

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Моделювання електропривода трубопровідної арматури з синхронним двигуном з постійними магнітами**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТз-41
спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Сидор М. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Закордонець В. С.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л. Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В. П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Шелестовський Б. Г.
(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

_____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)
« » 20__ 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 Сидору Максиму Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання електропривода трубопровідної арматури з синхронним двигуном з постійними магнітами

Керівник роботи Закордонець Володимир Савич, к. ф-м. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «04» травня 2026 року № 4/9-214

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Параметри запірно-регульованої апаратури

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський розділ

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТз-41 - Т.: ТНТУ, 2026.

Стор. 61; рис. 33; табл.; джерел 13; додатків 0.

Кваліфікаційну роботу присвячено моделюванню електроприводу запірно-регулюючої арматури на базі синхронного двигуна з постійними магнітами Siemens SIMOTICS S (0,75 кВт, 7,2 Нм) та безлюфтового хвильового редуктора. Математичний опис системи виконано в координатах dq з орієнтацією за потоком ротора. У програмі MATLAB Simulink розроблено триконтуру систему підпорядкованого регулювання, в якій контур струму був налаштований на частоту ШІМ 5 кГц, контур швидкості - на симетричний оптимум, а в контурі положення використано задавач інтенсивності з постійною часу 0,68 для усунення перерегулювання. Моделювання підтвердило стійкість приводу в усіх режимах, зокрема під час посадки затвора в сідло, де перехід регулятора швидкості в насичення забезпечує герметичність арматури та надійний захист двигуна.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД,
ТРУБОПРОВІДНА АРМАТУРА, СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ
МАГНІТАМИ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ,

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Типи трубопровідної арматури	8
1.2 Особливості конструкції синхронних двигунів з постійними магнітами.	10
1.3 Підходи в управлінні синхронним двигуном з постійними магнітами..	14
1.4 Основні вимоги до електроприводу запірної арматури.....	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	18
2.1 Вибір електроприводу	18
2.2 Вибір редуктора	20
2.3 Вибір системи управління.....	22
2.4 Представлення електричної машини в рухомій системі координат dq , орієнтованій за вектором магнітного потоку ротора.	23
2.5 Особливості синхронного двигуна з постійними магнітами	26
2.6. Векторна діаграма і структурна схема синхронного двигуна з постійними магнітами	27
2.7 Параметри силової частини електроприводу.....	31
2.8. Налаштування регулятора контуру струму.....	31
2.9. Налаштування регулятора контуру швидкості	33
2.10. Налаштування регулятора контуру положення	35
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	38
3.1 Опис моделі електроприводу трубопровідної арматури	38
3.2 Дослідження основних режимів роботи електроприводу	42
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	53
4.1 Аналіз заходів безпеки при роботі з електроустаткуванням.....	53
4.2 Нормативні вимоги щодо проектування об'єктів енергетики	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60

ВСТУП

Характерною рисою сучасної індустрії є масштабна цифровізація та автоматизація виробничих циклів, що трансформує як локальні інженерні задачі, так і функціонування розгалужених промислових систем. Рішення комплексних інженерних задач вимагає модернізації компонентної бази, розширення функціональних можливостей обладнання та розробки високоефективних систем керування.

Провідною тенденцією у вирішенні цих завдань є впровадження автоматизованого електроприводу. Застосування керованого силового перетворювального обладнання, енергоефективних двигунів і мікропроцесорних систем контролю дозволяє оптимізувати роботу технічних комплексів та підвищити якість виробничих процесів. Особливо гостро це питання стоїть у сфері керування трубопровідною запірною-регулюючою арматурою. Порівняно з гідравлічними чи пневматичними аналогами, електричний привід має вагомі переваги: високу економічність, простоту передачі та перетворення електричної енергії в механічну, легкість підведення живлення в робочу зону та широкі можливості регулювання координат руху.

Застосування автоматизованого електроприводу для трубопровідної арматури дозволяє здійснювати безперервний моніторинг її стану, оперативно керувати потоками, тиском та об'ємами рідин і газів. Це мінімізує вплив людського фактора, суттєво підвищує рівень безпеки та надійності об'єктів, а також знижує собівартість кінцевого продукту.

На сучасному етапі електропривід перетворився на складну структуру, що об'єднує електродвигун, силове перетворювальне обладнання, механічні передавальні пристрої, а також комплекси датчиків зворотного зв'язку і комутаційної апаратури. Жорсткі вимоги до точності та енергоефективності технологічних процесів зумовлюють перехід до замкнених систем автоматичного керування. Такі системи спроможні реалізовувати складні

адаптивні алгоритми контролю, забезпечуючи оптимальні динамічні режими роботи при мінімальному енергоспоживанні.

Метою роботи є: підвищення надійності та енергоефективності функціонування трубопровідної арматури шляхом розробки замкнутої системи автоматизованого електроприводу з оптимізованими алгоритмами керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Проаналізувати сучасний стан, технологічні вимоги та особливості функціонування автоматизованих електроприводів запірної і регулюючої арматури.

Обґрунтувати вибір структури електроприводу (типу електродвигуна, силового перетворювача та засобів автоматизації) відповідно до заданих технологічних умов.

Розробити математичний опис та комп'ютерну (або імітаційну) модель системи «перетворювач — двигун — виконавчий механізм арматури» для дослідження перехідних процесів.

Дослідити пускові, робочі та аварійні режими роботи системи, оцінити її енергетичну ефективність та захисні функції (зокрема, тепловий захист та обмеження моменту).

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Типи трубопровідної арматури

Трубопровідною арматурою називають технічний пристрій, який інтегрується в магістральну систему для безпосереднього керування параметрами потоку робочого середовища (рідкого або газоподібного) шляхом його перекриття, відсікання, регулювання чи змішування. Основним принципом роботи є зміна площі прохідного перетину. Розрізняють трубопровідну арматуру за видами, типами та функціональним призначенням. Розглянемо детальніше ці розділи.

Відповідно до функціонального призначення, виділяють такі категорії пристроїв:

1. Запірна. Поступальний рух робочого органу з одного крайнього положення в інше. Основне її призначення полягає в перекритті потоку із заданою герметичністю на вимогу технологічного процесу.

2. Регулююча. Поступальний рух робочого органу в будь-яке положення із заданою точністю. Призначена для управління та регулювання робочих параметрів шляхом зміни витрати або прохідного перетину.

3. Зворотна. Розрахована для запобігання протіканню зворотного потоку при зміні напрямку його руху за допомогою щільного перекриття труби.

4. Запобіжна. Є захисним заходом для обладнання і трубопроводу. Запобігає неприпустимому підвищенню тиску, скидаючи надлишки робочого середовища через масовідвід.

5. Розподільно-змішувальна: застосовується для комутації чи змішування робочих середовищ. Завдяки відповідному положенню запірного органу вона дозволяє розділяти один вхідний потік на кілька напрямків або, навпаки, об'єднувати декілька потоків у загальний вихідний колектор.

Крім призначень, також є різні типи арматури, що відрізняються між собою робочим органом: засувки, крани, клапани.

Засувка належить до найпопулярніших типів промислової арматури, де замикаючий елемент рухається перпендикулярно до осі технологічного потоку [1]. Вони орієнтовані на перекриття магістралей умовним діаметром 50–2000 мм при тиску до 20 МПа і температурах середовища, що сягають 450 °С. Робочим станом для засувки є крайні положення — повне відкриття або повне закриття каналу, хоча інколи їх застосовують для грубого дискретного регулювання витрати. Механізм дії пристрою ґрунтується на механічному перекритті прохідного перетину, як показано на рисунку 1.1.

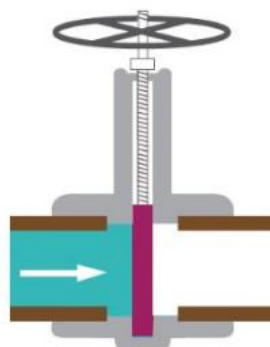


Рисунок 1.1 – Принцип роботи засувки

За видами розрізняють кілька груп трубопровідної арматури:

- Неавтоматизована (ручна). Управління здійснюється шляхом передачі обертання від ручного дублера, який приводить в обертання оператор самостійно. Часто зустрічається даний вид в місцях, де не передбачені умови для роботи електронних пристроїв.

- Автоматизована. Управління здійснюється шляхом механічної передачі, як правило, через редуктор. Ініціатором для перетворення в обертання може бути як будь-яке стороннє джерело енергії, так і робоче середовище. Система не є самоналагоджувальною і вимагає дій оператора в своїй роботі.

- Автоматична. Містить в собі принцип роботи, як в автоматизованій. Участь оператора в даному випадку полягає тільки в одноразовому запуску системи.

1.2 Особливості конструкції синхронних двигунів з постійними магнітами.

Головна відмінність синхронного двигуна з постійними магнітами від класичної машини з електромагнітним збудженням полягає в тому, що основний магнітний потік ротора створюється автономними ПМ. Завдяки цьому двигун позбавлений рухомих ковзних контактів (щіток та контактних кілець) і не потребує зовнішнього джерела постійного струму для живлення індуктора. Водночас за своїми пусковими та робочими характеристиками СДПМ дуже близькі до традиційних синхронних двигунів.

Ротори таких машин мають комбіновану структуру, яка поєднує в собі елементи двох типів двигунів: синхронного (безпосередньо постійні магніти) та асинхронного (короткозамкнена пускова обмотка, виконана у вигляді «білячої клітки»).

На сьогодні найбільшого поширення набули два типи компоновки роторів.

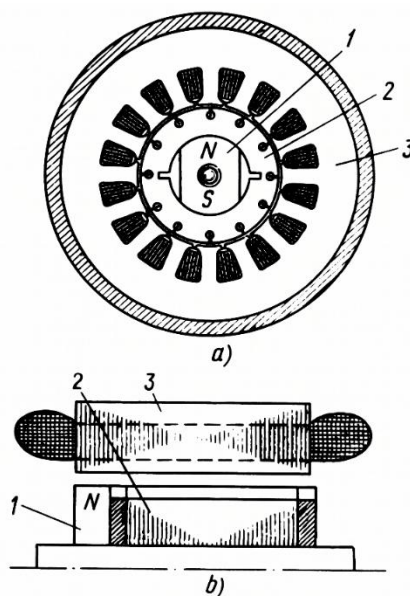


Рисунок 1.2 – Конструктивні варіанти виконання ротора СДПМ: а) – радіальне розташування елементів; б) – аксіальне (торцеве) розташування елементів.

У першому варіанті (рисунок 1.2а) постійні магніти 1 та шихтоване сталеве осердя 2 з короткозамкненою обмоткою розміщені в розточці статора 3 радіально. У другому варіанті (рисунок 1.2б) реалізовано аксіальну схему. Ротори з аксіальним розташуванням зазвичай застосовують у багатополюсних машинах із малим внутрішнім діаметром статора, коли впровадження радіальної конструкції (яка є значно кращою з електромагнітної точки зору) утруднене через геометричні обмеження.

Під час увімкнення в мережу двигун починає розгін як звичайна асинхронна машина: обертовий момент виникає внаслідок взаємодії обертового магнітного поля статора із струмами, що індукуються в короткозамкненій обмотці ротора. Коли частота обертання наближається до синхронної, ротор — завдяки тяговому зусиллю між ПМ та магнітним полем статора — втягується в синхронізм і далі обертається із чітко синхронною швидкістю. Специфіка пуску СДПМ полягає в тому, що вони розганяються у вже збудженому стані. Для порівняння, у класичних двигунах з електромагнітним збудженням обмотку ротора під час пуску зазвичай відключають від джерела постійного струму або замикають на гасильний опір. У процесі розгону ротора під дією корисного асинхронного моменту M_a , магнітне поле постійних магнітів наводить в обмотках статора власну ЕРС. Ця ЕРС не збалансована з напругою мережі живлення, оскільки її частота визначається поточною швидкістю ротора:

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60}$$

Оскільки під час розгону швидкість ротора менша за синхронну ($n_2 < n_1$), частота індукованої ЕРС f_2 не дорівнює частоті мережі f_1 :

$$f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60}$$

Через цю різницю частот у колі статора виникають додаткові струми. Взаємодіючи з полем ротора, вони створюють гальмівний (генераторний) момент M_g , який діє в протилежний бік до корисного пускового моменту M_a .

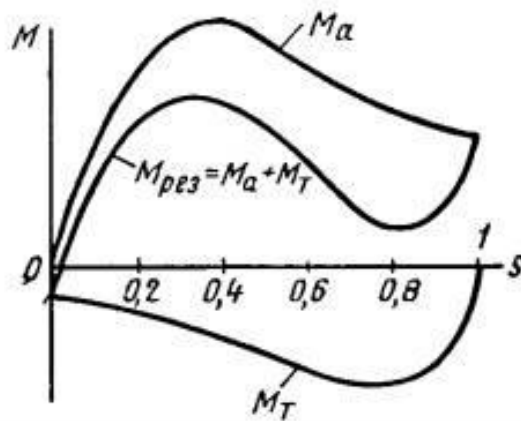


Рисунок 1.3 – Пускові властивості двигунів.

Наявність гальмівного моменту погіршує пускові якості СДПМ (рисунок 1.3), що вимагає ретельного інженерного аналізу при проектуванні — передусім правильного вибору ступеня збудження постійних магнітів.

Підвищення залишкової індукції та магнітного потоку ПМ, з одного боку, збільшує сталий синхронний момент (а отже, і граничну потужність машини), але з іншого — різко підвищує гальмівний момент під час розгону. За помилкового розрахунку двигун або взагалі не зможе запуснитися через надмірне гальмування, або не видасть необхідної потужності в робочому синхронному режимі.

Завдяки поєднанню надійності та стабільності робочих параметрів, СДПМ знайшли широке застосування. Вони мають постійну миттєву кутову швидкість у межах одного оберту, високий коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) та високий ККД. Використання ПМ — це ефективний спосіб знизити масу й габарити машини, спростити її обслуговування та ліквідувати втрати на збудження. Сьогодні активно впроваджуються системи з комбінованим (гібридним) збудженням, де постійні магніти працюють спільно з класичними обмотками, які живляться постійним струмом. Такий підхід поєднує автономність ПМ із гнучкістю електромагнітного керування, дозволяючи регулювати напругу і частоту обертання при значно менших затратах

потужності на керування та менших габаритах магнітної системи. Історично використання ПМ тривалий час обмежувалося машинами потужністю в кілька кіловольт-ампер. Проте поява нових високоеерцетивних матеріалів (насамперед на основі рідкоземельних елементів неодим-залізо-бор NdFeB та самарій-кобальт SmCo) дозволяє стабільно нарощувати одиничну потужність двигунів.

В наш час СДПМ широко застосовуються в різних галузях виробництва;

- Важка промисловість (шахти, металургійні заводи, теплові станції). У цих сферах синхронні двигуни з постійними магнітами працюють у ролі надійних приводів для конвеєрів, потужних вентиляторів та інших великогабаритних агрегатів. Вони забезпечують стабільну роботу обладнання навіть у важких умовах експлуатації та за значних навантажень.

- Енергетика (станції та підстанції). Тут застосовуються спеціальні синхронні машини, які працюють у режимі холостого ходу і виробляють виключно реактивну потужність. Ця потужність є необхідною для забезпечення роботи численних асинхронних двигунів, підключених до загальної мережі. Самі ж синхронні машини у такому режимі називають «компенсаторами».

- Насосні та холодильні компресорні установки. Оскільки синхронні двигуни здатні ефективно працювати з найрізноманітнішою реактивною потужністю, їх масово впроваджують у промислові холодильники, насоси та аналогічні механізми, які потребують суворо незмінної, стабільної швидкості роботи незалежно від коливань тиску чи опору середовища.

- Прецизійне приладобудування та автоматика. Електродвигуни на постійних магнітах є незамінними у пристроях і приладах малої потужності, де ключовою вимогою є точне і суворе дотримання сталості швидкості. Їх використовують як виконавчі двигуни в автоматичних самописних приладах,

електрогодинах, системах програмного керування та інших високоточних апаратах.

1.3 Підходи в управлінні синхронним двигуном з постійними магнітами

Розширення ринку СДПМ зумовлене їхніми високими енергетичними показниками, зокрема покращеним ККД та масогабаритними характеристиками [1]. Головна відмінність між СДПМ та асинхронною машиною криється у будові ротора: відсутність короткозамкненої обмотки дозволяє підняти ККД приводу в середньому на 2% за однакових параметрів статора та силового інвертора [2]. Функціонування двигуна забезпечується напівпровідниковими перетворювачами частоти чи серводрайверами, що реалізують різні підходи до керування. Для невибагливих локальних систем достатньо трапецієподібного алгоритму із датчиками положення Холла, тоді як для високодинамічних та точних приводів обов'язковим є впровадження векторних методів контролю [3].

Головними перевагами скалярного керування є алгоритмічна простота та низька вартість реалізації. Проте цей метод неефективний за низьких частот обертання та динамічно змінного навантаження на валу. У разі перевищення навантаженням критичного значення моменту, синхронна машина випадає із синхронізму та втрачає керуваність.

Суть скалярного підходу полягає в підтримці постійного співвідношення між амплітудою та частотою напруги живлення ($U/f = \text{const}$) у всьому робочому діапазоні, де об'єктами контролю є лише модуль і частота напруги статора. Базове співвідношення U/f розраховується за номінальними параметрами двигуна. Його незмінність забезпечує стабільність магнітного потоку в повітряному проміжку. Завищення цього відношення призводить до перезбудження машини та насичення магнітопроводу, а зниження — до її недозбудження та просідання моменту.

На відміну від скалярного, векторне керування СДПМ реалізується трьома основними модифікаціями:

Польоорієнтоване керування з датчиком положення: забезпечує прецизійне та плавне регулювання швидкості, моменту, а також кутової координати ротора. Як чутливі елементи використовують оптичні чи магнітні енкодери, синусно-косинусні обертові трансформатори (СКОТ) та магніторезистивні датчики. Такі системи потребують значних обчислювальних ресурсів і точної ідентифікації параметрів об'єкта, що здорожує кінцеве рішення. Їх впровадження є доцільним лише у високоточних приводах верстатів із ЧПУ, робототехніці та дозувальних комплексах.

Бездатчикове польоорієнтоване керування : базується на математичному обчисленні кутового положення ротора за величиною робочої проти-ЕМС, що індукується в статорних обмотках під час обертання. Метод є надійним на наднизьких швидкостях і при зупинці, оскільки корисний сигнал проти-ЕМС згасає до рівня електромагнітних шумів. Безсенсорне керування найкраще підходить для СДПМ із явнополюсним ротором, тоді як для неявнополюсних машин діапазон регулювання суттєво звужується. Схема вимагає потужного мікропроцесорного контролера для розрахунку спостерігачів стану.

Пряме керування моментом (DTC: гарантує високу швидкодію та широкі межі регулювання швидкості. Проте його застосування обмежується підвищеними пульсаціями моменту і струму статора, а також значною похибкою визначення поточного положення ротора на певних частотах. Алгоритм DTC створює високе обчислювальне навантаження на керуючий процесор.

1.4 Основні вимоги до електроприводу запірної арматури

У промисловості найширшого поширення набув регульований електропривод. Як електромеханічна система він керує параметрами технологічного процесу, змінюючи стан робочого середовища (тиск, температуру тощо).

Сучасний електропривод загального призначення має відповідати таким базовим вимогам; надійність: безвідмовний функціонал у заданих умовах протягом визначеного часу, точність: забезпечення допустимого технологічним процесом рівня похибки (статичного відхилення), швидкодія: оптимальна швидкість реакції системи на динамічні зміни в процесі, якість динамічних процесів: плавність протікання перехідних процесів у часі (мінімізація часу перерегулювання), енергоефективність: максимізація ККД і недопущення надмірного, технологічно невиправданого споживання енергії, сумісність: мінімізація впливу вищих гармонік від перетворювачів приводу на інше обладнання електромережі.

Електропривод є пріоритетним вибором для запірної арматури завдяки можливості дистанційного керування, діагностики та точного позиціонування. Додатково до нього висуваються такі технічні вимоги:

- Забезпечення чітко заданих моментів та швидкостей обертання.
- Висока точність переміщення робочого органу (позиціонування).
- Наявність ручного дублера на випадок аварійних ситуацій.
- Підтримка як місцевого, так і дистанційного керування.
- Індикація робочих параметрів на локальній панелі та пульті оператора.

Електроприводи запірної арматури виконують низку специфічних технологічних завдань:

Автоматичне відключення в кінцевих положеннях. Здійснюється двома шляхами: за шляхом (досягнення заданої координати) або за моментом на валу. На практиці частіше застосовують зупинку за моментом, оскільки це забезпечує щільне сидання запірного органу та герметичність арматури.

Захист від перевантажень за моментом. Спрацьовує не лише наприкінці ходу, а й у проміжних положеннях. Якщо запірний елемент заклинює (через потрапляння стороннього предмета), система негайно вимикає двигун.

Тепловий захист. Вбудовані датчики температури (термовимикачі або РТС-термістори) захищають обмотки двигуна від перегріву та надмірних струмів, знеструмлюючи привід у разі перевищення температурного ліміту.

Автономне регулювання. Сучасні приводи оснащуються вбудованими ПД-регуляторами. Це дозволяє приводу самостійно керувати технологічним процесом на віддалених об'єктах, виконуючи функції програмованого логічного контролера (ПЛК) без встановлення додаткового обладнання.

Equation Section 2

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір електроприводу

Стосовно регулюючої арматури, широке застосування знайшли такі приводи, які мають ряд переваг: малі габарити, можливість створення необхідного крутного моменту і підтримання його постійності під час руху, можливість дистанційного керування і простота.

Кілька десятків років тому для таких цілей використовувалися двигуни постійного струму незалежного збудження. Вони мають відповідні характеристики, але мають істотний недолік, через який в даний час виходять з кола уваги. Щітко-колекторний вузол часто приходиться в непридатність, на ньому втрачається багато енергії, а також він є джерелом іскріння. На зміну таким електроприводам прийшли приводи на основі змінного струму.

Практично в будь-якій галузі застосовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. Характеристики у нього явно гірші: невеликий момент, затягування засувки і можливе просідання напруги мережі при неправильно підібраній потужності, а також введення реактивної складової в мережу при його використанні роблять його не кращим за вищеописаний ДПТ НВ. Але він дуже простий у використанні, тому його застосовують практично скрізь.

Останнім часом все більше знаходять застосування синхронні електроприводи з постійними магнітами (СДПМ). Такий двигун позбавлений обмотки в роторі, що дозволяє знизити масу і прибрати електричні втрати в ній. Також вони мають постійну швидкість при навантаженні. Синхронний двигун має перевагу за реактивною потужністю, при $\cos\varphi = 1$ він живиться тільки активним струмом, також він може виступати в якості компенсатора реактивної енергії

Ротор являє собою постійний магніт (рисунок 2.1), полюси якого притягуються обертовим полем статора, внаслідок чого створюється крутний момент. Завдяки цьому в таких двигунах відсутнє ковзання.

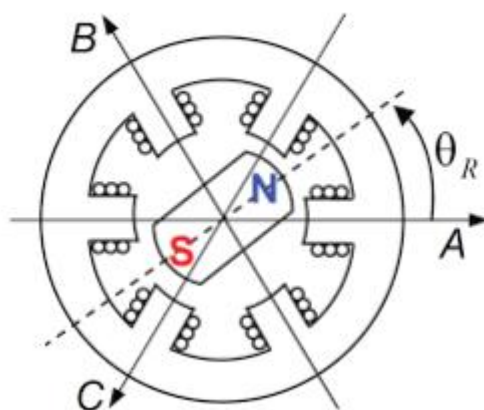


Рис. 2.1 – Принцип роботи синхронного двигуна з постійними магнітами

Для поточних досліджень був обраний синхронний електродвигун Siemens SIMOTICS S 1FK7083-2AF71-1QG0. Технічні характеристики представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики

Найменування	Значення
Марка	SIMOTICS S 1FK7083-2AF71-1QG0
Корисна потужність,	0,75
Номінальна частота обертання, об/хв	1000
Номінальний крутний момент, Нм	7,2
Амплітудна/діюча напруга, В	311/220
Амплітудний/діючий струм, А	3,96/2,8
Частота мережі живлення, Гц	133,33
Кількість фаз	3

Продовження Таблиці 2.1

З'єднання фаз	Y – «Зірка»
Кількість пар полюсів	8
ККД, %	80%
Коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$	0,99
Кріплення	IM3681
Ступінь захисту	IC40
Опір обмотки статора, Ом	1,4
Потокозчеплення від постійних магнітів, мВс	182,916
Індуктивність обмотки статора в осі d, мГн	3,768
Індуктивність обмотки статора в осі q, мГн	6,287
Момент інерції ротора, кг/м ²	$0,951 \cdot 10^{-3}$

2.2 Вибір редуктора

Редуктори є необхідною частиною для передачі необхідного зусилля.

Розрізняють кілька видів і типів, які відрізняються як способом передачі крутного моменту, так і конструктивними особливостями. Можна виділити кілька типів редукторів:

- Циліндричний редуктор. Він відрізняється невеликими розмірами і енергоефективністю. Це обладнання використовується в найрізноманітніших промислових цілях, але в основному застосовується для виконання важких завдань. Циліндричний редуктор широко поширений у виробництві пластмас, цементу, гуми та інших галузях важкої промисловості. Малопотужні додатки, такі як дробарки, екструдери, охолоджувачі та конвеєри, можуть отримати вигоду від цього матеріалу.

- Циліндричний редуктор незвичайний тим, що він встановлений під кутом, що дозволяє більшій кількості зубців взаємодіяти в одному напрямку під час руху. Це забезпечує безперервний зв'язок протягом певного часу.

- Конічний редуктор. Цей вид редуктора відрізняється наявністю ряду вигнутих зубців, розташованих на конусоподібній поверхні поблизу обода

пристрою. Конічний редуктор використовується для створення оберտального руху між непаралельними валами. Зазвичай застосовується в кар'єрах, гірничодобувній промисловості та на конвеєрах.

- Черв'ячні редуктори. Черв'ячні редуктори приводять в рух важкі завдання. Ці редуктори використовуються в тих випадках, коли необхідно знизити швидкість між непересічними осьовими валами. У цьому типі промислових редукторів використовується черв'ячне колесо великого діаметра. Черв'як або гвинт з'єднується із зубами на зовнішній стороні редуктора. Завдяки гвинтоподібному руху, викликаному обертанням черв'яка, колесо рухається аналогічним чином. Більшість таких редукторів використовується в важкій промисловості, наприклад, у виробництві добрив, хімікатів і мінералів. .

- Планетарний редуктор. Три або чотири планетарні шестерні оточують сонячну шестерню в центрі планетарного редуктора. Всі вони утримуються разом кільцевою шестернею з внутрішніми зубами. Така конструкція дозволяє планетарній системі передач створювати високий крутний момент на невеликій площі за рахунок рівномірного розподілу потужності між шестернями. Цей тип редуктора переважає в передових технологіях, таких як роботи і 3D-друк.

- Планетарний редуктор ідеально підходить для точних застосувань завдяки своїй довговічності, точності та особливій функціональності. Цей тип редуктора підвищує довговічність і продуктивність вашого обладнання. Планетарні редуктори випускаються в суцільному або порожнистому виконанні і з різними варіантами кріплення, такими як фланець, вал або лапа.

- Хвильовий редуктор. Це тип механічної системи передачі, в якій використовується гнучкий шліц із зовнішніми зубами, який деформується обертовим еліптичним плунжером для зачеплення з внутрішніми зубами зовнішнього шліца.

Хвильовому редуктору притаманні певні переваги перед традиційними, такими як косозубі або планетарні передачі, в тому числі:

- відсутність люфту
- компактність і мала вага
- високі передавальні числа
- можливість зміни передавальних чисел у стандартному корпусі
- хороша роздільна здатність і відмінна повторюваність
- високий крутний момент
- співвісність вхідного і вихідного валу

Високі передавальні числа можливі при невеликому обсязі (співвідношення від 30:1 до 320:1 можливе в тому ж просторі, в якому планетарні редуктори зазвичай дають тільки співвідношення 10:1).

До недоліків відноситься схильність до «закручування» (кручення пружини) в області низького крутного моменту.

Хвильовий редуктор широко використовується в робототехніці та аерокосмічній промисловості. Вона може забезпечувати зниження передачі, але також може використовуватися для збільшення швидкості обертання або для диференціальної передачі.

Для даного завдання вибираємо хвильовий редуктор з проміжними тілами кочення.

2.3 Вибір системи управління

Класичний підхід, за якого поле статора змушене «тягнути» за собою ротор, робить роботу СДПМ малоефективною. Тому на практиці застосовують різноманітні стратегії керування — від простих скалярних до складних векторних і багатоконтурних систем. Вибір конкретної системи керування цілком залежить від поставлених цілей та умов експлуатації двигуна.

Більшість електроприводів реалізуються без будь-якої системи керування, звичайним пуском, оскільки не ставляться вимоги щодо регулювання. Але в сферах, де необхідне чітке позиціонування або дотримання зусилля, заданої швидкості та багатьох інших параметрів,

найчастіше використовують систему із зворотними зв'язками. Вони ж, у свою чергу, допомагають зрозуміти конкретний стан електроприводу.

Найефективнішим способом керування є векторне, орієнтоване за вектором потокозчеплення ротора. Суть методу полягає в активному формуванні просторового положення вектора магнітного поля статора відносно ротора. Замість пасивного затягування індуктора в синхронізм, система створює виштовхувальне електромагнітне зусилля, спрямоване строго перпендикулярно до магнітної осі ротора. З курсу фізики відомо, що якщо струм, що протікає по провіднику, і силові лінії магнітного поля перпендикулярні, то на провідник буде діяти максимальна сила Ампера, і провідник відштовхнеться. Оскільки обмотка статора жорстко закріплена, то штовхатися і внаслідок цього обертатися буде ротор. Для цього необхідно знати положення валу, щоб визначити, як спрямовані силові лінії магнітного поля ротора. Тоді на статорі можна створювати такий вектор струму, який буде перпендикулярний їм. В якості датчика положення використовується синусно-косинусний датчик, що показує положення електричного кута між двома сусідніми полюсами.

2.4 Представлення електричної машини в рухомій системі координат dq , орієнтованій за вектором магнітного потоку ротора.

Для нашого розуміння звична трифазна система, де сигнал змінюється гармонічно. При розгляді такої системи вводять абстрактний вектор, що обертається відносно нерухомих осей (рисунок 2.2).

Представлені на рисунку фазні струми є проекціями результуючого обертового вектора на трифазну геометричну систему осей АВС із просторовим зсувом у 120° . У симетричній системі сума проекцій повинна дорівнювати нулю. Для простої людини, звиклої до мережі змінного струму, такий вид представлення є оптимальним, оскільки відразу можна побачити, що сигнал синусоїдальний з певною амплітудою і частотою. Але для системи управління, яка тільки встигла обробити одне значення сигналу, доводиться

відразу працювати з абсолютно іншим. Причому це відбувається з частотою в кілька разів більшою за частоту вхідного сигналу.

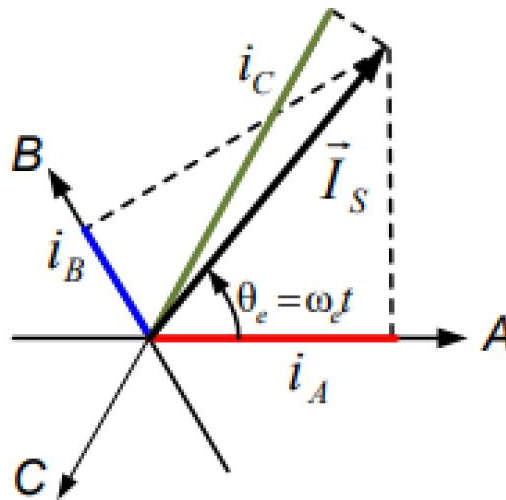


Рисунок 2.2 – Струм електродвигуна в осях abc

Щоб абстрагуватися від такого роду проблем, винайшли перетворення, за допомогою яких можна спростити систему. Будемо розглядати поступовий перехід від даної схеми до рухомої.

Якщо прийняти вісь α , що збігається з віссю A, і вісь β , їй перпендикулярну, то вийде нерухома система координат $\alpha\beta$ (рисунок 2.3).

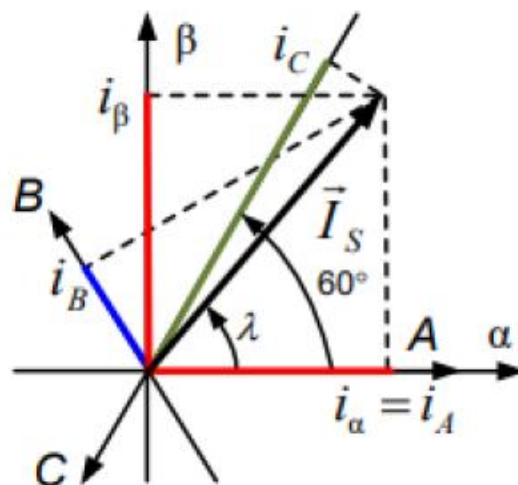


Рисунок 2.3 – Проекції просторового вектора струму електродвигуна на нерухомі координатні осі α та β .

Від описаних вище проблем вона нас не рятує, але знижує кількість рівнянь, які необхідно вирішувати, і, як наслідок, виходить два регулятори замість трьох по кожній фазі. Можна уявити дану систему координат, як нерухому, закріплену на статорі. Формули, за якими відбуваються перетворення, представлені нижче:

$$\begin{cases} i_a = i_A \\ i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} i_A = i_\alpha \\ i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \\ i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \end{cases} \quad (2.2)$$

Фундаментальним рішенням для спрощення аналізу динаміки змінних полів є перехід до обертової системи координат. Нижче наведено графічне представлення (рисунок 2.4) та математичний апарат трансформації координат із нерухомої ортогональної системи $\alpha\beta$ в обертову систему XY .

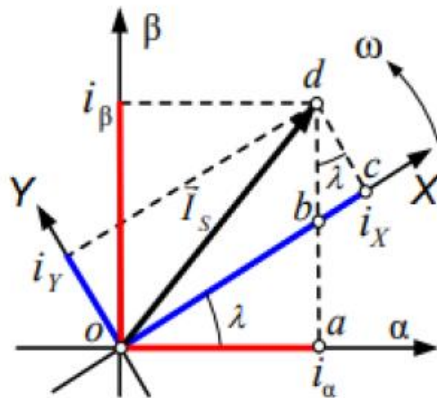


Рисунок 2.4 – Струм електродвигуна в обертовій системі координат XY

$$\begin{cases} i_X = i_\alpha \cos(\lambda) + i_\beta \sin(\lambda) \\ i_Y = -i_\alpha \sin(\lambda) + i_\beta \cos(\lambda) \end{cases} \quad (2.3)$$

Доцільність зазначеного переходу обумовлена можливістю подальшої трансформації рівнянь у систему координат dq, що обертається синхронно з магнітним потоком ротора машини.

Перетворення ABC=>dq впливає з вищеописаних перетворень, для цього вони і описувалися.

$$\begin{cases} i_d = \left(\frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \right) \sin(\lambda) + i_A \cos(\lambda) \\ i_q = \left(\frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \right) \cos(\lambda) - i_A \sin(\lambda) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} i_A = i_d \cos(\lambda) - i_q \sin(\lambda) \\ i_B = \frac{\sqrt{3}}{2} (i_q \cos(\lambda) + i_d \sin(\lambda)) - \frac{1}{2} i_A \\ i_C = -\frac{\sqrt{3}}{2} (i_q \cos(\lambda) + i_d \sin(\lambda)) - \frac{1}{2} i_A \end{cases} \quad (2.5)$$

Опишемо сенс таких маніпуляцій. Раніше доводилося в прямому сенсі стежити за системою, щоб регулювати її. Тепер можна уявити, що система координат жорстко зафіксована з ротором. Якщо обертається вектор струму, то з такою ж швидкістю обертається наша система координат, отже вектор струму для неї нерухомий. Ми виключаємо гармонічну складову, що значно спрощує процес регулювання. При цьому амплітуда і фаза керованого вектора визначаються двома скалярними величинами його проєкцій на осі координат обертової системи. Для управління будують векторний регулятор на основі двох скалярних регуляторів його проєкцій.

2.5 Особливості синхронного двигуна з постійними магнітами

Статор СДПМ виготовляється з шихтованої електротехнічної сталі з трьома обмотками, які зсунуті на 120 градусів, так само як і у статора асинхронного двигуна. До обмоток статора підключається трифазна синусоїдальна напруга мережі або перетворювача змінного струму. Схема включення обмоток синхронного двигуна представлена на рисунку 2.5. [8].

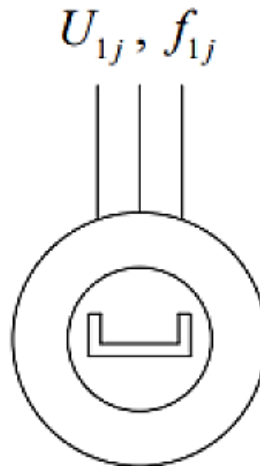


Рисунок 2.5 – Схема умовного графічного позначення трифазного синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів

Синхронним двигунам з постійними магнітами характерний великий повітряний зазор, а також низький ступінь насичення. Тому нелінійність магнітного ланцюга не враховується.

У модель двигуна без урахування магнітного ланцюга вводяться деякі припущення:

1. Втрати в сталі відсутні;
2. У магніто-м'якого матеріалу магнітопроводу нескінченна магнітна проникність;
3. Запасена магнітна енергія, яка використовується для опису електричної машини, розглядається як енергія статичного магнітного поля;

Магнітна проникність повітряного зазору представляється у вигляді добутку магнітної проникності статора і ротора [5].

2.6. Векторна діаграма і структурна схема синхронного двигуна з постійними магнітами

Фізичні процеси та взаємозв'язок електромагнітних величин у синхронній машині ілюструє векторна діаграма, наведена на рисунку 2.6

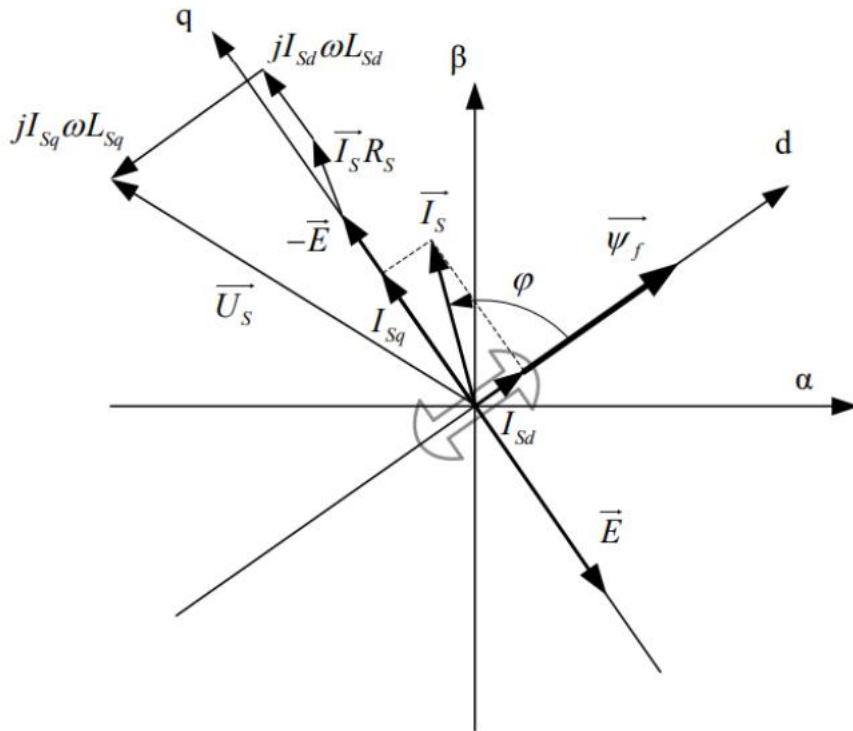


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма СДПМ

Результуюче потокозчеплення ротора Ψ_f пропорційне числу витків статора та магнітному потоку постійних магнітів. Напрямок вектора Ψ_f збігається з поздовжньою віссю ротора d , а його просторове зміщення відносно вектора струму статора визначається кутом φ .

Магнітне поле ротора при обертанні наводить у статорних обмотках вектор ЕРС, спрямований під кутом 90° до вектора потокозчеплення. Розрахунок амплітуди цього вектора здійснюється за такою формулою:

$$E = \psi_f \cdot \omega \quad (2.6)$$

де ω - електрична швидкість обертання, яка визначається за такою залежністю:

$$\omega = Z_p \cdot \omega_R \quad (2.7)$$

де ω_R - кутова швидкість ротора двигуна, рад/с;

Z_p - кількість пар полюсів двигуна.

На основі геометричного аналізу векторної діаграми, представленої на рисунку 2.6, можна скласти таке векторне рівняння рівноваги:

$$\vec{U}_s = -\vec{E} + \vec{I}_s R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} L_{sd} + \vec{I}_{sq} L_{sq}) \quad (2.8)$$

де \vec{U}_s – векторна величина напруги статора, В

\vec{I}_s – векторна величина струму статора, А

$\vec{I}_{sd}, \vec{I}_{sq}$ – проекції (складові) вектора струму статора на поздовжню

d та поперечну q осі координат відповідно, А;

L_{sd}, L_{sq} – індуктивності обмотки статора по поздовжній d та поперечній q магнітних осях, мГн;

R_s – активний опір фази обмотки статора, Ом

Рівняння рівноваги напруг статора враховує наведену ЕРС та спади напруги на активному й індуктивному опорах обмотки. Робочий момент двигуна створюється в результаті взаємодії магнітного потоку статора із його струмом. Зважаючи на число фаз та кількість пар полюсів, момент визначається добутком відповідних просторових векторів. Для трифазної машини справедлива така залежність:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \cdot \vec{I}_s \times \vec{\psi}_s \quad (2.9)$$

У проекції на осі dq отримуємо:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sd} \psi_d - I_{sq} \psi_q) \quad (2.10)$$

де ψ_d, ψ_q – складові (проекції) вектора потокозчеплення статора по поздовжній d та поперечній q осях координат відповідно, Вб;

Дані потокозчеплення виражаються за такими формулами:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_{sd} I_{sd} + \psi_f \\ \psi_q &= L_{sq} I_{sq} \end{aligned} \quad (2.11)$$

З урахуванням цих виразів перепишемо рівняння для моменту в наступному вигляді:

$$M = \frac{3}{2} Z_p (I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq})) \quad (2.12)$$

Якщо знехтувати магнітними втратами, рівняння стану обмоток статора СДПМ в обертових координатах dq набувають такого вигляду:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} - \omega L_{sq} I_{sq} \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + R_s I_{sq} + \omega L_{sd} I_{sd} + \omega \psi_f \end{cases} \quad (2.13)$$

Виражаючи з системи струм, отримуємо:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = \left(U_{sd} + \omega L_{sq} I_{sq} - R_s I_{sd} \right) \frac{1}{L_{sd}} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = \left(U_{sq} - R_s I_{sq} - \omega L_{sd} I_{sd} - \omega \psi_f \right) \frac{1}{L_{sq}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Умова механічної рівноваги описується виразом:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad (2.15)$$

Отримані математичні залежності дозволяють побудувати структурну схему СДПМ (рисунок 2.7) для її подальшої реалізації в середовищі візуального моделювання.

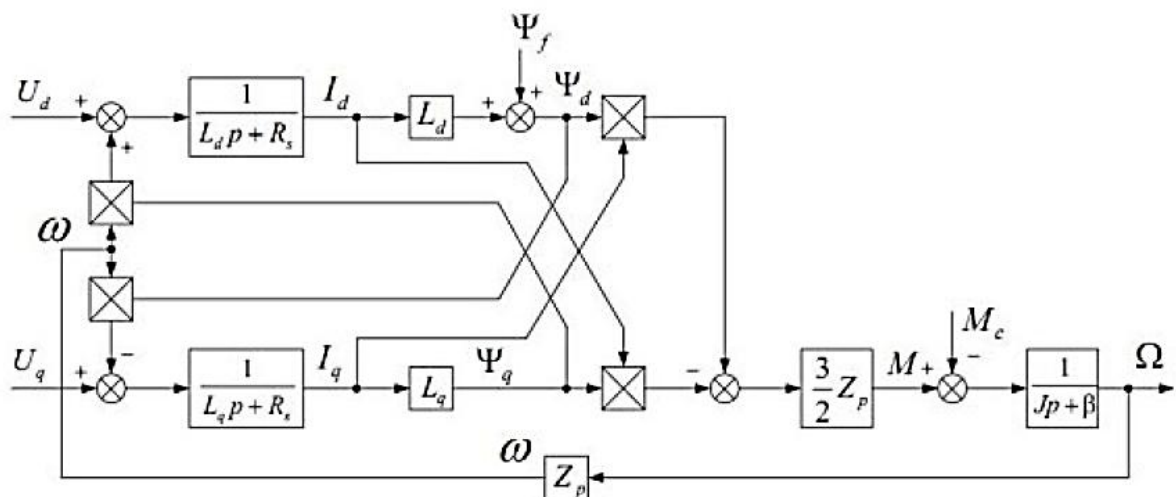


Рисунок 2.7 – Структурна схема СДПМ в обертовій системі координат dq

2.7 Параметри силової частини електроприводу

Між струмом і моментом двигуна існує коефіцієнт, що пов'язує ці величини:

$$c = \frac{M_H}{I_H} = \frac{7.2}{2.8} = 2.57$$

Для двигуна задано максимальний амплітудний струм $I_{\max} = 12$ А. За допомогою коефіцієнта, отриманого вище, можна знайти максимальний момент вхідної ланки:

$$M_{\max} = cI_{\max} = 2.57 \frac{12}{\sqrt{2}} = 21.8$$

Знаючи значення максимального і номінального моменту, знайдемо значення перевантажувальної здатності:

$$K_m = \frac{M_{\max}}{M_H} = \frac{21.8}{7.2} = 3.02$$

Для синхронного двигуна з постійними магнітами справедливе співвідношення:

$$\frac{I_{\max}}{I_H} = \frac{P_{\max}}{P_H}$$

Виходячи з цього, визначимо максимальну потужність двигуна:

$$P_{\max} = \frac{P_H I_{\max}}{I_H} = \frac{750 \cdot 12}{2.8 \cdot \sqrt{2}} = 2272 \text{ Вт.}$$

2.8. Налаштування регулятора контуру струму

Функціонально-структурна схема контуру регулювання струму представлена на рисунку 2.8. Зазначені контури по осях d та q мають ідентичну топологію і відрізняються лише значеннями еквівалентних індуктивностей. Синтез та оптимізацію параметрів регулятора проведено на прикладі контуру струму по осі q .

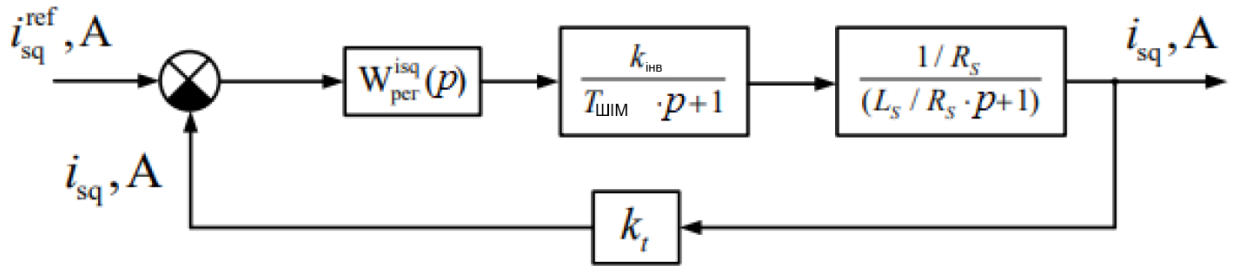


Рисунок 2.8 – Функціонально-структурна схема контуру регулювання струму

Процес оптимізації проводиться без урахування впливу зворотного зв'язку по ЕРС двигуна і впливу зміни кута між вектором потоку від постійних магнітів і вектором напруг.

Враховуючи, що динамічні властивості датчика струму визначаються пропорційним ланцюгом, запишемо передавальну функцію об'єкта керування:

$$W_{окq}(p) = \frac{k_{инв} \cdot 1 / R_s \cdot k_t}{(T_{ШИМ} p + 1)(T_{eq} p + 1)} \quad (2.16)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт підсилення інвертора, при напрузі живлення зі сторони постійного струму, що дорівнює $U_{dc}/2 = 311/2 = 155,5$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом k_t приймається рівним одиниці, що відповідає налаштуванню системи в абсолютних (іменованих) одиницях без масштабування сигналів датчиків.

$T_{ШИМ}$ – постійна часу інвертора, при частоті ШИМ 5кГц:

$$T_{ШИМ} = \frac{1}{5000} = 0.0002 \text{ с.}$$

T_{eq} – електромагнітна постійна часу з проекцією на вісь q.

Параметри регулятора розраховуються виходячи з умов налаштування контуру на модульний оптимум. При цьому бажана передавальна функція розімкнутої системи визначається виразом:

$$W_{MO}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \quad (2.17)$$

В такому разі передавальна функція регулятора з правила послідовного з'єднання блоків:

$$W_{MO}(p) = W_{perq}(p) \cdot W_{oy}(p)$$

$$W_{perq}(p) = W_{MO}(p) \frac{1}{W_{oy}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} \frac{(T_{ШИМ}p+1)(T_{eq}p+1)}{k_{инв} \cdot 1 / R_S \cdot k_t} \quad (2.18)$$

Сталу часу регулятора T_{μ} вибирають із умови компенсації найбільшої електромагнітної сталої часу об'єкта керування. Розрахунок величини сумарної некомпенсованої сталої часу контуру T_{eq} виконують за такою залежністю:

$$T_{eq} = \frac{L_q}{R_S} = \frac{6.278 \cdot 10^{-3}}{1.4} = 0.0045 \text{ с}$$

Приймаємо $T_{\mu} = T_{ШИМ}$, тоді електромагнітна постійна часу підлягає компенсації:

$$W_{perq}(p) = \frac{R_S T_{eq}}{2T_{ШИМ} k_{инв} k_t} \frac{(T_{eq}p+1)}{T_{eq}p} \quad (2.19)$$

Отримуємо ПІ-регулятор з наступними параметрами:

$$K_{pq} = \frac{R_S T_{eq}}{2T_{ШИМ} k_{инв} k_t} = \frac{1.4 \cdot 0.0045}{2 \cdot 0.0002 \cdot 155.5 \cdot 1} = 0.101$$

$$T_{iq} = T_{eq}$$

Порахуємо також для складової d:

$$K_{pd} = \frac{R_S T_{ed}}{2T_{ШИМ} k_{инв} k_t} = \frac{1.4 \cdot \frac{3.768 \cdot 10^{-3}}{1.4}}{2 \cdot 0.0002 \cdot 155.5 \cdot 1} = 0.06$$

$$T_{id} = T_{ed}$$

2.9. Налаштування регулятора швидкості

Структурна схема контуру зворотного зв'язку за швидкістю наведена на рисунку 2.9.

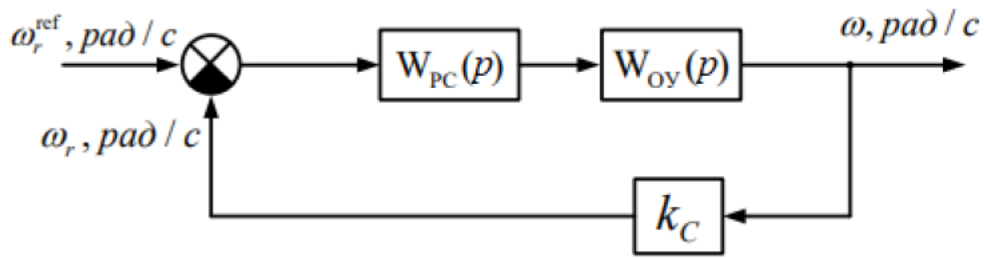


Рисунок 2.9 – Функціонально-структурна схема контуру регулювання швидкості

Контур швидкості будується над контуром струму q , оскільки саме він є моментотворюючим. Запишемо передавальну функцію об'єкта управління:

$$W_{OY}(p) = W_{KT}(p) \cdot \psi_f \frac{3}{2} Z_p \frac{1}{Jp} k_c \quad (2.20)$$

де, k_c – передавальна функція замкнутого контуру струму, k_c – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, приймаємо рівним одиниці;

$W_{KT}(p)$ – передавальна функція внутрішнього (замкненого) контуру струму;

Розпишемо передавальну функцію контуру струму:

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{2T_{ШИМ} p(T_{ШИМ} p + 1) + 1} = \frac{1}{2T_{ШИМ}^2 p^2 + 2T_{ШИМ} p + 1} \quad (2.21)$$

Оскільки $2T_{ШИМ}^2 p^2 \approx 0$, то можна прийняти:

$$W_{KT}(p) = \frac{1}{2T_{ШИМ} p + 1} \quad (2.22)$$

$$W_{OY}(p) = \frac{\frac{3}{2} Z_p \psi_f k_c}{Jp(2T_{ШИМ} p + 1)}$$

Синтез та налаштування параметрів регулятора швидкості виконується за критерієм симетричного оптимуму. Передавальна функція розімкнутого контуру, налаштованого відповідно до цього критерію, має такий вигляд:

$$W_{CO}(p) = \frac{4T_{\mu} p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu} p + 1)} \quad (2.23)$$

Виразначимо передавальну функцію регулятора з правила послідовного з'єднання блоків:

$$W_{CO}(p) = W_{PC}(p) \cdot W_{OY}(p) \quad (2.24)$$

$$W_{PC}(p) = W_{CO}(p) \frac{1}{W_{OY}(p)} = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{Jp(2T_{ШМ}p + 1)}{\frac{3}{2}Z_p \psi_f k_c} \quad (2.25)$$

Приймаємо $T_{\mu} = 2T_{ШМ}$, тоді:

$$W_{PC}(p) = \frac{J}{\frac{3}{2}Z_p \psi_f k_c \cdot 4T_{ШМ}} \cdot \frac{(8T_{ШМ}p + 1)}{8T_{ШМ}p} \quad (2.26)$$

Отримуємо ІІІ-регулятор з наступними параметрами:

$$k_p = \frac{J}{\frac{3}{2}Z_p \psi_f k_c \cdot 4T_{ШМ}} = \frac{0.912 \cdot 10^{-3}}{\frac{3}{2} \cdot 8 \cdot 0.189 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0.0002} = 0.5026$$

2.10. Налаштування регулятора контуру положення

Функціонально-структурна схема контуру регулювання положення представлена на рисунку 2.10.

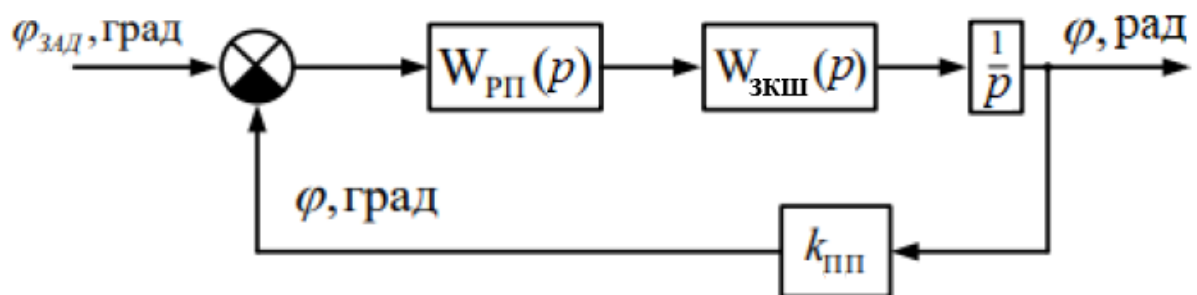


Рисунок 2.10 – Структурна схема контуру зворотного зв'язку за положенням

Для узгодження одиниць вимірювання коефіцієнт зворотного зв'язку переводить значення кута з радіан у градуси. Математична модель об'єкта керування описується такою передавальною функцією:

$$W_{OY}(p) = W_{KC}(p) \cdot \frac{1}{p} k_{III} \quad (2.27)$$

де k_{III} – коефіцієнт за зворотним зв'язком по положенню

Відповідно до вищевикладеного принципу, передавальну функцію замкнутого контуру швидкості можна представити у вигляді:

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{4T_{ШИМ}p + 1} \quad (2.28)$$

З огляду на налаштування контуру на модульний оптимум, математичний вираз передавальної функції регулятора записується так:

$$W_{PI}(p) = W_{MO}(p) \cdot \frac{1}{W_{OY}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{p(4T_{ШИМ}p + 1)}{k_{III}} \quad (2.29)$$

Приймаємо $T_{\mu} = 4T_{ШИМ}$, тоді:

$$W_{PI}(p) = \frac{1}{4T_{ШИМ}k_{III}} \quad (2.30)$$

Отримуємо П-регулятор, але варто зазначити, що при такому налаштуванні обов'язково буде перерегулювання, так як сам оптимум на це розрахований. Це означає, що запірний орган перетисне і пошкодить конструкцію труби або арматури. Щоб це нівелювати, збільшимо постійну часу контуру.

$$k_p = \frac{1}{32 \cdot 4T_{ШИМ} \cdot k_{III}} = 0.68$$

Висновки до розділу

1. Для електроприводу арматури обрано синхронний двигун з постійними магнітами марки Siemens SIMOTICS S 1FK7083-2AF71-1QG0. Ця модель має номінальну корисну потужність 0,75 кВт (з максимальною потужністю до 2362,5 Вт), швидкість 1000 об/хв, крутний момент 7,2 Нм та високий коефіцієнт потужності ($\cos(\varphi) = 0,99$). В якості передавального механізму обрано хвильовий редуктор з проміжними тілами кочення, що

здатен забезпечувати надзвичайно високі передавальні числа (від 30:1 до 320:1) у компактному корпусі при повній відсутності люфту.

2. Обґрунтовано застосування системи векторного керування в рухомій системі координат dq , орієнтованій за вектором магнітного потоку ротора. Це дозволяє уникнути роботи з трифазним гармонійним сигналом частотою понад 133 Гц, перетворюючи його на дві скалярні величини для ефективнішого керування. В якості датчика зворотного зв'язку по положенні вибрано синусно-косинусний датчик.

3. Розраховано та налаштовано три підпорядковані контури. Контур струму налаштований на модульний оптимум (враховано частоту ШІМ 5 кГц і постійну часу інвертора 0,0001 с), а контур швидкості – на симетричний оптимум. При налаштуванні П-регулятора контуру положення було встановлено, що класичний модульний оптимум дає перерегулювання, тому постійну часу контуру було примусово збільшено до 0,68.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Опис моделі електроприводу трубопровідної арматури

Для дослідження динамічних режимів роботи розробленої системи електроприводу було використано середовище візуального моделювання MATLAB/Simulink. Створена симуляційна модель представлена на рисунку 3.1. Модель складається з блоку двигуна «PMSM» (Permanent Magnets Synchronous Machine), координатних перетворень, блоку векторної широтно-імпульсної модуляції, блоку перетворювача, областей завдань відповідних вхідних величин, показань і навантаження, ПІ-регулятора струму, ПІ-регулятора швидкості, блоку компенсації та П-регулятора положення.

Дана імітаційна модель містить ряд припущень: немає мертвого часу перемикання ключів, відсутня широко-імпульсна модуляція, параметри мережі живлення є ідеальними (потужність нескінченно велика, струм і напруга синусоїдальні). Дані припущення є прийнятними для такого типу розрахунків.

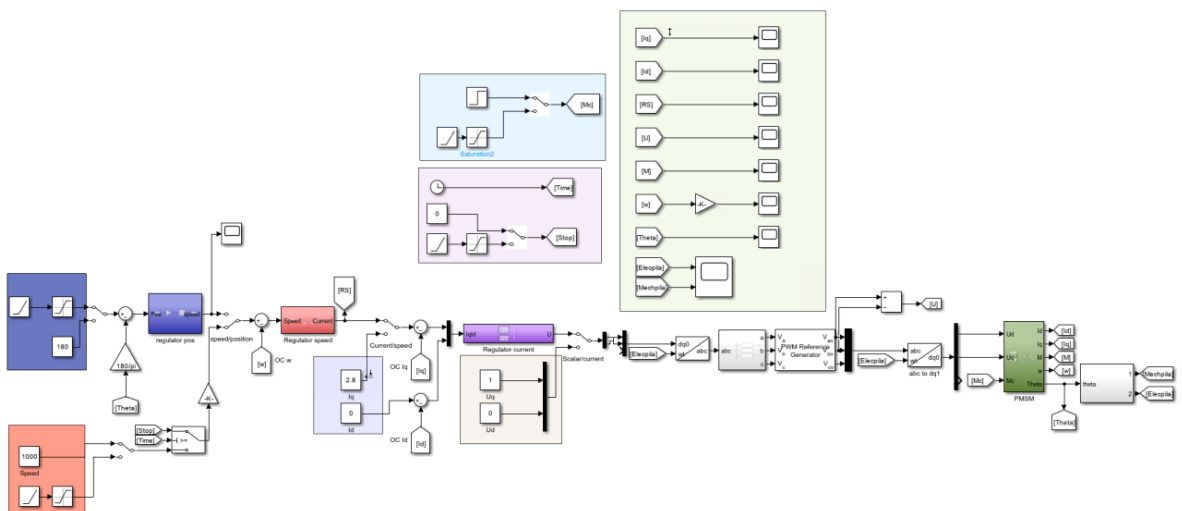


Рисунок. 3.1 – Модель електроприводу трубопровідної арматури

Блок двигуна складений за вищезазначеною системою рівнянь. Зовнішній вигляд і вміст показано на рисунках 3.2 і 3.3 відповідно.

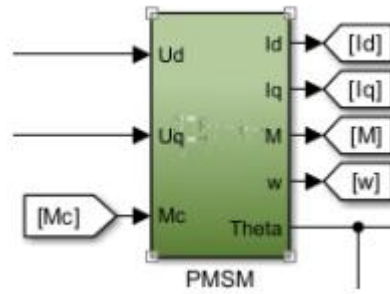


Рисунок. 3.2. – Блок двигуна

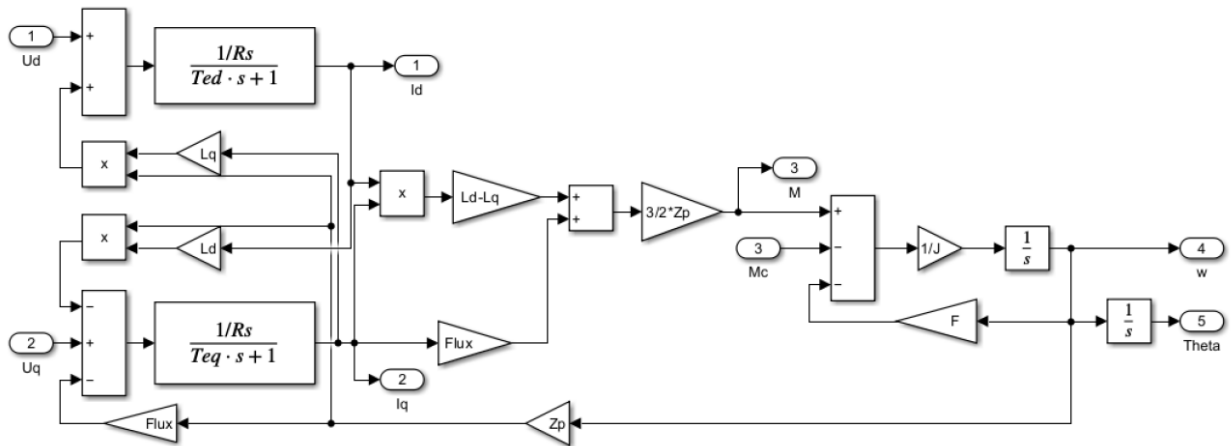


Рисунок. 3.3. – Вміст блоку двигуна

Для зняття показань використовуються мітки. Вихідними даними з двигуна є струми d і q, момент обертання, швидкість і кут положення. Блоки координатних перетворень необхідні для переходу з трифазної системи до двофазної, орієнтованої за вектором потоку зчеплення ротора.

Блок векторної широко-імпульсної модуляції перетворює вхідний сигнал у векторний. Дане рішення допомагає повністю використовувати ланку постійного струму, на відміну від синусоїдальної ШІМ.

Блок перетворювача складається з трьох передавальних функцій, що імітують затримку перемикавання ключів і підсилення вхідного сигналу. Вміст представлений на рисунку 3.4.

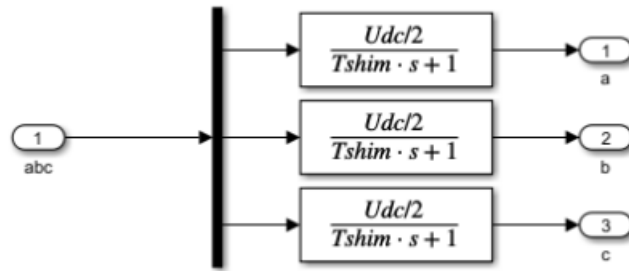


Рисунок. 3.4. – Блок перетворювача

Блоки регуляторів виконані однаково, їх вміст покажемо на основі регулятора швидкості на малюнку 3.5.

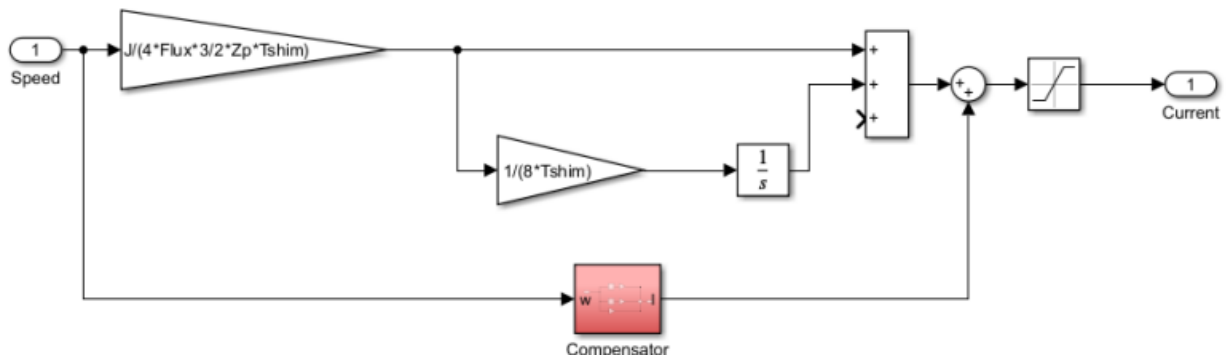


Рисунок 3.5. – ПІ-регулятор швидкості

У даній роботі була введена компенсація струму при навантаженні, втратах на тертя, інерції [3]. Оскільки струм у двигуні піддається різним операціям, а саме: ділиться на момент інерції, віднімається момент навантаження, тертя – все це негативно позначається на роботі як двигуна, так і регуляторів, що заважає отримати необхідні характеристики. Блок обчислює надбавку, яку необхідно додати до виходу регулятора швидкості, щоб нівелювати дані явища. Вміст представлено на рисунку 3.6.

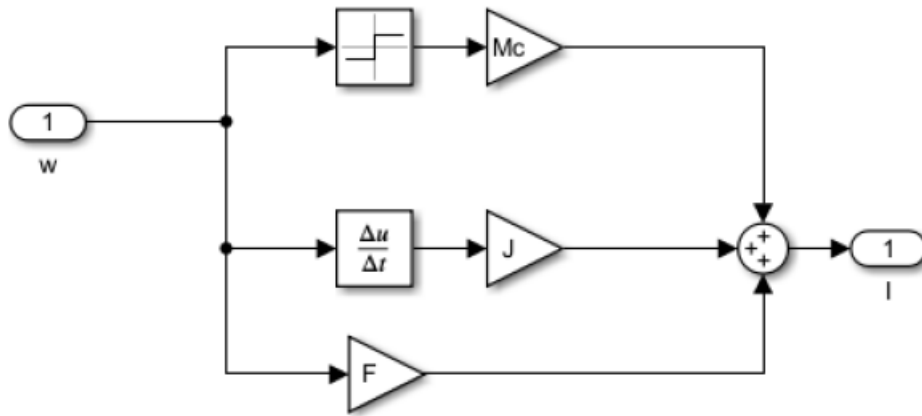


Рисунок. 3.6. – Вміст блоку компенсації втрат

Слід зазначити, що для перетворювачів Парка необхідно знати положення ротора. Для забезпечення коректної роботи всієї схеми необхідно, щоб датчик кута повороту ротора після проходження початкової позиції обнулявся і починав рахувати заново. А оскільки цього не відбувається, на виході був доданий алгоритм для обнулення датчика. Графік, що показує положення електричного і механічного кута, представлений на рисунку 3.7.

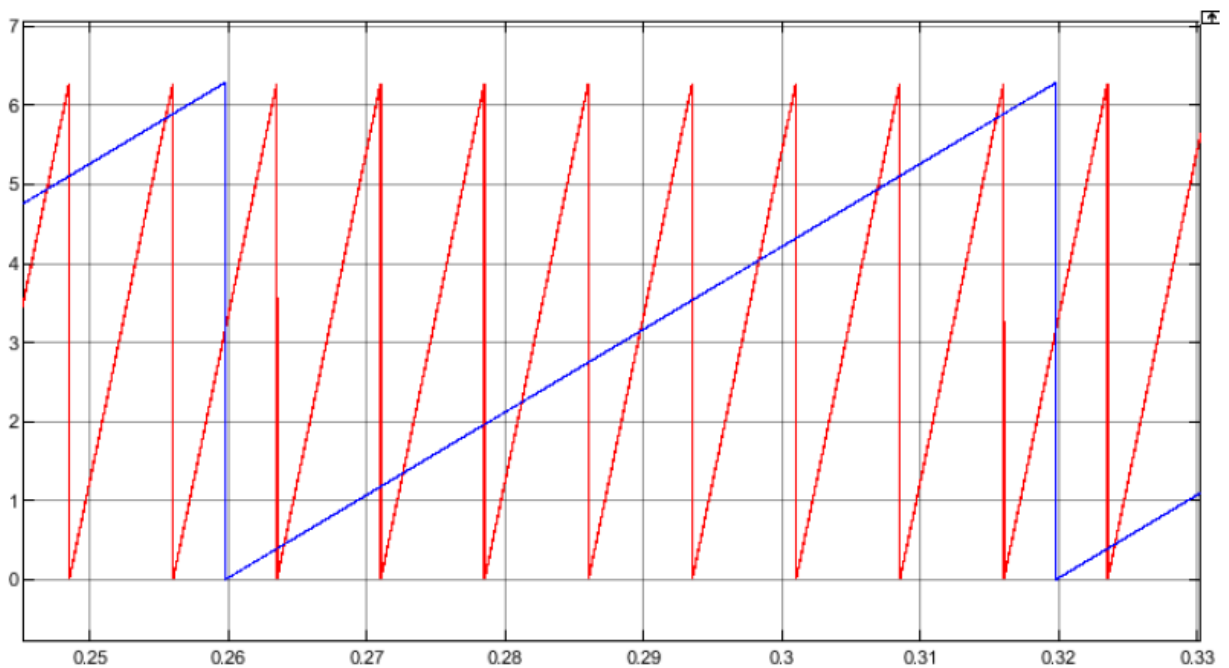


Рисунок. 3.7. – Зміна кутів повороту в часі

З аналізу часових діаграм, наведених на рисунку 3.7, видно, що одному повному механічному оберту ротора відповідають 8 періодів електричних величин. Оскільки число пар полюсів досліджуваного двигуна також дорівнює 8, це підтверджує правильність формування сигналів кутового положення, які надходять на блоки перетворення координат Парка.

3.2 Дослідження основних режимів роботи електроприводу

Перед тим як перейти до аналізу динамічних характеристик зовнішнього контуру швидкості, необхідно підтвердити адекватність та точність функціонування внутрішнього контуру струму.

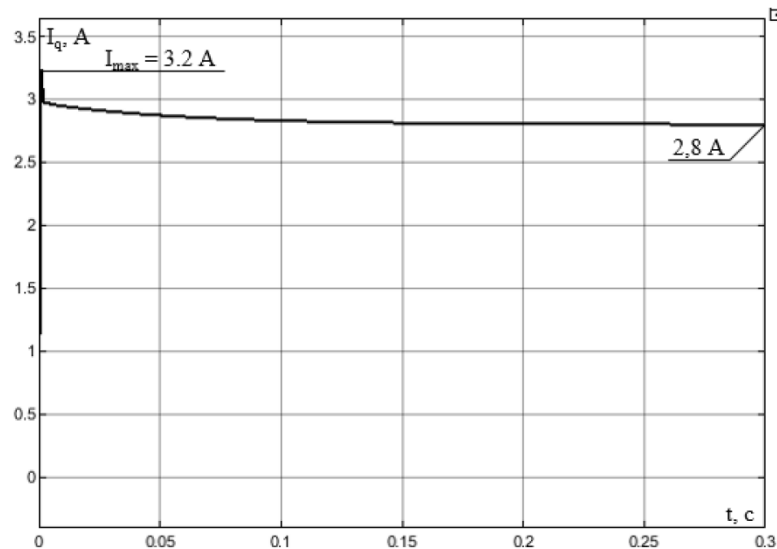


Рисунок 3.8. – Робота контуру струму

Як можна помітити, струм досягає сталого значення $2,8$ А. При запуску спостерігається невелике перерегулювання і плавний перехід до сталого значення.

Розглянемо перехідні процеси в контурі швидкості при пуску, навантаженні та зупинці двигуна.

Для початку оцінімо роботу регулятора контуру швидкості, для цього приберемо зі схеми обмежувач на виході регулятора і компенсатор втрат (рисунок 3.9).

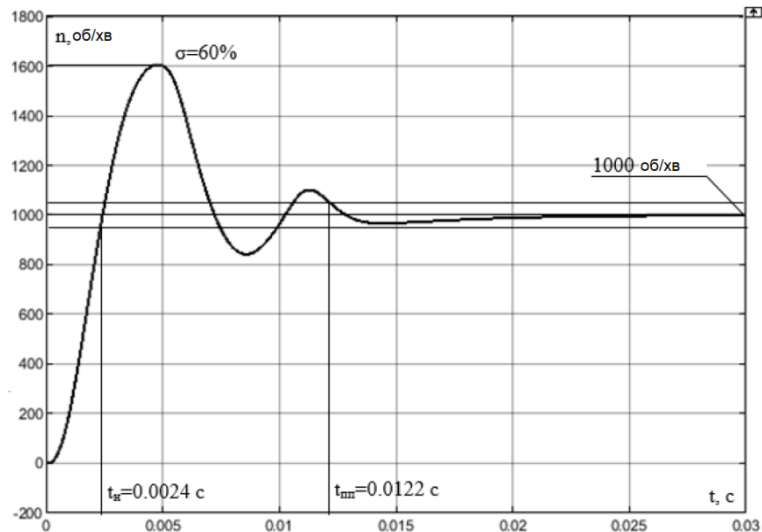


Рисунок 3.9. – Пуск двигуна в контурі швидкості

Як видно з перехідного процесу, швидкість виходить на стаціонарне значення, але є дуже велике перерегулювання, що перевищує норму симетричного оптимуму (40%). Оскільки в схемі не враховані втрати на тертя, інерцію, припущення контуру струму, тому при такому розрахунку це допустимо. Час перехідного процесу склав 0,0122 секунди. Система астатична, працює коректно. Навантаження проходить також, оскільки струм не виходить за задані межі.

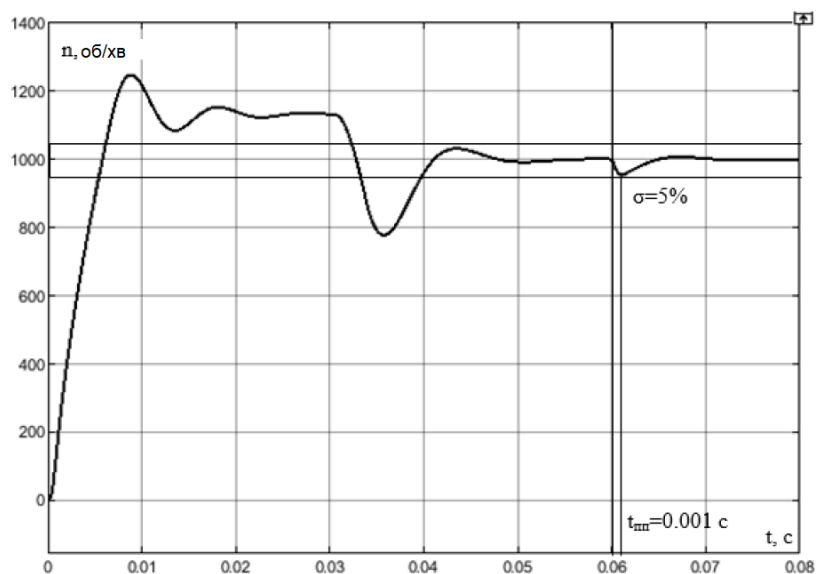


Рисунок. 3.10. – Навантаження з обмежувачем

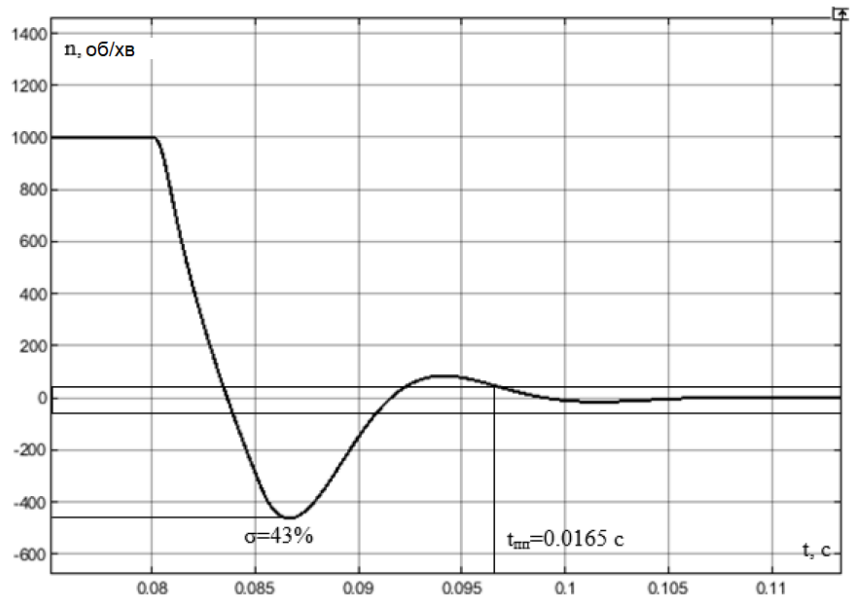


Рис. 3.11. – Зупинка двигуна з обмежувачем

Зупинка двигуна відбувається довше, що є природним при обмеженні струму. Зупинка пройшла за 0,0165 с., перерегулювання підвищилося до 43% через те, що межа струму не дає швидко компенсувати різке падіння швидкості.

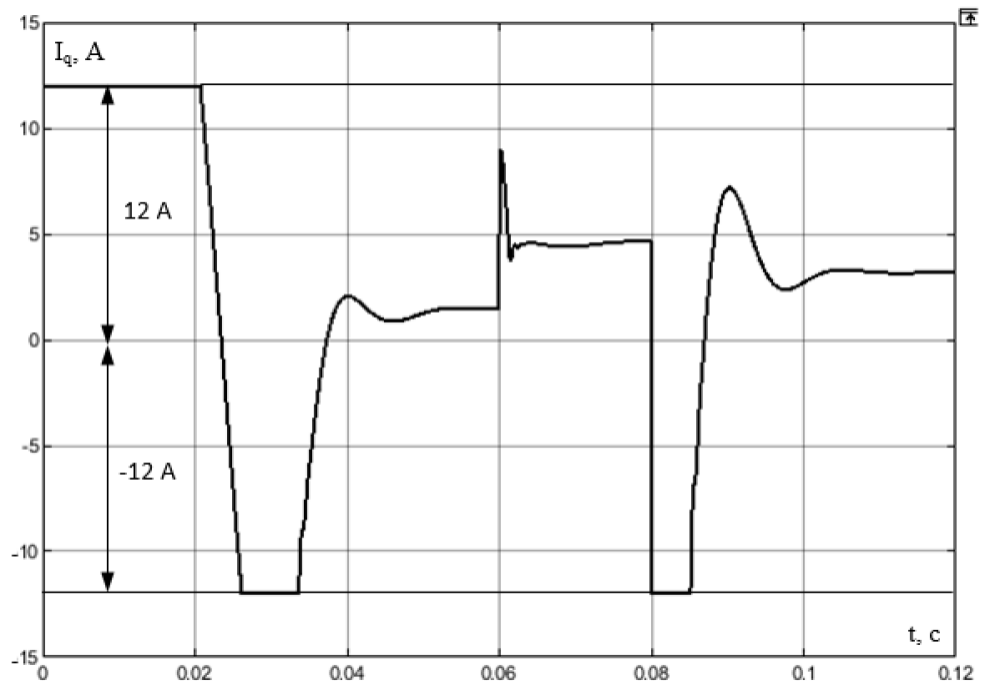


Рисунок. 3.12. – Робота регулятора швидкості

З графіка видно, що завдання на регулятор швидкості обмежується тим значенням, яке ми задали - 12 А. Оскільки процеси, пов'язані з перерегулюванням у всіх вищерозглянутих випадках, не є нормою, було вирішено ввести задавач інтенсивності для пуску і зупинки двигуна.

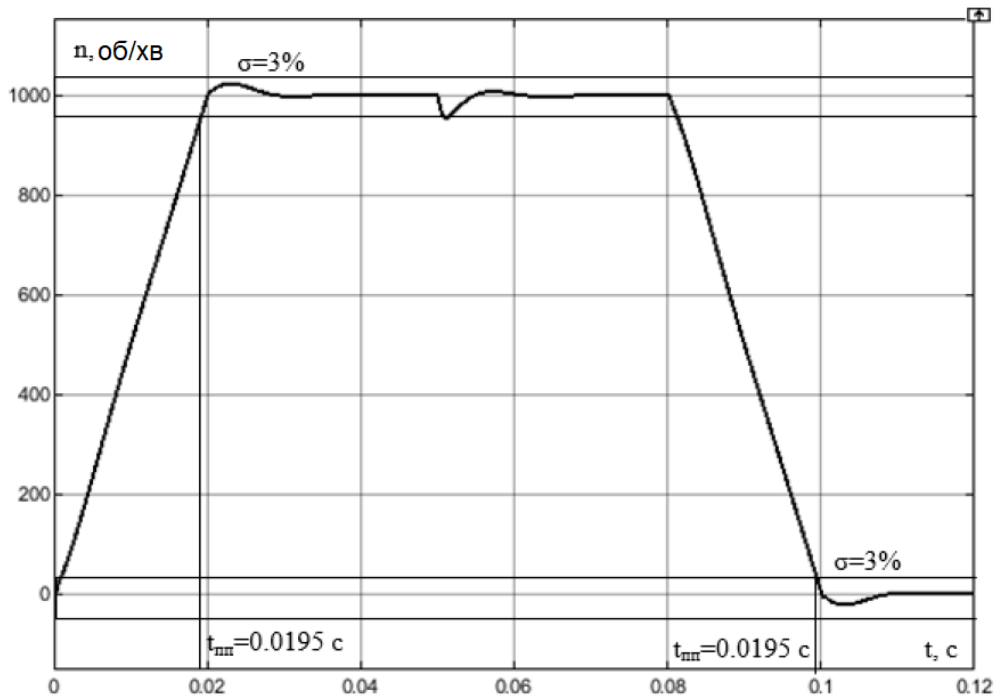


Рисунок. 3.13. – Пуск і зупинка двигуна з задавачем інтенсивності

Задавач інтенсивності дозволив уникнути високого перерегулювання шляхом збільшення часу перехідного процесу. Таким чином було розглянуто контур швидкості, налаштовано регулятори і введено компенсатор та обмежувач із задавачем інтенсивності. Тепер можна перейти до режиму положення, який є пріоритетним для приводів регулюючої арматури. Даний контур є зовнішнім для швидкості і повинен давати завдання на обертання валу двигуна, а значить і запірного органу, в певну позицію.

Для початку проведемо аналіз роботи системи підпорядкованого регулювання трьох контурів. Для цього приберемо обмеження і подивимося на три вихідні величини, якими керує наша система: струм, швидкість і

положення. Оскільки необхідно розглянути тільки вид перехідних процесів, введені масштабні коефіцієнти.

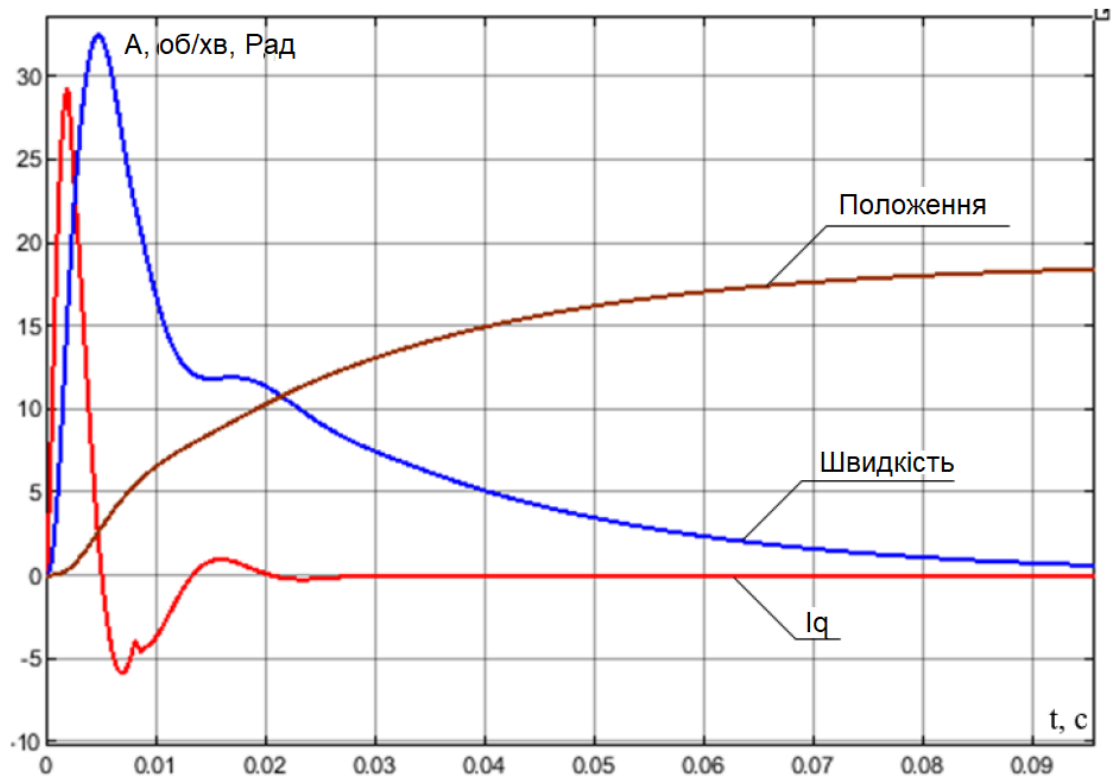


Рисунок 3.14. – Перехідний процес при підлеглому регулюванні

З рисунка можна побачити, як в перший момент часу з'являється сплеск струму, що природно, оскільки він є ініціатором всього руху. Струм перетворюється в момент, а далі в швидкість. Оскільки завдання на струм надходить від регулятора швидкості і кожного разу це значення зменшується, то можна побачити, як пік струму припадає на певне значення швидкості. Далі регулятор розуміє, що швидкість більша, ніж ця точка, і починає знижувати струм в надії, що швидкість повернеться назад. Тепер, коли вже струм змінює свій знак, то і двигун починає гальмувати. Пік двигуна припадає саме на точку зміни знака струму. Далі можна спостерігати картину, як швидкість поступово зменшується, оскільки регулятор бачить, що відбувається поступове наближення положення до заданого. Підпорядковане регулювання працює правильно.

Розглянемо два випадки, коли траєкторія руху включає рівноприскорену і рівносповільнену зону і коли крім даних двох зон присутній прямолінійний рух. Щоб отримати дві зони, довжина шляху, який повинен «пройти» привід, повинна бути такою, щоб швидкість не встигла досягти встановленого значення і продовжувати рух з ним. Для кращого вигляду, значення положення збільшено в 10 разів (рисунок 3.15).

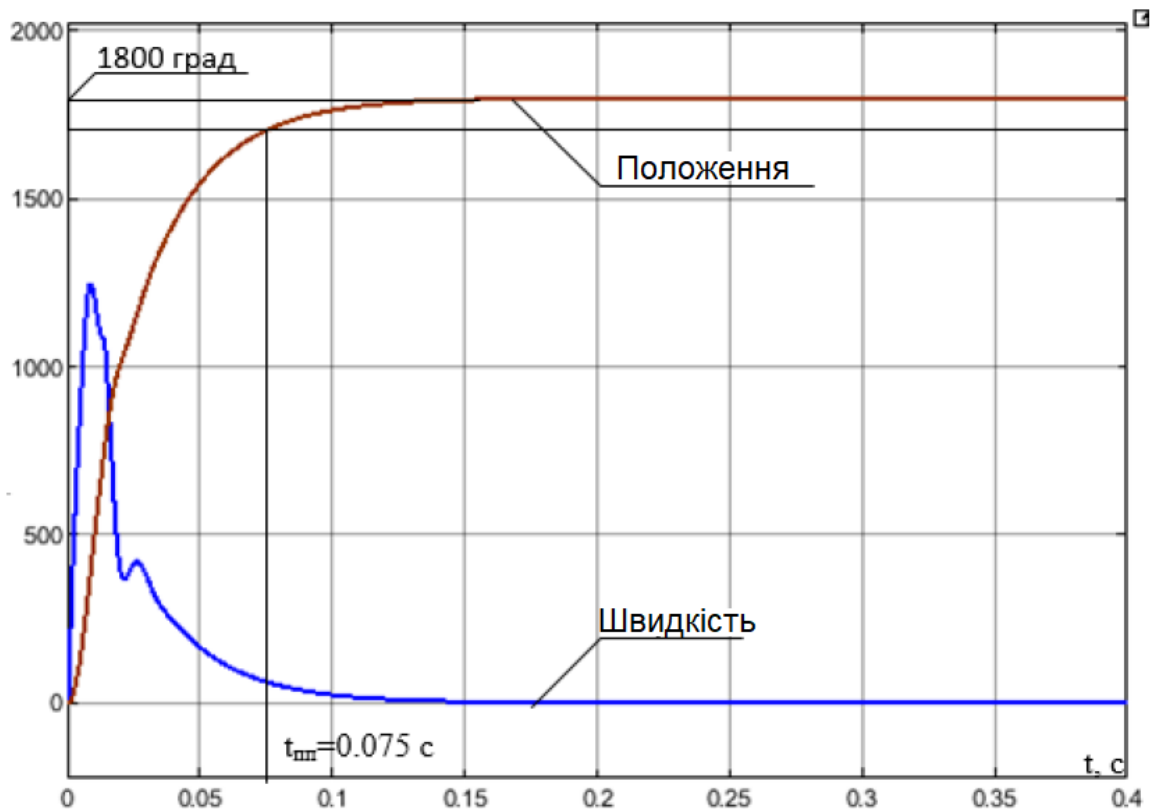


Рисунок. 3.15. – Положення і швидкість при малій траєкторії руху

Швидкість змінюється на всьому шляху, отже, є і прискорення. Рух з постійною швидкістю відсутній, тому немає прямолінійної ділянки на графіку положення. Як і був налаштований контур положення, на характеристиці відсутнє перерегулювання і час перехідного процесу становить 0,075 с.

Тепер розглянемо випадок, коли швидкість встановиться, для цього задамо положення в 10 разів більше. Масштабні коефіцієнти при цьому приберемо.

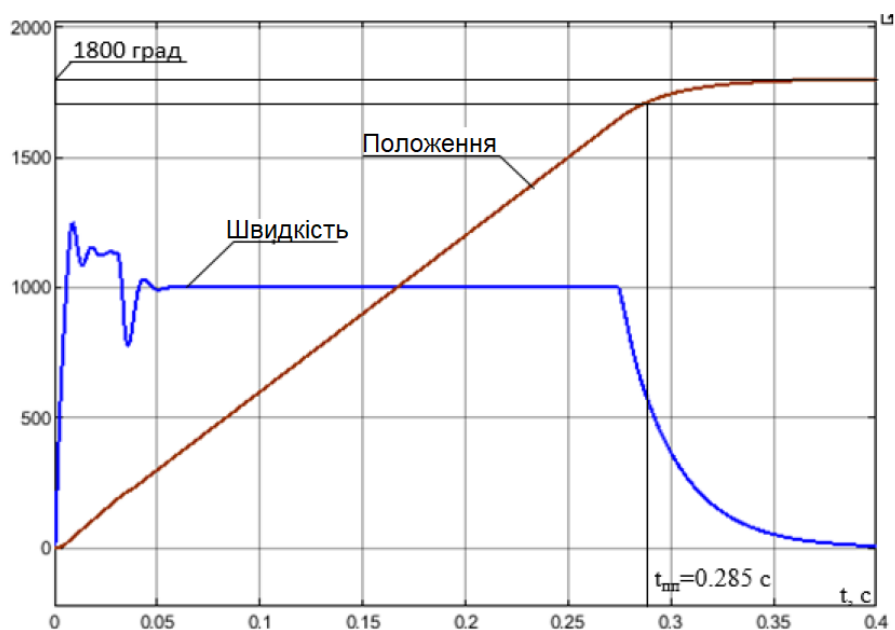


Рисунок 3.16. – Положення і швидкість при великій траєкторії руху

Можна побачити прямолінійну ділянку. Оскільки швидкість постійна, то і положення збільшується прямолінійно з певним кутом нахилу. У даних дослідях можна спостерігати стрибок швидкості, що може спричинити негативні наслідки у вигляді гідроудару, деформації конструкції тощо.

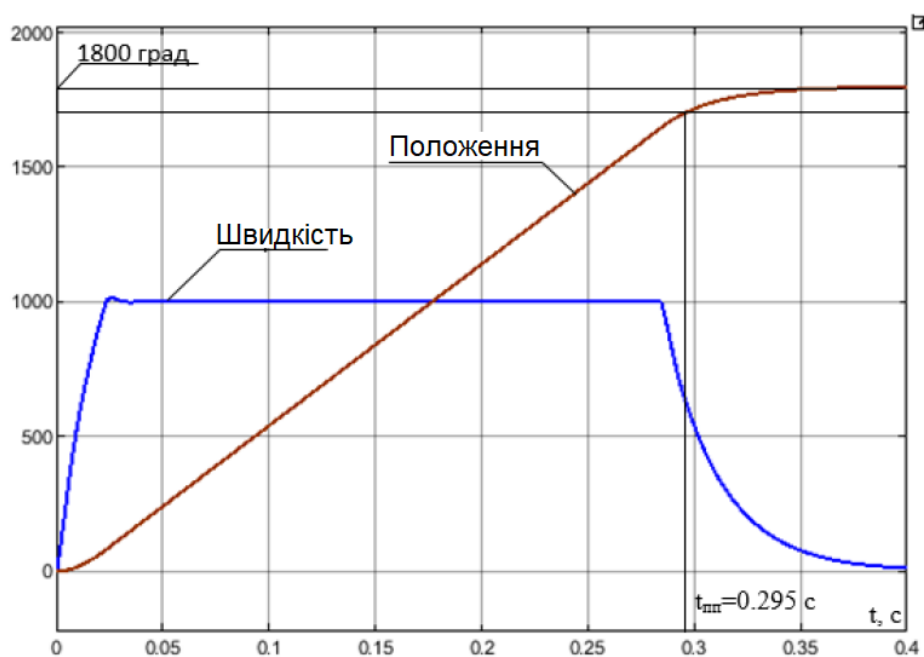


Рисунок 3.17. – Перехідний процес із ЗІ 10000 рад/с

Щоб цього уникнути, було прийнято використовувати задавач інтенсивності. Цим ми зможемо домогтися регулювання швидкості досягнення позиції, що вирішить дану проблему. Розглянемо дві швидкості наростання і побачимо, як змінюються характеристики.

Характеристики вийшли плавними, оскільки завдання на регулятор положення надходить невеликим у перший момент часу, тим самим швидкість зростає м'яко.

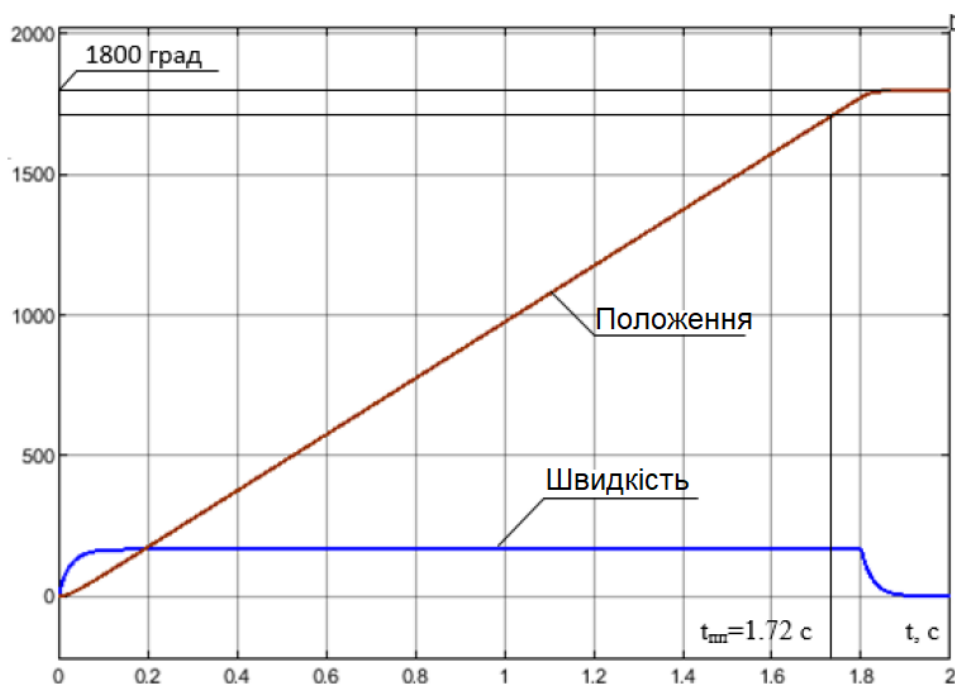


Рисунок. 3.18. – Перехідний процес із задавачником інтенсивності 1000 рад/с

Проаналізувавши дані залежності, можна сказати, що виставляючи різний кут нахилу задавача інтенсивності, можна керувати швидкістю. Чим повільніше зростає завдання на регулятор положення, тим повільніше вал двигуна буде наближатися до встановленого значення положення.

Розглянутий контур положення дозволяє зробити висновок про те, що система працює стабільно. Перейдемо до аналізу процесу ущільнення запірною арматурою. Ущільнення арматури виконують найважливішу функцію, значення якої переоцінити неможливо, адже герметичність визначає надійність трубопровідної арматури, а тому є її найважливішою якістю.

Введемо лінійне зростання моменту навантаження, що імітує ущільнення.

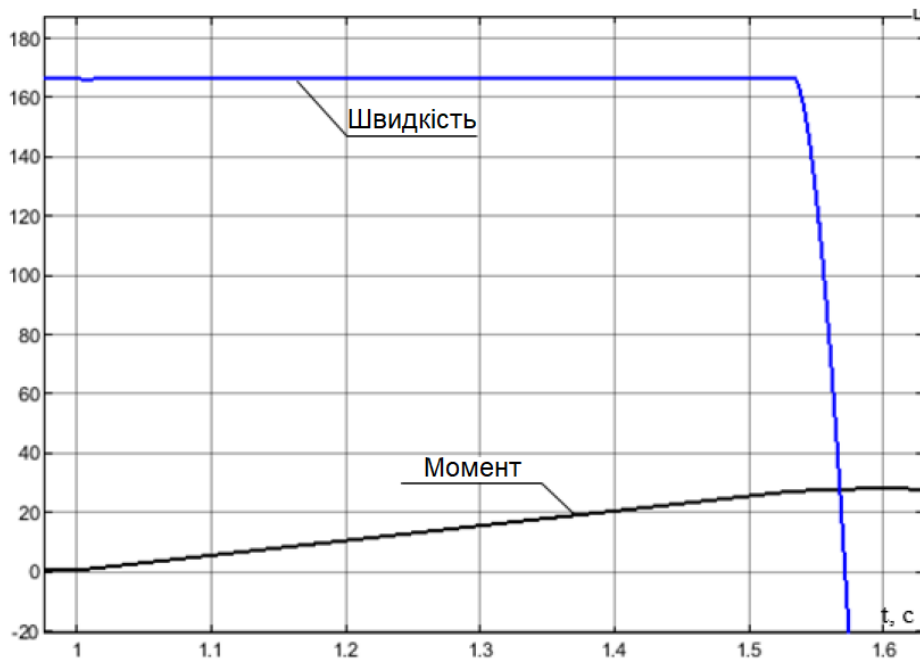


Рисунок 3.19. – Швидкість і момент навантаження при ущільненні арматури

На рисунку 3.19 наведено графіки зміни швидкості електропривода та моменту навантаження під час процесу ущільнення арматури. Із графіка видно, що до моменту часу приблизно 1,52 с швидкість двигуна залишається практично сталою на рівні близько 165 рад/с, що свідчить про стабільну роботу системи електропривода.

У процесі ущільнення арматури момент навантаження поступово зростає, оскільки збільшується механічний опір робочого механізму. Незважаючи на це, система автоматичного регулювання забезпечує підтримання сталої швидкості. Після досягнення граничного значення навантаження відбувається різке зниження швидкості до нуля, що відповідає зупинці механізму або переходу системи в режим перевантаження.

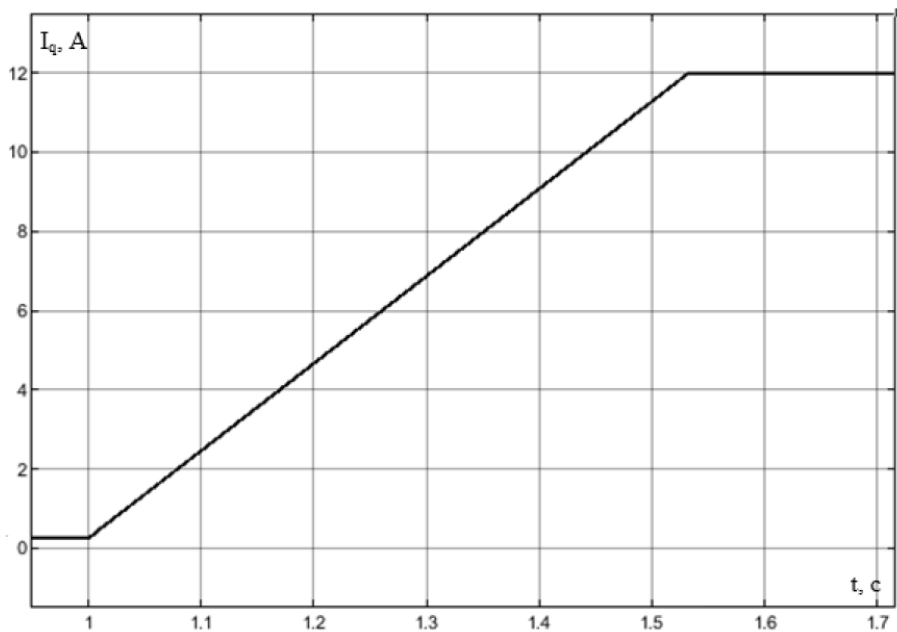


Рисунок 3.20. – Вихід регулятора швидкості при ущільненні

З рисунка видно, що в міру зростання моменту навантаження регулятор поступово збільшує вихідний сигнал для компенсації додаткового механічного опору та підтримання заданої швидкості обертання двигуна. Максимальне значення сигналу досягається приблизно в момент 1,5 с і становить близько 12 А. Після цього сигнал стабілізується, що свідчить про досягнення граничного режиму роботи системи керування.

При лінійному зростанні можна бачити, що швидкість до граничного моменту намагається триматися на певному значенні, регулятор ще протистоїть і система астатична. Коли момент навантаження зріс занадто сильно, регулятор швидкості йде в насичення і не може компенсувати дане навантаження.

Висновки до розділу

1. Застосування задавача інтенсивності з різними темпами наростання сигналу (1000 рад/с та 10000 рад/с) дозволило повністю ліквідувати небезпечні кидки швидкості та перерегулювання у контурі положення. Це мінімізує ризики виникнення гідроударів у трубопроводній

системі, усуває загрозу деформації елементів конструкції та забезпечує плавний і точний вихід запірному органу на задану позицію (час перехідного процесу становить 0,075 с).

2. Проведено імітаційне моделювання специфічного для запірної арматури процесу ущільнення (посадки в сідло) за умов лінійного зростання моменту навантаження. Дослідження підтвердили високу статичну точність та астатизм системи: електропривід стабільно утримує робочу швидкість (близько 165 рад/с) завдяки гнучкому збільшенню сигналу на виході регулятора швидкості. При досягненні граничного механічного опору регулятор переходить у стан насичення (обмеження струму на рівні 12 А), після чого швидкість плавно знижується до нуля, що забезпечує необхідну щільність закриття та герметичність арматури із надійним захистом двигуна від пошкодження.

3. Результати моделювання перехідних процесів у всіх режимах (пуск, навантаження, зупинка, позиціонування та ущільнення) підтверджують високу адекватність, стійкість і працездатність синтезованої системи підпорядкованого регулювання, що дозволяє рекомендувати її для практичної реалізації в електроприводах магістральної арматури.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки під час роботи з електроустаткуванням

Струмоведачі частини електроустановки повинні бути недоступними для випадкового прямого дотику до них, а доступні для дотику відкриті її частини і сторонні провідні частини не повинні знаходитися під напругою, яка становить небезпеку ураження електричним струмом як у нормальному режимі роботи електроустановки, так і при пошкодженні її ізоляції. [11]

Для захисту від ураження електричним струмом при прямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі основні заходи захисту:

- основна ізоляція струмоведачих частин;
- огорожі і оболонки;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності;
- наднизька (мала) напруга. Для додаткового захисту від прямого дотику в електроустановках напругою до 1 кВ можуть застосовуватись ПЗВ.

Захист від прямого дотику не вимагається, якщо номінальна напруга не перевищує:

- 25 В змінного або 60 В постійного струму при застосуванні системи БННН, а також системи ЗННН у випадку, коли електрообладнання

експлуатується тільки в сухих приміщеннях і знаходиться в зоні дії системи зрівнювання потенціалів, а ймовірність контакту людини з частинами, які знаходяться під напругою, мала;

- 6 В змінного або 15 В постійного струму у всіх інших випадках.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику повинні застосовуватись, окремо або в поєднанні, такі заходи захисту:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимикання живлення;
- зрівнювання потенціалів;

- вирівнювання потенціалів;
- подвійна або посилена ізоляція;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолюючі (непровідні) приміщення, зони, площадки;
- наднизька (мала) напруга.

Захист від непрямого дотику слід виконувати в усіх випадках, якщо напруга електроустановці перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму. В приміщеннях з підвищеною небезпекою, в особливо небезпечних і в зовнішніх установках виконання захисту від непрямого дотику може знадобитися при більш низьких напругах, наприклад: 25 В змінного і 60 В постійного струму або 12 В змінного і 30 В постійного струму за наявності відповідних вимог до конкретних електроустановок або електроприймачів.

Заходи захисту від ураження електричним струмом повинні бути передбачені в електроустановці чи її частині або застосовані до окремих електроприймачів і можуть бути реалізовані при виготовленні електрообладнання, або в процесі монтажу електроустановки чи в обох випадках. Застосування двох і більше заходів захисту в електроустановці не повинно чинити взаємного впливу, що знижує ефективність кожного з них.

Для захисного заземлення електроустановок можуть бути використані штучні і природні заземлювачі. В першу чергу слід використовувати природні заземлювачі. Якщо при використанні природних заземлювачів опір заземлювальних пристроїв задовольняє пред'явлені до них вимоги, то виконання штучних заземлювачів в електроустановках напругою до 1 кВ не обов'язкове. Використання природних заземлювачів як елементів заземлювальних пристроїв не повинно приводити до їх ушкодження при протіканні по них струмів короткого замикання або до порушення роботи пристроїв, з якими вони зв'язані.

Для заземлення в електроустановках різних призначень і напруг, територіально зближених, необхідно, як правило, застосовувати один спільний заземлювальний пристрій.

Заземлювальний пристрій, який використовується для заземлення електроустановок одного або різних призначень і напруг, повинен задовольняти усі вимоги, висунуті до заземлення цих електроустановок: захист людей від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції; умови режимів роботи мереж; захист електрообладнання від перенапруги; електромагнітну сумісність комп'ютерних і мікропроцесорних систем, РЗА і АСУ ТП, які застосовуються у цих електроустановках, тощо - протягом усього періоду експлуатації. В першу чергу повинні дотримуватись вимоги, висунуті до захисного заземлення.

При виконанні незалежного окремого заземлювача для функціонального заземлення за умовами роботи інформаційного або іншого чутливого до впливу перешкод устаткування повинні бути вжиті спеціальні заходи захисту від ураження електричним струмом, які виключають одночасний дотик до частин, що можуть при ушкодженні ізоляції опинитися під небезпечною різницею потенціалів.

Для об'єднання заземлювальних пристроїв різних електроустановок в один спільний заземлювальний пристрій можуть бути використані природні і штучні заземлювальні провідники при їх кількості не менше двох.

Необхідні значення напруг дотику і опорів заземлювальних пристроїв при стіканні з них струмів замикання на землю і струмів витoku повинні бути забезпечені при найбільш несприятливих умовах у будь-яку пору року.

При визначенні опору заземлювальних пристроїв повинні враховуватися штучні і природні заземлювачі. При визначенні питомого опору землі за розрахункове слід приймати його сезонне значення, яке відповідає найбільш несприятливим умовам. Заземлювальні пристрої повинні бути механічно міцними та динамічно стійкими до струмів замикання на землю і не повинні термічно ушкоджуватись за час їх протікання. Матеріал і переріз заземлювачів повинні забезпечувати їх стійкість до корозії на весь період експлуатації.

Електроустановки напругою до 1 кВ житлових, громадських і промислових будинків, приміщень для утримання тварин і зовнішніх

установок повинні, як правило, отримувати живлення від джерела з глухозаземленою нейтраллю із застосуванням системи заземлення TN. Вимоги до вибору системи TN-C, TN-S, TN-C-S для конкретних електроустановок подаються у відповідних главах ПУЕ.

TN-S система заземлення – нульовий робочий та нульовий захисний провідники працюють окремо в усій системі. TN-C-S система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в частині мережі.

TN-C система заземлення – функції нульового робочого та нульового захисного провідників об'єднані в одному провідникові в усій мережі.

ІТ-система заземлення – мережа живлення системи ІТ не має безпосереднього зв'язку струмовідних частин з землею, а відкриті струмопровідні частин електроустановки заземлені.

L – фазний провідник.

N – нульовий робочий провідник.

PE – нульовий захисний провідник.

PEN – об'єднаний нульовий робочий та захисний провідник.

Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому дотику в електроустановках із системою TN повинно виконуватися автоматичне вимикання живлення відповідно до підрозділу 1.4. На повітряних лініях мереж з системою TN повинно виконуватись повторне заземлення PEN- провідника відповідно до вимог підрозділу 1.6. Рекомендується також виконувати повторне заземлення PEN (PE) – провідника на ввіді в електроустановки будинків згідно з підрозділом 1.6. В середині великих і багатоповерхових будинків аналогічну функцію виконує зрівнювання потенціалів шляхом приєднання нульового захисного провідника до головної заземлювальної шини.

4.2 Вимоги під час проектування енергетичних об'єктів

Заходи щодо підвищення стійкості об'єктів енергетики здійснюють відповідно до вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів, які починають діяти після прийняття постанови урядом. Вимоги норм призначені для того, щоб в умовах НС:

- забезпечити захист населення та знизити масштаби руйнувань (пожеж, затоплень, заражень);
- підвищити стійкість роботи об'єктів господарювання і галузей економіки;
- створити умови для успішного проведення робіт з ліквідації наслідків НС.

Вимоги норм проектування реалізують під час проектування та забудови міст, будівництва нових промислових підприємств, об'єктів енергетики, транспортних систем, систем водо- та газопостачання, а також під час їх реконструкції.

Головним документом, відповідно до якого слід планувати та здійснювати інженерно-технічні заходи цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) є «Будівельні норми і правила» (БН і П 2.00.05-90), а також «Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження» (Київ, НАН України, 1995). Запровадження норм проектування ІТЗ ЦЗ здійснюється диференційовано з урахуванням ролі і важливості міст і об'єктів економіки. Для цього міста поділяють на групи, а об'єкти – на категорії за такою класифікацією: міста: «Особливої групи», I, II та III груп; об'єкти господарювання: «Особливої важливості», I та II категорій. Об'єкти атомної енергетики виділяють в окрему групу.

Для «категорійних» міст і об'єктів з метою реалізації ІТЗ встановлено дві зони: можливих слабких руйнувань, де очікується (за прогнозом) надмірний тиск у фронті повітряної УХ $P_{\phi} = 10\text{--}30$ кПа; можливих сильних руйнувань, у межах якої очікується $P_{\phi} > 30$ кПа.

Межа зони сильних руйнувань для міст «особливої», I, II, III груп пролягає в межах проектної забудови міста (ПЗМ), а зони слабких руйнувань – на відстані 7 км від межі проектної забудови міста (ПЗМ приймають відповідно до затвердженого генерального плану забудови на розрахунковий період). Для об'єктів «особливої важливості» межа зони сильних руйнувань пролягає на відстані 3 км від межі проектної забудови об'єкта; слабких – 10 км

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано та сформовано силову частину приводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами Siemens SIMOTICS S 1FK7083-2AF71-1QG0 потужністю 0,75 кВт, та безлюфтового хвильового редуктора з проміжними тілами кочення. Це забезпечило високі передавальні числа у компактному корпусі та хороші енергетичні параметри системи.

2. Розроблено систему векторного керування в рухомій системі координат dq з орієнтацією за потокозчепленням ротора та зворотним зв'язком через синусно-косинусний датчик. Такий підхід дозволив трансформувати трифазні гармонічні сигнали високої частоти (понад 133 Гц) у дві скалярні величини для спрощення та підвищення ефективності регулювання.

3. Запропоновано триконтурну систему підпорядкованого регулювання, де контур струму оптимізовано за модульним оптимумом, а контур швидкості - за симетричним. Для усунення перерегулювання в контурі положення класичну настройку скориговано шляхом навмисного збільшення постійної часу до 0,68 та впровадження задавача інтенсивності, що забезпечило плавний вихід на позицію за 0,075 с.

4. Шляхом імітаційного моделювання підтверджено адекватність системи в усіх режимах роботи, зокрема під час специфічного процесу ущільнення запірною органу. Система продемонструвала високу статичну точність і стійкість: при зростанні опору сідла регулятор швидкості переходить у насичення, забезпечуючи повну герметичність арматури та надійний захист двигуна від пошкодження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вороновський О.В., Кулик М.В., Романенко А.О. Теорія автоматичного керування в електроприводах: Навчальний посібник/ О.В. Вороновський, М.В. Кулик, А.О. Романенко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 184 с.
2. Jahns T.M. Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives for Valve Actuators and Pipeline Control/ T.M. Jahns // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Vol. IA-51, No. 3. – P. 2145–2153.
3. Загірняк М.В., Клепіков В.Б., Ковбаса С.М. Автоматизований електропривід загальнопромислових механізмів та трубопровідної арматури: Навчальний посібник/ М.В. Загірняк, В.Б. Клепіков, С.М. Ковбаса – Кременчук: КрНУ, 2023. – 190 с.
4. Шкрабець Ф.П., Остроухов М.В., Федорець М.С. Електричні машини та автоматизований привід запірно-регулюючих пристроїв: Монографія/ Ф.П. Шкрабець, М.В. Остроухов, М.С. Федорець – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. – 142 с.
5. Pyrhönen J., Hrabovcová V., Scott R.S. Design of Rotating Electrical Machines: Second Edition/ J. Pyrhönen, V. Hrabovcová, R.S. Scott – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. – 612 p.
6. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Димко С.С. Системи векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами: Монографія/ С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, С.С. Димко – Київ: Техніка, 2020. – 215 с.
7. Lorenz R.D., Novotny D.W. Controlled Speed AC Drive Systems: University Course Notes/ R.D. Lorenz, D.W. Novotny – Madison: University of Wisconsin, 2017. – 280 p.
8. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Кіселичник О.І. Теорія електроприводу: Підручник для студентів вищих навчальних закладів/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, О.І. Кіселичник – Київ: Вища школа, 2019. – 410 с.

9. Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Розкаряка П.І. Синтез систем підпорядкованого регулювання координат електроприводів: Навчальний посібник/ П.Х. Коцегуб, О.І. Толочко, П.І. Розкаряка – Донецьк-Дніпро: Середняк Т.К., 2018. – 165 с.

10. Островерхов М.Я., Бурик М.П., Сидоренко В.А. Системи керування напівпровідниковими перетворювачами та електроприводами: Навчальний посібник/ М.Я. Островерхов, М.П. Бурик, В.А. Сидоренко – Київ: Каравела, 2021. – 204 с.

11. Маляр В.С., Подільський В.Р., Блінов І.В. Моделювання електромеханічних систем у середовищі MATLAB Simulink: Підручник/ В.С. Маляр, В.Р. Подільський, І.В. Блінов – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 230 с.

12. 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 ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

13. 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. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.