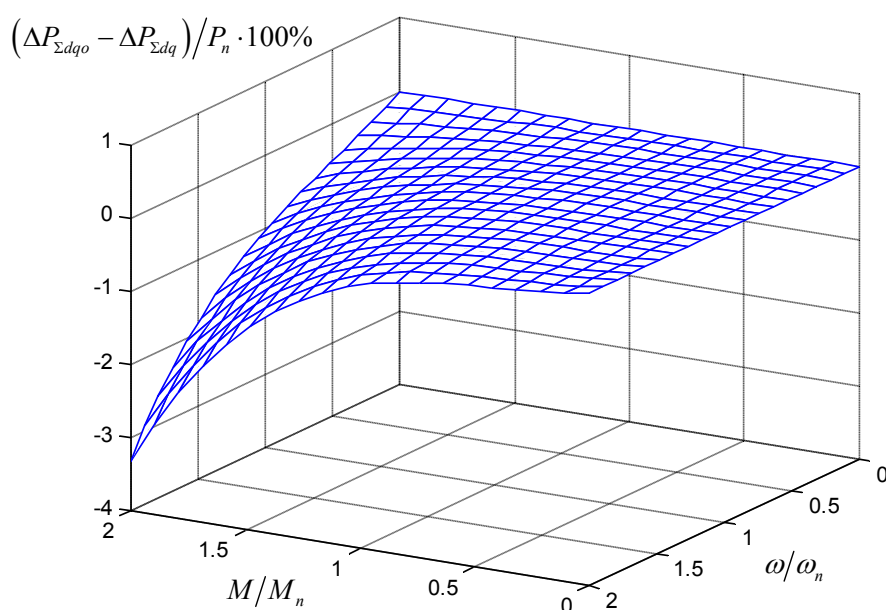


Рисунок 1.23. - Різниця сумарних втрат між запропонованою та класичною системами

Ефект від застосування запропонованої системи збільшується із зростанням робочої швидкості та навантаження СДПМ.

Висновки до розділу 1

При врахуванні втрат в сталі у створенні електромагнітного моменту беруть участь не повні складові струму статора, а тільки їх частини.

У випадку суттєвих втрат в сталі використання класичної системи векторного керування призводить до помилки відпрацювання бажаного електромагнітного моменту. Усунути цей недолік можливо за рахунок переходу від регулювання dq складових до регулювання складових dqo . Причому регулятори струму, декомпозиція каналів та компенсація проти-ЕРС у більшості випадків можуть бути залишені без змін.

При роботі від задатчика інтенсивності класична та удосконалена системи векторного керування забезпечують потрібний момент, однак в традиційному варіанті це пов'язано з підвищенням втрат в двигуні.

Результати моделювання показали, що застосування запропонованої системи дозволяє порівняно з класичною системою підвищити ефективність на (0,5-3)%.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

2.1. Загальний підхід до оптимального керування СДПМ

Оптимальним керуванням називається керування, що забезпечує досягнення найкращих, у сенсі обраного критерію, якісних показників системи в умовах заданих обмежень на керуючі впливи та змінні стану.

В якості критерію оптимальності в загальному випадку може бути обрано будь-який показник. Однак в наш час найбільший інтерес являє необхідність мінімізації втрат електроенергії. Отже в якості критерію оптимальності доцільно обирати саме мінімізацію втрат потужності в двигуні, що дозволить покращити енергетичні показники системи електроприводу. Важливим фактором є те, що мінімізація втрат без урахування вимог до системи призводить до рішень, які не можуть бути реалізовані. Наприклад, мінімізація втрат енергії без урахування вимог щодо швидкодії призводить до нескінченно довгих перехідних процесів. Або для мінімізації втрат в усталеному режимі двигун не повинен працювати взагалі. Тобто певні вимоги представляють собою обмеження при досягненні бажаного показника оптимальності (екстремуму цільової функції).

У загальному випадку знаходження екстремуму функції при заданих обмеженнях може бути виконане будь-яким відомим методом. В даному випадку застосовується метод множників Лагранжа. При цьому процедура має наступну послідовність.

Розглянемо неперервну скалярну функцію n змінних

$$y = f(\mathbf{x}) \quad (2.1)$$

та додаткову умову, яка задана у вигляді неявної гладкої функції

$$g(\mathbf{x}) = 0, \quad (2.2)$$

де $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$.

Вираз $g(\mathbf{x})$ визначає гіперповерхню S і є умовою, що обмежує можливі рішення задачі пошуку точок екстремуму функції $f(\mathbf{x})$.

Задача знаходження умовного екстремуму (мінімуму або максимуму) функції $y = f(\mathbf{x})$ полягає у визначенні найбільшого або найменшого значення $y = y^*$, яке відповідає обмеженню, тобто

$$y^* = \min_{\mathbf{x} \in S} f(\mathbf{x}),$$

а також аргументу $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$, при якому має місце це значення, тобто

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x} \in S} f(\mathbf{x}).$$

Введемо функцію Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) + \lambda g(\mathbf{x}), \quad (2.3)$$

де λ – постійний коефіцієнт, який називається множником Лагранжа.

Нехай функція $f(\mathbf{x})$ диференціюється в точці $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$. Тоді, якщо ця точка являє умовний локальний екстремум функції $f(\mathbf{x})$, то знайдеться значення $\lambda = \lambda^*$ таке, що точка $(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$ являється стаціонарною точкою функції Лагранжа $L(\mathbf{x}, \lambda)$.

Після знаходження частинних похідних функції Лагранжа отримаємо

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \lambda \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = g(\mathbf{x}) = 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Отримана система $n+1$ рівнянь використовується для знаходження значень $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ та λ , які відповідають шуканій стаціонарній точці.

Виходячи з виразу електромагнітного моменту СДПМ (1.3), останній визначається частинами двох складових струму статора. Отже, одне і те ж значення може бути отримано з різних їх комбінацій. Тому i_{do} та i_{qo} можуть бути вибрані у такій спосіб, щоб поряд із забезпеченням необхідного електромагнітного моменту досягалося виконання ще й критерію оптимальності. У цьому випадку буде досягнута однозначність, тобто тільки одна пара значень частин проекцій струму статора забезпечить водночас формування необхідного

електромагнітного моменту та виконання обраного критерію оптимальності. При чому, вважаючи на те, що i_{qo} приймає участь в створенні складової від постійних магнітів та реактивної складової електромагнітного моменту (див. (1.3)), то потрібне значення останнього доцільно забезпечувати саме за її рахунок. В цьому випадку досягнення критерію оптимальності буде виконуватись шляхом зміни частини поздовжньої складової струму статора, а необхідне значення електромагнітного моменту є обмежуючою умовою при знаходженні екстремуму цільової функції.

При виборі цільової функції, мінімізація якої забезпечила би підвищення енергоефективності електроприводів, можна виділити два підходи: непряма та пряма мінімізація втрат в СДПМ.

Непрямий підхід забезпечує мінімізацію значення певної змінної системи, від якої залежить той чи інший тип втрат. При цьому робиться припущення про те, що досягнення мінімуму цієї змінної одночасно забезпечує і мінімізацію певного типу втрат. Наприклад, відомо, що втрати в міді (1.5) пропорційні квадрату повного струму статора (стратегія керування «Максимум моменту на ампер»), тоді його мінімізація повинна привести до мінімізації цих втрат. Аналогічно і з втратами в сталі (1.6), які залежать від квадрату напруги, що підводиться до статора («Максимум моменту на вольт»). Дані алгоритми керування набули великого поширення, однак при їх синтезі не враховувались втрати в сталі. Також, як буде показано далі, не завжди мінімізація певного сигналу призводить до мінімізації відповідного типу втрат.

Прямий підхід полягає в тому, що в якості цільової функції обираються безпосередньо вирази, що характеризують відповідні складові сумарних втрат. Однак у випадку мінімізації складових втрат («Мінімум втрат в міді», «Мінімум втрат в сталі»), використання тієї чи іншої стратегії в основному пов'язано з певними режимами роботи, а саме – діапазоном регулювання швидкості. Більший інтерес представляє мінімізація саме сумарних втрат («Мінімум сумарних втрат»), що дозволить забезпечити найбільшу ефективність системи.

На основі математичного опису СДПМ (1.1), (1.2) проведено аналіз цільових функцій в залежності від поздовжньої складової та робочої швидкості (рис. 2.1-2.5) для досліджуваного двигуна. Отримані графіки, показали, що дійсно кожна цільова функція має виражений мінімум, який може бути досягнуто за рахунок вибору необхідного значення i_{do} .

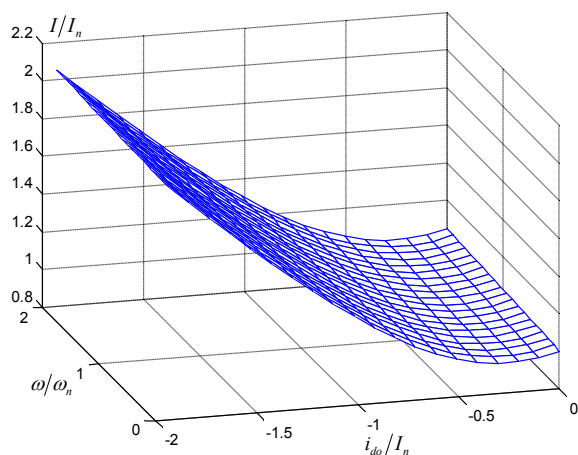


Рисунок 2.1. - Залежність повного струму статора від швидкості та моментотворюючої частини поздовжньої складової струму статора

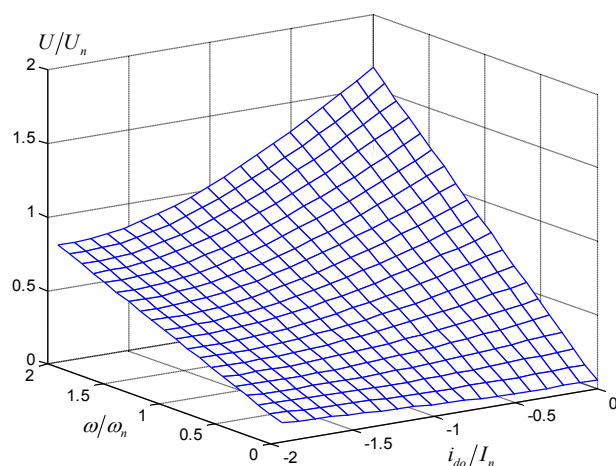


Рисунок 2.2. - Залежність напруги статора від швидкості та моментотворюючої частини поздовжньої складової струму статора

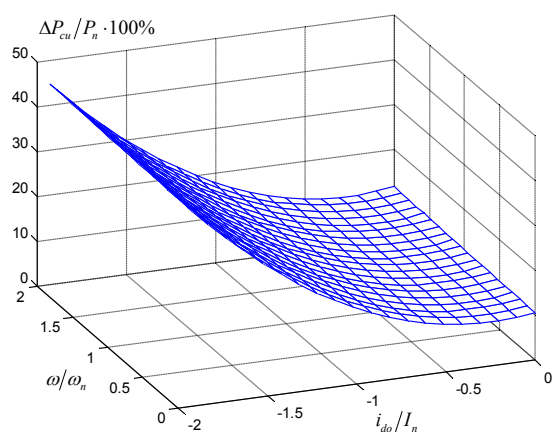


Рисунок 2.3. - Залежність втрат в міді від швидкості та моментотворюючої частини поздовжньої складової струму статора

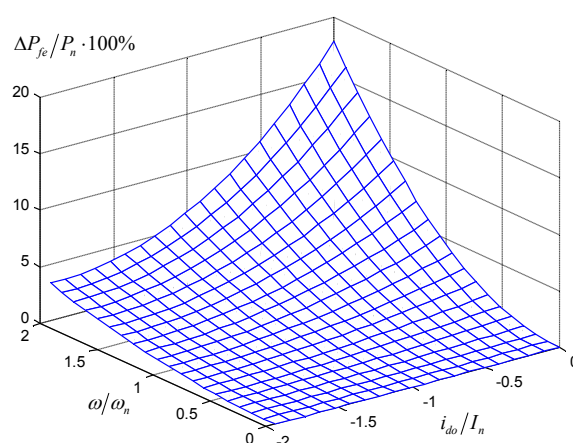


Рисунок 2.4. - Залежність втрат в сталі від швидкості та моментотворюючої частини поздовжньої складової струму статора

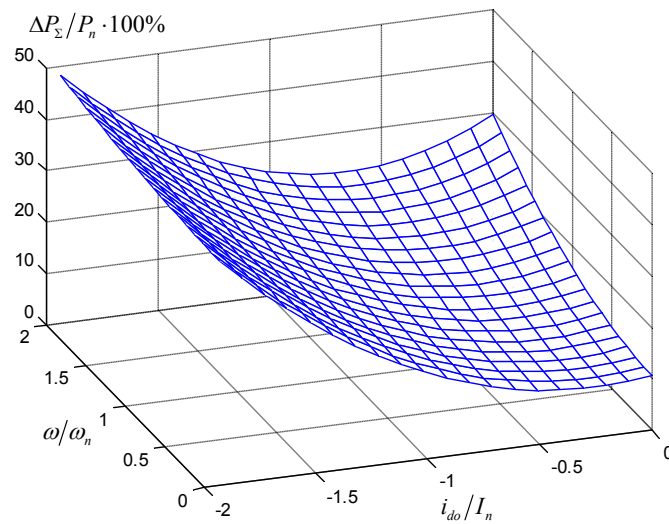


Рисунок 2.5. - Залежність сумарних втрат від швидкості і моментотворюючої частини поздовжньої складової струму статора

Слід зазначити, що при врахування втрат в сталі, мінімум сумарних втрат не збігається з мінімумом струму статора. Проте для цього конкретного двигуна більшу частку сумарних втрат складають саме втрати в міді, що позначається на близькості зазначених екстремумів.

2.2. Синтез стратегій оптимального керування СДПМ

Метою методу керування «Максимальний момент на ампер» (ММА) є забезпечення максимального електромагнітного моменту при заданому струмі або мінімального значення струму при заданому моменті. Відповідно до другого із перелічених формулювань задачі необхідно знайти мінімум скалярної функції (2.1), яка в даному випадку відповідає виразу повного струму статора

$$I(i_{do}, i_{qo}) = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c}\right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c}\right)^2}, \quad (2.5)$$

при виконанні додаткової умови (2.2) – забезпечення бажаного моменту, згідно (1.3).

В даному випадку функція Лагранжа (2.3) має вигляд:

$$L(i_{do}, i_{qo}, \lambda) = \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right)^2 + \\ + \lambda \left(M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \right).$$

Система рівнянь (2.4) набуває наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial i_{do}} = 2 \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right) + 2 \frac{\omega_e L_d}{R_c} \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right) - \\ - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{qo} \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial i_{qo}} = 2 \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right) - 2 \frac{\omega_e L_d}{R_c} \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right) - \\ - \frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do}) \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} = 0. \end{array} \right.$$

Вирішивши дану систему, отримуємо залежність між частинами складових струму статора, що забезпечить стратегію керування ММА

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \\ - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2 + i_{qo}^2 \frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2}}. \quad (2.6)$$

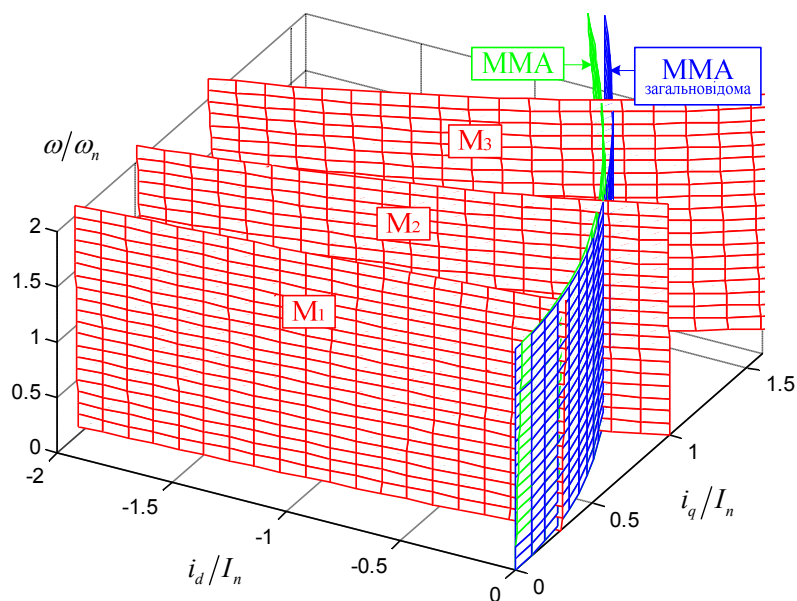
Якщо прийняти, що втрати в сталі відсутні ($R_c = \infty$), то весь струм йде на створення магнітного потоку. В цьому випадку отримаємо загальновідомий вираз для ММА, який є частинним випадком (2.6):

$$i_d = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2}.$$

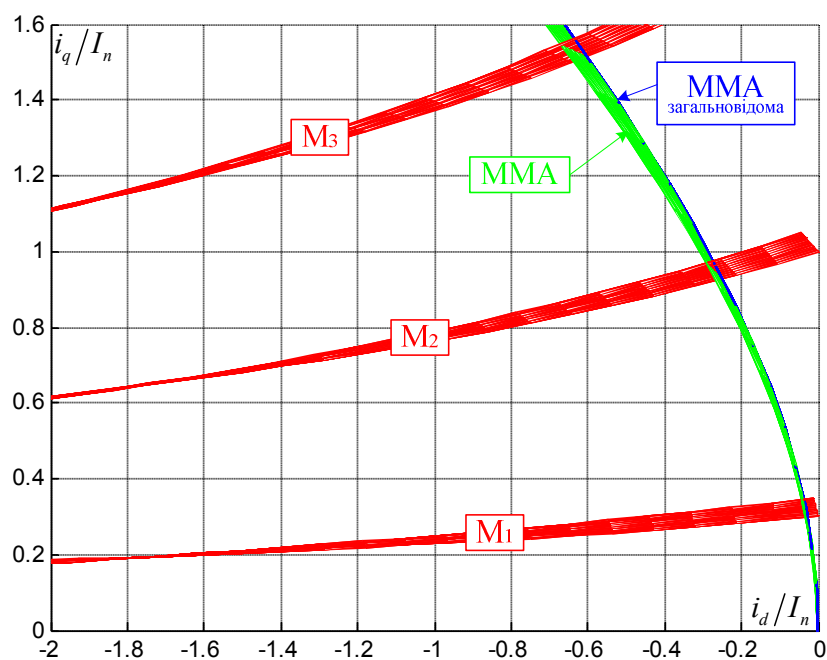
Даний вираз відповідає СДПМ з магнітами встановленими всередині ротора. У випадку магнітів, які встановлені на поверхні ротора, останнє рівняння приймає форму, яка відповідає найпростішому алгоритму керування

$$i_d = 0.$$

На рис. 2.6 графічно зображено поверхні регулювання, які відповідають стратегії керування ММА, та поверхні рівних моментів СДПМ ($M_1 < M_2 < M_3$).



а)



б)

Рисунок 2.6. - Поверхні керування ММА (а) та їх проекції на струмову площину (б)

З рис. 2.6 можна бачити, що в загальному випадку співвідношення між струмами, яке визначає стратегію керування ММА, залежить від швидкості. Зі збільшенням робочої швидкості поздовжня складова струму статора збільшується в від'ємному напрямку. У цьому полягає основна відмінність від відомого алгоритму, отриманого без урахування втрат в сталі. Також слід відмітити, що наявність втрат в сталі призводить до аналогічної залежності поверхонь електромагнітного моменту від робочої швидкості.

Метод керування ММА отримав найбільше використання в діапазоні швидкостей, нижчих за номінальну. Це пов'язано з тим, що в цьому діапазоні привалюють втрати в міді, які залежать від квадрату повного струму статора, мінімізацію якого забезпечує алгоритм керування, що розглядається.

Метою методу керування «Максимальний момент на вольт» (ММВ) є забезпечення максимального електромагнітного моменту при заданій напрузі або мінімального значення напруги при заданому моменті.

В цьому випадку скалярна функція (2.1), яка потребує мінімізації відповідає повній напрузі статора

$$U(i_{do}, i_{qo}) = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = \sqrt{\left(Ri_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2 + \left(Ri_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2}. \quad (2.7)$$

Аналогічно ММА, додатковою умовою (2.2) є забезпечення бажаного моменту, згідно (1.3).

В цьому випадку функція Лагранжа (2.3) має вигляд:

$$L(i_{do}, i_{qo}, \lambda) = \left(Ri_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2 + \left(Ri_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c}\right)\right)^2 + \lambda \left(M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}\right).$$

Система рівнянь (2.4) приймає вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial i_{do}} &= 2R \left(Ri_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right) + \\ &\quad + 2\omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \left(Ri_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right) - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{qo} \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial i_{qo}} &= 2R \left(Ri_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right) - \\ &\quad - 2\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \left(Ri_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right) - \frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do}) \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} = 0. \end{aligned} \right.$$

Із даної системи, отримано залежність між складовими струму статора, виконання якої забезпечить стратегію керування ММВ

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \frac{\left(\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_d L_q \right)^2}{\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_d^2} + i_{qo}^2 \frac{\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_q^2}{\left(\frac{R_c R}{R_c + R} \right)^2 + \omega_e^2 L_d^2}}. \quad (2.8)$$

Аналогічно ММА, в разі нехтування у виразі (3.4) втратами в сталі, отримуємо

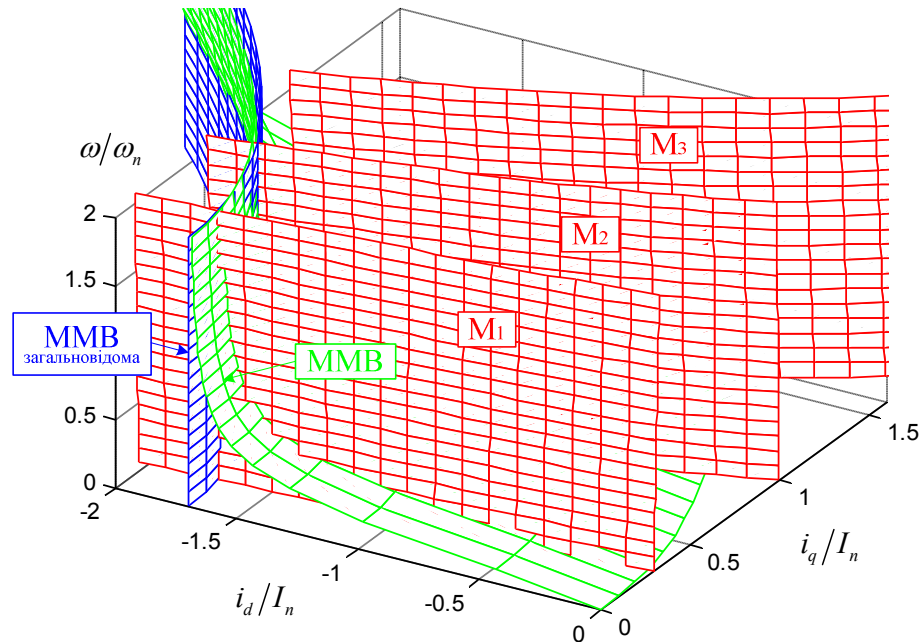
$$i_d = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{L_q}{L_d} \right) - \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2}.$$

Останній вираз являє собою більш зручну форму загальновідомих рівнянь, які забезпечують ММВ:

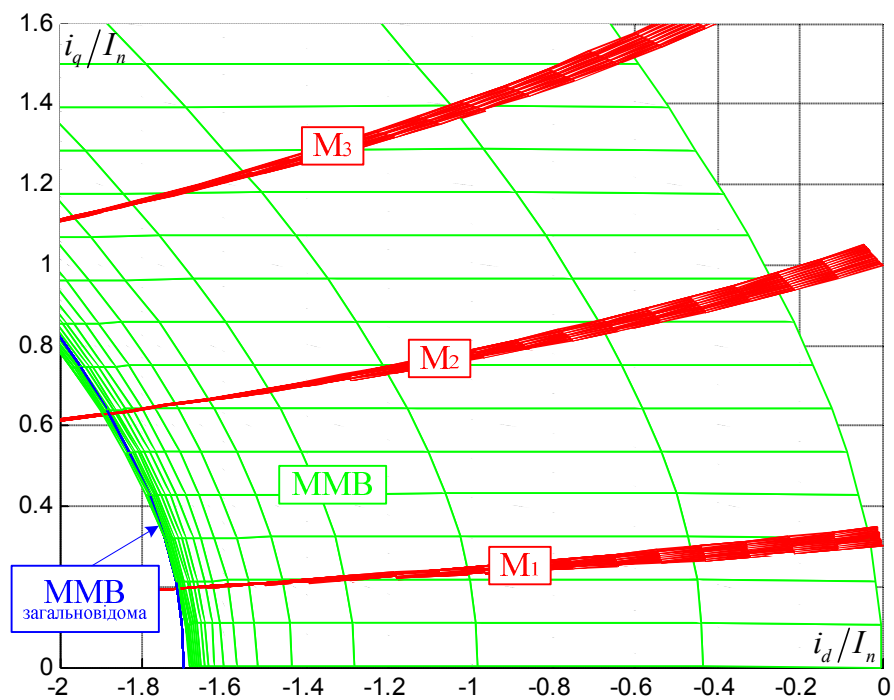
$$i_d = -\frac{\psi_{pm} + \Delta \psi_d}{L_d}; \quad i_q = \frac{\sqrt{\psi_o^2 - \Delta \psi_d^2}}{L_q};$$

$$\Delta\psi_d = \frac{L_q\psi_{pm} - \sqrt{(L_q\psi_{pm})^2 + 8(L_d - L_q)^2\psi_o^2}}{L_q}; \quad \psi_o = \sqrt{(L_di_d + \psi_{pm})^2 + (L_qi_q)^2}.$$

На рис. 2.7 зображено поверхні регулювання, що відповідають стратегіям керування ММВ.



