

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

«Моделювання в середовищі MATLAB електропривода на базі синхронного
двигуна з постійними магнітами»
(тема кваліфікаційної роботи)

спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»

Виконав: студент 2 курсу групи ДЕА - А23мг

Спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка

_____ / Назар ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Керівник _____ / Наталія АНТОНЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Рецензент _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я, прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Геннадій КАНІЮК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ / Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я, прізвище)

Секретар ЕК _____ / Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я, прізвище)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра: Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу/дипломний проєкт)
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу (ці) вищої освіти _____ Назару ОЛІЙНИКУ _____
(ім'я, прізвище)

1. Тема «Моделювання в середовищі MATLAB електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «05» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Об'єктом дослідження є синхронний двигун із постійними магнітами. Як вихідні дані подано: - структурна схема електроприводу - характеристики досліджуваного електромобіля.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, що їх належить розробити):
1. Принцип роботи системи керування синхронного двигуна. 2. Проектування системи керування синхронним електродвигуном. 3. Розрахунок силового устаткування. 4. Моделювання системи управління у програмному продукті MATLAB

6. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Презентація, виконана в програмі Microsoft PowerPoint

7. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
1	Наталія Антоненко			

8. Дата видачі завдання «02» вересня 2024 р.

Керівник роботи

Наталія АНТОНЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

Назар ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи
(дипломної роботи/дипломного проєкту)

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Принцип роботи системи керування синхронного двигуна.	12.10.2024- 19.10.2024	
2	Проектування системи керування синхронним електродвигуном.	19.10.2024 – 30.10.2024	
3	Розрахунок силового устаткування.	30.10.2024 – 14.11.2024	
4	Моделювання системи управління у програмному продукті MATLAB	14.11.2024- 22.11.2024	
5	Підготовка загальних висновків по роботі	23.11.2024- 03.12.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	До 04.12.2024	

Здобувач (ка) вищої освіти

Назар ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Моделювання в середовищі MATLAB електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами»

Назар ОЛІЙНИК

Магістерська робота містить: 55 сторінки, 7 рисунків, 7 таблиць, 2 додатки, список використаних джерел містить 17 джерел.

**СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ,
ВЕКТОРНА ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, БЕЗДАТЧИКОВЕ
УПРАВЛІННЯ, ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

Об'єктом дослідження – система керування електродвигуном для електронавантажувача, керована електроприводом із функціональними перетворювачами.

Метою роботи є побудова системи керування синхронним двигуном із постійними магнітами, що забезпечує необхідні динамічні та енергетичні показники контролю якості.

За допомогою програмного продукту Matlab змодельовано модель електроприводу та систему керування. Розраховано коефіцієнти регуляторів швидкості та струму. Отримано перехідні характеристики процесів, що дозволяють порівнювати ефективність розроблених систем.

ABSTRACT

for the master's thesis on the topic

‘Modelling in MATLAB of an electric drive based on a permanent magnet synchronous motor’

Nazar OLIYNYK

Master's thesis contains: 55 pages, 7 figures, 7 tables, 2 appendices, the list of references includes 17 sources.

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, VECTOR PULSE WIDTH MODULATION, SENSORLESS CONTROL, VECTOR CONTROL, ENERGY EFFICIENCY

The object of research is an electric motor control system for an electric forklift controlled by an electric drive with functional converters.

The aim of the work is to build a control system for a permanent magnet synchronous motor that provides the required dynamic and energy quality control indicators.

The model of the electric drive and the control system were modelled using Matlab software. The coefficients of the speed and current controllers were calculated. The transient characteristics of the processes were obtained, which allow comparing the efficiency of the developed systems.

Терміни, визначення, позначки та скорочення

АІН – Автономний інвертор напруги

АЕД – Асинхронний електродвигун

ДПС - Двигун постійного струму

ДПР - Датчик положення ротора

ККД - Коефіцієнт корисної дії

ПЧ - Перетворювач частоти

СД – Синхронний двигун

ТАУ - Теорія автоматичного управління

ТЕД - Тяговий електродвигун

ШІМ - Широтно-імпульсна модуляція

IGBT – Біполярний транзистор із ізольованим затвором

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ПРИНЦИП РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	11
1.1. Аналіз методів управління СД.....	11
1.2. Опис математичної моделі СД.....	16
Висновки по першому розділу.....	21
2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ	22
2.1. Система СДПМ із використанням датчика положення ротора	22
2.2. Система СДПМ із використанням функціональних перетворювачів ..	29
2.3. Система СДПМ із використанням бездатчикового управління	30
2.3.1. Опис спостерігача стану	31
Висновки по другому розділу	33
3 РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ	34
3.1. Розрахунок потужності двигуна та його вибір	34
Висновки по третьому розділу	37
4. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ У ПРОГРАМНОМУ ПРОДУКТІ МАТЛАВ.....	38
4.1. Моделювання синхронного двигуна.....	38
4.2. Налаштування регуляторів швидкості та струму	39
4.3. Моделювання системи з датчиком положення ротора	40
4.4. Моделювання системи керування з використанням функціональних перетворювачів.....	41
4.5. Моделювання системи керування з використанням бездатчикового керування	43
Висновки по четвертому розділу.....	45
ВИСНОВОК.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48

ВСТУП

Транспорт з електродвигуном за екологічними нормами значно обганяє інші види автотранспорту з ДВЗ (двигун внутрішнього згорання). Тому, технологія і виробництво електротранспорту передбачили використання транспорту, у якому при зіткненні контакторів енергія надходить до двигуна від системи електропостачання. Звідси випливає, що маневреність даного контактного електротранспорту буде набагато гіршою за маневреність автотранспорту. Попри це, вивчення різних варіантів використання палива двигунів необхідне, тому що забруднення довкілля від транспорту з ДВЗ досить сильно впливають на наслідки для оточуючих, тим паче в економічно розвинених містах.

Перехід до інших джерел енергії, безпечні для навколишнього середовища, є одним з найважливіших варіантів вирішення проблеми зниження негативного впливу транспортних засобів на природу в цілому. Транспортний засіб, який може замінити сучасний автомобіль, що використовує традиційне паливо, повинен перевищувати або не поступатися їх маневреності. Гібридні електромобілі з комбінованою установкою – основний напрямок для зниження рівня забрудненості навколишнього середовища.

Електромобіль – це відносно нова концепція у світі автомобільної промисловості, головним джерелом енергії є акумуляторна батарея. Вимоги, що застосовуються до накопичувачів енергії:

- вибухобезпека та пожежна безпека;
- наявність малих масогабаритних характеристик;
- наявність широкого спектру робочих температур;
- мінімальний саморозряд;
- тривалий термін роботи;
- простота в обслуговуванні;
- невелика токсичність;

– наявність ККД зарядно-розрядної характеристики.

Підприємство, що виробляє продукцію, дає гарантію на термін служби акумуляторної батареї, але лише за умови її експлуатації. Технічна документація на виріб, що випускається та надається підприємством, повинна містити опис режимів експлуатації джерел струму, які, у свою чергу, повинні відповідати їй. Індивідуальні експлуатаційні характеристики притаманні кожному типу електрохімічних систем. Якщо є потреба у підвищенні надійності джерела енергії, для кожного конкретного набору батарей надаються певні технічні характеристики.

Для досягнення повної безпеки використання батареї, а також оптимальних умов її експлуатації необхідно суворо дотримуватись режимів роботи та застосовувати механізми, за допомогою яких енергія батареї перерозподіляється між батареями. Невід'ємною частиною сучасних накопичувачів енергії є система управління та контролю за станом електрохімічного джерела струму, яка відповідає за правильність режиму роботи акумуляторної тягової батареї.

Застосування енергоефективного електроприводу на основі синхронного двигуна з постійними магнітами є досить актуальним явищем, яке і на сьогоднішній день продовжує вдосконалюватися.

Магістерська робота спрямована на дослідження системи керування синхронним двигуном із постійними магнітами, що забезпечує необхідні динамічні та енергетичні показники контролю якості.

Актуальність виконання роботи зумовлена необхідністю підвищення динамічних та енергетичних показників контролю якості енергоефективного електроприводу на основі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Метою роботи є побудові системи керування синхронним двигуном із постійними магнітами, що забезпечує необхідні динамічні та енергетичні показники контролю якості.

Завдання дослідження.

1. Провести аналіз принципів роботи системи керування синхронного двигуна.
2. Провести проектування системи керування синхронним електродвигуном.
3. Провести розрахунок силового устаткування.
4. Провести моделювання в середовищі MatLab системи керування синхронного двигуна з постійними магнітами.

Об'єктом дослідження є синхронний двигун з постійними магнітами.

Методи дослідження. Для досягнення сформульованої мети та завдань використано комплекс взаємодоповнюючих методів дослідження:

– теоретичні методи включають аналіз наукової, технічної та методичної літератури з досліджуваної теми та суміжних галузей для вивчення концептуальних положень, базових понять і категорій дослідження; аналіз стану машинобудівної промисловості; а також узагальнення, абстрагування, класифікацію та проектування з метою забезпечення та підтримки необхідного рівня якості виробів.

Новизна отриманих результатів та їх теоретичне значення полягає в уточненні та конкретизації теоретичних і експериментальних положень у енергетичній промисловості.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що проведений аналіз, проектування, розрахунки та узагальнення даних дозволили зробити висновки, що отримана у цій роботі система бездатчикового управління з ФП для СД забезпечує найменше значення струму статора двигуна серед проаналізованих систем, що має високі динамічні показники.

1 ПРИНЦИП РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

1.1. Аналіз методів управління СД

Загальні відомості про синхронний двигун. Даний двигун є електричною машиною змінного струму, у якого частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля в повітряному зазорі. Статор цього двигуна схожий на конструкцію статора асинхронного двигуна. На роторі знаходяться постійні магніти, на відміну від їх розташування є два види СДПМ: магніти розташовані на поверхні ротора; магніти розташовані у сталі ротора. Двигуни зазвичай виробляються на малу потужність і використовують у сервоприводах разом із перетворювачем частоти [1]. Є розробки цих двигунів мегаватної потужності [2].

Синхронні електродвигуни все частіше зустрічаються в областях, де використовуються ДПС або АД. Наприклад, приводи циркулярних насосів; приводи компресорів у побутовій техніці, системах вентиляції, в бурових установках. Причинами цього є поточна тенденція зменшення вартості магнітних матеріалів, і навіть модернізація системи управління. Виникнення відповідної обчислювальної техніки допомагає замінити ДПС СДПМ в приводі. Значний поштовх дало поширення перетворювачів як транзистор з ізолюваним затвором (IGBT) і використання принципів ШІМ [3, 4, 5].

