

**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 робастної системи непрямого векторного керування
асинхронними двигунами»

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>Чебан М.М.</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)

м. Херсон – 2020 року

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

Чебан Михайло Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка робастної системи непрямого векторного керування асинхронними двигунами

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 методи синтезу систем непрямого векторного керування асинхронними двигунами, спрямовані на підвищення динамічних властивостей і показників енергетичної ефективності електромеханічних систем.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз існуючих алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами; синтез робастного алгоритма векторного керування моментом і потоком асинхронного двигуна; 2. Практична реалізація і результати досліджень систем векторного керування АД; 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 існуючих алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами	вересень 2019 р.	
2	Синтез робастного алгоритма векторного керування моментом і потоком асинхронного двигуна	лютий 2020 р.	
3	Практична реалізація і результати досліджень систем векторного керування АД	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)

Чебан М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Костюченко В.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Об'єм пояснювальної записки становить 108 аркушів, вона містить 4 розділи, 28 рисунків, 3 таблиці, 51 найменування в списку використаної літератури. Мультимедійна презентація представлена на 11 слайдах.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси керування електромеханічним перетворенням енергії в системі векторно-керованого асинхронного електроприводу.

Предметом досліджень є алгоритми непрямого векторного керування АД для систем з підвищеними властивостями робастності і адаптації до варіацій активного опору ротора.

Метою роботи є розробка робастної системи непрямого векторного керування асинхронними двигунами.

Робота присвячена питанням розробки та дослідження нових алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами, які мають підвищені властивості робастності та адаптації по відношенню до параметричних збурень. Отримав подальший розвиток метод синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком асинхронних двигунів. Синтезовано та досліджено основні існуючі алгоритми непрямого векторного керування, а також новий алгоритм робастного векторного керування з підвищеними властивостями робастності до варіацій активного опору роторного кола, який забезпечує глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора та має властивості глобальної асимптотичної експоненційної стійкості. Теоретично обґрунтовано правомірність застосування нелінійного принципу розділення для побудови адаптивних систем на основі синтезованих алгоритму робастного непрямого векторного керування та адаптивного спостерігача вектора потокозчеплення ротора.

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

Ключові слова: система автоматичного керування, асинхронний електропривод, векторне керування, спостерігач магнітного потоку.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ	
1.1. Аналіз методів сучасної теорії автоматичного управління, що використовуються в електромеханічних системах	11
1.1.1. Класичне векторне управління АД.....	12
1.1.2. Векторне управління на основі сучасної теорії управління	16
1.1.3. Робастність систем векторного керування АД.....	17
1.1.4. Адаптивне до варіацій активного опору ротора управління АД	19
1.2. Синтез робастного алгоритма векторного керування моментом і потоком асинхронного двигуна	22
1.2.1. Постановка завдання непрямого векторного керування моментом і потоком.....	22
1.2.2. Стандартний алгоритм регулювання моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора	25
1.3. Синтез алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком з підвищеними властивостями робастності.....	35
1.3.1. Алгоритм поліпшеного непрямого векторного керування (I-IFOC)	39
1.3.2. Алгоритм робастного непрямого векторного керування (R-IFOC).....	42
Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АД	
2.1. Структура стенду для дослідження алгоритмів векторного керування при керуванні моментом	48
2.2. Дослідження робастності алгоритмів векторного керування моментом АД IFOC і R-IFOC	52

2.3. Дослідження синтезованого робастного алгоритму управління моментом АД.....	57
2.4. Дослідження адаптивного спостерігача і алгоритму робастного векторного управління.....	59
Висновки до розділу 2	74
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	
3.1. Загальні положення	75
3.2. Навчання і перевірка знань з охорони праці на судні.....	76
3.3. небезпечні та шкідливі фактори, що впливають на суднового електромеханіка	77
3.4. Основи електробезпеки на судні.....	79
3.5. Надання першої допомоги потерпілим від електричного струму	81
3.6. Розрахунок штучної вентиляції в приміщенні судна.....	82
РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ СУДЕН ТА ЇХ ОБЛАДНАННЯ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ НАФТОЮ	
ВИСНОВКИ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	105

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун;

ЕМС - електромеханічна система;

ЕМ - електрична машина;

DFOC - стандартне пряме векторне управління;

IFOC - стандартне непряме векторне управління;

I-IFOC - покращене непряме векторне управління;

R-IFOC - робастне непряме векторне управління.

ВСТУП

Векторно-керовані асинхронні двигуни (АД) набули широкого поширення в електромеханічних системах автоматизації різних технологічних об'єктів з підвищеними вимогами до динамічних і статичних показникам якості управління. До таких об'єктів в першу чергу відносяться системи управління рухом в металообробних верстатах, роботах, гнучкому автоматизованому виробництві, спецтехніки, прокатному виробництві та інших застосуваннях.

Проблема керування моментом та модулем вектора потокозчеплення АД являє собою складну нелінійну багатовимірну задачу при частковій вимірюваності вектора стану в умовах координатних і параметричних збурень, повне рішення якої не знайдено. Найпоширеніші системи непрямого векторного керування демонструють істотну чутливість до варіацій активного опору ротора, що призводить до зниження як показників якості керування, так і показників енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії.

Одним із способів подолання даної проблеми є застосування методів теорії робастних систем, які забезпечують відносно прості рішення при частковій компенсації дії обмежених варіацій параметрів, що змінюються. Недолік даного способу полягає в тому, що ефективність компенсації залежить від режимів роботи електромеханічного об'єкта.

Альтернативним шляхом компенсації варіацій активного опору ротора є застосування підходів, що базуються на теорії адаптивних систем, коли досягається повна асимптотична компенсація варіацій активного опору ротора без обмежень на діапазон його змін та режими роботи АД. Недоліком адаптивних систем є їх складність.

Гнучке поєднання переваг робастних і адаптивних систем може розглядатися як перспективний шлях вирішення даної проблеми. Саме тому, розробка методів синтезу і аналізу систем векторного керування моментом та потокозчепленням АД, робастних і адаптивних по відношенню до варіацій активного опору роторного кола, а також простих з точки зору їх практичної

реалізації, є актуальною задачею.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процеси керування електро механічним перетворенням енергії в системі векторно-керованого асинхронного електроприводу.

Предметом досліджень є алгоритми непрямого векторного керування АД для систем з підвищеними властивостями робастності і адаптації до варіацій активного опору ротора.

Цілі та задачі дослідження:

- розвиток методу синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потокозчепленням АД, що ґрунтується на концепції формування результуючих рівнянь динаміки похибок відпрацювання у формі декомпозиції вихідної моделі АД на дві зв'язані підсистеми, властивості яких забезпечують підвищення робастності по відношенню до варіацій активного опору роторного кола;

- теоретичне обґрунтування і дослідження робастності існуючих алгоритмів непрямого векторного керування моментом та потоком АД, в тому числі стандартного непрямого векторного керування (СВК), керування на основі принципу пасивності (ВКПП), поліпшеного векторного керування (ПВК), а також нового робастного векторного керування (РВК);

- синтез та дослідження адаптивного до варіацій активного опору ротора асимптотичного спостерігача вектора потокозчеплення ротора, який є простішим за існуючі теоретично обґрунтовані;

- теоретичне обґрунтування можливості застосування нелінійного принципу розділення для побудови адаптивних систем векторного керування АД.

- створення комп'ютерних математичних моделей розроблених структур систем векторного керування АД і дослідження процесів в них з позицій робастності до параметричних збурень роторного кола.

Методи дослідження: другий метод Ляпунова, керування по вимірюваному виходу, теорія адаптивних систем, математичне моделювання, використання

експериментальних установок векторно-керованих асинхронних електроприводів, побудованих на основі сучасних цифрових сигнальних процесорів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розвинуто метод синтезу алгоритмів непрямого векторного керування, який дозволяє ефективно конструювати зворотні зв'язки підсистеми потоку для досягнення стабілізації системи, формування її динамічних властивостей і додаткового зниження чутливості до варіацій параметрів роторного кола;

- розроблено метод дослідження робастності алгоритмів непрямого векторного керування моментом та потоком асинхронних двигунів по відношенню до основного параметричного збурення - зміни активного опору ротора, що дозволяє аналітично проводити повномасштабні дослідження поведінки похибок регулювання моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора в стаціонарних режимах роботи АД;

- розроблено нову структуру системи робастного непрямого векторного керування, яка гарантує глобальне робастне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора за рахунок формування стабілізуючих зворотних зв'язків за похибками оцінювання статорних струмів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

1.1. Аналіз методів сучасної теорії автоматичного управління, що використовуються в електромеханічних системах

Системи векторно-керованих асинхронних електроприводів, які використовуються в широкому класі технологічних об'єктів, є одними з найбільш поширених електромеханічних систем (ЕМС). Це обумовлено перевагами використання асинхронних двигунів, таких як простота обслуговування, низька вартість і висока надійність, в порівнянні з ЕМС, в яких застосовуються електричні машини інших типів. З іншого боку ЕМС на основі АД складні, так як управління асинхронним двигуном являє собою складну нелінійну багатовимірну задачу, повне рішення якої на даний момент не знайдено, що є актуальним завданням для сучасної електромеханіки як з теоретичної, так і практичної точок зору.

У 1970-80-ті роки були сформульовані проблеми управління АД, як класу нелінійних об'єктів, хоча сучасна нелінійна теорія управління перебувала тільки на стадії формування.

Перші системи векторного керування машинами змінного струму, впроваджені в серійних виробках, були створені без глибокого теоретичного обґрунтування в спрощеному вигляді на підставі розуміння фізики процесів електромеханічного перетворення енергії.

Перша систематизація методів нелінійного управління в електромеханічних системах за період 1984-1994 років представляла методи управління різними електричними машинами (ЕМ), які мають обґрунтоване математичне формулювання проблеми і аналітичний доказ досягнення цілей управління [1].

За останні десятиліття були розроблені наступні аналітичні методи аналізу і синтезу нелінійних систем:

- лінеаризація зворотним зв'язком [2];

- адаптивне і грубе (робастне) управління [3-11];
- розривне управління, включаючи клас систем зі змінною структурою [12-17];
- управління на основі принципу пасивності [18-20];
- управління по вимірюванню виходу (при частково вимірюваному вектору стану) [3 - 5, 21].

Аналогом управління з підпорядкованим регулюванням параметрів в області нелінійних систем є метод синтезу, який отримав назву "зворотна покрокова процедура проектування", який був розроблений П. Кокотовичем в 1991 році [22]. Інший новий теоретичний підхід до проектування систем управління на основі АД з короткозамкненим ротором, вперше запропонований в фундаментальних роботах Р. Ортеги [18, 20], який отримав назву «управління в ЕМС з використанням принципу пасивності». Цей підхід передбачає формування енергії замкнутої системи в такому бажаному вигляді, який гарантує асимптотичне відпрацювання траєкторій моменту і потоку АД. У [23] представлені рішення класу задач нелінійного управління, які ґрунтуються на використанні другого методу Ляпунова для синтезу алгоритмів векторного керування в поєднанні зі зворотним покроковим завданням проектування. В [24, 25] дані рішення задач управління на основі лінеаризації зворотним зв'язком, в яких знайшли застосування методи диференціальної геометрії. Загальнотеоретичні підходи щодо застосування розривних управлінь в ЕМС наведені в [26 - 28]. В [29] міститься систематизація рішень задач оцінювання параметрів і діагностики АД. Рішення задач бездатчикового управління і прямого керування моментом наведені в [30].

1.1.1. Класичне векторне управління АД

Векторні методи управління в даний час розглядаються як основні для управління асинхронним двигуном, який є нелінійним багатовимірним об'єктом [31]. Особливість математичних моделей ЕМ змінного струму полягає в тому, що

вони мають шостий порядок і залежать в правій частині диференціальних рівнянь від кутового положення ротора, якщо модель представлена в фізичних змінних статора і ротора. Якщо в АД є короткозамкнені обмотки на роторі, то виміряти можна лише частину змінних стану, тому в даному випадку розглядається задача управління по вимірюваному виходу. Для вирішення цієї проблеми в системах з лінійними об'єктами, відповідно до принципу поділу, невимірювана частина змінних стану замінюється на їх оцінені значення, за допомогою асимптотичного спостерігача [21]. У нелінійних системах принцип поділу потребує доведення стійкості для кожної зі структур алгоритмів управління та спостерігачів. Додатково необхідно отримати робастні рішення, в зв'язку з дією параметричних збурень моделі ЕМ, обумовлених варіацією опорів обмоток при їх нагріванні.

Метод частотного управління, вперше запропонований для управління кутовою швидкістю АД в [36]. Амплітуда і кутова частота вектора напруги статора є компонентами двовірного скалярного управління. У технічній літературі [37, 38] представлено досить докладний опис частотного управління. Метод частотного управління не дозволяє забезпечити асимптотичне управління моментом і потоком навіть в сталому режимі, а також отримати динамічну поведінку цих змінних із заданими динамічними показниками, так як ґрунтується на розгляді квазі-сталих режимів роботи АД [36].

При векторному керуванні здійснюється управління амплітудою і просторовим положенням вектора напруги статора, завдяки чому можливе незалежне управління механічними координатами та модулем потокозчеплення АД.

Теорія класичного векторного керування АД ґрунтується на припущенні про струмове управління обмотками статора, яке досягається використанням замкнутих контурів регулювання струму, що мають ПІ-регулятори струму з "великим" коефіцієнтом посилення. В цьому випадку, задача управління зниженого порядку в полеорієнтованій системі координат структурно схожа з завданням управління ДПС з незалежним збудженням, оскільки передбачається, що досягаються умови ідеальної орієнтації за вектором потокозчеплення. Такий

підхід дозволяє сформулювати принципи векторного управління, не вимагаючи при цьому спеціальних знань в галузі сучасної нелінійної теорії управління, хоча і не враховує в повному обсязі особливості АД як нелінійного об'єкта.

Векторно-керовані асинхронні електроприводи виконуються на основі типових структур прямого (Direct Field Oriented Control - DFOC) і непрямого векторного керування (Indirect Field Oriented Control - IFOC) [38, 39], які в даний час визначаються як стандартні або класичні. Опис технології побудови таких систем управління АД, які вперше почали впроваджуватися в серійне виробництво в середині 1980х. На рис. 1.1 і рис. 1.2 наведені типові структури систем стандартного прямого і непрямого векторного керування, конфігурація яких включає перетворення змінних АД в полеорієнтовану систему координат (d-q).

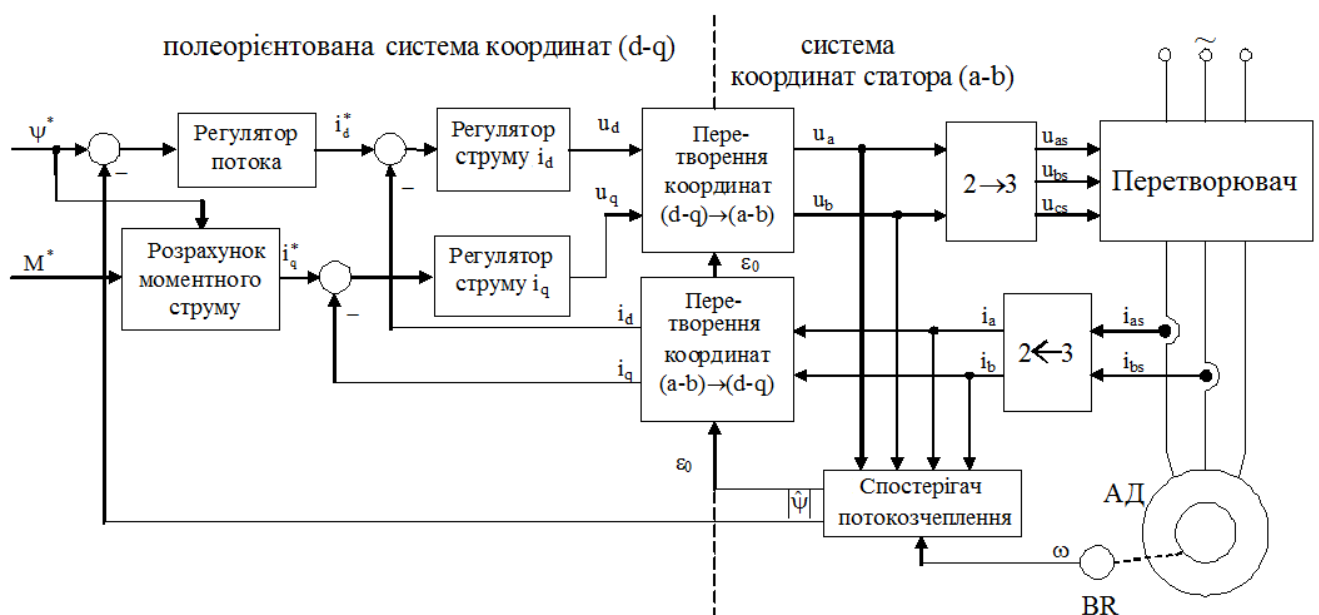


Рисунок 1.1. - Структурна схема системи стандартного прямого векторного керування АД

Орієнтація системи координат (dq) задається або за допомогою спостерігача вектора потокозчеплення ротора, виходами якого є оцінені кутові положення ε_0 і модуль $|\hat{\psi}|$ вектора потокозчеплення ротора в разі прямого векторного управління, або формуванням заданого кутового положення ε_0

системи координат (dq) в функції заданого ковзання при непрямому векторному керуванні.

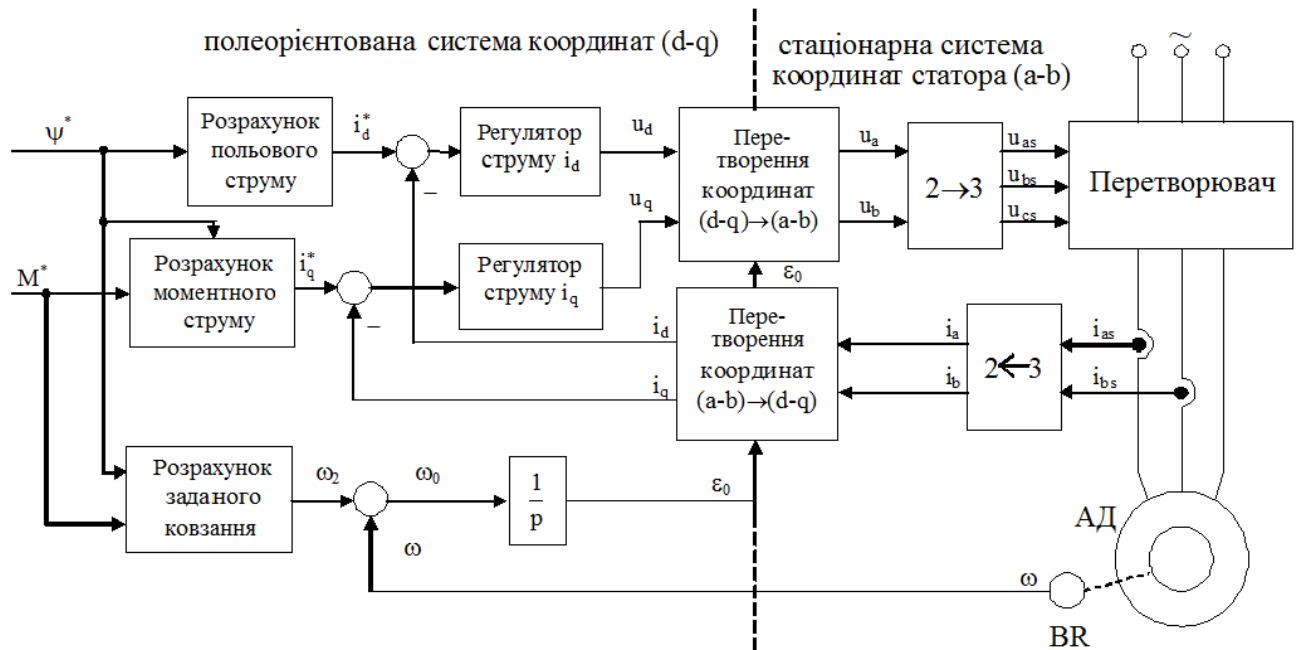


Рисунок 1.2. - Структурна схема системи стандартного непрямого векторного керування АД

У моделі АД формування керуючих впливів (u_d , u_q) по осях d і q відбувається за допомогою ПІ регуляторів струму, для яких задані значення моментного i_q^* і польового i_d^* компонентів струму статора є промасштабованими завданнями по моменту (q -вісь) і потоку (d -вісь). На практиці, незважаючи на відсутність суворого теоретичного обґрунтування, електромеханічні системи на основі АД з векторним керуванням першого покоління демонстрували показники якості, які наближалися до досяжних в високодинамічних синхронних електроприводах.

1.1.2. Векторне управління на основі сучасної теорії управління

З використанням методів диференціальної геометрії, вперше проведено дослідження властивостей керованості для стандартної моделі АД, в результаті чого встановлено її основну властивість часткової лінеаризації зворотним зв'язком. Показано, що управління АД з досягненням умов орієнтації по полю може здійснюватися в будь-якій системі координат. Лінеаризація і декомпозиція вихідної нелінійної моделі АД на електромеханічну і електромагнітну підсистеми можлива за рахунок дії регулятора, який лінеаризує зворотним зв'язком по повному вектору стану. Для конструювання значної кількості алгоритмів управління АД представлені варіанти лінеаризуючих регуляторів є базовими. Якщо виконуються умови струмового управління статором, то класичне векторне управління з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора являє собою спрощений варіант лінеаризуючого. Концепція динамічної лінеаризації зворотним зв'язком не отримала подальшого розвитку через високу складність одержуваних рішень. Еквівалентна структура об'єкта управління механічними координатами та модулем вектора потокозчеплення (статора або ротора), яка може бути отримана завдяки використанню лінеаризуючих регуляторів, є лінійною і розв'язаною щодо регульованих виходів і нових керованих впливів, тому для їх синтезу можливо використовувати методи теорії лінійних систем. У той же час рішення не можуть бути реалізовані на практиці, оскільки вимагають вимірюваності повного вектора стану, проте вони сформулювали концептуальну лінію отримання "ідеального" управління, яка стала основою для синтезу реальних нелінійних управлінь по вимірюваному виходу.

Для реалізації розв'язуючого перетворення координат в структурі лінеаризуючого алгоритму необхідно вимір повного вектора стану моделі АД, включаючи інформацію про вектор потокозчеплення ротора або статора. Рішенням проблеми став синтез нелінійних асимптотичних спостерігачів і оцінювачів вектора потокозчеплення, оцінки якого використовувалися в алгоритмі управління замість реальних значень. Використання асимптотических

спостерігачів потоку в системах векторного керування АД, які ґрунтуються на використанні принципу поділу, концептуально схожі з лінійними системами. Передбачається, що процес оцінювання компонент вектора потокозчеплення завершився і значення реальні і оцінені збігаються. Такі рішення не відрізняються від ідеалізованих алгоритмів, які використовують повний вектор стану, тому їх відносять до прямого векторного управління (DFOC). Якщо розглядати непряме векторне управління (IFOC), то в цьому випадку передбачається збіг заданого просторового положення системи координат ($d-q$) і напрямку вектора потокозчеплення ротора, вважається також, що його модуль дорівнює заданому значенню (рис. 1.2).

Використання принципу поділу в стандартних системах векторного керування на практиці в значній кількості серійно-випускаємих асинхронних електроприводів, в яких використовувалося як пряме, так і непряме орієнтування по вектору потокозчеплення ротора, підтвердило їх технічну правомочність.

Асимптотична стійкість стандартних алгоритмів при струмовому управлінні вперше теоретично доведена в [76] - [79], а для випадку повного порядку в [80], [81], набагато пізніше початку їх впровадження в серійних приводах.

1.1.3. Робастність систем векторного керування АД

У системах з повністю вимірюваним вектором стану робастність щодо параметричних і координатних збурень можливо забезпечити за рахунок формування алгоритму робастного управління, в разі ж часткового вимірювання вектора стану робастність одержуваного рішення є принциповою, оскільки досягти її при регулюванні невимірюваних координат досить важко. Зміни активних опорів статора, а особливо ротора, є основними параметричними збуреннями в системах векторного керування АД. Дані збурення можуть призводити до порушення асимптотичності відпрацювання координат, а в деяких випадках навіть до втрати стійкості. Під впливом цих збурень відбувається деградація динамічних і статичних показників якості управління механічними

координатами та модулем потокозчеплення, а також зниження енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії.

Основи теорії управління електромеханічним перетворенням енергії в асинхронному електроприводі були закладені при синтезі алгоритмів векторного керування АД по вимірюваному виходу. Вони довели працездатність технічних рішень і суттєво вдосконалили їх.

Робастність системи прямого векторного управління, побудованої на основі принципу поділу, визначається робастністю спостерігача магнітного потоку повного або зниженого порядку. У разі стандартного непрямого векторного керування, яке є розімкненим щодо регулювання вектора потокозчеплення ротора, робастність щодо зміни активного опору ротора визначається виключно параметрами у роторному ланцюзі АД.

Велика кількість досліджень присвячено питанням підвищення робастності спостерігачів вектора потокозчеплення ротора АД.

Стійкість систем непрямого векторного керування є робастною щодо зміни активного опору роторного ланцюга. Однак при значному відхиленні від номінального значення, в системі можлива поява режиму біфуркацій, і навіть втрата стійкості.

До параметричних збурень відносять також варіації індуктивностей статора, ротора і намагнічування в результаті насичення магнітної системи АД. Зміна цих параметрів обмежена в нормальних режимах роботи АД, оскільки модуль вектора потокозчеплення регулюється тільки в сторону зменшення від його номінального значення. Для спеціальних ЕМ, спроектованих для задач частотного і векторного управління, прийнятно вважати, що номінальне значення потоку відповідає лінійній ділянці кривої намагнічування. Облік ефекту насичення магнітної системи АД призводить до ускладнення математичних моделей, що ускладнює їх використання для цілей управління.

В наш час запропонований поліпшений алгоритм непрямого векторного керування АД (Improved Indirect Field Oriented Control - I-IFOC), який не вимагає застосування спостерігача магнітного потоку. Робастність алгоритму досягається

за рахунок надання властивостей глобальної експоненційної стійкості системі, а синтезована підсистема управління потоком АД містить негативний зворотний зв'язок у разі не нульової кутової швидкості АД. Як показують експериментальні дослідження, покращений алгоритм непрямого векторного керування дозволяє стабілізувати динамічні показники якості регулювання координат АД і в значній мірі запобігає збільшенню активних втрат при варіаціях активного опору роторного ланцюга. Питання робастності управління потоком при кутовій швидкості, що дорівнює нулю, залишається відкритим.

Незважаючи на великий обсяг досліджень, присвячених питанню підвищення властивостей робастності систем векторного керування АД, повного вирішення цієї проблеми до цих пір не знайдено. Важливі результати по зниженню вразливості на варіації активного опору ротора отримані для рішень, які засновані на використанні принципу поділу, в той час як для задач управління по вимірюваному виходу дана проблема тільки розробляється.

1.1.4. Адаптивне до варіацій активного опору ротора управління АД

Теорія адаптивного управління лінійними об'єктами дає ряд загальних аналітичних рішень [10, 12], які, конструктивні в проектуванні, однак в разі нелінійних об'єктів мають обмежене застосування. Класичний підхід для синтезу адаптивних систем, який ґрунтується на критерії гіперстійкості, може бути застосований і для нелінійних об'єктів. Даний метод базується на доведенні суворої позитивної визначеності об'єкта управління, що для нелінійного випадку має ряд труднощів. Альтернативний підхід, такий як непряме адаптивне управління [3], допускає оновлювати параметри об'єкта в неадаптивному регуляторі, використовуючи значення параметрів, які оцінюються за допомогою алгоритму ідентифікації. При цьому можливо отримати локально стійкі рішення в разі, коли алгоритм ідентифікації та неадаптивна система є експоненціально стійкими в ізолюваному стані.

Методи прямого адаптивного управління нелінійними об'єктами [3, 4, 7, 8] розроблені для випадку повного виміру вектора стану і знаходяться в стадії розвитку при його частковому вимірі. Дослідження показують, що нелінійна модель АД має такі структурні властивості, які не дозволяють на основі застосування існуючих аналітичних методів отримати пряме рішення задачі адаптивного управління для випадку параметричної невизначеності роторного ланцюга АД при частковому вимірі вектора стану. Це пояснюється складністю завдання, оскільки АД є нелінійним багатовимірним об'єктом управління з частково вимірюваним вектором стану, причому, що змінні параметри роторного ланцюга входять в праву частину диференціальних рівнянь, вихід яких не вимірюється. Для об'єктів управління цього класу загальна теорія нелінійного та адаптивного управління знаходиться лише в стадії становлення.

Вивчення даної проблеми проводилося як в прикладному, так і в теоретичному напрямках. Значна частина алгоритмів ідентифікації активного опору ротора і спостереження вектора потокозчеплення в умовах його невизначеності не має суворого теоретичного обґрунтування, з іншого боку ті, які теоретично доведені, як правило, дуже складні.

Як показали експериментальні дослідження алгоритмів ідентифікації активного опору ротора з властивістю глобальної асимптотичної стійкості, адаптивний алгоритм забезпечує ефективну компенсацію варіацій активного опору ротора, яке може змінюватися через нагрівання до 100% свого номінального значення.