а)



б)

Рисунок 2.7. - Поверхні керування ММВ (а) та їх проекції на струмову площину

(б)

Для ММВ за умови врахування втрат в сталі, в порівнянні з класичним алгоритмом, спостерігається яскраво виражена залежність від робочої швидкості, при низьких значеннях останньої.

Також з рис. 2.7 можна побачити, що робота на поверхні ММВ в широкому діапазоні швидкості можлива тільки при невеликих значеннях електромагнітного моменту.

Дана стратегія керування отримала найбільше розповсюдження в діапазоні швидкостей, значно вищих за номінальну. Це може бути пов'язано з тим, що в цьому випадку основним обмеженням є напруга статора. Таким чином, чим менше робоча напруга тим більшої швидкості можливо досягти.

Також в цьому діапазоні швидкостей втрати в міді значно менші за втрати в сталі, величина яких пропорційна квадрату напруги.

Як зазначалося раніше мінімізація струму статора повинна забезпечувати мінімум втрат в міді. Для перевірки цього твердження синтезовано алгоритм керування, який безпосередньо дозволяє мінімізувати цю складову сумарних втрат.

Метою методу керування «Мінімізація втрат в міді» (МВМ) є забезпечення мінімальних втрат в міді при заданому моменті. У відповідності з цим необхідно знайти мінімум скалярної функції (2.1), яка в даному випадку відповідає втратам в міді (1.5) при забезпеченні бажаного моменту, згідно (1.3), що представляє собою додаткову умову (2.2).

В даному випадку функція Лагранжа (2.3) матиме вигляд:

$$L(i_{do}, i_{qo}, \lambda) = \frac{3}{2} R \left(\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right)^2 \right) + \\ + \lambda \left(M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \right).$$

Відповідно (2.4), отримаємо наступну систему рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial i_{do}} &= 3R \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right) + 3 \frac{\omega_e}{R_c} R L_d \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right) - \\ &\quad - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{qo} \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial i_{qo}} &= 3R \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right) - 3 \frac{\omega_e}{R_c} R L_d \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right) - \\ &\quad - \frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do}) \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} = 0. \end{aligned} \right.$$

Вирішивши дану систему, знаходимо, залежність між складовими струму статора, яка дозволить реалізувати стратегію керування MBM

$$\begin{aligned} i_{do} &= -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \\ &\quad - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2 + i_{qo}^2 \frac{R_c^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_c^2 + \omega_e^2 L_d^2}}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Як можна бачити з виразів (2.6) та (2.9), стратегіям MMA та MBM відповідають однакові залежності між частинами поздовжньої та поперечної складових струмів, що дозволяє підтвердити твердження про їх ідентичність.

Аналогічно MBM, для перевірки припущення мінімізації втрат в сталі при використанні стратегії керування MMB синтезовано алгоритм, який забезпечує мінімізацію цього типу втрат безпосередньо.

Отже метою стратегії керування «Мінімізація втрат в сталі» (MBC) є забезпечення мінімальних втрат в сталі при заданому моменті. У відповідності з цим необхідно знайти мінімум скалярної функції (2.1), яка в даному випадку відповідає втратам в сталі (1.6) при забезпеченні бажаного моменту, згідно (1.3), що представляє собою додаткову умову (2.2).

Функція Лагранжа (2.3) матиме вигляд:

$$L(i_{do}, i_{qo}, \lambda) = \frac{3}{2} \frac{(\omega_e L_q i_{qo})^2}{R_c} + \frac{3}{2} \frac{(\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}))^2}{R_c} + \\ + \lambda \left(M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \right)$$

Таким чином, система рівнянь (2.4) має вигляд

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial i_{do}} = 3 \frac{\omega_e^2 L_d (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{qo} \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial i_{qo}} = 3 \frac{\omega_e^2 L_q^2 i_{qo}}{R_c} - \frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do}) \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} = 0. \end{cases}$$

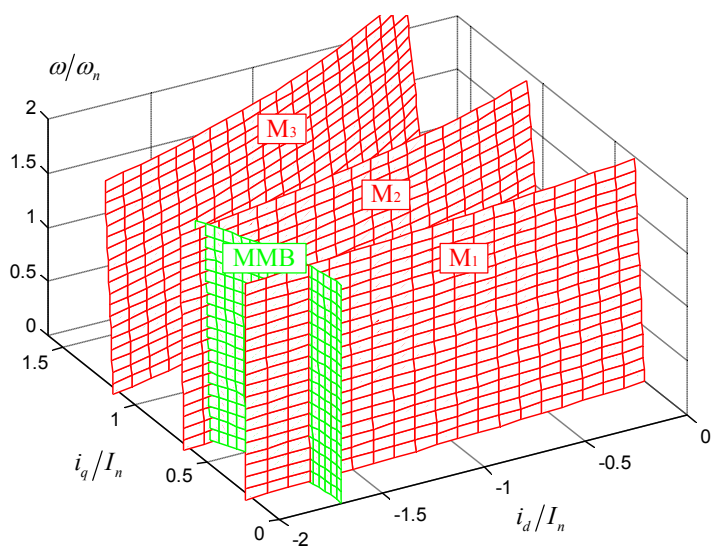
Вирішивши дану систему, отримуємо залежність між струмами статора для реалізації стратегії керування МВС

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{L_q}{L_d} \right) - \frac{L_q}{L_d} \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_{qo}^2}. \quad (2.10)$$

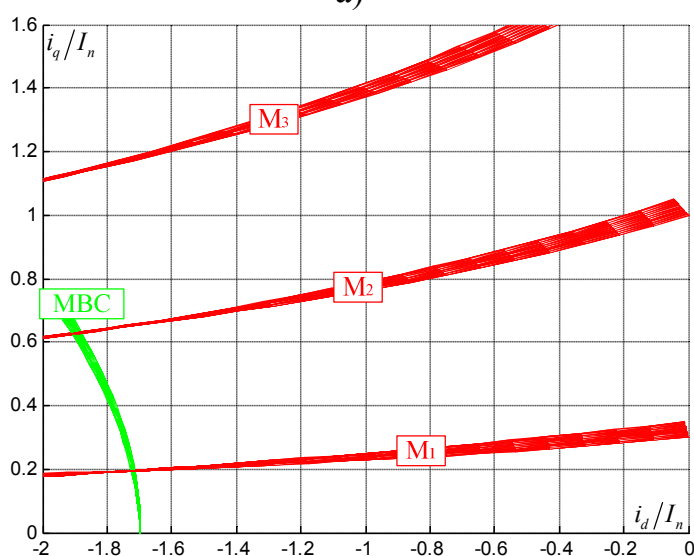
Як можна бачити з (2.8) та (2.10) в загальному випадку ММВ та МВС це різні алгоритми керування. Однак вираз (2.10) ідентичний до спрощеного варіанту стратегії керування ММВ (при нехтуванні втратами в сталі). Відмінність полягає у складових струму статора, які використовуються в залежностях, що розглядаються.

На рис. 2.8 графічно зображено поверхню регулювання, що відповідає стратегії керування МВС.

З рис. 2.8 можна бачити, що співвідношення між струмами, що визначається алгоритмом керування МВС також залежить від швидкості і починається не з початку координат, а з точки $i_d = -\psi_{pm}/L_d$. Як впливає з рис. 2.7 та рис. 2.8, зі збільшенням швидкості стратегії керування ММВ і МВС зближуються.



а)



б)

Рисунок 2.8. - Поверхня керування МВС (а) та її проекція на струмову площину (б)

Отримані алгоритми керування для мінімізації втрат в міді та втрат в сталі дозволяють оптимізувати роботу електроприводу у разі виконання певних умов щодо режимів роботи СДПМ. Однак при широкому діапазоні регулювання швидкості потрібно використовувати обидві стратегії керування, що дозволить вагомо підвищити енергоефективність тільки при низьких швидкостях (МВМ) або швидкостях значно більших за номінальну (МВС).

При швидкостях близьких до номінальної величини втрат в міді і в сталі співмірні та використання тієї чи іншої стратегії керування поряд зі зменшенням

однієї складової втрат призведе до збільшення другої. Відтак найбільш ефективною стратегією керування є стратегія, яка дозволяє мінімізувати сумарні втрати.

Метою стратегії керування «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ) є забезпечення мінімальних сумарних втрат при заданому моменті. У відповідності з цим необхідно знайти мінімум сумарних втрат, який представляє собою скалярну функцію (2.1)

$$\Delta P_{\Sigma}(i_{do}, i_{qo}) = \Delta P_{Cu}(i_{do}, i_{qo}) + \Delta P_{Fe}(i_{do}, i_{qo})$$

при забезпеченні бажаного моменту, згідно (1.3), що являє собою додаткову умову (2.2).

В цьому випадку функція Лагранжа (2.3) матиме вигляд:

$$L(i_{do}, i_{qo}, \lambda) = \Delta P_{Cu}(i_{do}, i_{qo}) + \Delta P_{Fe}(i_{do}, i_{qo}) + \lambda \left(M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} \right).$$

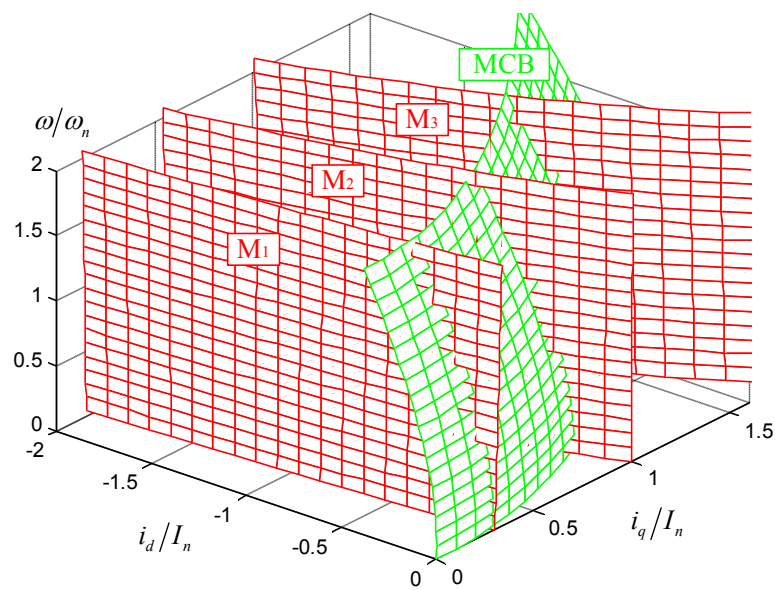
З урахуванням (1.5) та (1.6), система (2.4), запишеться в наступному виді

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial i_{do}} = 3R \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} + \frac{\omega_e L_d}{R_c} \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right) \right) + \\ + 3 \frac{\omega_e^2 L_d (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{qo} \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial i_{qo}} = 3R \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} - \frac{\omega_e L_d}{R_c} \left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right) \right) + \\ + 3 \frac{\omega_e^2 L_q^2 i_{qo}}{R_c} - \frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do}) \lambda = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = M - \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} - \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo} = 0. \end{cases}$$

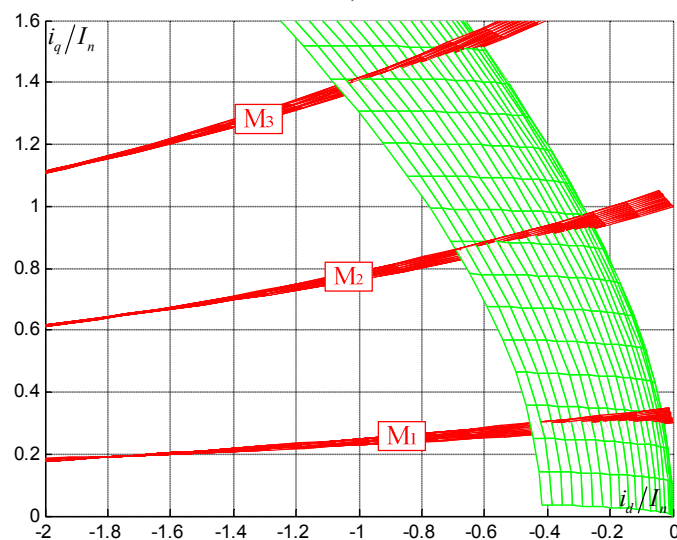
Вирішивши дану систему, отримуємо залежність між складовими струму статора, яка реалізує стратегію керування МСВ

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_d L_q}{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2 + i_{qo}^2 \frac{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_q^2}{R_c^2 \frac{R}{R_c + R} + \omega_e^2 L_d^2}}. \quad (2.11)$$

На рис. 2.9 графічно зображено поверхню регулювання, що відповідає стратегії керування МСВ.



а)



б)

Рисунок 2.9. - Поверхня керування МСВ (а) та її проекція на струмову площину (б)

Як можна бачити з рис. 2.6, 2.7 та 2.9 дана поверхня керування займає проміжне положення між МВМ та МВС, а також в значній мірі залежить від робочої швидкості.

Аналіз виразів (2.5), (2.7)-(2.11) показав, що всі залежності між частинами складових струму статора мають однакову структуру, а відмінність полягає в різних значеннях еквівалентного опору R_e .

Таким чином, вираз, що дозволить узагальнити всі наведені стратегії керування СДПМ приймає наступний вигляд

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2 + i_{qo}^2 \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}}. \quad (2.12)$$

Значення еквівалентного опору в залежності від бажаної стратегії керування наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення еквівалентного опору

Бажана стратегія	Максимум моменту на ампер (ММА)	Максимум моменту на вольт (ММВ)	Мінімум втрат в міді (МВМ)	Мінімум втрат в сталі (МВС)	Мінімум сумарних втрат (МСВ)
R_e	R_c	$\frac{R_c R}{R_c + R}$	R_c	0	$R_c \sqrt{\frac{R}{R_c + R}}$

Вираз (2.12) отримано для СДПМ з магнітами, встановленими всередині ротора, якому відповідає найбільш загальний математичним опис серед синхронних двигунів без електричного збудження. Отже, з (2.12) можна отримати більш прості частинні випадки уніфікованих залежностей, що дозволяють реалізувати систему оптимального керування для СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора ($L_d = L_q = L_s$):

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm} \omega_e^2 L_s}{R_e^2 + \omega_e^2 L_s^2}$$

і синхронного реактивного двигуна ($\psi_{pm} = 0$)

$$i_{do} = -i_{qo} \sqrt{\frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}}.$$

2.3. Аналіз запропонованих стратегій керування

Для аналізу розглянутих стратегій керування побудуємо залежності для обраних критеріїв оптимальності від робочої швидкості СДПМ при номінальному навантаженні. На рис. 2.10 наведено графіки повного струму та напруги статора, з яких можна бачити, що дійсно найменший струм та напруга досягається при використанні ММА/МВМ та ММВ, відповідно.

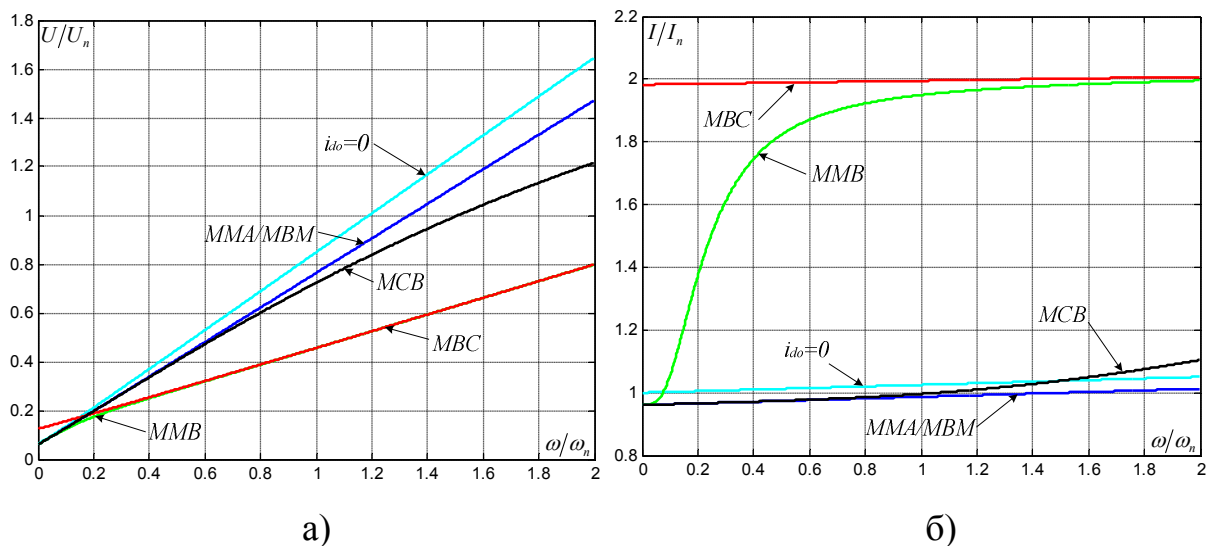


Рисунок 2.10. - Напруга (а) та струм (б) статора СДПМ при різних стратегіях керування в залежності від швидкості двигуна

Також, різниця між стратегіями керування МВС та ММВ істотна з точки зору струму СДПМ тільки до номінальної швидкості, в той час як напруга має практично однакове значення вже починаючи з 20% номінальної швидкості.

На рис. 2.11 приведено залежності втрат СДПМ при різних стратегіях керування. Як можна бачити всі стратегії забезпечують мінімальні значення відповідних критеріїв.

Причому, з рис. 2.11б видно, що мінімальних втрати в сталі можна досягти як за рахунок використання алгоритму керування МВС та і за рахунок ММВ.

Однак використання ММВ в діапазоні швидкостей нижчих за номінальну дозволяє, поряд із мінімізацією втрат в сталі, значно знизити сумарні втрати (рис. 2.11в).

Також з наведених залежностей можна побачити, що стратегії керування ММА/МВМ та МСВ в даному випадку забезпечують близькі характеристики при швидкостях нижче за номінальну. Однак при збільшенні робочої швидкості різниця між цими алгоритмами керування стає більш вагомою внаслідок збільшення втрат в сталі.

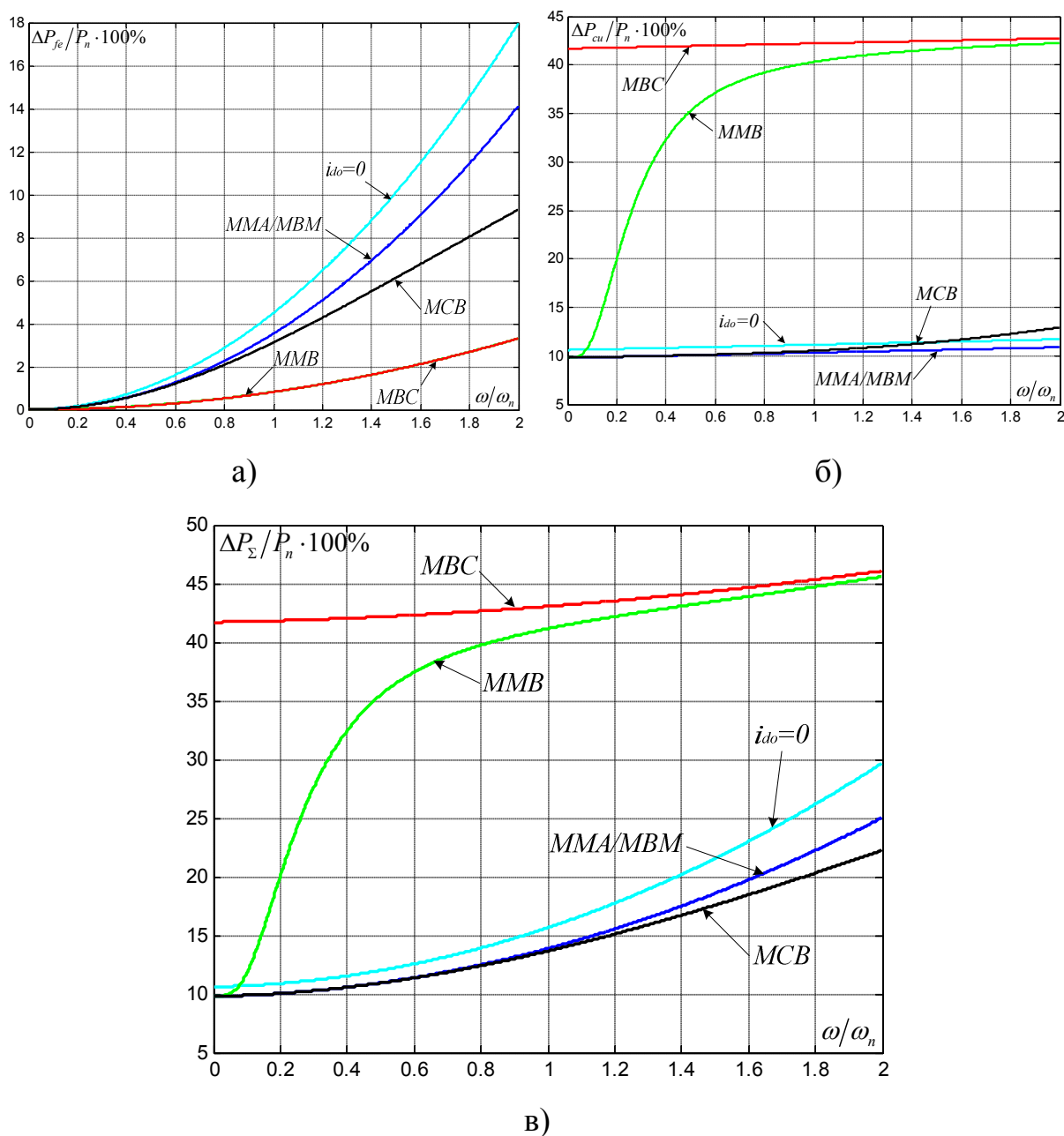


Рисунок 2.11. - Втрати сталі (а), міді (б) та сумарні втрати (в) СДПМ при різних стратегіях керування в залежності від швидкості двигуна

Для аналізу впливу навантаження на рис. 2.12, 2.13 наведено характеристики СДПМ при використанні різних стратегій керування для номінальної швидкості при зміні моменту двигуна.

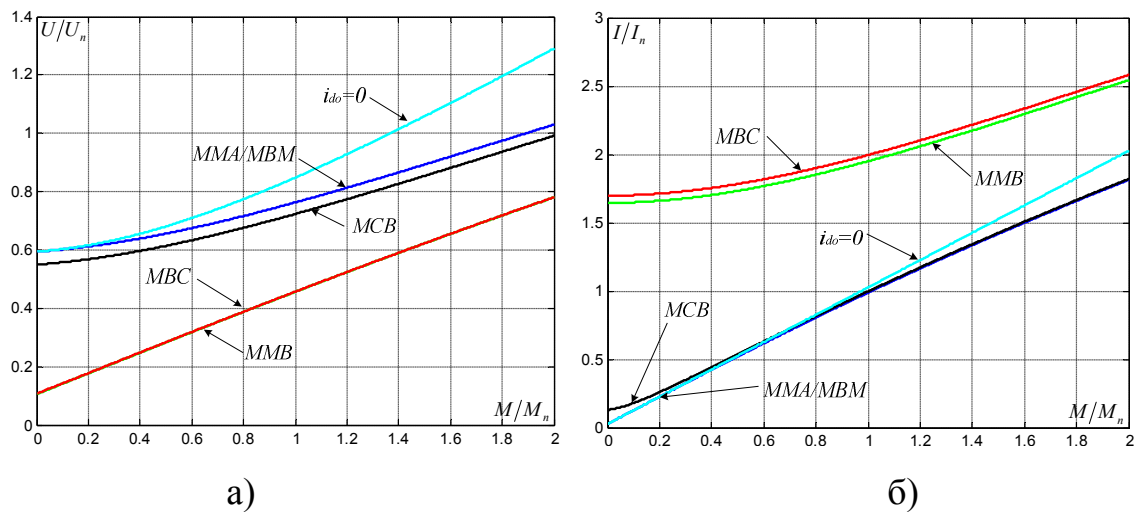


Рисунок 2.12. - Напряга (а) і струм (б) статора СДПМ при різних стратегіях керування в залежності від електромагнітного моменту двигуна

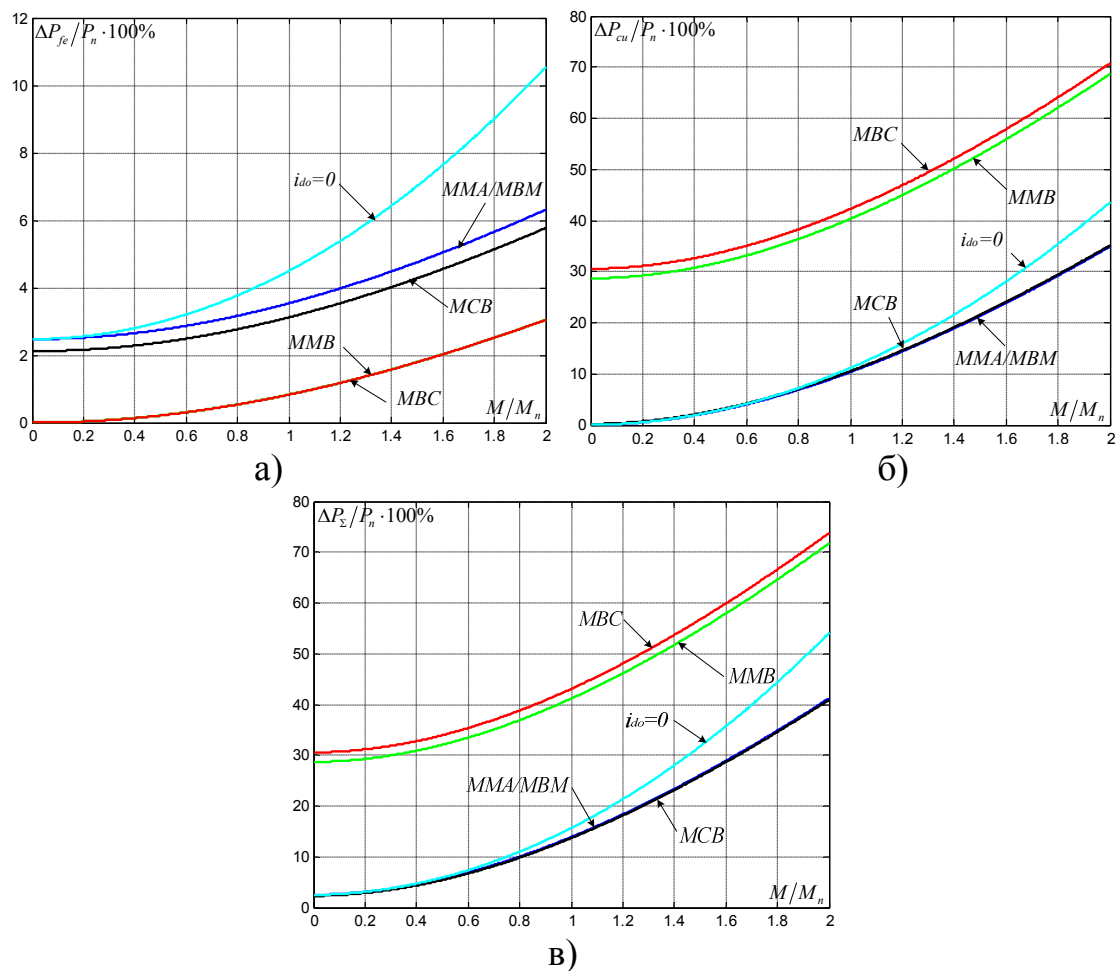


Рисунок 2.13. - Втрати в сталі (а), міді (б) і сумарні втрати (в) СДПМ при різних стратегіях керування в залежності від електромагнітного моменту двигуна

З наведених графіків можна бачити, що всі алгоритми керування забезпечують мінімізацію значень відповідних сигналів також і при зміні моменту двигуна. Слід відзначити, що зміна електромагнітного моменту, на відміну від зміни швидкості двигуна, не призводить до істотної різниці між характеристиками системи при використанні алгоритмів керування ММА/МВМ та МСВ, ММВ та МВС.