Класифікація методів управління СД. Напрямок розвитку принципу керування СД визначається в основному розвитком системи керування приводом: параметри двигуна, тип перетворювача, наявність датчиків кута повороту та швидкості.

Наявність чи відсутність датчиків магнітного стану та координат механічного руху є важливим для побудови системи управління СД. На валу двигуна в класичному приводі, в основі якого лежить СД, встановлено ДПР. Датчик Холла, резольвер та енкодер можна застосовувати як датчик. В

результаті отримуємо досить просту схему, але надійність системи погіршується через те, що будова двигуна складна.

Досягнуті результати (зокрема, від удосконалення спостерігачів за станом) в галузі ТАУ, що розвивається, призвели до того, що в наш час з'явилися бездатчикові приводи. Через те, що немає датчика положення ротора, вся інформація необхідна для виконання алгоритму надходить від спостерігача стану. У системах, де не можна встановити ДПР, бездатчикові системи відіграють велику роль. Компактність, невисока вартість та надійність – ключові переваги таких систем.

У вітчизняній зарубіжній літературі описаний ряд версій керування системою без датчиків, які, у свою чергу, ґрунтуються на математичних моделях двигунів перемінного струму. У цих системах розрахунок швидкості обертання дорівнює швидкості в модулі і можна порівняти з кутовим положенням вектора ЕРС ротора. Ці системи відрізняються одна від одної точністю та чутливістю при зміні вхідних параметрів у математичній моделі. Недоліком таких способів є неможливість електроприводу на низьких частотах, тому що ЕРС ротора в даному випадку близький до нульової позначки і не може подати потрібний сигнал.

У такому разі погіршується енергоефективність електроприводу і збільшується споживана потужність силовими елементами через те, що виникають додаткові втрати в перетворювачі та двигуні. Для оцінювання пасивної системи є два варіанти – адаптивний і неадаптивний. Для розширення та функціональності адаптивні системи використовують нестандартні та стандартні моделі. Для електромагнітних процесів неадаптивні системи використовують моделі ротора та статора. Адаптивні системи використовують стандартні та нестандартні моделі для розширення та функціональності. Для цього використовується метод Ляпунова.

Методи побудови систем управління для СД також різноманітні.

Різні методи управління показані рис. 1.1.

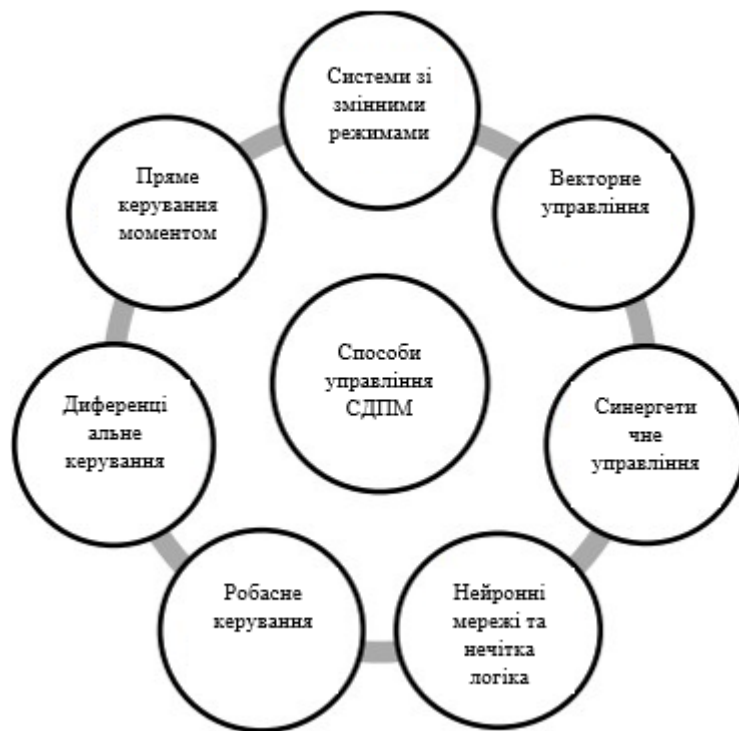


Рис. 1.1- Варіанти виконання систем управління СД

Розберемо кожен із варіантів управління СД докладніше. Метод прямого контролю моменту, що крутить, спочатку був запропонований до використання в асинхронному двигуні, але в наш час він знайшов застосування і в інших машинах змінного струму. Принцип роботи даного методу ґрунтується на виборі вектора напруги відповідно до притаманної таблиці значень. Однак поле статора та момент контролюються одночасно.

Такі системи мають ряд переваг: стійкість досягається при зміні параметрів, алгоритм управління спрощується через відсутність струмового контуру управління та забезпечується висока продуктивність системи. Але метод прямого управління моментом має значний недолік: при невеликих навантаженнях виникають коливання обертання ротора та моменту.

Метод диференціального управління зменшує коливання моменту. Цей метод отримано в результаті розгляду протилежних знаків похідних моменту та модуля вектора магнітного потоку статора. Недоліком цього способу є зниження продуктивності при роботі з максимальною напругою.

С.Є. Ривкін написав у своїй статті про ковзний (змінний) режим. Для цих систем характерна наявність змінної структури. Вся суть полягає в тому, що при проходженні поверхні, що ковзає, знак рушійного сигналу змінюється на протилежний. Все описується рівнянням, що ґрунтується на змінному стані об'єкта. До недоліків таких систем можна віднести кілька випадків: -Можливість нестабільності в момент перетину поверхні перемикавання; високочастотне перемикавання, яке може призвести до швидкого зношування механічних та електричних частин електроприводу.

При побудові систем управління найперспективнішими та найсучаснішими інструментами є Neuron Networks та Fuzzy Logic. Основним недоліком таких систем є у великих обчислювальних потужностях.

Нещодавно було розроблено методи синтезу стійких систем управління. Зміни навантаження, опору в статорі, моменту інерції частин, що крутяться, напруги мережі впливають як на механічні характеристики, так і на перехідні процеси. Надійні системи не адаптовані, але здатні дати необхідну роботу за зміни характеристик ефектів і нестабільної роботи двигуна. Необхідність скорочення необхідного обсягу інформації, прагнення універсальної системи управління двигуна і зниження коштів у налаштування – це веде до інтересу надійного управління. Зараз, незважаючи на великі досягнення, варіанти Н-оптимізації не набули широкого практичного застосування.

Розробляються системи управління СДПМ, що ґрунтуються на синергетичному підході. З теорії синергетичного управління відомо, що набір критеріїв управління системи записується у вигляді інваріантів. СД має кілька каналів керування; отже, йому може бути зазначено трохи більше двох інваріантів. Як стабілізацію швидкості обертання двигуна використовується стабілізація швидкості обертання валу двигуна, а електромагнітний інваріант вибирається таким чином, щоб зменшити до нуля поздовжню складову струму статора I_d . Адекватний синергетичний контроль синтезується з використанням методу аналітичного конструювання агрегованих

регуляторів. Перевага цього методу – висока точність, недолік – складність розрахунків, значний час обробки.

Принцип векторного управління двигуном ґрунтується на положенні вектора зв'язку потоку, що створюється постійними магнітами. Саме через цей факт у деяких джерелах такий принцип називається «орієнтованим на полі». Основна мета даного методу - управління машиною постійного струму, в якій співвідношення моменту, що крутить, і потоку перевіряється в статичному і динамічному режимах. Знаючи положення ротора і застосовуючи математичні рівняння, система координат, що обертається (d, q) (джерело – миттєві значення струму статора) пов'язана з ротором. Якщо поточні значення ідентифікатора підтримувати рівним нулю, уздовж осі d потік буде постійним. В даному випадку момент є пропорційним значенню струму i_q , що задається в системі керування.

Найбільш поширеними методами управління SDPM є пряме управління моментом, що крутить, і векторне управління. Система з прямим контролем моменту краще виконує керуючі та заважають впливу. Крім того, векторне управління поступається прямому управлінню моментом, що крутить, через низький опір змін параметрів і вимагає використання більш складної ШІМ-системи.

Перевагами векторного управління статичних режимах є менша пульсація і менші обчислювальні ресурси. У електроприводах зі стабільним керуванням та незначними порушеннями навантаження краще використовувати саме такі системи. Враховуючи те, що в даній статті розглядається енергоефективний електропривод, векторне управління вибирається як метод управління СД, який дає менше втрат у двигуні при низьких значеннях гармонік струму.

1.2. Опис математичної моделі СД

Синхронні двигуни з постійними магнітами відрізняються тим, що на роторі є постійні магніти, які створюють захоплюючий магнітний потік. Статор цих машин схожий на АД-статор і має дво-або трифазну обмотку. При складанні математичної моделі SDPM ми приймемо такі припущення [1]:

- 1) відсутнє насичення магнітопроводу, втрати сталі, вплив зміщення струму;
- 2) симетричні обмотки статора;
- 3) індуктивність не змінється при зміні положення ротора.

Розберемо рівняння рівноважної напруги статора СД з використанням моделі двигуна, показаної на рис.1.2.

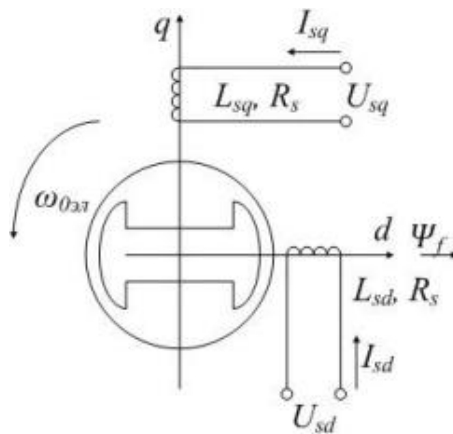


Рис. 1.2 - Модель СД

Розглянемо рівняння СД у системі координат (d, q) , вісь d орієнтована вздовж магнітної осі ротора. Швидкість системи у просторі дорівнює синхронній швидкості

$$pn\omega = \omega_{0\text{эл}},$$

де p_n – число пар полюсів,

ω – швидкість обертання валу двигуна.