К. Матсусе (K. Matsuse) запропонував адаптивний до варіацій активного опору ротора спостерігач вектора потокозчеплення, який є одним з найбільш цитованих в публікаціях даного напрямку. Структурно спостерігач К. Матсусе складається з стандартного спостерігача Вергезе повного порядку і алгоритму ідентифікації невідомого опору ротора, що конструюється на основі спрощеного синтезу методом Ляпунова. Спостерігач демонструє працездатність, однак доказів його асимптотичної стійкості до сих пір немає. У порівнянні з першими загальнотеоретичними рішеннями, які гарантують глобальну асимптотичну

стійкість, спостерігач К. Матсусе більш простий (п'ятий порядок в порівнянні з одинадцятим) і містить меншу кількість налагоджень коефіцієнтів. Відзначимо, що доказ асимптотичної стійкості для нелінійної системи має не тільки теоретичний інтерес, але гарантує умови, в яких система працездатна. У той же час технічні рішення можуть бути працездатні в окремих режимах, але мати незадовільні показники і навіть бути нестійкими в інших, визначити які наперед неможливо.

Основним недоліком перших алгоритмів адаптивного управління АД, а також розроблених пізніше є їх складність і чутливість до варіацій активного опору статора.

Для компенсації впливу варіацій опору статора може бути використана інформація про його значення, що отримується за допомогою термічної моделі статора.

Виконаний аналітичний огляд показує, що існуючі алгоритми векторного керування не в повній мірі враховують вплив варіації активного опору ротора. Разом з тим зміна активного опору ротора АД призводить до суттєвої деградації показників якості управління і зниження енергоефективності процесу електромеханічного перетворення енергії. Існуючі алгоритми векторного керування або частково вирішують цю проблему в обмеженій області варіації активного опору ротора, або повністю, але при цьому досить складні в реалізації на практиці. Алгоритми непрямого векторного керування потенційно мають більші можливості щодо зниження чутливості до варіацій активного опору ротора. У той же час істотно розширити дані можливості дозволяє застосування комбінованої системи на підставі непрямого векторного керування і адаптивних систем, що дасть можливість об'єднати переваги двох підходів.

Внаслідок цього синтез, дослідження і практична реалізація нових структур алгоритмів векторного керування АД, які будуть мати властивості робастності та адаптації до варіацій параметрів роторного ланцюга, а також бути простими в технічній реалізації, є актуальним завданням сучасної електромеханіки, що є метою даної магістерської роботи. Для цього необхідно вирішити такі завдання:

1. Розвинути метод синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потокозчеплення АД з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора, На основі цього методу синтезувати новий алгоритм векторного керування АД з підвищеними властивостями робастності (Robust Indirect Field Oriented Control - R-IFOC).

2. Дослідити робастність існуючих алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком АД, в тому числі стандартного непрямого векторного керування IFOC, управління на основі принципу пасивності, поліпшеного непрямого векторного керування I-IFOC, а також нового робастного непрямого векторного керування R-IFOC .

3. Синтезувати адаптивний щодо варіацій активного опору ротора асимптотичний спостерігач вектора потокозчеплення ротора.

4. Теоретично обґрунтувати можливість застосування нелінійного принципу поділу для побудови адаптивних систем векторного керування АД.

5. Створити комп'ютерні математичні моделі розроблених структур систем векторного керування АД і дослідити процеси в них з позицій робастності до параметричних збурень роторного ланцюга.

1.2. Синтез робастного алгоритма векторного керування моментом і потоком асинхронного двигуна

1.2.1. Постановка завдання непрямого векторного керування моментом і потоком

Завдання управління моментом і потокозчепленням асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який являє собою нелінійний багатомірний об'єкт управління з частково вимірюваним вектором стану, являється однією з найбільш складних завдань сучасної електромеханіки. Рішенням цього завдання в класі непрямого полеорієнтування присвячено багато робіт. Метою даної роботи є розвиток методу синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і

потокосцеплення АД з орієнтацією по вектору потокосцеплення ротора, який ґрунтується на концепції формування результуючих рівнянь динаміки помилок відпрацювання в формі декомпозиції вихідної моделі АД на дві пов'язані підсистеми.

Стандартна математична модель АД в умовах симетричності, представлена в стаціонарній системі координат статора (a-b), має вигляд

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_a i_b - \psi_b i_a) \\ \dot{i}_a &= -\gamma i_a + \alpha \beta \psi_a + \beta \omega \psi_b + \frac{1}{\sigma} u_a \\ \dot{i}_b &= -\gamma i_b + \alpha \beta \psi_b - \beta \omega \psi_a + \frac{1}{\sigma} u_b \\ \dot{\psi}_a &= -\alpha \psi_a - \omega \psi_b + \alpha L_m i_a \\ \dot{\psi}_b &= -\alpha \psi_b + \omega \psi_a + \alpha L_m i_b\end{aligned}\tag{1.1}$$

де $(i_a, i_b)^T, (u_a, u_b)^T, (\psi_a, \psi_b)^T$ - компоненти векторів струму статора, напруги статора, потокосцеплення ротора; M - електромагнітний момент, ω - кутова швидкість, M_c - момент навантаження, L_m - індуктивність намагнічуючого контуру. Позитивні константи в (1.1), що задаються електричними параметрами АД, визначені в такий спосіб:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}; \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}; \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m,$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 - активні опори й індуктивності статора і ротора, L_m - індуктивність намагнічуючого контуру, J - повний момент інерції, одна пара полюсів прийнята без втрати спільності.

Орієнтуючись на застосування векторних методів управління, динамічну модель АД доцільно представити в синхронній системі координат (d-q), що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_0 . Після перетворення (1.1) в синхронну систему координат отримаємо:

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\
\dot{i}_d &= -\gamma i_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + \frac{1}{\sigma} u_d \\
\dot{i}_q &= -\gamma i_q - \omega_0 i_d + \alpha \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + \frac{1}{\sigma} u_q \\
\dot{\psi}_d &= -\alpha \psi_d + (\omega_0 - \omega) \psi_q + \alpha L_m i_d \\
\dot{\psi}_q &= -\alpha \psi_q - (\omega_0 - \omega) \psi_d + \alpha L_m i_q \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \quad \varepsilon_0(0) = 0,
\end{aligned} \tag{1.2}$$

де $(i_d, i_q)^T, (u_d, u_q)^T, (\psi_d, \psi_q)^T$ - компоненти векторів струму статора, напруги статора, потокозчеплення ротора в системі координат (d-q); ε_0 - кутове положення системи координат (d-q) щодо нерухомої системи координат статора (a-b). Змінні в системі координат (d-q) пов'язані з змінними в системі координат статора (a-b) перетворенням

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}^{(d-q)} &= \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(a-b)} \\
\mathbf{x}^{(a-b)} &= \mathbf{e}^{J\varepsilon_0} \mathbf{x}^{(d-q)}, \quad \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{1.3}$$

де $\mathbf{x}$ - двомірний вектор напруг, струмів або потокозчеплення.

Завдання управління потоком і моментом АД полягає в регулюванні двох вихідних координат електричної машини: модуля вектора потокозчеплення ротора $|\psi| = (\psi_d^2 + \psi_q^2)^{\frac{1}{2}}$ і моменту M , заданих вектором $\mathbf{y}_1 = (|\psi|, M)^T$, за допомогою двомірного вектора напруг статора $\mathbf{u} = (u_d, u_q)^T$, використовуючи для цього вектор вимірюваних змінних $\mathbf{y} = (\omega, i_d, i_q)^T$.

Нехай вектор заданих траєкторій зміни модуля вектора потокозчеплення ротора і моменту визначено у вигляді

$$\mathbf{y}_1^* = (\psi^*, M^*)^T, \tag{1.4}$$

де M^* і $\psi^* > 0$ - задані обмежені функції, тоді вектор помилок відпрацювання запишеться

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 = \mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_1^* \triangleq (\tilde{\psi}, \tilde{M})^T. \quad (1.5)$$

Припустимо, що для моделі АД (1.2) справедливі такі припущення:

A.1. Параметри АД відомі і постійні.

A.2. Кутова швидкість АД ω обмежена.

A.3. Задані траєкторії потоку $\psi^* > 0$ і моменту M^* і обмежені M^* і мають обмежені відомі похідні $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$, $\dot{M}^*$.

За умови виконання цих припущень необхідно синтезувати нелінійний динамічний регулятор, який гарантує досягнення наступних цілей управління:

O.1. Глобальне асимптотичне відпрацювання потоку-моменту, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0. \quad (1.6)$$

O.2. Асимптотическую розв'язку процесів управління вихідними координатами.

O.3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми управління моментом.

O.4. Грубість по відношенню до варіації параметрів роторного ланцюга.

1.2.2. Стандартний алгоритм регулювання моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора

Метою цього підрозділу є теоретичне обґрунтування стандартного алгоритму непрямого векторного керування АД (IFOC). Для цього управління IFOC реінтерпретували з позицій сучасної нелінійної теорії управління.

Припустимо, що допущення A.1-A.3, прийняті в пункті 1.2.1, виконуються з $\psi^* = \text{const}$, $M^* = \text{const}$. Тоді, визначивши в (1.2) закон зміни керуючих впливів у вигляді

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_q + v_d \\ \omega_0 i_d + v_q \end{pmatrix}, \quad (1.7)$$

необхідно знайти нелінійний регулятор, заданий перетворенням координат (1.3), а також (1.7) у вигляді

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \mathbf{e}^{J\varepsilon_0} \left[\boldsymbol{\sigma} \begin{pmatrix} -\omega_0 i_q + v_d \\ \omega_0 i_d + v_q \end{pmatrix} \right], \quad (1.8)$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

який гарантує асимптотичне регулювання потоку-моменту відповідно до (1.6).

Підставивши (1.7) в (1.2), отримаємо модель АД у вигляді декомпозиції електромеханічна - електромагнітна підсистеми

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (1.10)$$

$$\dot{i}_q = -\gamma i_q + \alpha \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + v_q;$$

$$|\psi| = (\psi_d^2 + \psi_q^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\dot{i}_d = -\gamma i_d + \alpha \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + v_d,$$

$$\dot{\psi}_d = -\alpha \psi_d + \omega_2 \psi_q + \alpha L_m i_d, \quad (1.11)$$

$$\dot{\psi}_q = -\alpha \psi_q - \omega_2 \psi_d + \alpha L_m i_q,$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0.$$

де $\omega_2 = \alpha L_m i_q / |\psi|$ - частота ковзання.

Керуючі впливи v_d, v_q в електромеханічній та електромагнітній підсистемах (1.10), (1.11) служать для регулювання струмів i_d і i_q , а також вихідних координат M і $|\psi|$ в кожній з підсистем.

Підсистема потоку. Непряме орієнтування по вектору потокозчеплення ротора досягається формуванням динаміки системи координат (d-q) (1.2) у вигляді

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\psi}, \quad (1.12)$$

де ε_0 може розглядатися як задане значення для кутового положення вектора потокозчеплення ротора.

Рівняння (1.12), в умовах ідеального полеорієнтування, визначає задану динамічну поведінку кутового положення вектора потокозчеплення ротора відповідно до рівняння для синхронної швидкості поля АД $\omega_0 = \omega + \omega_2$. Грунтуючись на концепції непрямого полеорієнтування, мета управління модулем

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_q \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_d.\end{aligned}\quad (1.17)$$

Положення рівноваги $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q)^T = 0$ є глобально експоненціально стійким, що випливає з розгляду функції Ляпунова

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2), \quad (1.18)$$

похідна від якої в силу рівнянь (1.17) має вигляд

$$\dot{V} = -\alpha(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2) = -2\alpha V. \quad (1.19)$$

Відзначимо, що в разі початково знеструмленої машини ($\psi_d(0) = \psi_q(0) = 0$) початкові умови в (1.17) виникають за рахунок $\psi^* > 0$, тобто $\tilde{\psi}_d(0) = -\psi^*(0)$, $\tilde{\psi}_q(0) = \psi_q(0) = 0$.

Оскільки ідеальні джерела струму не існують, то для апроксимації їх дії в системах з інверторами напруги, що живлять обмотки статора, організовують контури регулювання струму з пропорційно-інтегральними (ПІ) регуляторами струму, що мають "великі" коефіцієнти посилення. При цьому вихід регулятора потоку (1.16) формує задане значення струму статора по осі d

$$i_d^* = \frac{\psi^*}{L_m}. \quad (1.20)$$

Визначивши помилку відпрацювання струму по осі d $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$, рівняння (1.11) запишуться у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_d, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -\gamma \tilde{i}_d - \left(\frac{R_l}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right) \frac{1}{L_m} \psi^* + \alpha \beta (\psi^* + \tilde{\psi}_d) + \beta \omega \tilde{\psi}_q + v_d.\end{aligned}\quad (1.21)$$

Регулятор струму ПІ типу описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}v_d &= -k_{idl} \tilde{i}_d + x_d, \\ \dot{x}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d,\end{aligned}\quad (1.22)$$

де $k_{id1} > 0$ і $k_{ii} > 0$ коефіцієнти пропорційної і інтегральної складових регулятора струму.

Поставивши (1.22) в (1.21), рівняння динаміки помилок відпрацювання струму набувають вигляду

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_d &= -k_{ii}\tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -(k_{id1} + \gamma)\tilde{i}_d + \left(x_d - \frac{R_1}{\sigma} \frac{\psi^*}{L_m}\right) + \alpha\beta\tilde{\psi}_d + \beta\omega\tilde{\psi}_q.\end{aligned}\quad (1.23)$$

Інтегральна складова x_d в останньому рівнянні (1.23) може розглядатися як оцінка постійного збурення $\frac{R_1}{\sigma} \frac{\psi^*}{L_m}$. Визначивши помилку оцінювання як

$\tilde{x}_d = x_d - \frac{R_1}{\sigma} \frac{\psi^*}{L_m}$, рівняння (1.21), (1.23) перепишуться наступним чином:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha\tilde{\psi}_d + (\omega_0 - \omega)\tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha\tilde{\psi}_q - (\omega_0 - \omega)\tilde{\psi}_d, \\ \dot{\tilde{x}}_d &= -k_{ii}\tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{id}\tilde{i}_d + \tilde{x}_d + \alpha\beta\tilde{\psi}_d + \beta\omega\tilde{\psi}_q,\end{aligned}\quad (1.24)$$

де $k_{id} = k_{id1} + \gamma$.

Для будь-якої обмеженої траєкторії зміни кутової швидкості $|\omega| < c_1 < \infty$ і заданого набору параметрів АД (α, β, γ) існують параметри настройки регулятора струму $(k_{id}, k_{ii}) > 0$, такі, що система (1.24) є асимптотично стійкою, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{x}_d, \tilde{i}_d) = 0. \quad (1.25)$$

Для доказу умови (1.25) розглянемо наступну функцію Ляпунова

$$V = \frac{1}{2} (\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2 + \gamma_1 \tilde{i}_d^2 + \gamma_2 \tilde{x}_d^2), \quad (1.26)$$

похідна якої уздовж траєкторій (1.24) дорівнює

$$\dot{V} = -\alpha(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2) + (\alpha L_m + \gamma_1 \alpha \beta) \tilde{\psi}_d \tilde{i}_d + \gamma_1 \beta \omega \tilde{\psi}_q \tilde{i}_d - \gamma_1 k_{id} \tilde{i}_d^2, \quad (1.27)$$

якщо $k_{ii} = \gamma_2^{-1} \gamma_1$.

Умова заперечення $\dot{V}$ в (1.27) знаходиться за правилом Сильвестра в вигляді

$$k_{id} > \frac{1}{2\alpha\gamma_1} \left[\alpha^2 (L_m + \gamma_1\beta)^2 + \gamma_1^2 \beta^2 \omega^2 \right]. \quad (2.28)$$

Тобто при виконанні умови (1.28) $\dot{V}$ задовольняє оцінці

$$\dot{V} \leq -c(\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2 + \tilde{i}_d^2), \quad c > 0 \quad (1.29)$$

і, отже, сигнали $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{x}_d, \tilde{i}_d)$ є обмеженими. При умові обмеженості кутової швидкості ω і $\omega_2 = \alpha L_m \frac{\dot{i}_q}{\psi^*}$, похідні $\dot{\tilde{\psi}}_d, \dot{\tilde{\psi}}_q, \dot{\tilde{x}}_d, \dot{\tilde{i}}_d$ в (1.24) також є обмеженими.

Оскільки в силу умови (1.29) маємо

$$\int_0^t \dot{V}(\tau) d\tau = V(0) - V(t) \leq V(0),$$

то пряме застосування лемми Барбалат [8] дає умова (1.25).

Разом з тим, базуючись на цьому результаті, можуть бути отримані більш сильні умови стійкості положення рівноваги системи (1.24). Запишемо (1.24) в наступній стандартній формі:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{21} &= \mathbf{A}_{21}(t) \mathbf{x}_{21} + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}} &= -\lambda \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \mathbf{x}_{21}, \end{aligned} \quad (1.30)$$

де $\mathbf{x}_{21} = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T$; $\mathbf{z} = \tilde{x}_d$; $\mathbf{\Gamma} = (0, 0, 1)$, $\mathbf{P} = \text{diag} \frac{1}{2}(1, 1, \gamma_1)$, $\lambda = 2 \frac{k_{ii}}{\gamma_1}$,

$$\mathbf{A}_{21}(t) = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega_2 & \alpha L_m \\ -\omega_2 & -\alpha & 0 \\ \alpha\beta & \beta\omega & -k_{id} \end{bmatrix}.$$

Оскільки всі умови для системи (1.30) виконуються з $\mathbf{\Gamma} = \text{const}$, то положення рівноваги $(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{x}_d, \tilde{i}_d) = 0$ являється експоненціально стійким. Тип стійкості при цьому полуглобальний, оскільки умова стійкості (1.28) залежить від зовнішнього параметра ω .

З умови (1.25) випливає, що алгоритм управління електромагнітною підсистемою, заданий (1.8), (1.9), (1.12), (1.20), (1.22), гарантує асимптотичне регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора з одночасною асимптотичною орієнтацією по цього вектору.

Підсистема моменту. Підсистема управління моментом з (1.10) з урахуванням (1.7) описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \psi^* i_q^* + \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_q^* + \tilde{i}_q) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q (i_d^* + \tilde{i}_d) \right] \triangleq M^* + \tilde{M}, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -\gamma \tilde{i}_q - \gamma i_q^* + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d - \beta \omega \psi^* + v_q - \dot{i}_q^*, \end{aligned} \quad (1.31)$$

де $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ - помилка відпрацювання струму.

При розгляді стандартного алгоритму векторного керування моментом, на додаток до припущення про обмеженість кутової швидкості, вводиться обмеження на величину прискорення $\dot{\omega}$. Вважається, що допустимо приймати $\dot{\omega} = 0$ при розгляді процесів управління моментом, тобто процеси регулювання кутової швидкості набагато повільніші, ніж процеси регулювання моменту (струму i_q). З першого рівняння (1.31) алгоритм управління моментом буде

$$\dot{i}_q^* = \frac{2}{3} \frac{L_2}{L_m} \frac{M^*}{\psi^*}. \quad (1.32)$$

Алгоритм регулювання струму по осі q формується у вигляді ПІ регулятора

$$\begin{aligned} v_q &= -k_{iq1} \tilde{i}_q + x_q, \\ \dot{x}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (1.33)$$

де k_{iq1} , k_{ii} - коефіцієнти пропорційної і інтегральної компонент.

Підставивши (1.32), (1.33) в (1.31), отримаємо

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= \frac{3}{2} \frac{L_2}{L_m} \left[\tilde{\psi}_d (i_q^* + \tilde{i}_q) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q (i_d^* + \tilde{i}_d) \right], \\ \dot{x}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d - \gamma i_q^* - \beta \omega \psi^* + x_q, \end{aligned} \quad (1.34)$$

де $k_{iq} = \gamma + k_{iq1}$.

Інтегральна компонента x_q в (1.34) може розглядатися як оцінка постійного збурення $(\gamma i_q^* + \beta \omega \psi^*)$. Визначивши $\tilde{x}_q = x_q - (\gamma i_q^* + \beta \omega \psi^*)$ як помилку оцінювання, останні два рівняння в (1.34) набувають вигляду (при $\dot{\omega} = 0, M^* = \text{const}, \psi^* = \text{const}$)

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_q + x_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d.\end{aligned}\quad (1.35)$$

Рівняння (1.35) і (1.24) представляються в стандартній формі

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_1 &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}(t) \mathbf{x}_2, \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= \mathbf{A}_2(t) \mathbf{x}_2,\end{aligned}\quad (1.36)$$

де $\mathbf{x}_1 = (\tilde{x}_q, \tilde{i}_q)^T$, $\mathbf{x}_2 = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{x}_d, \tilde{i}_d)^T$,

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -k_{ii} \\ 1 & -k_{iq} \end{bmatrix}, \mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta \omega & \alpha \beta & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega_2 & 0 & \alpha L_m \\ -\omega_2 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{ii} \\ \alpha \beta & \beta \omega & 1 & -k_{id} \end{bmatrix}.$$

Оскільки $\mathbf{A}_1 \in \text{Гурвіцевою}$ $\forall (k_{ii}, k_{iq}) > 0$, $\mathbf{B}(t)$ обмеженою при $|\omega| < c < \infty$, положення рівноваги $\mathbf{x}_2 = 0$ є експоненціально стійким, то положення рівноваги $\mathbf{x}_1 = 0$ також експоненціально стійке. При обмежених $\psi^* > 0$ і M^* струми i_q^* і i_d^* також обмежені, а, отже, помилка відпрацювання моменту $\tilde{M}(t)$ в (1.34) експоненціально згасає в нуль. Таким чином, цілі управління моментом і модулем вектора потокозчеплення ротора при асимптотичній орієнтації по полю АД досягаються при використанні нелінійного алгоритму управління, що складається з:

- компенсуючого регулятора

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} &= \mathbf{e}^{J_{\varepsilon_0}} \left[\boldsymbol{\sigma} \begin{pmatrix} -\omega_0 \mathbf{i}_q + \mathbf{v}_d \\ \omega \mathbf{i}_d + \mathbf{v}_q \end{pmatrix} \right], \\ \begin{pmatrix} \mathbf{i}_d \\ \mathbf{i}_q \end{pmatrix} &= \mathbf{e}^{-J_{\varepsilon_0}} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_a \\ \mathbf{i}_b \end{pmatrix}; \mathbf{e}^{J_{\varepsilon_0}} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix};\end{aligned}\quad (1.37)$$

- регулятора модуля потоку

$$\begin{aligned} \dot{i}_d^* &= \frac{\psi^*}{L_m}, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{\dot{i}_q}{\psi^*}; \end{aligned} \quad (1.38)$$

- регулятора струму по осі d

$$\begin{aligned} v_d &= -k_{id1} \tilde{i}_d + x_d, \\ \dot{x}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d; \end{aligned} \quad (1.39)$$

- регулятора моменту

$$\dot{i}_q^* = \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}; \quad (1.40)$$

$$\text{де } \mu_1 = \frac{3 L_m}{2 L_2}.$$

- регулятора струму по осі q

$$\begin{aligned} v_q &= -k_{iq1} \tilde{i}_q + x_q, \\ \dot{x}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q. \end{aligned} \quad (1.41)$$

Структурна схема стандартного алгоритму непрямого векторного керування наведена на рис. 1.4.

Повні рівняння динаміки помилок регулювання модуля вектора потокозчеплення і моменту задаються (1.24), (1.34) і мають вигляд

$$\tilde{y}_1 = \begin{pmatrix} \tilde{\psi} \\ \tilde{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left[(\psi^* + \tilde{\psi}_d)^2 + \tilde{\psi}_q^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \psi^* \\ \frac{3 L_m}{2 L_2} \left[\tilde{\psi}_d (\dot{i}_q^* + \tilde{i}_q) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q (\dot{i}_d^* + \tilde{i}_d) \right] \end{pmatrix}, \quad (1.42)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_q + x_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d, \end{aligned} \quad (1.43)$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_d, \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_d, \\
\dot{\tilde{x}}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d, \\
\dot{\tilde{i}}_d &= -k_{id} \tilde{i}_d + \tilde{x}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta \omega \tilde{\psi}_q.
\end{aligned}
\tag{1.44}$$

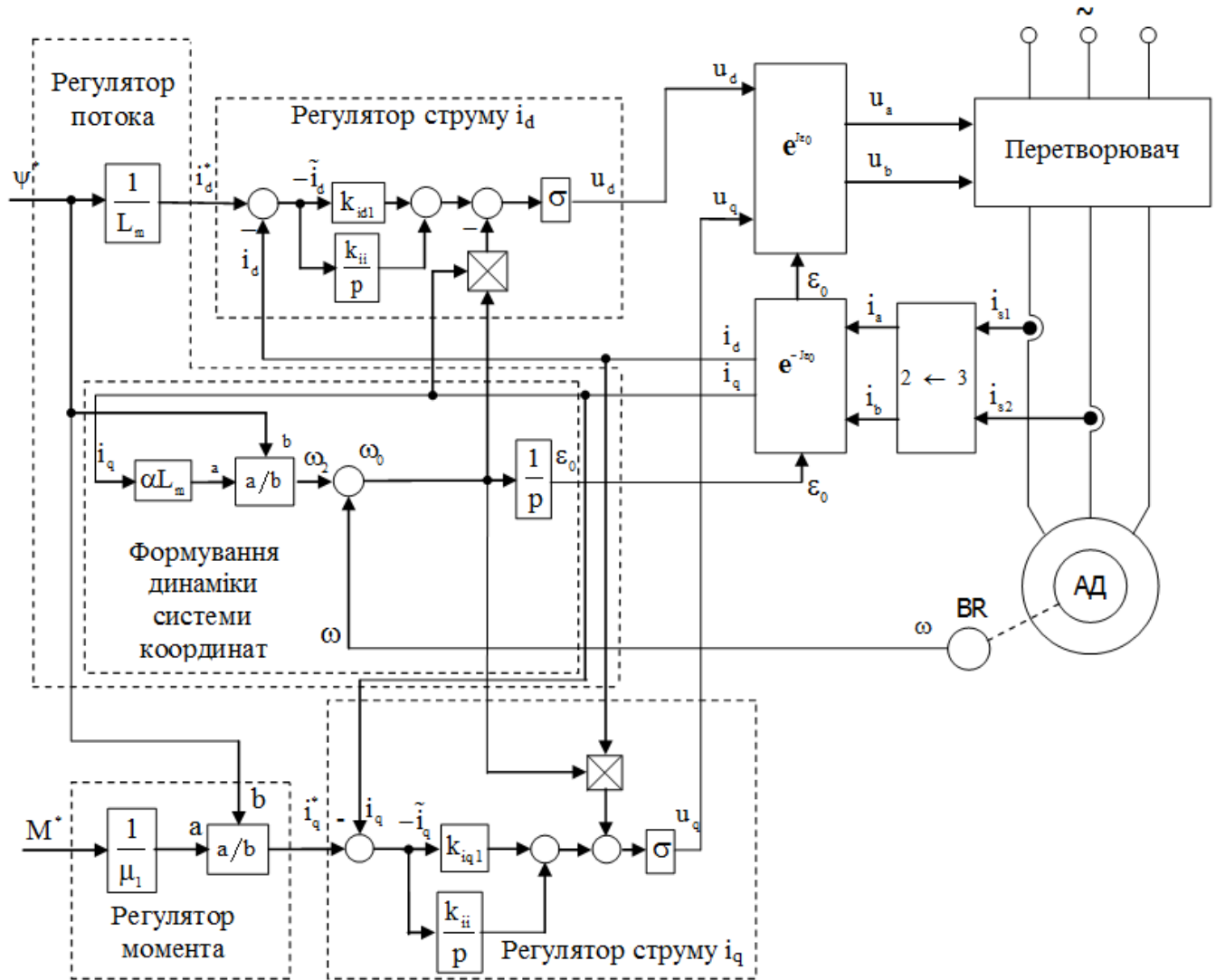


Рисунок 1.4. - Структурна схема системи стандартного непрямого векторного керування АД

Кутова швидкість в (1.43), (1.44) при розгляді завдання управління моментом визначається рішенням рівнянь руху механічної частини

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \left[(M^* + \tilde{M}) - M_c \right],
\tag{1.45}$$

Параметрами настройки алгоритму непрямого векторного управління (1.37) - (1.41) є значення пропорційних ($k_{id} = k_{iq} = k_p$) та інтегральних (k_{ii}) складових регуляторів струму при виконанні умови (1.28). Типова настройка контурів регулювання струму, як лінійних систем другого порядку з характеристичним рівнянням $p^2 + k_p p + k_{ii} = 0$, передбачає виконання співвідношень

$$k_{ii} = \frac{k_p^2}{4} \text{ при } \xi = 1, \quad k_{ii} = \frac{k_p^2}{2} \text{ при } \xi = \sqrt{2}/2, \quad (1.46)$$

де $k_{ii} = \omega_0^2$, ω_0 – власна частота недемпфованих коливань, ξ – коефіцієнт демпфування коливальної ланки.

При збільшенні коефіцієнтів регуляторів струму здійснюється перехід до струмового управління АД, коли $i_d = i_d^*$, $i_q = i_q^*$, тобто при $\tilde{i}_d = \tilde{i}_q = 0$. При цих умовах помилки регулювання моменту $\tilde{M}$ визначаються помилками регулювання компонент вектора потокозчеплення ротора $\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q$. Після їх згасання в нуль регулювання моменту, як впливає з (1.42), відбувається без помилок.

Розглянутий стандартний алгоритм регулювання моменту й модуля вектора потокозчеплення ротора має властивість локальної експоненціальної стійкості і забезпечує асимптотичну розв'язку процесів управління вихідними координатами в сталому режимі. Асимптотичне регулювання потоку-моменту досягається в разі, коли відомі і постійні параметри АД. Процеси управління моментом і потоком є взаємопов'язаними в динаміці.