Далі проведемо аналіз використання оптимальних алгоритмів керування на динамічні показники системи електроприводу.

Згідно з розглянутого раніше принципу формування завдань на частини складових струму статора, останні залежать від необхідного електромагнітного моменту (рис. 1.12). Таким чином, для визначення i_{do}^* та i_{qo}^* необхідно вирішити систему рівнянь, яка складається з (1.3) та (2.12), відносно частин складових струму статора.

Однак, дана система не має аналітичного рішення, яке було би зручне у використанні при реалізації системи керування. Тому завдання на частину поперечної складової струму статора i_{qo}^* може бути знайдено із рішення наступного рівняння

$$\left(i_{qo}^*\right)^4 + \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \frac{\psi_{pm} M^*}{\frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q)^2} i_{qo}^* - \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \left(\frac{M^*}{\frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q)} \right)^2 = 0,$$

а i_{do}^* – на основі знайденого значення i_{qo}^* у відповідності до виразу уніфікованої стратегії керування (2.12).

В залежності від конкретних параметрів СДПМ такий підхід дозволяє поліпшити динамічні характеристики системи електроприводу, однак у будь-якому разі призводить до збільшення обчислювальних витрат. Тому найчастіше значення i_{qo}^* розраховують на основі поточного значення i_{do} за виразом, який отримано з (1.3)

$$i_{qo}^* = \frac{M^*}{\frac{3}{2} Z_p (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}.$$

Математичне моделювання показало, що покращення динамічних процесів системи електроприводу в даному випадку є несуттєвим, тому далі при дослідженнях визначення завдань на частини складових струму статора буде виконуватись у відповідності до останнього способу.

Перевірку працездатності систем виконано в режимах розгону та роботі на холостому ходу з подальшим збільшенням навантаження до номінального рівня.

Перехідні процеси в системі електроприводу при використанні стратегії керування ММА/МВМ наведено на рис. 2.14-2.15.

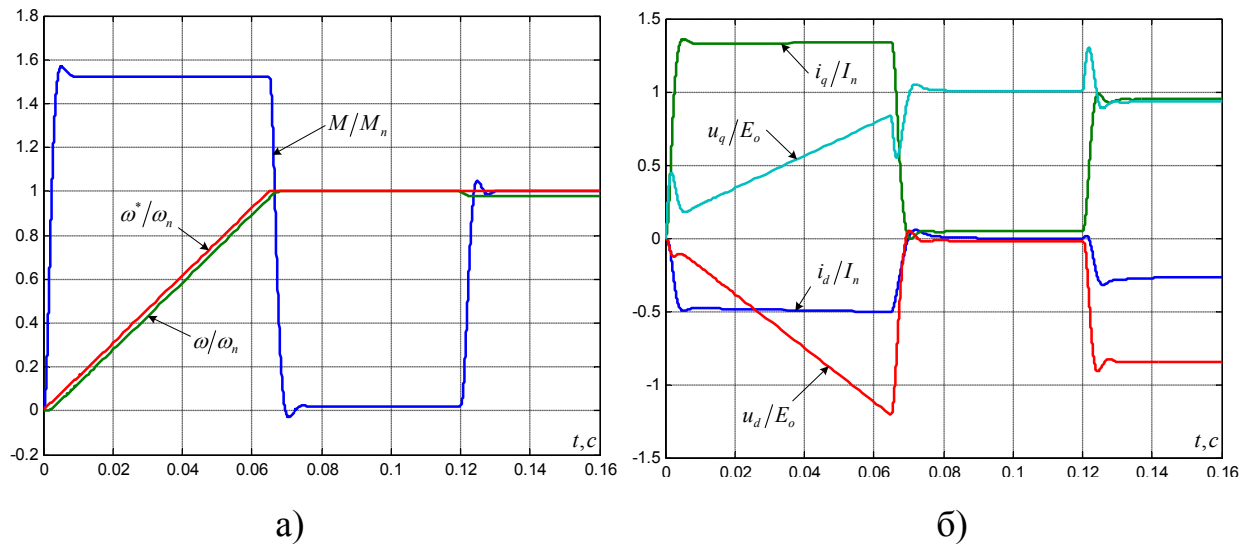


Рисунок 2.14. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості та швидкості (а) і складових напруги та струму статора (б) при стратегії керування ММА/МВМ

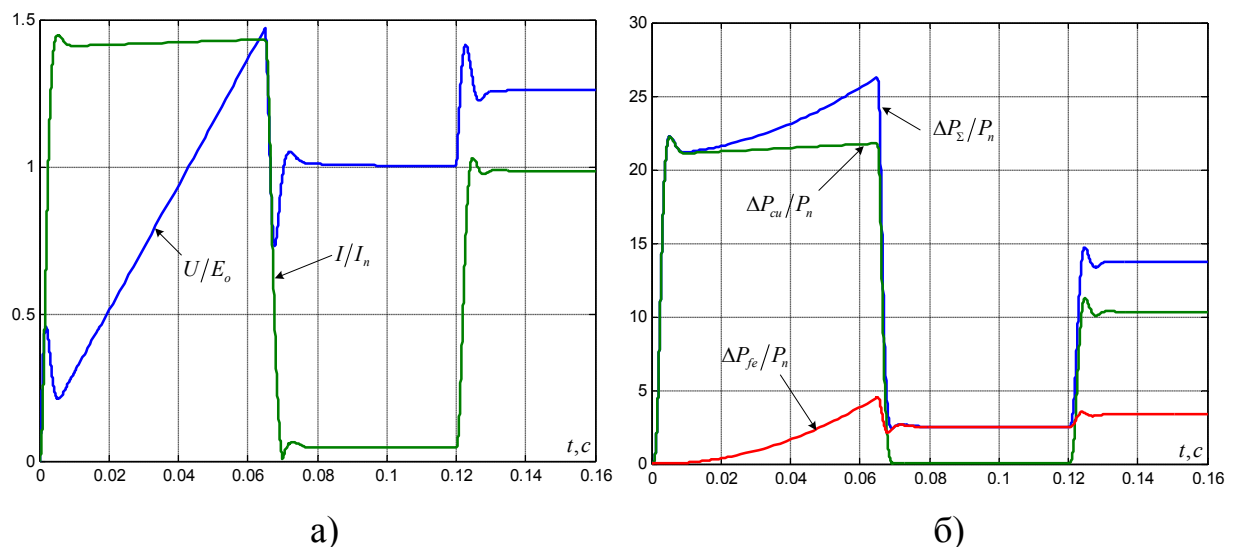


Рисунок 2.15. - Графіки повного струму та напруги статора (а) і втрат у двигуні (б) при стратегії керування ММА/МВМ

З рис. 2.14а видно, що застосування алгоритму керування ММА/ МВМ ніяк не позначається на динамічних і статичних показниках системи векторного керування. У порівнянні з поширеним законом керування – підтримання поздовжньої складової на нульовому рівні, при необхідності створення моменту, дана складова збільшується в від'ємному напрямку (рис. 2.14 б), приводячи до більшого використання реактивної складової електромагнітного моменту. Збільшення швидкості відбувається за рахунок збільшення напруги при практично постійному струмі (рис. 2.15 а), що зумовлює збільшення тільки втрат в сталі поряд з практично постійними втратами в міді (рис. 2.15 б).

На рис. 2.16-2.17 наведено перехідні процеси в системі електроприводу при використанні стратегії керування ММВ.

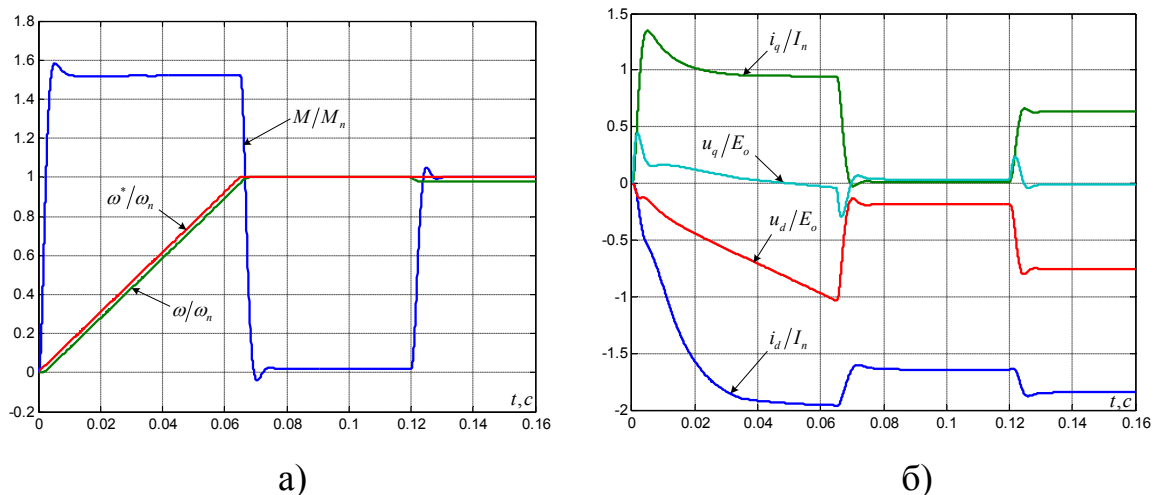


Рисунок 2.16. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і складових напруги та струму статора (б) при стратегії керування ММВ.

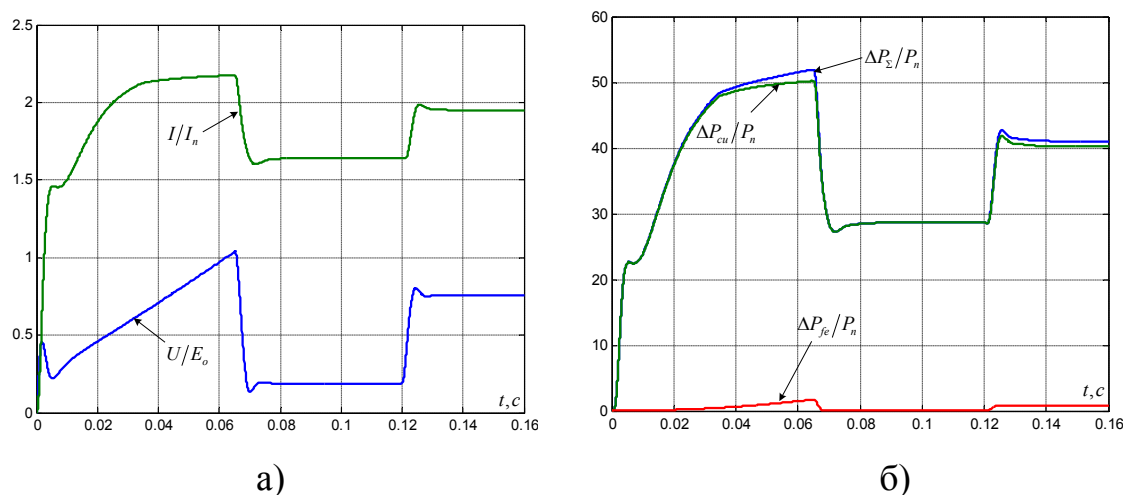


Рисунок 2.17. - Графіки повного струму та напруги статора (а) і втрат у двигуні (б) при стратегії керування ММВ

Застосування стратегії керування ММВ також дозволяє забезпечити традиційні динамічні та статичні характеристики системи векторного керування. Застосування ММВ забезпечує максимальне використання струму для отримання необхідної потужності (рис. 2.16 б), що призводить до від'ємних показників складових напруги статора. У початковий момент розгону збільшення струму відбувається поступово (рис. 2.17 а), в залежності від робочої швидкості, що відповідає поверхні ММВ (рис. 2.7 а). З рис. 2.17 б видно, що вагомішою складовою сумарних втрат є втрати в міді. Однак, слід відзначити, що загальний ККД двигуна буде значно гірше в порівнянні з ММА/МВМ.

На рис. 2.18, 2.19 наведені перехідні процеси в системі електроприводу при використанні стратегії керування МВС.

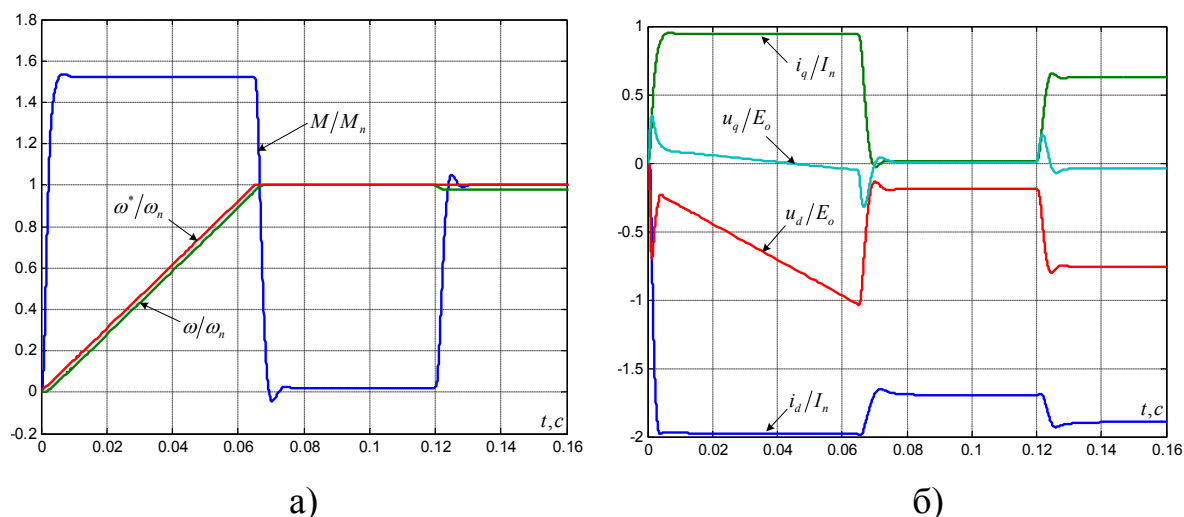
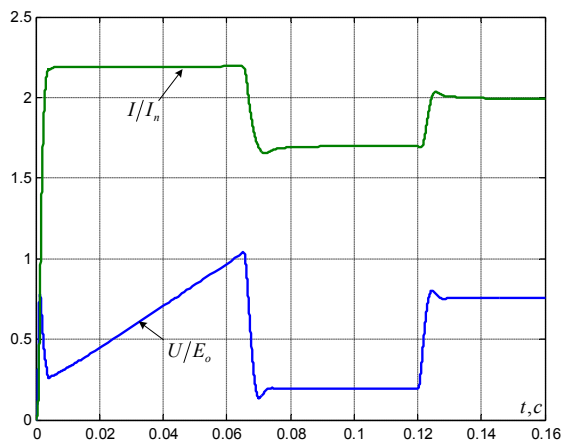
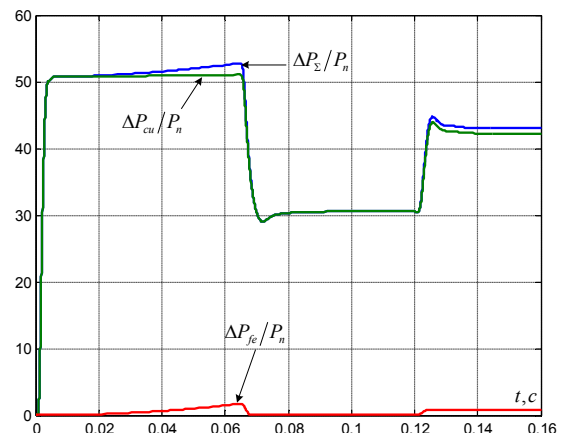


Рисунок 2.18. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і складових напруги та струму статора (б) при стратегії керування МВС

Наведені процеси аналогічні процесам, що відповідають стратегії керування ММВ, що пов'язано з близькістю цих законів регулювання. У порівнянні з ММВ стратегія керування МВС відрізняється меншим перерегулюванням і коливательністю (рис. 2.18 а). Основною відмінністю є характер зміни струму при забезпеченні необхідної моменту при низьких частотах роботи СДПМ (рис. 2.19 а). Застосування стратегії МВС також не дозволяє отримати високі енергетичні показники системи, однак може застосовуватися для забезпечення мінімуму втрат в сталі (рис. 2.19 б).



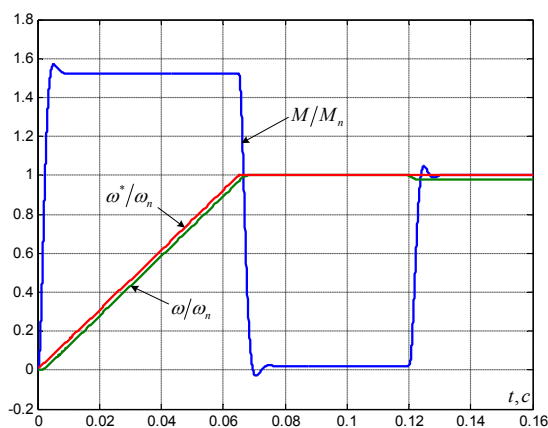
а)



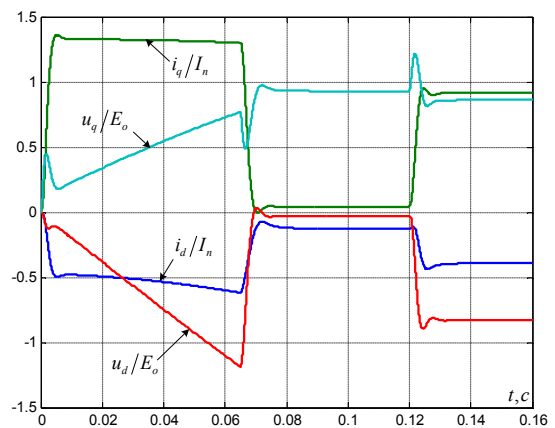
б)

Рисунок 2.19. - Графіки повного струму і напруги статора (а) і втрат у двигуні (б) при стратегії керування МВС

Перехідні процеси в системі електроприводу при використанні стратегії керування МСВ наведено на рис. 2.20, 2.21.

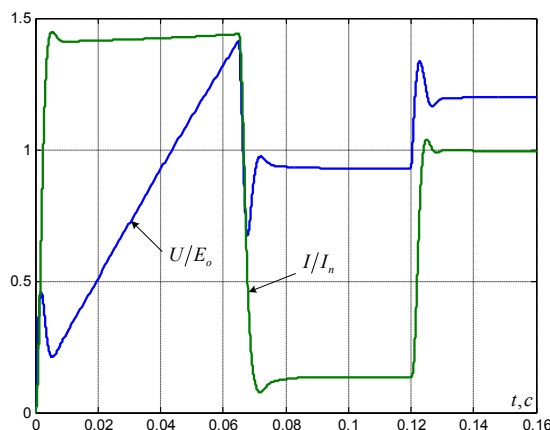


а)

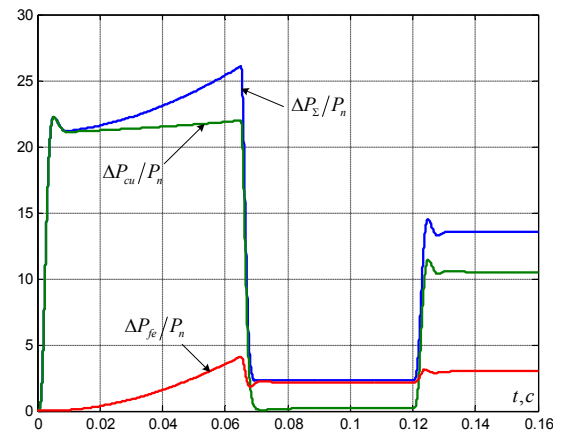


б)

Рисунок 2.20. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і складових напруги та струму статора (б) при стратегії керування МСВ



а)



б)

Рисунок 2.21. - Графіки повного струму та напруги статора (а) і втрат у двигуні (б) при стратегії керування МСВ

Динамічні і статичні характеристики такої системи (рис. 2.21) відповідають характеристикам системи векторного керування. Збільшення швидкості в більшій мірі відбувається за рахунок збільшення напруги (рис. 2.20 б, 2.21 а), що пов'язано з превалюванням втрат в міді в цьому діапазоні частот. Тому стратегії ММА та МСВ у даному випадку виявляються досить близькими. Однак застосування МСВ все ж дозволяє підвищити сумарний ККД системи в порівнянні з ММА (рис. 2.21 б).

2.4. Система оптимального керування з урахуванням існуючих обмежень на струм і напругу електропривода

Відомо, що в системі електроприводу існують фізичні обмеження на електричні координати. Так максимальна напруга статора обмежена максимальною вихідною напругою інвертора

$$U_{\max} = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}. \quad (2.13)$$

Максимальний рівень обмеження струму, у свою чергу, визначається мінімальним значенням з допустимого струму двигуна та перетворювача:

$$I_{\max} = \min(I_{\max \text{ Д}}, I_{\max \text{ ПЧ}}). \quad (2.14)$$

При отриманні залежностей між частинами складових струму статора, що дозволяють реалізувати оптимальні стратегії керування, вказані обмеження не бралися до уваги. Таким чином, за певних умов може виникнути ситуація, коли для забезпечення того чи іншого критерію оптимальності при заданому моменті буде вимагатися значення струму і/або напруги, що перевищує максимальні межі.

Для виключення такого режиму роботи, можуть бути запропоновані два варіанти. У першому випадку при отриманні стратегій керування необхідно врахувати обмеження (2.13) та (2.14), що призведе до значного ускладнення результуючих виразів залежностей або може унеможливити їх знаходження. Другий варіант полягає у визначенні граничних рівнів сигналів завдання i_{do}^* та i_{qo}^* .

Якщо знехтувати втратами в міді ($R = 0$) і втратами в сталі ($R_c = \infty$), то повна напруга, що підводиться до статора дорівнюватиме

$$U = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = \sqrt{(\omega_e L_q i_q)^2 + (\omega_e (L_d i_d + \psi_{pm}))^2} = Z_p \omega \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_{pm})^2}.$$

Виразивши звідси швидкість ротора, отримаємо

$$\omega = \frac{U}{Z_p \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_{pm})^2}}. \quad (2.15)$$

Як можна бачити з (2.15) регулювання швидкості СДПМ можливо, як за рахунок зміни напруги, що підводиться до статора, так і за рахунок зміни струму статора. Причому при повній компенсації потоку від постійних магнітів і відсутності навантаження, теоретично можлива швидкість дорівнює нескінченності.

У разі досягнення обмеження за напругою, більше значення швидкості може бути одержано за рахунок збільшення частини поздовжньої складової струму статора i_{do} в від'ємному напрямку. Для того щоб не перевищити обмеження за напругою величина i_{do} повинна бути менше деякого значення. Воно може бути знайдено з (2.7) за умови $U = U_{\lim}$, звідки:

$$i_{do \max} = -\frac{\omega_e^2 L_d \psi_{pm} + R_e \omega_e (L_d - L_q) i_{qo}^*}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \left(\frac{U_{\lim}}{R} \right)^2 - \left(\frac{R_e \omega_e \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{qo}^*}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2}, \quad (2.16)$$

де $R_e = R \cdot R_c / (R + R_c)$, що відповідає стратегії керування ММВ.

Найменше значення поздовжньої складової струму доцільно обмежити на рівні, відповідному ММВ, тобто:

$$i_{do \min} = i_{do \text{ ММВ}}. \quad (2.17)$$

В свою чергу, збільшення частини поздовжньої складової у від'ємному напрямку призведе до збільшення повного струму статора. Щоб уникнути

перевищення допустимого рівня, значення складової i_{qo} не повинно перевищувати величини

$$i_{qo \max I} = -\frac{R_e \omega_e (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} I_{\lim}^2 - \left(\frac{\omega_e^2 L_q \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{do}}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \right)^2}, \quad (2.18)$$

яка отримана з (2.5) за умови $I = I_{\lim}$. При цьому $R_e = R_c$, що відповідає стратегії керування ММА/МВМ.