Трифазна обмотка статора замінюється двома обмотками, осі яких спрямовані вздовж координатних осей (d, q) . Обмотки нерухомі щодо системи координат, що обертається (d, q) і характеризуються активним опором R_s та індуктивностями L_{sd} та L_{sq} . На обмотки подається напруга U_{sd} і U_{sq} , у результаті через них протікають струми I_{sd} і I_{sq} . Враховуючи напрямки осей координат, зв'язок потоку статора вздовж осі d Ψ_{sd} визначається струмом I_{sd} і магнітним потоком, що генерується постійними магнітами, а вздовж осі q Ψ_{sq} – тільки струмом I_{sq} . Зв'язок потоку Ψ_f може бути представлений просторовим вектором, який є стаціонарним щодо ротора і обертається разом з ним, а отже, і системою координат (d, q) .

Таким чином, рівняння для узагальненого вектора напруги статора і вектора магнітного потоку на вісь системи координат, що обертається, у формі оператора має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + p \psi_{sd} - \omega_{0\text{эл}} \psi_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + p \psi_{sq} + \omega_{0\text{эл}} \psi_{sd}; \\ \psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\ \psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq}, \end{aligned} \tag{1.1}$$

де R_s - опір фази обмотки статора;

L_{sd}, L_{sq} - індуктивності обмоток статора по осях d і q ;

$I_{sd}, I_{sq}, U_{sd}, U_{sq}$ - струми і напруги статора по осях d і q ;

$\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_f$ - потокозчеплення осей d, q , які створюються.

Рівняння моменту:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}); \\ p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega), \end{aligned} \quad (1.2)$$

де J – момент інерції, створюваний у роторі;

M, M_c – моменти електромагніту та опору;

β – коефіцієнт демпфування.

Підставивши рівняння для потокозчеплень в рівняння вектора напруги, запишемо рівняння (1.1) і (1.2) щодо струмів I_d і I_q :

$$\begin{aligned} pI_{sd} &= \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_{0\text{эл}} L_{sq} I_{sq}); \\ pI_{sq} &= \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_{0\text{эл}} L_{sd} I_{sd} - \omega_{0\text{эл}} \Psi_f); \\ M &= \frac{3}{2} P_n (\Psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}); \\ p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega). \end{aligned} \quad (1.3)$$

З математичної моделі СД, вираженої системою рівнянь (1.3) будемо структурну схему, показану рис. 1.3.

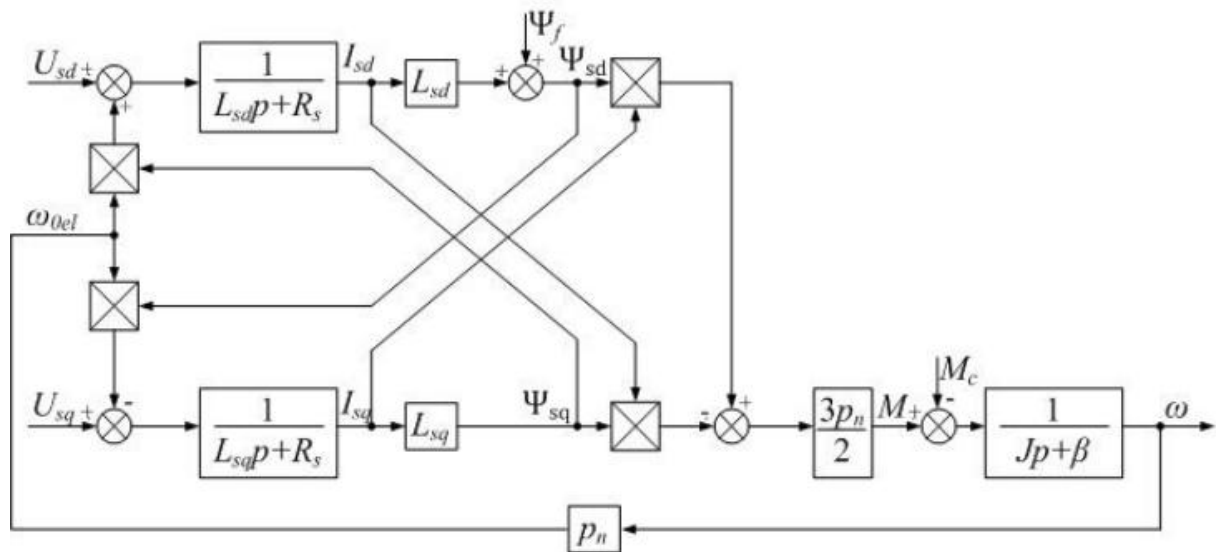


Рис.1.3 - Структурна схема СД

Відомо, що при збільшенні або зменшенні навантаження СД швидкість залишається незмінною. У цьому випадку кутове положення просторового вектора зв'язку потоку ротора щодо вектора зв'язку потоку статора змінюється. В ідеальному режимі холостого ходу ці вектори збігаються в просторі, але коли навантаження прикладається до валу двигуна, вектор магнітного потоку ротора відстає від вектора магнітного потоку статора на певний кут навантаження θ . Цей кут вимірюється в радіанах і обчислюється через інтеграл різниці між миттєвими значеннями швидкостей поля статора і ротора в електричному просторі, які існували в перехідному процесі, пов'язаного зі зміною навантаження. Рівняння виглядає так:

$$\theta = \frac{\omega_{0эл} - \omega p_n}{p}. \quad (1.4)$$

По-перше, крутний момент двигуна збільшується зі збільшенням кута навантаження. У той момент, коли кут сягає 90° , момент сягає свого максимуму. Зі збільшенням кута навантаження, тобто двигуна перевантажується, відповідний момент зменшується і двигун входить у зону нестабільної роботи, що призводить до зупинки двигуна. Це виражено в кутовій характеристиці, яка показана на рис. 1.4.

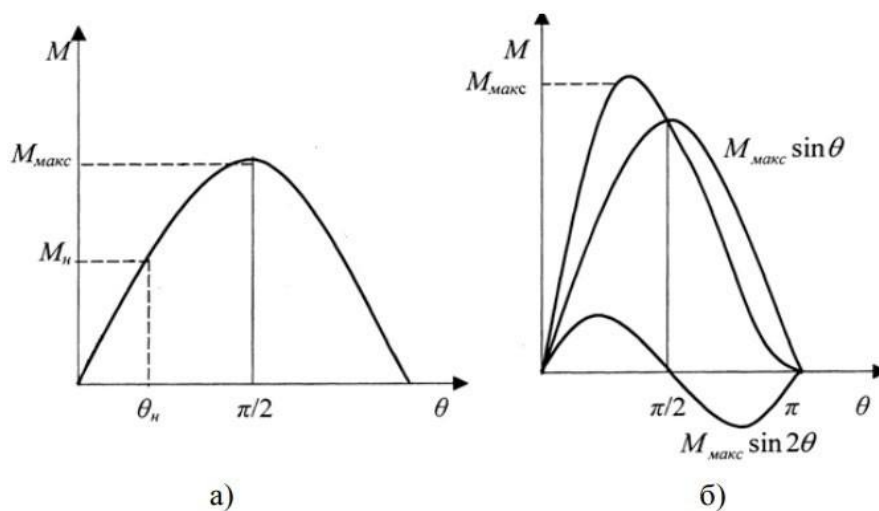


Рис.1.4- Кутова характеристика СД:

а) неявнополюсний СДПМ; б) явнополюсного двигуна,
де: $M_{\max}$ – максимальний момент, M_n та θ_n – номінальний момент та кут навантаження.

Для неявно полюсного двигуна кутовий відгук виражається у вигляді синусоїдальної залежності. Якщо двигун явно полюсний, то момент викликаний полем ротора, призводить до появи реактивного моменту, який пропорційний $\sin 2\theta$ та спотворює форму кривої.

Висновки по першому розділу

У першому розділі магістерської роботи було проаналізовано наступне:

1. Синхронний двигун – це перспективний двигун, який використовується в системах промислової автоматизації, роботах та маніпуляторах, приводах подачі та основних рухах металорізальних верстатів, координатних пристроях, точних системах стеження та наведення, у тягових електроприводах, кермовому управлінні літальних апаратів та підводних апаратів, приводах, електромеханічних пристроях автомобілів у побутовій техніці. Синхронний двигун також активно поширюється у галузях, де традиційно використовувалися ДПС чи АД.

2. У зв'язку з поширенням СДПМ також розробляються та вдосконалюються його алгоритми керування. Можна виділити основні напрямки:

- точність розробки програмного завдання;
- відсутність чутливості до невизначених параметрів СД;
- збільшення діапазону управління у напрямку до низьких швидкостей;
- використання бездатчикових алгоритмів, що призводить до підвищення надійності приводу;
- легкість алгоритмів з погляду обчислювального навантаження, оскільки простіші алгоритми забезпечують коротший час обчислення і більш коротку затримку в управлінні, що дозволяє використовувати ще дешевші мікропроцесори;
- мінімізація енергоспоживання.

2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

2.1. Система СДПМ із використанням датчика положення ротора

Комбінування системи управління, в якій встановлюється складова струму статора $I_{sd}=0$, зробимо на основі моделі СД описаної рівнянням (1.3) у системі координат (d,q) .

Функціональна схема системи управління з початковими параметрами струму $I_{sd}=0$ показана на рис.2.1.

де ω , I_{dz} , I_{qz} , U_{dz} , U_{qz} – завдання швидкості, струмів та напруг, I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} – струми фаз статора, U_{kd} , U_{kq} – компенсаційні складові, g – ШИМ сигнал.

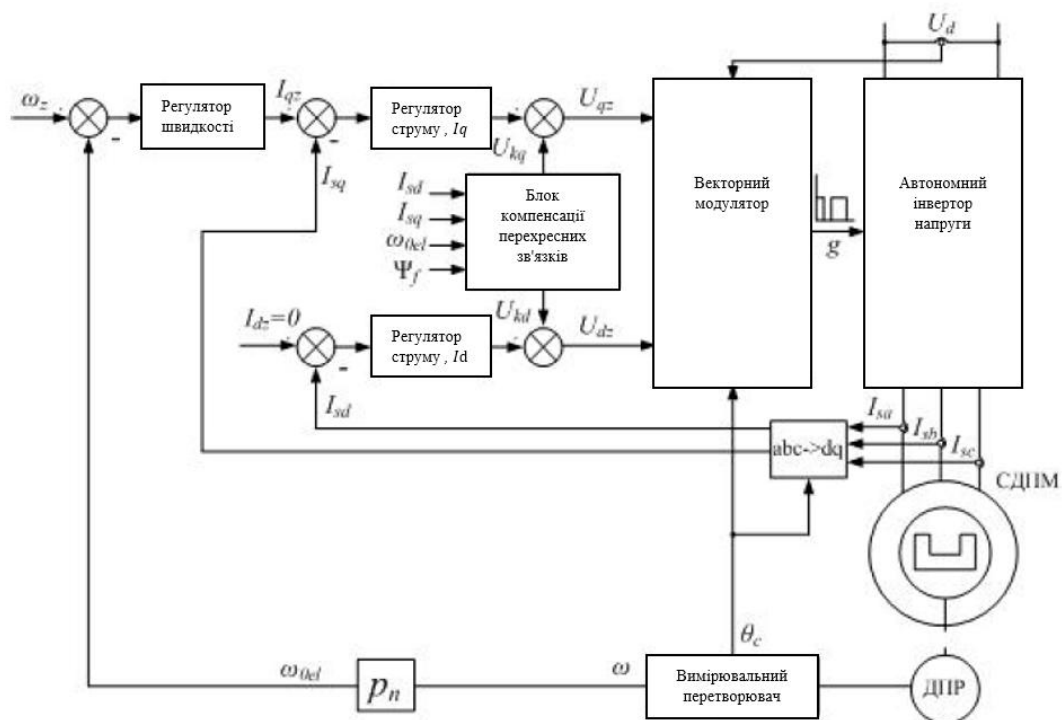


Рис. 2.1 – Функціональна схема системи управління

Нульове значення струму осі d робить напрямок струму статора перпендикулярним щодо магнітної осі ротора.