1.3. Синтез алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком з підвищеними властивостями робастності

Базова конфігурація алгоритмів управління потоком

$$i_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (1.47)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\psi^*} + \frac{\varphi_1(y, y_1^*, z)}{\psi^*},$$

$$u_d = \sigma \left(\gamma i_d^* - \omega_0 i_q^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{idl} \tilde{i}_d - v_d \right), \quad (1.48)$$

де $\varphi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*, \mathbf{z})$ - функція, що забезпечує глобальну стабілізацію підсистеми потоку, $k_{id1} > 0$ - коефіцієнт пропорційної складової регулятора струму по осі d, v_d - додатковий коригувальний сигнал, і моментом

$$\dot{i}_q^* = \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}, \quad \psi^* > 0, \quad (1.49)$$

$$u_q = \sigma(\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 \dot{i}_d^* + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_q^* - k_{iq1} \tilde{i}_q - v_q), \quad (1.50)$$

де $k_{iq1} > 0$ - коефіцієнт пропорційної складової регулятора струму по осі q, v_q - додатковий коригувальний сигнал, надає можливість сформувати кілька варіантів систем управління моментом-потокком за рахунок конструювання коригувальних зворотних зв'язків $\varphi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*)$, v_d і v_q , які повинні забезпечувати:

- а) глобальну стабілізацію системи;
- б) формування бажаних показників якості управління;
- с) властивості грубості до варіацій параметрів роторного ланцюга.

Рівняння динаміки помилок відпрацювання в композитній системі момента-потоку задаються мають вигляд

$$\begin{pmatrix} \tilde{\psi} \\ \tilde{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\psi_d^2 + \psi_q^2)^{\frac{1}{2}} - \psi^* \\ \mu_1 [\psi^* \tilde{i}_q + \tilde{\psi}_d \dot{i}_q - \tilde{\psi}_q \dot{i}_d] \end{pmatrix}, \quad (1.51)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d - \varphi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*), \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{id} \tilde{i}_d + \omega_0 \tilde{i}_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta \omega \tilde{\psi}_q - v_d, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_q - \omega_0 \tilde{i}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d - v_q. \end{aligned} \quad (1.52)$$

Необхідно відзначити важливу властивість системи (1.51), (1.52), яка дозволяє сконструювати алгоритм керування моментом-потокком на основі принципу пасивності.

Положення рівноваги $\tilde{\mathbf{x}}_e = 0, \tilde{\mathbf{x}}_e = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d, \tilde{i}_q)^T$ системи (1.52) є глобально експоненціально стійким при $\varphi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*) = -\alpha L_m \tilde{i}_q$, $v_d = v_q = 0$.

Алгоритм управління при цьому включає:

- регулятор вектора потокозчеплення ротора

$$\begin{aligned} \dot{i}_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \\ \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \end{aligned} \quad (1.53)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{\dot{i}_q^*}{\psi^*},$$

- регулятор моменту

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}, \\ \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right), \end{aligned} \quad (1.54)$$

- двовимірний регулятор струму

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma (\gamma \dot{i}_d^* - \omega_0 \dot{i}_q^* - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{id1} \tilde{i}_d) \\ \sigma (\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 \dot{i}_d^* + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_q^* - k_{iq1} \tilde{i}_q) \end{pmatrix}, \quad (1.55)$$

Рівняння динаміки помилок відпрацювання в електричній підсистемі АД при цьому будуть

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha \tilde{\psi}_d + \omega_2 \tilde{\psi}_q + \alpha L_m \tilde{i}_d, \\ \dot{\tilde{\psi}}_q &= -\alpha \tilde{\psi}_q - \omega_2 \tilde{\psi}_d + \alpha L_m \tilde{i}_q, \\ \dot{\tilde{i}}_d &= -k_{id} \tilde{i}_d + \omega_0 \tilde{i}_q + \alpha \beta \tilde{\psi}_d + \beta \omega \tilde{\psi}_q, \\ \dot{\tilde{i}}_q &= -k_{iq} \tilde{i}_q - \omega_0 \tilde{i}_d + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta \omega \tilde{\psi}_d. \end{aligned} \quad \mathbf{A}_e(t) \tilde{\mathbf{x}}_e \quad (1.56)$$

Для доказу стійкості системи (1.55) розглянемо наступну функцію Ляпунова з $\tilde{\mathbf{x}}_e = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d, \tilde{i}_q)^T$, $1/\beta > \varepsilon > 0$:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_e^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \varepsilon \\ \varepsilon & 0 & \varepsilon/\beta & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 & \varepsilon/\beta \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_e \triangleq \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_e^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_e. \quad (1.57)$$

Похідна від (1.56) вздовж траєкторій руху (1.56) дорівнює

$$\dot{V} = -\frac{\varepsilon}{\beta} \left(\frac{R_1}{\sigma} \right) (\tilde{i}_d^2 + \tilde{i}_q^2) - \alpha (1 - \varepsilon \beta) (\tilde{\psi}_d^2 + \tilde{\psi}_q^2) \triangleq -\tilde{\mathbf{x}}_e^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_e < 0, \quad (1.58)$$

якщо: $\varepsilon = \frac{\alpha L_m}{\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta + k_i} < \frac{1}{\beta}$, $k_i = k_{id} = k_{iq}$.

З (1.57) і (1.58) випливає, що положення рівноваги є глобально експоненціально стійким.

Алгоритм управління (1.53) - (1.55) має важливу особливість: система (1.56) є експоненціально стійкою $\forall(k_{id}, k_{iq}) \geq 0$, в тому числі і при відсутності зворотного зв'язку по струму, коли $k_{id} = k_{iq} = 0$. При цьому, стійкість процесів управління струмами статора і вектора потокозчеплення ротора забезпечується за рахунок природних властивостей стійкості (пасивності) електричної системи АД, а для управління немає необхідності в вимірі струмів статора.

Структурна схема системи непрямого векторного керування з алгоритмом (1.53) - (1.55) представлена на рис. 1.5.

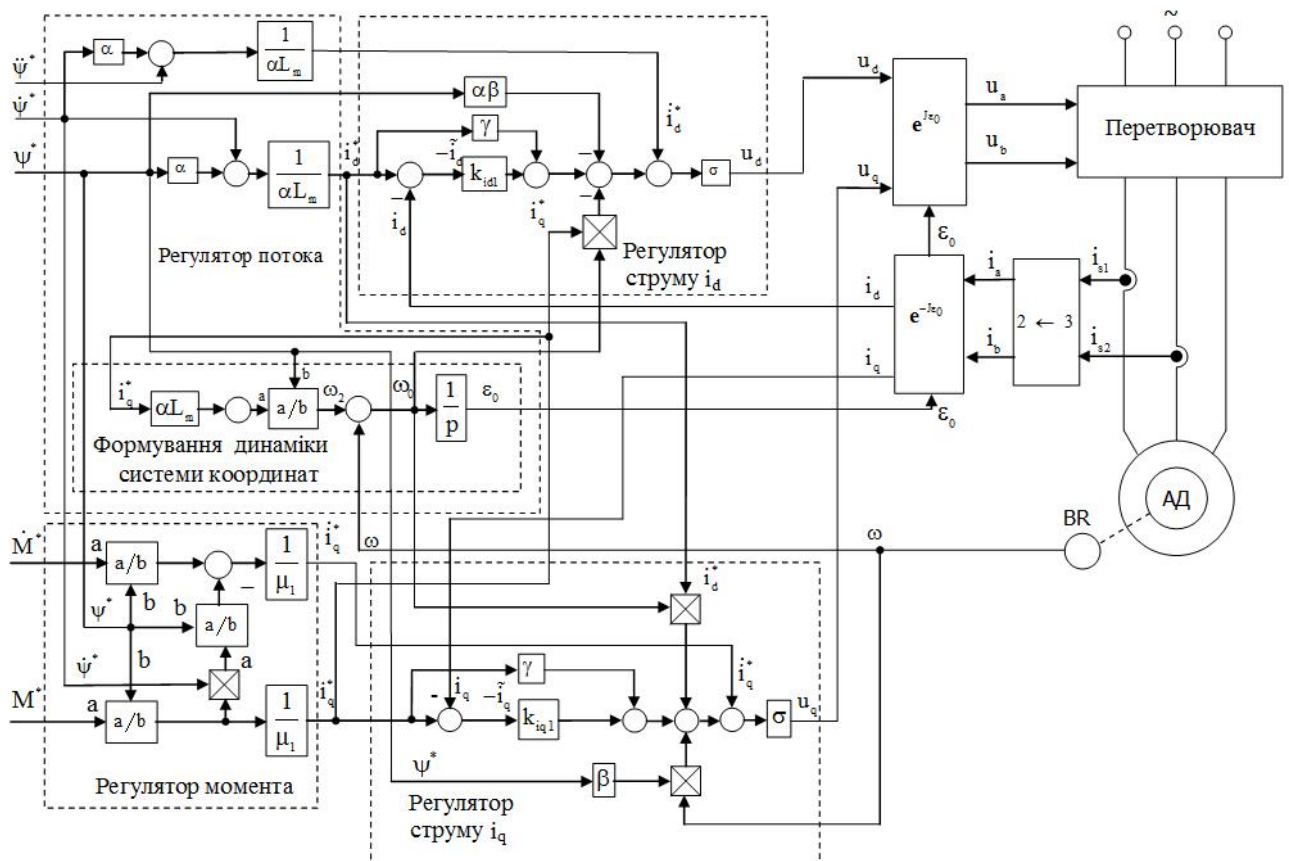


Рисунок 1.5. - Структурна схема системи непрямого векторного керування АД, заснованої на принципі пасивності

1.3.1. Алгоритм поліпшеного непрямого векторного керування (I-IFOC)

Алгоритм I-IFOC є подальшим розвитком теорії непрямого полеорієнтування. Він передбачає формування коригувальних зворотних зв'язків для системи (1.52) в такому вигляді:

$$v_d = \omega_0 \tilde{i}_q, \quad (1.59)$$

$$v_q = -\omega_0 \tilde{i}_d + z_q, \quad (1.60)$$

$$\dot{z}_q = -k_{iiq} \tilde{i}_q,$$

$$\varphi_1(y, y_1^*) = \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d, \quad (1.61)$$

де z_q - інтегральна компонента регулятора струму по осі q , $k_{iiq} > 0$ - коефіцієнт інтегральної складової регулятора струму; $\gamma_1 > 0$ - коефіцієнт робастифікованого зворотного зв'язку підсистеми потоку.

Алгоритм I-IFOC при цьому включає:

- регулятор вектора потокозчеплення ротора у вигляді

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \\ \dot{i}_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \\ \dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 &= \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\psi^*} + \frac{\gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d}{\psi^*}, \gamma_1 > 0; \end{aligned} \quad (1.62)$$

- регулятор струму по осі d

$$u_d = \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{id1} \tilde{i}_d); \quad (1.63)$$

- регулятор моменту

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}, \\ \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right); \end{aligned} \quad (1.64)$$

- регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_q^* - k_{iq1} \tilde{i}_q - z_q \right), \\ \dot{z}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_q. \end{aligned} \quad (1.65)$$

Настроювальними параметрами алгоритму управління (1.62) - (1.65) являються коефіцієнти регуляторів струму $k_{id1}, k_{iq1}, k_{iiq}$ по осях d і q , а також корегуючий коефіцієнт γ_1 , який повинен задовольняти умові

$$k_{id} > \frac{\alpha (L_m + \gamma_1 \beta)^2}{4\gamma_1} \quad (1.66)$$

Регулятор (1.62) - (1.65) перетворює вихідну модель АД

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 &= \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{B}_1(t) \tilde{\mathbf{x}}_2, \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2 &= \mathbf{A}_2(t, \tilde{\mathbf{x}}_1) \tilde{\mathbf{x}}_2, \end{aligned}$$

в систему виду

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 = (\tilde{\psi}, \tilde{\mathbf{M}})^T = \mathbf{h}(t, \tilde{\mathbf{x}}_1, \tilde{\mathbf{x}}_2) = \begin{pmatrix} \left[(\psi^* + \tilde{\psi}_d)^2 + \tilde{\psi}_q^2 \right]^{1/2} - \psi^* \\ \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (\dot{i}_q^* + \tilde{i}_q) + \psi^* \tilde{i}_q - \tilde{\psi}_q (\dot{i}_d^* + \tilde{i}_d) \right] \end{pmatrix} \quad (1.67)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_q \\ \dot{\tilde{i}}_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_{iiq} \\ -1 & -k_{iq} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\beta\omega & \alpha\beta & 0 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}_2 \triangleq \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{B}_1(t) \tilde{\mathbf{x}}_2, \quad (1.68)$$

де $\tilde{\mathbf{x}}_1 = (z_q, \tilde{i}_q)^T$, $k_{iq} = \gamma + k_{iq1}$,

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{\psi}}_d \\ \dot{\tilde{\psi}}_q \\ \dot{\tilde{i}}_d \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega_2 & \alpha L_m \\ -\omega_2 & -\alpha & -\gamma_1 \beta \omega \\ \alpha \beta & \beta \omega & -k_{id} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_d \\ \tilde{\psi}_q \\ \tilde{i}_d \end{pmatrix} \triangleq \mathbf{A}_2(t, \tilde{\mathbf{x}}_1) \tilde{\mathbf{x}}_2, \quad (1.69)$$

де $k_{id} = \gamma + k_{id1}$, $\tilde{\mathbf{x}}_2 = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T$.

Підсистема потоку (1.69) глобально експоненціально стійка, матриця $\mathbf{A}_1$ в (1.68) є матрицею Гурвіца, $\mathbf{B}_1(t)$ обмежена при обмеженій кутовій швидкості, вектор функція $\mathbf{h}(t, \tilde{\mathbf{x}}_1, \tilde{\mathbf{x}}_2)$ задовольняє умові, отже, положення рівноваги композитної системи (1.68), (1.69) є глобально експоненціально стійким. Таким

чином цілі управління моментом і потоком $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{y}_1 = 0$ досягаються глобально при $\psi^* > 0$.

Після затухання процесів в електромагнітній підсистемі (1.69) регулювання потоку не впливає на процеси управління моментом, тобто регулювання вихідних змінних асимптотично розв'язане.

Структурна схема системи поліпшеного непрямого векторного управління з алгоритмом (1.66) - (1.69) пре дставлена на рис. 1.6.

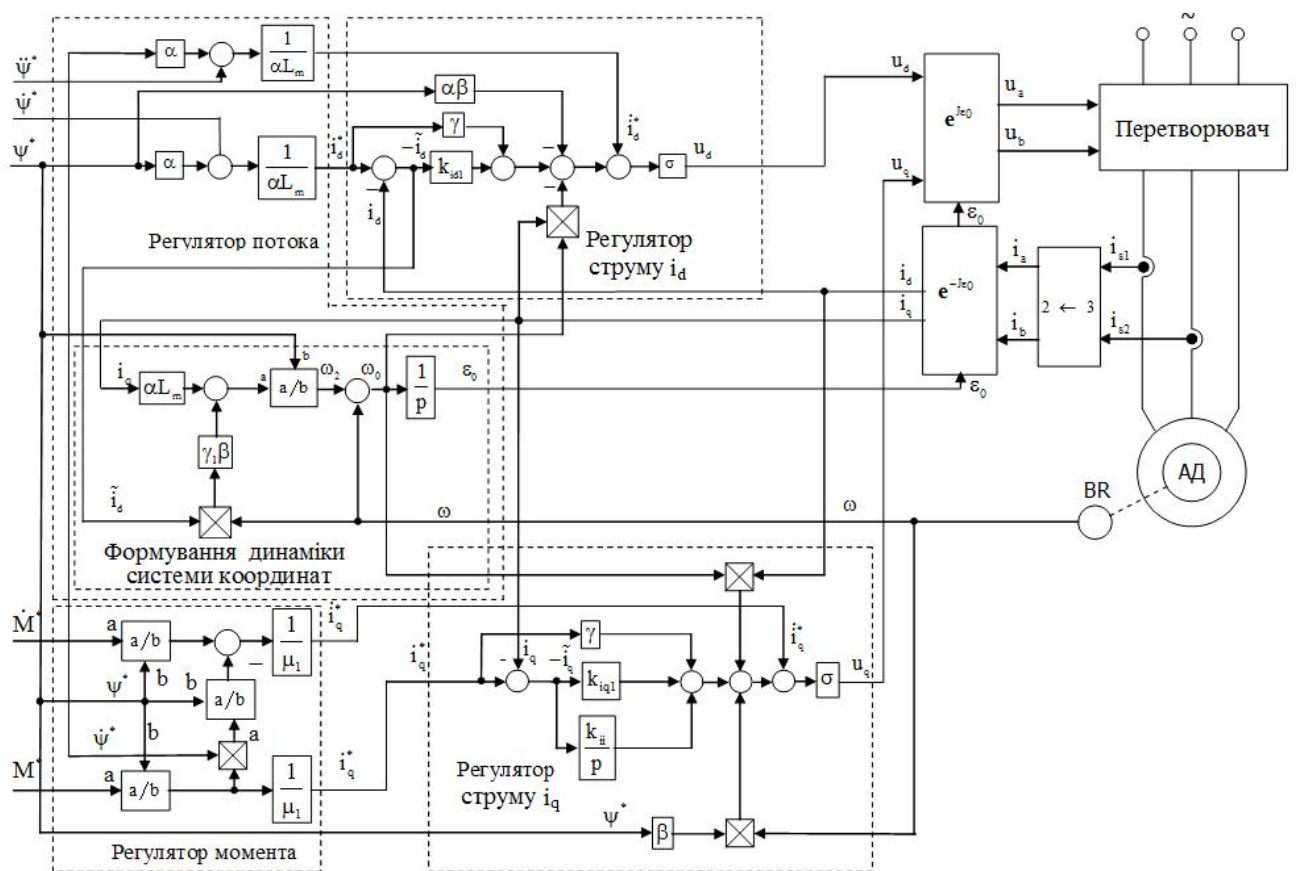


Рисунок 1.6. - Структурна схема системи поліпшеного непрямого векторного керування АД

Відзначимо, що рівняння динаміки помилок відпрацювання (1.68), (1.69) мають форму декомпозиції електромеханічна-електромагнітна підсистеми, в якій електромеханічна підсистема забезпечує управління моментом, а електромагнітна - модулем вектора потокозчеплення ротора.

На відміну від стандартного векторного управління, яке забезпечувало симптотичне регулювання постійних ψ^* і M^* , I-IFOC гарантує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій потоку і моменту, які в умовах відомих параметрів АД, після згасання в нуль помилок відпрацювання потоку $\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q$, обумовлених початковими умовами, буде ідеальним.

1.3.2. Алгоритм робастного непрямого векторного керування (R-IFOC)

Концепція поліпшеного непрямого векторного керування АД, передбачає декомпозицію вихідної моделі АД за рахунок дії нелінійного регулятора на дві пов'язані нелінійні підсистеми: електромеханічну і електромагнітну, остання з яких має властивість глобальної експоненційної стійкості за рахунок введення нелінійного зворотного зв'язку за помилкою регулювання польової компоненти струму статора. Покращене непряме векторне управління, в порівнянні зі стандартним, гарантує більш високу грубість щодо параметричних збурень роторного ланцюга. Разом з тим в задачах регулювання моменту присутність помилки регулювання польової компоненти струму статора є небажаною, оскільки вона входить у вираз для помилки відпрацювання моменту і може надавати негаактивний вплив на точність регулювання вихідних координат при низьких швидкостях.

Для виключення цього недоліку разом з використанням розробленого методу синтезовано алгоритм робастного непрямого векторного управління (Robust Indirect Field Oriented Control R-IFOC), в якому пропонується досягати ефекту підвищення грубості шляхом формування корегуючої функції $\phi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*)$ не на підставі помилки регулювання польової компоненти вектора струму статора $\tilde{i}_d$, а в функції помилки її оцінювання при нульових помилках регулювання статорних струмів $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$ в усталених режимах.

Робастний алгоритм непрямого векторного керування передбачає формування коригувальних зворотних зв'язків для системи (1.52) в такому вигляді:

$$\begin{aligned} v_d &= z_d, \\ \dot{z}_d &= -k_{iid} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (1.70)$$

$$\begin{aligned} v_q &= z_q, \\ \dot{z}_q &= -k_{iiq} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (1.71)$$

$$\varphi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*) = \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d + \gamma_2 \beta \omega (\dot{i}_d - \hat{i}_d), \quad (1.73)$$

де z_d - інтегральна компонента регулятора струму по осі d; $\hat{i}_d$ - оцінка струму i_d .

Алгоритм R-IFOC включає:

- регулятор вектора потокозчеплення ротора у вигляді

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \\ i_q^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \\ \dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 &= \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\psi^*} + \frac{\gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d}{\psi^*} + \frac{\gamma_2 \beta \omega \ddot{i}_d}{\psi^*}, \gamma_1, \gamma_2 > 0; \end{aligned} \quad (1.74)$$

- регулятор струму по осі d

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma \dot{i}_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_d^* - k_{id1} \tilde{i}_d - z_d); \\ \dot{z}_d &= k_{iid} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (1.75)$$

- регулятор моменту

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \frac{M^*}{\psi^*}, \\ i_q^* &= \frac{1}{\mu_1} \left(\frac{\dot{M}^*}{\psi^*} - \frac{M^* \dot{\psi}^*}{\psi^{*2}} \right), \end{aligned} \quad (1.76)$$

- регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma (\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_q^* - k_{iq1} \tilde{i}_q - z_q), \\ \dot{z}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_q. \end{aligned} \quad (1.77)$$

- спостерігач польової компоненти струму статора

$$\dot{\hat{i}}_d = -\gamma \hat{i}_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi^* + \frac{1}{\sigma} u_d + k_1 \tilde{i}_d, \quad (1.78)$$

де $\tilde{i}_d = i_d - \hat{i}_d$ - помилка оцінювання струму i_d ; $(k_{id1}, k_{iq1}) > 0$ - коефіцієнти пропорційних складових струмів; k_{ii} - коефіцієнти інтегральних складових регуляторів струму; $k_1 > 0$ - корегуючий коефіцієнт спостерігача; $(\gamma_1, \gamma_2) > 0$ - параметри настройки зворотних зв'язків підсистеми потоку.

При використанні R-IFOC (1.75) - (1.78) повні рівняння динаміки помилок регулювання і оцінювання подаються у вигляді декомпозиції двох пов'язаних підсистем, що включає підсистему моменту (електромеханічну підсистему)

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \left[\tilde{\psi}_d (i_q^* + \tilde{i}_q) - \tilde{\psi}_q (i_d^* + \tilde{i}_d) \right] \\ \begin{pmatrix} \dot{z}_q \\ \dot{\tilde{i}}_q \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & k_{iiq} \\ -1 & -k_{iq} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_q \\ \tilde{i}_q \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta\omega & \alpha\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_d \\ \tilde{i}_d \\ \tilde{\psi}_d \\ \tilde{\psi}_q \\ \tilde{i}_d \end{pmatrix} \triangleq \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{B}_1(t) \tilde{\mathbf{x}}_2 \end{aligned} \quad (1.79)$$

і підсистему потоку (електромагнітну підсистему)

$$\begin{aligned} \tilde{\psi} &= \left[(\psi^* + \tilde{\psi}_d)^2 + \tilde{\psi}_q^2 \right]^{1/2} - \psi^* \\ \begin{pmatrix} \dot{z}_d \\ \dot{\tilde{i}}_d \\ \dot{\tilde{\psi}}_d \\ \dot{\tilde{\psi}}_q \\ \dot{\tilde{i}}_d \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & k_{iid} & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -k_{id} & \alpha\beta & \beta\omega & 0 \\ 0 & \alpha L_m & -\alpha & \omega_2 & 0 \\ 0 & -\gamma_1 \beta \omega & -\omega_2 & -\alpha & -\gamma_2 \beta \omega \\ 0 & 0 & \alpha\beta & \beta\omega & -k_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_d \\ \tilde{i}_d \\ \tilde{\psi}_d \\ \tilde{\psi}_q \\ \tilde{i}_d \end{pmatrix} \triangleq \mathbf{A}_2(t, \tilde{\mathbf{x}}_1) \tilde{\mathbf{x}}_2, \end{aligned} \quad (1.80)$$

де $k_0 = \gamma + k_1$.

Експоненціальна стійкість положення рівноваги $\tilde{\mathbf{x}}_2 = 0$ впливає з розгляду функції Ляпунова для системи (1.80) зниженого порядку (при $z_d = 0$).

Пряме використання теореми Ляпунова про стійкість встановлює експоненціальну стійкість положення рівноваги $(\tilde{i}_d, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d) = 0$, а, отже, виходячи із структурних властивостей (1.80), і положення рівноваги $\tilde{\mathbf{x}}_2 = (z_d, \tilde{i}_d, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{i}_d)^T = 0$.

Таким чином, стан рівноваги композитної системи (1.79), (1.80) є глобально експоненціально стійким, що гарантує досягнення асимптотичного відпрацювання моменту і потоку, а також асимптотичне розв'язання цих процесів.

Номинальна динаміка контуру регулювання моментного струму $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}_1$ є лінійною. З четвертого рівняння в (1.80) видно, що підсистема потоку має два негативні зворотні зв'язки з коефіцієнтами γ_1 і γ_2 , які формуються завданням функції $\phi_1(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1^*, \mathbf{z}) = \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d + \gamma_2 \beta \omega \tilde{i}_d$. Під час дії параметричних збурень роторного ланцюга компонента $\tilde{i}_d$ прагне до нуля в сталому режимі, в той час як коригувальний сигнал $\gamma_2 \beta \omega \tilde{i}_d$ забезпечує підсистемі потоку замкнутість негативним зворотним зв'язком, а, отже, і грубість по відношенню до зміни параметрів роторного ланцюга.

Структурна схема системи з алгоритмом робастного непрямого векторного управління представлена на рис. 1.7. На малюнку ділянками виділені компоненти R-IFOC, що відрізняють його від IFOC.

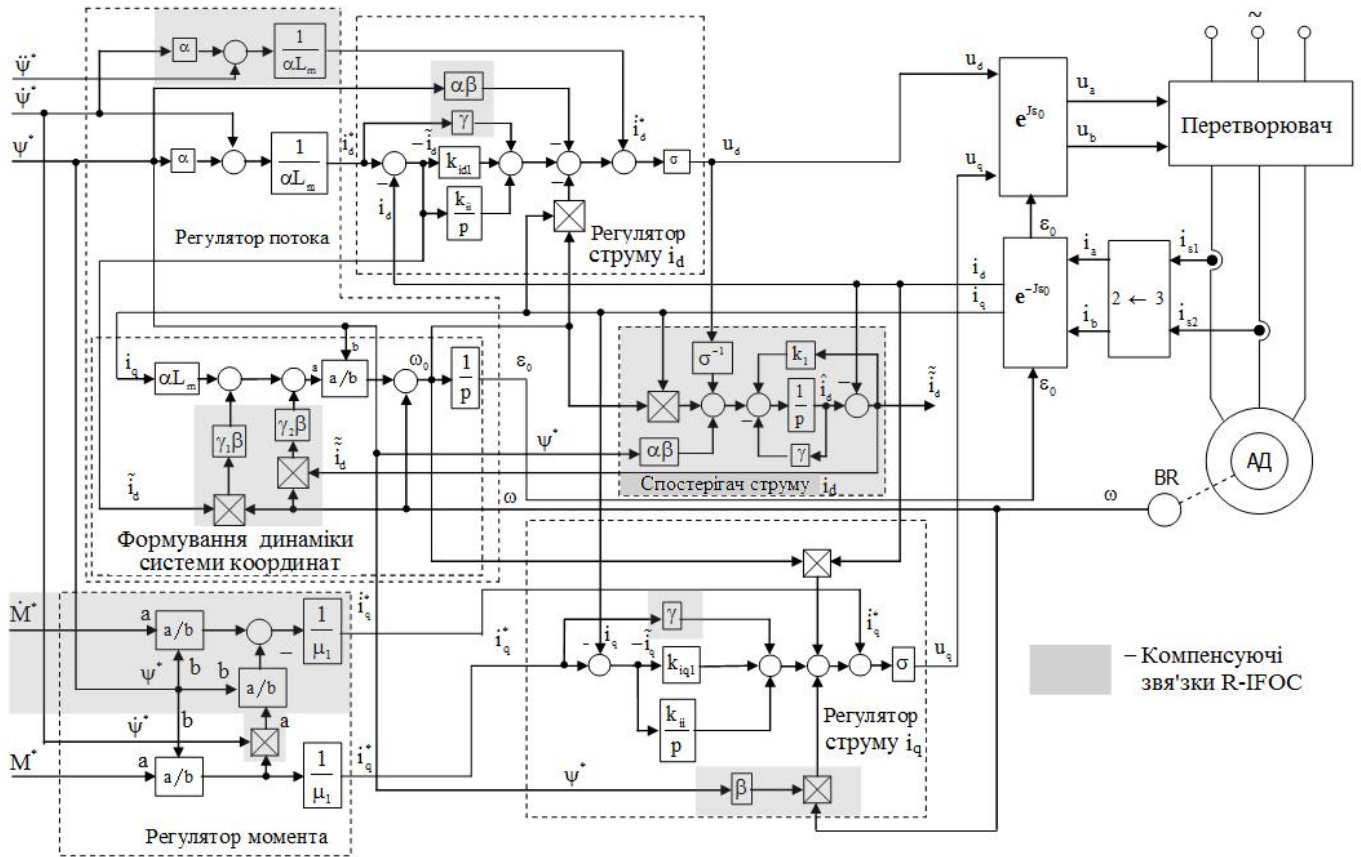


Рисунок 1.7. - Структурна схема системи робастного непрямого векторного керування АД

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто метод синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком асинхронних двигунів, який ґрунтується на декомпозиції вихідної структури двигуна на дві зв'язані підсистеми: електромеханічна-електромагнітна або механічна-електрична. Доведено, що завдяки таким властивостям декомпозицій композитна система являється глобально (локально) асимптотично експоненціально стійкою.