У випадку роботи на швидкостях, які значно перевищують номінальну, за умови досягнення частиною поздовжньої складової i_{do} своєї нижньої межі (2.17), подальше збільшення швидкості можливо лише за рахунок зменшення поперечної складової струму статора. В даному разі максимальне значення i_{qo} може бути знайдено з (2.7) за умови $U = U_{\lim}$:

$$i_{qo \max U} = -\frac{R_e \omega_e (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \left(\frac{U_{\lim}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e^2 L_q \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{do}}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \right)^2}, \quad (2.19)$$

де $R_e = R \cdot R_c / (R + R_c)$ відповідає алгоритму керування ММВ.

Результуючим обмеженням струму i_{qo} слід вибрати найменше з (2.18) і (2.19).

На рис. 2.22 приведено поверхні обмежень і їх проекції на струмову площину.

З рис. 2.22 можна бачити, що основним обмеженням при низьких частотах обертання є обмеження за струмом. З ростом робочої швидкості система може досягати обмеження за напругою. Таким чином, робочий простір лежить всередині поверхні обмеження за струмом і нижче поверхні обмеження за напругою.

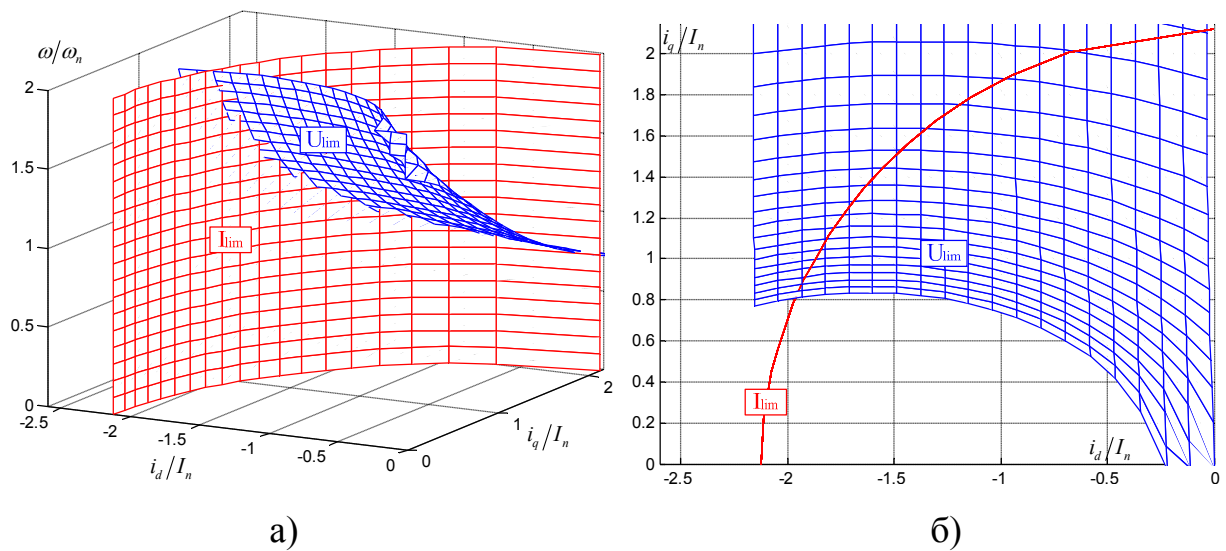


Рисунок 2.22. - Поверхні обмежень струму і напруги статора (а) та їх проекції на струмову площину (б)

Результуючу функціональну схему розробленої системи оптимального керування СДПМ наведено на рис. 2.23.

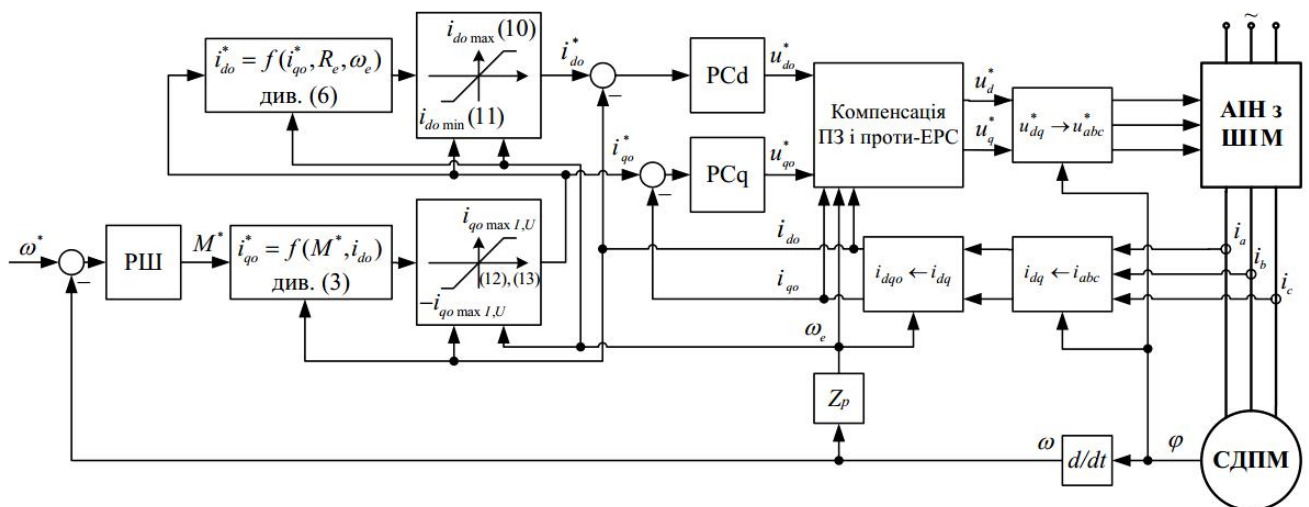


Рисунок 2.23. - Функціональна схема системи оптимального керування СДПМ при урахуванні існуючих обмежень на струм та напругу статора

2.5. Робота системи оптимального керування при урахуванні існуючих обмежень на напругу і струм статора

Для аналізу роботи системи за умови обмежень максимальні значення допустимого струму і напруги були штучно знижені. Досліджувалися режими

розгону за задатчиком інтенсивності та робота на сталій швидкості, що дорівнює півтора номіналу, при постійному моменті статичного опору, який дорівнює 50% номінального.

Перехідні процеси в системі при використанні стратегії керування MMA/MBM наведено на рис. 2.24, 2.25.

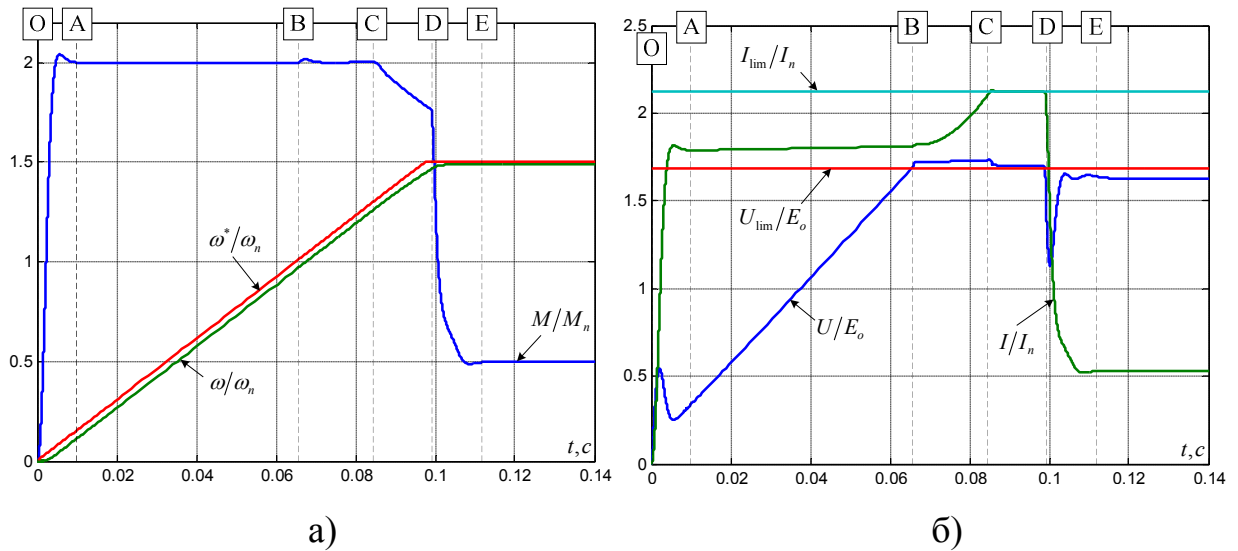


Рисунок 2.24. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і амплітудних значень напруги і струму статора (б) при стратегії керування MMA/MBM у разі обмежень координат

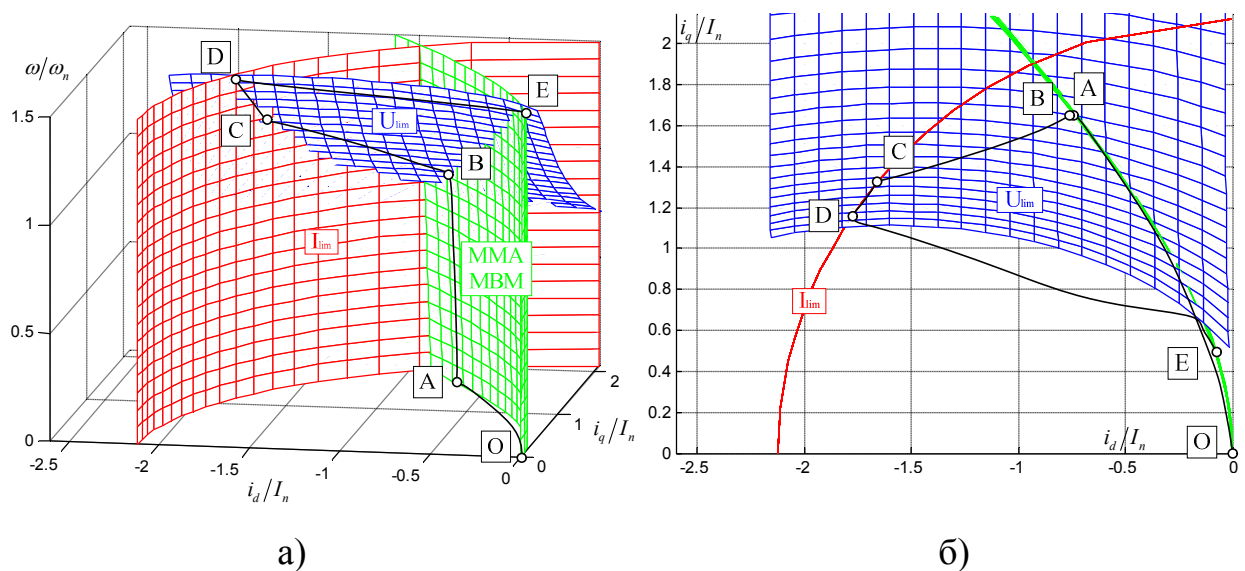


Рисунок 2.25. - Графіки траєкторії роботи системи (а) і її проекція та струмову площу (б) при MMA/MBM у разі обмежень координат

В даному випадку процес розгону можна розділити на три основні етапи. На першому етапі робота здійснюється на поверхні MMA/MBM з постійним динамічним моментом (ділянка АВ). При досягненні напругою статора рівня обмеження починається другий етап (BC). При цьому подальше збільшення швидкості здійснюється за рахунок зменшення поздовжньої складової струму статора в від'ємному напрямку у відповідності з виразом (2.16). На другому етапі динамічний момент зберігається на бажаному рівні за рахунок збільшення струму статора. Причому збільшення останнього супроводжується перерозподілом частки його складових і збільшенням реактивної складової електромагнітного моменту (1.3). Рух системи відбувається за поверхнею обмеження за напругою. Третій етап (CD) починається, коли струм статора також досягає рівня обмеження. При цьому підтримка динамічного моменту на заданому рівні вже не можлива та відбувається зниження швидкодії. Поперечна складова струму статора починає змінюватися у відповідності з виразом (2.17). При досягненні заданої швидкості система знову переходить на поверхню стратегії регулювання MMA/MBM в точку перетину з поверхнею статичного моменту.

Перевищення напругою допустимих значень пов'язано з тим, що при виведенні обмежень складових струму були використані рівняння статички. Відповідно в разі наявності похідних струмів (di/dt) це призводитиме до похибки. Тому результуючі обмеження слід занижувати на (10-20)% для забезпечення запасу в динаміці.

На рис. 2.26, 2.27 наведено перехідні процеси системи при використанні стратегії керування MMB.

Послідовність розгону аналогічна розглянутій для MMA, з тим лише винятком, що обмеження за напругою не досягається, а відразу досягається обмеження за струмом (точка В). Відмінною особливістю є погіршення динаміки, пов'язане з тим, що підтримання необхідного динамічного моменту забезпечується лише короткочасно (ділянка АВ).

Також слід відзначити, що використання стратегії керування ММВ можливо в широкому діапазоні моментів лише при малих швидкостях та що обмеження за напругою для даної стратегії не досягне.

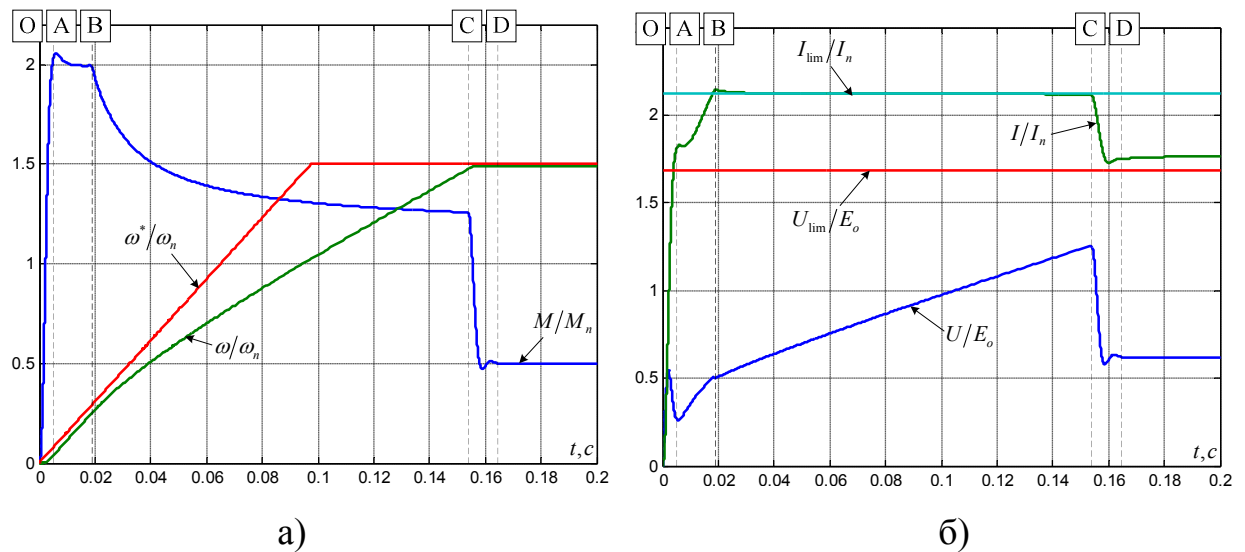


Рисунок 2.26. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і амплітудних значень напруги і струму статора (б) при стратегії керування ММВ у разі обмежень координат

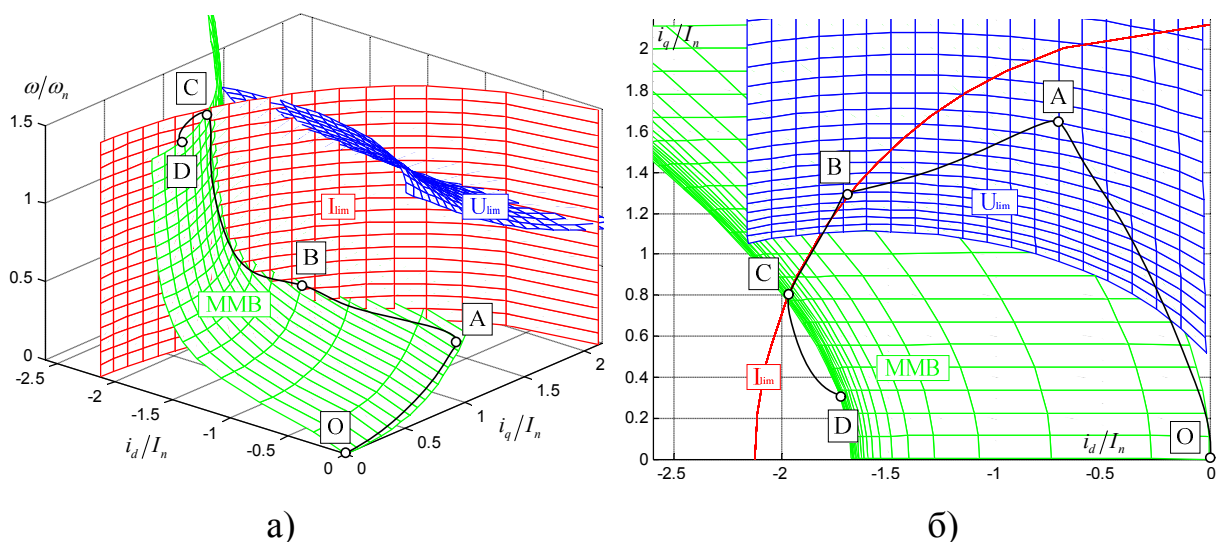


Рисунок 2.27. - Графіки траєкторії роботи системи (а) і її проекція та струмову площу (б) при ММВ у разі обмежень координат

На рис. 2.28, 2.29 наведено перехідні процеси системи при використанні стратегії керування МВС.

У разі застосування стратегії керування МВС система майже миттєво переходить в режим струмообмеження (рис. 2.28).

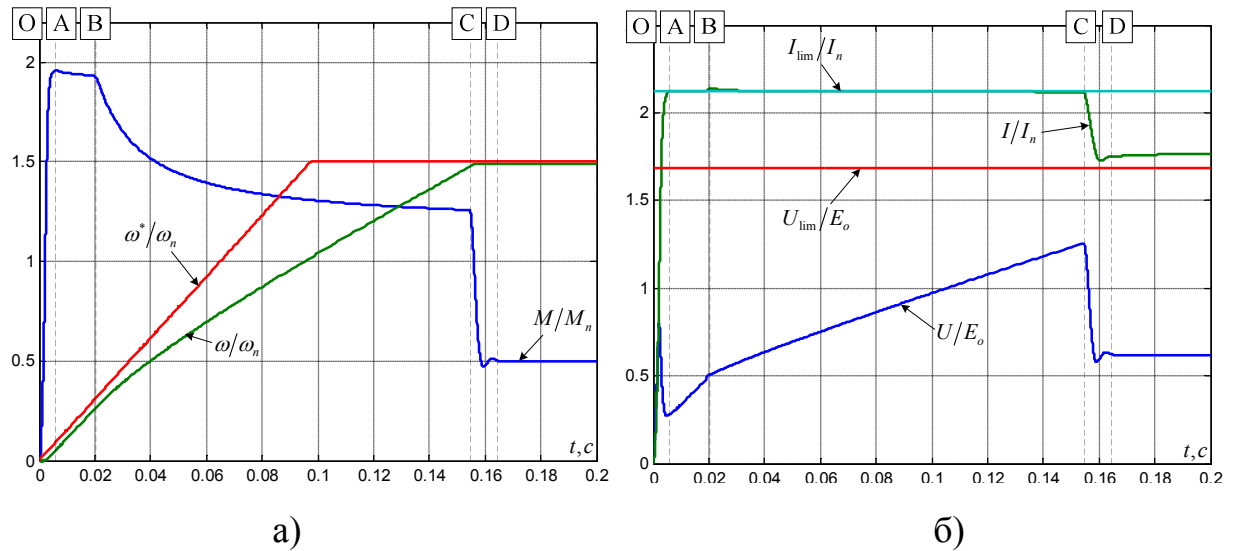


Рисунок 2.28. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і складових амплітудних значень напруги і струму (б) при стратегії керування МВС у разі обмежень координат

Причому частина поздовжньої складової струму статора досягає свого мінімального значення, яке відповідає (2.17) (точка В). У зв'язку з цим подальший розгін відбувається аналогічно стратегії керування ММВ (ділянка ВС). Перехід на поверхню МВС відбувається тільки при виході на сталу швидкість (точка D).

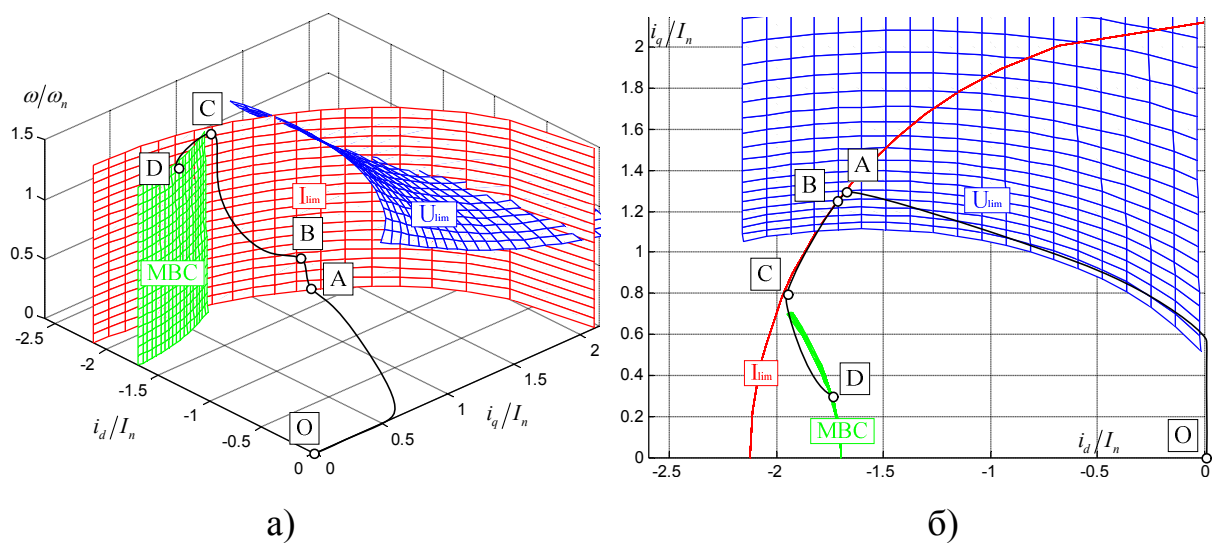


Рисунок 2.29. - Графіки траєкторії роботи системи (а) і її проекція та струмову площу (б) при МВС у разі обмежень координат

Можна побачити, що застосування даного закону керування, в порівнянні з ММВ, можливо лише при малих моментах двигуна.

На рис. 2.30, 2.31 наведено перехідні процеси при використанні стратегії керування МСВ.

В даному випадку робота системи аналогічна використанню стратегії керування ММА/МВМ. Відмінність полягає лише в менших ділянках роботи на поверхнях обмеженнях.

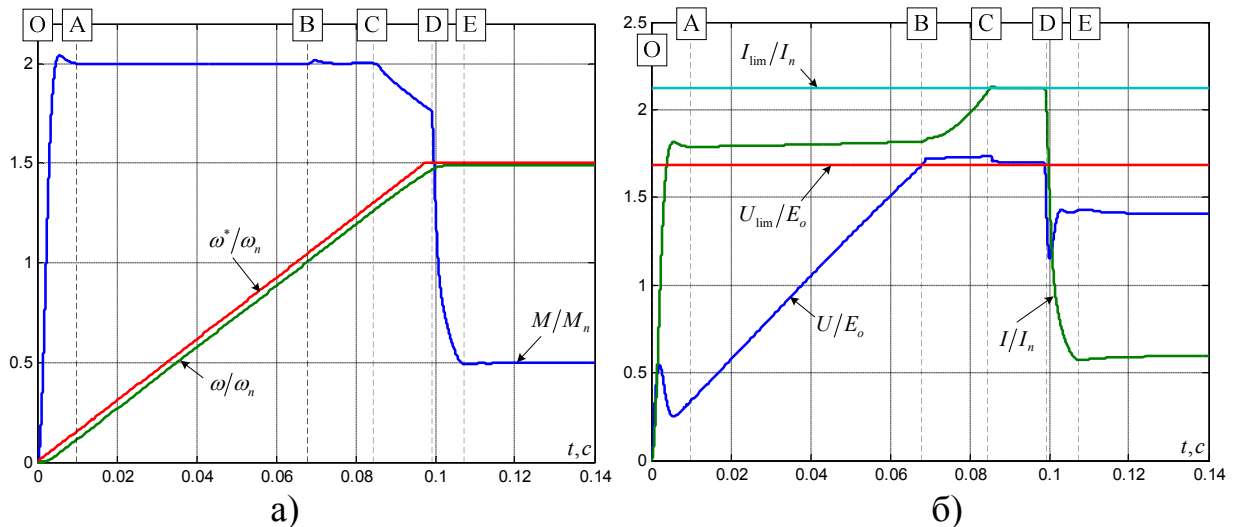


Рисунок 2.30. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і амплітудних значень напруги і струму статора (б) при стратегії керування МСВ у разі обмежень координат

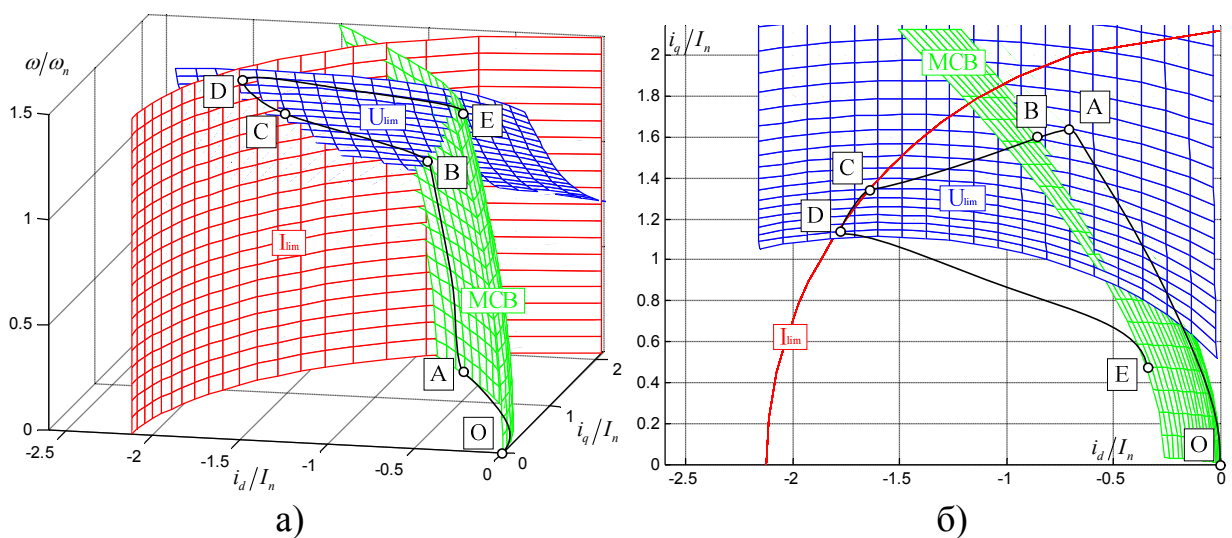


Рисунок 2.31. - Графіки траєкторії роботи системи (а) і її проекція та струмову площу (б) при МСВ у разі обмежень координат

Всі попередні результати отримано при обмеженні завдань на частини складових струму статора у відповідності до виразів (2.16) – (2.19) згідно функціональній схемі запропонованої системи (рис. 2.23).

