

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Енергоефективний електропривід на основі синхронного двигуна з постійними магнітами**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-42
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Калитюк В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Андрійчук В.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач
кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Федак С.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 02 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Калитюку Вадиму Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Енергоефективний електропривід на основі синхронного двигуна з постійними магнітами

Керівник роботи ... Андрійчук Володимир Андрійович, д.т.н., проф.

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

Затверджені наказом ректора від « 31 » Грудня 2025 року № 4/7-1163

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Вихідними даними до роботи є параметри синхронного двигуна з постійними магнітами, структурні схеми систем керування та математична модель електропривода, реалізована у середовищі MATLAB

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

(підпис)

Калитюк В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Андрійчук В.А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42.
- Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.56; рис.22 ; табл.2 ; джерел 14; додатків –.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Енергоефективний електропривід на основі синхронного двигуна з постійними магнітами».

Мета кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження енергоефективного електропривода на основі синхронного двигуна з постійними магнітами із застосуванням сучасних методів векторного та бездатчикового керування, а також оцінювання його динамічних та енергетичних характеристик шляхом математичного моделювання.

Проведено аналіз синхронних двигунів з постійними магнітами, їх конструктивних особливостей та сфер застосування. Також розглянуто сучасні методи керування СДПМ і визначено перспективність використання енергоефективних бездатчикових систем керування.

Представлено математичну модель синхронного двигуна у системі координат (d,q) та синтезовано системи векторного і бездатчикового керування. Крім того, досліджено принципи роботи регуляторів струму, швидкості та адаптивного спостерігача стану.

Виконано моделювання у середовищі MATLAB і представлено динамічні характеристики. За результатами моделювання встановлено, що бездатчикова система керування забезпечує найкращі показники швидкодії, точності регулювання та енергоефективності електропривода.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами, енергоефективний електропривід, векторне керування, бездатчикове керування, адаптивний спостерігач стану.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Сихронні машини з постійними магнітами	8
1.2 Низькошвидкісний прямий привід	9
1.3 Високошвидкісний прямий привід	10
1.4 Аналіз методів управління синхрним двигуном	11
1.1.1 Класифікація методів управління синхрним двигуном.	12
1.6 Висновки до розділу	15
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	17
2.1 Опис математичної моделі синхронного двигуна	17
2.2 Система СДПМ з використанням датчика положення ротора	20
2.3 Система СДПМ з використанням функціональних перетворювачів	26
2.4 Система СДПМ з використанням бездатчикового управління	28
2.5 Спостерігач стану	29
2.6 Висновки до розділу	31
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	33
3.1 Моделювання системи управління в програмному продукті Matlab	33
3.1.1 Налаштування регуляторів швидкості та струму	35
3.2 Моделювання системи з датчиком положення ротора	36
3.3 Моделювання системи управління з використанням функціональних перетворювачів	39
3.4 Моделювання системи управління з використанням бездатчикового управління	42

3.5 Висновки до розділу	46
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	48
4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	48
4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	55

ВСТУП

Швидкий розвиток промисловості, транспортних систем, робототехніки та автоматизованих виробництв обумовлює зростання вимог до точності, надійності та енергоефективності електроприводів. З огляду на те, що електродвигуни споживають значну частку виробленої електроенергії, підвищення ефективності електромеханічних систем є одним із ключових напрямів сучасної електротехніки. Актуальність цієї проблеми додатково посилюється зростанням вартості енергоресурсів, необхідністю зменшення екологічного навантаження та широким впровадженням енергоощадних технологій.

Одним із перспективних напрямків підвищення енергоефективності електроприводів є використання синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ). Такі двигуни характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії, великою питомою потужністю, компактністю, високою перевантажувальною здатністю та хорошими динамічними характеристиками. На відміну від асинхронних двигунів, СДПМ не мають втрат у роторному колі, що забезпечує менше тепловиділення та більш ефективне використання електричної енергії. Завдяки цьому СДПМ знаходять широке застосування у сучасних електроприводах електромобілів, промислових роботів, верстатів із ЧПК, авіаційної техніки, вітроенергетичних установок та побутової техніки.

Важливою перевагою СДПМ є можливість реалізації високоточних систем векторного керування, які дозволяють незалежно регулювати електромагнітний момент та магнітний потік двигуна. Це забезпечує покращення динамічних характеристик електропривода, зменшення пульсацій моменту та підвищення точності регулювання швидкості. Ефективність таких систем значною мірою визначається способом формування керувальних сигналів, структурою системи керування та алгоритмами оцінювання координат ротора.

Одним із сучасних напрямків розвитку електроприводів є використання бездатчикових систем керування, у яких відсутні механічні датчики положення та швидкості ротора. Використання бездатчикового принципу дозволяє підвищити

надійність системи, зменшити її вартість, спростити конструкцію привода та покращити експлуатаційні характеристики. Для реалізації таких систем широко застосовуються адаптивні спостерігачі стану, які забезпечують оцінювання швидкості обертання та кута положення ротора на основі вимірюваних електричних параметрів двигуна.

Актуальність даної теми обумовлена потребою у розробці енергоефективних систем електропривода на базі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), що характеризуються високою ефективністю, точною системою регулювання та надійною роботою в умовах змінних навантажень. Значну увагу приділяють дослідженню методів векторного та бездатчикового керування, які сприяють підвищенню ефективності використання електроенергії та покращенню динамічних властивостей електропривода.

Мета кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження енергоефективного електропривода на основі синхронного двигуна з постійними магнітами із застосуванням сучасних методів векторного та бездатчикового керування, а також оцінювання його динамічних та енергетичних характеристик шляхом математичного моделювання.

Для реалізації поставленої мети в роботі необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних СДПМ та сфер їх застосування і дослідити існуючі методи керування;
- розробити математичну модель синхронного двигуна з постійними магнітами у системі координат (d,q) та бездатчикову систему керування із застосуванням адаптивного спостерігача стану;
- провести моделювання розроблених систем у середовищі MATLAB;
- провести порівняння результатів моделювання різних структур електропривода та визначити найбільш ефективну систему керування.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Сихронні машини з постійними магнітами

На сьогоднішній день на електродвигуни припадає 65 % світового споживання енергії. Із зростанням екологічних проблем все більшого попиту набувають електричні приводи з вищим ККД. Постійні магніти стають одним із ключових компонентів, що використовуються в широкому спектрі електродвигунів для електромеханічних приводів та тягових систем у сучасній автомобільній промисловості. Через постійно зростаючі вимоги до паливної ефективності, нульових викидів та більшої електрифікації транспортних засобів, компоненти та системи електродвигунів і генераторів знаходять своє застосування у тяговому приводі транспортних засобів, електричному рульовому приводі, приводі трансмісії, вентиляторі охолодження двигуна, електричному гальмуванні, масляних та водяних насосах, та інше.

У сучасних комерційних електромобілях як електроприводи переважно застосовуються асинхронні машини та синхронні машини з постійними магнітами (СМПМ). Останнім часом спостерігається підвищений інтерес до заміни традиційних асинхронних машин синхронними машинами з постійними магнітами, що значною мірою зумовлено зниженням вартості магнітних матеріалів.

СМПМ не містять обмотки ротора, завдяки чому зменшуються втрати в міді та підвищується коефіцієнт корисної дії порівняно з асинхронними машинами. Крім того, у низькошвидкісних застосуваннях використання машин із постійними магнітами дає змогу відмовитися від редуктора, що спрощує конструкцію приводу.

Проблеми динамічного характеру зазвичай не є суттєвими під час роботи електричних машин на швидкостях до 100 000 об/хв. Машини, частота обертання яких перевищує це значення, належать до класу високошвидкісних електричних машин.

Кінцева швидкість, тобто лінійна швидкість поверхні ротора, є кращим способом визначення високошвидкісних електричних машин, оскільки швидкості

поверхні ротора можна використовувати як критичні швидкості. Для регулювання швидкості та крутного моменту машини редуктор традиційно з'єднується зі стандартною асинхронною машиною. Вигідно усунути цей механічний елемент, оскільки він є дорогим, знижує ефективність приводу та потребує технічного обслуговування.

У порівнянні з асинхронними машинами та машинами з комутованим релактансним полем, машини з постійними магнітами (ПММ) мають найвищу питому потужність та ККД, найменшу масу та найкоротшу активну довжину статора.

1.2 Низькошвидкісний прямий привід

Низькошвидкісні (або високошвидкісні) приводи без редуктора називаються приводами прямого зчеплення. Оскільки редуктор є дорогим, знижує ККД приводу та потребує технічного обслуговування, машина з постійними магнітами з приводом прямого зчеплення є привабливим рішенням, здатним скласти конкуренцію асинхронному двигуну та редуктору, оскільки такі машини безпосередньо з'єднані з навантаженням.

У низькошвидкісних застосуваннях використання машин з постійними магнітами може повністю усунути необхідність у редукторі, який традиційно з'єднується зі стандартною асинхронною машиною. Низькошвидкісні приводи з постійними магнітами з прямим приводом в основному використовуються у двох сферах: вітрових турбінах та суднових двигунах. Приводи з прямим приводом також успішно використовуються в ліфтах для економії місця.

У звичайній вітроелектростанції [1] [2] генератор з'єднаний з турбіною через редуктор, завдяки чому він зазвичай може обертатися зі швидкістю 1000 або 1500 об/хв. Вітроелектростанцію можна спростити, усунувши редуктор і використовуючи низькошвидкісний генератор, ротор якого обертається з тією ж швидкістю, що й ротор турбіни.

Рішення з використанням генератора та редуктора у вітроелектростанції можна замінити низькошвидкісним синхронним генератором з постійними магнітами.

Синхронні машини, що використовуються в приводах двигунів для човнів та суден [3], зазвичай є високошвидкісними машинами порівняно з низькою швидкістю, яка потрібна для гвинтів. Тому в трансмісії необхідна редукторна передача, а використання такого потужного пристрою негативно позначається на вартості, масі та коефіцієнті корисної дії приводів двигунів суден.

Отже, значне поліпшення можна було б досягти завдяки використанню низькошвидкісних електродвигунів з високим крутним моментом, які дозволяють здійснювати прямий привід гвинтів судна.

1.3 Високошвидкісний прямий привід

Під високошвидкісними двигунами [4,5] зазвичай розуміють двигуни, швидкість обертання яких перевищує 10 000 об/хв або показник складності (добуток швидкості обертання на квадратний корінь потужності) перевищує $1 \cdot 10^5$.

Наразі високошвидкісні двигуни використовуються переважно в промисловості, медицині, енергетиці та аерокосмічній галузі. Порівняно з низькошвидкісними та середньошвидкісними традиційними електричними машинами, високошвидкісні електричні машини мають такі переваги, як висока питома потужність, компактність та невелика вага. Що ще важливіше, високошвидкісні електричні машини можна безпосередньо підключати до високошвидкісних навантажень, і звичайні редуктори більше не потрібні, що дозволяє уникнути складних редукторних систем, підвищити ефективність та надійність системи, а також зменшити вібрацію, шум та вартість системи. З розвитком у галузі перетворювачів силової електроніки проблеми з високочастотним живленням, необхідним для високошвидкісної роботи, більше не є обмеженням.

Розвиток високошвидкісних електричних машин також підтримується розробкою високошвидкісних підшипникових систем з високою міцністю, меншими втратами та довшим терміном служби. Зі зростанням застосування високошвидкісних систем СМПМ та прагненням до створення високоефективних двигунів, високошвидкісні СМПМ та їхні технології керування приводом стали новою гарячою темою в електротехнічній галузі. Вони також використовуються як приводи коліс для тягових приводів в електромобілях.

Прямий привід у вигляді приводу коліс [6] не потребує редуктора, а отже, не виникає пов'язаних з ним втрат при перетворенні енергії. Механічна потужність генерується безпосередньо там, де вона потрібна – на колесі.

1.4 Аналіз методів управління синхрним двигуном

Синхронний двигун (СД) являє собою електричну машину змінного струму, Статор цього двигуна схожий за конструкцією на статор асинхронного двигуна (АД). На роторі знаходяться постійні магніти (ПМ), залежно від їх розташування існує два види СДПМ: магніти розташовані на поверхні ротора; магніти розташовані в сталі ротора. Зазвичай виробляються на малу потужність і використовуються в сервоприводах разом з перетворювачем частоти [7-9,13].

Синхронні електродвигуни дедалі частіше застосовуються в галузях, де традиційно використовувалися двигуни постійного струму (ДПС) або асинхронні двигуни (АД). Зокрема, це приводи циркуляційних насосів, компресорів у побутовій техніці, системах вентиляції, а також у бурових установках. Така тенденція зумовлена зниженням вартості магнітних матеріалів і вдосконаленням систем керування. Розвиток сучасної обчислювальної техніки створив передумови для заміни ДПС на синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) у приводах. Важливим фактором також стало широке впровадження силових перетворювачів на основі транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) та використання методів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [3, 4, 5].

1.1.1 Класифікація методів управління синхрним двигуном.