Розберемо кожен із основних елементів системи управління СД із ДПР.

Датчик положення ротора. Він визначає кут повороту у діапазоні від 0° до 360° . Як простий вимір кута використовують резольвер або енкодер. Ці показання надсилаються в перетворювач, який показує миттєве значення кута повороту цифрового формату. Разом з кутом вимірюється миттєве значення частоти обертання двигуна і відразу порівнюється із заданим значенням швидкості. Виходячи з цих показань, помилка у значеннях відправляється в регулятор швидкості.

Перетворювач координат. Перетворювач змінює фазні струми трифазної системи (a, b, c) , і перетворює їх на двофазну систему (d, q)

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_c) & \sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_c) & \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де θ_c - Кутове положення ротора.

Вектор модулятор. Він конвертує напруги статора в імпульси керування ключами інвертора напруги на основі ШІМ. Модулятор робить операції:

- визначає модуль та фазу в заданому векторі напруги;
- вибирає сектор, де знаходиться вектор напруги;
- визначає кут повороту вектора напруги щодо сектора, в якому він знаходиться;
- розрахунок часу включення базових векторів напруги;
- розподіляє сигнали керування ключами інвертора.

Автономний інвертор напруги. Інвертор входить до складу дволанкового перетворювача частоти, схема показана рис. 2.2, де НВ – некерований випрямляч, С – ємність конденсатора, R_T та K_T – опір мережі та ключ.

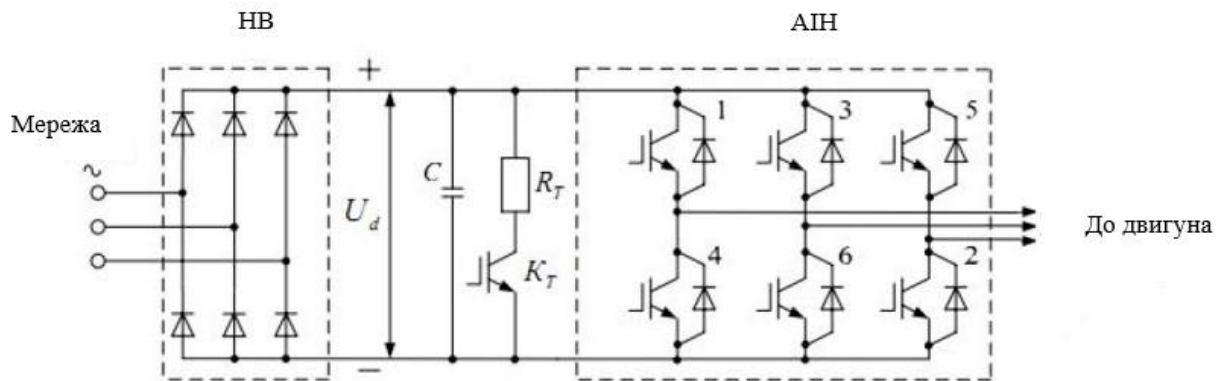


Рис. 2.2 – Дволанковий перетворювач частоти

Інвертор виконаний на IGBT-транзисторах із зворотними діодами. За допомогою ШІМ сигналу, інвертор перетворює вхідну напругу U_d на трифазну напругу, яка подається на двигун.

Компенсація перехресних зв'язків. Підставляючи третє та четверте рівняння системи (1.1), запишемо рівняння векторів напруги:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + p L_{sd} I_{sd} - \omega_{0\text{эл}} L_{sq} I_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + p L_{sq} I_{sq} + \omega_{0\text{эл}} L_{sd} I_{sd} + \omega_{0\text{эл}} \psi f. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Система рівнянь (2.2) показує, що між цими двома каналами регулювання є перехресні зв'язки. Для того, щоб не було поганого впливу каналів один на одного, необхідно компенсувати перехресні зв'язки. Це можна компенсувати такими рівняннями:

$$\begin{aligned} U_{kd} &= -\frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}; \\ U_{kq} &= \frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де $k_{пч}$ – коефіцієнт передачі частоти.

При обчисленні компенсаційних значень рівнянь (2.3) беруться значення струмів, взяті із системи (d, q). Для компенсації ці значення підсумовуються із сигналом завдання вектора напруги U_{dz} та U_{qz} , які є вихідними значеннями регуляторів струму.

Регулятори струмів та швидкості. Розрахунок регуляторів зробимо виходячи з регулювання компенсації нелінійних зв'язків.

Системи регулювання мають свої добрі якості:

1. Легкість розрахунку та налаштування системи. Кожен контур системи містить регулятор, що надає контуру динаміку, також компенсується найвища постійна часу.
2. Обмеження максимальних значень координат системи, які досягаються за рахунок обмеження вихідного сигналу зовнішнього контуру.

Для того щоб зробити синтез регулятора струму по осі d використовуємо структурну схему контуру, яка показана на рис. 2.3. На схемі позначено:

$\frac{k_d}{T_d p + 1}$ - передавальна функція по осі d ,

де $k_d = \frac{1}{R_s}$, $T_d = \frac{L_{sd}}{R_s}$, R_s – опір фази;

L_s – індуктивність обмоток;

$U_{kd} = -\frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} L_{sq} I_{sq}$ – сигнал компенсації перехресного зв'язку,

$\frac{k_{пч}}{T_{пч}p+1}$ - передатна функція ПЧ, який записаний як аперіодична ланка, $k_{дт}$ – датчик струму, $W_{рт}$ – передатна функція регулятора струму.

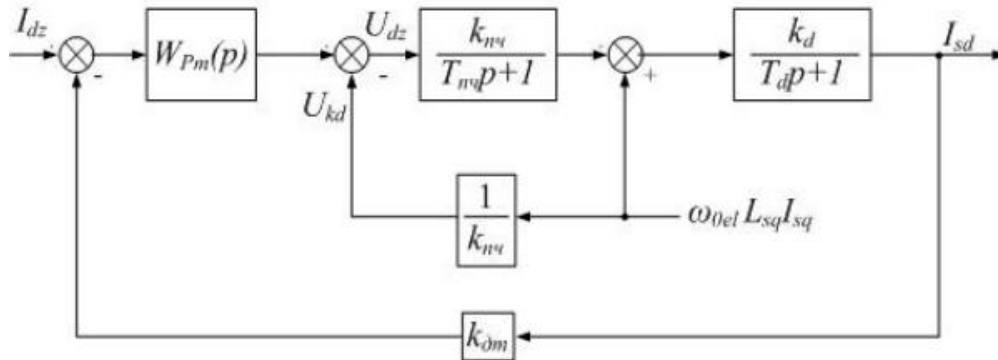


Рис. 2.3 - Структурна схема регулятор струму по осі d

Виходячи з того, що перехресні зв'язки скомпенсовані, можемо провести налаштування оптимуму малої некомпенсованої постійної часу $T_{км}$, що дорівнює $T_{нч}$. У результаті вийде передатна функція розімкнутої системи:

$$W(p) = W_{pm}(p) \frac{k_{нч} k_{дм} k_d}{(T_{нч}p + 1) + (T_d p + 1)} = \frac{1}{2T_{км}p(T_{км}p + 1)};$$

$$W_{pm}(p) = \frac{T_d p + 1}{2k_{нч} k_{дм} k_d T_{км} p} = \frac{L_{sd}}{2k_{нч} k_{дм} T_{км}} + \frac{R_s}{2k_{нч} k_{дм} T_{км}} \frac{1}{p}.$$
(2.4)

У результаті коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових визначаються рівняннями:

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{нч} k_{дм} T_{км}};$$

$$k_{id} = \frac{R_s}{2k_{нч} k_{дм} T_{км}}.$$
(2.5)

Передатна функція замкнутого контуру струму:

$$W(p) = \frac{1/k_{\partial m}}{2T_{\kappa m}^2 p^2 + 2T_{\kappa m} p + 1}. \quad (2.6)$$

Регулятор струму по осі q виконується аналогічно, але з урахуванням наступних умов:

1. $\frac{k_q}{T_q p + 1}$ - передатна функція статорного ланцюга по осі q , де $k_q = \frac{1}{R_s}$, s
 $T_q = \frac{L_{sq}}{R_s}$, R_s — опори фази; L_{sq} - індуктивність обмоток.

2. Обурливий сигнал компенсації має вигляд $U_{kq} = \frac{1}{k_{пч}} \omega_{0эл} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f)$.

Рівняння регулятора струму по осі q буде схожі на формули регулятора по s и d (2.5):

$$\begin{aligned} k_{pq} &= \frac{L_{sq}}{2k_{пч} k_{\partial m} T_{\kappa m}}; \\ k_{iq} &= \frac{R_s}{2k_{пч} k_{\partial m} T_{\kappa m}}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Регулятор швидкості зробимо, спираючись на структурну схему, представлену рис. 2.4.

Реактивну складову моменту в рівнянні (1.3) можна знехтувати в кількох випадках:

1) для неявно полюсних двигунів ($L_{sd} = L_{sq}$);

2) коли $I_{sd} = 0$.