В традиційному варіанті системи векторного керування для обмеження координат використовуються максимально припустимі значення поздовжньої і поперечної складових струму статора, які отримані відповідно з (2.15) та виразу повного струму статора (2.5). В цьому випадку

$$i_{d \max} = -\frac{\psi_{pm}}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\left(\frac{U_{\lim}}{Z_p \omega}\right)^2 - (L_q i_q)^2},$$

$$i_{q \max} = \sqrt{I_{\lim}^2 - i_{d \max}^2}.$$

Для порівняння традиційного та розробленого способів обмеження завдань на складові струму статора на рис. 2.32-2.35 наведено відповідні перехідні процеси системи електроприводу при розгоні до двох номіналів швидкості та накиді навантаження для стратегії керування МСВ.

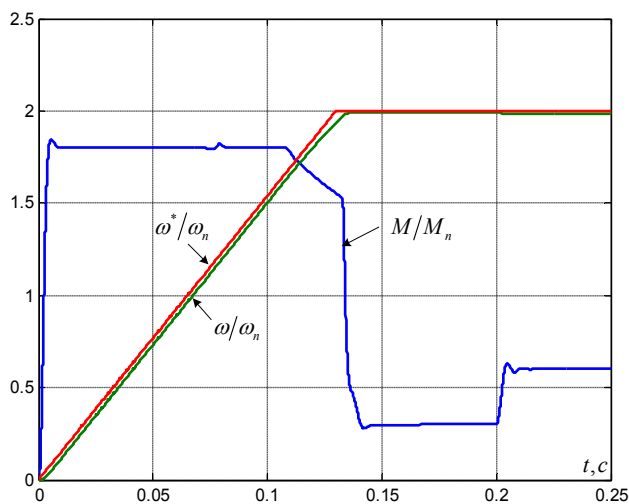


Рисунок 2.32. - Графіки моменту та швидкості двигуна при обмеженні координат традиційним способом

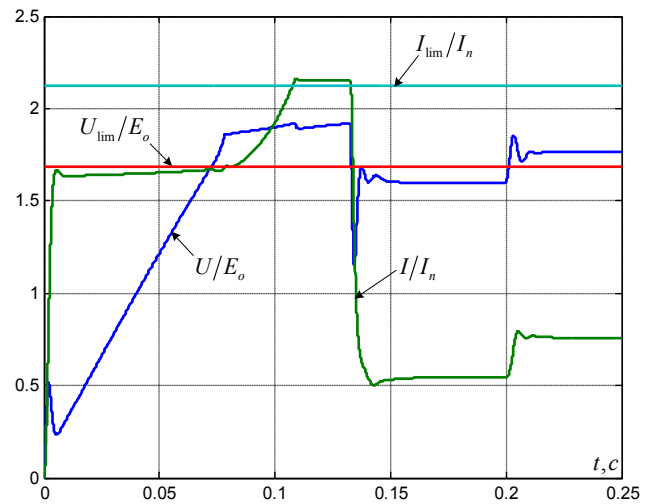


Рис. 3.33. Графіки напруги та струму статора при обмеженні координат традиційним способом

З рис. 3.33 можна побачити, що обмежувані координати в класичній системі виходять за максимальні рівні, як в динамічних режимах так і в статиці.

В той же час використання запропонованої системи дозволяє усунути похибку обмеження сигналів струму та напруги статора в статичному режимі і значно зменшити її в динаміці (рис. 2.33).

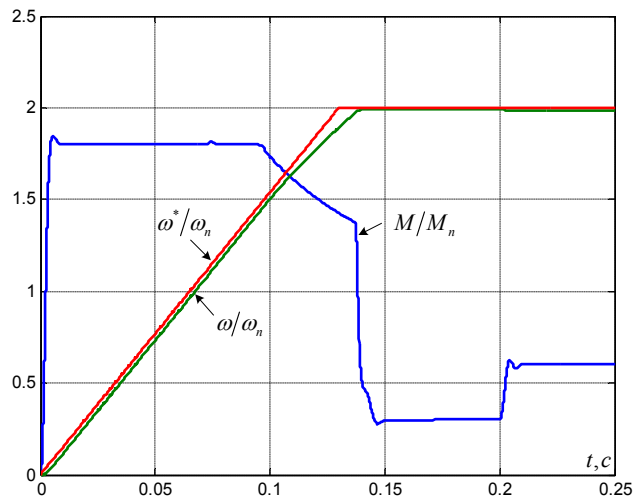


Рисунок 2.34. - Графіки моменту та швидкості двигуна при обмеженні координат запропонованим способом

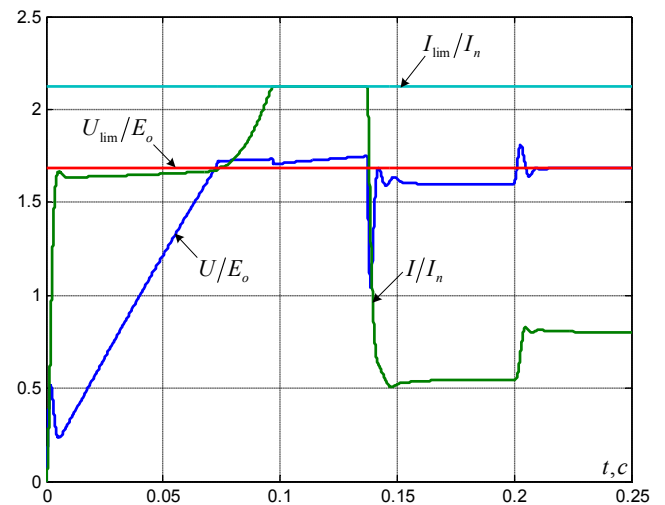


Рисунок 2.35. - Графіки напруги та струму статора при обмеженні координат запропонованим способом

Як зазначалося раніше режим послаблення поля може забезпечити роботу СДПМ при швидкостях значно більших за номінальну, а при виконанні певних умов, теоретична швидкість може дорівнювати нескінченності.

На рис. 2.36, 2.37 наведено перехідні процеси системи у випадку розгону до трьох номіналів швидкості при використанні стратегії МСВ.

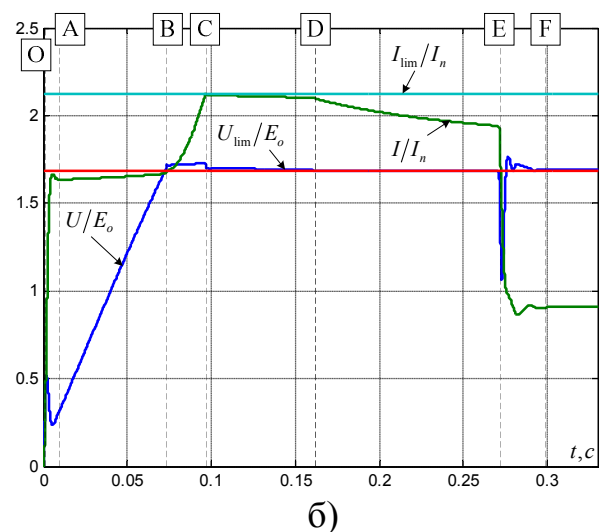
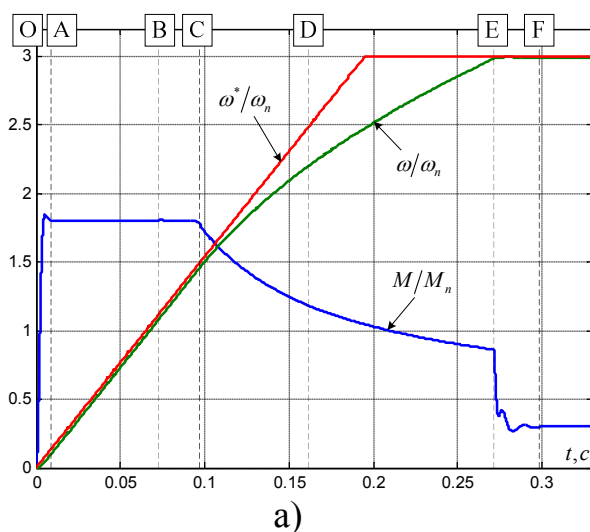


Рисунок 2.36. - Графіки електромагнітного моменту та швидкості (а) і амплітудних значень напруги і струму статора (б) при стратегії керування МСВ

З наведених графіків можна бачити, що процес розгону відбувається аналогічно раніше розглянутому випадку (рис. 2.30, 2.31) до моменту часу коли частина поздовжньої складової струму статора (i_{do}) досягає свого мінімального рівня (2.17) (точка D). Після цього система переходить на поверхню ММВ (ділянка DE). Обмеження на i_{qo} відбувається у відповідності до виразу (2.19).

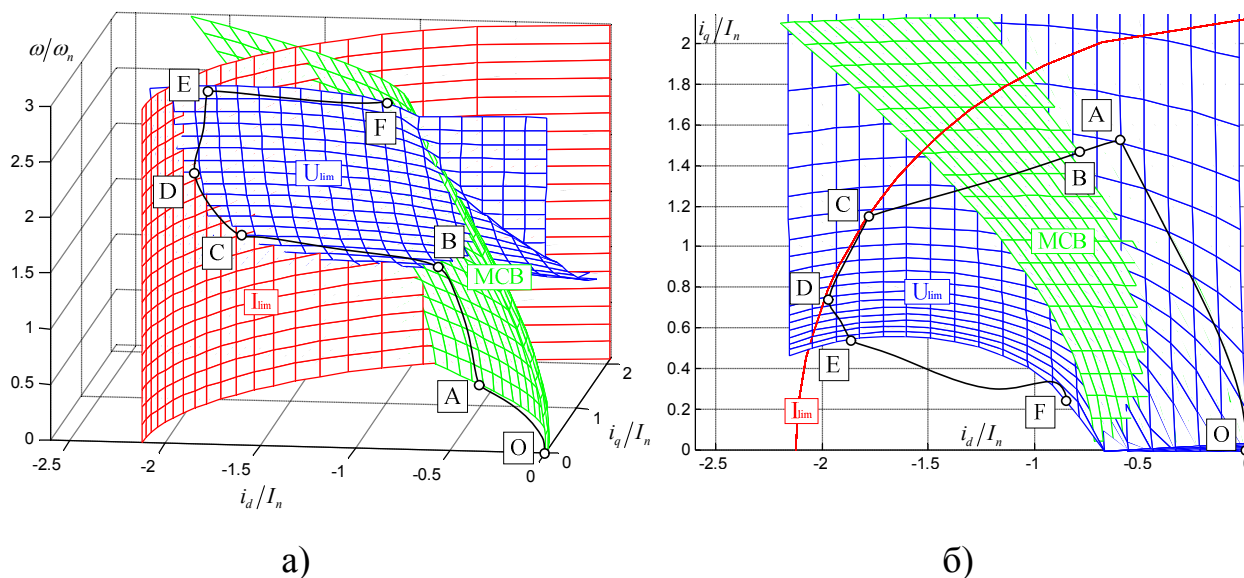


Рисунок 2.37. - Графіки траєкторії роботи системи (а) і її проекція та струмову площу (б) при МСВ

Робота на цій ділянці характеризується зменшенням струму статора двигуна. Причому максимальна швидкість, яку можна досягнути, обмежена тільки існуючим моментом опору та механічною міцністю ротора. Після досягнення завданої швидкості система знову переходить на поверхню МСВ.

2.6. Експериментальна перевірка системи оптимального керування

В якості об'єкта керування було обрано СДПМ, який є частиною системи комплектного сервопривода. Комплектна експериментальна установка являє собою систему сервопривода виробництва фірми Schneider Electric – Lexium 05A. Перший двигун (серводвигун BSH) керується від сервоперетворювача Lexium 05A, а другий (трифазний АД з короткозамкненим ротором) – від перетворювача

Altivar 71. На валу АД встановлений датчик швидкості. До перетворювача частоти підключена програмована карта вбудованого контролера та гальмівний резистор. Елементи схеми (Altivar 71, Lexium 05A та програмована карта вбудованого контролера) з'єднані за допомогою мережевого протоколу CANopen.

Серводвигун серії BSH представляє собою синхронний двигун з магнітами встановленими на поверхні ротора. На валу двигуна встановлено однообертовий (4096 точок) абсолютний датчик положення SinCos Hiperface®, що забезпечує точність вимірювання кутового положення валу $< \pm 1,3$ кутової хвилини.

Цей датчик дозволяє вимірювати кутове положення та швидкість СДПМ. Крім того його оснащено пристроєм пам'яті де зберігаються паспортні дані відповідного двигуна, які передаються до перетворювача.

Паспортні дані двигуна BSH 0701P, який входить до складу експериментальної установки наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані двигуна BSH 0701P

Параметр	Значення
Номінальна швидкість n_n , об/хв	3000
Максимальна швидкість $n_{\max}$, об/хв	6000
Номінальний момент M_n , Нм	1,4
Максимальний момент $M_{\max}$, Нм	3,5
Номінальна напруга U_n , В	220
Номінальний струм I_n , А	1,72
Момент інерції двигуна J , кг·м ²	0,00003
Кількість пар полюсів	3
Активний опір фази статора R , Ом	5,2
Індуктивність за поздовжньою віссю L_d , мГн	17,65
Індуктивність за попередньою віссю L_q , мГн	21,3
Лінійна напруга, при обертанні двигуна зі швидкістю 1000 об/хв, В	46

Як можна побачити з табл. 2.2, навіть при розташуванні магнітів на поверхні ротора, в реальній системі наявна незначна електромагнітна асиметрія ($L_d < L_q$).

Сервоперетворювач Lexium 05 в стандартному виконанні має гальмівний опір, що позбавляє від необхідності зовнішнього гальмівного опору для більшості видів використання.

Висока динамічність обумовлена також малим часом дискретизації контурів регулювання сервоперетворювача Lexium 05:

- 62,5 мкс для контуру струму;
- 250 мкс для контурів швидкості та положення.

Керування двигунами BSH за допомогою сервоперетворювача Lexium05 може здійснюватися в одному з наступних режимів:

- режим позиціонування: відносні і абсолютні переміщення;
- режим електричного валу;
- регулювання швидкості з контролем положення;
- пряме регулювання швидкості;
- регулювання струму;
- ручне переміщення для зручності наладки.

Функція автоматичного налаштування Lexium 05 визначає коефіцієнти посилення контурів регулювання залежно від механічної частини установки для різних видів переміщення, у тому числі вертикального.

В якості системи керування в сервоперетворювачем Lexium 05 використовується традиційна система векторного керування, аналогічна розглянутій в пункті 1.5. Причому поздовжня складова струму статора підтримується на нульовому рівні.

Для перевірки адекватності математичної моделі реальній системі необхідно мати повну інформація про об'єкт керування. Більшість даних може бути отримана з паспорту двигуна. Проте там відсутня інформація про втрати в сталі. Тому було виконано розрахунок еквівалентного опору R_c , який

характеризує даний тип втрат та використовується при математичному моделюванні.

При цьому прийнято допущення, що паразитні втрати зневажливо малі, а втрати в роторі СДПМ відсутні.

Враховуючи, що в реальній системі

$$L_d L_q (\omega_e / R_c)^2 \ll 1, \quad (2.20)$$

можна спростити вираз (1.9), який дозволяє отримати значення частин складових струму статора i_{do}, i_{qo} на основі значень i_d, i_q :

$$\begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_q \omega_e / R_c \\ -L_d \omega_e / R_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_q \omega_e / R_c \\ 1 \end{bmatrix} \psi_{pm} \omega_e / R_c. \quad (2.21)$$

Підставивши (2.21) в рівняння електромагнітного моменту (1.3) та враховуючи (2.20) і особливості системи керування ($i_d = 0$), після перетворень отримаємо

$$M = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_q - \frac{3}{2} Z_p \frac{\omega_e}{R_c} \left(\psi_{pm}^2 + (L_q^2 - L_d L_q) i_q^2 \right). \quad (2.22)$$

Електрична потужність, що споживається СДПМ:

$$P_{el} = P_m + \Delta P_{cu} + \Delta P_{fe} = M \omega + \frac{3}{2} (i_d^2 + i_q^2) R + \frac{3}{2} \frac{U_o^2}{R_c} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (2.23)$$

Підставивши (2.22) в (2.23) при $i_d = 0$ та $U_o^2 = u_d^2 + (u_q - i_q R)^2$, отримаємо значення еквівалентного опору, що характеризує втрати в сталі

$$R_c = \frac{u_d^2 + (u_q - i_q R)^2 - \omega_e^2 \left(\psi_{pm}^2 + (L_q^2 - L_d L_q) i_q^2 \right)}{u_q i_q - \omega_e \psi_{pm} i_q - i_q^2 R}. \quad (2.24)$$

При застосуванні цієї формули використано паспортні данні (R, L_d, L_q, ψ_{pm}) та результати експериментальних досліджень, що полягають у серії запусків СДПМ до різних значень швидкості.

Отриманий за такою методикою графік залежності та його апроксимація функцією

$$R_c = \frac{R_{co} \omega_e L_c}{R_{co} + \omega_e L_c},$$

яка отримана з (1.7), наведено на рис. 2.38. Символом «*» відмічені табличні точки, а неперервною лінією – значення апроксимуючого виразу при $R_{co}=5200$ Ом, $L_c=3,9$ Гн.

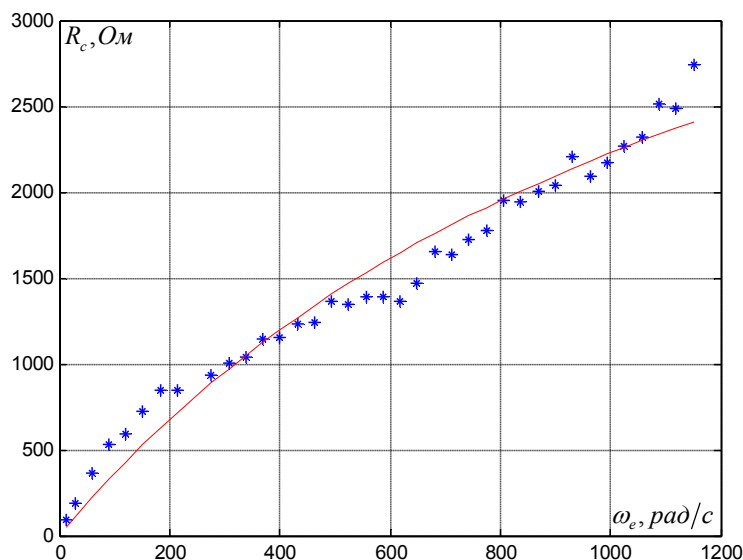


Рисунок 2.38. – Залежність значення еквівалентного опору R_c від електричної кутової швидкості ротора

З рис. 2.38 можливо побачити чітку залежність еквівалентного опору втрат в сталі від робочої швидкості, що дозволяє підтвердити раніше зроблені твердження. Враховуючи, що робота здійснюється на холостому ході, ефект магнітного насичення не повинен істотно впливати на результати.

На рис. 2.39-2.41 зображено залежності складових втрат та сумарних втрат в двигуні, що розглядається, від робочої швидкості та поздовжньої складової струму статора при моменті, що дорівнює максимального припустимому для навантажувального двигуна. Для їх побудови було використано паспортні дані та результати розрахунку R_c . Наведені графіки дозволяють попередньо оцінити можливості підвищення ефективності системи при використанні оптимальних за втратами в двигуні систем керування.

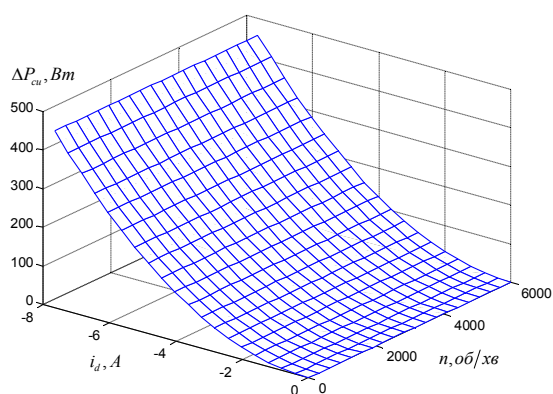


Рисунок 2.39. – Залежність втрат в міді від швидкості та поздовжньої складової струму статора для досліджуваного двигуна

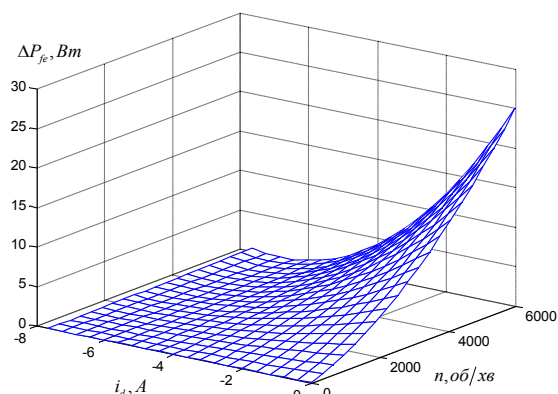


Рисунок 2.40. – Залежність втрат в сталі від швидкості та поздовжньої складової струму статора для досліджуваного двигуна

З рис. 2.39 можна бачити, що мінімум втрат в міді майже не залежить від швидкості, що поряд з низьким впливом втрат в сталі також вказує на несуттєву реактивну складову в результуючому електромагнітному моменті двигуна. Це призводить до того, що стратегія керування ММА/МВМ не дозволяє суттєво підвищити ефективність системи порівняно з стратегією керування – підтримка поздовжньої складової на нульовому рівні.

В свою чергу, як можна побачити з рис. 2.40. мінімум втрат в сталі може бути досягнутий або при великому значенні струму, або при швидкості значно більшій за номінальну. Ці особливості вносять обмеження на використання даної стратегії на експериментальній установці, що пов'язано з максимально припустимим струмом перетворювача та вимірювальних приладів і поверхневим розташуванням магнітів на роторі.

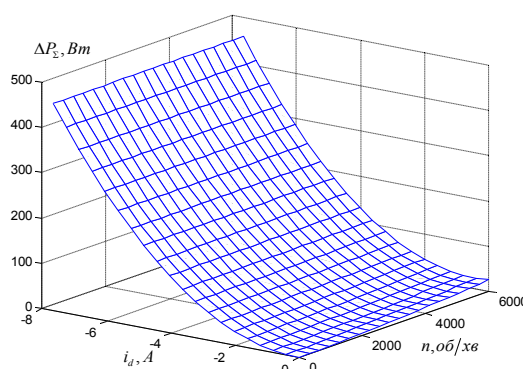


Рисунок 2.41. – Залежність сумарних втрат від швидкості та поздовжньої складової струму статора для досліджуваного двигуна

З рис. 2.39-2.41 видно, що досягнення мінімумів втрат можливо, як і зазначалося раніше, за рахунок вибору значення поздовжньої складової (або її моментоутворюючої частини). Принципово, кожен з типів втрат має свій мінімум. Внаслідок своєї конструкції основним компонентом сумарних втрат є саме втрати в міді. Тому мінімуми поверхонь втрат в міді та сумарних втрат досить близькі.

Для реалізації системи оптимального керування СДПМ, порівняно з традиційною системою, необхідно перейти до регулювання частин складових струму (i_{do}, i_{qo}) та сформулювати завдання на поздовжню складову у відповідності до виразу (2.12). Однак особливістю системи комплектного електроприводу є неможливість внесення змін у структуру системи керування, що веде до необхідності використання стороннього перетворювача частоти з вільно програмованою системою керування.