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

На валу двигуна в класичному приводі, в основі якого лежить СД, встановлений датчик положення ротора (ДПР). Датчик Холла і енкодер можна застосовувати в якості датчика. В результаті отримуємо досить просту схему, але надійність системи погіршується через те, що будова двигуна складна.

Досягнуті результати в області розвитку ТАУ привели 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 і надійність – ключові переваги таких систем.

У літературі описано низку версій управління системою без датчиків, які, в свою чергу, базуються на мат. моделях двигунів. У цих системах розрахунок швидкості обертання дорівнює швидкості в модулі і порівнянний з кутовим положенням вектора ЕРС ротора. Вони відрізняються точністю і чутливістю при зміні вхідних параметрів в математичній моделі. Недоліком таких способів є неможливість роботи електроприводу на низьких частотах, оскільки ЕРС ротора в даному випадку близький до нульової позначки і не може подати необхідний сигнал. У такому випадку погіршується енергоефективність електроприводу і збільшується споживана потужність силовими елементами через те, що виникають додаткові втрати в перетворювачі і двигуні. Для оцінювання пасивної системи існують два варіанти – адаптивний і неадаптивний. Для розширення і функціональності адаптивні системи використовують нестандартні і стандартні моделі. Для електромагнітних процесів неадаптивні системи використовують моделі ротора і статора.

Адаптивні системи використовують стандартні та нестандартні моделі для розширення та функціональності. Методи побудови систем управління для СД також різноманітні. Різні методи управління показані на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 - Варіанти виконання систем управління СД

Розберемо кожен з варіантів управління СД більш детально. Метод прямого контролю крутного моменту спочатку був запропонований для 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 властивої таблиці значень. Однак поле статора і момент контролюються одночасно.

Такі системи мають ряд переваг: стійкість досягається при зміні параметрів, алгоритм управління спрощується через відсутність струмового контуру управління

і забезпечується висока продуктивність системи. Але спосіб прямого управління моментом має значний недолік: при невеликих навантаженнях з'являються коливання обертання ротора і моменту.

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

Нещодавно були розроблені методи синтезу стійких систем управління. Зміни навантаження, опору в статорі, моменту інерції обертових частин, напруги мережі впливають як на механічні характеристики, так і на перехідні процеси. Надійні системи не адаптовані, але здатні забезпечити необхідну роботу при зміні характеристик ефектів і нестабільній роботі двигуна. Необхідність скорочення потрібного обсягу інформації, прагнення до універсальної системи управління двигуном і зниження грошових коштів на налаштування – це веде до інтересу надійного управління. Зараз, незважаючи на великі досягнення, варіанти оптимізації не отримали широкого практичного застосування.

Для синхронних двигунів із постійними магнітами (СДПМ) активно розробляються системи керування на основі синергетичного підходу. Згідно з теорією синергетичного керування, сукупність критеріїв керування задається у вигляді інваріантів. Оскільки СДПМ є багатоканальною системою керування, для нього може бути визначено не більше двох інваріантів. Один із них використовується для стабілізації швидкості обертання валу двигуна, тоді як електромагнітний інваріант підбирається таким чином, щоб поздовжня складова струму статора I_d прямувала до нуля.

Синтез синергетичного керування виконується методом аналітичного конструювання агрегованих регуляторів. Перевагою цього підходу є висока точність керування, однак його недоліками є складність математичного апарату та значні обчислювальні витрати.

Векторне керування двигуном базується на орієнтації системи координат відносно вектора потокозчеплення, створюваного постійними магнітами. Через це в науковій літературі цей метод також відомий як керування, орієнтоване за полем (Field-Oriented Control). Основною метою такого підходу є забезпечення характеристик, аналогічних двигуну постійного струму, де керування моментом і магнітним потоком може ефективно реалізовуватися як у статичних, так і в динамічних режимах роботи.

Знаючи положення ротора і застосовуючи математичні рівняння, обертаюча система координат (d, q) (джерело - миттєві значення струму статора) пов'язана з ротором. Якщо поточні значення ідентифікатора підтримувати рівними нулю, то вздовж осі d потік буде постійним. У даному випадку момент є пропорційним значенню струму i_q , яке задається в системі управління.

Найбільш поширеними методами управління СДПМ є пряме управління крутним моментом і векторне керування. Система з прямим контролем моменту краще виконує керуючі і заважаючі впливи. Крім того, векторне керування поступається прямому, крутним моментом через низький опір змінам параметрів і вимагає використання більш складної ШІМ-системи.

Перевагами векторного управління в статичних режимах є менша пульсація і менші обчислювальні ресурси. В електроприводах зі стабільним керуванням і незначними порушеннями навантаження краще використовувати саме такі системи.

1.6 Висновки до розділу

Було розглянуто особливості СМ з постійними магнітами, їх конструктивні переваги та основні сфери застосування. Встановлено, що використання постійних магнітів дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії, зменшити масогабаритні показники та покращити енергетичні характеристики електроприводів порівняно з асинхронними машинами.

Проаналізовано особливості низькошвидкісних і високошвидкісних приводів прямого зчеплення. Визначено, що застосування СМПМ дозволяє відмовитися від

використання редукторів. Розглянуто основні сфери використання таких приводів, зокрема у вітроенергетиці, суднових системах, електромобілях та промислових установках.

Також проведено аналіз методів керування СД з ПМ. Проаналізовано принципи векторного керування, прямого керування моментом, синергетичного та бездатчикового керування. Встановлено, що найбільш поширеними методами є векторне керування та пряме керування моментом, які забезпечують високу точність регулювання та хороші динамічні характеристики електропривода..

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис математичної моделі синхронного двигуна

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) характеризуються наявністю на роторі постійних магнітів, які формують збуджувальний магнітний потік. Статор таких машин конструктивно подібний до статора асинхронного двигуна та містить дво- або трифазну обмотку. Під час побудови математичної моделі СДПМ зазвичай приймають такі припущення [8–12]:

- відсутність насичення магнітопроводу, втрат у сталі та впливу витіснення струму;
- симетричність обмоток статора;
- незмінність індуктивності при зміні положення ротора.

Рівняння балансу напруг статора синхронного двигуна формуються на основі моделі, поданої на рис. 2.1. Рівняння двигуна записуються в системі координат (d, q) , де вісь d співпадає з магнітною віссю ротора. Швидкість обертання цієї координатної системи відповідає синхронній швидкості, яка визначається через число пар полюсів p_n та механічну кутову швидкість обертання вала двигуна ω .

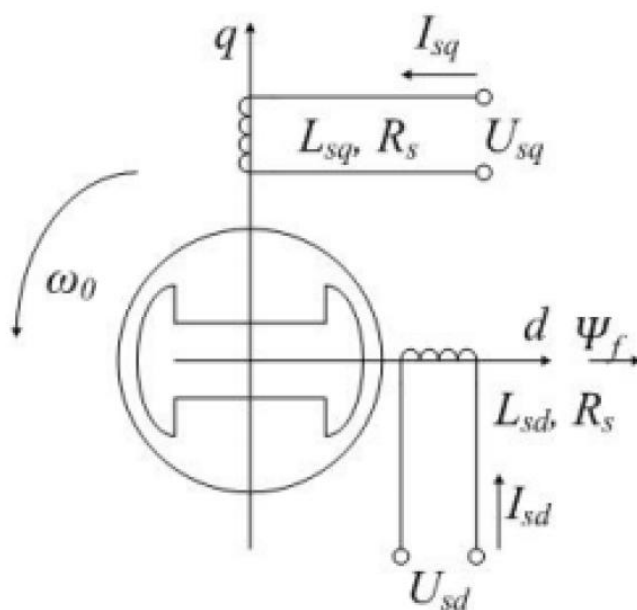


Рисунок 2.1 - Математична модель СД

Отже, рівняння вектора напруги статора та вектора потокозчеплення в обертовій системі координат можна подати в операторній формі, що дозволяє зручно враховувати динамічні процеси в синхронному двигуні та спрощує подальший аналіз його електромагнітних режимів. Такий запис є особливо доцільним при дослідженні перехідних процесів і синтезі систем керування, оскільки забезпечує компактне математичне представлення взаємозв'язків між електричними змінними машини.

$$\begin{aligned}
 U_{sd} &= R_s I_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_{0el}\psi_{sq}; \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + p\psi_{sq} - \omega_{0el}\psi_{sd}; \\
 \psi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f; \\
 \psi_{sq} &= L_{sq} I_{sq} + \psi_f.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Рівняння електромагнітного моменту має вигляд

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_{sd} I_{sq} - \psi_{sq} I_{sd}) \\
 p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Після підстановки рівнянь потокозчеплень у рівняння вектора напруг рівняння (1.1) та (1.2) можна подати у формі, вираженій через струми I_d та I_q

$$\begin{aligned}
 pI_{sd} &= \frac{1}{L_{sd}} (U_{sd} - R_s I_{sd} + \omega_{0el} L_{sq} I_{sq}); \\
 pI_{sq} &= \frac{1}{L_{sq}} (U_{sq} - R_s I_{sq} + \omega_{0el} L_{sd} I_{sd} - \omega_{0el} \psi_f); \\
 M &= \frac{3}{2} P_n (\psi_f I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}); \\
 p\omega &= \frac{1}{J} (M - M_c - \beta\omega).
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

На основі мат. моделі СД, описаної системою рівнянь (2.3), побудовано схему, представлену на рис. 2.2.

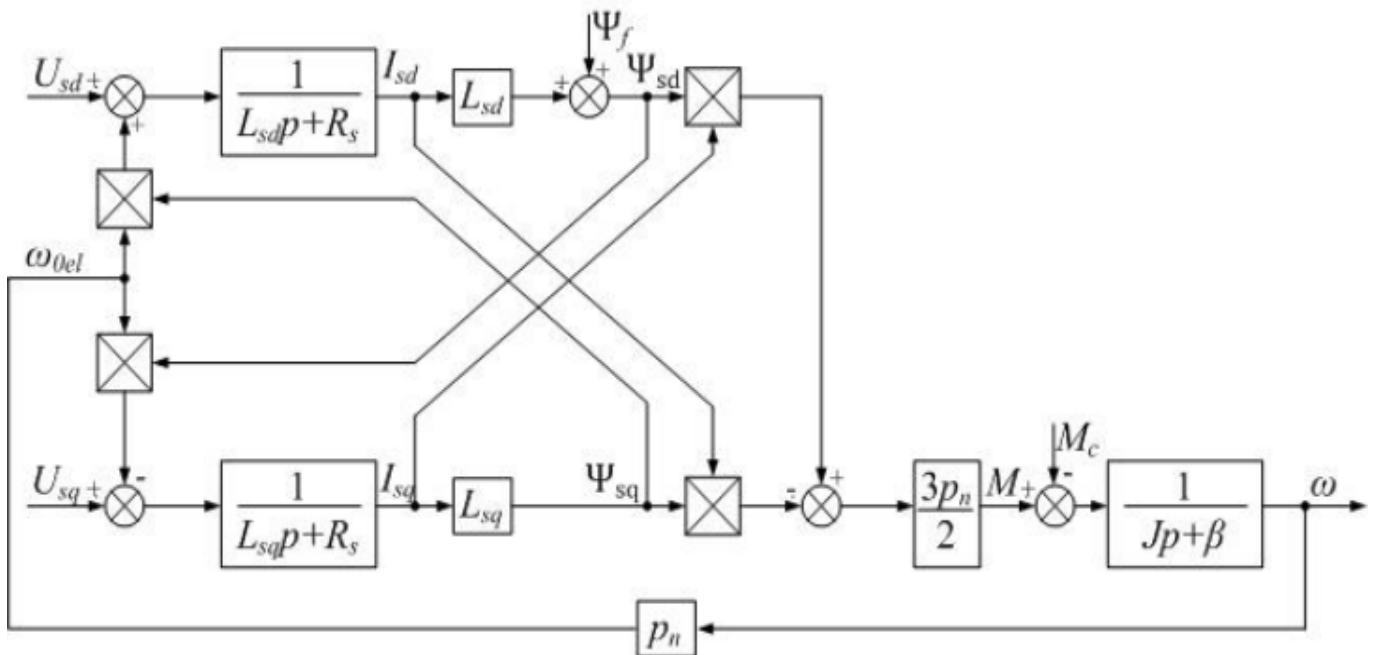


Рисунок 2.2 - Функціональна схема синхронного двигуна.

Відомо, що при зміні навантаження синхронного двигуна його швидкість залишається незмінною. Тому відбувається лише зміна взаємного кутового положення просторових векторів потокозчеплення статора та ротора. У режимі ідеального холостого ходу ці вектори збігаються, однак із появою навантаження на валу вектор потоку ротора відстає від вектора потоку статора на кут навантаження θ .

Цей кут, що вимірюється в радіанах, визначається як інтегральна різниця між миттєвими кутовими швидкостями електромагнітних полів статора і ротора в електричному просторі під час перехідного процесу, який виникає при зміні навантаження. Рівняння записується у такому вигляді:

:

$$\theta = \frac{\omega_{0el} - \omega P_n}{p} \quad (2.4)$$

По-перше, крутний момент двигуна зростає зі збільшенням кута навантаження. При досягненні значення 90° він набуває максимального значення. Подальше збільшення кута навантаження, тобто перехід до перевантаження двигуна, призводить до зменшення моменту та входження двигуна в нестійку область роботи, що може викликати його зупинку. Це відображається кутовою характеристикою, наведеною на рис. 2.3.

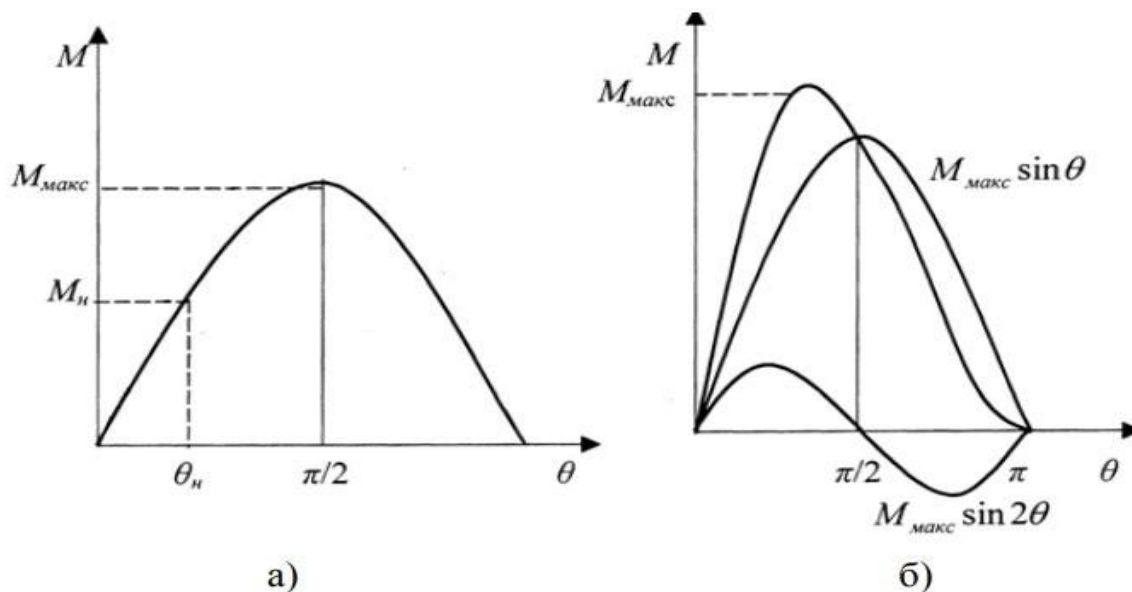


Рисунок 2.3 - Кутова характеристика синхронного двигуна включає: а) випадок неявнополісної машини; б) випадок явнополісної машини.

Для неявнополісного двигуна кутова характеристика має синусоїдальний характер. У разі явнополісної машини момент, зумовлений полем ротора, доповнюється реактивною складовою, яка є пропорційною $\sin 2\theta$ і спричиняє спотворення форми кутової залежності.

2.2 Система СДПМ з використанням датчика положення ротора

Комбінування системи управління, в якій встановлюється складова струму статора $I_{sd} = 0$, зробимо на основі моделі СД, описаної рівнянням (2.3) в системі координат (d, q) .

Схема системи керування з заданими початковими параметрами складової струму $I_{sd} = 0$ представлена на рис. 2.4. де ω , I_{dz} , I_{qz} , U_{dz} , U_{qz} – заданні швидкості, струмів і напруг, I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} – струми фаз статора, U_{kd} , U_{kq} – компенсаційні складові, g – ШІМ сигнал.

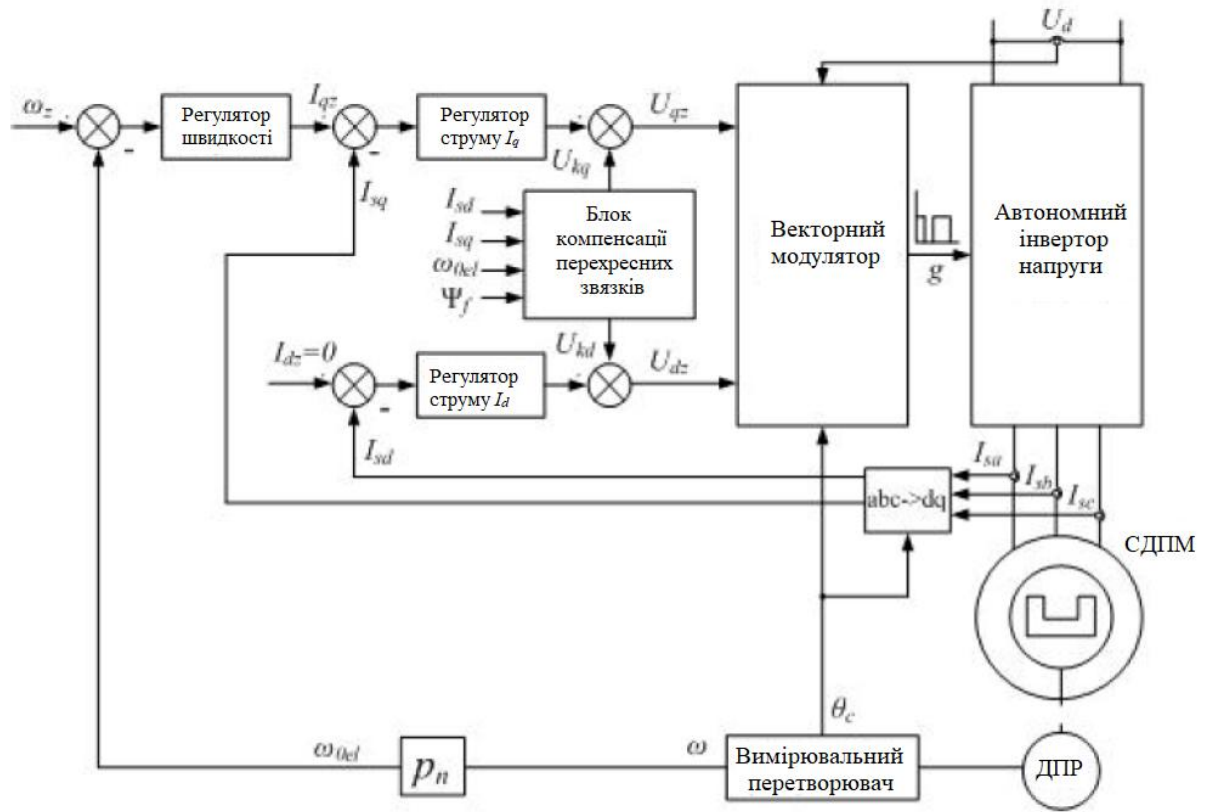


Рисунок 2.4 - Функціональна схема системи керування

Нульове значення струму по осі d робить напрямком струму статора перпендикулярним відносно магнітної осі ротора.

Датчик положення ротора (ДПР). Він визначає кут повороту в діапазоні від 0° до 360° . В якості простого вимірювання кута використовують енкодер. Ці показання відправляються в перетворювач, який показує миттєве значення кута повороту в цифровому форматі. Разом з кутом вимірюється миттєве значення частоти обертання двигуна і відразу порівнюється із заданим значенням швидкості. Виходячи з цих показань, помилка в значеннях відправляється в регулятор швидкості.

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

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_c) & \sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_c) & \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

де θ_c — кутове положення ротора.

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

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

Автономний інвертор напруги. Інвертор входить до складу дволанкового перетворювача частоти, схема показана на рис. 2.5. де НВ – некерований випрямляч, С – ємність конденсатора, R_T і K_T – опір мережі і ключ.

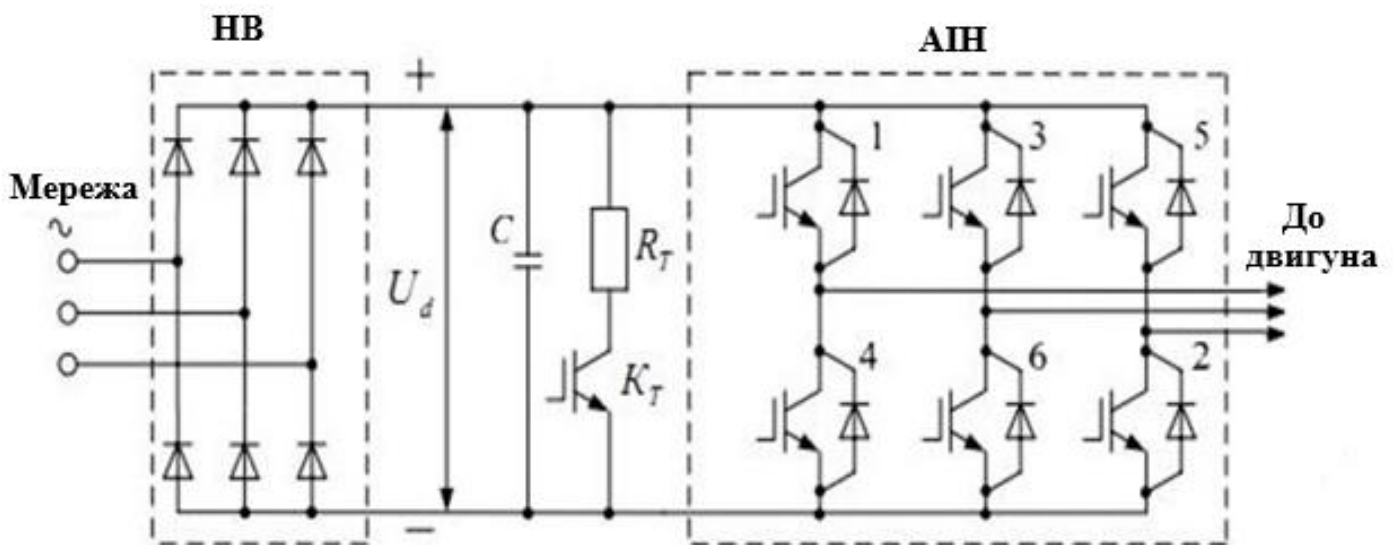


Рисунок 2.5 – Дволанковий перетворювач частоти

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

Підставляючи третє і четверте рівняння системи (2.1), запишемо рівняння векторів напруги:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + pL_{sd} I_{sd} - \omega_{0el} L_{sq} I_{sq}; \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + pL_{sq} I_{sq} + \omega_{0el} L_{sd} I_{sd} + \omega_{0el} \psi_f. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Система рівнянь (2.6) показує, що між цими двома каналами регулювання існують перехресні зв'язки. Щоб уникнути негативного впливу каналів один на одного, необхідно компенсувати перехресні зв'язки. Це можна компенсувати за допомогою таких рівнянь:

$$\begin{aligned} U_{kd} &= -\frac{1}{k_{nc}} \omega_{0el} L_{sq} I_{sq} \\ U_{kq} &= -\frac{1}{k_{nc}} \omega_{0el} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f) \end{aligned} \quad (2.7)$$

При обчисленні компенсаційних значень за рівняннями (2.7) беруться значення струмів, взяті з системи (d, q) . Для компенсації ці значення підсумовуються з сигналом завдання вектора напруги U_{dz} і U_{qz} .

Регулятори струму та швидкості реалізуються на основі компенсації нелінійних взаємозв'язків у системі керування.

Системи регулювання мають свої хороші якості:

1. Легкість розрахунку і 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 синтезу регулятора струму по осі d використовується структурна схема відповідного контуру, представлена на рис. 2.6. На цій схемі позначен:

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

$$U_{kd} = -\frac{1}{k_{nc}} \omega_{0el} L_{sq} I_{sq} - \text{сигнал компенсації перехресного зв'язку},$$

$$\frac{k_{nc}}{T_{nc} p + 1} - \text{передавальна функція ПЧ}, \text{ який записаний як аперіодичний ланка},$$

W_{pc} - передавальна функція регулятора струму.

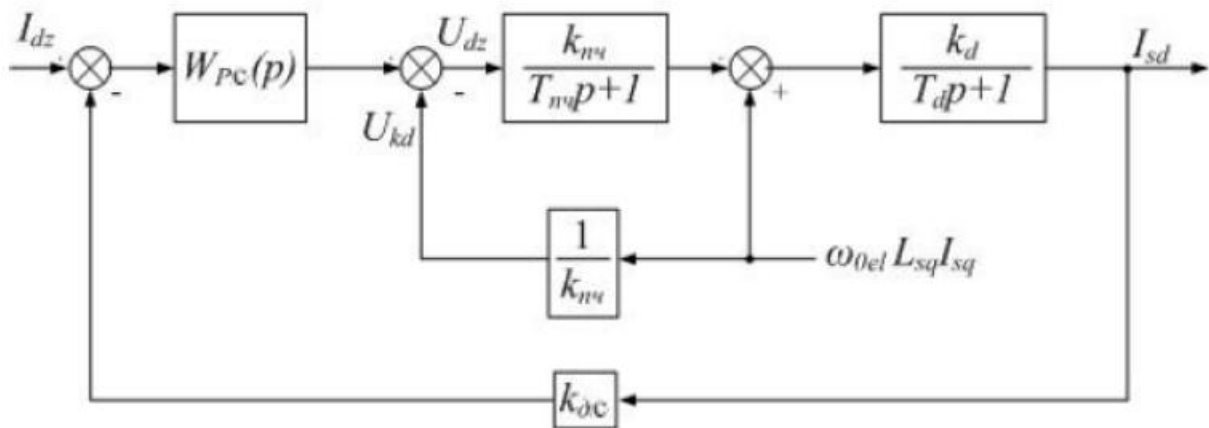


Рисунок 2.6 - Структурна схема регулятора струму по осі d

Виходячи з того, що перехресні зв'язки компенсовані, можемо провести налаштування оптимуму малої некомпенсованої постійної часу $T_{кт}$, що дорівнює $T_{пч}$.

У підсумку отримаємо передавальну функцію розімкнутої системи:

$$W(p) = W_{pc}(p) \frac{k_{nc} k_{dc} k_d}{(T_{nc} p + 1) + (T_d p + 1)} = \frac{1}{2T_{kc} p (T_{kc} p + 1)} \quad (2.8)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{T_d p + 1}{2k_{nc} k_{dc} k_d T_{kc} p} = \frac{L_{sd}}{2k_{nc} k_{dc} T_{kc}} + \frac{R_s}{2k_{nc} k_{dc} T_{kc}} \frac{1}{p}$$

У результаті значення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових визначаються такими рівняннями:

$$k_{pd} = \frac{L_{sd}}{2k_{nc}k_{dc}T_{kc}} \quad (2.9)$$

$$k_{id} = \frac{R_s}{2k_{nc}k_{dc}T_{kc}}$$

Передавальна функція замкнутого контуру струму записується у вигляді:

$$W(p) = \frac{1/k_{dc}}{2T_{kc}^2 p^2 + 2T_{kc} p + 1} \quad (2.10)$$

Регулятор струму по осі q реалізується за аналогічним принципом, проте з урахуванням таких умов:

1) $\frac{k_q}{T_q p + 1}$ – передавальна функція статорного контуру по осі q

2) Обурюючий сигнал компенсації має вигляд $U_{kq} = \frac{1}{k_{nc}} \omega_{0el} (L_{sd} I_{sd} + \psi_f)$

Рівняння регулятора струму по осі q має аналогічний вигляд до рівнянь регулятора по осі d (2.9):

$$k_{pq} = \frac{L_{sd}}{2k_{nc}k_{dc}T_{kc}} \quad (2.11)$$

$$k_{iq} = \frac{R_s}{2k_{nc}k_{dc}T_{kc}}$$

Регулятор швидкості був розроблений відповідно до структурної схеми, поданої на рис. 2.7, яка визначає основні взаємозв'язки між елементами системи керування та забезпечує реалізацію необхідних динамічних і статичних характеристик електропривода. У деяких випадках реактивною складовою моменту в рівнянні (2.3) можна знехтувати:

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

2) коли $I_{sd} = 0$.

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

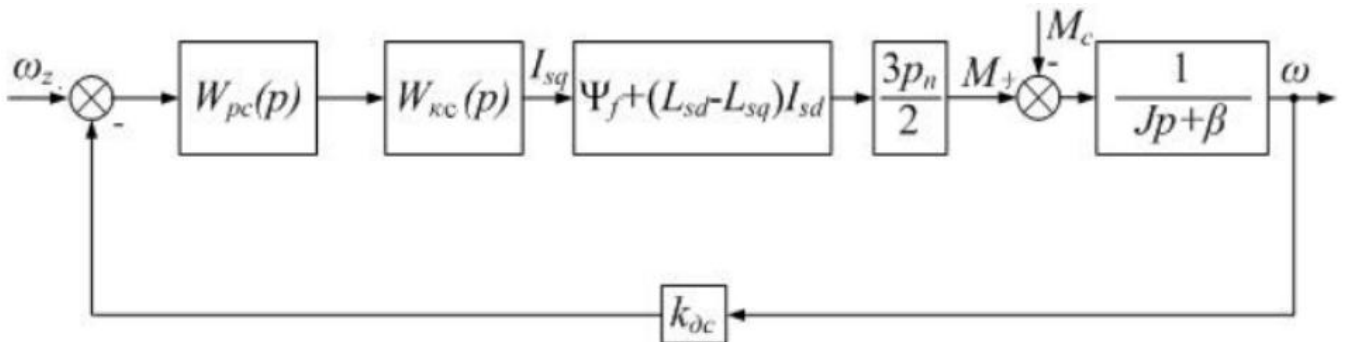


Рисунок 2.7 - Структурна схема контуру регулювання швидкості

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

$$W(p) = W_{pc}(p) W_{pm}(p) \psi_f \frac{3}{2} p_n \frac{1}{J_p} k_{dc} = \frac{4T_{kc}}{8T_{pc}^2 p^2 (T_{pc} p + 1)} \quad (2.12)$$

У результаті отримуємо ПІ-регулятор швидкості з такими коефіцієнтами::

$$k_{p\omega} = \frac{k_{dc}}{3T_{kc} \psi_f p_n k_{dc}} \quad (2.13)$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{dc} J}{12T_{kc}^2 \psi_f p_n k_{dc}}$$

2.3 Система СДПМ з використанням функціональних перетворювачів

Як описувалося раніше, отримання певного моменту СД при малому струмі не є оптимальним варіантом. Управління здійснюється забезпеченням певного співвідношення між складовими значеннями струму статора, яке задається за допомогою функціональних перетворювачів (ФП). Схема системи управління СД з ФП наведена на рис. 2.8. Оскільки СД в момент визначається значенням струму статора, I_{sd} і I_{sq} підключені до виходу регулятора швидкості. ФП являють собою залежності сигналів завдання складових струму статора від моменту, виражені у

відносних одиницях. Характеристики будуються на основі розрахунку, що пояснюється формулами і рисунком 2.9.

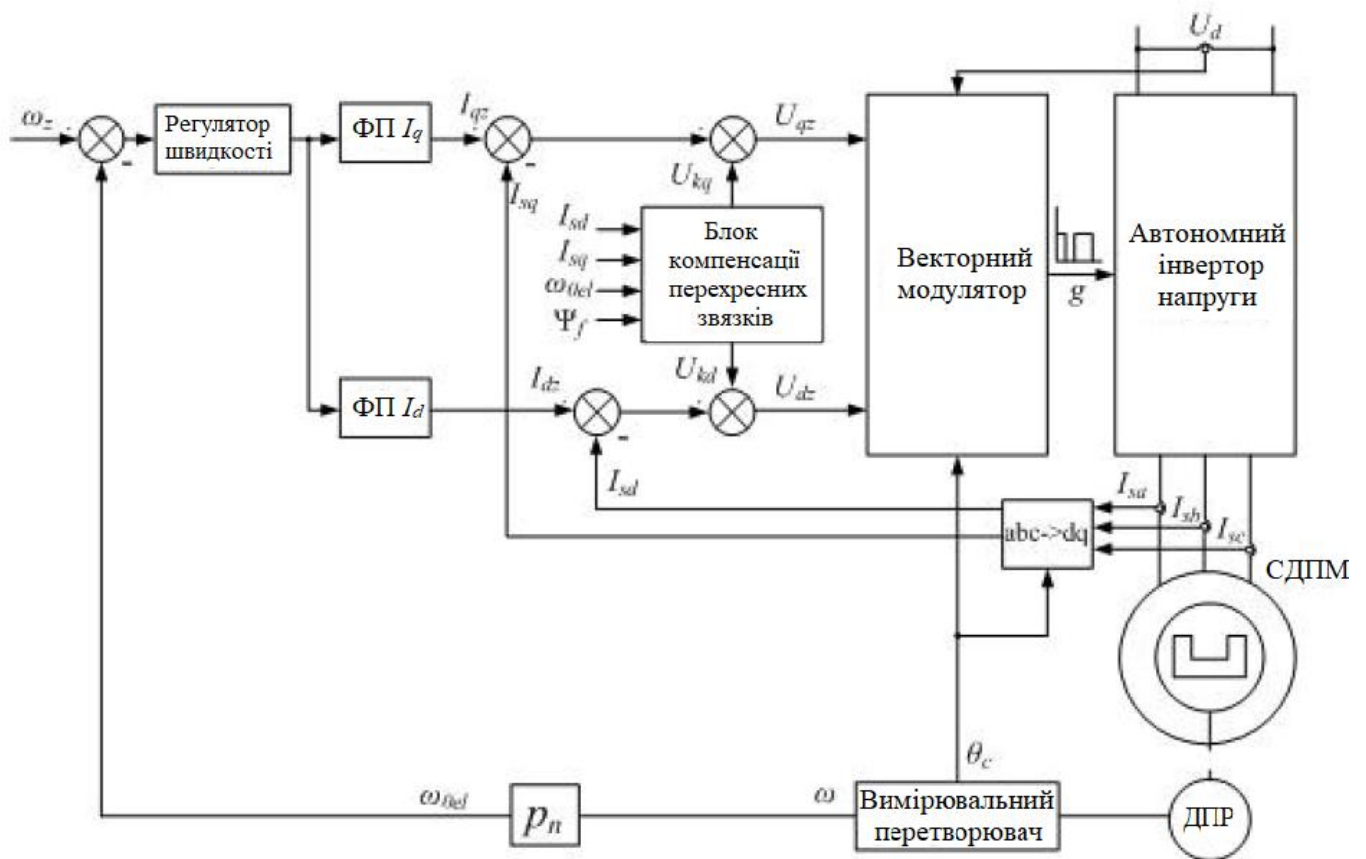


Рисунок 2.8 - Функціональна схема системи управління СД з ФП

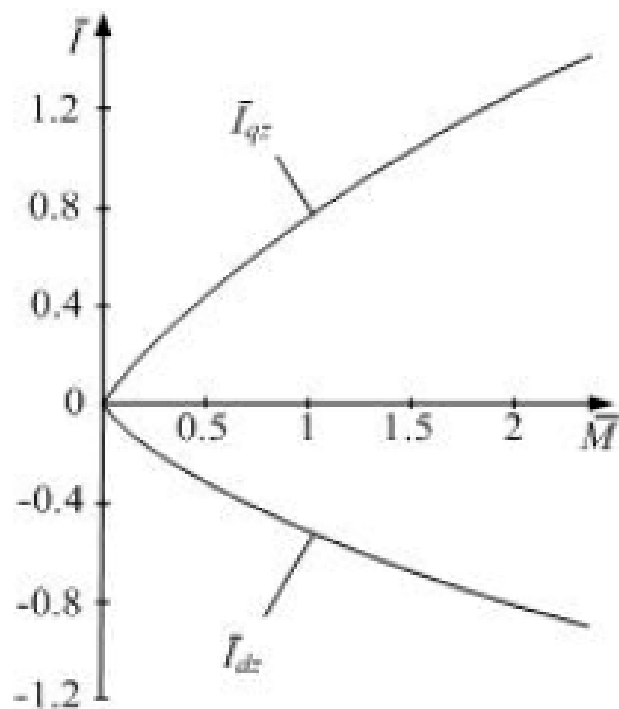


Рисунок 2.9 – Графік функціональних перетворювачів

2.4 Система СДПМ з використанням бездатчикового управління

Під час розробки систем керування дедалі частіше висувається вимога відмови від датчика положення ротора (ДПР), для підвищення надійності, зменшення витрат та спростити обслуговування електроприводу. У деяких системах застосування ДПР для визначення кутового положення ротора та миттєвої швидкості є неприпустимим.

У таких випадках використовують бездатчикові системи керування, де задача визначення кута положення ротора і швидкості вирішується непрямим шляхом. Це реалізується за допомогою спостерігача стану.

Функціональна схема бездатчикового керування синхронним двигуном наведена на рис. 2.10. На ній показані $\hat{\omega}$, $\hat{\omega}_{0el}$, $\hat{\theta}_c$ оцінені значення швидкості обертання ротора, синхронної швидкості та кутового положення ротора.

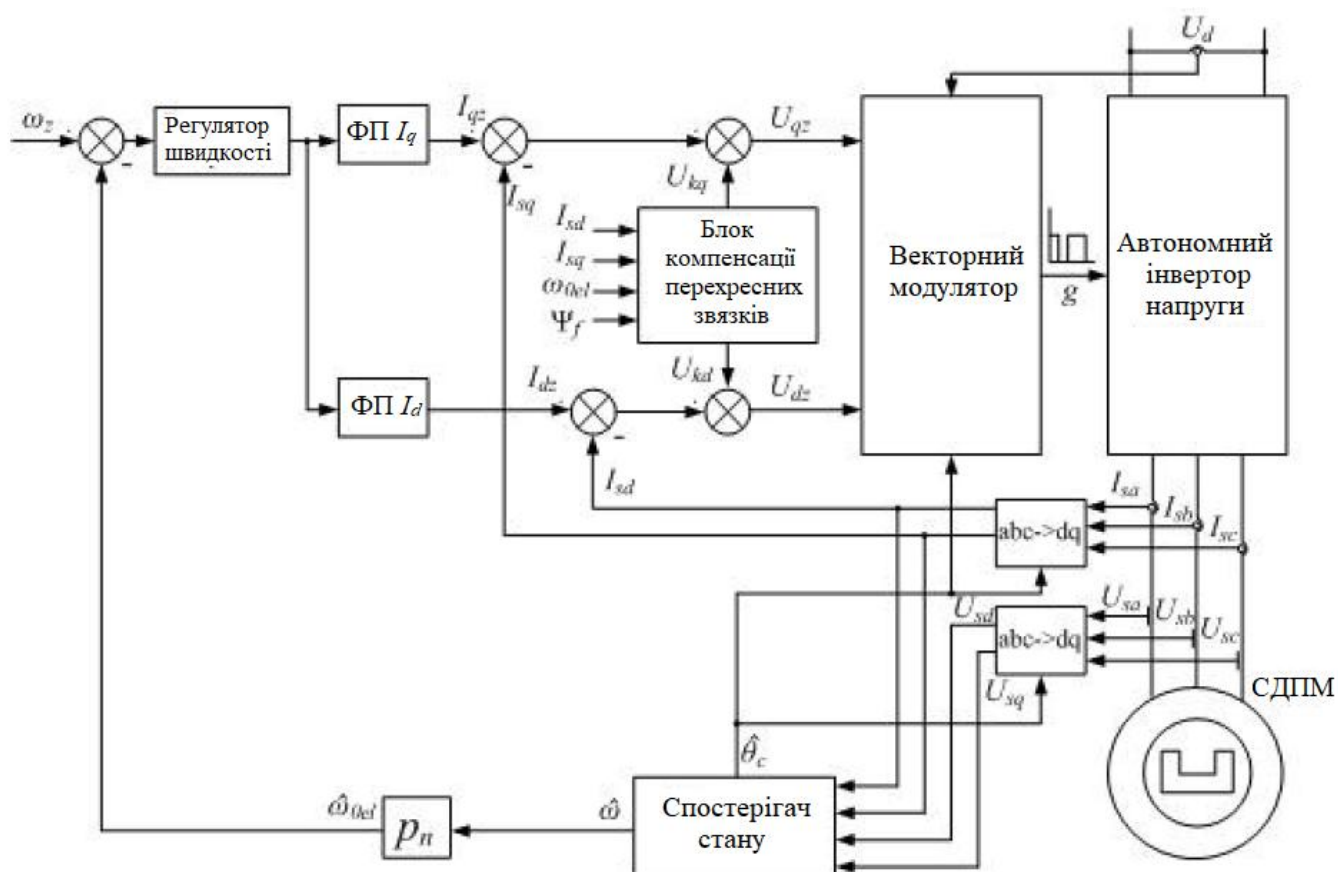


Рисунок 2.10 – Функціональна схема системи бездатчикового керування СД

Дана система є вдосконаленням системи управління з ФП (див. рис. 2.9). Крім спостерігача стану, вводяться датчики напружень і перетворювач координат, який виконується з (2.5). Перетворені в систему координат напруження U_{sd} і U_{sq} і струми I_{sd} і I_{sq} є початковими змінними для спостерігача стану. На основі цих даних спостерігач оцінює значення швидкості і кута положення.

2.5 Спостерігач стану

Існує багато алгоритмів оцінювання параметрів двигуна, що застосовуються для побудови спостерігачів. Основні підходи до реалізації спостерігачів наведено на рис. 2.11



Рисунок 2.11 – Спостерігачі стану

Непрямі позиційні вимірювачі для визначення положення ротора базуються на використанні властивої магнітної неоднорідності електричної машини. Така неоднорідність може проявлятися у вигляді конструктивної асиметрії обмоток статора або нерівномірного розподілу магнітної проникності в повітряному проміжку двигуна. За рахунок цих ефектів стає можливим отримання додаткової інформації про положення ротора без застосування механічних датчиків.

Одним із поширених підходів є використання методів високочастотної ін'єкції. Суть даного методу полягає у формуванні інвертором спеціальних високочастотних тестових сигналів, які накладаються на основний керуючий вплив. Реакція двигуна на ці сигнали містить інформацію про поточне положення ротора, що дозволяє виконувати його непряме визначення. Після оцінювання кутового положення швидкість обертання зазвичай визначається як чисельна або аналітична похідна від оціненого кута. Незважаючи на високу точність при певних режимах роботи, даний підхід має ряд недоліків, зокрема підвищення рівня електромагнітних шумів, можливе погіршення якості керування та додаткові втрати енергії, зумовлені високочастотним збудженням.

Окрему групу становлять вимірювачі похибки орієнтації, які визначають положення обертової системи координат на основі сигналів внутрішнього контуру керування. Принцип їх роботи полягає у мінімізації кутової похибки між заданою та фактичною орієнтацією системи координат, що опосередковано дозволяє отримати інформацію про положення ротора. Швидкість обертання в таких системах оцінюється через зміну положення обертової системи координат у часі. Основними обмеженнями даного підходу є недостатня динамічна швидкодія та суттєве погіршення точності або навіть неможливість роботи в режимі низьких швидкостей, коли корисний сигнал стає порівнянним із шумами.

Спостерігачі на основі фільтра Калмана є класом рекурсивних оцінювачів стану, які поєднують математичну модель об'єкта з даними вимірювань і використовують апарат теорії ймовірностей та математичної статистики. Їх основною перевагою є здатність оптимально оцінювати невідомі змінні стану системи в сенсі мінімізації середньоквадратичної похибки при наявності шумів

вимірювання та збурень. Завдяки цьому фільтр Калмана широко застосовується для відновлення таких величин, як кутове положення та швидкість ротора, навіть за умов неповної або зашумленої інформації. Водночас до недоліків таких спостерігачів належать значна обчислювальна складність, необхідність точного налаштування статистичних параметрів шумів, а також чутливість до похибок математичної моделі об'єкта.

Адаптивні спостерігачі також ґрунтуються на математичних моделях електромагнітних процесів у двигуні, однак на відміну від класичних підходів вони містять механізм корекції параметрів у реальному часі. Такі системи часто реалізуються у вигляді сервосистем, що включають додатковий адаптивний регулятор, який забезпечує підлаштування моделі до змінних умов роботи двигуна, зокрема температурних змін, насичення магнітного кола та параметричних відхилень. Завдяки цьому підвищується точність оцінювання станів у широкому діапазоні режимів роботи. Однак складність структури, підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів та необхідність стабільного налаштування адаптаційних законів залишаються основними обмеженнями цього класу спостерігачів.

2.6 Висновки до розділу

Було розглянуто мат. модель (СДПМ) та підходи до розробки систем керування ним. На основі припущень щодо лінійності магнітної системи та симетрії обмоток отримано рівняння у d - q системі координат, що дозволяє спростити аналіз електромеханічних процесів і зручно описати електромагнітний момент та потокозчеплення.

Було показано, що електромагнітний момент двигуна суттєво залежить від кута навантаження, а перевищення критичного значення призводить до втрати стійкості роботи. Це підкреслює важливість точного регулювання координат стану та швидкості в системах керування СДПМ.

Окрему увагу приділено різним структурам систем керування: із датчиком положення ротора, із функціональними перетворювачами та бездатчиковим

керуванням. Встановлено, що класичні датчикові системи забезпечують високу точність, але мають нижчу надійність і більшу вартість, тоді як бездатчикові рішення є більш перспективними завдяки простоті та зменшенню апаратної складності.

Також проаналізовано основні типи спостерігачів стану, включаючи методи високочастотної ін'єкції, фільтр Калмана та адаптивні спостерігачі. Показано, що кожен із підходів має свої переваги та обмеження, зокрема компроміс між точністю оцінювання, обчислювальною складністю та стійкістю до шумів..

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання системи управління в програмному продукті Matlab

Моделювання синхронного двигуна (СД) у системі координат (d,q) відбувається на основі диференціальних рівнянь (1.3), що описують електромагнітні та механічні процеси в електроприводі. Перехід до обертової системи координат (d,q) дозволяє суттєво спростити математичний опис двигуна, оскільки змінні струму та напруги перетворюються у квазістаціонарні величини. Це забезпечує зручність аналізу динамічних режимів роботи та підвищує точність моделювання електромеханічних процесів.

Для побудови моделі використовуються вихідні параметри двигуна, наведені в таблиці 3.1, зокрема: активний опір обмоток статора, індуктивності по осях d та q , момент інерції ротора, коефіцієнт тертя, номінальна напруга, частота живлення та інші технічні характеристики. На основі цих параметрів формується математична модель, що описує взаємозв'язок між електромагнітним моментом, струмами, потокозчепленнями та швидкістю обертання ротора.

Таблиця 3.1 - Вихідні параметри двигуна

P_d , кВт	M_d , Нм	U , В	β	R , Ом	L_{sd} , мГн	L_{sq} , мГн	Ψ_f , Вб	J , кг · м ²	p_n
7,5	66	200	0	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4

Модель синхронного двигуна була реалізована в програмному середовищі MATLAB із використанням пакета Simulink, який дозволяє виконувати імітаційне моделювання складних динамічних систем. У моделі реалізовано основні функціональні блоки: джерело живлення, перетворювач координат, математичний опис електричної частини двигуна, блок механічної системи та засоби контролю вихідних параметрів.

Структурна схема побудованої моделі наведена на рисунку 3.1. Вона відображає взаємодію між електричною та механічною підсистемами двигуна, а

також процес формування електромагнітного моменту та швидкості обертання ротора.

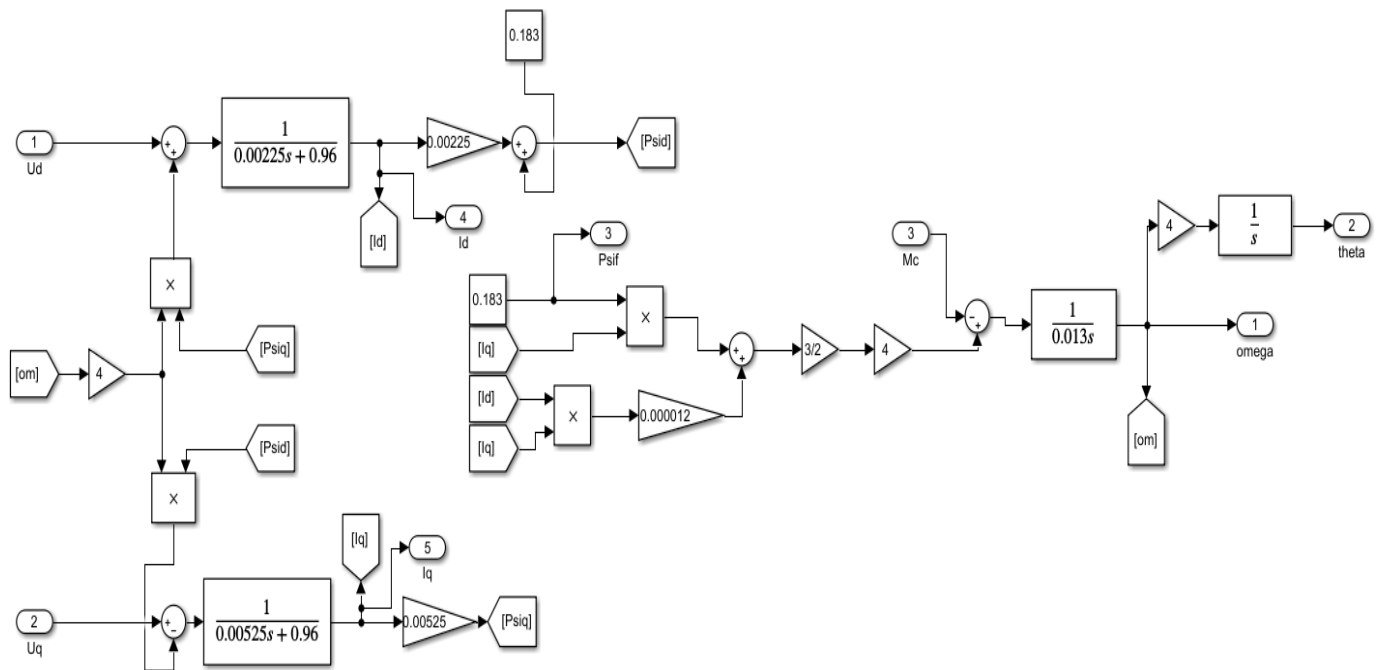


Рисунок 3.1- Модель СД

У результаті проведеного моделювання отримано залежність зміни кутової швидкості обертання синхронного двигуна, яка представлена на рисунку 3.2. Аналіз графіка показує характер перехідного процесу під час пуску двигуна: швидкість плавно зростає від нульового значення до усталеного режиму роботи. У процесі розгону можуть спостерігатися незначні коливання швидкості, які обумовлені електромагнітними перехідними процесами та особливостями системи керування.

Результати моделювання підтверджують правильність побудованої математичної моделі та її придатність для аналізу режимів роботи синхронного двигуна, дослідження динамічних процесів і подальшого удосконалення системи керування електроприводом.

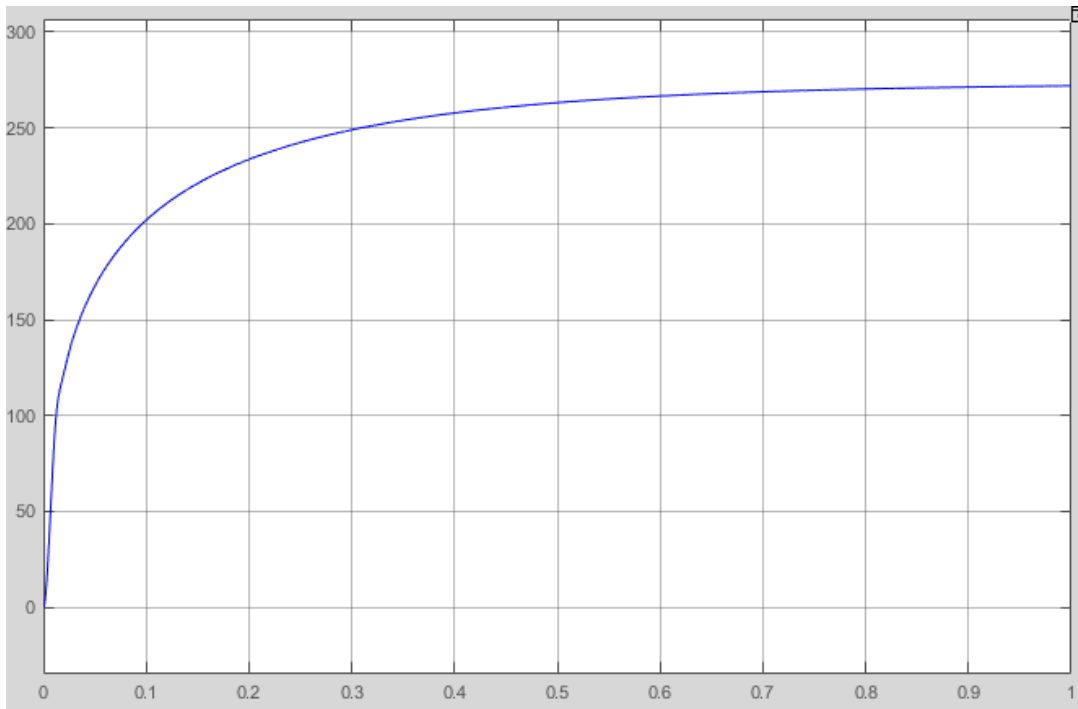


Рисунок 3.2 - Графік швидкості СД

3.1.1 Налаштування регуляторів швидкості та струму

Зробимо налаштування оптимуму за модулем поздовжньої та поперечної складових струму. Потрібно розрахувати коефіцієнти регуляторів струму. Перетворювач частоти буде представлений в якості аперіодичної ланки $\frac{k_{nc}}{T_{nc}p + 1}$. Коефіцієнт передачі $k_{nc} = 2$. Постійну часу $T_{пч} = T_{кт}$ виберемо рівною періоду модуляції, тобто при частоті ШІМ 2 кГц $T_{пч} = 0.0005$. Коефіцієнт передачі датчика струму $k_{дс} = 1$.

$$\begin{aligned}
 k_{pd} &= \frac{L_{sd}}{2k_{nc}k_{дс}T_{км}} = \frac{0,00255}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,0005} = 0,78 \\
 k_{pq} &= \frac{L_{sq}}{2k_{nc}k_{дс}T_{км}} = \frac{0,00525}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,0005} = 0,66 \\
 k_{id} = k_{iq} &= \frac{R_s}{2k_{nc}k_{дс}T_{км}} = \frac{0,96}{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,0005} = 479.97
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Коефіцієнти регулятора швидкості відповідно з умовою $T_{кc} = 2T_{кТ} = 0,001$. Коефіцієнт передачі датчика швидкості $k_{дс} = 1$. Параметри двигуна взяті з таблиці 3.1.

$$k_{p\omega} = \frac{k_{дс} J}{3T_{кc} \psi_f p_n k_{дс}} = \frac{1 \cdot 0,013}{3 \cdot 0,001 \cdot 0,0183 \cdot 4 \cdot 1} = 0,85$$

$$k_{i\omega} = \frac{k_{дс} J}{12T_{кc}^2 \psi_f p_n k_{дс}} = \frac{1 \cdot 0,013}{12 \cdot 0,001^2 \cdot 0,0183 \cdot 4 \cdot 1} = 54$$
(3.2)

Модель системи векторного керування СДПМ з використанням датчика положення ротора в MATLAB/Simulink. Перехресні зв'язки, складені рівняннями (2.7), представимо у вигляді підсистеми Compensation.

3.2 Моделювання системи з датчиком положення ротора

На основі матеріалу, наведеного у розділі 2, а також функціональної схеми системи керування (рис. 2.5), було створено модель системи керування синхронним двигуном (СД) із використанням датчика положення ротора (ДПР), яка представлена на рис. 3.3. Розроблена модель містить автономний інвертор напруги (АІН), систему векторного керування та блоки формування керуючих впливів.

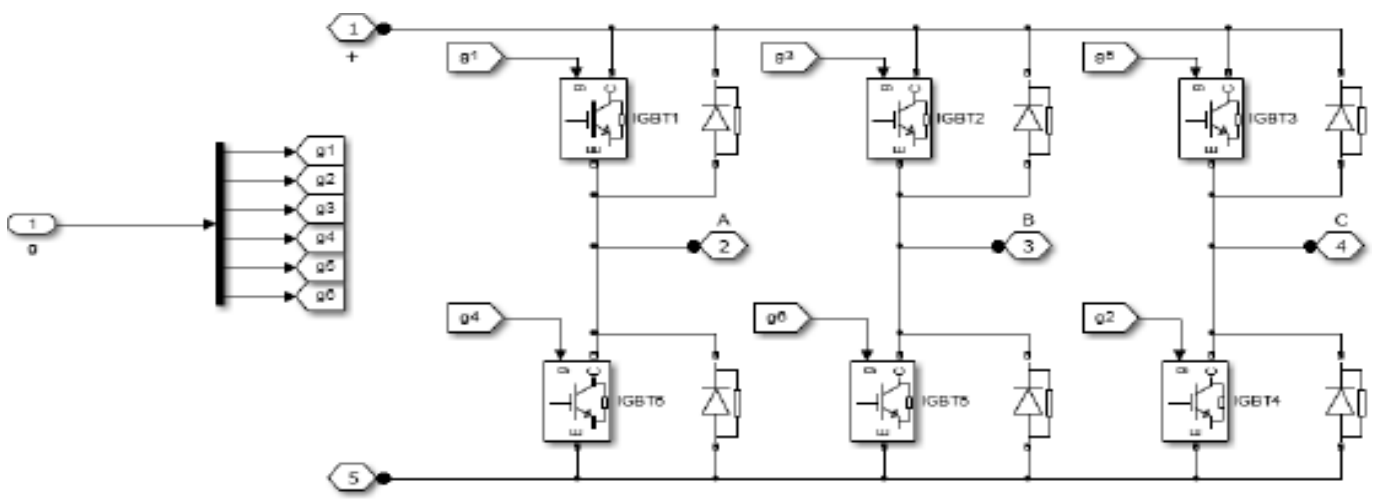


Рисунок 3.3 – Схема моделі автономного інвертора напруги (АІН)

Для аналізу роботи системи було проведено моделювання її динамічних режимів. У процесі моделювання навантаження прикладалося до двигуна через 60 секунд після початку роботи системи. Результати моделювання у вигляді графіків швидкості обертання двигуна при використанні векторного модулятора та датчика положення ротора наведені на рис. 3.5.

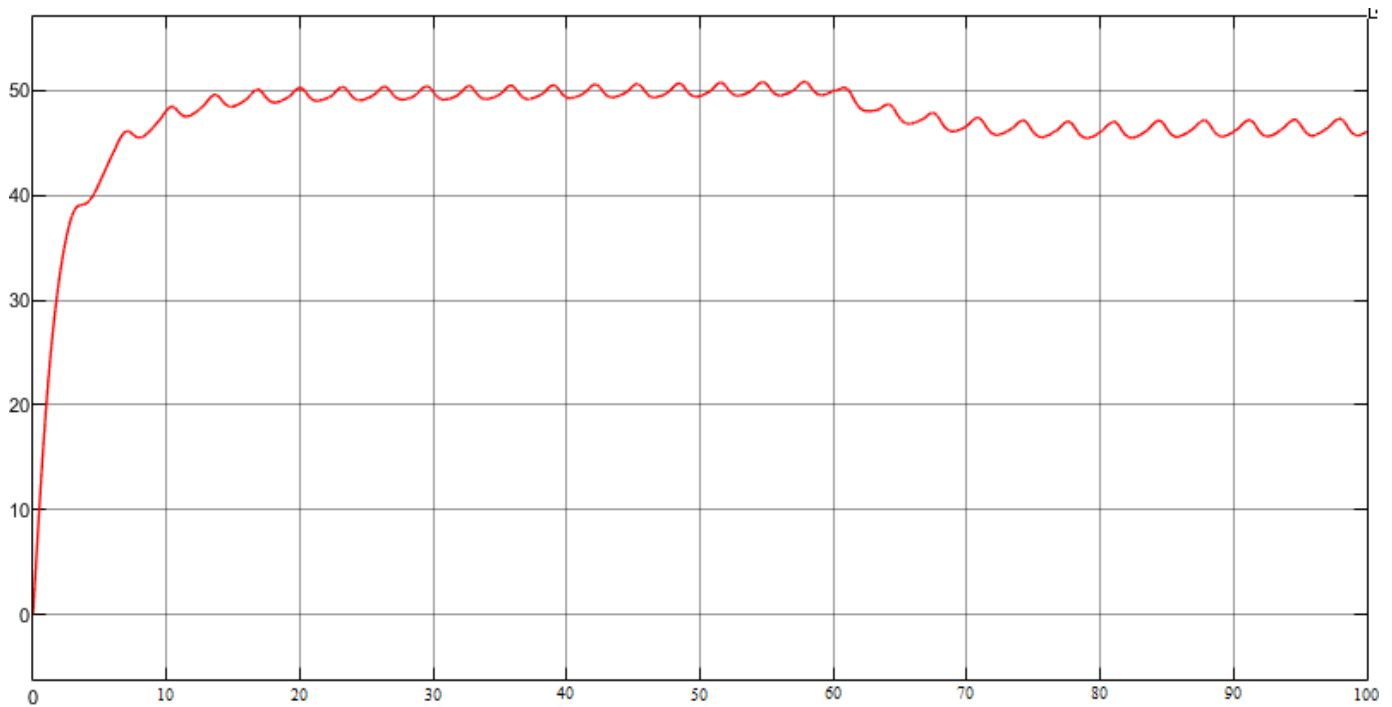


Рисунок 3.5 – Графіки швидкості СД

Аналіз отриманих результатів показує, що введення до системи векторного модулятора та автономного інвертора напруги призводить до появи високочастотних коливань і шумових складових у швидкісних характеристиках двигуна. Це пояснюється комутаційними процесами в інверторі та особливостями роботи ШІМ-модуляції, які створюють пульсації струму і напруги.

Разом із тим, підтримання поздовжньої складової струму статора на рівні $I_{sd} = 0$ не забезпечує оптимального режиму роботи двигуна з точки зору мінімізації струму статора при формуванні необхідного електромагнітного моменту. Для підвищення енергоефективності системи та зменшення втрат доцільно використовувати більш складні алгоритми керування, які забезпечують оптимальний розподіл складових струму статора.

У такому випадку керування двигуном здійснюється шляхом підтримання певного співвідношення між поперечною та поздовжньою складовими струму статора. Це співвідношення визначається за допомогою функціональних перетворювачів (ФП), які формують необхідні значення струмів залежно від режиму роботи електропривода. Використання функціональних перетворювачів дозволяє реалізувати режими керування, спрямовані на мінімізацію втрат, підвищення ККД та покращення динамічних характеристик системи електропривода.

3.3 Моделювання системи управління з використанням функціональних перетворювачів

На основі теоретичних положень, наведених у розділі 2, а також функціональної схеми системи керування (рис. 2.8), було розроблено модель системи векторного керування синхронним двигуном у середовищі MATLAB/Simulink із використанням функціональних перетворювачів (ФП). Основною особливістю даної системи є формування завдань струмів статора не за допомогою окремих регуляторів струму, а через функціональні залежності, які забезпечують оптимальний розподіл складових струму залежно від режиму роботи електропривода.

Під час побудови моделі було виключено діючі регулятори струму, які використовувалися у попередній структурі системи керування (рис. 3.6). У цьому випадку сигнали завдання для поздовжньої та поперечної складових струму формуються безпосередньо функціональним перетворювачем, підключеним після регулятора швидкості. Такий підхід дозволяє реалізувати оптимальні алгоритми керування двигуном, спрямовані на зменшення втрат енергії, покращення динамічних характеристик та підвищення енергоефективності електропривода.

Функціональні залежності для формування струмів задаються у вигляді табличних характеристик. Для їх реалізації у MATLAB/Simulink використано блок 1-D Lookup Table, який дозволяє задавати необхідні значення вихідних сигналів залежно від вхідного параметра. Завдяки цьому забезпечується гнучке

налаштування системи та можливість реалізації складних нелінійних характеристик керування.

Отримана модель системи векторного керування з використанням функціональних перетворювачів наведена на рис. 3.6.

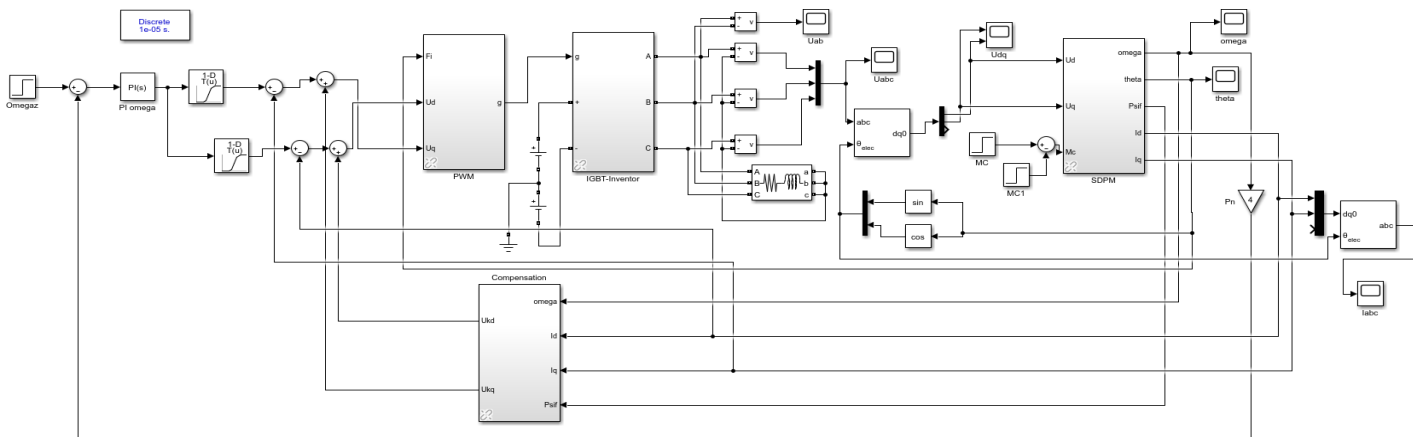


Рисунок 3.6 - Модель системи векторного керування ФП

Для забезпечення заданої якості перехідних процесів виконано налаштування регулятора швидкості. За результатами параметричного синтезу були підібрані такі значення параметрів регулятора:

$$k_{p\omega} = 1,84$$

$$k_{i\omega} = 50,2$$

Після налаштування системи було виконано її імітаційне моделювання. У процесі моделювання через 60 секунд після запуску до валу двигуна прикладалося навантаження, що дозволило оцінити поведінку системи у динамічному режимі роботи та перевірити стійкість системи до зовнішніх збурень.

Результати моделювання, представлені у вигляді графіка швидкості обертання СДПМ із використанням функціональних перетворювачів, представлено на рисунку 3.7.

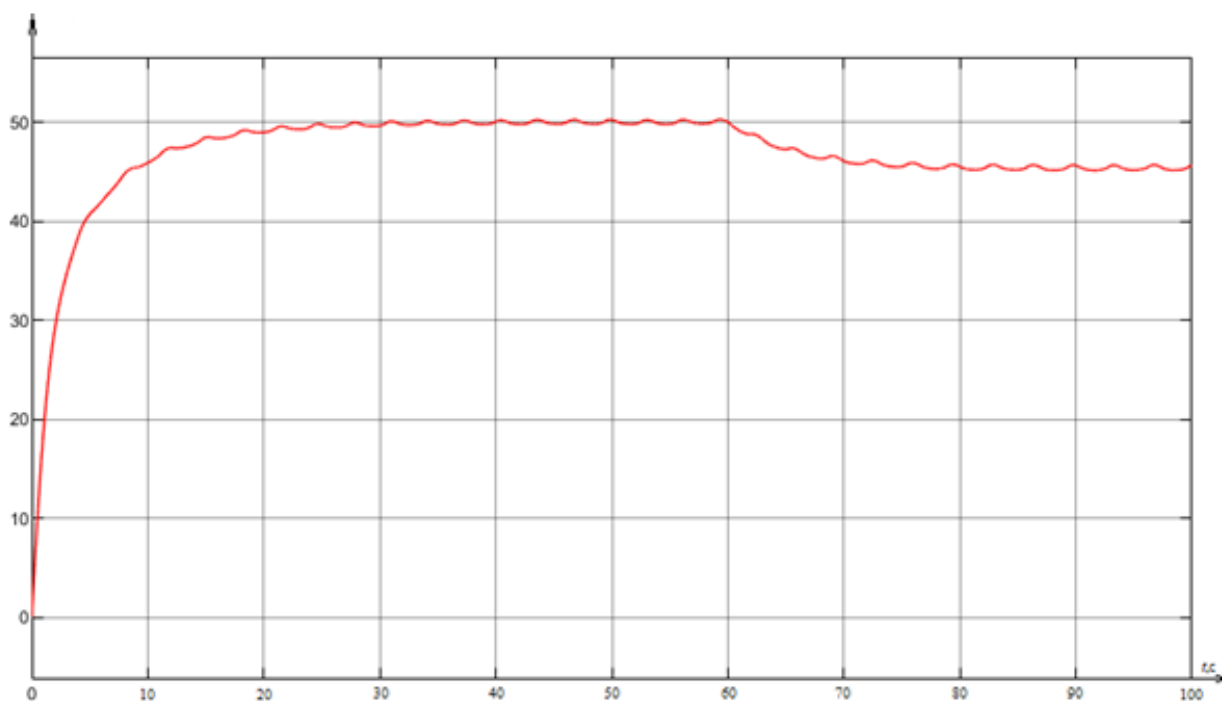


Рисунок 3.7 – Графік швидкості СД в системі з ФП

Порівняння отриманих результатів із характеристиками системи, наведеної на рис. 3.5, показує суттєве покращення динамічних властивостей електропривода при використанні функціональних перетворювачів. Зокрема, у системі з ФП спостерігається значно менше перерегулювання швидкості під час перехідного процесу — близько 6 % у порівнянні з 12 % у системі без ФП. Це вказує на покращення якості регулювання та підвищення стійкості системи керування в цілому.

Крім того, після прикладання навантаження у системі з функціональними перетворювачами спостерігаються менші коливання швидкості та швидше відновлення усталеного режиму роботи. Це пояснюється більш оптимальним формуванням складових струму статора та ефективнішим використанням електромагнітного моменту двигуна.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування функціональних перетворювачів у системах векторного керування синхронними двигунами. Використання ФП дозволяє покращити динамічні характеристики електропривода, знизити рівень коливань швидкості, зменшити перерегулювання та підвищити загальну ефективність роботи системи керування.

3.4 Моделювання системи управління з використанням бездатчикового управління

Для реалізації бездатчикової системи управління синхронним двигуном з постійними магнітами (СДПМ) необхідно сформулювати модель спостерігача стану, яка забезпечує оцінювання координат електропривода без використання механічних датчиків швидкості та положення ротора. Використання спостерігачів у системах керування електроприводами дозволяє підвищити надійність системи, зменшити її вартість та покращити експлуатаційні характеристики за рахунок відмови від фізичних сенсорів.

У даній роботі для оцінювання швидкості та кутового положення ротора було синтезовано адаптивний спостерігач стану. Його структура побудована на основі математичної моделі статора СДПМ, що описується системою диференціальних рівнянь у координатах $d-q$. Крім того, до структури спостерігача входить закон адаптації, який забезпечує автоматичне коригування оцінених параметрів системи відповідно до зміни режимів роботи електропривода.

Адаптивний механізм спостерігача містить інтегральну складову з коефіцієнтом $\lambda = 45$, що забезпечує необхідну швидкодію та стійкість процесу оцінювання. Використання інтегральної складової дозволяє зменшити похибку оцінювання швидкості ротора в усталеному режимі та підвищити точність роботи системи при дії зовнішніх збурень.

На рисунку 3.8 показано модель адаптивного спостерігача швидкості.

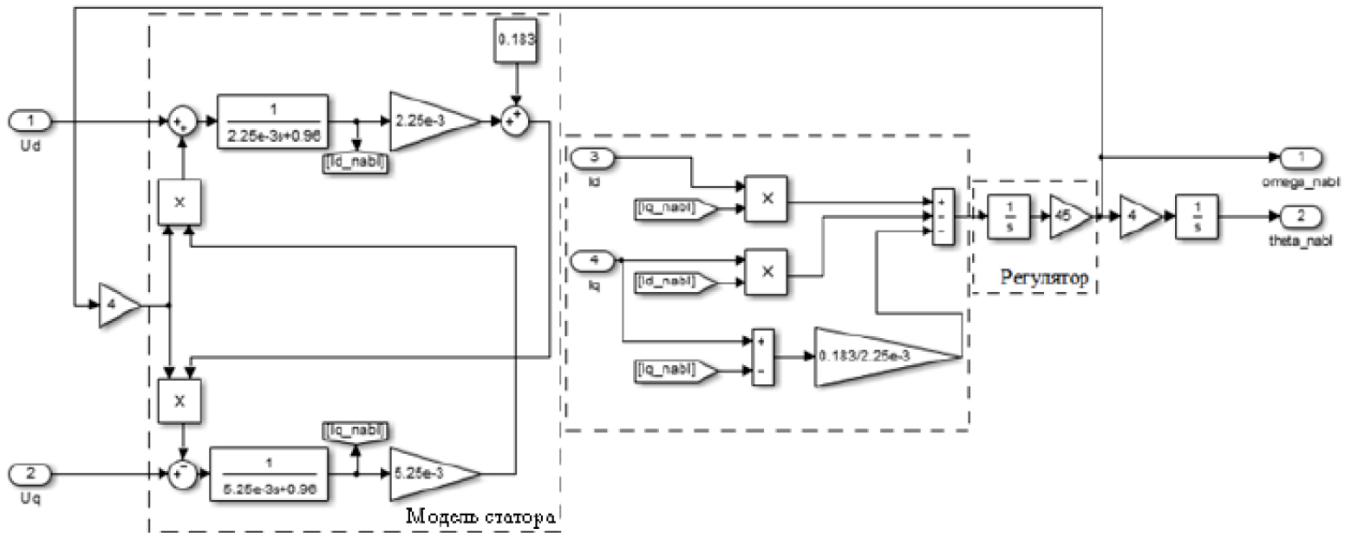


Рисунок 3.8 – Схема моделі адаптивного спостерігача швидкості

Після розробки адаптивного спостерігача було сформовано повну модель бездатчикової системи керування відповідно до функціональної схеми, наведеної на рисунку 2.11. Для цього до моделі векторної системи керування з функціональним перетворювачем було додано блок адаптивного спостерігача швидкості, який здійснює оцінювання швидкості обертання та кутового положення ротора.

Отримані оцінені значення використовуються як сигнали зворотного зв'язку у системі керування, а також застосовуються у блоках координатних перетворень. Таким чином забезпечується повноцінне функціонування системи без необхідності використання механічних датчиків положення та швидкості.

Структурна схема отриманої бездатчикової системи керування представлена на рис. 3.9.

Для перевірки працездатності та ефективності розробленої системи було проведено комп'ютерне моделювання. У процесі моделювання на вал двигуна протягом 60 секунд прикладалося навантаження, що дозволило оцінити динамічні властивості системи та її здатність компенсувати зовнішні збурення.

На рисунку 3.10 представлено графік зміни швидкості синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) у складі бездатчикової системи керування, що відображає динаміку її формування в перехідних та усталених режимах роботи.

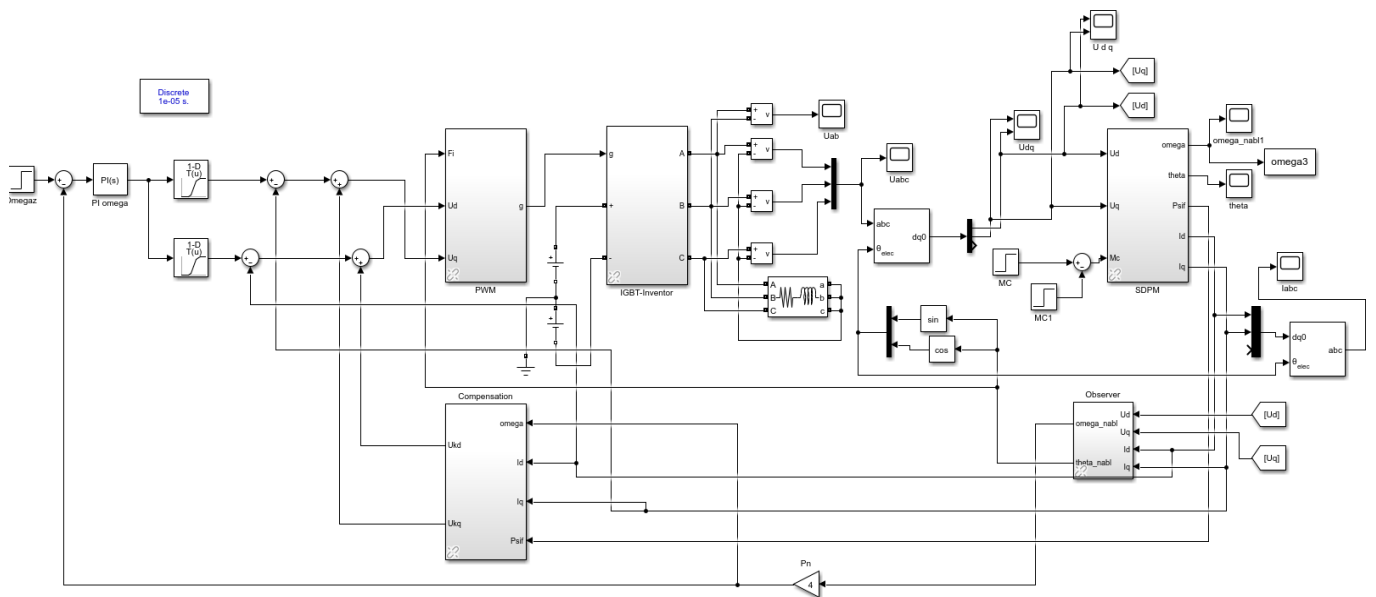


Рисунок 3.9 – Модель системи бездатчикового управління

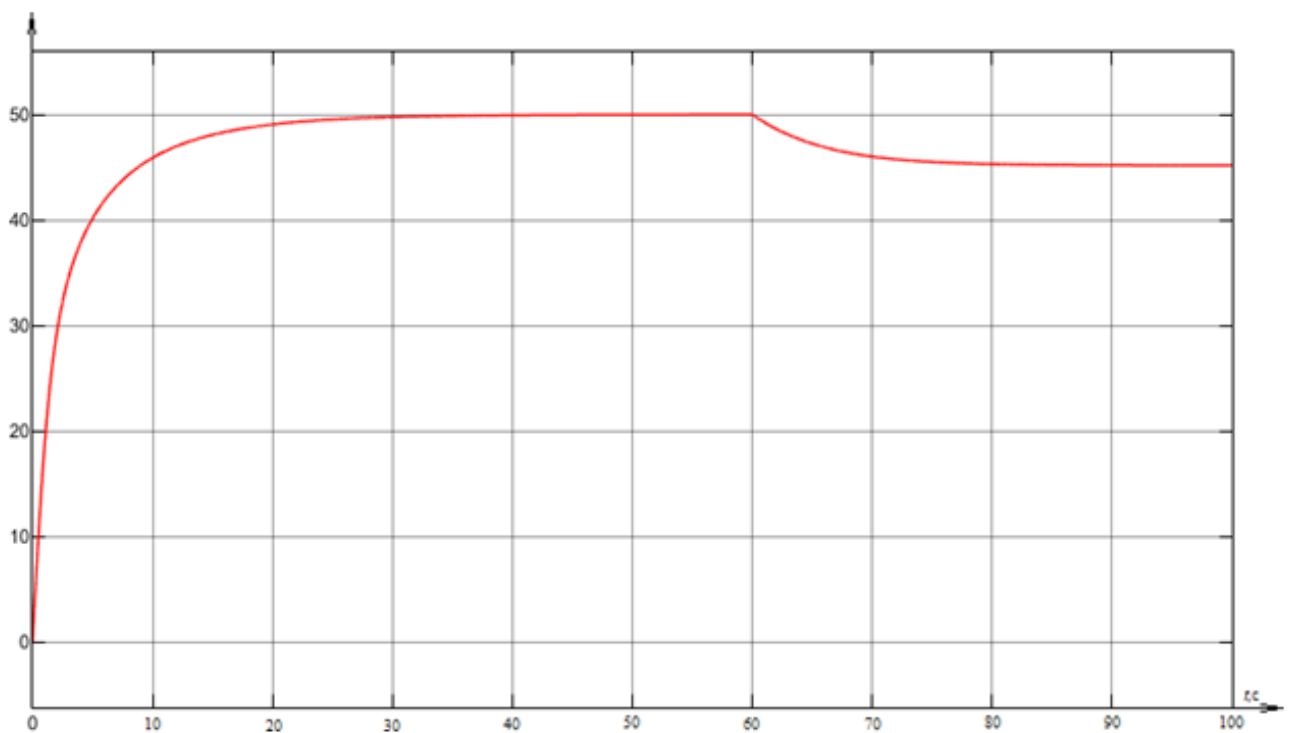


Рисунок 3.10 – Графік швидкості СДПМ з бездатчиковою системою управління

Аналіз результатів моделювання показав, що розроблений адаптивний спостерігач забезпечує стійку роботу системи навіть при зміні параметрів двигуна, зокрема при варіаціях активного опору статора. Це свідчить про достатню

робастність системи та її здатність адаптуватися до зміни умов роботи електропривода.

Крім того, з отриманих графіків видно, що при використанні адаптивного спостерігача покращується якість перехідних процесів. Зокрема, відсутні значні коливання швидкості та струмів, а процес встановлення режиму роботи відбувається швидше порівняно з іншими досліджуваними системами. Такі результати пояснюються адаптивними властивостями регулятора швидкості та ефективною роботою алгоритму оцінювання стану.

Для оцінювання ефективності розробленої системи було проведено порівняльний аналіз динамічних характеристик трьох систем керування СДПМ:

1. Векторної системи керування з нульовим завданням поздовжньої складової струму статора та датчиком положення ротора (система 1);
2. Векторної системи керування з функціональним перетворювачем (система 2);
3. Бездатчикової системи керування з адаптивним спостерігачем (система 3).

Порівняння здійснювалося за такими показниками якості:

- величина перерегулювання при відпрацюванні сигналу швидкості;
- похибка регулювання швидкості;
- час регулювання при дії збурення.

Результати порівняння наведені у таблиці 3.2.

У таблиці 3.2 наведено такі показники якості: перевищення при відпрацюванні сигналу швидкості ν км/год, процентне співвідношення сигналу швидкості ν %, контрольний час при відпрацюванні сигналу збурення t_{pf} .

Таблиця 3.2 – Порівняння динамічних показників якості систем

	ν км/год	ν %	t_{pf} , с
Система управління 1	± 6	12	25
Система управління 2	± 3	6	20
Система управління 3	50	0	15

Дані, наведені у таблиці 3.2, показують, що бездатчикова система управління демонструє найкращі динамічні характеристики серед усіх розглянутих варіантів. Зокрема, система 3 характеризується відсутністю перерегулювання, мінімальною похибкою регулювання та найменшим часом перехідного процесу.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування адаптивного спостерігача у системі керування СДПМ. Використання бездатчикowego принципу дозволяє не лише зменшити апаратну складність системи, але й забезпечити високі показники точності та швидкодії.

Таким чином, за результатами математичного моделювання та виконаного порівняльного аналізу встановлено, що розроблена бездатчикова система керування з функціональним перетворювачем забезпечує високі динамічні показники, зниження струмів статора та стабільну роботу електропривода за умов зміни параметрів двигуна і впливу зовнішнього навантаження.

Отже, поставлена у роботі мета щодо розробки ефективної бездатчикової системи керування СДПМ була успішно досягнута.

3.5 Висновки до розділу

У розділі було проведено та описано моделювання систем векторного керування СДПМ, а також їх складових. Середовищем моделювання було обрано Simulink, що входить до складу математичного пакету MATLAB. Дана програма включає в себе 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 їх роботу.

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 бездатчикowego управління з ФП – підсумкова модель.

Аналіз перехідних характеристик кожної з досліджуваних систем показує, що на кожному етапі моделювання були вирішені відповідні поставлені завдання.

У процесі роботи було розроблено адаптивний спостерігач стану, який забезпечує визначення кутового положення та швидкості обертання ротора (СДПМ). Отримані результати демонструють, що спостерігач коректно виконує свої функції навіть за незначних змін активного опору статора двигуна, що підтверджується графіками перехідних процесів.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням [14].

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його

проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за

колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, крЗПильних елементів; справність введів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що крЗПлять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального

захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потріскуванні всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

4.2 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної і світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мінімальні терміни.

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах НС.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

- надійність захисту робітників та службовців;
- спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;
- захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);

– надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);

– стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;

– підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

– укриття людей в захисних спорудах;

– проведення евакозаходів;

– радіаційно-хімічний захист;

– медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкції об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

а) підвищення стійкості електрозабезпечення:

– розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;

– закілювання електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;

– створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

– водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;

– захист вододжерел та резервуарів чистої води;

– створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

в) підвищення стійкості систем газу, тепло- та паливо- забезпечення:

– розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;

– газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;

– встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

- максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;
- проведення профілактичних протипожежних заходів;
- підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);
- забезпечення ПУ засобами зв'язку;
- використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискореного (негайного) відновлення порушеного виробництва;
- розробка необхідної технічної та технологічної документації;
- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;
- розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;
- визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;
- висока підготовка керівного складу;
- своєчасне прийняття вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведенням комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків НС.

Інженерно-технічні заходи – це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунально-енергетичних систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО при захисті робітників і службовців, проведенні РіНР, відновленні виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено модель синхронного двигуна з постійними магнітами у системі координат (d,q) . Побудована модель враховує електромагнітні та механічні процеси, що відбуваються в електроприводі, і дозволяє досліджувати режими роботи двигуна при різних навантаженнях та умовах керування. На основі отриманої математичної моделі створено структурну схему електропривода та проведено налаштування регуляторів струму і швидкості.

У середовищі MATLAB із використанням пакета Simulink було реалізовано моделі трьох систем керування СДПМ: системи з датчиком положення ротора, системи з використанням функціональних перетворювачів та бездатчикової системи керування з адаптивним спостерігачем стану. Проведене моделювання дозволило дослідити динамічні характеристики кожної із систем, оцінити якість регулювання швидкості та стійкість роботи електропривода при зміні навантаження.

У ході дослідження встановлено, що застосування функціональних перетворювачів сприяє покращенню динамічних властивостей системи, зменшенню перерегулювання та підвищенню енергоефективності електропривода завдяки раціональному формуванню складових струму статора.

Найбільш ефективні результати отримано для бездатчикової системи керування з адаптивним спостерігачем стану, яка забезпечує мінімальну похибку регулювання, високу швидкодію та стійку роботу в умовах зміни параметрів двигуна і впливу зовнішніх збурень. У роботі також було створено адаптивний спостерігач стану, який забезпечує оцінювання швидкості обертання та кута положення ротора без використання механічних датчиків. Застосування бездатчикового принципу керування дозволяє підвищити надійність системи, знизити її вартість та спростити конструкцію електропривода. Результати проведеного моделювання підтвердили працездатність та ефективність розробленої системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G. Baoming, A. de Almeida and F. J. Ferreira, “Design of Transverse Flux Linear Switched Reluctance Motor,” IEEE Transaction on Magnetics, vol. 45, no. No. 1, pp. 113-119, January 2009.
2. Lin F.J., Wai R.J. Robust recurrent fuzzy neural network control for linear synchronous motor drive system. Neurocomputing. – 2003. – Т. 50. Рр. 365-390.
3. Скочиляс, О. І., & Буняк, О. А. (2025). Аналіз функціонування захистів асинхронних двигунів. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 59-59.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. A. D. Almeida, J. Fong, C. Brunner, R. Werle and M. V. Werkhoven, “New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems - A major opportunity for energy and carbon savings,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 115, 2019.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с..
7. АНДРІЙЧУК, В., НАКОНЕЧНИЙ, М., ФІЛЮК, Я., КОСТИК, Л., & КОЗАК, І. (2023). Електропривід рухомої опромінювальної установки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 329(6), 44-48.
8. J. Malinowski, W. Hoyt, P. Zwanziger and B. Finley, “Motor and Drive-System Efficiency Regulations: Review of Regulations in the United States and Europe,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 23, no. 1, pp. 34-41, January/February 2017.
9. Шворак, Д. А., & Наконечний, М. С. (2024). Методи регулювання асинхронних двигунів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної

конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 289-289.

10. Белякова, І. В., Вакуленко, О. О., & Ришиковець, О. Л. (2018). Досвід підвищення енергоефективності на автотранспортному підприємстві. Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 3, 9-10.

11. F. J. T. E. Ferreira and A. T. de Almeida, “Reducing Energy Costs in Electric-Motor Driven Systems: Savings Through Output Power Reduction and Energy Regeneration,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 24, no. 1, pp. 84-97, Jan.-Feb. 2018.

12. S. Fassbinder, “Saving Energy with High Efficiency Motors,” Leonardo Energy, 2007

13. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПІІ Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

14. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик, І. Б. Окіджний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.