У результаті виходить, $M = \frac{3}{2} P_n \psi_f I_{sq}$, где $\psi_f = const$

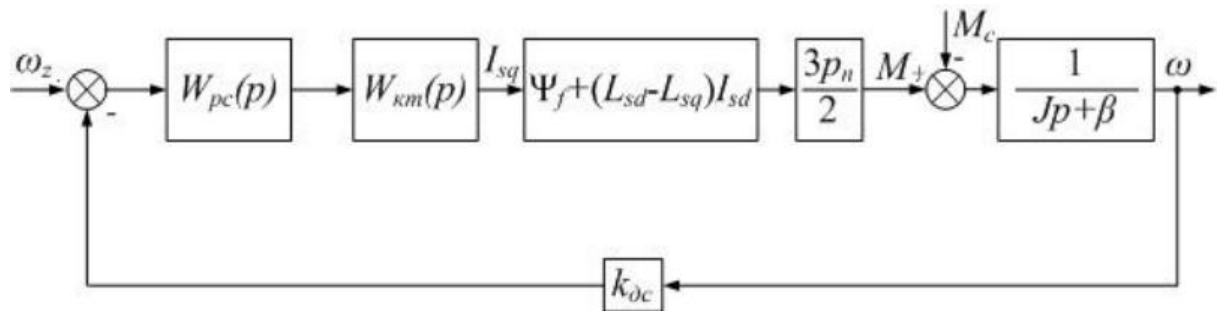


Рис. 2.4 - Структурна схема швидкості

Коли $\beta = 0$ налаштування виконується за симетричним оптимумом. Можна записати передатну функцію розімкненої системи:

$$W(p) = W_{pc}(p) W_{pm}(p) \psi_f \frac{3}{2} p_n \frac{1}{Jp} k_{\delta c} = \frac{4T_{kc}}{8T_{pc}^2 p^2 (T_{pc}p + 1)} \quad (2.8)$$

В результаті отримаємо ПІ-регулятор швидкості з коефіцієнтами:

$$k_{p\omega} = \frac{k_{\partial m} J}{3T_{kc} \psi_f p_n k_{\delta c}};$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{\partial m} J}{12T_{kc}^2 \psi_f p_n k_{\delta c}}. \quad (2.9)$$

$$\text{де } T_{\text{КС}} = 2T_{\text{КТ}}.$$

2.2. Система СДПМ із використанням функціональних перетворювачів

Як описувалося раніше, щоб отримати певний момент СД при маленькому струмі не є оптимальним варіантом. Управління здійснюється забезпеченням певного співвідношення між складовими значеннями статорового струму, яке задається за допомогою функціональних перетворювачів (ФП). Схема системи управління СД з ФП наведено рис. 2.5.

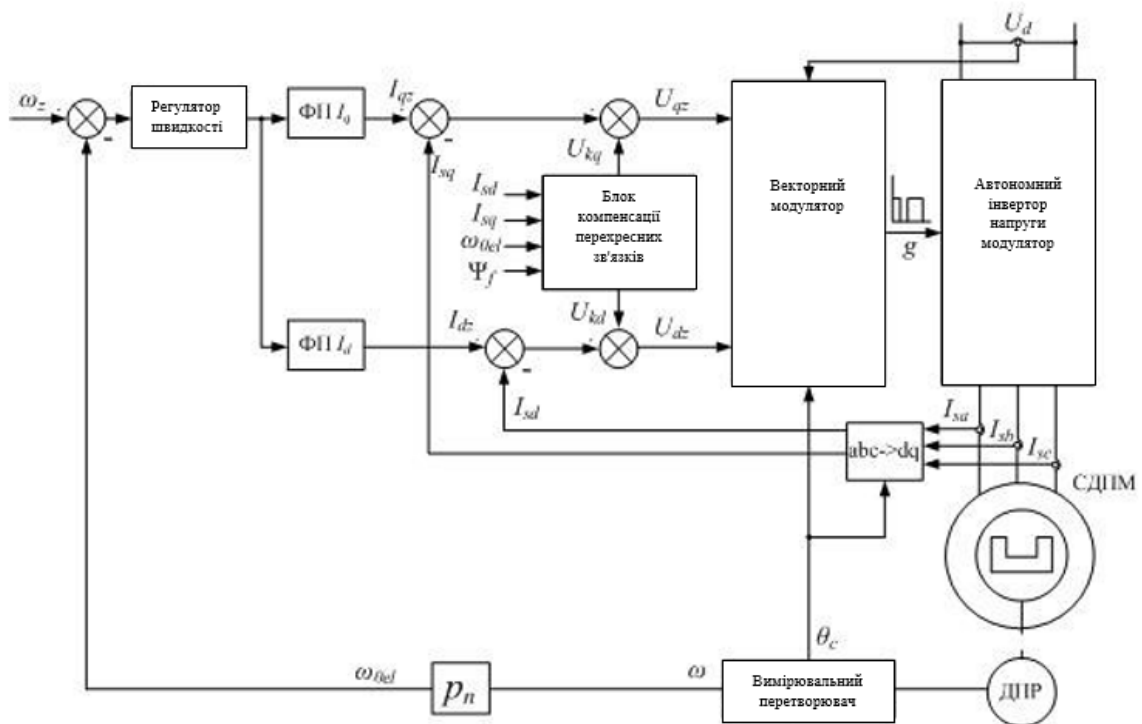


Рис. 2.5 - Функціональна схема системи керування СД з ФП

Так як в СД момент визначається значенням струму статора, I_{sd} і I_{sq} підключені до виходу регулятора швидкості. ФП є залежності сигналів завдання складових струму статора від моменту, виражені у відносних

одиницях. Характеристики будуються на основі розрахунку, що пояснюється формулами та рис. 2.6.

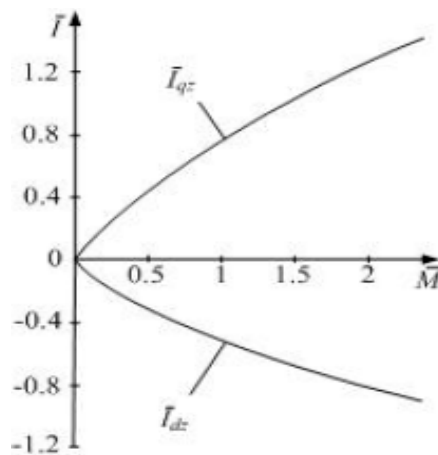


Рис. 2.6 – Графік функціональних перетворювачів

2.3. Система СДПМ із використанням бездатчикового управління

При проектуванні систем управління дедалі частіше ставиться умова видалення ДПР підвищення надійності, зменшення витрат і простоти обслуговування електропривода. У деяких системах використання ДПР визначення кута положення ротора і миттєвої швидкості просто неприпустимо.

У цьому випадку використовуються бездатчикові системи керування, в яких ставиться завдання непрямого визначення кута положення ротора та швидкості двигуна. Це можна вирішити з допомогою спостерігача стану.

Функціональна схема системи бездатчикового управління СД представлена на рис. 2.7. На схемі показані $\hat{\omega}$, $\hat{\omega}_{0el}$, $\hat{\theta}_c$ оцінки швидкості обертання ротора, синхронної швидкості та кута положення ротора.

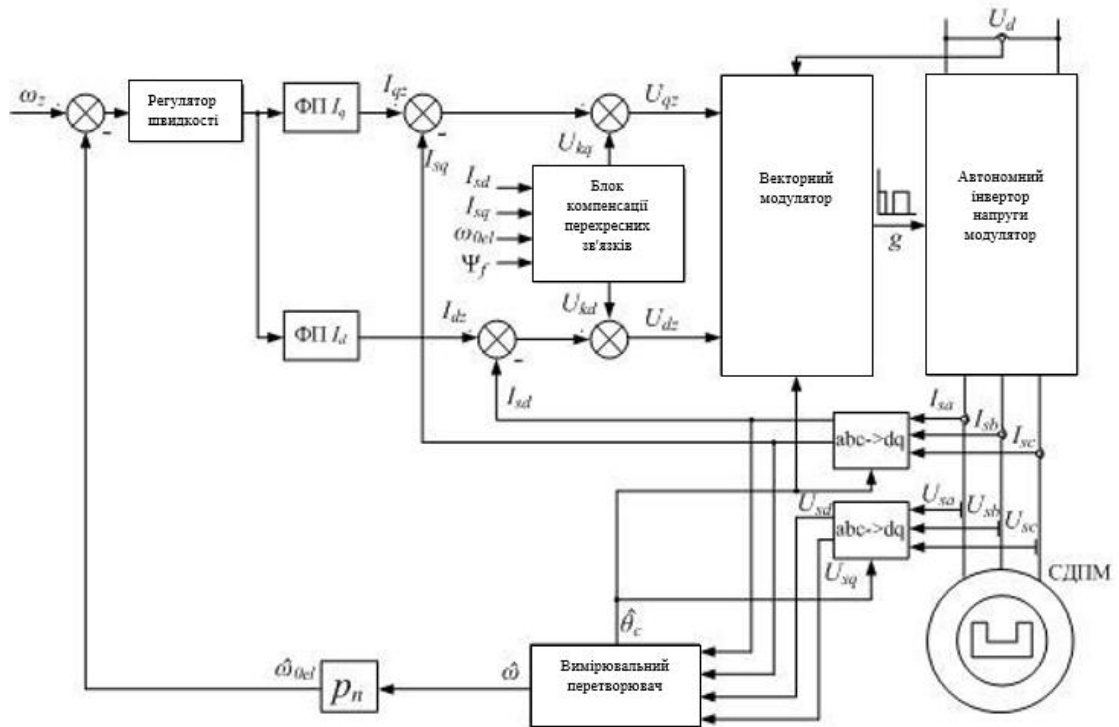


Рис. 2.7 – Функціональна схема системи бездатчикового управління СД

Ця система є поліпшенням системи управління з ФП (див. Рис.2.6). Крім спостерігача стану, вводяться датчики напруги і перетворювач координат, який виконується на підставі рівнянь (2.1). Перетворені в систему координат напруги U_{sd} і U_{sq} і струми I_{sd} і I_{sq} . На підставі цих даних спостерігач оцінює значення швидкості та кута положення.

2.3.1. Опис спостерігача стану

Наразі існує велика кількість алгоритмів для оцінювання даних двигуна для створення спостерігачів. Варіанти спостерігачів наведено на рис. 2.8.