Для реалізації розроблених систем оптимального керування СДПМ було використано мікропроцесорний контролер DS1104 фірми dSpace разом з типовою силовою частиною перетворювача частоти та необхідними вимірювальними приладами. Технічні характеристики контролера DS1104 наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики контролера DS1104

Компонент контролера	Технічні дані
Основний процесор	64-бітовий процесор MPC8240 із плаваючою точкою Частота ЦПУ 250 МГц
АЦП із 4 мультимплексними каналами	Розрядність – 16 біт Аналоговий діапазон – ± 10 В Час перетворення – 2 мкс
АЦП із 4 незалежними каналами	Розрядність – 12 біт Аналоговий діапазон – ± 10 В Час перетворення – 800 нс
ЦАП з 8 незалежними каналами	Розрядність – 16 біт Аналоговий діапазон – ± 10 В Час перетворення – 2 мкс
Цифровий ввід/вивід	20 паралельних ліній Макс. вихідний струм – ± 5 мА TTL -рівень сигналу
Допоміжний сигнальний процесор	16-бітовий процесор TMS32F240 із фіксованою точкою Частота – 20 МГц
Широтно-імпульсний вихід	1 канал із трифазною ШІМ 4 канали з однофазною ШІМ
Цифровий ввід/вивід	14 паралельних ліній Макс. вихідний струм – ± 13 мА TTL -рівень сигналу
Живлення контролера	+ 5 В $\pm 5\%$, 2,5 А + 12 В $\pm 5\%$, 0,3 А – 12 В $\pm 5\%$, 0,2 А
Споживана потужність	18,5 Вт

Контролер являє собою пристрій, який встановлюється в гніздо PCI-шини стандартного комп'ютера, і може програмуватися за допомогою пакета Matlab та його додатку Simulink.

DS1104 має в своєму складі два мікропроцесора: PowerPC 603e (виробництва Motorola) та TMS320F240 (Texas Instruments).

Для керування контролером та візуалізації необхідних процесів використано спеціалізовано програмне забезпечення Control Desk.

Вимірювання значень струму статора виконано на основі датчиків, що функціонують за принципом ефекту Холла (виробництво LEM). Всі датчики мають струмовий вихід. Далі здійснюється перетворення вторинних струмових сигналів датчиків в сигнали до відповідного рівня напруги. Для фільтрації та зниження впливу перешкод отриманий сигнал усереднюється шляхом інтегрування за інтервал дискретності функціонування перетворювачів.

Програмування контролера DS1104 виконано в пакеті Matlab/Simulink відповідно до принципів побудови вдосконаленої системи векторного керування СДПМ та реалізації розроблених алгоритмів оптимального керування.

Для простоти та отримання найкращих характеристик регулювання швидкості та струмів СДПМ виконано у вигляді однієї задачі. Програмний дозвіл на виконання даного переривання реалізується за рахунок розміщення функціонального блоку DS1104SLAVE_PWMINT в основному вікні моделі пакета Matlab/Simulink (рис. 2.42).

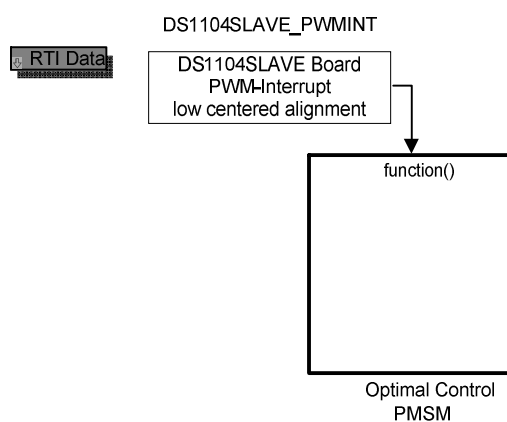


Рисунок 2.42. – Програмна реалізація задачі оптимального керування СДПМ контролером DS1104

Даний блок входить до складу бібліотеки реального часу контролера DS1104, яка підключається до пакету Matlab при інсталяції програмного забезпечення контролера.

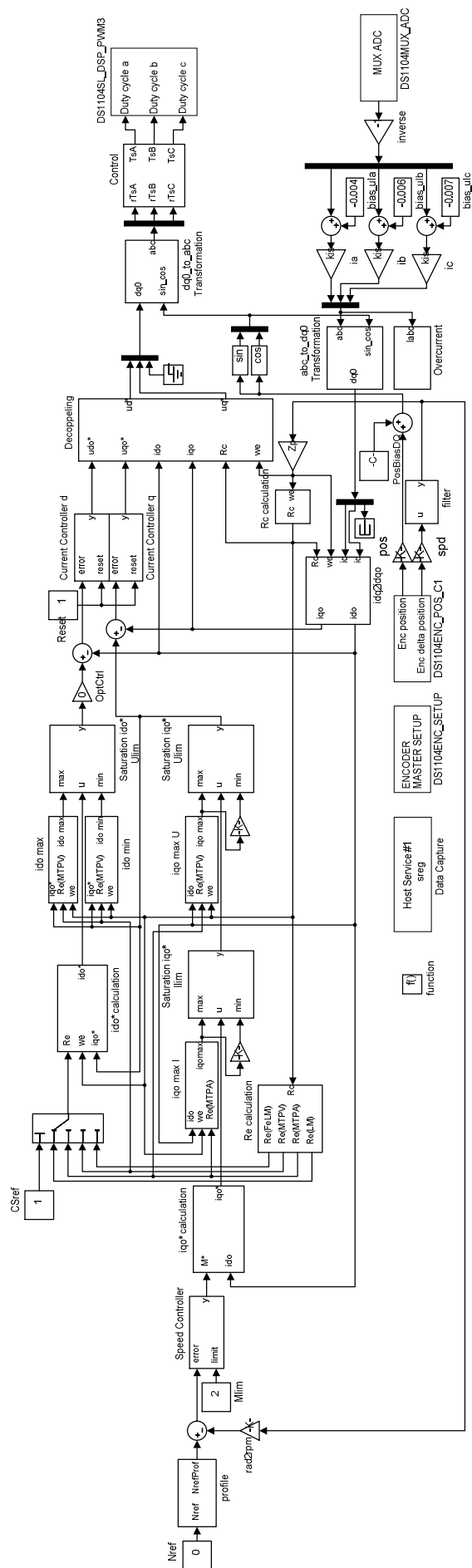
Вміст підсистеми «Optimal Control PMSM» наведено на рис. 2.43. Дана модель побудована на основі функціональної схеми системи оптимального керування СДПМ (рис. 2.23).

Блок DS1104MUX_ADC (рис. 2.43) використовується для отримання інформації стосовно фазних струмів від пристрою вимірювань. Налаштування нульового рівня виконується за рахунок підбору зсувів: “bias_uIa”, “bias_uIb”, “bias_uIc”. Масштабування сигналів фазних струмів здійснюється завданням коефіцієнтів “ia”, “ib”, “ic”. Від вказаних блоків інформація щодо фазних струмів поступає до блоку “abc_to_dq0 Transformation”, який здійснює перетворення з трьохфазної до двофазної системи координат, що обертається. Даний блок разом з блоком “dq0_to_abc Transformation”, який виконує зворотне перетворення, є стандартним блоком бібліотеки “Power System Blockset”.

Значення кутового положення та швидкості двигуна отримується з енкодера, встановленого на валу навантажувального двигуна, за допомогою блоку DS1104ENC_POS_C1. Для попереднього налаштування енкодера до програми додано блок DS1104ENC_SETUP.

Керування інвертором напруги здійснюється за рахунок блоку DS1104SL_DSP_PWM3, який передає дані щодо відносної тривалості фазних імпульсів перетворювача до контролера DS1104.

У схемі (рис. 2.43) також використано підсистему “Overcurrent”, яка реалізує максимальний струмовий захист силовій частині перетворювача частоти. Для цього абсолютні значення фазних струмів порівнюються з максимально допустимим струмом. При перевищенні хоча б одним із струмів максимального значення відповідний вихід одного з компараторів впливає на функціональний блок контролера DS1104 “simState_SET”, що призводить до зупинки процесу регулювання.



Вибір бажаної стратегії керування здійснюється за допомогою блоку “CSRef”, який керує роботою перемикача, що дозволяє обирати значення еквівалентного опору (блок “Re calculation”).

Граничні значення поздовжньої та поперечної складових струму статора розраховуються в блоках “ido max”, “ido min” та “iqo max I”, “iqo max U” згідно з виразами (2.16)-(2.19) відповідно.

При проведенні експериментальних досліджень частота комутації ключів АІН була задана рівною 8 кГц. Налаштування контурів системи виконувалось у відповідності до методу подвійних пропорцій та з урахуванням наявності фільтру в каналі зворотного зв'язку за швидкістю.

В режимі холостого ходу сумарні втрати обумовлені майже повністю втратами в сталі. Однак під навантаженням переважну частину сумарних втрат складають втрати в міді, що підтверджує раніше зроблені припущення.

На рис. 2.44 показані перехідні процеси, які отримані у випадку застосування стратегії керування «Мінімізація сумарних втрат». З рис. 2.44 видно, що застосування оптимальної, з точки зору мінімуму втрат в двигуні, системи керування не впливає на динамічні характеристики електроприводу. При використанні алгоритму керування МСВ поздовжня складова зменшується в від'ємному напрямку, що відповідає даній стратегії керування. Також на рис. 2.44 в можна побачити, що в даному випадку відбувся перерозподіл складових втрат: втрати в сталі зменшилися, а втрати в міді дещо збільшилися. Однак, внаслідок раніше розглянутих особливостей досліджуваного СДПМ, суттєвого зменшення втрат в двигуні при використанні стратегії керування МСВ не помітно.

На рис. 2.45 наведено графіки роботи системи векторного керування при використанні стратегії ММА/МВМ. Звідси видно, що як і передбачалося раніше, дана стратегія керування досить близька до алгоритму керування – підтримка поздовжньої складової на нульовому рівні. Однак можна побачити зменшення поздовжньої складової у від'ємному напрямку в процесу розгону та під навантаженням, що відповідає ММА/МВМ.

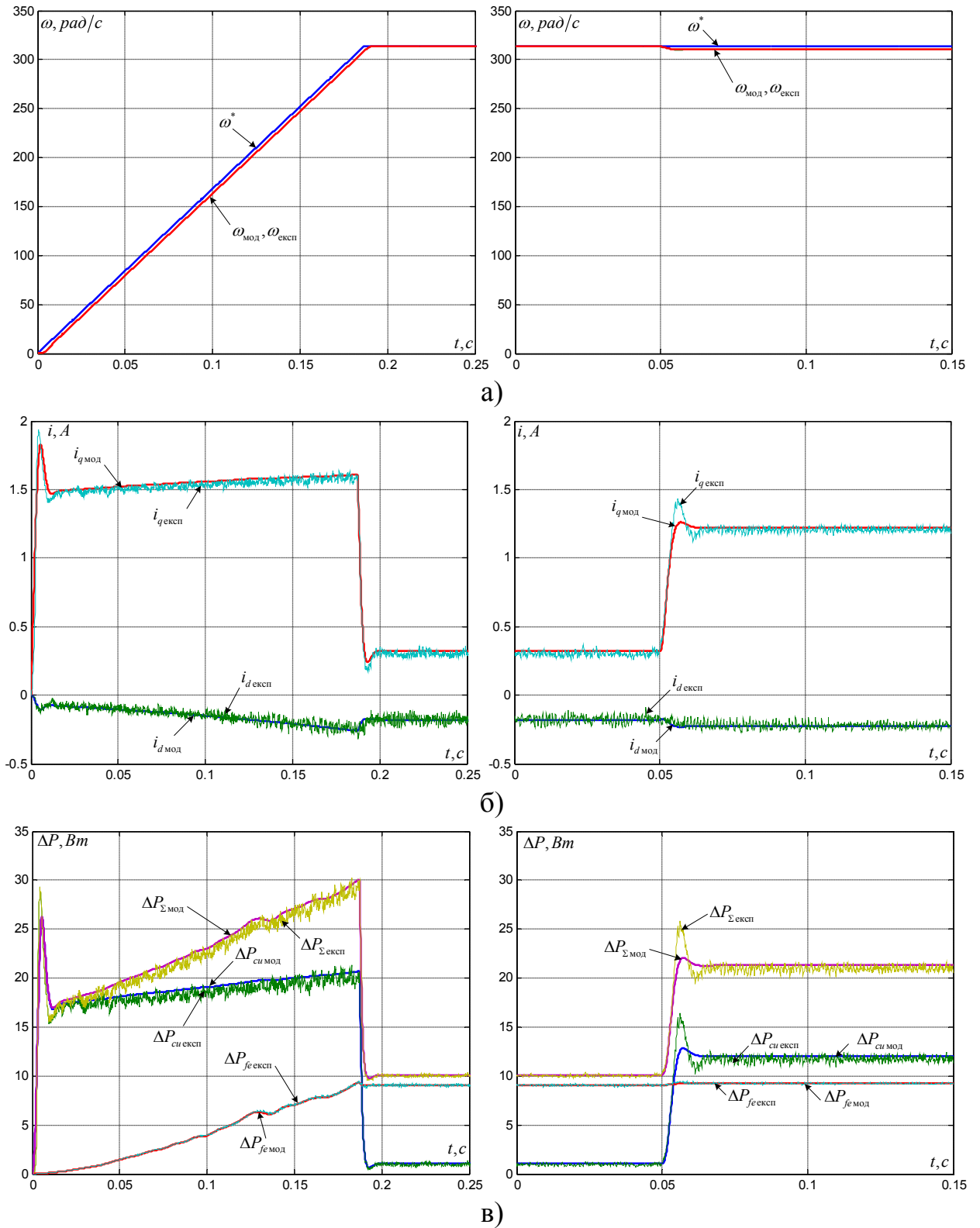


Рисунок 2.44. – Перехідні процеси оптимальної системи керування в режимі розгону та під навантаженням при стратегії керування МСВ: а) швидкість двигуна; б) складові струму статора; в) втрати в двигуні

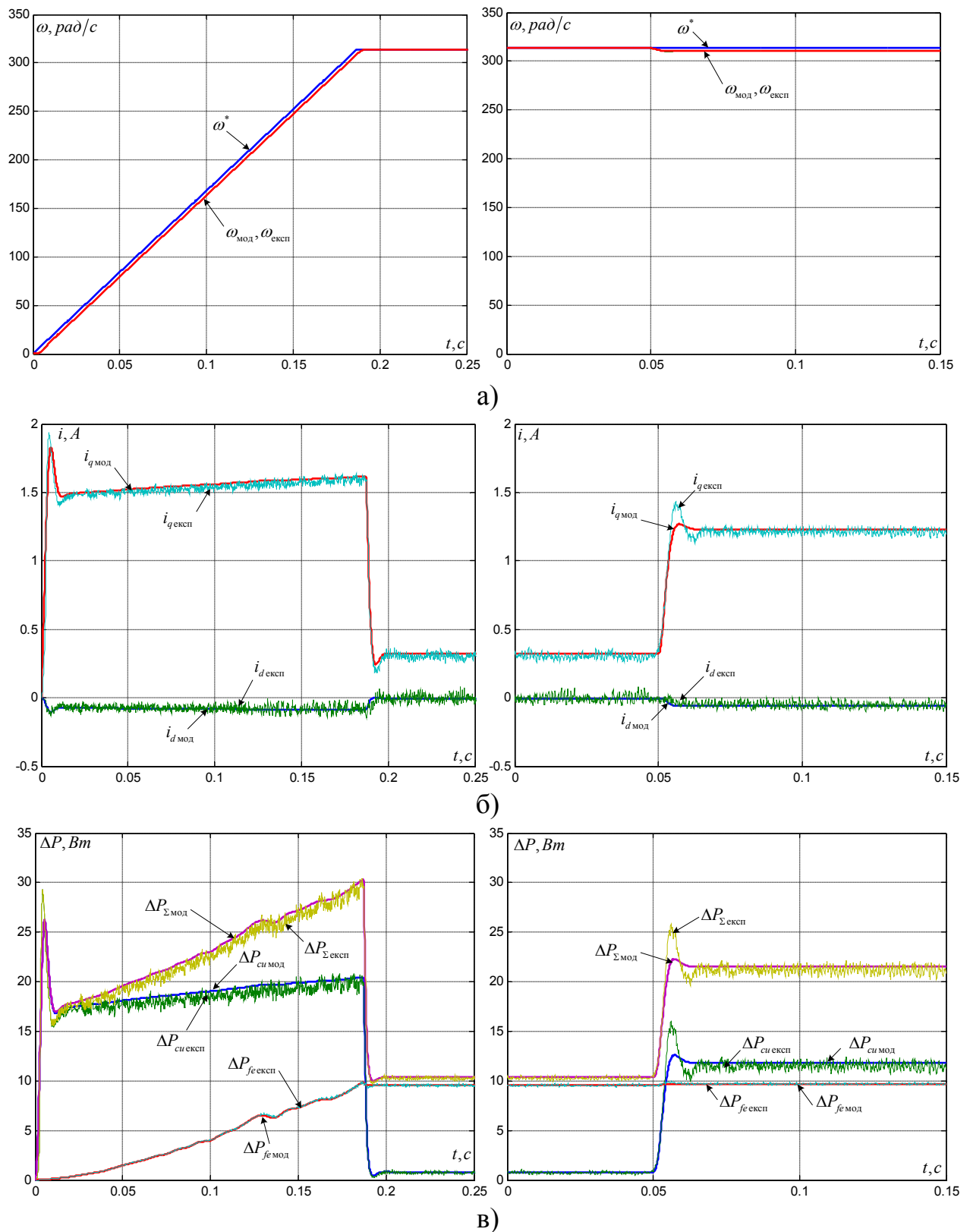


Рисунок 2.45. – Перехідні процеси оптимальної системи керування в режимі розгону та під навантаженням при стратегії керування ММА/МВМ:

а) швидкість двигуна; б) складові струму статора; в) втрати в двигуні

Висновки до розділу 2

Аналіз СДПМ довів, що досягнення бажаного критерію оптимальності можливо за рахунок регулювання поздовжньої складової струму статора i_{do} .

В загальному випадку стратегії керування «Максимальний момент на ампер» (ММА) і «максимальний момент на вольт» (ММВ) залежать від робочої швидкості, що пов'язано з наявністю втрат в сталі.

Використання стратегій керування «Мінімізація втрат в міді» (ММВ) і «Мінімізація втрат в сталі» (МВС), порівняно з «Максимальний момент на ампер» (ММА) / «Мінімізація втрат в міді» (МВМ) і «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ), призводить до суттєвого зниження ККД системи.

При роботі на швидкостях, які не перевищують номінальну, стратегії керування «Максимальний момент на ампер» (ММА) / «Мінімізація втрат в міді» (МВМ) і «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ) забезпечують близькі результати, що пов'язано з превалюванням в цьому діапазоні втрат в міді. Однак застосування стратегії «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ) в порівнянні з «Максимальний момент на ампер» (ММА) / «Мінімізація втрат в міді» (МВМ) все ж дозволяє знизити сумарні втрати на (1,5-7)% та підвищити ККД системи, приблизно на (0,2-1)%.

Ефективність застосування алгоритму керування «Мінімізація сумарних втрат», по відношенню до сумарних втрат в СДПМ, значно зростає із збільшенням робочої швидкості. У випадку двох номіналів швидкості сумарні втрати порівняно зі стратегією керування «Максимальний момент на ампер» зменшуються на (12-25)%, що призводить до зростання ККД системи на (2-3)%.

Використання оптимальних стратегій керування не впливає на динамічні та статичні характеристики системи векторного керування при недосягненні рівнів обмеження на координати електроприводу.

Для гарантованого забезпечення обмеження напруги в динаміці рекомендується все ж таки знизити рівень обмеження на (10-20)%.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Загальні положення

Метою даного розділу є виявлення діючих на людину при роботі на об'єкті небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які в певних випадках можуть привести до травм і професійних захворювань.

Специфічна особливість роботи на морському транспорті, різноманітність технічних засобів і висока насиченість ними сучасних суден вимагають глибоких і твердих знань в області охорони праці, що дозволяють попередити нещасні випадки і професійні захворювання моряків, а також швидко і вміло орієнтуватися в складних умовах морського плавання [3, 11].

Вплив виробничого середовища в процесі трудової діяльності обумовлюється:

- ступенем механізації, автоматизації, герметичності обладнання;
- характером праці;
- санітарними умовами праці (забруднення повітря пилом або газами, шум, вібрація, різні випромінювання).

Суднова електроенергетична система призначена для вироблення, передачі і розподілу між споживачами електроенергії, складається з великої кількості різноманітних технічних засобів та пристроїв, які несуть з собою практично весь комплекс небезпек і шкідливостей, в тій чи іншій мірі загрожують здоров'ю людини.

При проектуванні суднових пристроїв і систем необхідно керуватися нормативними документами. Ці документи регламентують конкретні вимоги безпеки, що враховують призначення судна і його устаткування [6].

У разі неполадок з автоматизацією вахтове місце електромеханіка переноситься з містка в ЦПУ, тому нижче проведений аналіз умов праці обслуговуючого персоналу в приміщеннях, де розміщується проектоване електрообладнання і з'являються шкідливі фактори, що впливають на персонал.

Не менш важливим завданням є охорона навколишнього середовища. Тому необхідно виявити джерела забруднення навколишнього середовища судном і визначити заходи для ліквідації джерел забруднення.

3.2. Аналіз умов праці вахтового електромеханіка в приміщенні ЦПУ

Приміщення ЦПУ знаходиться в безпосередній близькості з машинним відділенням. Тому при розгляді шкідливих факторів необхідно враховувати джерела, що знаходяться не тільки в ЦПУ, але і в машинному відділенні [11, 18].

Джерелом шкідливих факторів в приміщенні ЦПУ є розподільні мережі і кабелі, які викликають:

- електромагнітні випромінювання;
- підвищену пожежонебезпеку;
- можливість ураження електричним струмом.

У свою чергу машинне відділення, через наявність в ньому головного і допоміжного двигунів, генераторів, вентиляторів, насосів, є джерелом вібрації і шуму, а також створює небезпеку теплового травматизму та інших перерахованих вище факторів.

Можна сказати, що з втратою автоматизації класу AUT 1, судно переходить на автоматизацію AUT 2 з вахтою електромеханіка в приміщенні ЦПУ.

Приміщення ЦПУ призначене для установки в ньому контрольно-вимірювальних приладів, органів управління ГЕУ, ДГА, ГРЩ. ЦПУ повинен бути надійно захищений від впливу джерел надлишкового тепла, підвищених шумів і вібрацій, обладнаний системою кондиціонування повітря, так як в ньому постійно знаходиться вахтовий електрик.

ЦПУ є щит з похило розташованими панелями; висота з боку робочого місця становить 700 мм, що зручно для роботи.

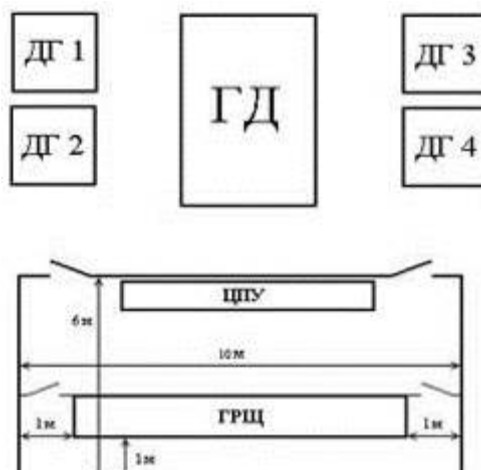


Рисунок 3.1. - Схема приміщення ЦПУ

ЦПУ відноситься до спеціальних електричних приміщень, тобто двері закриваються на замок і відкриваються назовні; проводиться постійна вентиляція; в такому приміщенні виключена можливість концентрації газів, парів води, мастила і палива, кислотних випарів. З передньої сторони ГРЩ є прохід шириною більше 2 м, а з заднього боку - 1 м, з обох сторін встановлені діелектричні поручні. Простір позаду ГРЩ з відкритими струмоведучими частинами, обмежена і забезпечена дверима.

3.2.1. Електробезпека при експлуатації електростанції

Електробезпека займає особливе місце серед інших питань безпеки та охорони праці, так як ураження електричним струмом нерідко призводить до смертельного результату. Ураження електричним струмом відбувається при зіткненні людини з струмоведучими частинами електричної установки, що знаходиться в цей момент під напругою. Нерідко причинами нещасних випадків є несправність ізоляції, внаслідок чого, нетоковедучі частини установок (корпус) можуть опинитися під напругою [11].

При огляді електричних машин необхідно звертати особливу увагу на стан опору ізоляції машини і її грілок; на з'єднання проводів і кабелів; на огорожу струмоведучих і огорожувальних частин; на наявність і справність заземлення.

При проектуванні СЕС необхідно передбачити заходи безпеки людини, оцінюючи можливу величину струму, що проходить через тіло людини, в разі дотику до струмоведучих частин установки, що знаходяться під напругою. На судні лінійна напруга $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, мережа трифазного змінного струму з ізольованою нейтраллю. дані генератора: МСК-103-4 ($P = 200 \text{ кВт}$, $U = 400 / 230 \text{ В}$, $n = 1500 \text{ об / хв}$, $\text{ККД} = 90.5\%$).

ЦПУ за характером приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою. Згідно з вимогами Правил Регістру на судні передбачені заходи щодо запобігання небезпеки ураження електричним струмом, до них відносяться:

- електрообладнання в ЦПУ виконано в морському виконанні;
- контроль опору ізоляції проводиться мегомметром та ПКІ;
- двері ГРЩ, кришки РЩ, блоків автоматики забезпечені захисним блокуванням;
- на ГРЩ встановлені поручні з діелектричного матеріалу;
- струмопровідні шини, заземлюючі з'єднання пофарбовані у відповідні кольори;
- заземлені металеві частини електрообладнання;
- приміщення ЦПУ забезпечено знаком небезпеки;
- є в наявності ізолюючі засоби захисту;
- діелектричні рукавички, інструменти з ізольованими рукоятками, діелектричні черевики;
- підлога в ЦПУ біля ГРЩ покрита спеціальними гумовими килимками.

3.2.2. Заходи щодо захисту рідких і газоподібних речовин від статичної електрики

Електризація відбувається тим інтенсивніше, чим вище електричний опір рідини або менше їх електрична провідність. Рідини виявляють сильну електризацію, коли електрична провідність їх не перевищує 10^{-9} Ом*см . Низькокиплячі вуглеводні електризується слабкіше, ніж висококиплячі. Наявність

в нафтопродуктах неелектропровідних домішок, газів, повітря значно посилює їх електризацію.

Інтенсивність електризації прямо пропорційна швидкості подачі рідкого нафтопродукту. Швидкість накопичення зарядів, що утворюються при перекачуванні нафтопродуктів, становить від одного до декількох мікрокулонов на 1 л.