2. Показано, що глобальна стабілізація і робастифікація підсистеми потоку алгоритму робастного непрямого векторного керування R-IFOC досягається за рахунок введення стабілізуючого зворотного зв'язку за помилково оцінки струму статора по осі d (польової компоненти струму статора), а робастифікація регулювання цього струму - за рахунок використання класичного ПІ-регулятора струму з "великим" коефіцієнтом посилення.

3. Дано теоретичне обґрунтування локальної асимптотичної стійкості стандартного алгоритму непрямого векторного керування IFOC (при регулюванні постійних завдань моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора). Показано, що при збільшенні коефіцієнтів зворотних зв'язків ПІ регуляторів струму взаємозв'язок між процесами регулювання моменту і потоку знижується. За умови токового управління АД (при нескінченних коефіцієнтах регуляторів струму) IFOC набуває властивість глобальної асимптотичної експоненційної стійкості.

4. Показано, що в умовах точно відомих параметрів АД існує функція Ляпунова для його електричної підсистеми, яка описується нелінійними диференціальними рівняннями 4-го порядку, що дозволяє синтезувати алгоритм відпрацювання моменту і потоку, який не вимагає вимірювати струми статора і базується на природних властивостях стійкості АД.

РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АД

2.1. Структура стенду для дослідження алгоритмів векторного керування при керуванні моментом

Для дослідження робастного і стандартного алгоритмів управління рекомендується використання дослідного стенду, що містить наступні складові частини: перетворювач, АД, датчики, навантажувальний агрегат.

Для порівняння синтезованого алгоритму робастного векторного управління використаємо класичний алгоритм непрямого векторного керування [38], який в даний час є промисловим стандартом.

Обидва алгоритми мають подібну базову структуру, яка включає в себе внутрішні контури регулювання струмів, представлені в системі координат, асимптотично орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора, і зовнішні контури регулювання моменту і потоку. На відміну від стандартного алгоритму векторного управління, в якому підсистема потоку лише локально асимптотично стійка, запропонований алгоритм забезпечує глобальне експонентне асимптотичне відпрацювання модуля і кутового положення вектора потокозчеплення ротора, що і гарантує властивість робастності стосовно параметричних збурень.

Схема стенду представлена на рис. 2.1. До складу стенду входять:

1. Два асинхронних двигуна потужністю 2.2 кВт, вали яких жорстко пов'язані між собою за допомогою муфти. На валу також знаходиться фотоімпульсний датчик швидкості з роздільною здатністю 1024 імпульсів / об.

Один з двигунів М1 є досліджуваним, інший М2 виконує функцію індикаторної машини. Силові частини перетворювачів, які забезпечують управління асинхронними двигунами, ідентичні і включають: силовий випрямляч, ланку постійного струму з клампером для скидання енергії, одержуваної від двигуна при його роботі в генераторних режимах, зарядний резистор R_z з

зарядним реле К для безпечного заряду ємності С, силовий інвертор, а також датчики статорних струмів ДТ1, ДТ2 і датчик напруги ланки постійного струму ДН.

2. Керуюча частина включає контролер на базі цифрового сигнального процесора TMS320LF2406. Плата контролера підключена до персонального комп'ютера (ПК) через COM-порт з використанням RS-232 протоколу обміну даними. Контролер забезпечує реалізацію алгоритму управління із записом і відображенням обраних змінних в реальному масштабі часу, розрахунок і генерування сигналів ШІМ, управління ключем клампера, введення сигналів зворотних зв'язків за струмом і швидкості, реалізації всіх захисних функцій, а також загального управління всією системою. Для вимірювання струмів використано два гальванічно розв'язаних датчиків струму ДТ1, ДТ2 (LEM). Період квантування за часом при цифровій реалізації алгоритмів керування дорівнює 200 мкс. Керуючі і силові ланцюги установки гальванічно розв'язані.

Параметри досліджуваних двигунів приведені в табл. 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 - Параметри АД с номінальною потужністю 2.2 кВт

Номінальний струм, А	5	Індуктивність статора, Гн	0,28
Число пар полюсів	2	Індуктивність ротора, Гн	0,28
Опір статора, Ом	3,2	Індуктивність намагнічуючого контуру, Гн	0,271
Опір ротора, Ом	2,5	Момент інерції, кг·м ²	0,015

Таблиця 2.2 - Параметри АД с номінальною потужністю 50 кВт

Номінальний струм, А	52	Індуктивність статора, Гн	0,029
Число пар полюсів	2	Індуктивність ротора, Гн	0,029
Опір статора, Ом	0,31	Індуктивність намагнічуючого контуру, Гн	0,025
Опір ротора, Ом	0,195	Момент інерції, кг·м ²	0,3

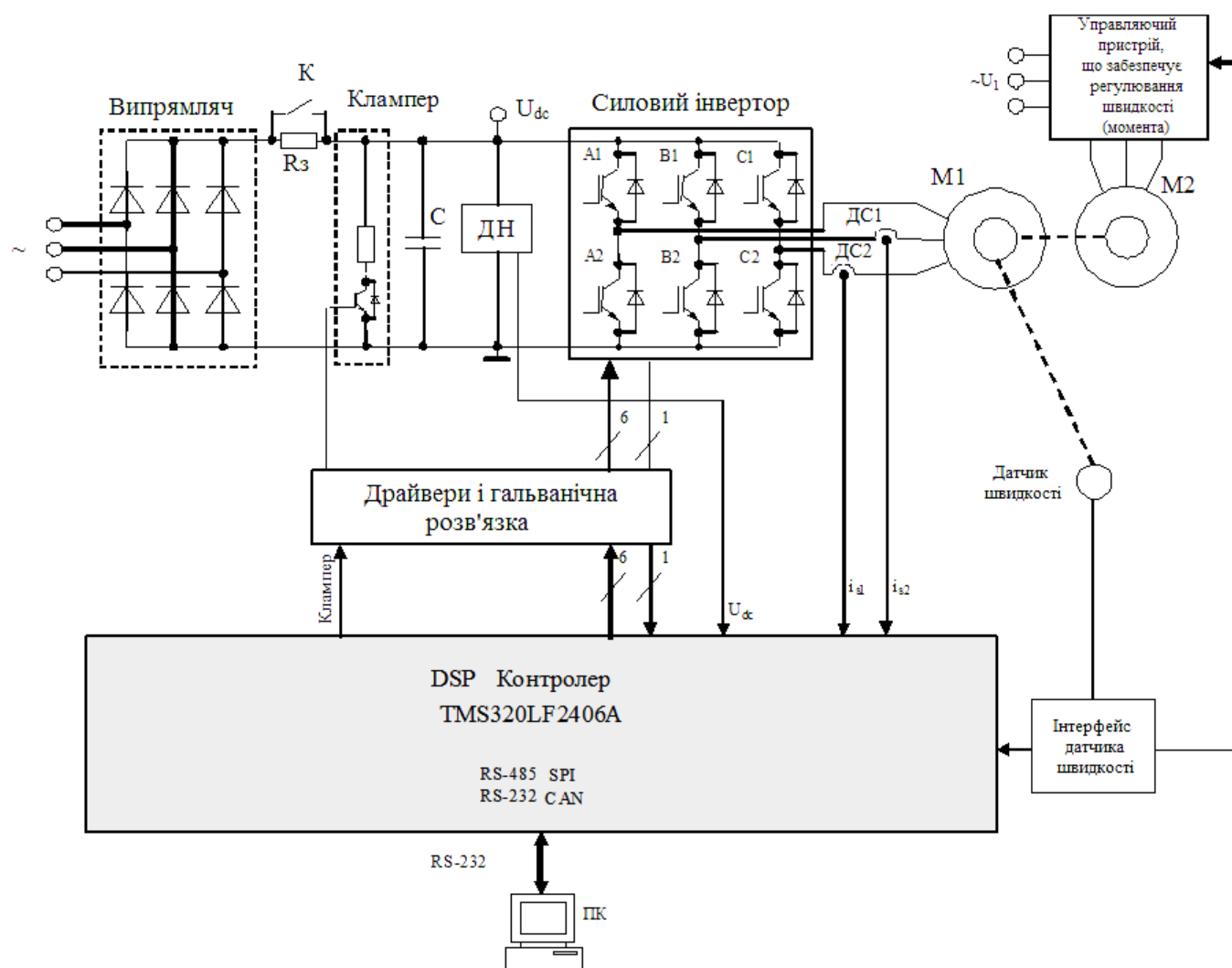


Рисунок 2.1. - Схема дослідного стану для випробування алгоритмів керування асинхронним електроприводом

DSP контролер, який виконує функції управління моментом приводного асинхронного двигуна, виконаний на основі цифрового сигнального процесора TMS320LF2406A (Texas Instruments). Функціональна схема контролера показана на рис. 2.2.

Структура контролера містить наступні функціональні блоки:

- центральний 16 розрядний DSP процесор TMS320LF2406A, максимальна тактова частота якого становить 40МГц. Особливістю даного процесора є виконання операцій типу $Y = AB + C$ за один такт, а операції ділення за 16 тактів;

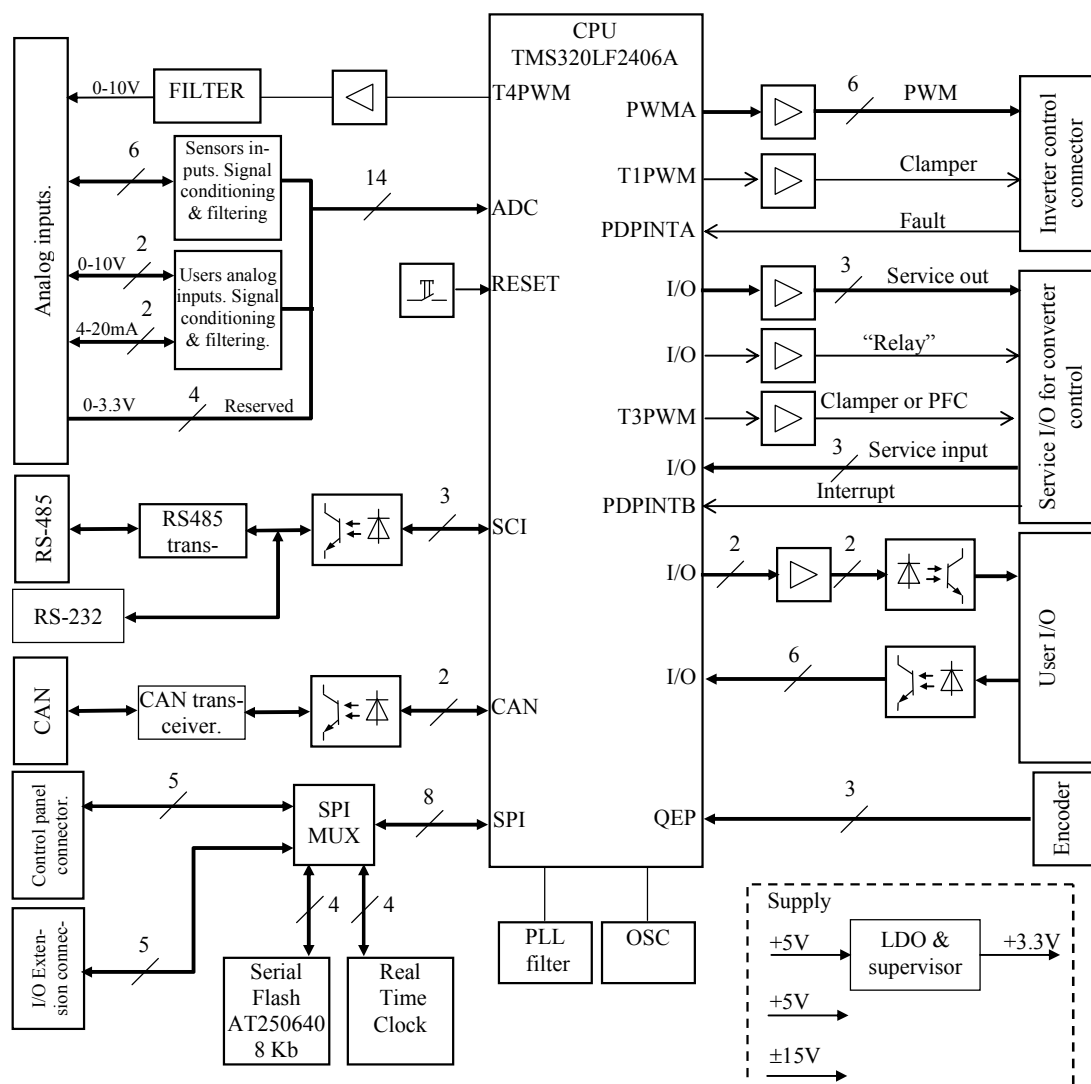


Рисунок 2.2. - Функціональна схема DSP контролера

- пам'ять 32Kb внутрішньої флеш-пам'яті і 2,5Kb внутрішньої оперативної пам'яті;
- 8 аналогових входу (з яких два аналогових входи з діапазоном 0..10V, і два з діапазоном 4..20mA, а також чотири для підключення датчиків) і 6 гальванічно розв'язаних дискретних входів і 2 гальванічно розв'язаних дискретних вихода; 10 розрядний АЦП, час перетворення 1мкс;
- гальванічно розв'язаний комунікаційний інтерфейс на основі RS-232 / RS-485 для обміну даними з ПК. Додатково організована можливість створення мережі для управління групою контролерів на основі CAN інтерфейсу.
- вхід для датчика швидкості, який служить для прийому трьох стандартних послідовностей з фотоімпульсного датчика швидкості.

- SPI мультиплексор розширює SPI порт процесора на три пристрої
- SPI Flash для зберігання настроюваних параметрів вашої системи;
- Порт підключення пульта управління;
- Порт підключення плати розширення дискретного вводу / виводу;
- Порт підключення годинника реального часу.

Для керування силовою платою використовуються два порти: порт управління безпосередньо силовим інвертором (6 ШІМ імпульсів і сигнал захисту перетворювача), сигнал управління клампером; порт сервісних входів / виходів, що для управління модулями на силовій платі такими, як зарядне реле, скидання захисту драйвера і т.д.

Програмне забезпечення установки включає в себе дві складові: програмне ядро контролера для роботи з мовою високого рівня і зовнішня програма, яка працює на персональному комп'ютері і виконує функції візуалізації даних, що надходять із установки з подальшим їх збереженням для подальшої обробки.

Програмне забезпечення контролера розроблено і написано в середовищі Code Composer Studio з використанням об'єктно-орієнтованої мови C++.

2.2. Дослідження робастності алгоритмів векторного керування моментом АД IFOC і R-IFOC

При виконанні досліджень синтезованого алгоритму векторного керування точність відпрацювання моменту і потоку ротора АД дослідимо непрямым методом, який полягає в наступному. Момент, створюваний досліджуваним АД (М1 на рис. 2.1), є моментом навантаження для індикаторної машини (М2 на рис. 2.1), яка працює в режимі стабілізації кутової швидкості з П-регулятором. Для цього алгоритм регулювання моменту індикаторної машини був інтегрований в алгоритм регулювання швидкості, тобто вихід регулятора швидкості формував завдання на момент АД у вигляді

$$M^* = J(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \dot{\omega}^*), \quad (2.1)$$

де k_{ω} - коефіцієнт пропорційної складової П регулятора швидкості; J - сумарний момент інерції; ω^* - задана кутова швидкість обертання валу АД; $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ - помилка відпрацювання швидкості; M^* - заданий момент.

Помилка відпрацювання кутової швидкості і моментний ток індикаторної машини в сталому режимі є величинами прямопропорційними моменту досліджуваної машиною і можуть бути використані для непрямой оцінки якості його відпрацювання. Відзначимо, що при всіх тестах в алгоритмі управління індикаторної машини М2 використовувалися коректні значення параметрів АД.

З метою порівняння динамічних і статичних характеристик, кожен з тестів проводився для двох алгоритмів управління: розробленого робастного R-IFOC і загальноприйнятого для порівняння стандартного алгоритму IFOC.

Для тестування застосовувалася наступний порядок операцій управління АД:

індикаторна машина розганяється на задану швидкість, рівну 50 рад/с, яка стабілізується за допомогою пропорційного регулятора швидкості;

в початковий інтервал часу відбувається збудження досліджуваного АД з використанням заданої траєкторії потокозчеплення, починаючи зі значення 0,02 Вб і закінчуючи 0,96 Вб, з першої похідної, яка дорівнює 1,88 Вб / с, при цьому завдання на момент дорівнює нулю;

через 0,5 с після початку збудження від двигуна потрібно відпрацювати задану траєкторію моменту АД першого порядку, починаючи з нульового значення до 10 Нм на першій ділянці і до -5 Нм на другій (66% і 33% від номінального моменту двигуна). Швидкість зміни заданого моменту дорівнює 200 Нм / с.

Також були встановлені наступні параметри інвертора досліджуваного двигуна: частота ШІМ 10 кГц, мертвий час в інверторі перетворювача – 3,2 мкс.

Коефіцієнти робастного алгоритму управління моментом мають таке значення: коефіцієнти пропорційної і інтегральної складових регуляторів струму $k_{id1} = k_{iq1} = 500$, $k_{iid} = k_{iiq} = 125000$; коригуючі коефіцієнти підсистеми потоку

$\gamma_1 = \gamma_2 = 0.1$, коефіцієнт спостерігача польової компоненти струму статора $k_1 = 500$. Коефіцієнт пропорційного регулятора швидкості індикаторної машини (2.1) встановлено рівним $k_\omega = 50$. Настроювальні коефіцієнти контурів регулювання струму стандартного алгоритму IFOC встановлені такими ж як і для досліджуваного алгоритму.

При проведенні експериментів для стандартного і робастного алгоритмів векторного керування без варіацій активного опору ротора АД, отримані графіки перехідних процесів, представлені на рис. 2.3, які для IFOC і R-IFOC однакові.

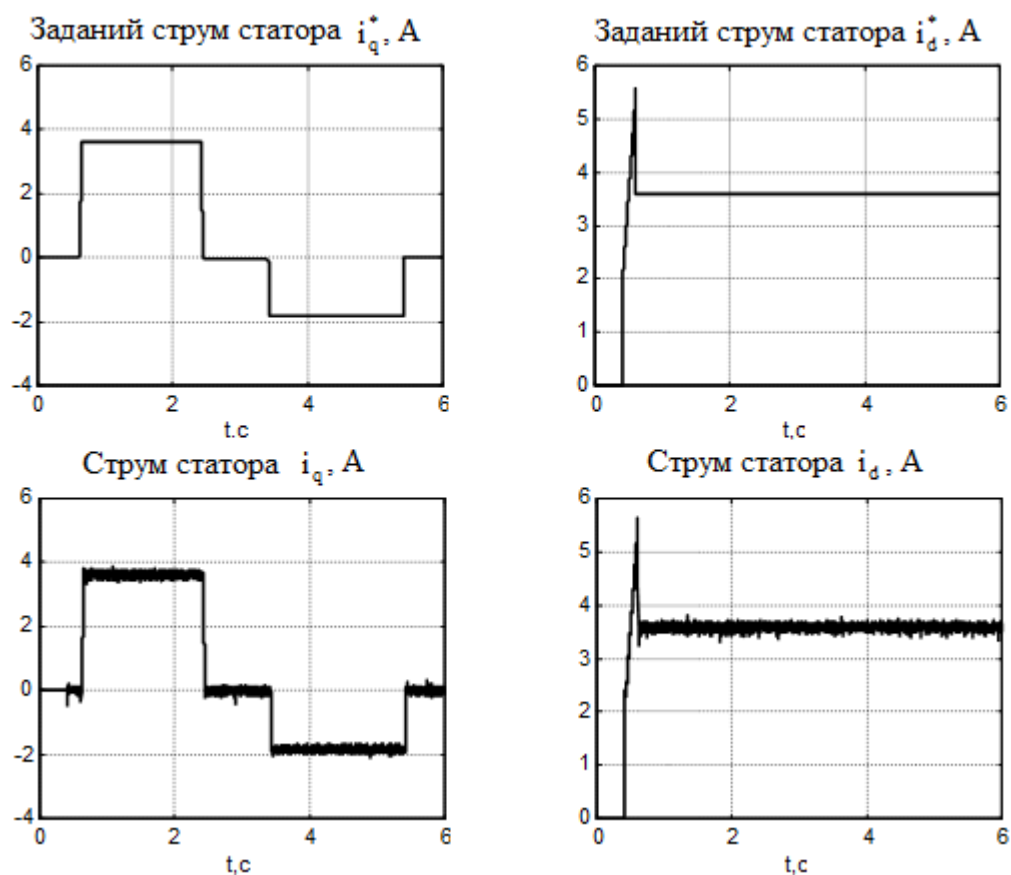


Рисунок 2.3. - Графіки перехідних процесів при використанні R-IFOC з $\hat{\alpha}_p = \alpha_N$

На рис. 2.4 зображені графіки перехідних процесів струмів статора при варіації активного опору ротора АД $\hat{R}_2$ (параметра $\hat{\alpha}_p$ в алгоритмі досліджуваного АД) для випадку застосування стандартного алгоритму управління IFOC, а на рис. 2.5 - для алгоритму R-IFOC.

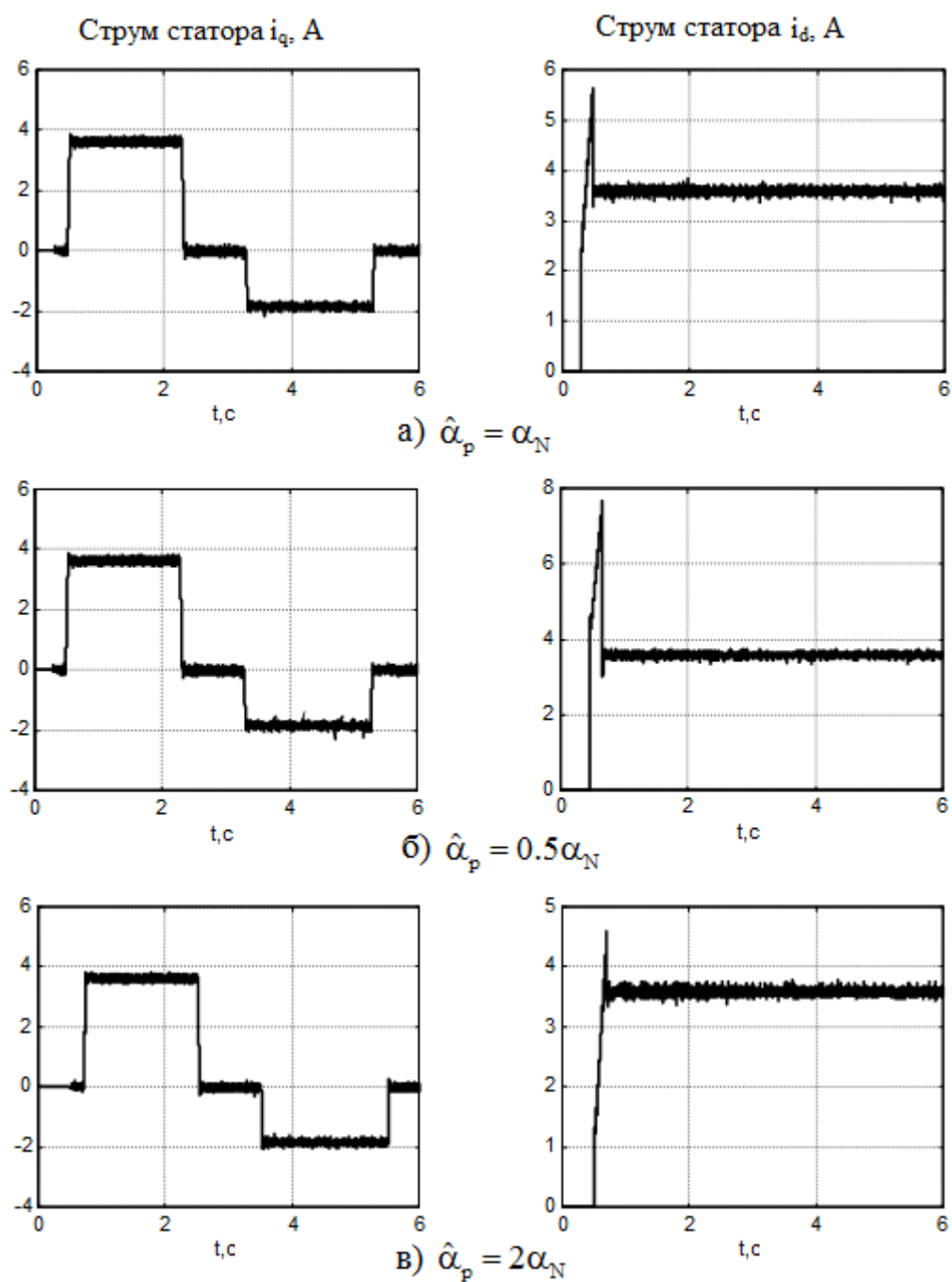


Рисунок 2.4. - Графіки перехідних процесів при використанні IFOC для випадку

$$\hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}_p = 0.5\alpha_N \text{ і } \hat{\alpha}_p = 2\alpha_N$$

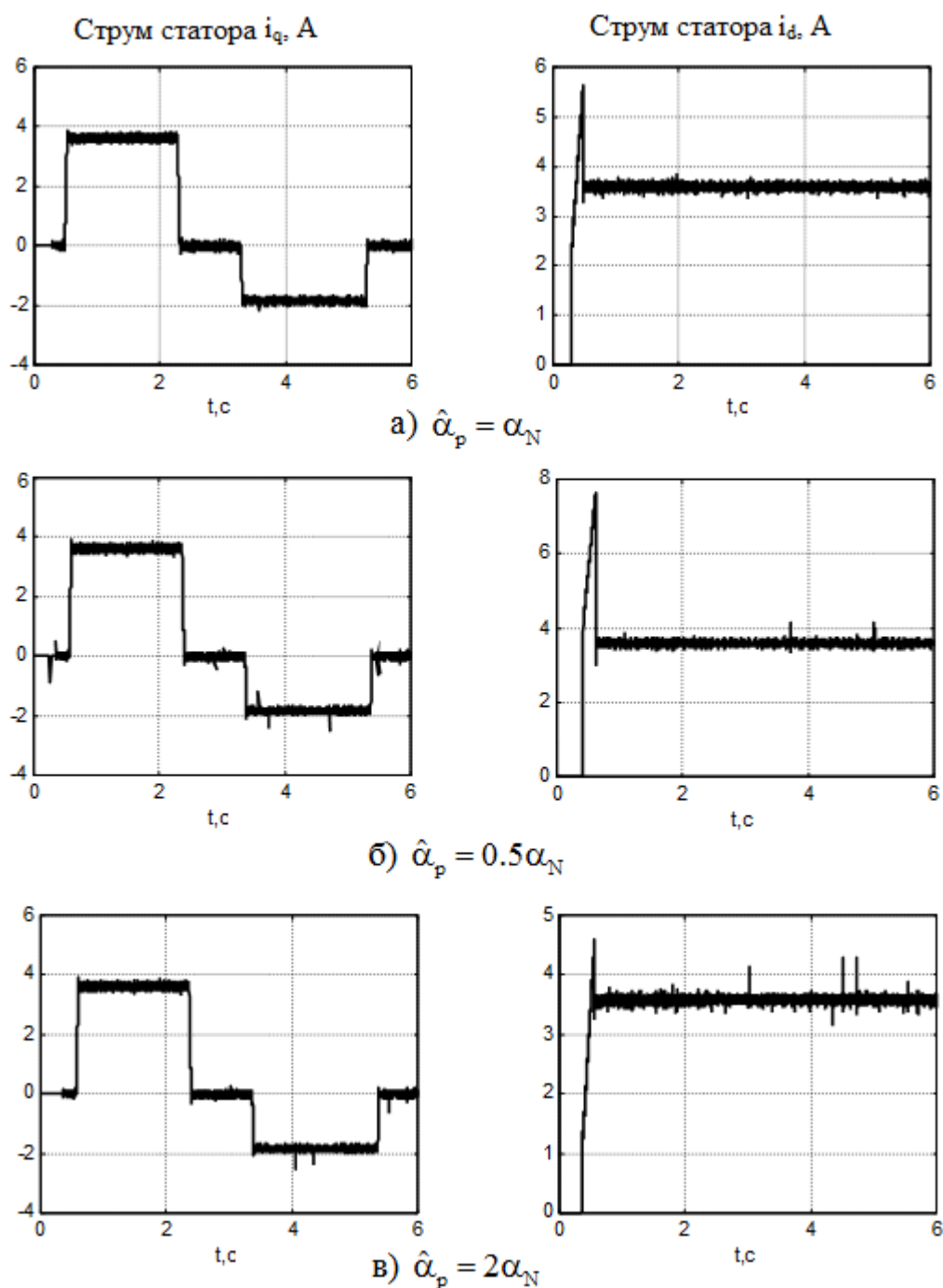


Рисунок 2.5. - Графіки перехідних процесів при використанні R-IFOC для випадку, і

З порівняння графіків рис. 2.3-2.5 видно, що динаміка внутрішніх змінних (струмів статора) для двох алгоритмів управління як при точно відомих параметрах, так і при варіаціях активного опору ротора залишається незмінною, за винятком польової компоненти струму статора на етапі збудження машини. Ця зміна пояснюється тим, що складова заданого струму збудження, яка компенсує

першу похідну від заданої траєкторії потоку є залежною від значення активного опору ротора.

2.3. Дослідження синтезованого робастного алгоритму управління моментом АД

Для дослідження синтезованого робастного алгоритму управління застосовувалася наступна послідовність операцій управління:

- під час початкового інтервалу часу 0,75-1,5 с виконується збудження машини з використанням траєкторії першого порядку; при цьому задане потокозчеплення зростає від $\psi^*(0) = 0.02$ Вб до значення 0.96 Вб;
- на інтервалі часу 1,5-7 с двигуну потрібно відпрацювати задану траєкторію зміни моменту першого порядку, з першою похідною яка дорівнює 3300 Нм / с;
- на інтервалі часу 7-9 с двигун працює в режимі вільного вибігу;
- починаючи з $t > 9$ с починається гальмування двигуна по траєкторії першого порядку, з першою похідною яка дорівнює 3300 Нм / с;
- на інтервалі $t \in 5-9$ с АД працює в режимі ослаблення поля.

На рис. 2.6, 2.7 представлені результати тестування системи робастного непрямого векторного алгоритму управління з використанням АД потужністю 50 кВт.

Як видно з рис. 2.6 алгоритм управління забезпечує якісне відпрацювання заданої траєкторії моменту, що видно по лінійності графіка зміни кутової швидкості на ділянках розгону і гальмування з повним потоком. При роботі двигуна на швидкостях вище 135 рад / с, здійснюється режим ослаблення магнітного потоку АД з метою забезпечення регулювання моменту двигуна при роботі на швидкостях вище номінальної. Перехід в режим ослаблення поля забезпечує роботу системи без входження вихідної напруги інвертора в зону обмеження, що видно з графіків напруг статора. Режим ослаблення поля проводиться шляхом зменшення заданого потокозчеплення в залежності від заданої швидкості АД.

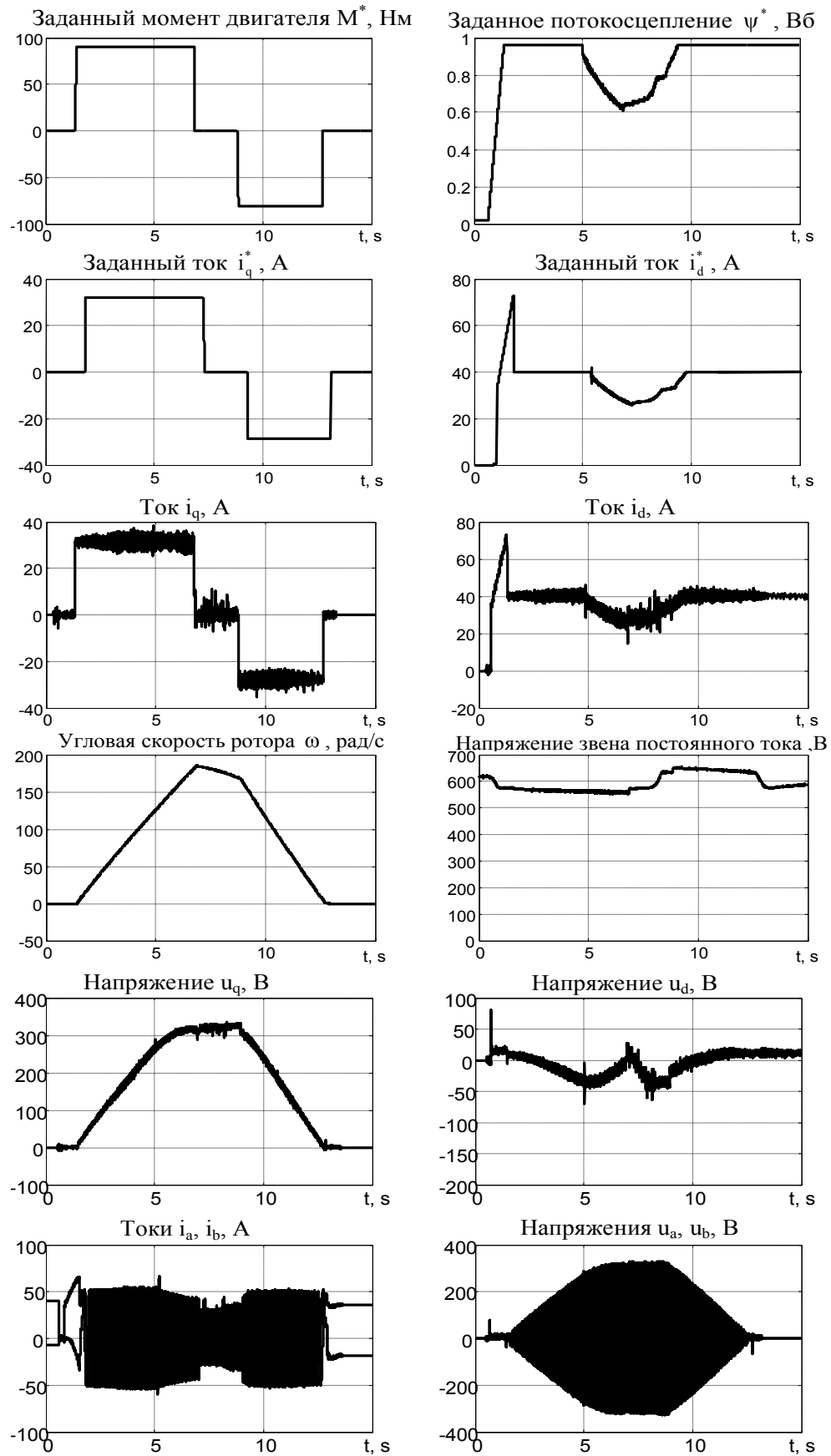


Рисунок 2.6. - Перехідні процеси при відпрацюванні моменту і потоку АД потужністю 50 кВт в системі з R-IFOC

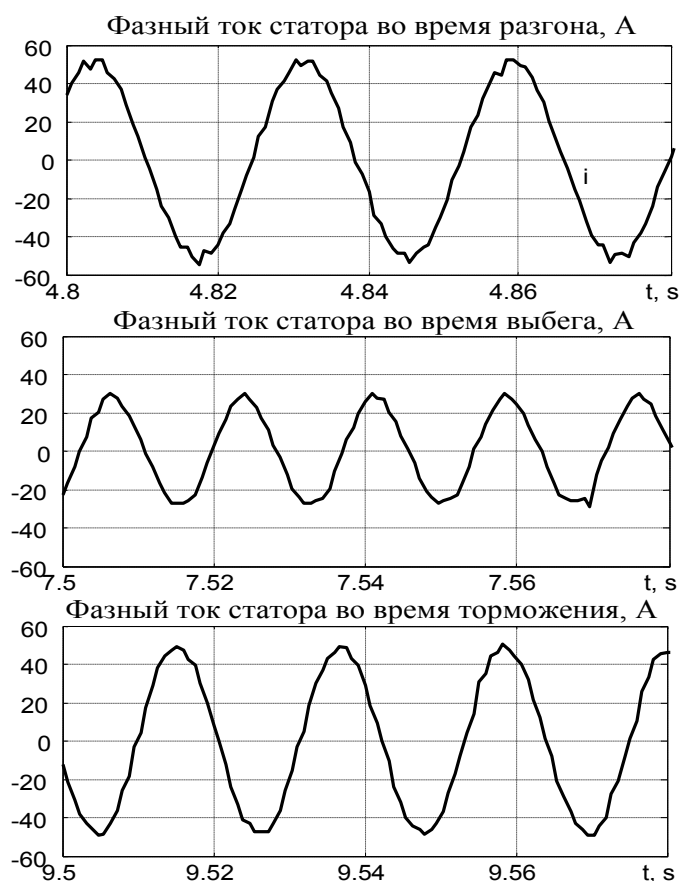


Рисунок 2.7. - Форма фазного струму статора

На рис. 2.7 показана форма фазного струму статора АД в різних режимах роботи, з яких випливає, що струми статора мають синусоїдальну форму без значних спотворень.

2.4. Дослідження адаптивного спостерігача і алгоритму робастного векторного управління

Метою проведення дослідження адаптивного спостерігача є підтвердження результатів, отриманих при дослідженні методом математичного дослідження.

При тестуванні використовувалися значення налаштовувальних параметрів алгоритму векторного керування і адаптивного спостерігача такі ж як і при математичному моделюванні.

Так само як і при математичному моделюванні тестування виконано в два етапи: на першому досліджена робота адаптивного спостерігача в автономному

режимі; на другому досліджені перехідні процеси в системі робастного векторного управління, в якій використовується значення $\hat{\alpha}_p$, отримане за допомогою адаптивного спостерігача. Обидва тести проводилися для двох значень початкових умов оціненого значення параметра α : $\hat{\alpha}(0) = 2\alpha_N$ ($\bar{\alpha} = 2$) і $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$ ($\bar{\alpha} = 0.5$). Відзначимо, що використовувався більший діапазон зміни активного опору ротора, заданий зміною параметра $\bar{\alpha}$, оскільки адаптивна система дозволяє компенсувати параметричні збурення в більшому діапазоні.

На рис. 2.8 представлені графіки перехідних процесів при паралельній автономній роботі системи векторного керування, що реалізує R-IFOC з коректним значенням $\hat{\alpha}_p = \alpha_N$ в регуляторі, і адаптивного спостерігача з $\hat{\alpha}(0) = \alpha_N$. Початкові значення для змінних спостерігача встановлені $\hat{\psi}_a(0) = 0.02$ Вб, $\hat{\psi}_b(0) = 0$, $\hat{i}_a(0) = 0$, $\hat{i}_b(0) = 0$. В аналогічних умовах отримані графіки перехідних процесів, рис. 2.9, в адаптивному R-IFOC при значенні параметра $\hat{\alpha}_p$ в алгоритмі, що дорівнює $\hat{\alpha}$, яке формується адаптивним спостерігачем. Перехідні процеси в адаптивному і неадаптивному R-IFOC не відрізняються при коректному значенні $\hat{\alpha}(0) = \alpha_N$. Важливо відзначити з графіків для помилок оцінювання струмів, що після загасання процесів відпрацювання початкових умов $\hat{\psi}_a(0) \neq 0$ перехідні процеси в спостерігачі відсутні.

На рис. 2.10, 2.11 показані перехідні процеси в адаптивному спостерігачі при виконанні описаного тесту з $\hat{\alpha}_p = \alpha_N$ для $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$ і $\hat{\alpha}(0) = 2\alpha_N$ відповідно. Відповідно до аналізу, на ділянках перехідних процесів, де магнітний потік є постійним, або АД не генерує момент, оцінювання невідомого параметра є неможливим, що і впливає з інтервалів часу між закінченням збудження і початком розгону, а також після розгону перед набросом навантаження.

Як видно з рис. 2.10, рис. 2.11 адаптивний спостерігач забезпечує асимптотичну оцінку вектора потокозчеплення ротора, струмів статора і невідомого параметра α . Час оцінювання при зазначених умовах і налаштованих параметрах становить менше 1,5 с.

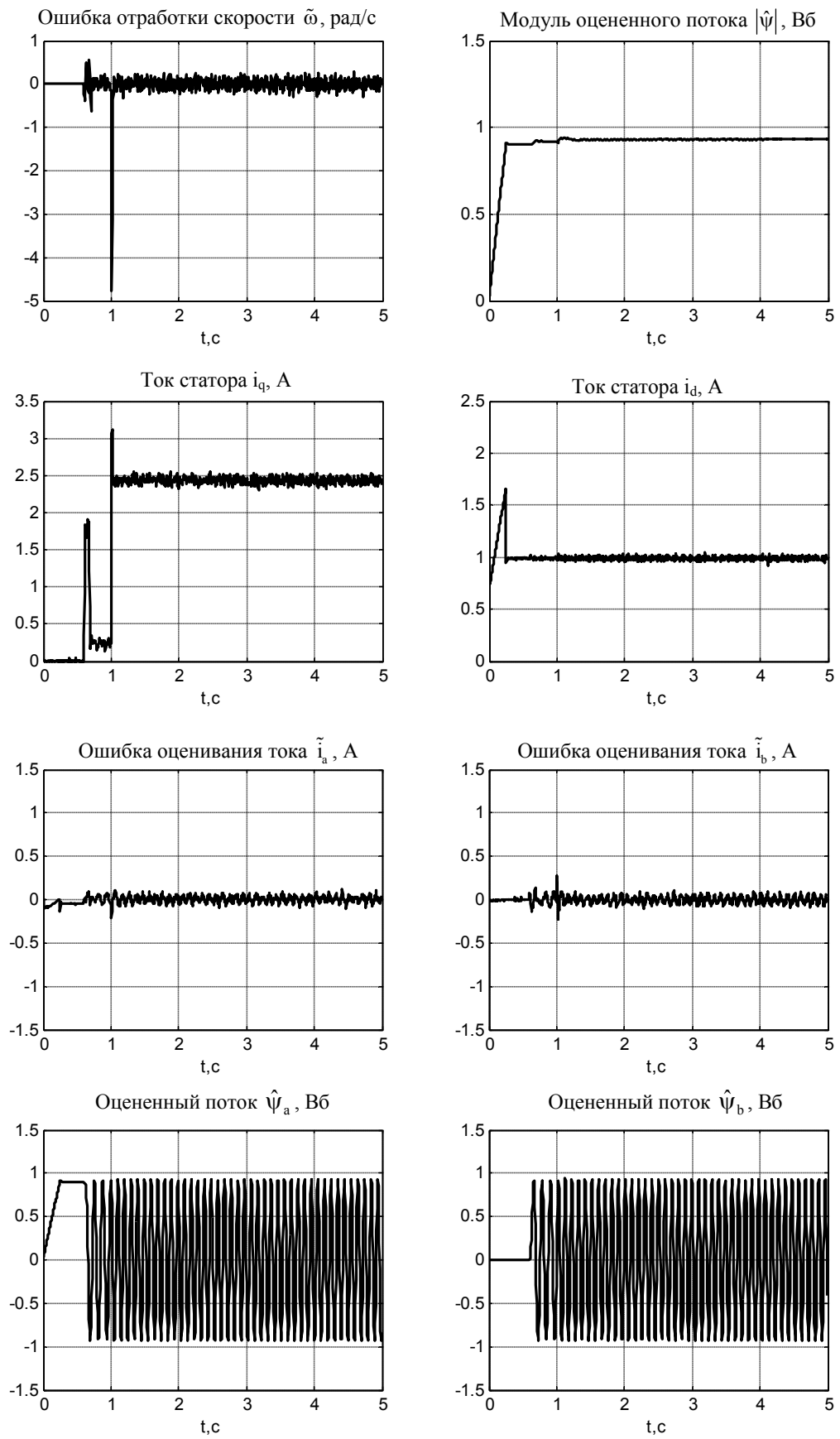


Рисунок 2.8. - Графіки перехідних процесів при неадаптивним R-IFOC:

$$\omega = 50 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}(0) = \alpha_N$$

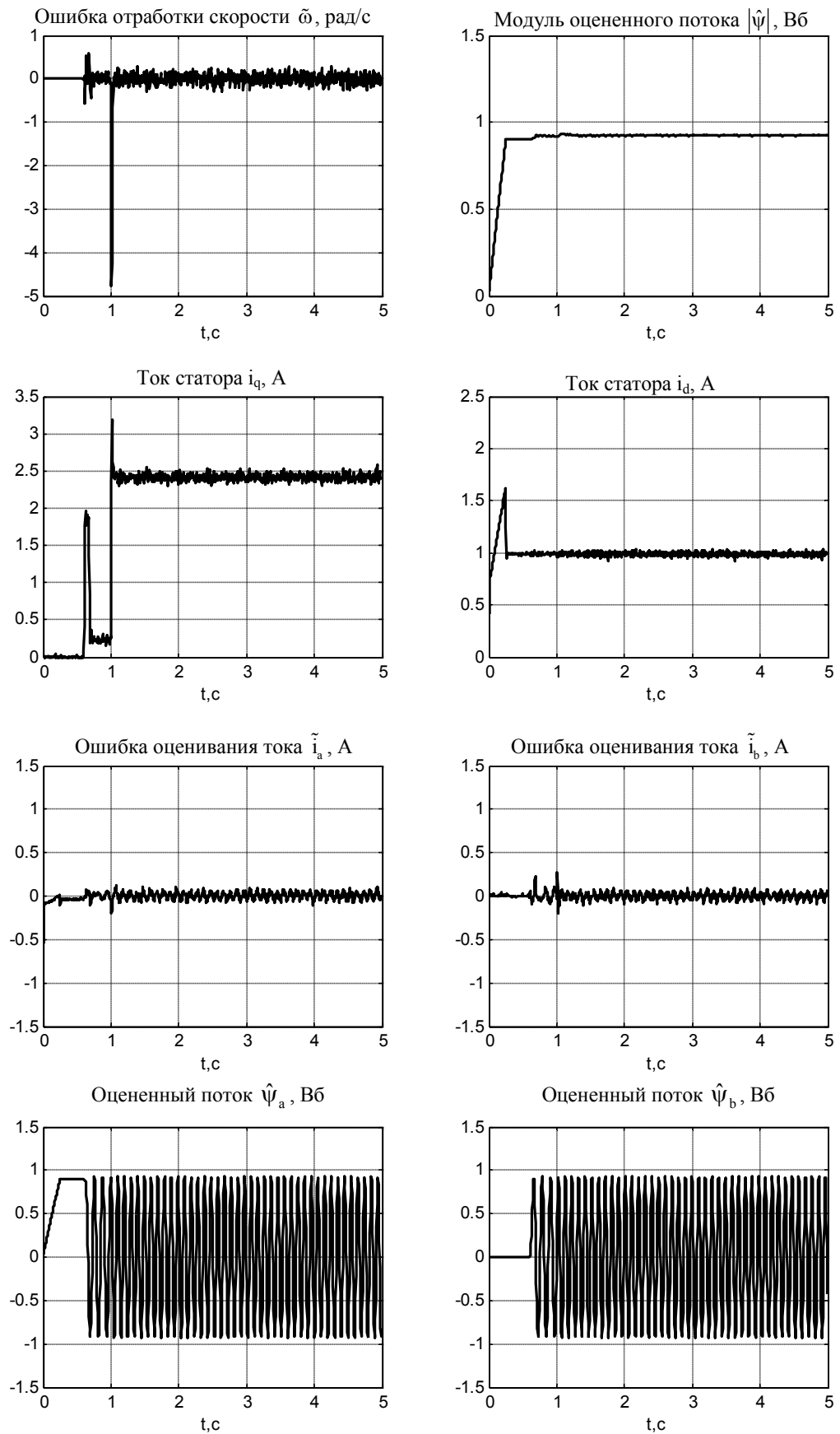


Рисунок 2.9. - Графіки перехідних процесів при адаптивному R-IFOC:

$$\omega = 50 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}, \hat{\alpha}(0) = \alpha_N$$

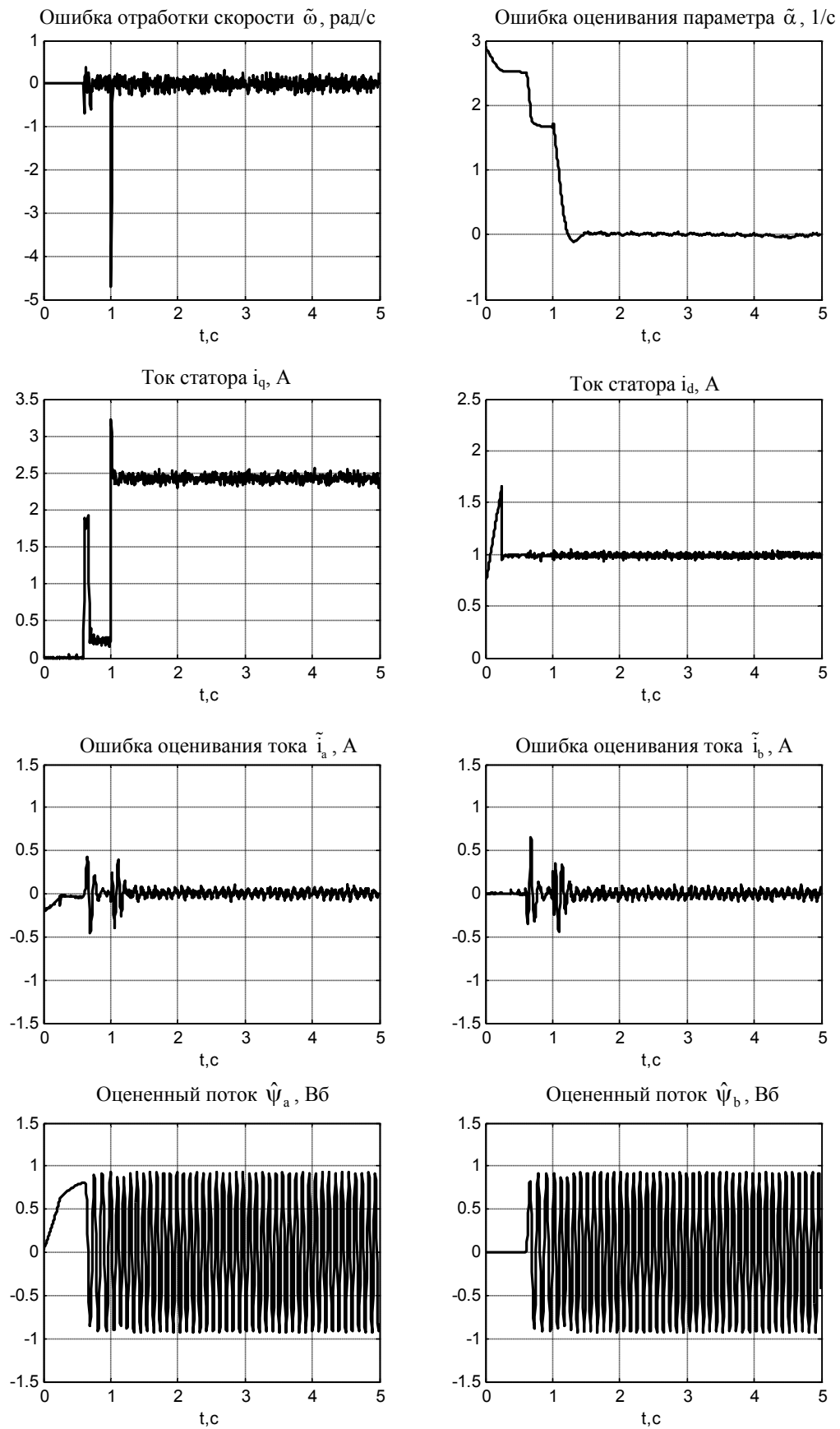


Рисунок 2.10. - Графіки перехідних процесів при неадаптивному R-IFOC:

$$\omega = 50 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$$

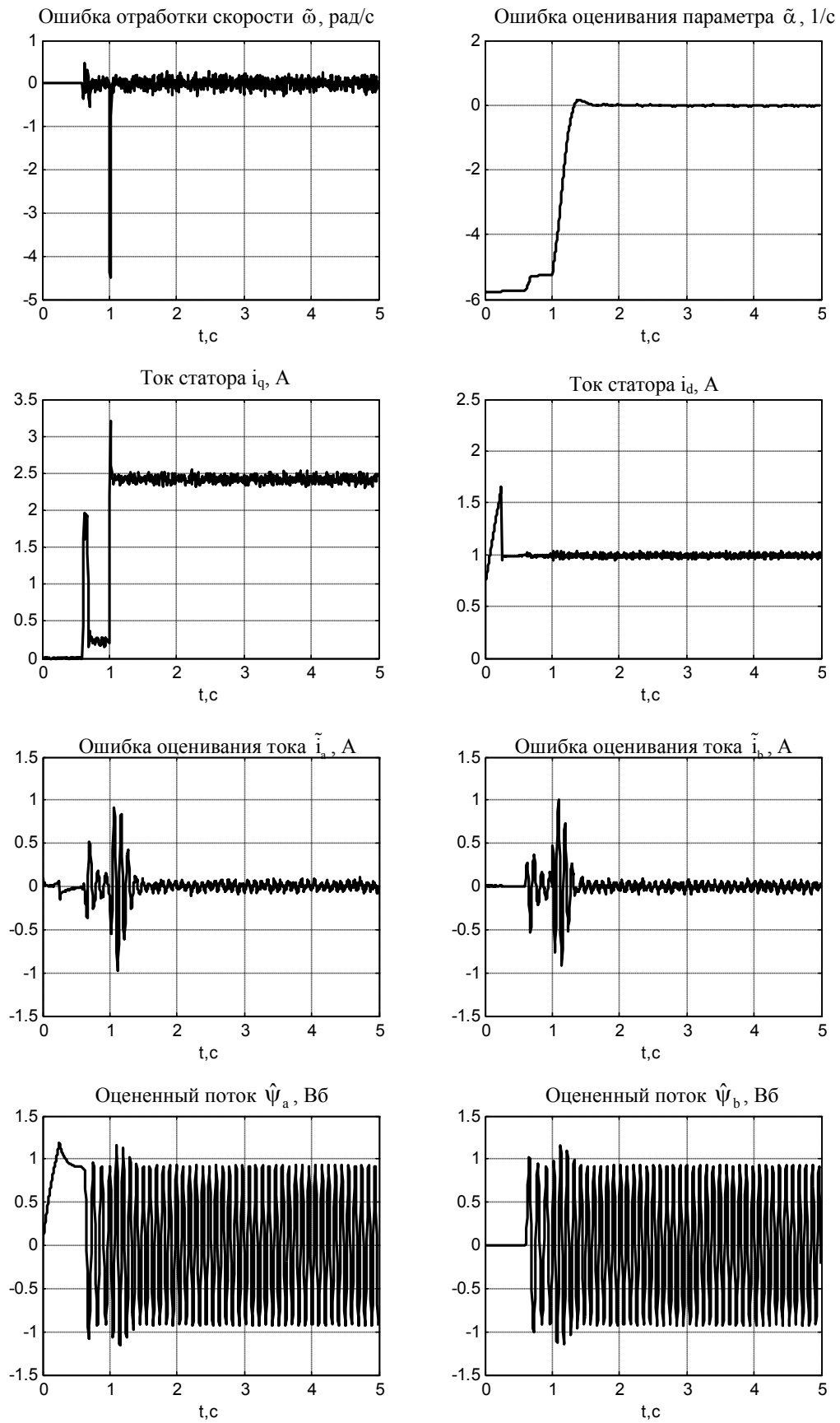


Рисунок 2.11. - Графіки перехідних процесів при неадаптивному R-IFOC:

$$\omega = 50 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}(0) = 2\alpha_N$$

Графіки перехідних процесів в адаптивній системі з алгоритмом R-IFOC при $\hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}$, $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$ і $\hat{\omega}(0) = 2\alpha_N$ представлені на рис. 2.12, 2.13.

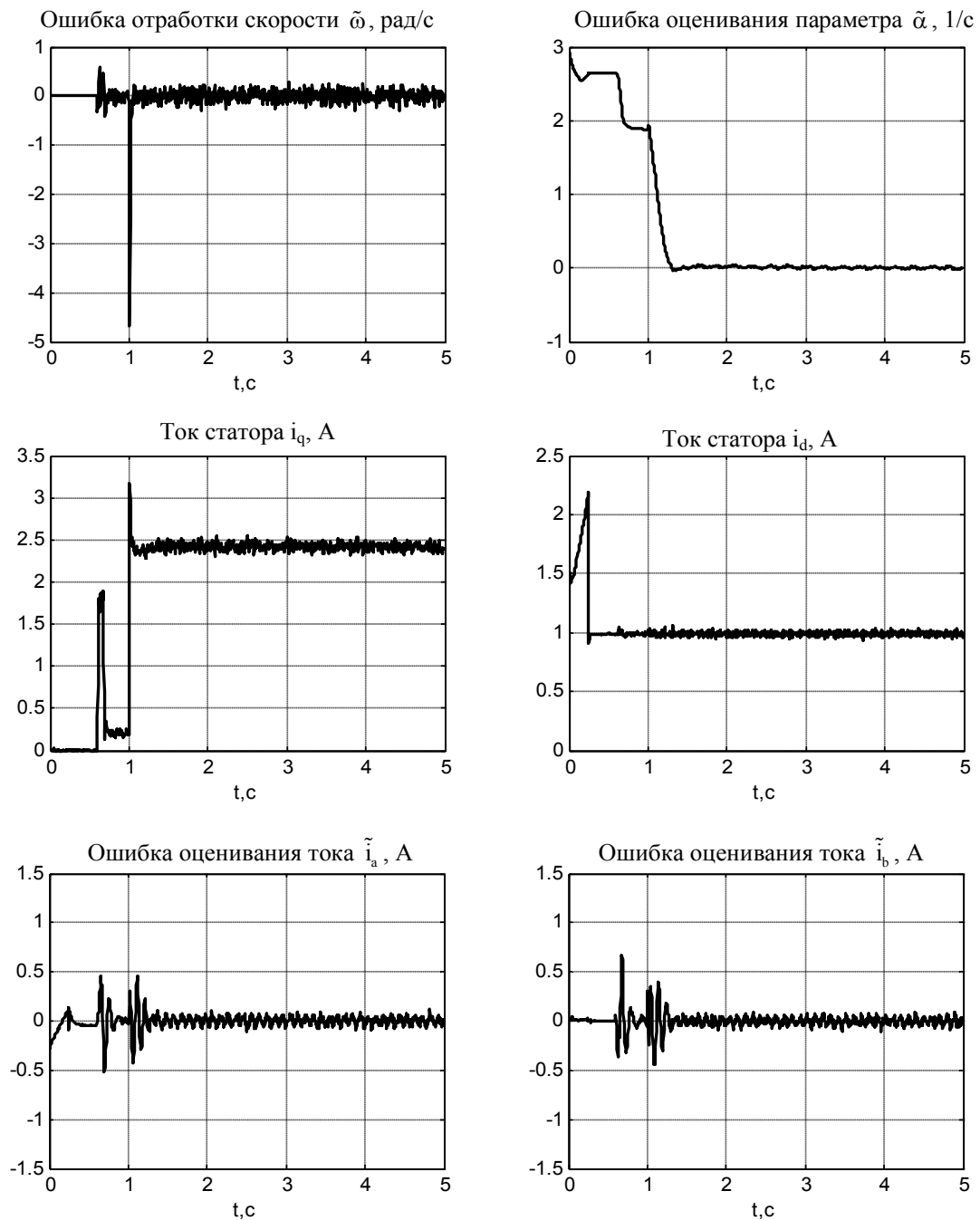


Рисунок 2.12. - Графіки перехідних процесів при адаптивному R-IFOC:
 $\omega = 50$ рад/с, $\hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}$, $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$

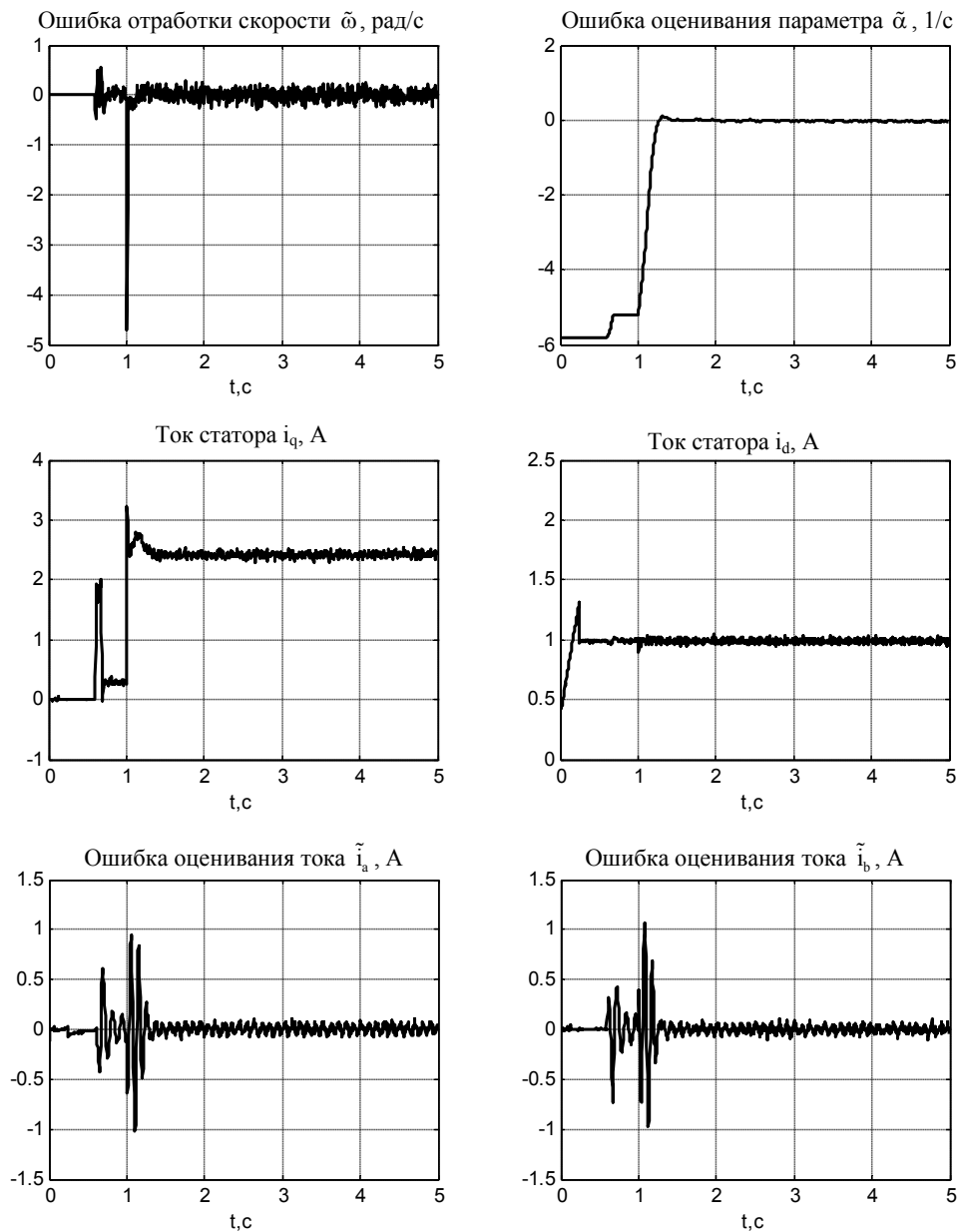


Рисунок 2.13. - Графіки перехідних процесів при адаптивному R-IFOC:
 $\omega = 50$ рад/с, $\hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}$, $\hat{\alpha}(0) = 2\alpha_N$

R-IFOC при варіаціях $\hat{\alpha}_p$ забезпечує високі показники якості регулювання кутової швидкості і незначне збільшення моментної складової струму статора. Як видно з рис. 2.13, після прикладення навантаження, коли $\hat{\alpha}_p > \alpha_N$, значення моментного струму дещо зростає і в міру сходження помилок оцінювання спостерігача в нуль, спадає до рівня, який відповідає точно відомим значенням α . У разі, коли $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$, ефект впливу варіації менш виражений, що підтверджується результатами.

Оскільки основним призначенням адаптивної версії R-IFOC є підвищення динамічних і статичних показників якості системи при роботі в зоні низьких швидкостей, включаючи нульову, то далі розглянемо властивості адаптивного управління при нульовій швидкості.

На рис. 2.14 і 2.15 показані динамічні процеси в неадаптивній і адаптивній системах з R-IFOC при нульовій швидкості. Динамічна поведінка систем в умовах $\omega = 50$ рад / с і $\omega = 0$ рад / с при номінальних значеннях $\hat{\alpha}_p = \alpha_N$ і $\hat{\alpha}(0) = \alpha_N$ не має суттєвих відмінностей за винятком зменшеного значення моментного струму через відсутність складових моменту, пропорційних кутовий швидкості, які обумовлені "в'язким" тертям, а також компонентами "сухого" тертя. У той же час при нульовій швидкості, коли робастная дія, яка залежить від кутової швидкості зворотних зв'язків в R-IFOC не проявляється, її властивості будуть такими ж, як і при стандартному IFOC.

На рис. 2.16 показані динамічні процеси при $\hat{\alpha}_p = 0.5\alpha_N$ і $\hat{\alpha}_p = 2\alpha_N$, $\hat{\alpha}(0) = \alpha_N$. В умовах цього тесту спостерігач працює з коректним значенням $\hat{\alpha}$ і тому оцінює потокозчеплення коректно. В умовах тесту на рис. 2.16 (а) потік АД більше заданого, машина працює в режимі насичення магнітної системи, в той час як при $\hat{\alpha}_p = 2\alpha_N$, рис. 2.16 (б), потік ослаблений і для створення однакового моменту потрібно збільшений моментний струм i_q . Динамічна поведінка в цьому режимі є неприйнятна, система знаходиться поблизу межі стійкості.

Для демонстрації автономної роботи адаптивного спостерігача при $\omega = 0$ рад/с виконаний тест з $\hat{\alpha}_p = \alpha_N$ при ініціалізації спостерігача з $\hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$. Динамічні процеси для цих двох випадків представлені на рис. 2.17 і рис. 2.18. Асимптотична оцінка невідомого здійснюється за інтервал часу, який не перевищує 3-4 секунди.

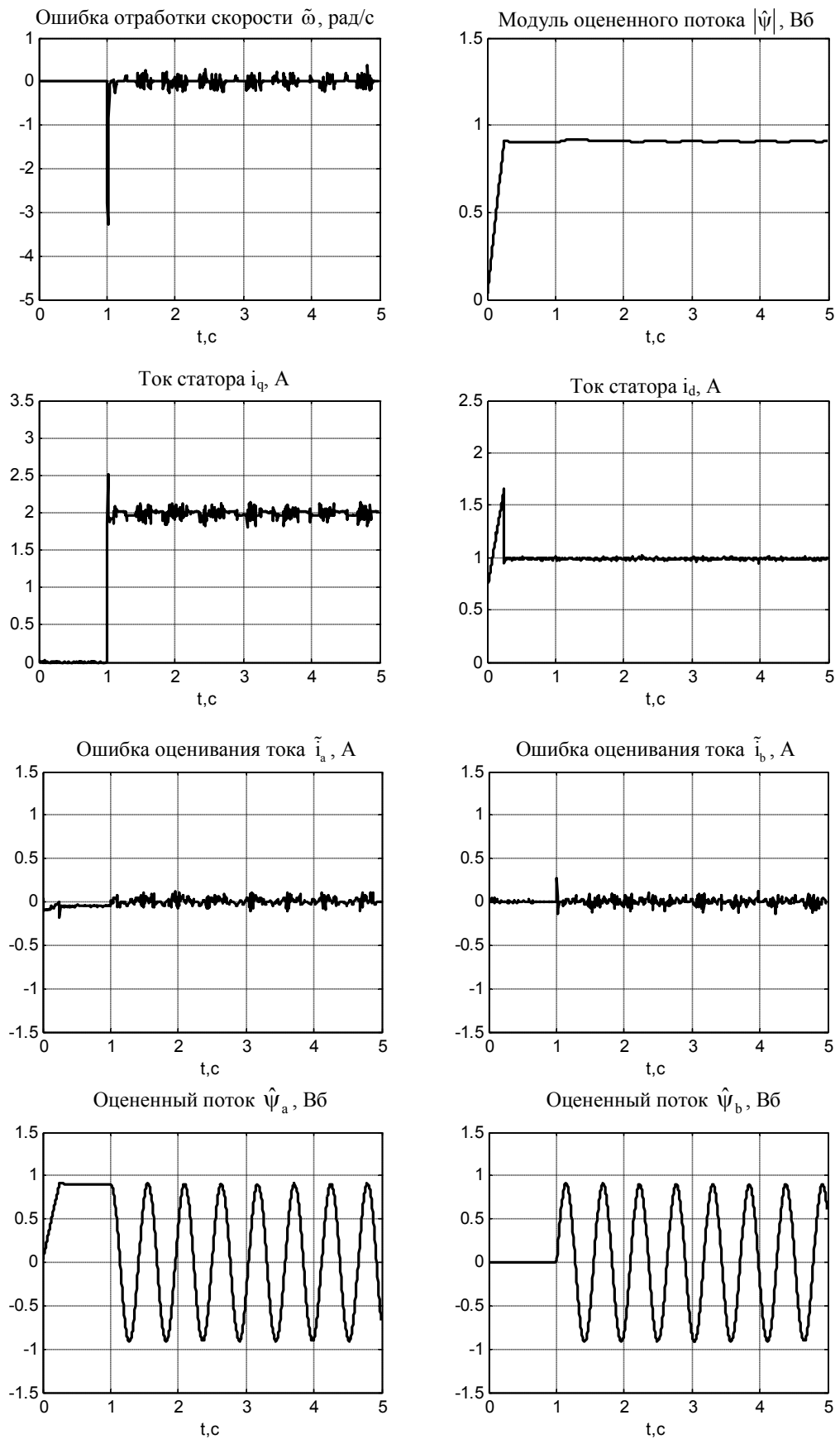


Рисунок 2.14. - Графіки перехідних процесів при неадаптивному R-IFOC:

$$\omega = 0 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}(0) = \alpha_N$$

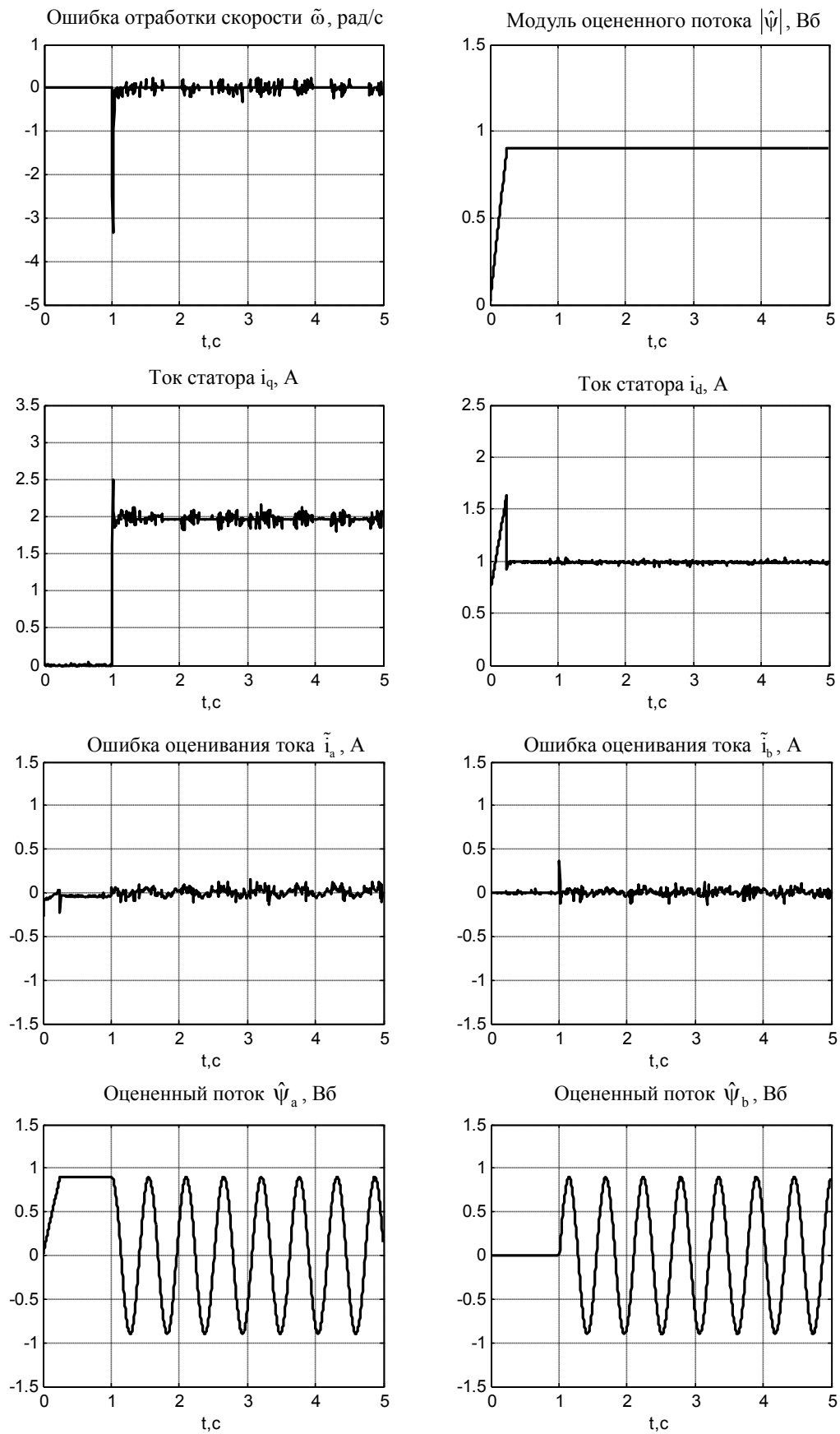


Рисунок 2.15. - Графіки перехідних процесів при адаптивному R-IFOC:

$$\omega = 0 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}, \hat{\alpha}(0) = \alpha_N$$

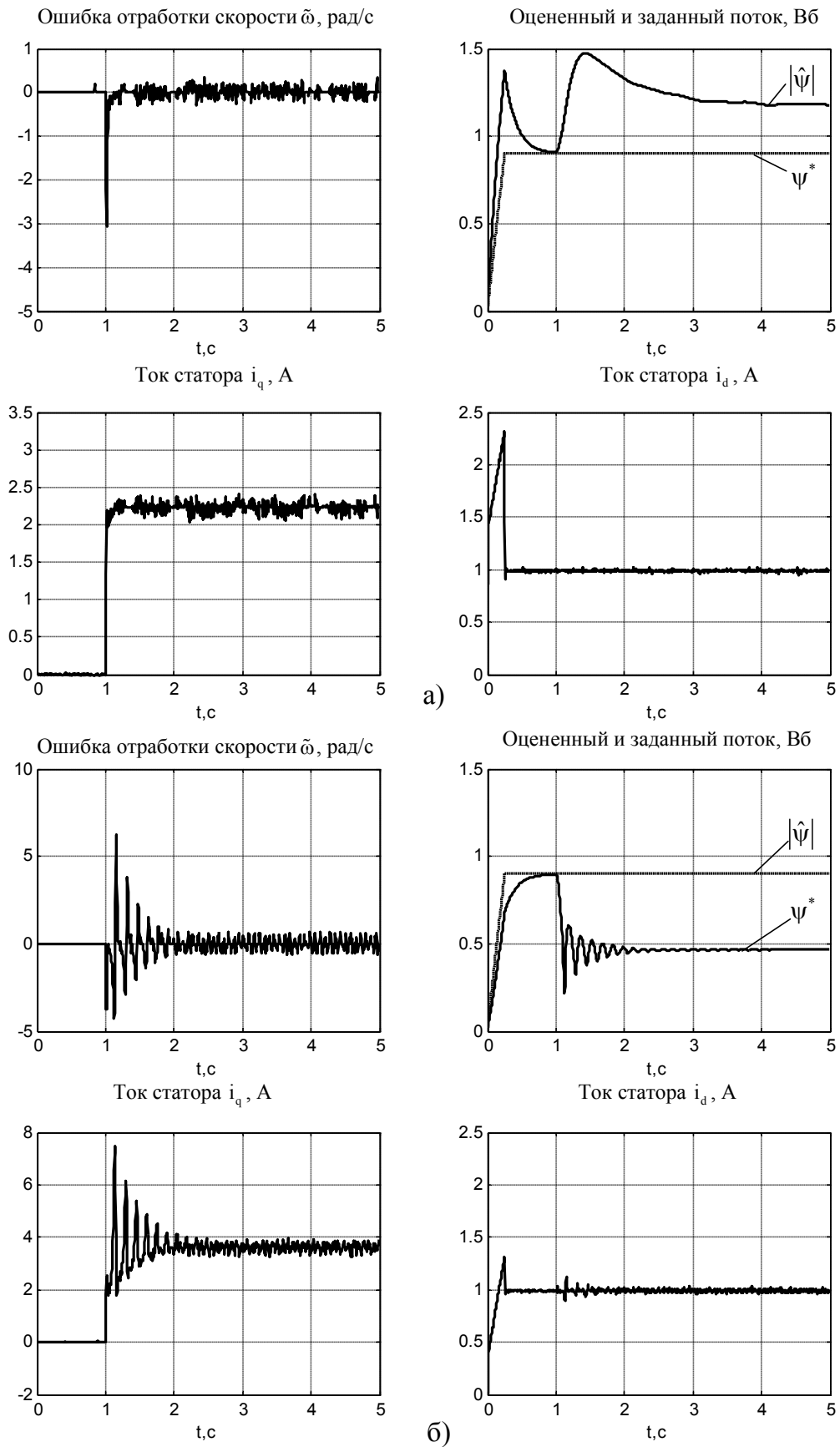


Рисунок 2.16. - Динамічна поведінка системи з R-IFOC при $\omega = 0$ рад/с,
 $\hat{\alpha}(0) = \alpha_N$; а) $\hat{\alpha}_p = 0.5\alpha_N$; б) $\hat{\alpha}_p = 2\alpha_N$

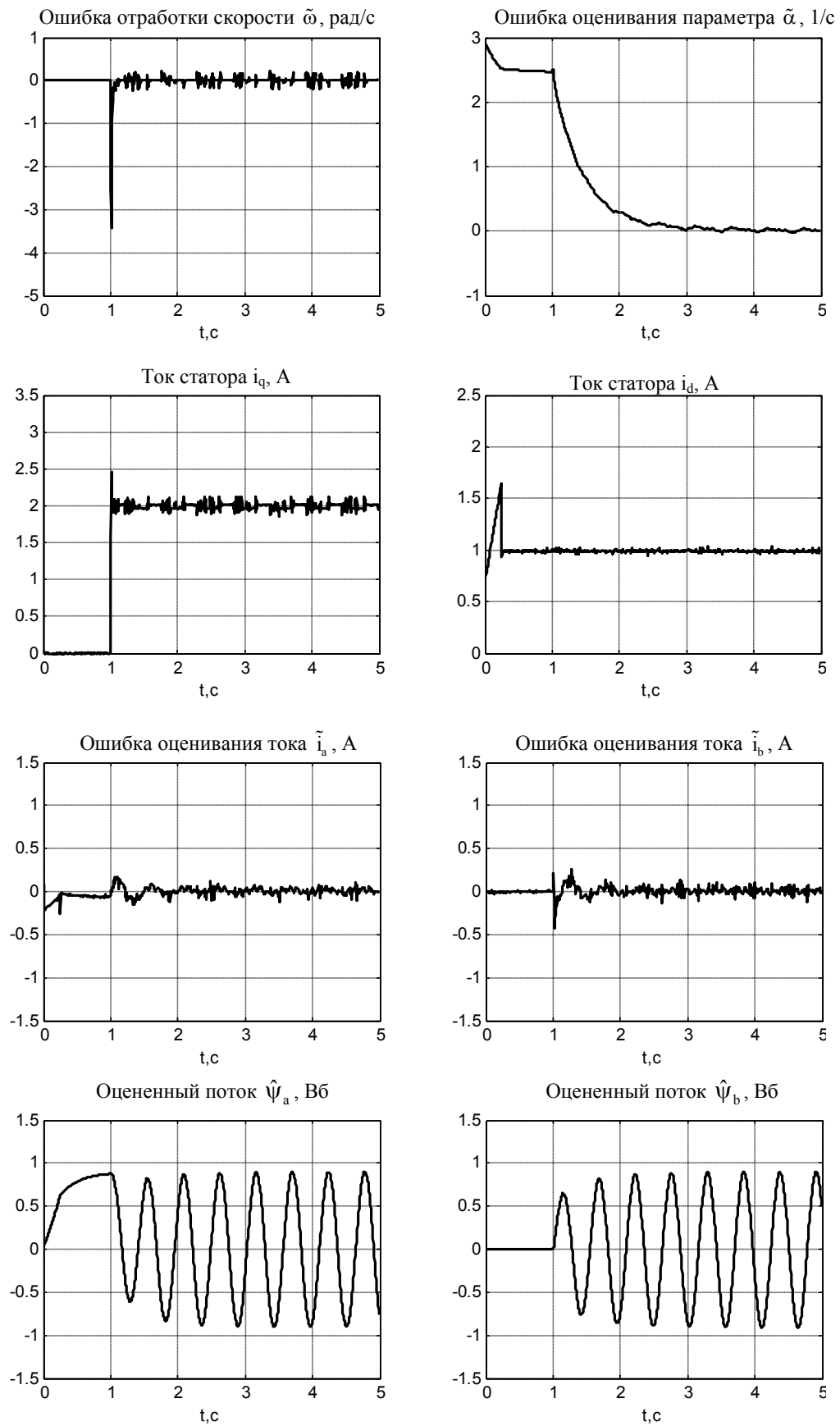


Рисунок 2.17. - Графіки перехідних процесів при неадаптивному R-IFOC:

$$\omega = 0 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \alpha_N, \hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$$

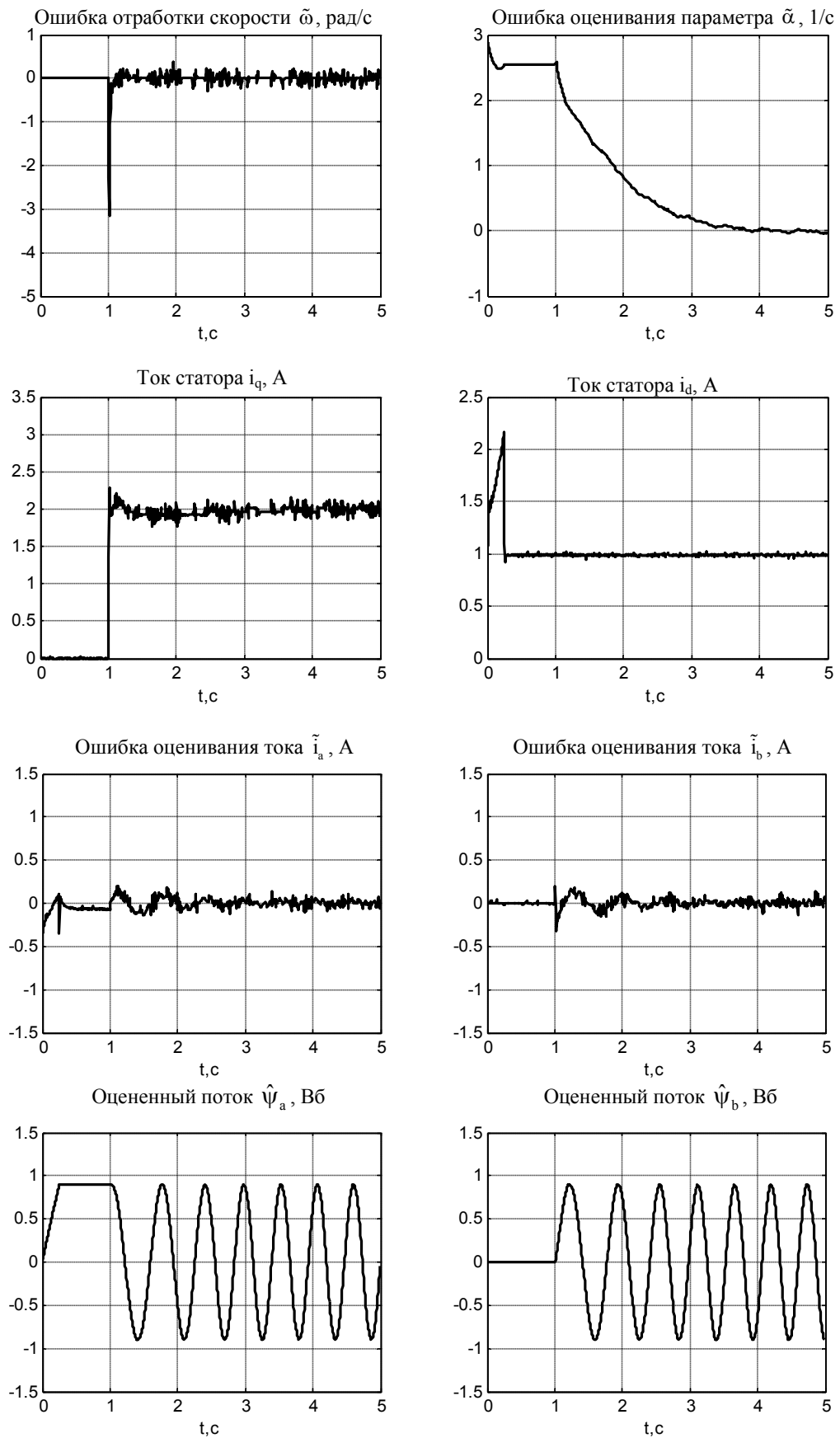


Рисунок 2.18. - Графіки перехідних процесів при адаптивному R-IFOC:

$$\omega = 0 \text{ рад/с}, \hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}, \hat{\alpha}(0) = 0.5\alpha_N$$

Результати виконаних досліджень підтверджують, що використання адаптивного спостерігача в складі алгоритму робастного векторного управління дозволяє забезпечити повну компенсацію впливу варіацій активного опору ротора на процеси управління моментом-потокотчеплення АД у всіх режимах роботи, включаючи режим з нульовою швидкістю. З порівняння перехідних процесів дослідження з перехідними процесами при математичному моделюванні можна зробити висновок, що результати експериментального дослідження з високим ступенем точності збігаються з результатами, отриманими при математичному дослідженні, що підтверджує достовірність основних теоретичних положень.

У порівнянні зі стандартним алгоритмом векторного керування АД досягається істотне підвищення показників якості регулювання механічних координат, а також енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії.

Необхідно особливо відзначити, що застосування адаптивного спостерігача в складі алгоритму R-IFOC дозволяє компенсувати варіацію активного опору ротора АД навіть при нульовій швидкості обертання, що є вагомою перевагою в порівнянні з неадаптивними I-IFOC і R-IFOC.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено методику порівняльного тестування алгоритмів векторного керування з управлінням від розроблених інверторів, алгоритм управління яких реалізований на цифровому сигнальному процесорі TMS320LF2406A. Дослідження на розробленій моделі в Matlab підтвердили основні теоретичні результати.

2. В умовах аналогічних тестів графіки перехідних процесів і результати інших досліджень з високим ступенем точності збігаються з результатами математичного моделювання.

3. Порівняльне тестування синтезованого робастного R-IFOC, а також стандартного алгоритмів непрямого векторного керування моментом IFOC при управлінні АД показало, що при відсутності варіацій активного опору ротора алгоритм робастного векторного управління R-IFOC забезпечує більш високі динамічні показники якості при відпрацюванні заданих траєкторій моменту-потокосцеплення.

4. Підтверджено, що адаптивний спостерігач вектора потокосцеплення ротора має однакову динамічну поведінку як при автономній роботі, так і в адаптивній системі регулювання швидкості, побудованої на основі нелінійного принципу поділу, що підтверджує правомірність його застосування.

5. Порівняльне тестування систем векторного керування кутовою швидкістю з алгоритмами робастного (R-IFOC) і стандартного (IFOC) управління моментом-потокосцепленням підтверджує висновки, отримані шляхом моделювання, а сам алгоритм робастного векторного управління забезпечує високу якість процесів управління, яке відповідає вимогам високодинамічних технологічних застосувань.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Загальні положення

Основними законодавчими актами з охорони праці [41, 43] є:

Національні документи:

- Конституція України;
- Закон України «Про охорону праці»;
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»;
- Закон України «Про пожежну безпеку»;
- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення».

Міжнародні документи [44, 49]:

1. Міжнародний Кодекс безпечного обслуговування суден / International Safety Management-Code (ISM- Code);
 2. Контрольні листи (Check Lists) на проведення небезпечних робіт на судні
- розроблені в компаніях на основі вимог Міжнародних конвенцій і ISM- Code.

На базі цих документів видаються спеціальні правила і норми охорони праці, в яких викладені конкретні вимоги з підвищення безпеки та поліпшення умов праці.

У сучасну систему правових норм охорони праці входять:

- правила і норми, які регулюють взаємовідносини адміністрації та профорганізації в галузі охорони праці;
- правила і норми техніки безпеки, виробничої санітарії та охорони зовнішнього середовища з урахуванням забезпечення індивідуального захисту працюючих від виробничих шкідливостей;
- правила, що регулюють планування та організацію охорони праці;
- норми, що визначають рівень відповідальності посадових осіб за порушення законодавства про охорону праці.

3.2. Навчання і перевірка знань з охорони праці на судні

Трудове законодавство зобов'язує адміністрацію підприємств проводити інструктаж і регулярне навчання працюючих безпечним прийомам роботи. Відповідальність за своєчасне проведення інструктажів, навчання екіпажів суден і за допуск їх до самостійної роботи покладається на старших помічників капітанів та старших механіків суден. Виробляються інструктажі та навчання наступних основних видів [48, 49]:

- вступний інструктаж (вступний) - виробляється з усіма які направляються на роботу на судно (у тому числі і з практикантами при проходженні плавпрактики). Інструктаж проводиться спеціалістом з охорони праці підприємства (судновласника), як правило, в кабінеті охорони праці;

- первинний - безпосередньо після прибуття на судно;

- повторний - не рідше 2 разів на рік, а для працюючих з підвищеною небезпекою - кожні 6 місяців;

- позаплановий - проводиться після аварій або нещасних випадків;

- цільовий - перед виконанням робіт, на які необхідно оформляти наряд-допуск.

- первинний, повторний, позаплановий, цільовий проводить безпосередньо керівник робіт (старший помічник капітана або старший механік або електромеханік для екіпажів суден, що перевозять небезпечні та шкідливі вантажі.).

На суднах іноземних компаній держав - членів ІМО в перший день прибуття на судно старший помічник капітана проводить з прибулим членом екіпажу заняття з загальних питань техніки безпеки. Інструктаж з питань охорони життя на морі та запобігання забрудненню повинен реєструватися в спеціальному журналі.

На робочому місці проводиться інструктаж (Checklist No1. 08 Bridge Familiarization). Оригінал документа залишається на судні, а копія відправляється в компанію.

3.3. Небезпечні та шкідливі фактори, що впливають на суднового електромеханіка

До шкідливих і небезпечних факторів, які впливають на електромеханіка, працюючого на судні, можна віднести: пил, хімічні речовини, підвищений рівень шуму і вібрації, високі електромагнітні випромінювання, недостатню освітленість робочого місця, підвищене значення напруги в електричних колах.

Захист від пилу. Тривала робота в умовах запиленості може призвести до тяжких хронічних професійних захворювань. Гострі частинки пилу можуть викликати поранення і захворювання шкіри та органів зору.

Захист від пилу здійснюють застосуванням ЗІЗ: захисні маски, окуляри, щитки, респіратори і фільтруючі протигази. Найбільш радикальний метод боротьби з промислової пилом - це механізація і автоматизація виробничих процесів і видалення людини із зони впливу пилу.

Деякі хімічні речовини, застосовувані на судах, а також перевозяться небезпечний вантаж можуть становити небезпеку для екіпажів суден через свою токсичність. Систематичний контроль стану повітряного середовища та рівня концентрації в ній токсичних речовин, застосування для роботи в загазованому середовищі апаратів на стислому повітрі (АСВ) зводить до мінімуму можливість отруєнь.

Захист від шуму. Тривала та інтенсивна дія шуму і вібрації впливає на органи слуху, приводячи іноді до глухоти. Викликає серйозні розлади нервнопсихічної та серцево-судинної діяльності організму. Ступінь шкідливості шуму і вібрації визначається під час будівництва та ремонту суден. Для цього шум вимірюється приладом - шумомером, а вібрація - осцилографом і Вібромери. Отримані результати порівнюють з вимогами Санітарних правил для морських суден України. При перевищенні рівня шуму і вібрації здійснюють заходи щодо їх зменшення: екранування шуму, поглинання шуму і вібрації (застосування глушників шуму і амортизаторів), застосування звукопоглинальних матеріалів і віброізоляції і т.д. Кардинальним способом вирішення проблеми зниження

шкідливого впливу шуму і вібрації на людей є впровадження засобів автоматизації і дистанційного керування судновими установками та обладнанням, а також застосування безвахтенного обслуговування механізмів і пристроїв.

Захист від електромагнітних та іонізуючих випромінювань. Устаткування сучасних суден обладнане потужними засобами радіонавігації, які є джерелами електромагнітних випромінювань, застосування в приладах радіоактивних ізотопів, а також можлива перевезення на судах небезпечних вантажів класу 7 (радіоактивні матеріали) несприятливо впливають на здоров'я людини. Тривале опромінення людей електромагнітними і іонізуючими (альфа, бета, нейтронні, гамма та рентгенівського випромінювання) може викликати променеву хворобу в гострій або хронічній формі.

Застосовують організаційно-профілактичні та технічні заходи для захисту екіпажів суден від шкідливої дії електромагнітних та іонізуючих випромінювань. Одним із дієвих способів забезпечення радіоактивної безпеки є систематичний дозиметричний контроль рівнів радіації, а також зовнішнього і внутрішнього опромінення екіпажу суден.

Освітленість суднових приміщень. До освітленості суднових приміщень пред'являються підвищені вимоги як гігієнічного. Так і техніко-економічного характеру, так як невдалий вибір світильників або недостатня освітленість контрольно-вимірювальних приладів може з'явитися причинами нещасних випадків і аварій. Норми освітленості суднових приміщень регламентуються Санітарними правилами для морських суден України

Залежно від джерела світла освітлення може бути природним і штучним, здійснюваним електричними освітлювальними приладами. Освітленість палуб і суднових приміщень повинна бути рівномірною, без глибоких тіней і сліпучих відблисків. При необхідності передбачається підсвічування шкал приладів, розташованих на щитах і постах керування.

Створення в суднових приміщеннях раціональних умов освітлення у великій мірі залежить від правильного обслуговування освітлювальної апаратури і виконання Правил технічної експлуатації суднового електрообладнання.

3.4. Основи електробезпеки на судні

Зіткнення людини з відкритими струмоведучими частинами, що перебувають під напругою, призводить до ураження електричним струмом. Проходячи через тіло людини, електричний струм надає теплове, електрична та біологічна впливу. Тепловий вплив призводить до опіків шкіри і перегріву тіла. Електричний вплив викликає електроліз крові, що призводить до порушення нормального функціонування організму. Біологічний вплив проявляється в небезпечному порушенні живих клітин і тканин, що призводить до припинення діяльності органів дихання і кровообігу.

Насиченість сучасних суден електроустаткуванням призводить до випадків потрапляння людей під напругу. Причому найбільш імовірним є зіткнення людини не з двома, а з однією фазою мережі. Так як на судах застосовуються системи з ізолюваною нейтраллю, то величина струму, що проходить через тіло людини, буде залежати не тільки від напруги мережі і опору тіла, але і від опору току витоку через ізоляцію на корпус, тобто від опору ізоляції. Тому підтриманню опору ізоляції на судні в межах, обумовлених Правилами Регістру ПТЕСЕ, приділяється першочергова увага.

Основними причинами електротравматизму на судах є:

- грубі порушення Правил технічної експлуатації суднового електрообладнання (ПТЕСЕ) і техніки електробезпеки;
- виконання робіт під напругою без дійсної необхідності в цьому і при недотриманні захисних заходів;
- недосконалість конструкцій електрифікованих механізмів (палубних пристроїв, машинного відділення та ін.);
- недосконалість конструкції світлотехнічних пристроїв і електровстановочне арматури;
- несправність і недосконалість переносний арматури і переносного інструменту;

- відсутність одноманітності у виборі напруг ланцюгів керування пускорегулювальної апаратури;
- незадовільний стан електричної ізоляції мережі,
- відсутність належного контролю за проведеними роботами з електрообладнанням;
- несвоєчасне усунення виниклих несправностей і пошкоджень електрообладнання;
- формальне проведення інструктажу з безпечних прийомів роботи.

Використання електричної енергії на судах пов'язано не тільки з небезпекою поразки обслуговуючого персоналу електричним струмом, але і з можливістю виникнення пожеж. У нормальних умовах теплову дію струму унормовано, тобто нагрів провідників і струмоведучих деталей в електрообладнанні розраховують таким чином, щоб він не перевищував встановлених норм. Внаслідок недотримання ПТЕСЕ і правил техніки безпеки, пошкоджень, дії на електрообладнання навколишнього середовища (вогкості, пилу, хімічно активних речовин) його нормальний стан порушується. При цьому в суднових електричних установках виникають короткі замикання, перевантаження, великі перехідні опори, дугові і іскрові розряди, що також може призвести до пожеж.

Для захисту персоналу, що працює на електричних установках, від ураження електричним струмом, впливу електричної дуги та продуктів її горіння і т. п. застосовуються основні і додаткові засоби захисту. Основні - це засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу електроустановки і дозволяє доторкатися до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою. Додаткові - це кошти, які самі по собі не можуть при даному напрузі забезпечити безпеку від ураження струмом. Вони служать для захисту від напруги кроку та впливу на людський організм електричної дуги та продуктів її горіння. До основних захисних засобів в електроустановках напругою до 1000 В відносяться діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими рукоятками, покажчики напруги, ізолюючі і струмовимірювальні кліщі. До додаткових засобів відносяться діелектричні калоші та боти, діелектричні гумові килимки, ізолюючі підставки.

Крім основних і додаткових, застосовуються допоміжні захисні засоби обслуговуючого персоналу від світлових, теплових і механічних впливів. До них відносяться захисні окуляри, протигази, спеціальні рукавиці і т. П. Все захисні ізолюючі засоби повинні бути пронумеровані і враховані у відповідних книгах обліку. При прийнятті в експлуатацію їх необхідно перевіряти незалежно від заводських випробувань. Позачергові випробування повинні проводитися в разі несправності захисних засобів або після їх ремонту. Перед кожним використанням захисних засобів справність і переконатися, що немає зовнішніх пошкоджень, проколів; перевірити по штампі, при якій напрузі можна користуватися даними періодичного випробування. Забороняється використовувати захисні засоби: з механічним пошкодженням, на відкритому повітрі в випробування, не за призначенням.

3.5. Надання першої допомоги потерпілим від електричного струму

Перед наданням першої допомоги необхідно, попередньо убезпечивши себе, швидко звільнити потерпілого від струму і стискує його подих одягу, потім оглянути порожнину рота і видалити слиз, якщо вона є.

Для визначення стану потерпілого необхідно покласти його на спину на тверду поверхню, перевірити дихання, пульс на променевій артерії у зап'ястя або на сонній артерії на передньо поверхні шиї, визначити ширину зіниці (широкий зіницю - ознака різкого погіршення кровопостачання мозку

У всіх випадках ураження електричним струмом виклик лікаря є обов'язковим незалежно від стану потерпілого. Якщо потерпілий знаходиться у свідомості, але до цього був у непритомному стані, його потрібно зручно покласти на підстилку і накрити зверху який-небудь одягом, до прибуття лікаря забезпечити повний спокій, безперервно стежачи за диханням і пульсом. Якщо ж потерпілий втратив свідомість, але при цьому зберігаються стійке дихання і пульс, необхідно рівно і зручно укласти його на підстилку, розстебнути пояс і одяг, забезпечити приплив свіжого повітря, давати нюхати нашатирний спирт. У

тих випадках, коли дихання дуже рідкісне і судорожне або відсутні всякі ознаки життя, слід зробити штучне дихання і масаж серця. Переносити постраждалого деінде дозволяється тільки тоді, коли йому або надає допомогу загрожує небезпека

3.6. Розрахунок штучної вентиляції в приміщенні судна

Вентиляція виробничих приміщень - це сукупність заходів та засобів, призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування метеорологічних умов та чистоти повітря, які відповідають гігієнічним вимогам.

Основне завдання вентиляції – видалення із приміщення забрудненого, вологого або нагрітого повітря і забезпечення надходження чистого зовнішнього повітря.

За напрямком потоку повітря вентиляція поділяється на припливну, витяжну та прпливно-витяжну.

За місцем дії: загальнообміна, місцева, комбінована.

За призначенням: робоча, аварійна.

За способом переміщенням повітря: природна, штучна та суміщена.

Природна вентиляція виробничих приміщень.

Штучна (механічна) вентиляція виробничих приміщень.

Природна вентиляція поділяється на неорганізовану та організовану. При неорганізованій об'єми повітря що надходять у виробниче приміщення та вилучаються із нього, невідомі і залежить від випадкових чиників: напрямку вітрового потоку, його сили та температури. Її різновиди: інфільтрація (надходження повітря через нещільності у вікнах, дверях, перекриттях тощо) та провітрювання (відкривання вікон та квартир).

Організована (аерація). Надходження чистого зовнішнього повітря здійснюється через спеціальні отвори в стінах виробничих будівель (припливні прорізи, формули), видалення відпрацьованого – через спеціальні пристрої

(аераційні ліхтарі) в даху чи у верхній частині будівлі. Тобто у приміщені створюється спрямована циркуляція повітря. Про цьому виникає незначне розрідження, що сприяє підсмоктуванню зовнішнього прохолодного повітря.

Регулювання надходження зовнішнього повітря здійснюється шляхом відкривання на необхідну величину припливних отворів. У теплий період року відкриваються фрамуги, розташовані на висоті 0,3...1,8 м від рівня підлоги, у холодний – на висоті не нижче 4 м від рівня підлоги (для запобігання переохолодження працівників).

Для збільшення тяги за рахунок енергії вітру над витяжними каналами встановлюють спеціальні насадки – дефлектори. Принцип дії дефлектора полягає у збільшенні тяги у витяжному каналі за рахунок створення у ньому розрідження при обтіканні поверхні дефлектора вітровим потоком. Ефективність дефлектора зростає із збільшенням швидкості вітру і висоти установки над дахом будівлі.

Переваги природної вентиляції:

- простота конструктивного виконання;
- простота обслуговування;
- економічність завдяки відсутності витрат електроенергії.

Недоліки:

- залежність ефективності від температури та швидкості вітрового потоку;
- неможливість регулювання параметрів (температури, відносної вологості) припливного повітря;
- неможливість очищення забрудненого під час виконання виробничих процесів повітря перед його викидом в атмосферу.

Штучна (механічна) вентиляція виробничих приміщень.

На відміну від природної, штучна (механічна) вентиляція забезпечує:

- 1) очищення забрудненого повітря;
- 2) вловлювання шкідливих речовин безпосередньо в місцях їх утворення;

- 3) можливість обробки припливного повітря (очищення, підігрівання, зволоження тощо);
- 4) можливість спрямованого подавання повітря в робочу зону;
- 5) можливість забору повітря у найбільш чистій зоні території підприємства і навіть за її межами.

При штучній вентиляції повітрообмін здійснюється внаслідок різниці тисків, що створюється вентилятором. Вона застосовується в тих випадках, коли температурні умови у виробничому приміщенні не дають можливості постійного (протягом року) використання аерації та коли кількість чи токсичність шкідливих речовин, які виділяються у повітря приміщення, зумовлюють необхідність конкретної величини повітрообміну.

Штучна вентиляція є робоча або аварійна. Робоча вентиляція є загальнообмінна, місцева та комбінована. Загальнообмінна забезпечує можливість створення необхідного мікроклімату та чистоти повітря у всьому об'ємі виробничого приміщення. Якщо у виробничих приміщеннях виділяються гази та пара з густиною, більшою за густину повітря (наприклад, пари кислот, бензину, гасу тощо), то загальнообмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% - із верхньої. Якщо густина газів менша за густину повітря, то видалення забрудненого повітря здійснюється у верхній зоні.

Загальнообмінна штучна вентиляція поділяється на припливну, витяжну та припливно-витяжну.

Припливна служить для надходження чистого зовнішнього повітря у виробниче приміщення. Повітрозабірні пристрої повинні бути розташованими в місцях, де повітря не забруднене пилом та газами, при цьому не нижче 2 м від рівня землі та нижче 6 м по вертикалі і не ближче 25 м по горизонталі від викидних каналів витяжної вентиляції.

Витяжна вентиляція служить для видалення забрудненого повітря із виробничого приміщення.

Припливно-витяжна вентиляція поєднує першу й другу і застосовується у приміщеннях, в яких виділяється значна кількість шкідливих газів, пари, пилу і в яких потрібно забезпечити підвищений повітрообмін. При цьому кількість видаленого повітря повинна бути на 10% більшою, ніж припливного. Крім цього, можливе використання не лише зовнішнього повітря, але й повітря виробничих приміщень після його очищення. Цей процес називається рециркуляцією і здійснюється в холодний період року для економії тепла, що витрачається на підігрівання зовнішнього повітря.

Нагрівальні прилади парового опалення потрібно закривати кожухами, які повинні регулярно очищати від пилу.

Завданням даного розрахунку є визначення необхідної продуктивності вентилятора знаючи встановлену для даного виробництва кратність повітрообміну.

Вибираємо схему організації повітрообміну-зверху вниз (рис 3.1).

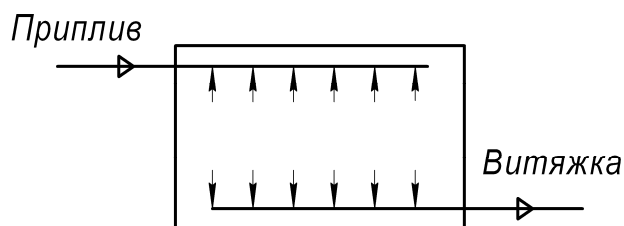


Рисунок 3.1. - Схема організації повітрообміну

Вихідні дані:

- приміщення – твіндек;
- розмір приміщення (Д×Ш×В) - 12×18×4 м;
- кількість шкідливих речовин (СО) - 12000 мг/год.

Визначимо кількість повітря, яке потрібно замінити:

$$L = \frac{P}{P_1 - P_0},$$

де P – кількість пилу, що виділяється в приміщенні, мг/год;

P_1 – допустима кількість пилу в приміщенні, мг/м³;

P_0 – вміст пилу в засмоктуваному чистому повітрі, мг/м³.

За одержаними даними проводиться розрахунок кратності повітрообміну, год⁻¹:

$$K = L / V_{\text{в}},$$

де L – повітрообмін, м³/год; $V_{\text{в}}$ – внутрішній вільний об'єм приміщення, $V_{\text{в}} \approx 0,8V$, де V – об'єм приміщення, м³.

Кратність повітрообміну показує, скільки разів протягом години обмінюється повітря у приміщенні. Звичайно, $K = 1 \dots 10$.

$$V = 12 \times 18 \times 4 = 864 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{в}} \approx 0,8V = 0,8 \times 864 = 691 \text{ м}^3.$$

$$L = \frac{12000}{20 - 5} = 800 \text{ м}^3/\text{год}.$$

За сумарним значенням повітрообміну визначаємо його кратність:

$$K = 800 / 691 = 1,16 \approx 1,5.$$

РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ СУДЕН ТА ЇХ ОБЛАДНАННЯ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ НАФТОЮ

Обладнання для запобігання забрудненню [51].

2.2.1 Загальні положення

2.2.1.1 За винятком передбаченого в 2.2.1.3, будь-яке судно валовою місткістю 400 і більше, але менше 10 000 повинне бути оснащено обладнанням для фільтрації нафти, що відповідає вимогам 2.2.2.1.

Будь-яке судно валовою місткістю 400 і більше, але менше 10 000, яке:

.1 не перевозить водяний баласт в паливних танках повинне бути оснащено обладнанням для фільтрації нафти на 15млн^{-1} з метою керування скиданням ізллял машинних приміщень;

.2 перевозить водяний баласт в паливних танках повинне бути оснащено обладнанням, яке вимагається згідно 2.2.1.2, для керування скиданням стоків ізллял машинних приміщень брудної баластної води із паливних танків, у відповідності з 2.4.2.2.

Судна, на яких недоцільно установлювати таке обладнання, повинні зберігати на борту брудну баластну воду із паливних танків і скидати її в приймальні споруди.

2.2.1.2 За винятком передбаченого в 2.2.1.3, будь-яке судно валовою місткістю 10 000 і більше повинне бути оснащено обладнанням для фільтрації нафти, що відповідає вимогам 2.2.2.2.

Обладнання для фільтрації нафти на 15млн^{-1} повинне бути достатньої потужності, щоб забезпечити пропускання такої кількості стоку, яка повинна скидатися.

2.2.1.3 На стаціонарних судах, здійснюючих тільки рейси без вантажу з метою зміни свого місця розташування, таких як судна-готелі, судна для зберігання тощо, обладнання для фільтрації нафти може не установлюватися. Такі судна обладнуються збірним танком достатньої, що задовольняє Регістр, місткості для повного зберігання на борту нафтовмісних трюмних вод.

2.2.1.4 Судна валовою місткістю менше 400 повинні бути оснащені, наскільки це практично можливо, обладнанням для зберігання на борту нафти або нафтовмісних сумішей або їх скидання у відповідності з вимогами 2.4.1.4.

2.2.1.5 Регістр і Адміністрація можуть не застосовувати вимоги 2.2.1.1і 2.2.1.2:

.1 до будь-якого судна, що виконує винятково рейси в межах особливих районів або арктичних вод; або

.2 до будь-якого судна, що має Свідоцтво згідно Міжнародного кодексу безпеки високошвидкісних суден (або іншим чином підпадає під дію цього Кодексу через свої розміри і конструкцію), виконуючого регулярні рейси, час оборотності яких не перевищує 24 годин, включаючи також рейси без пасажирів/вантажу з метою зміни місця розташування;

.3 відносно положень підпунктів .1і .2, викладених вище, повинні дотримуватися наступні умови:

.3.1 судно обладнане збірним танком достатньої місткості, яка задовольняє Регістр, для повного збереження на борту нафтовмісних трюмних вод;

.3.2 всі нафтовмісні трюмні води зберігаються на борту для наступного їхнього скидання в приймальні споруди;

.3.3 Адміністрація впевнилася, що в достатній кількості портів або терміналів, куди заходить судно, є приймальні споруди для приймання таких нафтовмісних трюмних вод;

.3.4 Міжнародне Свідоцтво щодо запобігання забруднення нафтою (ІОРР) / Свідоцтво про запобігання забрудненню нафтою, стічними водами, сміттям, якщо воно потрібно, повинне містити запис про те, що судно виконує винятково рейси в межах особливих районів або арктичних вод або є високошвидкісним судном для цілей вимог, викладених в 2.2, і характер рейсу встановлений; і

.3.5 скинута кількість, час і порт скидання реєструються в частині І Журналу нафтових операцій.

Не застосування вимог допускається за рішенням Адміністрації.

2.2.1.6 Запобігання розливів при операціях по бункеруванню нафтопродуктами.

.1 При розміщенні приймальних пристроїв для рідкого палива або інших нафтопродуктів, що використовуються для забезпечення функціонування судна, іншому, ніж зазначене в 2.5, місце розташування цих приймальних пристроїв повинне мати на палубі огороження у вигляді штаб висотою не менше 300мм.

Рекомендується застосування спеціальних приймальних станцій, аналогічних необхідним на пасажирських суднах, згідно з пунктом 13.6.2 частини VIII «Системи і трубопроводи» Правил класифікації та побудови морських суден.

.2 При наявності на судні приміщень для транспортування або зберігання рідкого палива місткістю більше 100м^3 , повинні виконуватися вимоги 2.5 у повному обсязі.

2.2.2 Обладнання для фільтрації нафти.

2.2.2.1 Обладнання для фільтрації нафти, зазначене в 2.2.1.1, повинне мати схвалену Регістром конструкцію і бути таким, щоб після проходження через нього будь-якої нафтовмісної суміші, що скидається в море, вміст нафти не перевищував 15млн^{-1} . При розгляді конструкції такого обладнання Регістр приймає до уваги технічні вимоги, рекомендовані ІМО.

2.2.2.2 Обладнання для фільтрації нафти, зазначене в 2.2.1.2, повинне відповідати вимогам

2.2.2.1. Крім того, воно повинне оснащуватися сигнальними пристроями, які включаються, коли цей рівень не може підтримуватися. Система також повинна бути обладнана пристроями, що забезпечують автоматичне припинення будь-якого скидання нафтовмісних сумішей, коли вміст нафти в стоці перевищує 15млн^{-1} . При розгляді конструкції такого обладнання Регістр приймає до уваги технічні вимоги, рекомендовані ІМО.

2.2.2.3 Обладнання для фільтрації нафти, зазначене в 2.2.2.1 і 2.2.2.2, є судновою установкою очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} і може включати

будь-яку комбінацію сепаратора або апарата для коагуляції, а також єдину установку, призначену для виробництва стоку із вмістом нафти не більше 15млн^{-1} .

2.2.2.4 Технічні вимоги, викладені в 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 цієї частини Правил, застосовуються:

.1 до обладнання, встановленого на судах, киль яких закладений або які перебувають у подібній стадії побудови 1 січня 2005 року або після цієї дати; і

.2 до нового обладнання, встановленого 1 січня 2005 року або після цієї дати на судах, киль яких був закладений або які перебували в подібній стадії побудови до 1 січня 2005 року, наскільки це доцільно і практично здійснено.

2.2.2.5 Обладнання, встановлене на судах, киль яких був закладений або які перебували в подібній стадії побудови до 1 січня 2005 року, повинне відповідати:

.1 Рекомендації з міжнародних технічних вимог до експлуатаційних характеристик і випробувань обладнання для сепарації нафтоводяних сумішей і приладів для визначення вмісту нафти, прийнятої резолюцією А.393(X), відносно обладнання, встановленого на судах 4 листопада 1978 року або після цієї дати; або

.2 Керівництву і технічним вимогам, прийнятим резолюцією МЕРС.60(33), відносно обладнання для запобігання забрудненню, встановленого на судах 30 квітня 1994 року або після цієї дати. У разі добровільної модернізації такого обладнання, з метою підвищення його продуктивності під час обробки емульгованої нафти, так, щоб дія суднової установки очищення нафтовмісних вод з руйнування емульсії, яка має забезпечуватись шляхом встановлення додаткового устаткування, воно могло бути рівноцінним обладнанню, що відповідає вимогам 2.2.3, 2.2.4 та 2.2.5 цієї частини Правил, тобто резолюції МЕРС.107(49). Таке додаткове устаткування має відповідати вимогам 2.2.6; або

.3 вимогам, що містяться в 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 цієї частини Правил, відносно обладнання для запобігання забрудненню, встановленого на судах 1 січня 2005 року або після цієї дати, наскільки це доцільно і практично здійснено.

Вимоги резолюцій А.393(X) або МЕРС.60(33) не застосовуються до суден, до яких застосовуються вимоги, викладені в 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 цієї частини Правил.

2.2.2.6 Мінімальні вимоги щодо схвалення обладнання для запобігання забрудненню:

.1 суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинна бути випробувана для схвалення типу відповідно до процедур, зазначених в частині 1 додатка до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70), за умови проведення екологічних випробувань, установлених у частині 3 додатка до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70); і

.2 попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний бути випробуваний для схвалення типу відповідно до частини 2 додатку до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70), за умови проведення екологічних випробувань, установлених у частині 3 додатку до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70).

2.2.2.7 Установлення суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} на судні повинне бути виконане таким чином, щоб під час експлуатації судна номінальна пропускна здатність на 15млн^{-1} не могла бути перевищена, за рахунок:

.1 застосування насосів, пропускна здатність яких дорівнює або менше пропускної здатності сепаратора нафтовмісних вод на 15млн^{-1} ;

.2 постійного обмеження надходження води в сепаратор нафтовмісних вод на 15млн^{-1} у тих випадках, коли до обладнання можливе приєднання насосів більшої пропускної здатності.

2.2.2.8 Для можливості перевірки під час експлуатації судна роботи суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} при закритому бортовому зливальному клапані, а також попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} із пристроєм автоматичного припинення скидання, на ділянці зливального трубопроводу між бортовим зливальним клапаном і пристроєм автоматичного припинення скидання повинний бути передбачений відвід із клапаном для зливання води назад у лляла або збірний танк нафтовмісних вод.

2.2.3 Суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} .

.1 Суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинна мати надійну конструкцію, розраховану для суднового застосування з урахуванням її передбачуваного розміщення на судні.

.2 Будь-які частини, що рухаються, суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , призначеної для установлення в місцях можливої наявності займистих повітряних сумішей або в інших небезпечних зонах, повинні мати конструкцію, що запобігаєможливість утворення статичної електрики. Будь-яке електрообладнання, що є частиною установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , повинне відповідати вимогам розділу 2 частини XI «Електричне обладнання» Правил класифікації та побудови морських суден.

.3 суднова установка очищення нафтовмісних вод 15млн^{-1} повинна бути спроектована для автоматичної роботи із призначенням безвахтового обслуговування, щонайменше, протягом 24 годин, проте повинні бути передбачені надійні заходи для виключення будь-якого скидання у випадку несправності.

Включення суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинне бути передбачене в ручному керуванні. Вимикання суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинне бути передбачене при автоматичній роботі і ручному керуванні.

.4 Зміна речовини, що подається в суднову установку очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , від нафтовмісних трюмних вод до нафти, від нафтовмісних трюмнихвод до емульгованих трюмних вод або від нафти і/або води до захоплювання повітря не повиннеприводити до зливу за борт будь-якої суміші із вмістом нафти більше 15млн^{-1} .

.5 Система повинна вимагати мінімальної підготовки для уведення її в дію. Що стосується обладнання, яке використовуєтьсядля очищення нафтовмісних вод машинного відділення, то для уведення цієї системи в дію не повинна виникати необхідність у регулюванні клапанів і іншого обладнання.

.6 Всі робочі вузли і деталі суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , що підлягають періодичному контролю і обслуговуванню або

піддаються зношуванню і поломці, повинні бути легкодоступні для технічного обслуговування.

.7 Конструкція суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинна забезпечувати надійну роботу при нахилі на кут $22,5^\circ$ у будь-якій площині від нормального робочого положення.

.8 Обладнання, що працює при надлишковому тиску, повинне бути постачене запобіжними пристроями.

Запобіжний пристрій повинний бути ввідрегульований на тиск: $p_{\text{відкр}} = 1,1p$, де p - робочий тиск.

.9 Деталі суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , що працюють при надлишковому тиску, до нанесення на них захисних покриттів повинні бути випробувані пробним гідравлічним тиском: $p_{\text{пр}} = 1,1p$, де p - робочий тиск.

Допускається випробування деталей роздільно по порожнинах пробним тиском, призначеним відповідно до робочого тиску в кожній порожнині.

.10 Подача обслуговуючих насосів повинна відповідати пропускній здатності суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} . У жодному разі подача обслуговуючих насосів не повинна перевищувати більше ніж в 1,5 рази пропускну здатність суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} .

.11 Повинна бути передбачена можливість осушення суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} .

.12 Якщо в конструкції суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} передбачений підігрів нафтовмісної суміші, він може здійснюватися за допомогою парових або водяних змішувачів. Електропідігрів допускається за умови виконання вимог 15.3 частини XI «Електричне обладнання» Правил класифікації та побудови морських суден.

.13 Суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , насоси та інше обладнання повинні бути оснащені приладами для контролю тиску,

температурі рівня, а також системою аварійно-попереджувальної сигналізації і захисту.

.14 Якщо до складу суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} входить сепаратор відцентрового типу, він повинний відповідати вимогам 5.4 частини IX «Механізми» Правил класифікації та побудови морських суден.

.15 Суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , насоси та інше обладнання в місцях можливого витoku нафтовмісних вод повинні бути постачені пристроями для збирання витоків, що задовольняють вимогам 13.5 частини VIII «Системи і трубопроводи» Правил класифікації та побудови морських суден.

.16 На вертикальних ділянках трубопроводу для входу нафтовмісної води і зливання очищеної води із суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} повинні бути передбачені пристрої для добору проб, схваленої Регістром конструкції. Рекомендовані конструкції пристроїв для добору проб із напірних та із приймальних (для вакуумної суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1}) трубопроводів, наведені на рис. 4.1 і 4.2 відповідно.

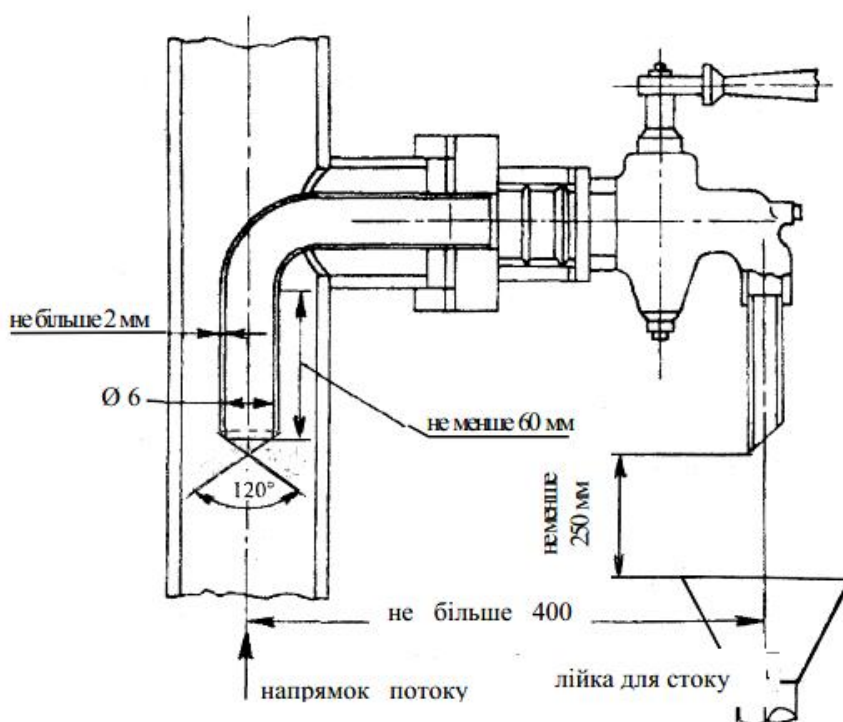


Рис. 4.1 Пристрій для добору проб із напірних трубопроводів

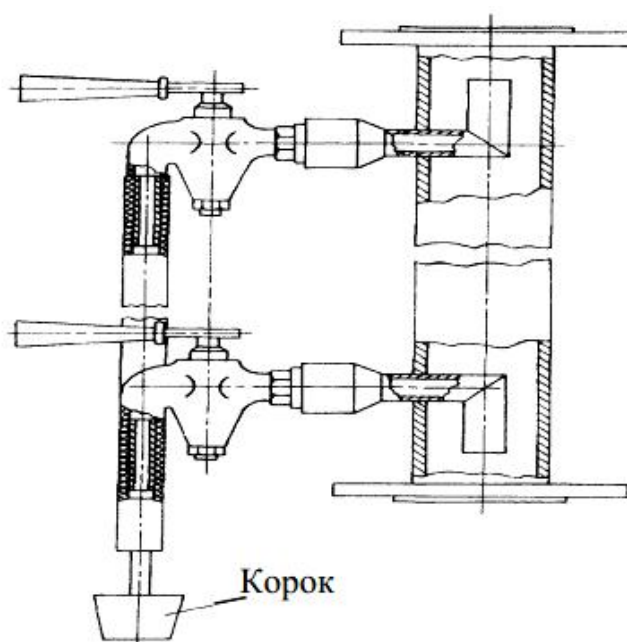


Рис. 4.2. Пристрій для добору проб із приймальних трубопроводів

За погодженням із Регістром допускається установлення пристрою для добору проб тільки на зливі очищеної води, як можна ближче до випускного отвору суднової установки очищення нафтовмісних вод.

.17 Якщо є обмеження (робочі і/або настановні), які Регістр вважає необхідними, це повинне бути зазначене в прикріпленій до обладнання таблиці.

.18 Рекомендована пропускна здатність суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} , залежно від валової місткості судна, наведена в таблиці 2.2.3.18.

Таблиця 2.2.3.18

Валова місткість судна	Рекомендована пропускна здатність суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} ($\text{м}^3/\text{год}$)
400 і більше, але менше 1600	0,5
1600 і більше, але менше 4000	1,0
4000 і більше, але менше 15000	2,5
15000 і більше	5,0

2.2.4 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} .

.1 Ці технічні вимоги поширюються на попереджувальні сигналізатори на 15млн^{-1} .

.2 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний бути стійким до корозії в умовах морського середовища.

.3 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} , призначений для установки в місцях можливої наявності займистих повітряних сумішей, повинний відповідати вимогам розділу 2 частини XI «Електричне обладнання» Правил класифікації та побудови морських суден.

Будь-які частини, що рухаються, сигналізатора на 15млн^{-1} , встановленого в небезпечній зоні, повинні мати конструкцію, що запобігає можливість утворення статичної електрики.

.4 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний надійно працювати в кліматичних умовах і при механічних впливах відповідно до 2.1 частини XI «Електричне обладнання» Правил класифікації та побудови морських суден. Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний надійно працювати при нахилі на кут $22,5^\circ$ у будь-якій площині від нормального робочого положення.

.5 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний бути оснащений електричним/електронним пристроєм, попередньо настроєним виробником на спрацювання, коли вміст нафти в стоці перевищує 15млн^{-1} з одночасною подачею команди на керування автоматичним запірним пристроєм для припинення скидання за борт. Цей пристрій повинний також автоматично спрацьовувати при будь-якій несправності, коли сигналізатор вийде з ладу, коли йде прогрів пристрою або коли пристрій знеструмлений у силу інших причин. Світлові і звукові сигнали повинні бути виведені до місця несення вахти обслуговуючим персоналом.

.6 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний реєструвати дату, час і стан сигналу, а також робочий стан суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} .

Пристрій, що реєструє, повинний також зберігати дані щонайменше за останні вісімнадцять місяців і повинний бути здатний відображати або друкувати протокол для офіційних перевірок, якщо це буде потрібно. У випадку заміни

попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} повинні бути передбачені засоби, що забезпечують, щоб зареєстровані дані залишалися на судні протягом 18 місяців.

.7 Повинна бути передбачена індикація « млн^{-1} ». На індикацію « млн^{-1} » не повинні впливати емульсія і/або сорт нафти, з огляду на те, що випробна рідина, докладно описана в 1.2.4 частини 1 додатка до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70), вважається такою, що представляє суміш, наявність якої можна припускати в лялах машинного приміщення судна.

.8 Час спрацювання попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} , тобто час, що пройшов з моменту зміни складу проби, що надходить у попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} , і до індикації « млн^{-1} », що показує остаточний результат, не повинний перевищувати 5 секунд.

.9 Точність попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} повинна бути в межах $\pm 5\text{млн}^{-1}$. Точність попереджувального сигналізатора повинна залишатися в зазначених межах незалежно від наявності забруднюючих речовин, інших ніж нафта, а подача енергії повинна відхилятися на 10% від проектної величини, тобто відносно електричного струму, стисненого повітря тощо.

.10 Точність попереджувальних сигналізаторів на 15млн^{-1} повинна перевірятися під час оглядів для поновлення Свідоцтва ІОРР відповідно до інструкцій підприємства - виробника. Калібрувати попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} на борту судна необов'язково, але допускається його випробування на судні відповідно до інструкцій підприємства - виробника. Як альтернатива прилад може замінятися відкаліброваним попереджувальним сигналізатором на 15млн^{-1} .

Свідоцтво про калібрування попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} , що підтверджує дату останньої калібрувальної перевірки, повинне зберігатися на судні для цілей перевірки. Перевірки точності можуть виконуватися тільки підприємством - виробником або особами, уповноваженими підприємством - виробником.

.11 Рекомендується передбачити наявність на борту судна простих пристроїв для перевірки відхилень і повторюваності показань приладу, а також можливості повторної установки приладу на «нуль».

.12 Попереджувальний сигналізатор повинний бути постачений чіткими написами або загальноприйнятими символами, що вказують на його призначення і дію.

Для запобігання навмисного включення попереджувальних сигналізаторів на 15млн^{-1} повинне бути передбачене наступне:

.12.1 при кожному доступі до попереджувального сигналізатора на 15млн^{-1} , що виходить за межі необхідних вимог пункту 2.2.4.11, потрібне зняття пломби; і

.12.2 попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний мати таку конструкцію, щоб сигнал включався завжди, коли для очищення або установки на «нуль» використовується чиста вода.

.13 У попереджувальному сигналізаторі на 15млн^{-1} не повинні утримуватися і використовуватися речовини, що мають небезпечні властивості, якщо не прийняті відповідні схвалені Адміністрацією заходи для усунення будь-яких небезпек, які можуть бути викликані такими речовинами.

.14 Конструкція попереджувального сигналізатора повинна забезпечувати можливість надійного кріплення.

.15 Попереджувальний сигналізатор на 15млн^{-1} повинний бути змонтований на судні щодо суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} таким чином, щоб загальний час спрацювання (включаючи час спрацювання самого сигналізатора) у проміжку часу між початком зливання води з вмістом нафти більше 15млн^{-1} із суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн^{-1} і припиненням зливання води за борт при спрацюванні автоматичного запірного пристрою був мінімальним, у будь-якому випадку цей час не повинний перевищувати 20 секунд.

.16 Змонтований на судні пристрій для відведення нафтовмісної води із зливального трубопроводу суднової установки очищення нафтовмісних вод на

15млн⁻¹ до попереджувального сигналізатора на 15млн⁻¹ повинний забезпечувати потік водиз необхідним тиском і витратою.

.17 Система добору проб повинна забезпечувати відповідність проб, що добираються, складу стоку. Місця добору проб повинні бути передбачені на всіх зливальних трубопроводах, які підлягають контролю.

Пристрої, що перебувають на борту судна, для добору проб зі зливального трубопроводу суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн⁻¹ до попереджувального сигналізатора на 15млн⁻¹, повинні забезпечувати повну відповідність проб складу стоку зналежними тиском і витратою.

Пристрій добору проб повинний розташовуватися на вертикальній ділянці зливального трубопроводу. Установлення його на горизонтальній ділянці може бути допущене Регістром, якщо забезпечене повне заповнення всього перетину зливальної труби рідиною протягом усього часу скидання.

2.2.5 Пристрій автоматичного припинення скидання.

.1 Пристрій автоматичного припинення скидання повинний забезпечувати припинення скидання нафтовмісної суміші за сигналом приладу, зазначеного в 2.2.4.

.2 Пристрій автоматичного припинення скидання повинний складатися із клапанного пристрою, встановленого на трубопроводі суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15млн⁻¹ для випуску стоку за борт, що автоматично направляє скидання сумішістоку в судові ляля або стічну цистерну, коли вміст нафти в стоці перевищує 15млн⁻¹.

2.2.6 Додаткове устаткування, що модернізує обладнання для фільтрації нафти

2.2.6.1 Загальні положення

Ці вимоги застосовуються при модернізації систем, встановлених до 1 січня 2005 року на судах, обладнання для фільтрації нафти яких було схвалене відповідно до резолюції МЕРС.60(33) і зазначеного в 2.2.2.5.2.

Найкращою мірою по запобіганню забрудненню нафтовмісними ляльними водами є інтегрована система обробки нафтовмісних трюмних вод (IBITS)

відповідно до Керівництва згідно з циркуляром МЕРС.1/Circ.642. IBITS запобігає утворенню нафтовмісних лляльних вод. Враховуючи труднощі при встановленні повної IBITS на існуючих суднах, слід серйозно розглядати питання про попереднє очищення нафтовмісних трюмних вод, наприклад, про встановлення системи води першого контуру між збірними колодязями і стічною цистерною для видалення з нафтовмісних трюмних вод домішок шляхом спливання або відстоювання, що є ефективним способом запобігання забрудненню суднової установки очищення нафтовмісних вод.

2.2.6.2 Область застосування

Ці вимоги застосовуються до додаткового устаткування подальшого очищення для модернізації обладнання фільтрації нафти, що відповідає вимогам резолюції МЕРС.60(33), з метою підвищення його продуктивності під час обробки емульгованої нафти, так, щоб дія суднової установки очищення нафтовмісних вод з руйнування емульсії, яка має забезпечуватись шляхом встановлення додаткового устаткування, могла бути рівноцінною дії обладнання, наведеного в 2.2.3- 2.2.5.

2.2.6.3 Варіанти модернізації

Устаткування для модернізації існуючого обладнання для фільтрації нафти може бути представлено двома наступними типами:

.1 Устаткування, яке може модернізувати конкретну конструкцію обладнання для фільтрації нафти. Таке устаткування має випробовуватись згідно з частиною 1 технічних вимог до випробувань, які містяться в додатку до Керівництва, прийнятого резолюцією МЕРС.205(62), і має бути з'єднане з обладнанням для фільтрації нафти, що відповідає резолюції МЕРС.60(33), а також бути схваленого типу, з урахуванням положень Керівництва, прийнятого резолюцією МЕРС.205(62), для використання в поєднанні з цією конкретною конструкцією обладнання, що пройшло випробування, для фільтрації нафти, які враховують:

- екологічні випробування, що містяться в частині 3 додатка до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70), і
- обмежуючі умови сертифікації модернізованого обладнання;

.2 Устаткування яке може модернізувати будь-яку конструкцію обладнання для фільтрації нафти, що відповідає вимогам резолюції МЕРС.60(33). Таке устаткування має випробовуватись відповідно до частини 2 технічних вимог до випробувань, які містяться в додатку до Керівництва, прийнятого резолюцією МЕРС.205(62), і бути схваленого типу, з урахуванням положень зазначеного вище Керівництва, для використання в поєднанні з будь-якою конструкцією обладнання для фільтрації нафти з урахуванням:

- екологічних випробувань, вимоги до яких містить частина 3 додатку до резолюції МЕРС.107(49) з поправками резолюцією МЕРС.285(70), і
- обмежуючих умов сертифікації модернізованого обладнання.

2.2.6.4 Технічні вимоги до додаткового устаткування

.1 Додаткове устаткування повинне мати міцну конструкцію і бути придатним для використання на судні з урахуванням його передбачуваного розміщення на ньому.

.2 Якщо таке устаткування встановлюється в місцях, де може утворюватися вогнебезпечна атмосфера, воно має відповідати необхідним правилам безпеки для таких приміщень. Будь-яке електрообладнання, що є частиною додаткового устаткування, має розташовуватись в безпечному районі або має бути схвалене Регістром, як безпечне для використання в небезпечному районі. Будь-які рухомі частини, що встановлюються в небезпечних районах, мають розташовуватись так, щоб уникати утворення статичної електрики.

.3 Додаткове устаткування має бути спроектоване так, щоб функціонувати в автоматичному режимі в поєднанні з існуючим обладнанням.

.4 Додаткове устаткування має вимагати мінімальної уваги для приведення його в дію. Стосовно устаткування, що використовується для ллял машинних відділень, не повинна виникати необхідність коригування клапанів та іншого обладнання для приведення додаткового устаткування в дію.

Устаткування має працювати, щонайменше, протягом 24 годин в нормальному режимі без обслуговування.

.5 Слід розуміти, що повне схвалення типу з використанням випробувальної рідини С має здійснюватися без перерв на контроль, очищення або обслуговування сепаратора для нафтовмісних вод. Це випробування розглядається як імітація автоматичної роботи обладнання протягом 24 годин, що не потребує уваги екіпажу.

.6 Слід розуміти, що суднова установка очищення нафтовмісних вод на 15 млн^{-1} має працювати безперервно і в автоматичному режимі.

.7 Усі рухомі частини додаткового устаткування, які схильні до зносу і пошкодження, мають бути легкодоступними для технічного обслуговування.

2.2.6.5 Вимоги до монтажу додаткового устаткування

.1 Наявне обладнання для фільтрації нафти за номінальною пропускною спроможністю має відповідати додатковому устаткуванню.

.2 Додаткове устаткування має встановлюватись між існуючим обладнанням для фільтрації нафти і точкою відбору проб, передбаченою для цілей перевірки на судні.

.3 Додаткове устаткування має забезпечуватись жорстко закріпленою табличкою із зазначенням експлуатаційних або монтажних обмежень, які вважають за необхідне виготовлювач або Регістр.

.4 На судні, оснащеному додатковим устаткуванням, має постійно знаходитись копія інструкції з його експлуатації і технічного обслуговування.

.5 Для цілей перевірки на судні точка добору проб має бути передбачена у вертикальній секції трубопроводу для стоку води якомога ближче до сепаратора, вказаного в 2.2.3.14, і випускного отвору додаткового устаткування. Мають бути передбачені засоби рециркуляції за випускним отвором додаткового устаткування або поряд з ним, щоб дозволити проведення випробувань суднової установки очищення нафтовмісних вод на 15 млн^{-1} , включаючи попереджувальний сигналізатор на 15 млн^{-1} і пристрій автоматичного припинення скидання, якщо вони встановлені, при закритому забортному отворі.

Попереджувальний сигналізатор на 15 млн^{-1} , якщо він встановлений, має відповідати вимогам 2.2.4.

ВИСНОВКИ

1. У роботі отримала подальший розвиток теорія векторного керування АД і на цій основі вирішена актуальна науково-технічна задача розвитку методів синтезу, теоретичного і практичного дослідження нових алгоритмів векторного керування АД, які мають підвищені властивості робастності і властивості адаптивності по відношенню до варіацій активного опору ротора, що є істотним при створенні електромеханічних систем з високими динамічними властивостями і показниками енергетичної ефективності. Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному.

2. На підставі аналізу існуючих рішень в області векторного керування АД обґрунтовано актуальність розвитку методів синтезу з метою розробки нових алгоритмів векторного керування, які б забезпечували високі показники якості керування моментом і потоком, були робастними (адаптивними) по відношенню до варіацій активного опору роторного кола, а також простими з точки зору практичної реалізації.

3. Отримав подальший розвиток метод синтезу алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком асинхронних двигунів, який ґрунтується на декомпозиції вихідної моделі на дві зв'язані підсистеми: електромеханічну і електромагнітну. Дана конструктивна процедура синтезу цих підсистем в умовах часткової вимірюваності вектора стану, що дозволяє гарантувати композитній системі властивість глобальної (локальної) асимптотичної експоненційної стійкості.

4. Синтезований робастний алгоритм векторного керування забезпечує: глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора; асимптотичну орієнтацію по вектору потокозчеплення ротора; асимптотичну розв'язку процесів керування моментом і потоком; асимптотичну лінеаризацію підсистеми керування моментом, що приводить до асимптотично лінійних рівнянь динаміки підсистеми моменту з вільно формованими показниками динаміки; робастність щодо варіацій активного

опору роторного кола; простоту технічної реалізації. Доведено, що розроблений алгоритм за показниками якості керування та властивостями робастності має кращі характеристики в порівнянні з існуючими алгоритмами непрямого векторного керування. Для відчутного підвищення точності при низьких швидкостях потрібна адаптивна компенсація варіацій активного опору ротора.

5. Розроблено метод формування зворотних зв'язків адаптивних до варіацій активного опору ротора спостерігачів вектора потокозчеплення ротора, що дозволяють забезпечити локальну експоненційну стійкість для структури, що складається з типового спостерігача Вергезе та алгоритму ідентифікації Матсусе. Запропонований метод ґрунтується на спеціальному перетворенні координат, що дозволяє виключити властивість добутку невідомого параметра і невимірюваних змінних у правій частині диференціальних рівнянь, вихід яких не вимірюється.

6. Розроблено метод дослідження робастності алгоритмів непрямого векторного керування моментом і потоком асинхронних двигунів щодо основного параметричного збурення - зміни активного опору ротора, який дозволяє аналітично проводити повномасштабні дослідження поведінки похибок регулювання моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора в різних режимах роботи АД. Результати порівняльних досліджень підтверджують переваги розробленого робастного алгоритму в порівнянні з іншими відомими алгоритмами при непрямому полеорієнтуванні.

7. Підтверджено, що за наявності варіацій активного опору ротора, запропонований алгоритм векторного керування у порівнянні зі стандартним дозволяє значно поліпшити динамічні показники якості при відпрацюванні траєкторій моменту і модуля потокозчеплення ротора, а також підвищити енергетичну ефективність процесу електромеханічного перетворення енергії. У розробленій адаптивній системі забезпечується повна компенсація впливу варіацій активного опору ротора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Taylor D. G. Nonlinear control of electric machines: An overview / D. G. Taylor // IEEE Control Systems Magazine. – Dec. 1994. – P. 41–51.
2. Isidori A. Nonlinear Control Systems (3rd edition) / A. Isidori. – Berlin: Springer-Verlag, 1995. – 549 p.
3. Krstic M. Nonlinear and Adaptive Control Design / M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic. – New York: Wiley, 1995. – 576 p.
4. Marino R. Nonlinear Control Design: Geometric, Adaptive and Robust / R. Marino, P. Tomei. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. – 390 p.
5. Sepulchre R. Constructive Nonlinear Control / R. Sepulchre, M. Jankovic, P. Kokotovic. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 313 p.
6. Slotine J.-J. E. Applied Nonlinear Control / J.-J. E. Slotine, W. Li. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990. – 352 p.
7. Fradkov A. L. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems / A. L. Fradkov, I. V. Miroshnik, V. O. Nikiforov. – Kluwer Academic Publ., the Netherlands, 1999. – 510 p.
8. Narendra K. S. Stable Adaptive Systems / K. S. Narendra, A. M. Annaswamy. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. – 496 p.
9. Astrom K. J. Adaptive Control / K. J. Astrom, B. Wittenmark. – New York: Addison-Wesley, 1994. – 544 p.
10. Борцов Ю. А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. –Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
11. Павлов Б. В. Системы прямого адаптивного управления / Б. В. Павлов, И. Г. Соловьев. –М. : Наука, 1989. – 136 с.
12. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы / Я. З. Цыпкин. –М. : Наука, 1974. – 576 с.
13. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С. В. Емельянов. –М. : Наука, 1967. – 336 с.

14. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / В.И. Уткин. – М. : Наука, 1981. – 368 с.
15. Борцов Ю. А. Автоматические системы с разрывным управлением / Ю. А. Борцов, И. Б. Юнгер. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
16. Методы синтеза систем с разрывным управлением на скользящих режимах. Сборник трудов. – М. : Институт проблем управления, 1983. – 99 с.
17. Young K. D. A control engineers guide to sliding mode control / K. D. Young, V. I. Utkin, U. Ozguner // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – May 1999. – Vol. 7, No. 3. – P. 328–342.
18. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems / Ortega R., Loria A., Nicklasson P., Sira-Ramirez H. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 543 p.
19. Van der Schaft A. L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control / A. Van der Schaft. – London: Springer-Verlag, 2000. – 249 p.
20. Nicklasson P. J. Passivity-based control of a class of Blondel-Park transformable electric machines / P. J. Nicklasson, R. Ortega, G. Espinosa-Perez, C. G. J. Jacobi // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1997. – Vol 42, No. 5. – P. 629–647.
21. Luenberger O. G. An introduction to observers / O. G. Luenberger // IEEE Trans. on Automatic Control. –Dec. 1971. –Vol. 16, No 6. –P. 596–602.
22. Kokotovic P. V. The joy of feedback: nonlinear and adaptive / P. V. Kokotovic // IEEE Control Systems Magazine. – June 1992. – Vol. 12. – P. 7–17.
23. Dawson D. M. Nonlinear Control of Electric Machinery / D. M. Dawson, J. Hu, T. C. Burg. – New York: Marcel Dekker Inc, 1998. – 437 p.
24. Bodson M. Differential-geometric methods for control of electric motors / M. Bodson, J. Chiasson // Int. Journal of Robust and Nonlinear Control. – 1998. –No. 8. – P. 927–952.
25. Chiasson J. Modelling and High Performance Control of Electric Machines / J. Chiasson. – John Willey&Sons, 2005. – 736 p.

26. Изосимов Д. Б. Скользящий режим в электроприводе (аналитический обзор) / Д. Б. Изосимов, С. Е. Рывкин. – М. : Препринт. Институт проблем управления. –1993. – 134 с.
27. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. – К. : ИСИМО, 1996. – 298 с.
28. Utkin V. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems / V. Utkin, J. Guldner, J. Shi. – Taylor&Francis Inc, 1999. – 325 p.
29. Vas P. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines / P. Vas. – Oxford: Clarendron Press, 1993. – 384 p.
30. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control / P. Vas. –London: Oxford University Press, 1998. – 768 p.
31. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. –М.–Л. : Энергия, 1964. – 527 с.
32. Krause P. C. Analysis of Electric Machinery / P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff. – IEEE Press, 1995. – 564 p.
33. Meisel J. Principles of Electromechanical Energy Conversion / J. Meisel. – New York: McGraw-Hill, 1966. – 639 p.
34. Теорія електропривода: Підручник / [М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк, О. М. Желдак, О. В. Ковальчук и др.] ; за ред. М. Г. Поповича. –К. : Вища школа, 1993. – 494 с.
35. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник / [О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепіков, Б. М. Мацко, С. М. Пересада и др.] ; за ред. М.Г. Поповича. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
36. Костенко М. П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов / М. П. Костенко // Электричество. – 1925. – № 2. – С. 24–32.
37. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

38. Leonhard W. Control of Electrical Drives. (3rd edition) / W. Leonhard. –Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 460 p.
39. Bose B. K. Power Electronics and AC Drives / B. K. Bose. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1986. – 432 p.
40. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
41. Гандзюк М.П. Основи охорони праці. К.: Каравела, 2005. – 408 с.
42. 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.
43. Закони України Про охорону праці: Закон України / Відомості Верховної Ради України. - 1992. - № 49, - Ст. 668.
44. Международная конвенція з охорони людського життя на морі - СОЛАС - 74 (SOLAS - 74), вид. 2008.
45. Международная конвенція про запобігання забруднення моря - МАРПОЛ - 73/78, вид. 2004.
46. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. – Харьков : «Основа», 2004. – 210 с.
47. Пересада С.М. Нелинейное и адаптивное управление в электромеханических системах с векторно-управляемыми электродвигателями: дис. доктора техн. наук : 05.09.03 / Сергей Михайлович Пересада. – К., 2007. – 472 с.
48. Пістун І.П. Охорона праці в судобудуванні. Львів; «Тріада плюс»; 2009- 580с.
49. Правила пожежної безпеки на морських суднах України, НАПБ.Б. 01.013 - 2007. - Київ: Основа, 2007.
50. Русаловський А.В. Правові та організаційні питання охорони праці. Університет «Україна»; К., 2009- 295с.
51. Правила запобігання забрудненню з суден. Регістр судноплавства України. Київ 2020, 237 с.