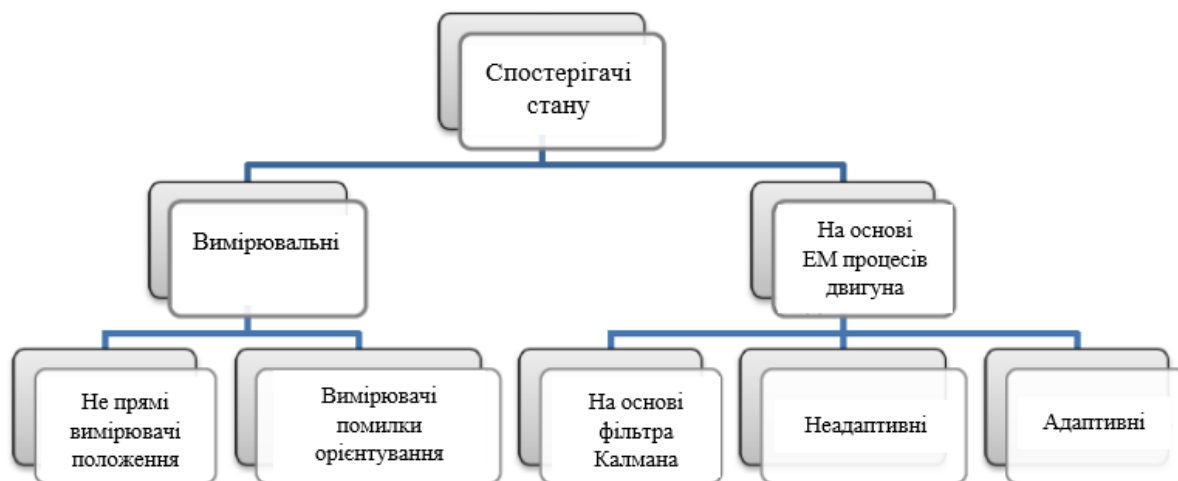


Рис. 2.8 – Спостерігачі стану

Непрямі позиційні вимірювачі для вимірювання положення ротора використовують магнітну неоднорідність властивостей двигуна, наприклад асиметрію обмоток або неоднорідність магнітної проникності. Відомі вимірювальні спостерігачі з використанням методу високочастотної інжекції, що полягає в генеруванні інвертором високочастотних тестових сигналів та пошуку реакції на ці сигнали реального положення ротора. Швидкість обертання ротора в цьому випадку оцінюється шляхом знаходження похідної від кута положення. До недоліків цього методу можна віднести підвищений рівень шуму та додаткових втрат.

Вимірники похибки орієнтації визначають положення системи координат, що обертається, за допомогою сигналів внутрішньої системи управління в залежності від її похибки орієнтації. Швидкість обертання ротора в цьому методі оцінюється за становищем системи координат, що обертається. Недоліками методу є недостатня швидкість та неможливість роботи на низьких швидкостях.

Спостерігачі на основі фільтра Калмана є своєрідним цифровим фільтром, алгоритм роботи якого побудований з урахуванням законів математичної статистики. Вона дозволяє відновити невідомий параметр, мінімізуючи вплив інтерференційних вимірювань відомих величин.

Недоліком таких спостерігачів є складність обчислень та налаштувань спостерігача.

Адаптивні спостерігачі також ґрунтуються на моделях магнітних процесів, що відбуваються в двигуні. Ці спостерігачі побудовані як сервосистеми і містять додатковий регулятор, який адаптує модель до реальних процесів, що відбуваються в двигуні.

Висновки по другому розділу

У другому розділі магістерської роботи було зпроектовано систему керування синхронним електродвигуном. Для проектування застосовувалась система синхронного двигуна з постійним магнітом із використанням датчика положення ротора, функціональних перетворювачів та бездатчикового управління.

Було зроблено наступні висновки:

1. Як критерій про енергоефективність СД приймається мінімізація струму при заданому моменті навантаження.
2. Для управління ключами інвертора застосовується метод векторної ШІМ.
3. Використання бездатчикового управління вимагає інформацію про швидкість обертання та кута положення ротора. Для вирішення цього завдання може застосовуватись спостерігач стану, який оцінює невідомі змінні машини змінного струму за допомогою відомих. Адаптивний спостерігач стану містить адаптер, що регулює, який адаптує модель електромагнітних процесів двигуна до реальних процесів.

3 РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ

3.1. Розрахунок потужності двигуна та його вибір

Вихідні дані до роботи:

Вантажопідйомність, кг.....1600

Маса порожнього навантажувача, кг.....3200

Маса завантаженого навантажувача, кг.....4800

ККД хутро. пров.0,96

Максимальна швидкість ГЕМ, км/год.....15

Потужність, що витрачається на пересування:

$$\begin{aligned}\Sigma P_p &= g \cdot F_{mp} \cdot m \cdot V \cdot \cos \alpha + 0.5 C_x \cdot S \cdot \rho_g \cdot V^3 + g \cdot m \cdot \sin \alpha \cdot V \\ &= 9,8 \cdot 0,018 \cdot 4800 \cdot 4,2 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0,342 \cdot 2 \cdot 1,225 \cdot 4,2^3 + 9,8 \cdot 4800 \cdot 0 = 4881 \text{ Вт.}\end{aligned}$$

Номінальна потужність ТЕД:

$$P_{д.н} = \frac{\Sigma P_p}{\eta} = \frac{4881}{0,96} = 5100 \text{ Вт}$$

Як електродвигун був обраний вентильний електродвигун з номінальною потужністю 7,5 кВт.

Табл. 3.1 – Технічні дані двигуна

$P_{д.н},$ кВт	$M_{д.н},$ Нм	$U,$ В	β	$R,$ Ом	$L_{sd},$ мГн	$L_{sq},$ мГн	$\Psi_f,$ Вб	$J,$ кг · м ²	p_n
7,5	66	200	0	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4

Розрахунок акумуляторної батареї та її вибір. Зробимо розрахунок ємності батареї. Розрахунок буде здійснено за умови, що електронавантажувач їхатиме зі швидкістю 15 км/год.

Розрахуємо скільки потрібно часу, щоб проїхати 150 км:

$$t = \frac{S}{V} = \frac{150}{15} = 10 \text{ ч.}$$

Розрахунок витраченої енергії:

$$W = t \cdot P_{\text{дн}} = 10 \cdot 5100 = 51000 \text{ ВАч.}$$

Розрахунок необхідної ємності:

$$C = \frac{W}{U} = \frac{51000}{200} = 255 \text{ Ач.}$$

Тоді потрібно на батарею 200В - 9 осередків, кожен осередок на 24В.

Вибираємо батарею технології Yale MSW030-F M1801210007D2



Рис. 3.1 - Тягова акумуляторна батарея Yale MSW030-F
M1801210007D2

Табл. 3.2 – Технічні характеристики акумулятора

Напруга, V	24
Ємність, Ah	300
Тип акумулятора	Кислотний
Довжина, мм	762
Ширина, мм	219
Висота, мм	591
Вага, кг	274

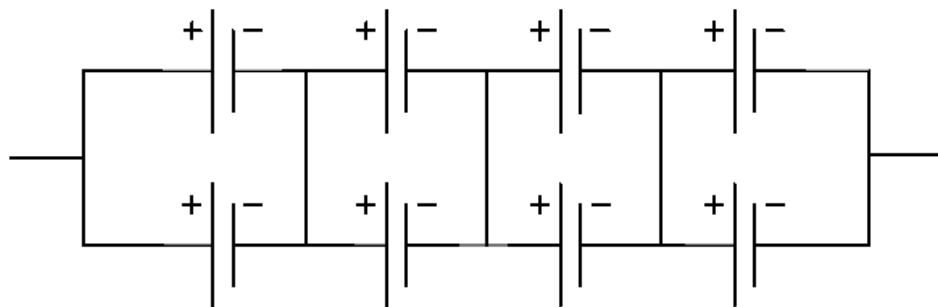


Рис. 3.2- Схема підключення акумуляторної батареї

За цією схемою підключення виходить загальна ємність батареї 600 Ah. Загальна відстань, яка може пройти, становить приблизно 300 км або 20 годин безперервної роботи електронавантажувача.

Висновки по третьому розділу

У третьому розділі магістерської роботи було проведено розрахунок потужності двигуна та зроблено його вибір.

Вибираємо тягову акумуляторну батарею Yale MSW030-F
M1801210007D2

4. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ У ПРОГРАМНОМУ ПРОДУКТІ MATLAB

4.1. Моделювання синхронного двигуна

Моделювання СД системі координат (d, q) проводиться на основі системи 2.1.

Зібрану модель двигуна в математичному пакеті MATLAB/Simulink представлено на рис. 4.1.

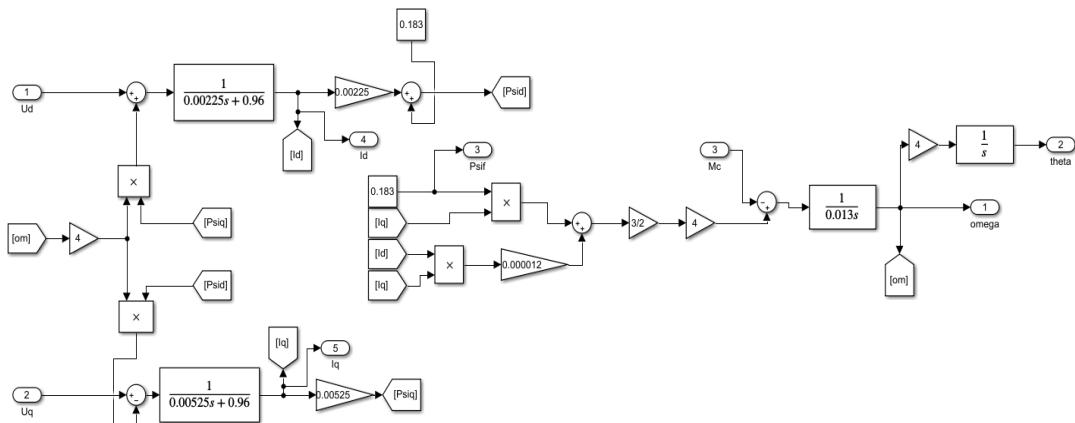


Рис. 4.1 - Модель СД

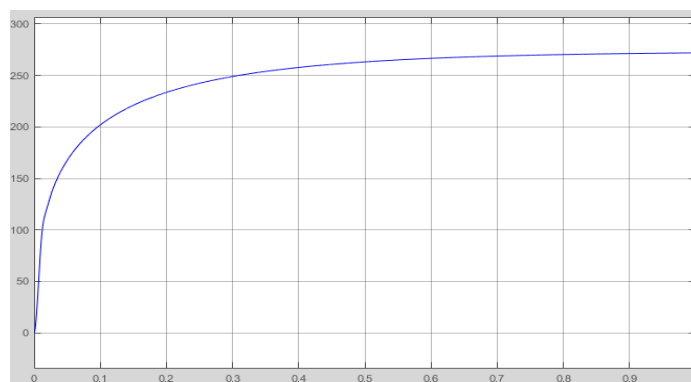


Рис. 4.2 - Графік швидкості СД

4.2. Налаштування регуляторів швидкості та струму

Зробимо налаштування оптимуму по модулю поздовжньої та поперечної складових струму. Потрібно розрахувати коефіцієнти регуляторів струму по формулам (1.9) та (2.1). Перетворювач частоти буде представлений як аперіодична ланка $\frac{k_{пч}}{T_{пч}p+1}$. Коефіцієнт передачі $k_{пч} = 2$. Постійну часу $T_{пч} = T_{кт}$ виберемо рівної періоду модуляції, тобто при частоті ШІМ 2 кГц $T_{пч} = 0.0005$ [25]. Коефіцієнт передачі датчика струму $k_{\partial m} = 1$.