Найбільша електризація спостерігається в трубопроводах, виготовлених з низьковуглецевих сталей. Шорсткість поверхні трубопроводів призводить до завихрень рідини при її русі, через що посилюється електризація нафтопродукту.

Як показує практика, електризація рідини виникає і посилюється лише в деяких найбільш сприятливих для електризації місцях (клапани, насоси, зміни перетину трубопроводу). На інших ділянках електризована рідина або втрачає свої заряди, або тільки зберігає отриманий заряд. Знаючи витрату нафтопродукту, кількість перекачаного продукту в одиницю часу і величину опору, можна з достатньою практичною точністю визначити потенціал в вольтах, що виникає на приймальній ємності:

$$V = Q \cdot R = q \cdot M \cdot R,$$

де q - швидкість електризації або заряд електрлізуємості продукту, Кл / л;

M - кількість перекачаного продукту, л;

R - опір струмопровідного з'єднання між ємністю і наповнювачем, Ом.

Для попередження накопичення статичної електрики необхідно:

- не допускати забруднення нафтопродуктів колоїдними розчинними матеріалами (гумою, асфальтом і ін.);
- видаляти залишки води після очищення ємностей і трубопроводів;
- вентилювати ємності з нафтопродуктами для видалення вибухонебезпечної суміші горючих речовин з повітрям.

При наповненні ємностей слід завантажувальні труби доводити до днища. Завантаження виробляти через отвори з великим поперечним перерізом, не допускаючи дотику струменя рідини зі стінками ємності з поверхнею рідини. При завантаженні в порожню ємність, а також якщо випускається отвір

завантажувального патрубку неможливо занурити в рідину заповнення слід проводити зі швидкістю, що не перевищує 0,5-0,7 м / с.

Введення до складу нафтопродуктів антистатичних присадок підвищує їх електропровідність, а отже, послаблює небезпечні прояви статичної електризації.

Зливні гумові шланги з металевими наконечниками для наливу в бочки повинні бути заземлені мідним дротом, оповитий по шлангу зовні з кроком 0,1 м або пропущеного всередині, з припаюванням одного кінця до металевих частин продуктопроводу, а іншого - до наконечника шланга. Наконечники шлангів повинні застосовуватися з металу (бронза, алюміній), що не дає іскри при ударі.

Відбір проб рідин з ємностей (резервуарів) під час їх заповнення або спорожнення забороняється. Відбір проб слід проводити лише після того, як рідина прийде в спокійний стан.

3.2.3. Небезпеки механічного та теплового травматизму

Можливість отримання травм механічного та теплового характеру в ЦПУ пов'язано з недотриманням техніки безпеки при експлуатації електрообладнання. За вимогами Регістру передбачені засоби захисту від механічного та теплового травматизму - огорожувальні пристрої від попадання людини в небезпечну зону. Так як ЦПУ та інші приміщення судна схильні хитавиці, то приміщення повинні бути обладнані поручнями. Тепловий травматизм пов'язаний з наявністю нагрітих частин. За ГОСТ 12.4.026-93 використовуються попереджувачі знаки небезпеки.

3.2.4. Пожежна безпека

За ступенем пожежонебезпеки приміщення ЦПУ відповідає категорії П - пожежонебезпечна. За статистичними даними основні причини пожеж в приміщеннях СЕУ в процентному співвідношенні складають:

- несправність або перевантаження електророзподільних пристроїв і кабельних мереж - 25%;

- несправність ГА і газових траків двигунів - 20%;
- займання палива і масла від нагрітих поверхонь або під дією відкритого полум'я - 25%;
- ремонтні роботи (зварювання, газорізання і нагрів) і порушення правил технічної експлуатації - 30%.

Найбільших збитків можуть принести пожежі, що охоплюють значну частину одного або декількох приміщень.

Причинами займання можуть бути:

- однофазне замикання через залишковий опір;
- електрична дуга;
- коротке замикання.

Для підтримки високої пожежної безпеки необхідно контролювати стан ізоляції СЕС в цілому, а також вибірково. З цією метою на судні використовується прилад типу ПКІ, а також передбачається чітке виконання правил техніки безпеки, тобто наявність відповідного обладнання та підтримання його в порядку.

Пожежна безпека повинна забезпечуватися як в робочому, так і в аварійному стані об'єкта. Для виявлення пожежі застосовується система з тепловими сповіщувачами - легкозаймистими вставками, як найбільш дешева і зручна. Так як в ЦПУ знаходяться струмопровідні шини та кабелі, а також комутаційна апаратура, то для гасіння пожежі застосовується система вуглекислотного пожежогасіння.

Для гасіння пожеж в ЦПУ використовуються первинні засоби пожежогасіння (вогнегасник - пінний хімічного типу ОХП - 10, вуглекислотні типу ОУ - для гасіння електроустановок під напругою).

На перекриттях між ПУ і розташованими над ним приміщеннями встановлена ізоляція протипожежна типу А -15, тобто захист виконано відповідно до вимоги Правил Регістру.

Прокладка кабелів по верхній палубі в районі вантажних танків передбачена в сталевих трубах, що захищають їх від механічних пошкоджень. Кріплення трас

кабелів виконано за допомогою кабельних підвісок, одиночних кабелів на скобах-мостах; в місцях можливих пошкоджень кабелі захищені металевими кожухами або прокладені в трубах. Прохід кабелів через водо- і газонепроникні переборки і палуби здійснюється через кабельні коробки, ущільнюються компаундом або через індивідуальні сальники.

Металеві корпуси електричних машин і апаратів, що працюють при напрузі понад 30 В, електрично з'єднані з корпусом судна за допомогою заземлюючих перемичок з міді або латуні. Передбачене заземлення корпусу судна на береговий заземлюючий пристрій.

3.2.5. Мікроклімат і шкідливі домішки в приміщенні ЦПУ

Мікрокліматичні умови в приміщенні ЦПУ визначаються ГОСТ12.1.005 - 88, які встановлюють загальні санітарно - гігієнічні вимоги до температури, вологості, швидкості руху повітря.

У приміщенні ЦПУ переважаючим шкідливим фактором є надмірне тепловиділення. Воно виникає від безпосередньої близькості машинного відділення, де встановлені генератори і дизелі. Повітря в приміщенні також містить такі шкідливі домішки, як вуглеводні ($\text{ГДК} = 5 \text{ мг / л}$), що усувається роботою припливно-витяжної вентиляції. Також в приміщенні ЦПУ встановлена система кондиціонування повітря, яка забезпечує нормовані параметри стану повітряного середовища і система електроопалення з використанням низькотемпературних нагрівачів.

3.2.6. Вібрація і шум

Машинне відділення через наявність в ньому двигунів, генераторів і допоміжних механізмів є джерелом вібрації і шуму. Вібрація і шум шкідливо впливають на здоров'я людей, і погіршує умови праці. Вібрація, в свою чергу, може привести до порушення нормальної роботи механізмів, приладів та іншого

обладнання.

Рівень шуму регламентується санітарними нормами ДСН 3.3.6.037 - 99, а загальні вимоги безпеки по ГОСТ 12.1.003 - 85. Для зниження шуму, що виникає при роботі ДГА, використовуються звукоізолюючі переборки між ЦПУ і МВ, для ефективності вона покрита звукопоглинальним матеріалом. При цьому рівень шуму не повинен перевищувати норм. Обсяг автоматизації судна відповідає класу А1. Воно обладнується системами автоматизації в обсязі, що дозволяє виробляти дистанційне автоматизоване управління головними механізмами. ЦПУ обладнаний пристроями індикації та аварійно-попереджувальною сигналізацією.

Для локалізації структурних шумів огорожувальні конструкції ЦПУ виконуються із застосуванням шумоізолюючих покриттів, а також проводиться герметизація дверей, отворів в місцях проходів кабелів і труб.

Параметри вібрації на судах нормуються відповідно до вимоги ДСН 3.3.6.039 - 99, а загальні вимоги безпеки по ГОСТ 12.1.012 - 90.

Обмеження поширення вібрацій від джерел в приміщенні ЦПУ досягається за допомогою віброізолюючих засобів, до яких відносяться віброізолюючі фундаменти, гнучкі патрубки, прокладки з гуми і пластмаси. Для віброізоляції механізмів використовуються амортизатори типу АКСС - І. Для захисту організму людини від шкідливого впливу вібрації в приміщенні ЦПУ застосовуються такі засоби: вібродемпфуючі килимки з мілкопористої гуми.

3.2.7. Освітлення

Для нормальної роботи обслуговуючого персоналу в приміщенні ЦПУ потрібно безперервне штучне освітлення в будь-який час доби, з оптимальною освітленістю. У приміщенні ЦПУ освітлення здійснюється комбінованим способом. Крім рівномірного освітлення (загального) всього приміщення робочі поверхні додатково висвітлюються окремими світильниками (місцеве освітлення).

У Правилах Регістру вказується мінімальна освітленість. Додаткові вимоги, що пред'являються до штучного освітлення:

- рівномірна освітленість робочих місць;
- стабільність напруги мережі;
- відсутність різних тіней на робочих поверхнях;
- обмеження сліпучої дії;
- обмеження відбивного блиску.

В залежності від призначення застосоване на судах електричне освітлення підрозділяється на наступні системи:

- загальне освітлення (рівномірне або локалізоване);
- комбіноване, що складається із загального та місцевого;
- переносне освітлення, як різновид місцевого, що забезпечує підвищення освітленості на робочих місцях під час огляду і ремонту обладнання.

Згідно "Норм штучного освітлення" на судах морського флоту мінімальна освітленість в приміщеннях ЦПУ на шкалах приладів при освітленні люмінесцентними лампами становить 300 лк.

3.2.8. Шкідливі випромінювання

Так як в сферу обслуговування електромеханіка входить все електрообладнання судна, то частина робочого часу він може знаходитися під електромагнітним випромінюванням.

Застосовувані на судні засоби радіозв'язку і радіонавігації, є джерелами потужних електромагнітних випромінювань. Електромагнітні поля радіочастот несприятливо впливають на здоров'я екіпажу. Суднові радіостанції є джерелами високочастотного випромінювання (ВЧ), а радіолокаційні станції - джерелами надвисокочастотного випромінювання (НВЧ).

Біологічний ефект впливу електромагнітних полів визначається інтенсивністю випромінювання (щільністю потоку енергії), частотою коливань, спрямованістю електромагнітного потоку в просторі, відстанню між випромінювачем і людиною, а також індивідуальними особливостями організму.

Найбільш надійним і допустимим засобом захисту від шкідливого впливу

електромагнітних випромінювань є екранування джерел випромінювання та об'єктів, що захищаються.

Для екранування робочих місць застосовуються екрани з листового матеріалу товщиною не менше 0,5 мм. Оглядові вікна та інші отвори в перегородках і подволоки екрановані густою металевою сіткою з розмірами вічок, що не перевищують 0,1 довжини хвилі.

Всі фідерні лінії, що несуть струм по робочих контурах, кабелі виконані коаксіальним проводом, що виключає необхідність їх екранування.

3.3. Розрахунок освітлення в ЦПУ

У разі класу автоматизації AUT 1 запуск головного двигуна можливий з містка, але не виключені випадки несення ваhti в приміщенні ЦПУ. Для визначення необхідної кількості світильників в ЦПУ зробимо розрахунок використовуючи наступну залежність:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot F_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \gamma},$$

де E_n - рівень мінімальної освітленості для приміщення ГРЩ ($E_n = 300\text{лк}$);

S - площа приміщення ($S = 60 \text{ м}^2$);

K_3 - коефіцієнт запасу для люмінесцентних ламп ($K_3 = 1,3$);

Z - коефіцієнт нерівномірності освітлення ($Z = 1$);

n - кількість ламп в одному світильнику ($n = 2$);

$F_{\text{л}}$ - світловий потік лампи світильника (для типу ЛБ40 $F_{\text{л}} = 2480\text{лм}$);

η - коефіцієнт використання світлового потоку ($\eta = 0,9$);

γ - коефіцієнт нерівномірності освітлення ($\gamma = 0,8$).

$$N = \frac{300 \cdot 60 \cdot 1,3 \cdot 1}{2 \cdot 2480 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 6 \text{ світильників.}$$

Таким чином, в приміщенні ЦПУ необхідно розмістити 6 світильників для забезпечення мінімально допустимого рівня освітленості. Також є необхідним розміщення джерел місцевого освітлення - настільних ламп на деяких панелях і

письмових столах.

План розміщення світильників наведено на рис. 3.2.

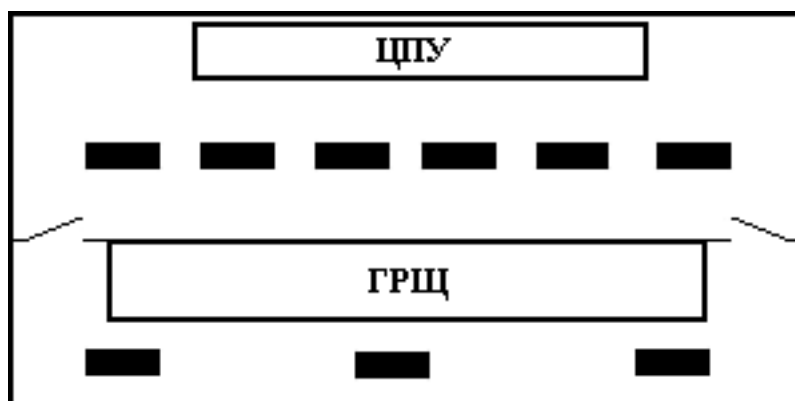


Рисунок 3.2. - План розміщення світильників в ЦПУ

РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ДО ОБЛАДНАННЯ І ПРИСТРОЇВ СУДЕН ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ СТІЧНИМИ ВОДАМИ

4.1. Загальні положення

1.1.1 Ця частина Правил поширюється на обладнання і пристрої суден, призначені для запобігання забрудненню стічними водами, і застосовується в повному обсязі до наступних суден:

- .1 до нових суден валовою місткістю 400 і більше;
- .2 до нових суден валовою місткістю менше 400, яким дозволяється мати на борту більше 15 осіб;
- .3. з 01 серпня 2010 року - до існуючих суден валовою місткістю 400 і більше;
- .4 з 01 серпня 2010 року - до існуючих суден валовою місткістю менше 400, яким дозволяється мати на борту більше 15 осіб.

1.1.2 Існуючі судна, зазначені в 1.1.1.3 і 1.1.1.4, кілі яких були закладені або які перебували в подібній стадії побудови до 2 жовтня 1983 року, для скидання стічних вод повинні бути обладнані, наскільки можливо, щоб відповідати вимогам 1.1.4.

1.1.3 На судна, не зазначені в 1.1.1, обсяг виконання вимог розділу 2 цієї частини Правил устанавлюється за погодженням з Регістром у кожному конкретному випадку з урахуванням вимог 1.1.4.

1.1.4 З урахуванням виключень, передбачених 1.1.5, скидання в море стічних вод забороняється, крім випадків, наведених у 1.1.4.1 і 1.1.4.2.

1.1.4.1 Скидання стічних вод з суден, що не є пасажирськими суднами, у всіх районах та скидання стічних вод з пасажирських суден за межами особливих районів дозволяється, якщо:

- .1 судно скидає здрібнені та знезаражені стічні води на відстані більше 3 морських миль від найближчого берега, використовуючи систему, схвалену

Регістром відповідно до 2.1.1.2, або скидає не здрібнені та не знезаражені стічні води на відстані більше 12 морських миль від найближчого берега за умови, що в кожному разі накопичені в збірних танках стічні води скидаються не миттєво, а поступово, коли судно перебуває в дорозі, маючи швидкість не менше 4 вузлів. Судновласником повинний бути наданий на розгляд Регістру розрахунок інтенсивності скидання стічних вод. Цей розрахунок повинний бути складений на основі нормативів, розроблених Організацією і схвалений Регістром; або

.2 на судні діє схвалена установка для обробки стічних вод (див. 2.3.10), на яку є Свідоцтво Адміністрації, яке підтверджує, що ця установка відповідає експлуатаційним вимогам, передбаченим згідно 2.1.1.1 і стік стічних вод не дає видимих плаваючих твердих часток і не викликає зміни кольору навколишньої води;

.3 положення пунктів 1.1.4.1.1 і 1.1.4.1.2 не застосовуються до суден, що експлуатуються в водах, які знаходяться під юрисдикцією будь-якої держави, і відвідуючим суднам з інших держав, коли вони знаходяться в цих водах і скидають стічні води відповідно до менш суворих вимог, які можуть бути встановлені цією державою.

1.1.4.2 Скидання стічних вод з пасажирських суден у межах особливого району забороняється, за виключенням випадків, оговорених в .3:

.1 для нових пасажирських суден з 1 червня 2019 року або після цієї дати;

.2 для існуючих пасажирських суден з 1 червня 2021 року або після цієї дати;

.3 якщо на судні діє установка для обробки стічних вод згідно 2.1.1.1 і 2.3, і стік не дає видимих плаваючих часток і не викликає зміни кольору навколишньої води.

Дати початку застосування вимог щодо інших, ще не призначених особливих районів, будуть визначені ІМО відповідно до Правил 13.2 Додатку IV до Конвенції МАРПОЛ.

1.1.4.3 Якщо стічні води змішані з відходами або іншими забрудненими водами, на які поширюються інші положення цих Правил, на додаток до вимог зазначених виконуються також інші вимоги Правил.

1.1.4.4 Інтенсивність скидання стічних вод повинна бути визначена на основі максимальної літньої осадки судна і максимальній експлуатаційній швидкості судна.

Якщо стічні води будуть скидатися із збірного танка за допомогою насоса, що має фіксовану подачу, повинні бути передбачені засоби для забезпечення подачі, що відповідає інтенсивності скидання при швидкості судна 4 вузлів або при конкретній мінімальній швидкості судна, що перевищує 4 вузли.

Якщо подача насоса стічних вод може бути змінною, то інтенсивність скидання може бути збільшена до максимального розрахункового значення, що відповідає максимальній літній осадці судна і максимальній експлуатаційній швидкості судна за рахунок збільшення подачі насоса за умови, що швидкість судна при цьому відповідає максимальній інтенсивності скидання.

При відсутності на борту судна вищевказаного розрахунку і засобів забезпечення скидання необроблених стічних вод відповідно до схваленої інтенсивності скидання (насосів з відповідною фіксованою або змінною подачею, запірною або регулюючою арматурою, тощо), скидання необроблених стічних вод в дозволених для скидання районах забороняється відповідно до 1.1.4.1.1.

У цьому випадку всі стічні води повинні накопичуватися в збірних танках і здаватися в приймальні споруди. При цьому факт скидання необроблених стічних вод в дозволених районах без виконання вищевказаних заходів повинен розцінюватися як порушення вимог цієї частини Правил.

1.1.5 Вимоги 1.1.4 і 1.1.6 не застосовуються до наступних випадків скидання стічних вод із судна:

.1 з метою забезпечення безпеки судна і людей, що перебувають на його борту, або порятунку людського життя на морі; або

.2 у результаті пошкодження судна або його обладнання за умови, що до та після випадку пошкодження були прийняті всі розумні запобіжні заходи для запобігання або зведення до мінімуму такого скидання.

1.1.6 Скидання стічних вод в полярних водах.

1.1.6.1 Полярні води означають арктичні води і/або район Антарктики.

Район Антарктики означає морський район до півдня від паралелі 60° південної широти.

Район арктичних вод означає морський район як він визначений в Правилі 17 Додатку IV до Конвенції МАРПОЛ.

1.1.6.2 У районі Антарктики і в арктичних водах будь-яке скидання в море стічних вод забороняється, за виключенням випадків, коли таке скидання виконується згідно з 1.1.5 і наступними вимогами:

.1 судно скидає здрібнені та незаражені стічні води згідно з 1.1.4.1.1 на відстані більше 3-х морських миль від будь-якого шельфового льодовика або припаю і знаходиться настільки далеко, наскільки це можливо виконати, від районів, де згуртованість льоду перевищує 1/10; або

.2 судно скидає не здрібнені та не незаражені стічні води згідно з 1.1.4.1.1 на відстані більше 12 морських миль від будь-якого шельфового льодовика або припаю і знаходиться настільки далеко, наскільки це можливо виконати, від районів, де згуртованість льоду перевищує 1/10; або

.3 на судні діє схвалена установка для обробки стічних вод (див. 2.3.10), на яку є Свідоцтво Адміністрації, яке підтверджує, що ця установка відповідає експлуатаційним вимогам, передбаченим згідно 2.1.1.1 або 2.1.2.1, і судно виконує скидання стічних вод згідно з 1.1.4.1.2 та знаходиться настільки далеко, наскільки це можливо виконати, від найближчого берега, будь-якого шельфового льодовика, припаю або районів, де згуртованість льоду перевищує 1/10.

1.1.6.3 Будь-яке скидання в море стічних вод забороняється із суден категорії А і В, які знаходяться на стадії побудови 1 січня 2017 року або після цієї дати і усіх пасажирських суден, які знаходяться на стадії побудови 1 січня 2017

року або після цієї дати, за виключенням випадків, коли такі скидання відповідають вимогам 1.1.6.2.3.

1.1.6.4 Незважаючи на вимоги 1.1.6.2, судна категорій А і В, які протягом тривалого часу експлуатуються в районах, де згуртованість льоду перевищує 1/10, можуть виконувати скидання стічних вод лише з використанням схваленої установки для обробки стічних вод (див. 2.3.10), на яку є Свідоцтво Адміністрації, яке підтверджує, що ця установка відповідає експлуатаційним вимогам, передбаченим згідно з 2.1.1.1 або 2.1.2.1. Такі скидання стічних вод підлягають схваленню Адміністрації.

Загальні положення про порядок нагляду за обладнанням і пристроями, призначеними для обробки стічних вод, їхнім виготовленням і наглядом, а також вимоги до технічної документації, що представляється на розгляд Регістру по судну в цілому, і вказівки про документи, які видаються Регістром на судна, викладені в розділі Загальні положення цих Правил і в:

Загальних положеннях класифікаційної та іншої діяльності;

Правилах огляду суден (ПОС);

Правилах технічного нагляду за побудовою суден і виготовленням матеріалів і виробів (ПТНП);

Керівництві з огляду морських суден в експлуатації (КОМСЕ).

Технічному нагляду Регістра при виготовленні підлягають:

.1 установки для обробки стічних вод, включаючи стосовні до них трубопроводи, насоси, електричне обладнання, пристрої, що дозують, пристрої для знезаражування, пристрої для керування, регулювання і контролю;

.2 системи для здрібнювання і знезаражування стічних вод;

.3 збірні цистерни, включаючи стосовні до них обладнання, пристрої для керування, регулювання і контролю.

При монтажі на судні нагляду Регістра підлягають:

.1 установки для обробки стічних вод;

.2 системи для здрібнювання і знезаражування стічних вод;

.3 збірні цистерни;

.4 обладнання і система трубопроводів для видалення стічних вод.

На розгляд Регістру повинна бути представлена наступна технічна документація по обладнанню і пристроях:

.1 креслення збірної танка (танків) стічних вод і розрахунок його місткості;

.2 схема системи трубопроводів здавання стічних вод у приймальні споруди;

.3 документація установки для обробки стічних вод:

технічний опис і принцип роботи;

креслення загального вигляду установки;

розрахунок пропускної здатності установки;

схема систем трубопроводів установки із вказівкою обслуговуючих механізмів;

принципова електрична схема;

схеми керування, регулювання, контролю, сигналізації і захисту;

програма випробувань установки.

.4 креслення і схеми систем для здрібнювання і знезаражування стічних вод.

4.2. Установки і обладнання для збирання, зберігання, обробки і видалення стічних вод

Кожне судно, від якого відповідно до 1.1.1 і 1.1.2 вимагається виконання положень цієї частини Правил, повинне обладнуватися однією з наступних систем каналізації:

.1 установкою для обробки стічних вод типу, схваленого Регістром у відповідності зі стандартами й методами випробувань, розробленими Організацією (див. 2.3.10); або

.2 системою здрібнювання і знезаражування стічних вод, схваленою Регістром. Така система обладнується засобами, що задовольняють вимогам цієї

частини Правил, для тимчасового зберігання стічних вод, коли судно перебуває на відстані меншій 3 морських миль від найближчого берега; або

.3 збірними танками місткістю, що задовольняє вимогам цієї частини Правил, для зберігання усіх стічних вод, звертаючи увагу на експлуатацію судна, кількість людей на борту та інші відповідні фактори.

Збірні танки повинні мати конструкцію, що задовольняє вимогам 2.2, і повинні мати засіб візуальної індикації обсягу їх вмісту.

У порядку відступу від вимог 2.1.1 кожне пасажирське судно, яке згідно з 1.1.1 і 1.1.2 повинне відповідати положенням цієї частини Правил і до якого застосовуються вимоги 1.1.4.2, коли воно знаходиться у межах особливого району, повинне бути обладнане однією із наступних систем стічних вод:

.1 установкою для обробки стічних вод типу, схваленого Регістром у відповідності зі стандартами і методами випробувань, розробленими Організацією (див. 2.3.10.2); або

.2 збірними танками місткістю, що задовольняє вимогам цієї частини Правил, для зберігання усіх стічних вод, звертаючи увагу на експлуатацію судна, кількість людей на борту та інші відповідні фактори.

Збірні танки повинні мати конструкцію, що задовольняє вимогам 2.2, і повинні мати засіб візуальної індикації обсягу його вмісту.

Трубопроводи, електричне обладнання і пристрої автоматизації для морських суден і суден змішаного плавання (море-ріка) повинні відповідати вимогам частин VIII «Системи і трубопроводи», XI «Електричне обладнання» і XV «Автоматизація» Правил класифікації та побудови морських суден;

Обладнання для збирання, зберігання, обробки і видалення стічних вод на плавучих бурових установках (ПБУ), морських стаціонарних платформах (МСП) і плавучих нафтогазодобувних комплексах (ПНК) повинне задовольняти вимогам «Правил класифікації, побудови та обладнання плавучих бурових установок і морських стаціонарних платформ» і вимогам Адміністрації.

Збірні цистерни. Регістру повинний бути представлений, погоджений із замовником, розрахунок сумарної місткості збірних цистерн із урахуванням

вимог Адміністрації до розрахункової кількості стічних вод, передбачуваного району і режиму експлуатації судна і числа людей на борту.

Збірні цистерни можуть бути вкладними або убудованими. Конструктивні елементи збірних цистерн повинні відповідати:

для морських суден, включаючи судна районів плавання R2-RSN і R3-RSN - вимогам частини II «Корпус» Правил класифікації та побудови морських суден;

для суден змішаного плавання (ріка-море) - вимогам частини II «Корпус» Правил класифікації та побудови суден змішаного плавання;

Збірні цистерни повинні бути виготовлені зі сталі. Внутрішні поверхні цистерн повинні бути гладкими (за винятком убудованих цистерн), захищеними від впливу середовища, з ухилом днища убік зливальних труб. Збірні цистерни повинні мати горловини, а також повинні бути обладнані пристроями для промивання водою і пропарювання. Рекомендуються пристрої для спучування стічних вод. . Кожна збірна цистерна повинна бути обладнана повітряними трубами.

Збірні цистерни повинні бути відділені кофердами від цистерн питної, мийної і котельної води, рослинного масла, а також від житлових, службових (господарських) і вантажних приміщень.

Збірні цистерни допускається розміщати без кофердамів у машинних і вантажних приміщеннях, якщо останні не призначені для перевезення харчової сировини і продуктів.

Допускається розташовувати збірну цистерну в окремому приміщенні зі штучною витяжною вентиляцією.

Збірні цистерни повинні бути випробувані пробним тиском, рівним 1,5 тиску водяного стовпа, обмірюваного від днища цистерни до нижнього санітарного приладу, що не має запору на відливному трубопроводі, але не менше 25кПа.

Установки для обробки стічних вод.

Пропускна здатність установки для обробки стічних вод у л/добу повинна визначатися за формулою:

$$Q = n q \quad ,$$

де: n - число людей; q - добова витрата стічних вод на одну людину, л (приймається за діючими нормами).

Конструкція установок для обробки стічних вод повинна забезпечувати надійну роботу при нахилі на кут 15° у будь-якій площині від нормального положення. Конструкція електричних пристроїв для керування, сигналізації і захисту установок для обробки стічних вод і елементи, які застосовуються для виготовлення цих пристроїв, повинні бути придатні для тривалої роботи в умовах вібрації із частотою:

від 2 до 13,2 Гц при амплітуді ± 1 мм і

від 13,2 до 80 Гц із амплітудою прискорення $\pm 0,7g$.

Установка для обробки стічних вод, усі стосовні до неї насоси та інше комплектувальне обладнання, трубопроводи і арматури, що стикаються зі стічними водами, повинні бути надійно захищені від їхнього агресивного впливу.

Установки для обробки стічних вод повинні забезпечувати ступінь очищення відповідно до діючих міжнародних норм.

Установки для обробки стічних вод повинні бути випробувані на щільність.

Трубопроводи повинні бути випробувані пробним гідравлічним тиском $p_{np} = 1,5p$, де p - робочий тиск.

Установки для обробки стічних вод повинні бути випробувані на підприємстві-виробникові або на судні за схваленою Регістром програмою.

Установки для обробки стічних вод допускається розміщати в машинних приміщеннях або в окремих приміщеннях зі штучною витяжною вентиляцією.

Повинна бути передбачена ефективна система промивання і знезаражування установки, механізмів і трубопроводів, що обслуговують її для виконання робіт, пов'язаних з перевіркою або ремонтом установки.

Трубопроводи стічних вод від шпігатів судових приміщень до установок для обробки стічних вод і збірних цистерн повинні бути оснащені пристроями, що виключають проникнення запаху від необроблених стічних вод у судові приміщення.

Для обладнання судна допускається застосовувати установки для обробки стічних вод типу, схваленого Регістром і Адміністрацією у відповідності зі стандартами і методами випробувань, прийнятими Організацією:

резолуцією МЕРС.159(55): «Переглянуте керівництво по здійсненню стандартів стоку і проведення робочих випробувань установок для обробки стічних вод» і з 01 січня 2016 року - резолюцією МЕРС.227(64) «Керівництво 2012 року з здійснення стандартів стоку і проведення робочих випробувань установок для обробки стічних вод» з поправками, прийнятими резолюцією МЕРС.284(70), а також резолюцією МЕРС.2(УІ) у випадках наведених нижче.

Вимоги резолюції МЕРС.227(64) з поправками, за виключенням вимог 4.2 цієї резолюції, повинні застосовуватися до установок для обробки стічних вод, встановлених 1 січня 2016 року або після цієї дати*:

- .1 на суднах, інших ніж пасажирські, у всіх районах; і
- .2 на пасажирських суднах за межами особливих районів згідно переглянутого Додатку ІУ до Конвенції МАРПОЛ.

Вимоги резолюції МЕРС.227(64) з поправками, з урахуванням вимог 4.2 цієї резолюції, будуть застосовуватися до установок для обробки стічних вод:

- .1 на нових пасажирських суднах (див. 1.2), що знаходяться в особливому районі Балтійського моря з яких передбачається скидання оброблених стічних вод в морі, 1 червня 2019 року або після цієї дати; і

- .2 на існуючих пасажирських суднах (див. 1.2), інших ніж вказаних в підпункті .3 нижче, що знаходяться в особливому районі Балтійського моря з яких передбачається скидання оброблених стічних вод в море, 1 червня 2021 року або після цієї дати; і

- .3 1 червня 2023 року - на існуючих пасажирських суднах (див. 1.2), які здійснюють прямі рейси із портів, що знаходяться за межами особливого району, в порти, які знаходяться до сходу від 28°10' східної довготи в межах особливого району, або в зворотньому напрямку і не здійснюють заходи в будь-які інші порти в межах особливого району, з яких передбачається скидання оброблених стічних вод в море.

Установки для обробки стічних вод, встановлених до 1 січня 2016 року і 1 січня 2010 року або після цієї дати на судах, інших ніж пасажирські, що здійснюють плавання в особливих районах згідно переглянутого Додатку IV до Конвенції МАРПОЛ і з яких передбачається скидання оброблених стічних вод в море, повинні відповідати вимогам резолюції МЕРС.159(55).

Установки для обробки стічних вод, встановлених до 1 січня 2010 року на судах, інших ніж пасажирські, що здійснюють плавання в особливих районах згідно переглянутого Додатку IV до Конвенції МАРПОЛ і з яких передбачається скидання оброблених стічних вод в море, повинні відповідати вимогам резолюції МЕРС.2(VI).

Системи для здрібнювання і знезаражування стічних вод.

Системи для здрібнювання і знезаражування стічних вод повинні забезпечувати здрібнювання твердих часток, що утримуються в них, до розмірів, які не перевищують 25 мм.

Системи повинні забезпечувати ступінь очищення стічних вод відповідно до діючих міжнародних норм.

Обладнання для видалення стічних вод.

Для видалення стічних вод із збірних цистерн необхідно передбачити два насоси.

Замість одного з насосів допускається установка ежектора.

З урахуванням призначення судна і умов його експлуатації, за погодженням з Регістром, може бути допущений один насос (ежектор).

Кожне судно повинне бути обладнане трубопроводом для здавання стічних вод у приймальні споруди.

Трубопровід повинний бути виведений на обидва борти. Трубопровід може бути виведений на один борт, за умови можливості видачі стічних вод на обидва борти.

Вивідні патрубки повинні встановлюватися в зручних для приєднання шлангів місцях і повинні бути обладнані зливальними з'єднаннями із фланцями

відповідно до рис. 4.1, а також повинні мати відмітні планки. Вивідні патрубки повинні бути обладнані глухими фланцями.

У районі розташування вивідних патрубків повинне бути обладнане місце спостереження і дистанційного відключення засобів, що відкачують, або передбачений ефективний зв'язок (радіо- або телефонний) між місцем спостереження за скиданням і місцем керування засобами, що відкачують.

Пуск і зупинка засобів, що відкачують, повинні виконуватися вручну.

Запірна арматура трубопроводів скидання стічних вод повинна мати можливість опломбування.

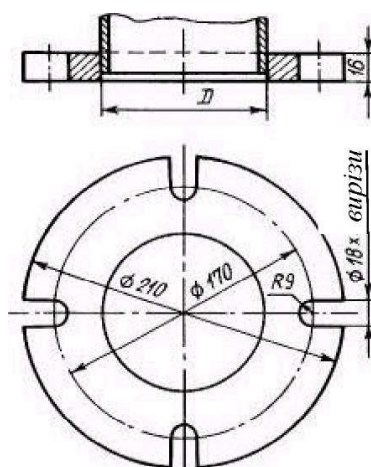


Рис. 4.1. Фланець

Фланець призначений для труб із внутрішнім діаметром до 100мм і виготовляється із сталі або еквівалентного матеріалу із плоскою торцевою поверхнею. Цей фланець разом з відповідною ущільнювальною прокладкою розраховується на робочий тиск 0,6МПа. Для суден, що мають теоретичну висоту борту 5,0м або менше, внутрішній діаметр зливального з'єднання може бути 38мм. З'єднання здійснюється за допомогою чотирьох болтів необхідної довжини, діаметром 16мм.

4.3. Контрольно – вимірювальні пристрої

Збірні цистерни повинні бути обладнані сигналізацією, що подає світлову і звукову сигналізацію у рульову рубку і центральний пост керування по

досягненню 80% їх заповнення, а також повинні мати ефективні засоби візуальної індикації об'єму їхньої місткості.

У якості ефективних засобів візуальної індикації об'єму місткості збірних танків стічних вод можуть використовуватися електронні засоби для визначення рівня стічних вод у будь-який момент часу.

Установка для обробки стічних вод повинна бути обладнана пристроєм для добору проб очищених і знезаражених вод.

При цьому точка для добору проб на трубопроводі із установки повинна бути розташована згідно 5.5.2 «Керівництва 2012 року з здійснення стандартів стоку і проведення робочих випробувань установок для обробки стічних вод», наведеного в резолюції МЕРС.227(64) з поправками, прийнятими резолюцією МЕРС.284(70).

4.4. Вимоги до суден, які експлуатуються у межах акваторії порта, і при плаванні на внутрішніх водних шляхах

4.1 Портові судна і плавзасоби повинні бути обладнані збірною цистерною або цистернами відповідно до вимог 2.1.3, 2.2 і 3.1, а також трубопроводом для здавання стічних вод у приймальні споруди. Вихідні патрубки повинні відповідати вимогам 2.5.2.

4.2 На плавучих доках трубопровід для здавання стічних вод у приймальні споруди повинний бути виведений у ніші вище стапель-палуби з обох бортів і не повинний перешкоджати нормальній роботі в доці. Вихідні патрубки повинні відповідати вимогам 2.5.2.

За погодженням з Регістром на плавзасобах, крім плавучих доків, трубопровід для здавання стічних вод у приймальні споруди може бути виведений на один борт.

4.3 Для здавання стічних вод у приймальні споруди повинний бути передбачений незалежний насос (ежектор).

4.4 Пуск і зупинка засобів, що відкачують, повинні відповідати вимогам 2.5.2.

За погодженням із Регістром на суднах і плавзасобах довжиною менше 24м може не обладнуватися місце спостереження за скиданням і дистанційним відключенням засобів, що відкачують, а також може не передбачатися зв'язок між місцем спостереження за скиданням і місцем керування засобами що відкачують. При цьому у всіх випадках повинні бути вжиті заходи, що виключають можливість скидання цих вод за борт.

4.5 Стоянкові судна повинні відповідати вимогам 4.1- 4.4.

4.6 Стоянкові судна можуть бути обладнані установками для обробки стічних вод, які задовольняють вимогам розділу 2.3. При цьому ступінь очищення повинний забезпечуватися відповідно до діючих національних норм.

4.8 При плаванні суден на внутрішніх водних шляхах з використанням установок для обробки стічних вод, ступінь очищення стічних вод повинний відповідати вимогам частини XIV «Засоби щодо запобігання забрудненню з суден» Правил класифікації та побудови суден внутрішнього плавання, а при експлуатації на Європейських внутрішніх водних шляхах - відповідним національним нормам.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що системи керування СДПМ потребують удосконалення, спрямованого на поліпшення енергетичних показників. Такого удосконалення можна досягти шляхом врахування втрат в сталі при синтезі системи векторного керування та стратегій оптимального керування, спрямованих на мінімізацію втрат в двигуні, а також отримання аналітичних залежностей, які дозволили би підвищити ефективність оптимізації та створили передумови до адаптації системи при зміні параметрів об'єкту керування.

2. Використання класичної системи векторного керування при наявності суттєвих втрат в сталі призводить до відпрацювання завданого електромагнітного моменту з похибкою величина якої залежить від швидкості електроприводу та величини бажаного моменту. Усунути цей недолік можливо за рахунок переходу від регулювання повних складових струму статора до регулювання складових їх частин, які приймають участь у створенні магнітного потоку. При роботі від задатчика інтенсивності обидві системи забезпечують потрібний момент, однак у класичній системі це пов'язано з підвищенням теплових втрат в двигуні. Результати моделювання показали, що застосування запропонованої системи дозволяє підвищити ефективність приблизно на (0,5-3)%.

3. При роботі на швидкостях, що не перевищують номінальну, стратегії керування «Максимальний момент на ампер» і «Мінімізація сумарних втрат» забезпечують досить близькі результати. Однак застосування останньої все ж дозволяє підвищити сумарний ККД системи приблизно на (0,2-1)%. Ефективність застосування алгоритму керування «Мінімізація сумарних втрат», по відношенню до сумарних втрат в СДПМ, значно зростає із збільшенням робочої швидкості. У випадку двох номіналів швидкості порівняно зі стратегією керування «Максимальний момент на ампер» сумарні втрати зменшуються на (12-25)%, що призводить до зростання ККД системи на (2-3)%.

4. Залежність між складовими струму статора, що дозволяє узагальнити розроблені стратегії оптимального керування, може використовуватись, як для СДПМ, так і для синхронного реактивного двигуна. Причому, вибір бажаної стратегії керування здійснюється шляхом зміни тільки одного параметра.

5. Обмеження керуючих впливів відповідно до знайдених в роботі виразів дозволяє усунути вихід координат, що обмежуються, за допустимі значення в статичних режимах і значно зменшити похибку в динамічних режимах. Для гарантованого забезпечення обмеження напруги в динаміці рекомендується все ж таки знизити рівень обмеження на (10-20)% у відношенні до розрахункових значень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бешта О.С. Обґрунтування доцільності використання синхронних двигунів з постійними магнітами з вбудованими магнітами / О.С. Бешта, О.В. Балахонцев, С.Г. Фурса // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – №4(63). – Ч.2. – С. 73-75.
2. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
3. Гандзюк М.П. Основи охорони праці. К.: Каравела, 2005. – 408 с.
4. Дьяконов В.П. Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
5. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник / В.П. Дьяконов. – Санкт-Петербург: Питер, 2002. – 528 с.
6. Закони України Про охорону праці: Закон України / Відомості Верховної Ради України. - 1992. - № 49, - Ст. 668.
7. Зменшення пульсацій моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна з вбудованими постійними магнітами / О.С. Бешта, С.Г. Фурса, А.І. Прохоров, О.В. Балахонцев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – №11(186). – С. 54-59.
8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 1987. – 248 с.
9. Корельский Д.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. / Д.В.Корельский, Е.М.Потапенко, Е.В.Васильева // “Радіоелектроніка. Інформатика. Управління”. – 2001. – № 2. – С. 155-159.
10. Коцегуб П.Х. Синтез вентильних приводів постійного струму: [Навч. посібник] / Павло Харитонович Коцегуб – Київ: ІЗМН, 1997. – 122 с.

11. Международная конвенція з охорони людського життя на морі - СОЛАС - 74 (SOLAS - 74), вид. 2008.
12. Международная конвенція про запобігання забруднення моря - МАРПОЛ - 73/78, вид. 2004.
13. Меньков А.В. Теоретические основы автоматизированного управления / А.В. Меньков, В.А. Острейковский. – Москва: Оникс, 2005. – 640 с.
14. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы / И.В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.
15. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В.М. Перельмутер. – Х. : Основа, 2004. – 210 с.
16. Пересада С.М. Векторное управление скоростью асинхронного двигателя при максимизации соотношения момент–ток в условиях токового управления / С.М. Пересада, С.С. Дымко // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2012. – КрНУ. – Вип. 3/2012 (19). – С. 56–60.
17. Пересада С.М. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент–ток / С.М. Пересада, С.С. Дымко // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2011. – КрНУ. – Вип. 3/2011 (15). – С. 16–20.
18. Правила пожежної безпеки на морських суднах України, НАПБ.Б. 01.013 - 2007. - Київ: Основа, 2007.
19. Розробка синхронного двигуна з постійними магнітами мінімальної вартості / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, С.Г. Фурса та ін. // Матеріали міжнародної конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – №28. – С. 426-427.
20. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л. Симоненкова. – Минск: ООО «Новое издание», 2007. – 393 с.
21. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : [учебник для студ. высш. учеб. заведений] / Георгий

- Георгиевич Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
22. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : [учебник для студ. высш. учеб. заведений] / Георгий Георгиевич Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
 23. Толочко О.И. Анализ систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при регулировании скорости вверх от номинальной / О.И. Толочко, В.В. Божко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – Харків: НТУ «ХПІ». - №28. – С. 149-152.
 24. Толочко О.І. Аналіз впливу перехресних зв'язків в системі векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2009. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 9 (158). – С. 21-24.
 25. Толочко О.І. Визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами / О.І. Толочко, Є.О. Вареник, В.В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. - Київ: «Техніка». - №03(79). – С. 72-74.
 26. Толочко О.І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ампер / О.І. Толочко, В.В. Божко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – 2010. – Донецк: ООО «АИР». – С. 242- 247.
 27. Толочко О.І. Ідентифікація індуктивностей синхронного двигуна з постійними магнітами рекурентним методом найменших квадратів / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2012. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. №1 (12)-2(13). – С. 234-238.

28. Толочко О.І. Особливості векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами при урахування втрат в сталі / О.І. Толочко, В.В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. - КрНУ – Вип. 3/2012 (19). – С. 45-47.
29. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2011. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 11 (186). – С. 392-395.
30. Трандафилов В.Н. Идентификация момента инерции электропривода ненормированным градиентным методом / В.Н Трандафилов, В.В. Божко, О.И. Толочко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2011. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 10 (180). – С. 194-199.
31. Akatsu, K. Impact of Flux Weakening Current to the Iron Loss in an IPMSM Including PWM Carrier Effect / Kan Akatsu, Katsuyuki Narita, Yoshiyuki Sakashita, Takashi Yamada // Energy Conversion. – 2009. – P. 1927 - 1932.
32. Bazzi, A.M. Comparative Evaluation of Machines for Electric and Hybrid Vehicles Based on Dynamic Operation and Loss Minimization / Ali M. Bazzi, Philip T. Krein // Energy Conversion. – 2010. – P. 3345 - 3351.
33. Boldea, Ion. Electric Drives: [Second Edition] / Ion Boldea, Syed A. Nasar. – USA: CRC Press, 2005. – 544 p.
34. Bose, Bimal K. Modern power electronics and AC drives / Bimal Bose. – New Jersey : Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
35. BSH Servo motor : Motor manual [V2.03]. – Schneider Electric, 2012. – 99 p.
36. Chomat, Miroslav. Electric machines and drives / Miroslav Chomat. – Rijeka : InTech, 2011. – 262 p.
37. Chunting, Mi. Modeling of Iron Losses of Permanent-Magnet Synchronous Motors / Mi Chunting, Gordon R. Slemon, Richard Boner // Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, №3. – P. 734 – 742.

38. De Doncker, Rik. Advanced electrical drives: Analysis, modeling, control / Rik De Doncker, Duco W.J. Pulle, Andre Veltman. – Springer, 2011. – 455 p.
39. Demmelmayr, F. Advantages of PM-machines Compared to Induction Machines in Terms of Efficiency and Sensorless Control in Traction Applications / Florian Demmelmayr, Markus Troyer, Manfred Schroedl // Industrial Electronics. – 2011. – P. 2762 – 2768.
40. DS1104 R&D Controller Board : Features. – Paderborn: dSpace GmbH, 2004. – 100 p.
41. DS1104 R&D Controller Board : Hardware Installation and Configuration. – Paderborn: dSpace GmbH, 2004. – 170 p.
42. DS1104 R&D Controller Board : RTI Reference. – Paderborn: dSpace GmbH, 2004. – 92 p.
43. DS1104 R&D Controller Board : RTLlib Reference. – Paderborn: dSpace GmbH, 2004. – 366 p.
44. Fan, JinXin. Core Loss Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Based on Experimental Test Curves / JinXin Fan, ChengNing Zhang, HuiJun Wang // Electromagnetic Field Computation. – 2010. – P. 1.
45. Freere, P. Design and evaluation of current controllers for PMSM drives / P. Freere, P. Pilla // Industrial Electronics. – 1990. – Vol. 2. – P. 1193 - 1198.
46. Giera, Jacek F. Permanent magnet motor technology / Jacek F. Giera, Mitchell Wing. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. – 611 p.
47. Gieras, Jacek F. Axial flux permanent magnet brushless machines / Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper. – Springer, 2008. – 357 p.
48. Hao, Shunghui. Closed-loop parameter identification of permanent magnet synchronous motor considering nonlinear influence factors / Shuanghui Hao, Jinghe Shi, Minghui Hao, Yoshio Mizugaki // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing. – 2010. – Vol.4, №6. – P. 1157 – 1165.
49. Husson, Rene. Control methods for electrical machines. – NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 374 p.

50. Itoh, J.-I. A Comparison between V/f Control and Position-Sensorless Vector Control for the Permanent Magnet Synchronous Motor / Jun-Ichi Itoh, Naofumi Nomura, Hiroshi Ohsawa // Power Conversion. – 2002. – Vol. 3. – P. 1310 - 1315.
51. Jahns, Thomas M. Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives / Thomas M. Jahns, Gerald B. Kliman, Thomas W. Neumann // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. IA-22, № 4. – P. 738 – 737.
52. Jannot, X. Analytical Computation of Stator Iron Losses in Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine / X. Jannot, J.-C. Vannier, A. Kedous-Lebouc, C. Marchand, M. Gabsi, J. Saint-Michel // Electrical Machines. – 2010. – P. 1 - 6.
53. Junaid, I. Improved model of the iron loss for the permanent magnet synchronous motors / Ikram Junaid, Junaid Qudsia, Byung-il Kwon // Electrical Machines and Systems. – 2010. – P. 1246 - 1251.
54. Kettlewell, J.E. Steady-State Performance Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using the Classical D-Q Model / James E. Kettlewell, Narayan C. Kar // International Conference Electrical Machines. – 2010. – Vol. 2. – P. 1 – 5.
55. Kiuchi, M. V/f Control of Permanent Magnet Synchronous Motors suitable for Home Appliances by DC-link Peak Current Control Method / M. Kiuchi, T. Ohnishi, H. Hagiwara, Y. Yasuda // International Power Electronics Conference. – 2010. – P. 567 - 573.
56. Kosaka, Manabu. Parameter identification for interior permanent magnet synchronous motor driven by sensorless control / Manabu Kosaka, Hiroshi Uda // Journal of low frequency noise, vibration and active control. – 2009. – Vol.28, №4. – P. 269-283.
57. Krishnan, R. Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives / R. Krishnan. – CRC Press, 2010. – 564 p.
58. Lamchich, Moulay Tahar. Torque control / Moulay Tahar Lamchich. – Rijeka : InTech, 2011. – 292 p.

59. Lee, Jae Jun. Comparison between concentrated and distributed winding in IPMSM for traction application / Jae Jun Lee, Won Ho Kim, Jin Seung Yu, Si Yeong Yun, Sang Min Kim, Jin Ju Lee, Ju Lee // *Electrical Machines and Systems*. – 2010. – P. 1172 - 1174.
60. Lee, Junggi. A Lookup Table Based Loss Minimizing Control for FCEV Permanent Magnet Synchronous Motors / Junggi Lee, Kwanghee Nam, Seoho Choi, Soonwoo Kwon // *Vehicle Power and Propulsion*. – 2007. – P. 175 - 179.
61. Lee, Junggi. Loss-Minimizing Control of PMSM With the Use of Polynomial Approximations / Junggi Lee, Kwanghee Nam, Seoho Choi, Soonwoo Kwon // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 24, №4. – P. 1071 - 1082.
62. Levi, E. Impact of iron loss on behavior of vector controlled induction machines / E. Levi // *Industry Applications*. – 1995. – Vol. 31, №6. – P. 1287 - 1296.
63. Levi, Emil. Impact of Stray Load Losses on Vector Control Accuracy in Current-Fed Induction Motor Drives / Emil Levi, Adoum Lamine, Andrea Cavagnino // *Energy Conversion*. – 2006. – Vol. 21, №2. – P. 442 - 450.
64. Li, Liyi. Research of Core loss of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) in AC Servo System / Liyi Li, Xuzhen Huang, Baoquan Kao, Baiping Yan // *Electrical Machines and Systems*. – 2008. – P. 602 – 607.
65. Ma, Lei. Prediction of Iron Loss in Rotating Machines With Rotational Loss Included / Lei Ma, Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda // *Magnetics*. – 2003. – Vol. 39, №4. – P. 2036 - 2041.
66. Meyer, Michael. Optimum Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors (IPMSM) in Constant Torque and Flux Weakening Range / Michael Meyer, Joachim Bocker // *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*. – 2006. – P. 282 - 286.
67. Morimoto, S. Optimum Machine Parameters and Design of Inverter-Driven Synchronous Motors for Wide Constant Power Operation / Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, Yoji Takeda, Katsunori Taniguchi // *Industry Applications Society Annual Meeting*. – 1994. – Vol. 1. – P. 177 - 182.