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{пч}k_{\partial m}T_{кт}} = \frac{0.00255}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.78$$

$$k_{pq} = \frac{L_{sq}}{2k_{пч}k_{\partial m}T_{кт}} = \frac{0.00525}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 0.66$$

$$k_{id} = k_{iq} = \frac{R_s}{2k_{пч}k_{\partial m}T_{кт}} = \frac{0.96}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.0005} = 479.97$$

Розрахуємо коефіцієнти регулятора швидкості відповідно до (2.3) за умови $T_{кс} = 2T_{кт} = 0.001$. Коефіцієнт передачі датчика швидкості $k_{\partial c} = 1$. Параметри двигуна взято з табл. 3.1.

$$k_{p\omega} = \frac{k_{\partial m}^J}{3T_{кс}\psi_f p_n k_{\partial c}} = \frac{1 \cdot 0.013}{3 \cdot 0.001 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 0.85$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{\partial m}^J}{12T_{кс}^2\psi_f p_n k_{\partial c}} = \frac{1 \cdot 0.013}{12 \cdot 0.001^2 \cdot 0.0183 \cdot 4 \cdot 1} = 57$$

Складемо модель системи векторного управління СДПМ з використанням датчика положення ротора MATLAB/Simulink. Перехресні зв'язки, складені рівняннями (1.7), представимо як підсистеми Compensation.

4.3. Моделювання системи з датчиком положення ротора

На підставі пункту 2.1 та функціональної схеми (див. рис. 2.2) складемо модель системи управління СД з ДПР.

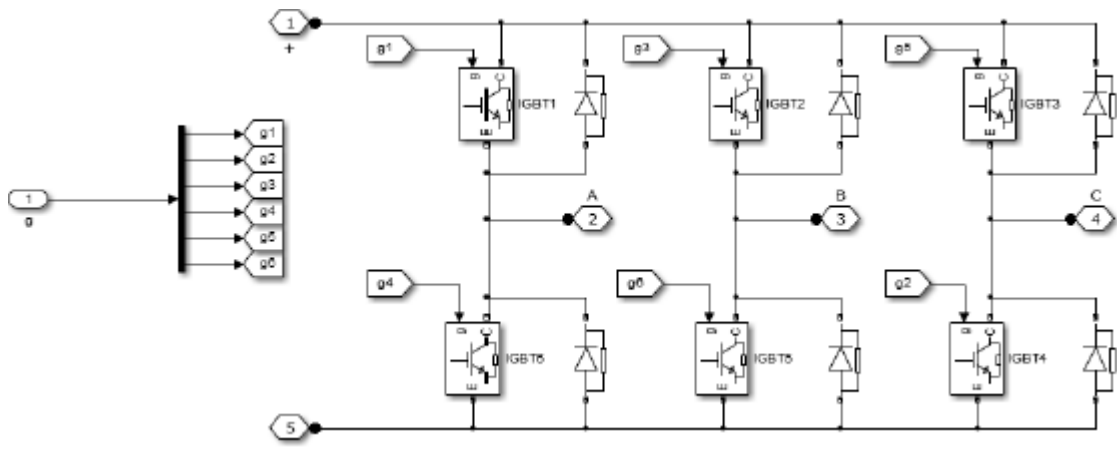


Рис. 4.3 – Модель АІН

У цій системі управління поздовжня складова струму задається нульовим значенням. Сигнали швидкості та кута положення ротора вимірюються ДПР. Векторний модулятор, що реалізує алгоритм на основі векторної ШІМ із частотою, що дорівнює 2 кГц, представлений підсистемою PWM. АІН представлений підсистемою IGBT-Invertor, яка представлена вище на рис.4.3. Обмеження максимальної напруги, яка подається на інвертор, враховано у векторному модуляторі. Отримана ситема надана у Додатку А.

Змоделюємо отриману систему. На момент 60 секунд навантаження прикладається до двигуна. Графік швидкості з модулятором і ДПР представлені рис. 4.4.

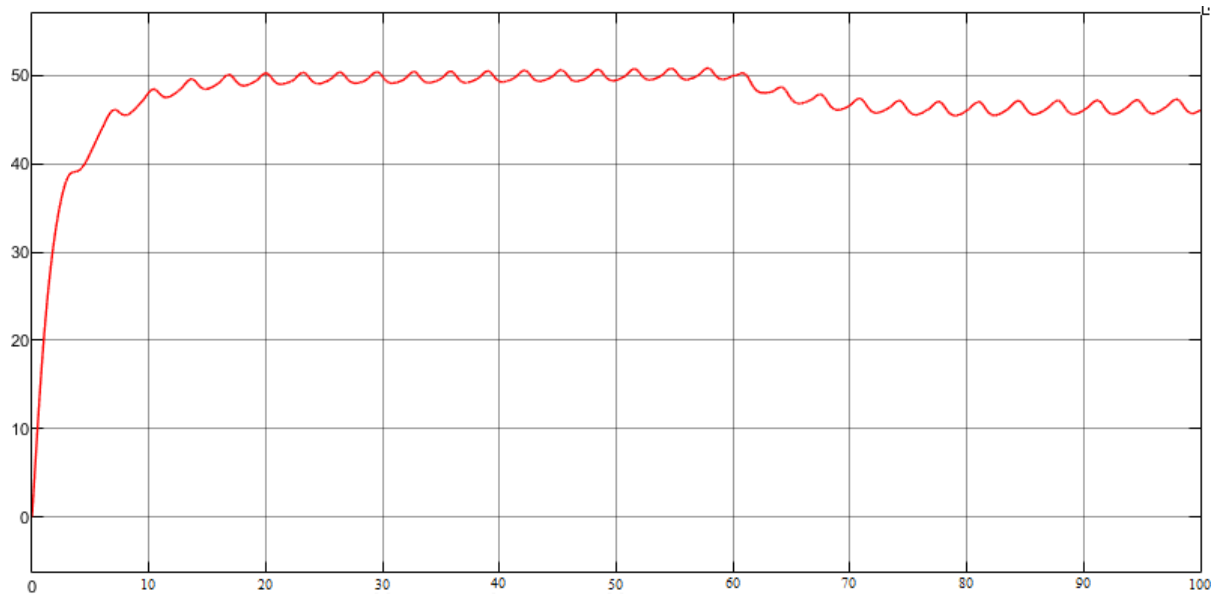


Рис. 4.4 – Графік швидкості СД

На рис. 4.4 показано, що при додаванні модель векторного модулятора і АІН в швидкісних характеристиках з'являється шум. Як було описано раніше, для отримання заданого моменту при мінімальному струмі статора зменшення складової струму статора вздовж осі d до нуля не є оптимальним варіантом. У цьому випадку керування здійснюється шляхом забезпечення певного співвідношення між складовими струму статора, яке встановлюється за допомогою функціональних перетворювачів (ФП).

4.4. Моделювання системи керування з використанням функціональних перетворювачів

На основі пункту 2.2 та функціональної схеми (див. рис. 2.5) складено модель векторної системи керування світлодіодами з ФП у середовищі

MATLAB/Simulink. Для цього ми виключаємо регулятори, що діють, з моделі, розглянутої в пункті 4.3. Завдання складових струмів у цьому випадку виходитиме від ФП, підключеного після регулятора швидкості. Характеристики задаються таблицею з використанням блоку одномірної таблиці 1-D таблиці підстановки. Отримана ситема надана у Додатку Б.

Відрегулюємо регулятор швидкості для отримання прийнятних показників якості системи. Отримані коефіцієнти регулятора: $k_{p\omega} = 1,84$, $k_{i\omega} = 50,2$. Зробимо імітацію системи. Через 60 секунд до двигуна прикладається навантаження. Графік швидкості роботи СДПМ під час встановлення струмів з допомогою ФП показаний на рис.4.5.

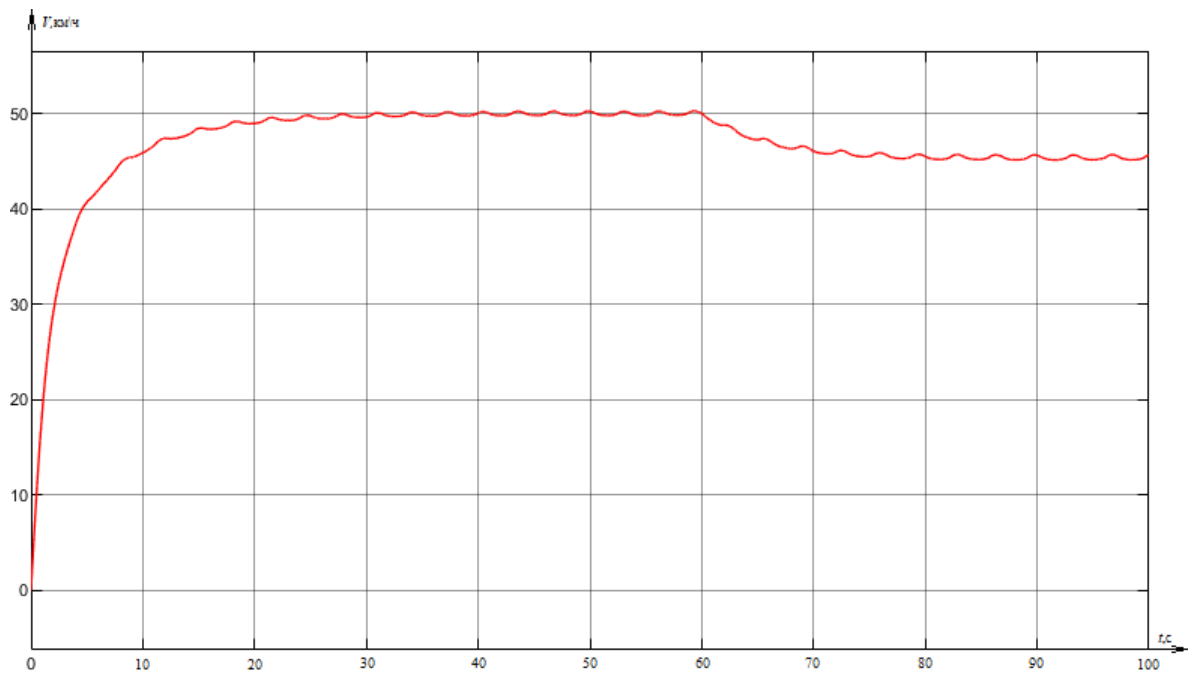


Рис. 4.5 – Графік швидкості СД у системі з ФП

Порівнюючи малюнки 4.4 і 4.5, можна побачити, що у системі з ФП спостерігається менше перевищення швидкості у процесі переходу (6% проти 12%). Крім того, в системі з автофокусуванням після застосування

навантаження спостерігається менше коливання швидкості. З цього випливає, що ФП працює належним чином.

4.5. Моделювання системи керування з використанням бездатчикового керування

Для того, щоб зробити модель безсенсорною системою управління, необхідно отримати модель спостерігача стану. Ми складаємо адаптивний спостерігач відповідно до структури, де модель статора описується системою рівнянь, а також існує функція майстра закону адаптації спостерігача. Контролер адаптера містить інтегральну складову з коефіцієнтом $\lambda = 45$. Модель адаптивного спостерігача швидкості показана на рис. 4.6.

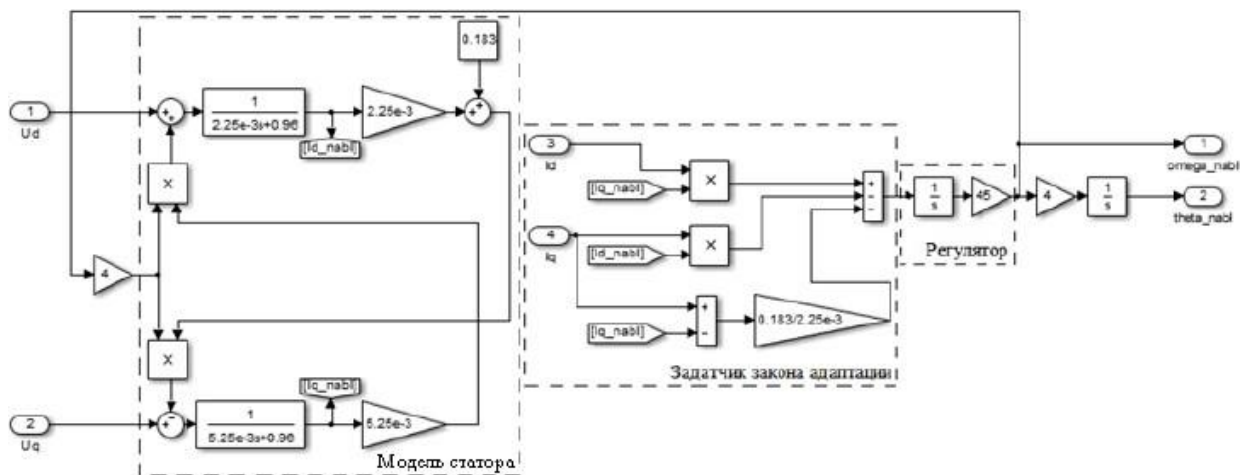


Рис. 4.6 - Модель адаптивного спостерігача швидкості

Ми складаємо модель безсенсорної системи керування відповідно до функціональної схеми (див. рис.2.7). Для цього ми додамо блок спостерігача швидкості спостерігача до моделі векторної системи управління з ФП, який оцінює швидкість і кутове положення ротора. Отримані оцінки

використовуються як сигнали зворотного зв'язку і в перетворювачах координат. Отримана система представлена у додатку В.

Змоделюємо отриману систему. Протягом 60 секунд застосовується навантаження. Графік швидкості ЦД у системі зі спостерігачем показаний на рис. 4.7.

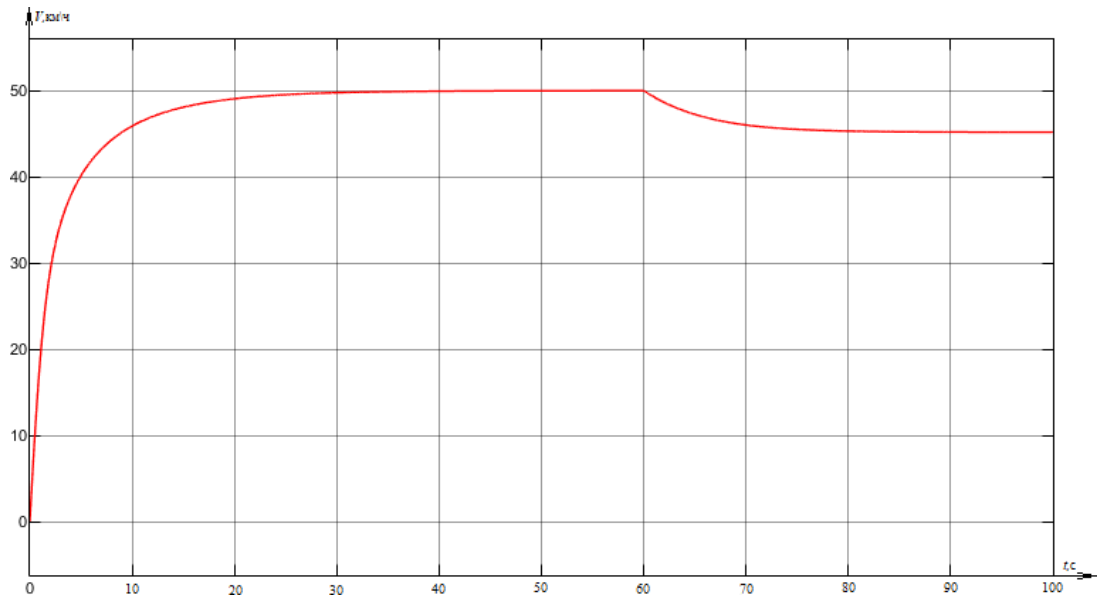


Рис. 4.7 – Графік швидкості СДПМ з системою бездавачів управління

Результати моделювання представлені на рис. 4.7, показують, що адаптивний спостерігач, що використовується в аналізованій безсенсорній системі управління, має стійкість при відносно невеликих змінах опору статора СД. Також із графіків видно, що якість перехідних процесів при зміні опору статора двигуна покращується, відсутні коливання, що можна пояснити адаптивністю регулятора швидкості.

Проведемо порівняльний аналіз динамічних та енергетичних характеристик розроблених систем управління СДПМ. Порівняємо графіки перехідних процесів швидкості СДПМ з векторною системою управління з нульовим завданням поздовжньої складової струму статора та ДПР (Система 1), з векторною системою управління з ФП (система 2) та з безсенсорною

системою управління (Система 3). У табл. 4.1 наведені наступні показники якості: перевищення при відпрацюванні сигналу швидкості $\vartheta_{\text{км\ч}}$, відсоткове співвідношення сигналу швидкості $\vartheta, \%$, контрольний час при відпрацюванні сигналу обурення t_{pf} .

Табл. 4.1 – Порівняння динамічних показників якості систем

	$\vartheta_{\text{км\ч}}$	$\vartheta, \%$	$t_{pf}, \text{с}$
Система управління 1	± 6	12	25
Система управління 2	± 3	6	20
Система управління 3	50	0	15

Значення, наведені у табл. 4.1, свідчать, що система 3, тобто. система з бездатчиковим управлінням має кращі динамічні показники в порівнянні з системою 1 (система з ДПР) і системою 2 (функціональний перетворювач).

Отже, підсумовуючи, слід зазначити, що, ґрунтуючись на результатах моделювання систем, і навіть їх порівняльного аналізу, можна сказати, що отримана у цій роботі система бездатчикового управління з ФП для СД забезпечує найменше значення струму статора двигуна серед проаналізованих систем, що має високі динамічні показники. Таким чином, можемо сказати, що поставлена мета роботи досягнута.

Висновки по четвертому розділу

У четвертому розділі магістерської роботи було змодельовано систему управління у програмному продукті MATLAB, а саме:

1. Було проведено та описано моделювання систем векторного управління СДПМ, а також їх складових. Середовищем моделювання було обрано середовище імітаційного моделювання Simulink, яке входить до складу математичного пакету MATLAB. Ця програма включає величезні можливості для вивчення динамічних процесів і зручний графічний інтерфейс. Використовуючи широкий потенціал Simulink, можна виконувати різні види аналізу пристроїв у часовій області, а також імітувати їхню роботу.

2. У процесі розробки методики поетапного формування підсумкової моделі були додані нові елементи, які ускладнили систему, але вони дозволили задати певне співвідношення між складовими струму статора, а також відмовитися від використання ДПР. Система бездатчикового управління з ФП – підсумкова модель.

3. Аналіз перехідних характеристик кожної із систем свідчить, кожен етап моделювання вирішує певні поставлені завдання (рис. 4.4, 4.5 та 4.7). Правильність вибору методики підтверджується покращенням динамічних характеристик системи.

4. У ході роботи було розроблено адаптивний спостерігач стану, що дозволяє кут та швидкість положення ротора СДПМ. Спостерігач правильно здійснює накладені нею функції навіть за незначних змін активного опору статора двигуна, що можна наочно побачити графіку перехідного процесу (рис. 4.7).

ВИСНОВОК

У ході виконання магістерської роботи було поставлено та досягнуто таких завдань, як:

- Побудова математичної моделі СДПМ;
- Розробка моделі векторного модулятора;
- Розробка моделі спостерігача стану;
- Проведення синтезу системи бездатчикового векторного управління СДПМ;
- Дослідження ефективності та результативності отриманих систем векторного управління.

Проводячи порівняння перехідних процесів швидкості, можна сказати, отримана система бездатчикового управління з динамічними характеристиками не поступається системам з ДПР. Отже, підбиваємо підсумок. Отримані під час роботи результати підтверджують ефективність розглянутої методики побудови бездатчикової системи векторного управління СДПМ, отже, вимоги до завдання до магістерської роботи виконані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТОК А