

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення ПД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи АУТПм-22-1

Коротков Вячеслав Михайлович
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. КІТАР Ромашов Ю. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Я, як студент ХНУРЕ (Коротков Вячеслав Михайлович), розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата

04.01.2023

П.І.Б.

Коротков В.М.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАМ _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програм _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«03» листопада 2023р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

1. Тема роботи Розроблення ПІД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу _____

Затверджена наказом по університету від 3 листопада 2023р. № 1286 СТ

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи _____

ОС Windows _____

Середовище розробки – Scilab _____

Мова програмування – Scilab _____

Інтерфейс – графічний _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ. _____

4.2 Електропривод як об'єкт автоматизації. _____

4.3 Теоретичні основи проектування ПІД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу. _____

4.4 Узагальнена математична модель автоматизованого електроприводу. _____

4.5 Визначення параметрів ПІД-регулятора кутової швидкості. _____

4.6 Комп'ютерне моделювання процесів в автоматизованому електроприводі. _____

4.7 Висновки. _____

4.8 Додатки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) – 10 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	Ромашов Ю.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою атестаційної роботи	03.11 – 09.11.23	Виконано
2	Загальні поняття, класифікація та принципи будови електроприводу	09.11 – 18.11.23	Виконано
3	Теоретичні основи проектування ПД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу	18.11 – 26.11.23	Виконано
4	Узагальнена математична модель автоматизованого електроприводу	26.11 – 12.12.23	Виконано
5	Визначення параметрів ПД-регулятора кутової швидкості	12.12 – 19.12.23	Виконано
6	Комп'ютерне моделювання процесів в автоматизованому електроприводі	19.12 – 26.12.23	Виконано
7	Комп'ютерна модель електроприводу як об'єкт автоматизації	26.12 – 02.01.24	Виконано
8	Дослідження впливу інтегральної складової ПД-регулятора	02.01 – 07.01.24	Виконано
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	11.01.24	Виконано
10	Подання роботи на рецензію	13.01.24	Виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	19.01.24	Виконано
12	Подання атестаційної роботи в ЕК	29.01.24	Виконано

Дата видачі завдання 03.11.2023

Студент _____
(підпис)

Коротков В. М.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. каф. КІТАР Ромашов Ю. В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 27 рис., 14 джерел.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕЛЕКТРОДВИГУН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
ПД-РЕГУЛЯТОР, SCILAB

Об'єктом дослідження в даній роботі є автоматизований електропривод.

Предмет дослідження – математична модель ПД-регулятора кутової швидкості.

Метою роботи є розроблення автоматизованого ПД-регулятора кутової швидкості електропривода для подальшого розвитку промисловості, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільності і точності в роботі технічних систем.

У цьому дослідженні розроблені загальні підходи розробки ПД-регулятора кутової швидкості для електроприводів різних видів і призначень. Побудована спрощена математична модель для автоматизованого електроприводу з ПД-регулятором кутової швидкості, і показано, що отримані умови стійкості використовуючи критерії Рауса, дає нескінченний набір для цього контролера допустимих параметрів, і розробляти такі контролери, це пропонується додатково забезпечити бажані характеристики частотні функції для цих автоматизованих електроприводів. Застосування запропонованих загальних підходів проілюстровано наприкладі лінійних систем, що представляють широкий клас промислові автоматизовані електроприводи.

ABSTRACT

Explanatory note: 58 pp., 27 figures, 14 sources.

ELECTRIC DRIVE, ELECTRIC MOTOR, MATHEMATICAL MODEL, PID CONTROLLERS, SCILAB

The object of research in this paper is an automated electric drive.

The subject of the study is a mathematical model of the PID angular speed controller.

The purpose of the work is to develop an automated PID regulator of the angular speed of the electric drive for further development of the industry, increasing energy efficiency and ensuring stability and accuracy in the operation of technical systems.

The general approaches are developed in this research to design angular velocity PID controllers for electrical drives of different types and purposes. It is built the simplified mathematical model for the automated electrical drive with the angular velocity PID controller, and it is shown that, stability conditions obtained by using the Routh's criteria give to the infinite set for this controller's permissible parameters, and to develop such controllers, it is proposed additionally to provide the wished characteristics of the frequency functions for these automated electrical drives. Application of the proposed general approaches is illustrated on the example of the linear systems representing the wide class of the industrial automated electrical drives.

ЗМІСТ

Зміст	5
Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Електропривод як об'єкт автоматизації	10
1.1 Загальні поняття, класифікація та принципи будови електроприводу	10
1.2 Електричні машини та механічна частина електроприводу	15
1.3 Керування електроприводом	17
1.4 Автоматизований електропривод	22
1.5 Постановка задач дослідження	28
1.6 Висновки за розділом 1	29
2 Проектування ПІД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу	30
2.1 Загальні підходи щодо проектування ПІД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу	30
2.2 Узагальнена математична модель автоматизованого електроприводу	32
2.3 Визначення параметрів ПІД-регулятора кутової швидкості	39
2.4 Висновки за розділом 2	43
3 Комп'ютерне моделювання процесів в автоматизованому електроприводі ...	44
3.1 Комп'ютерна модель процесів в електроприводі	44
3.2 Комп'ютерна модель електроприводу як об'єкт автоматизації	47
3.3 Дослідження впливу інтегральної складової ПІД-регулятора	50
3.4 Висновки за розділом 3	52
4 Охорона праці	54
4.1 Небезпека ураження електричним струмом	54
4.2 Електробезпека	54

Висновки	57
Перелік джерел посилань	58
Додаток А Абробачія наукових результатів дослідження.....	61
Додаток Б Демонстраційний матеріал	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматична система керування;

ВЗЗ – внутрішній зворотний зв'язок;

ГЗЗ – головний зворотний зв'язок;

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

ЕП – електропривод;

ЗЕ – задаючий елемент;

КЕ – керуючий елемент;

М – електрична машина;

МП – механічний перетворювач;

П – силовий перетворювач;

ПЕ – перетворювальний елемент.

ПД-регулятор – пропорційно - інтегрально диференціальний регулятор;

ПП – підсумовуючий пристрій;

РО – робочий орган;

СКЕП – система керування електроприводом;

ТМ – технологічна машина;

DOL – Direct On-Line;

VFD – Variable Frequency Drive.

ВСТУП

Проектування ПД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу має велику актуальність, тому що автоматизовані електроприводи широко використовуються в різних галузях промисловості. Ефективне керування кутовою швидкістю важливо для забезпечення оптимального функціонування приводів та, відповідно, для підвищення ефективності виробничих процесів. Також використання ПД-регулятора дозволяє оптимізувати роботу електроприводу, зменшити витрати енергії та підвищити його загальну енергоефективність. Це стає особливо важливим у сучасному світі, де акцент робиться на сталому розвитку та енергозбереженні.

ПД-регулятор дозволяє досягти точності та стабільності роботи автоматизованих електроприводів. Це критично для багатьох застосувань, таких як промислові роботи, автоматизовані лінії виробництва та інші, де важлива висока якість та надійність процесів.

Завдяки розвитку сучасних технологій та поглибленню наукових досліджень, можливість створювати більш точні та ефективні ПД-регулятори зростає. Це дозволяє вдосконалювати системи керування та підвищувати загальний рівень автоматизації.

Об'єктом дослідження в даній роботі є автоматизований електропривод.

Предмет дослідження – математична модель ПД-регулятора кутової швидкості.

Робота виконується з метою розроблення автоматизованого ПД-регулятора кутової швидкості електропривода для подальшого розвитку промисловості, підвищення енергоефективності та забезпечення стабільності і точності в роботі технічних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкцій електропривода та його процесів;
- провести розробку математичної моделі електропривода;
- виконати комп'ютерне моделювання автоматизованого ПД-регулятора кутової швидкості електропривода;
 - виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень;
 - оформити пояснювальну записку згідно ДСТУ 3008:2015[1–5].

1 ЕЛЕКТРОПРИВОД ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Загальні поняття, класифікація та принципи будови електроприводу

Електропривод – це електромеханічна система призначена для перетворення електричної енергії в механічну і навпаки.

Звичайний процес перетворення енергії є керованим.

При аналізі структури ЕП розрізняють дві основних частини, або канали:

- силову;
- інформаційну.

До силової частини належать електричні двигуни, перетворювачі електричної та механічної енергії, робочі органи, механізми, тобто всі частини електричного приводу, в яких протікає потужна енергія.

До інформаційної частини належать пристрої призначенні для керування електричним приводом, контролю технологічного процесу і тощо. Якщо привод не керований, інформаційна частина має бути відсутня.

До пристроїв інформаційного каналу відносять датчі, системи керування, моніторингу, лінії зв'язку і тощо.

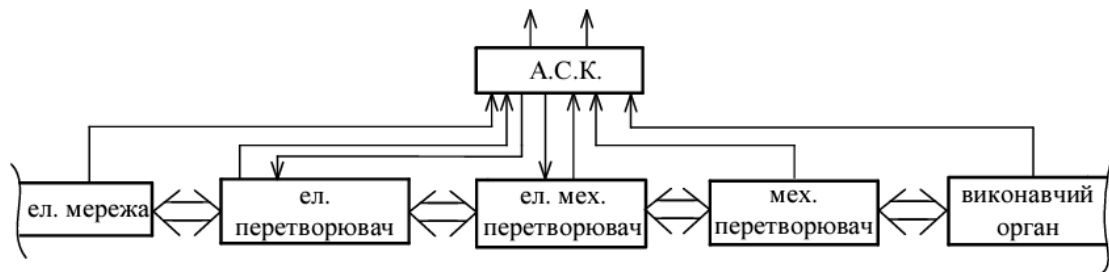


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура ЕП

Електричний привод зв'язаний двостороннім зв'язком з електричною мережею (ЕМ). В разі необхідності електрична енергія перетворюється за

допомогою електричного перетворювача (ЕП), після чого споживається електромеханічним перетворювачем (ЕМП). У ряді випадків необхідно перетворювати механічну енергію (зменшити швидкість обертання, збільшити момент, перейти від обертального руху до поступального і тощо) для чого використовується механічний перетворювач (МП), який пов'язаний із виконавчим органом, що виконує корисну роботу.

Розглянута частина приводу є силовою, та може передавати енергію в прямому, та зворотному напрямках.

В разі необхідності керування технологічним процесом ЕП оснащують автоматичною системою керування (АСК). АСК може отримувати інформацію від будь-якого елемента системи ЕП, та впливатиме на керовані елементи.

Класифікація електроприводів

а) За історією розвитку:

- 1) груповий – один двигун приводить до руху багато механічних пристроїв, виконавчих органів і тощо;
- 2) індивідуальний – кожен виконавчий орган та механізм працює із своїм двигуном, що відкриває широкі можливості для автоматизації;
- 3) пов'язаний – два або більше двигунів пов'язані механічно або електрично для синхронізації роботи.

б) за родом струму:

- 1) постійного струму;
- 2) змінного струму.

в) за ступенями керованості:

- 1) не керовані;
- 2) регульовані – мають декілька режимів, швидкостей;
- 3) програмовані – виконують послідовність команд, що були завчасно задані;

4) слідкуючий – ЕП, що відпрацьовує сигнал керування, який поступає зовні;

5) адаптивний – змінює свою структуру і параметри в залежності від впливу зовнішніх факторів із метою оптимізації вихідної величини.

г) за родом передаточного приладу:

1) редукторні;

2) безредукторні;

д) за рівнем автоматизації:

1) не автоматизовані;

2) автоматизований – в цьому випадку параметри керування визначаються людиною;

3) автоматичний – весь технологічний процес відбувається без участі людини.

Сили та моменти в ЕП розділяють на дві великі групи:

– динамічні;

– статичні.

Динамічні моменти та сили пов'язані зі зміною кінематичної енергії, що накопичується в механічній частині приводу. Статичні сили та моменти пов'язані із виконанням корисної роботи. Компенсацією «шкідливих» сил (тертя, опору повітря і тощо), непружними деформаціями, непружним крученням і тощо. В свою чергу статичні сили та моменти розділяють на активні і реактивні. Активні сили і моменти обумовленні виконанням роботи у полі потенційних сил, які не змінюють свій напрямок із зміною руху.

Асинхронний двигун складається з двох основних частин, розділених повітряним зазором: нерухомого статора й обертового ротора. Кожна з цих частин має осердя й обмотку. При цьому обмотка статора включається в мережу і є як би первинною, а обмотка ротора – вторинною, тому що енергія в неї

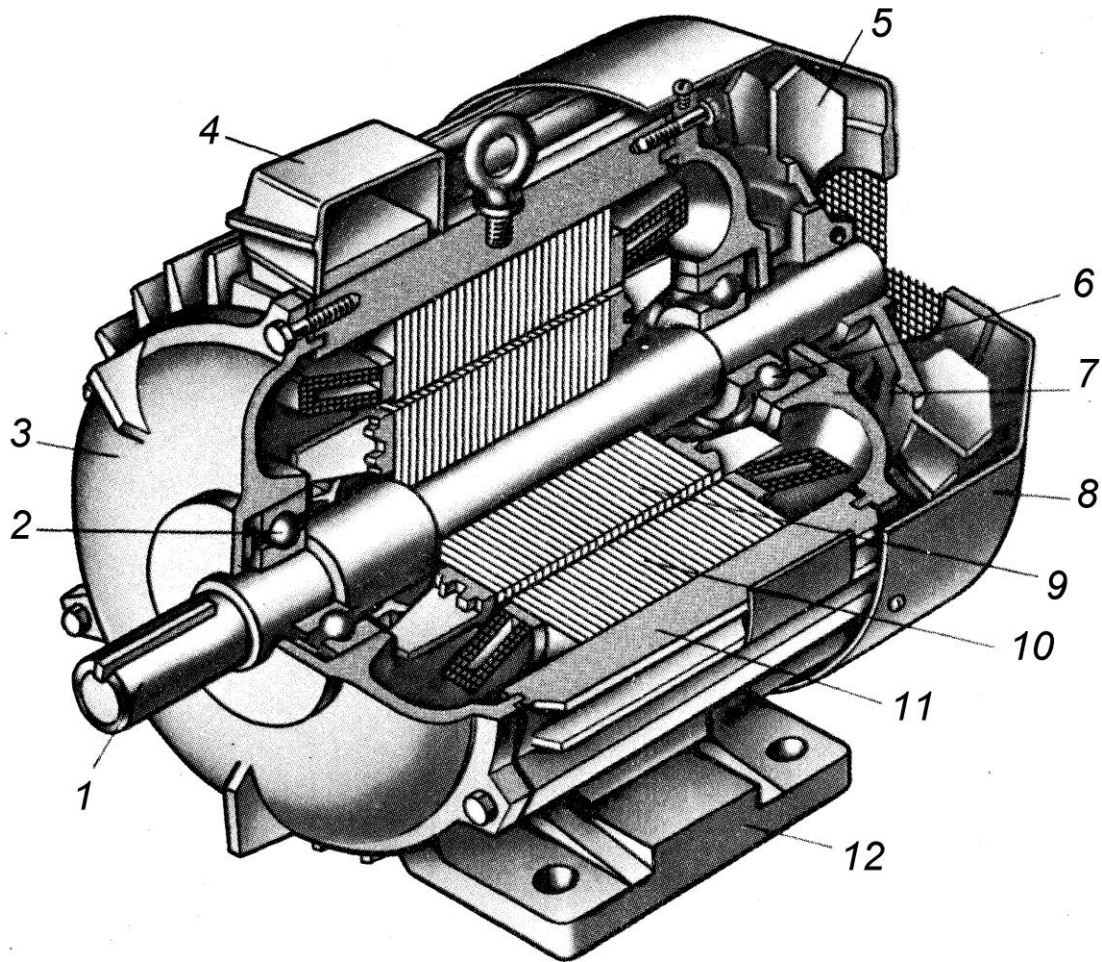
надходить з обмотки статора за рахунок магнітного зв'язку між цими обмотками, як у трансформатора.

За своєю конструкцією асинхронні двигуни поділяються на два види: двигуни з короткозамкнутим ротором і двигуни з фазним ротором. Будову трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором показано на рисунку 1.2. Двигуни цього виду мають найбільш широке застосування. Нерухома частина двигуна – статор – складається з корпусу 11 та осердя 10 із трифазною обмоткою. Корпус двигуна відливають з алюмінієвого сплаву чи з чавуну, або роблять зварним. Розглянутий двигун має закрите обдуже виконання. Тому поверхня його корпусу має ряд повздовжніх ребер, призначення яких полягає в тому, щоб збільшити поверхню охолодження двигуна.

У корпусі розташоване осердя 10 статора, що має шихтовану конструкцію: відштамповані листи з електротехнічної сталі, яка має найменші втрати на перемагнічування, товщиною, звичайно, 0,5 мм покриті шаром ізоляційного лаку, зібрані в пакет і скріплені спеціальними скобами чи повздовжніми зварними швами по зовнішній поверхні пакета. Така конструкція осердя сприяє значному зменшенню вихрових струмів Фуко, що виникають у процесі перемагнічування осердя обертовим магнітним полем. На внутрішній поверхні осердя статора є повздовжні пази, у яких розташовані пазові частини обмоток статора. Фазні обмотки виготовляють з ізольованого мідного проводу, який укладають у пази таким чином, щоб між їх серединами був кут 120°.

У розточці статора розташована обертова частина двигуна – ротор, що складається з вала 1 і осердя 9 із короткозамкнутою обмоткою. Така обмотка, названа «колесо білки», являє собою ряд металевих (алюмінієвих чи мідних) стержнів, розташованих у пазах осердя ротора, замкнених із двох сторін короткозамикаючими кільцями. Осердя ротора також має шихтовану конструкцію, але листи ротора не покриті ізоляційним лаком, а мають на своїй

поверхні тонку плівку окислу. Це є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми, тому що величина їх невелика через малу частоту перемагнічування осердя ротора. Наприклад, при частоті мережі 50 Гц і номінальному ковзанні 6% частота перемагнічування осердя ротора складає 3 Гц. Ротор і статор розділені повітряним зазором [6].



1 – вал; 2, 6 – підшипники; 3, 7 – підшипникові щити; 4 – коробка виводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух вентилятора; 9 – осердя ротора з короткозамкнутою обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою; 11 – корпус; 12 – лапи.

Рисунок 1.2 – Будова трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором [6].

1.2 Електричні машини та механічна частина електроприводу

Механічна частина електропривода – це рухомі маси двигуна (ротор) та передавального пристрою. З механічною частиною електропривода безпосередньо зв'язаний робочий орган (РО) механізму, який є об'єктом керування електропривода. Хоча робочий орган механізму не входить до механічної частини електропривода, але його параметри (маса, момент інерції тощо) враховуються в математичному описі електропривода, тому при проектуванні та дослідженні електропривода потрібно розглядати кінематичну схему всієї електромеханічної системи.

Кінематичні схеми механізмів дуже різноманітні, проте вони мають загальні особливості, бо складаються з типових елементів, а саме – зв'язаних в одне механічне коло мас, що рухаються обертально чи поступально. При навантаженні елементи кінематичної схеми відповідно до закону Гука пружно деформуються, бо не є абсолютно жорсткими. Такий рух механічної частини електропривода описується законами теоретичної та прикладної механіки.

На кінематичній схемі елементи, які рухаються поступально, характеризуються масою m [кг], а ті, що рухаються обертально – моментом інерції J [кг·м²]. Кожен елемент пов'язаний з наступним елементом невагомим механічним зв'язком, що характеризується жорсткістю c , яка вимірюється в [Н/м] чи [Н·м/рад] в залежності від виду руху.

Жорсткість – це величина зусилля чи моменту на одиницю деформації тіла. Чим більша жорсткість тіла, тим менше воно деформується. При поступальному русі на тіло (стрижень) діє пружне зусилля F_{12} , яке викликає деформацію S рисунок 1.3.

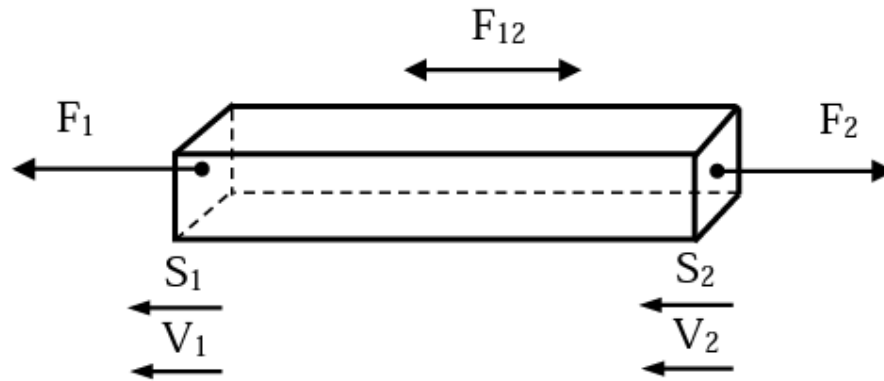


Рисунок 1.3 – Деформація пружного стрижня [7]

При обертальному русі на тіло (вал) діє пружний момент, який викликає деформацію рисунок 1.4.

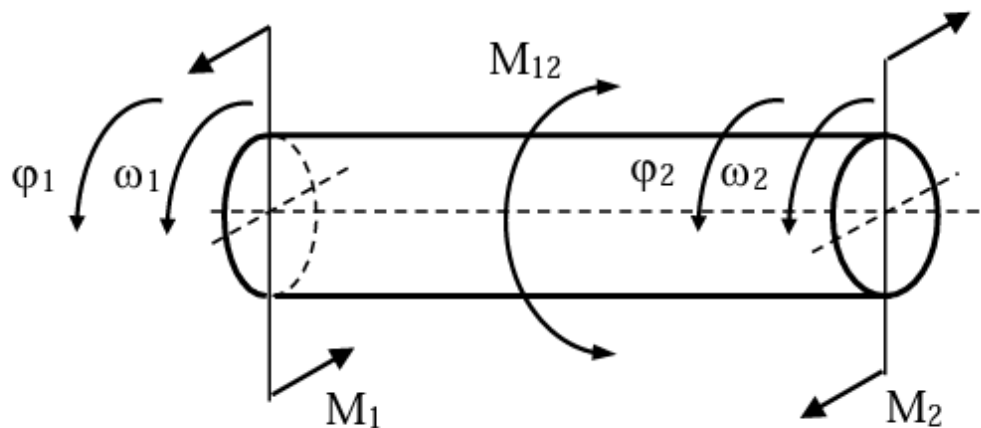


Рисунок 1.4 – Деформація пружного валу [7]

Найпершою задачею при проектуванні ЕП є складання на основі кінематичної схеми механічної частини електромеханічної системи розрахункової схеми та спрощення її до ступеня відповідно до вимог синтезу. Чим простіша розрахункова схема, тим простіший її математичний опис і

відповідний регулятор, проте при спрощенні не повинно якісно змінитися математична модель електромеханічної системи.

Кожен елемент кінематичної схеми характеризується жорсткістю, масою чи моментом інерції, сукупністю діючих на нього моментів чи сил, проте має свою швидкість, тому для безпосереднього порівняння вказаних параметрів їх необхідно привести до однієї швидкості, відносно якої здійснюються розрахунки та дослідження. Найчастіше це швидкість двигуна або лінійна швидкість робочого органу. В результаті приведення реальна кінематична схема замінюється енергетично еквівалентною розрахунковою. Найбільший вплив на рух мають елементи з найбільшою масою, як найбільш інерційні, та зв'язки з найменшою жорсткістю, бо призводять до коливань мас. Виділивши їх, можна спростити розрахункову схему й тим самим забезпечити меншу складність системи керування [7].

1.3 Керування електроприводом

Керування електроприводом – це процес керування рухом або функціями електроприводу (наприклад, електродвигуна) за допомогою різних технологій і пристроїв. Це може включати в себе регулювання швидкості, напруги, частоти, торку та інших параметрів для досягнення бажаного результату.

Кожну СКЕП можна розглядати як систему, що обробляє інформацію. Залежно від кількості використовуваних у СКЕП каналів інформації і їх структури розрізняють 3 види автоматичного керування:

- по розімкнутому циклу;
- по замкненому циклу;
- по комбінованому циклу.

На схемах (рис. 1.5 – 1.7) введені наступні позначення: U_C – напруга живильної мережі; Y_{PO} – регульована величина; m – регулюючий вплив; g –

задаючий сигнал; f_1 – f_n – збурення; ЗЕ – задаючий елемент; ПП – підсумовуючий пристрій; КЕ – керуючий елемент; П – силовий перетворювач; М – електрична машина; ГЗЗ – головний зворотний зв'язок; ВЗЗ – внутрішній зворотний зв'язок (допоміжний); ТМ – технологічна машина; ПЕ – перетворювальний елемент.

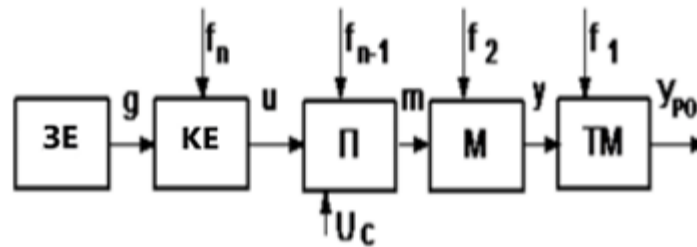


Рисунок 1.5 – Система, що працює по розімкненому циклу [8]

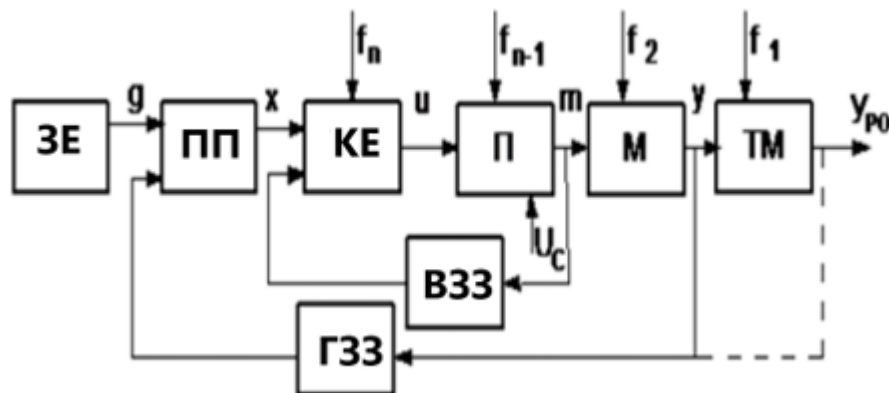


Рисунок 1.6 – Система, що працює по замкненому циклу [8]

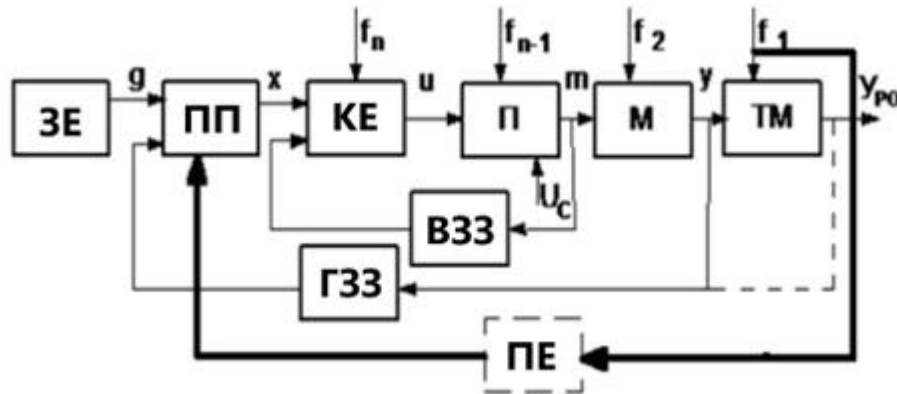


Рисунок 1.7 – Система, що працює по комбінованому циклу [8]

Для систем, що працюють по розімкнутому циклу (рисунок 1.4) характерна відсутність усякого виміру і контролю кінцевого значення регульованої величини U . Регулюючий вплив від регульованої величини не залежить. У цих системах є тільки один канал інформації – канал завдання, точність таких систем невисока і визначається жорсткістю природної характеристики двигуна. Дана система використовується для пуску і гальмування двигунів, регулювання швидкості в невеликих межах.

У системах керування по замкненому циклу (рисунок 1.5) спільно використовується два канали інформації:

- канал інформації за завданням $g(t)$;
- канал інформації про фактичне значення регульованої величини $y(t)$ (зворотний зв'язок).

Інформація завдання, порівнюється з інформацією зворотного зв'язку, визначається помилка керування $x(t)=g(t)-y(t)$ і залежно від величини і знака цієї помилки по каналу керування виробляється регулюючий вплив $m(t)$ на електродвигун таким чином, щоб звести помилку до нуля (або до припустимої величини), тобто забезпечити зміну регульованої величини за необхідним законом. При цьому жодне зі збурень не вимірюється, а їх вплив на регульовану величину сприймається системою керування опосередковано по каналу

зворотного зв'язку. Таке керування називається керуванням за помилкою або за відхиленням, а зворотний зв'язок по регульованій величині – головним зворотним зв'язком (виконується жорстким, негативним). Крім головного зворотного зв'язку в таких системах іноді застосовують допоміжні зворотні зв'язки ВОС (місцеві, жорсткі і гнучкі). Дія гнучких зворотних зв'язків впливає тільки в перехідних процесах. Керуючі елементи і допоміжні елементи СКЕП служать для поліпшення якості процесу керування (жорсткі негативні ВОС послабляють вплив збурень на елементи, охоплені ними). Якщо система має один головний зворотний зв'язок, вона одноконтурна, якщо крім головного ЗЗ має ще один або декілька місцевих ЗЗ, то вона – багатоконтурна.

СКЕП, які мають головний ЗЗ по регульованій величині називають замкненими.

Якість роботи системи зі ЗЗ значно вище, чим у розімкнутій системі і їх застосовують:

- у глибоко регульованих ЕП;
- при складних законах зміни задаючого впливу $g(t)$;
- у приводах виконавчих органів, що працюють узгоджено у одному механізмі або у декількох різних механізмах;
- коли потрібне формування оптимальних процесів пуску, гальмування, реверсу.

З метою зменшення помилки за збуренням може бути побудована система з регулюванням по збуренню за рахунок подачі на вхід сигналу, пропорційного збуренню, причому цей сигнал повинен компенсувати сигнал збурення в точці його прикладання.

Зменшення або повне усунення помилки може бути досягнуте при комбінованому керуванні, яке поєднує керування по відхиленню і керування по збуренню. Цей вид керування є найбільш досконалими і здійснюється по комбінованому циклу (рисунок 1.7). Для його реалізації до основної замкненої

структури додається розімкнута структура з каналом інформації по основному збурювальному впливу $f_1(t)$.

В наслідок цього у регулюючій дії $m(t)$ постійно є присутньою складова, яка компенсує вплив збурення $f_1(t)$ безпосередньо у місці його прикладання, що дозволяє забезпечити незалежність (інваріантність) регульованої величини $v(t)$ від основного збурювального впливу. Тобто розімкнута структура реалізує керування по збуренню, а вплив інших збурень ліквідує основна замкнена структура.

Іноді регульованою величиною для ЕП є вихідна координата технологічної машини ТМ – УРО (кутове переміщення робочого органу, температура і тощо). У цьому випадку вхідне коло головного ЗЗ переноситься на вихід ТМ (згідно з пунктиром на рисунках 1.5, 1.6).

По виду сигналів інформації і керування СКЕП поділяються на безперервні (аналогові) і дискретні (імпульсні, цифрові, релейні).

Системи керування можуть бути статичними ($\Delta X \neq 0$) і астатичними ($\Delta X = 0$) стосовно задаючого або збурювального впливу.

Усі системи, залежно від характеру рівнянь, що описують процеси керування, умовно діляться на лінійні (лінеаризовані) і нелінійні.

Вибір методу керування електроприводом залежить від конкретних вимог, типу приводу, характеристик навантаження та інших факторів. Кожен з цих методів має свої переваги та застосування в різних областях промисловості та автоматизації.

Сучасний етап автоматизації характеризується переважаючим застосуванням регульованого електропривода з використанням силових напівпровідникових перетворювачів, високоточних датчиків, а також аналогових, логічних і цифрових інтегральних мікросхем у керуючих пристроях. Подальший розвиток електронних засобів автоматизації пов'язаний з широким використанням мікропроцесорів, а також з переходом від дискретних схем

автоматики, що мають незмінну структуру, до вільно програмованих систем керування, головним чином до програмованих контролерів.

Підвищення технологічних вимог до електропривода, розширення його функцій призводить до зростання складності систем керування і збільшення кількості елементів електроавтоматики.

1.4 Автоматизований електропривод

Узагальнена функціональна схема автоматизованого електроприводу (АЕП) представлена на рисунку 1.8.

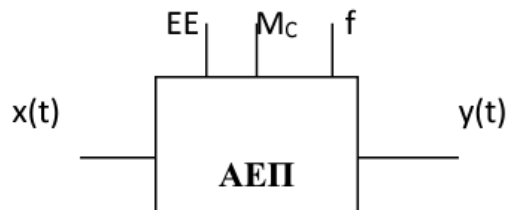


Рисунок 1.8 – Схема автоматизованого електроприводу [8]

Завдання, розв'язувані АЕП, залежать від характеру вхідного сигналу $x(t)$ і відповідності зміни вихідного сигналу $y(t)$ необхідному закону:

Формування необхідного закону зміни вихідного сигналу в перехідних режимах при прикладанні вхідного сигналу стрибком. Це завдання вирішується, коли визначають кінцеве значення регульованої величини, або є просто командою на пуск, гальмування, реверс і тощо.

$$y(t) = f_1\{x(t)\}, \quad (1.1)$$

де f_1 – функція залежності від припустимих струмів двигуна, прискорення, температури і тощо;

Підтримка з деякою точністю в статиці і динаміці відповідності між вихідною величиною і задаючою дією. Завдання вирішується, коли $x(t)$ є бажаним законом зміни $y(t)$;

$$y(t) = kx(t), \quad (1.2)$$

таку відповідність витримувати досить складно, тому що:

- діють збурення (зміни моменту на валу МС, напруги живильної мережі, температури і тощо);
- є інерційність елементів АУУ і ЕП;
- є нестабільність та обмеження параметрів ланок;
- обмежена чутливість ланок;
- неоднозначність елементів (гістерезис).

Оптимізація процесу зміни вихідної регульованої величини при зміні задаючого або збурювального впливу відповідно до прийнятих критеріїв якості.

$$y(t) = f_2\{x(t)\}, \quad (1.3)$$

де f_2 – визначається прийнятим критерієм, наприклад, швидкодією, коливальністю, втратами.

В якості базової прийнята класифікація СКЕП по видах керування певним основним функціям електромеханічних систем. Нараховується 6 основних функцій АЕП:

- керування процесами пуску, гальмування, реверсу (функція керування).
- Цю функцію можуть виконувати розімкнуті системи АЕП. У процесі керування здійснюється грубий контроль за струмом. Жорсткість механічних

характеристик не вище природних. На цей момент це найпоширеніша група АЕП;

- підтримання заданого значення регульованих координат – струму, швидкості, положення, потужності та інші з високим ступенем точності у статиці і динаміці (функція стабілізації). Цю функцію може виконати тільки замкнута система АЕП. Основна регульована величина – та, по якій замикається головний зворотний зв'язок;

- стеження за вхідними сигналами, що змінюються довільно (функція стеження, слідкування). Це завдання може бути виконане тільки в замкнутих системах. Сучасна слідкуюча система, як правило, трьохконтурна;

- відпрацьовування завдання, яке змінюється згідно програми (функція програмного керування);

- вибір доцільних режимів роботи АЕП (функція адаптації). Завдання може бути виконано в замкнутих системах;

- автоматичне керування комплексами машин і механізмів, об'єднаних загальним технологічним процесом.

Крім основних функцій, системи АЕП виконують ще й додаткові:

- захист електродвигуна і устаткування від к.з., перевантажень по струму, по напрузі і тощо;

- блокування, що забезпечує певну послідовність операцій і виключає аварійні режими;

- сигналізація.

Усі СКЕП, що виконують 1 – 4 основні функції, відносяться до автоматичних систем регулювання. Адаптивні СКЕП являють собою кібернетичні системи.

Системи керування першої групи забезпечують найпростіші операції пуску, зупинки, реверсування двигуна. Швидкість двигуна після розгону не регулюється і визначається природною механічною характеристикою та

величиною моменту навантаження МС. Для таких систем не передбачається застосування спеціальних заходів, що забезпечують формування оптимального перехідного процесу, тому в динаміці можливі довільні коливання змінних у широких межах. Якщо від механізму потрібна зміна швидкості усталеного руху, то від електропривода в загальному випадку потрібний автоматичний пуск двигуна на кожну із заданих швидкостей і переходи з кожної із заданих швидкостей на будь-яку іншу. Передбачається, що кожна швидкість задається відповідною механічною характеристикою двигуна. Автоматичні пристрої, що виконують першу функцію досить прості і допускають переривчасте керування.

Вони мають розімкнуту структуру і представлені на рисунку 1.9.

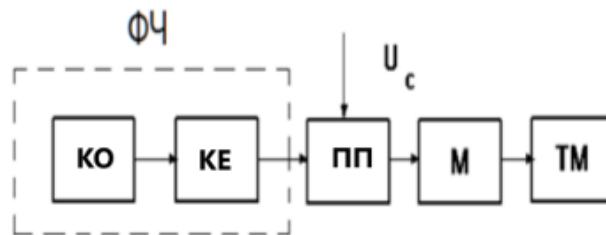


Рисунок 1.9 – Системи керування першої групи [8]

Система має функціональну частину (ФЧ), в яку входить командний орган (КО), керуючий елемент (КЕ), перемикаючий пристрій (ПП), який виконується зі ступінчастим перемиканням резисторів, реакторів, обмоток і інших елементів. Застосування знаходять в ЕП постійного і змінного струму транспортних засобів, а також механізмів металообробної, металургійної і інших галузей промисловості.

Системи керування другої групи автоматично відпрацьовують керуючу дію і підтримують задану швидкість обертання або іншу координату з високою точністю в статиці і динаміці (струм, швидкість, потужність, момент, прискорення).

Система керування є замкненою і забезпечує більш високу точність підтримання сталості заданої координати, чим розімкнута. Функціональна схема представлена на рисунку 1.10 і складається з командного органу КО, Керуючого пристрою КП, силового перетворювача ПП і зворотного зв'язку по швидкості ДШ двигуна, сигнал якого надходить на вхід КП, де відбувається порівняння його із заданим та формування потрібного закону керування.

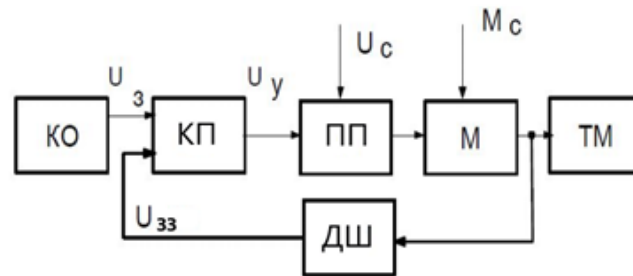


Рисунок 1.10 – Системи керування другої групи [8]

Системи керування третьої групи здійснюють стеження за сигналом завдання, що вводиться в систему і призначені для приводів технологічних машин, які вимагають відслідковування положення (рідше швидкості) виконуючого органу, тобто щоб вихідний вал повторював завдання із заданою точністю. Функціональна схема представлена на рисунку 1.11.

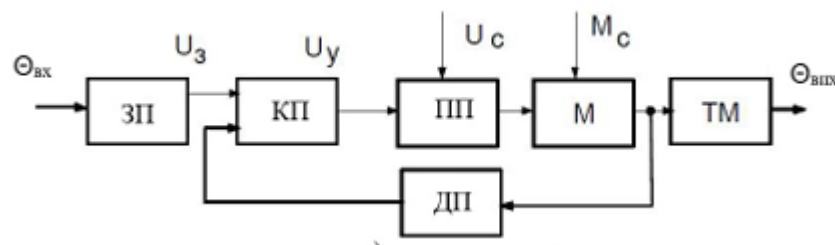


Рисунок 1.11 – Системи керування третьої групи [8]

Системи керування четвертої групи здійснюють відпрацювання заданої програми, тобто програмне керування. Програмні системи керування можуть містити в собі як замкнені, так і розімкнуті СКЕП, але мають загальний програмуючий пристрій ПРП, як це показано на рисунку 1.12.

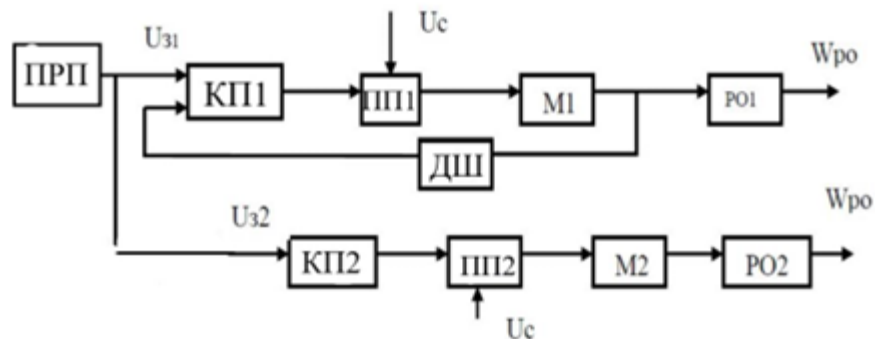


Рисунок 1.12 – Системи керування четвертої групи [8]

В даному прикладі схема складається з 2-х підсистем: верхня – замкнена, нижня – розімкнута. Електропривод із двигуном М1 виконаний по замкненій СУ, яка підтримує постійним значення швидкості РО1. Електропривод із двигуном М2 має розімкнуту систему керування і забезпечує зміну швидкості обертання валу РО2. Програма може формуватися програмним пристроєм різними способами.

Системи керування п'ятої групи забезпечують вибір доцільних режимів роботи ЕП – адаптивне керування.

Структура такої системи наведена на рисунку 1.13.

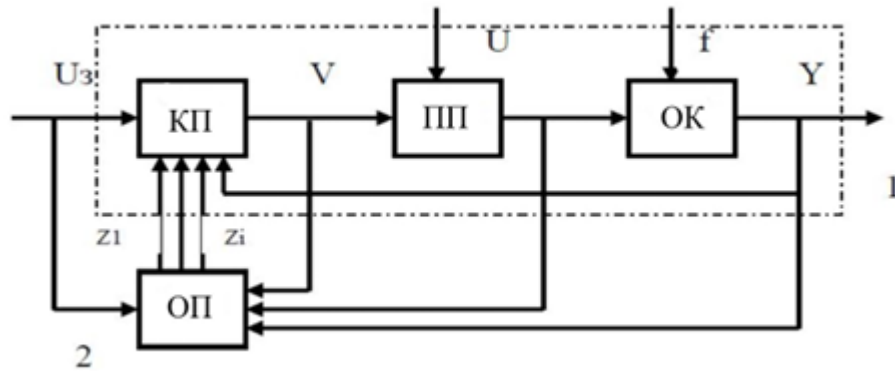


Рисунок 1.13 – Системи керування п'ятої групи [8]

Системи керування шостої групи забезпечують автоматичне керування комплексами машин і механізмів, об'єднаних загальним технологічним процесом. Використовуються при комплексній автоматизації виробничих процесів і установок – системі організації виробництва, при якій технологічні процеси виконуються автоматично діючою системою машин. Комплексна автоматизація припускає виконання автоматизованими пристроями найбільш складних функцій керування [9–12].

1.5 Постановка задач дослідження

Отже для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкцій електропривода та його процесів;
- провести аналіз теоретичних основ проектування електропривода ПДД-регулятора кутової швидкості електропривода;
- провести розробку математичної моделі електропривода ПДД-регулятора кутової швидкості електропривода;
- виконати комп'ютерне моделювання автоматизованого ПДД-регулятора кутової швидкості електропривода;

– виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень;

1.6 Висновки за розділом 1

У першому розділі ми розглянули інформацію про структуру та класифікацію електроприводів, а також методи їхнього керування. Зазначено, що електропривід можна класифікувати за різними критеріями, такими як історія розвитку, рід струму, ступені керованості, тип передаткового пристрою та рівень автоматизації. Описані різновиди сил і моментів в електроприводі, а також основні характеристики асинхронного двигуна та його будову.

Структура електроприводу розглядається як система з двох частин: силової та інформаційної. Силова частина включає всі елементи, де протікає потужна енергія, такі як електричні двигуни та механізми. Інформаційна частина призначена для керування електроприводом та контролю технологічного процесу.

Також надано інформацію про різновиди систем керування, такі як системи по розімкнутому циклу, по замкненому циклу та комбіновані цикли. Визначено переваги систем керування по замкненому циклу, зокрема високу якість роботи та застосування в глибоко регульованих електроприводах.

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Загальні підходи щодо проектування ПІД-регулятора кутової швидкості автоматизованого електроприводу

Різні підходи до проектування ПІД-регуляторів електроприводів мають схожі риси, які становлять загальні підходи.

Параметри ПІД-регулятора вибирають, щоб забезпечити автоматичну добірку заданих станів електроприводу.

ПІД-регулятор автоматично формує корекцію управління, що забезпечує заданий стан електроприводу.

Тому на етапі проектування відсутні вироби, що використовують математичні моделі.

Математична модель ПІД-регулятора – це математичний об'єкт, властивості якого близькі до властивостей ПІД-регулятора, тому вивчаючи математичну модель зможемо проєціювати стан ПІД-регулятора.

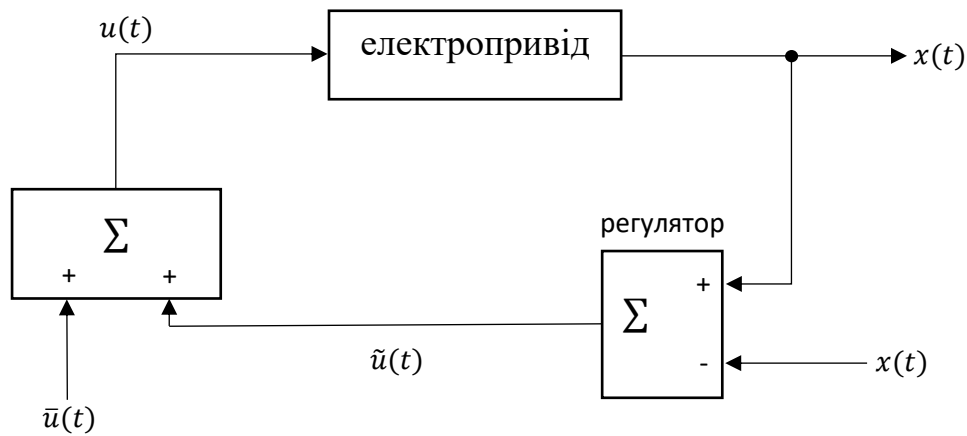


Рисунок 2.1 – Схема ПД-регулятора електропривода

$$u(t) = \bar{u}(t) + \tilde{u}(t), \quad (2.1)$$

де $u(t)$ – сигнал управління;

$\bar{u}(t)$ – заданне управління;

$\tilde{u}(t)$ – корекція управління.

$$x(t) - \bar{x}(t) = \tilde{x}(t), \quad (2.2)$$

де $x(t)$ – стан електропривода;

$\bar{x}(t)$ – необхідний стан електропривода;

$\tilde{x}(t)$ – відхилення стану електроприводу від необхідного (мале).

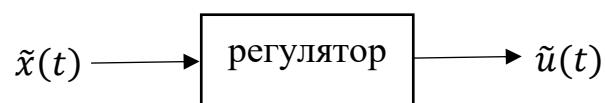


Рисунок 2.2 – Схема автоматичного регулятора

Закон регулювання для ПД-регулятора записується так:

$$\ddot{u}(t) = -K_p \ddot{x}(t) - K_I \int \ddot{x}(t) dt - K_D \frac{d\ddot{x}(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

де K_p, K_I, K_D – параметри ПД-регулятора.

Математична модель електроприводу – це математичний об'єкт, властивості якого є досить близькими до властивостей електроприводу, щоб вивчення математичної моделі дозволяло прогнозувати властивості електроприводу.

Якщо електропривод розглядати як об'єкт автоматизації, його математична модель повинна відображати зв'язок між управлінням $u(t)$ і поточним станом $x(t)$ електроприводу.

$$u(t) \xrightarrow{A_e} x(t), \quad (2.4)$$

де A_e – модель електропривода.

Зазвичай модель електроприводу представляють у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь.

У моделі електроприводу слід врахувати наявність ПД-регулятора так, що в результаті вийде модель автоматизованого електроприводу. Сенс ПД-регулятора в тому, щоб $\ddot{x}(t)$ був малим, це дозволяє лінеаризувати диференціальні рівняння автоматизованого електроприводу так, що в загальному випадку вони набудуть вигляду:

$$a_k \frac{d^n \ddot{x}}{dt^n} + a_{k-1} \frac{d^{n-1} \ddot{x}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\ddot{x}}{dt} + a_0 \ddot{x} = b_0 \ddot{u}(t), \quad (2.5)$$

де, $a_k = a_k(k_p k_I k_D)$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$, а b_0 – параметри математичної моделі автоматизованого електроприводу, зазвичай параметри підбирають так щоб:

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow \tilde{x}(t) \rightarrow 0. \quad (2.6)$$

Такі традиційні підходи – це по суті стійкість за Ляпуновим, Рауса, тобто визначення параметрів електродвигуна зводяться до задоволення умови стійкості полінома.

$$f(s) = a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0. \quad (2.7)$$

2.2 Узагальнена математична модель автоматизованого електроприводу

Автоматизований електропривод – складна система, яку можна вивчати з різних аспектів. Можна вивчати механічну, електричну частину та як електромеханічну систему, а також як засоби автоматизації.

Далі нами розглядатиметься електропривод як об'єкт автоматизації, такий розгляд відіграє ключову роль для проектування систем автоматичного керування та регулювання.

Характерною рисою математичних моделей об'єктів автоматизації є те, що у моделях введено керований параметр і параметр характеризуючий управління за рахунок якого забезпечується необхідне значення керованого параметра.

Для електроприводу керованим параметром можна розглядати кутову швидкість ротора електродвигуна.

Параметр характеризуючий управління – це напруга, що подається на електродвигун.

Зрозуміло, що керований параметр та параметр керування – функції часу t .

$$\omega = \omega(t), u = u(t), \quad (2.8)$$

де ω – ротор електродвигуна, u – напруга, що подається на електродвигун.

Математична модель повинна зв'язувати $\omega(t)$ та $u(t)$.

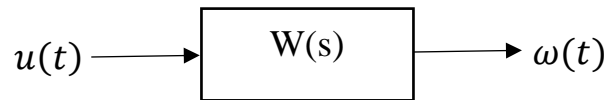


Рисунок 2.3 – Динамічна ланка, що представляє електропривід як об'єкт автоматизації

Вигляд математичної моделі повинен бути зручним для подальшого використання під час проектування систем автоматизованого управління та регуляторів у тому числі.

Найбільш загальний вигляд нашої математичної моделі записується так:

$$a_n \frac{d^n \omega}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} \omega}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_0 \omega = b_0 u(t), \quad (2.9)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0^{(0)}, \frac{d\omega}{dt}(t_0) = \omega_0^{(1)}, \dots, \frac{d^{n-1} \omega}{dt^{n-1}}(t_0) = \omega_0^{(n-1)}, \quad (2.10)$$

де n – порядок диференціального рівняння математичної моделі електроприводу;

$a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0$ – параметри диференціального рівняння математичної моделі електроприводу;

t_0 – заданий початковий момент часу;

$\omega_0^{(0)}, \omega_0^{(1)}, \dots, \omega_0^{(n-1)}$ – задані значення кутової швидкості та її похідних у початковий момент часу $t = t_0$.

Таким чином побудова математичної моделі (2.9), (2.10) зводиться у першу чергу до визначення параметрів диференціального рівняння (2.9). Для цього розглянемо процеси в електроприводі як в електромеханічній системі на основі електромеханічних аномалій, які дозволяють уявити математичну модель процесів в електроприводі у формі рівнянь Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} * \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, k = 1, 2, \dots, N, \quad (2.11)$$

де N – число ступенів свободи електроприводу як електромеханічної системи;

q_1, q_2, \dots, q_n и $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$ – узагальнені координати електроприводу як електромеханічної системи;

L – функція Лагранжа;

R – дисипативна функція Релея;

Q_k – узагальнені сили, які не розглядаються як дисипативні.

Рівняння (2.10) призведуть до системи N диференціальних рівнянь 2-го порядку, тому слід розглядати з початковими умовами.

$$\begin{aligned} q_1(t_0) &= q_{10}, q_2(t_0) = q_{20}, \dots, q_n(t_0) = q_{n0}, \\ \dot{q}_1(t_0) &= \dot{q}_{10}, \dot{q}_2(t_0) = \dot{q}_{20}, \dots, \dot{q}_n(t_0) = \dot{q}_{n0}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$ та $\dot{q}_{10}, \dot{q}_{20}, \dots, \dot{q}_{n0}$ – завдані узагальнені координати у початковий момент часу $t = t_0$.

Параметр керування u , очевидно, повинен відповідним чином визначати узагальнені сили Q_k в рівняннях (2.11), тобто:

$$Q_k = Q_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n, u(t)), k = 1, 2, \dots, N. \quad (2.13)$$

Таким чином, математична модель процесів в електроприводі представлена у узагальненому вигляді (2.11) – (2.13), що дозволяє виконати моделювання електроприводу.

Отже, математичну модель (2.9), (2.10) можна отримати шляхом тотожних перетворень математичної моделі (2.11) – (2.13).

Однак практично реалізувати модель у загальному випадку досить важко, тому в загальному випадку можна рекомендувати побудову математичної моделі (2.9), (2.10) шляхом параметричної ідентифікації з використанням результатів імітаційного моделювання електроприводу:

$$u(t), \omega(t)n_1 \rightarrow a_n, a_{n-1}, \dots, a_0, b_0. \quad (2.14)$$

Завдання ідентифікації (2.14) полегшується, якщо відомо значення n . Із загальних міркувань можемо стверджувати, що $n \geq 2$.

Значення n обумовлено тим, що, електропривод – це електромеханічна система і потрібно як мінімум 2 узагальнених коефіцієнта, щоб характеризувати механічну та електричну частини.

Найпростіша схематизація електроприводу призводить до механічної системи (з одним ступенем свободи і узагальненою силою у вигляді електромагнітного моменту електродвигуна) з двома ступенями свободи, одна з яких є кутом повороту валу електродвигуна, а інша – електричний заряд в обмотці ротора електродвигуна.

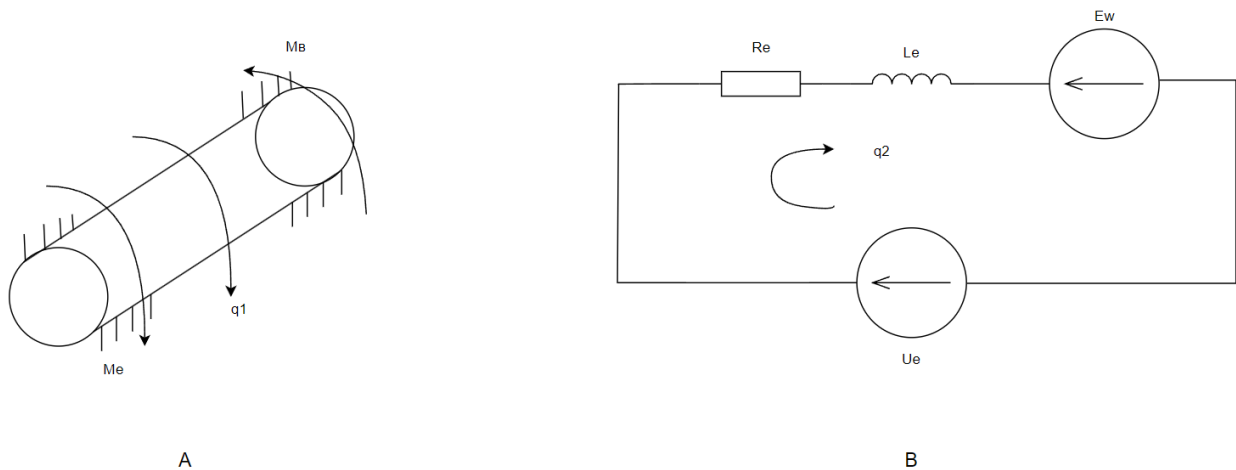


Рисунок 2.4 – Схематизація механічної частини (а) та електричної (б)

Кут повороту ротора електродвигуна позначимо q_1 , а заряд в обмотці ротора електродвигуна позначимо q_2 – на ротор електродвигуна діє момент тертя M_B і електромагнітний момент:

$$M_e = B_e * q_2, \quad (2.15)$$

де M_e – електромагнітний момент, B_e – електромеханічна характеристика електродвигуна.

Еквівалентна схема електродвигуна постійного струму включає активний опір R_e та індуктивність L_e обмотці ротора, а також електрорушійну силу самоіндукції:

$$E_\omega = B_e * q_1, \quad (2.16)$$

де E_ω – електрорушійну силу самоіндукції.

Джерелом енергії електродвигуна є електрична напруга, що подається на електродвигун U_e .

З урахуванням зазначених обставин маємо:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2}J\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}L_e\dot{q}_2^2; R = \frac{1}{2}B\dot{q}_1^2 + \frac{1}{2}R_e\dot{q}_2^2; \\ Q_1 &= B_e\dot{q}_2; Q_2 = U_e - B_e\dot{q}_1, \end{aligned} \quad (2.17)$$

де J – узагальнений момент інерції електродвигуна щодо осі обертання ротора електродвигуна;

B – узагальнений параметр в'язкого тертя наведеного до осі обертання ротора електродвигуна.

З урахуванням цих виразів рівняння лагранжа 2-го роду призведуть до результату:

$$J\ddot{q}_1 = -B\dot{q}_1 + B_e\dot{q}_2, L_e\ddot{q}_2 = -R_e\dot{q}_2 + U_e - B_e\dot{q}_1. \quad (2.18)$$

З урахуванням прийнятих раніше позначень отримуємо:

$$\omega = \dot{q}_1; u = U_e. \quad (2.19)$$

Тоді рівняння (2.18) з урахуванням (2.19) запишеться так:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -B\omega + B_e\dot{q}_2; L_e\ddot{q}_2 = -B_e\omega - R_e\dot{q}_2 + u. \quad (2.20)$$

Використовую рівняння (2.20), запишемо:

$$\dot{q}_2 = \frac{J}{B_e} * \frac{d\omega}{dt} + \frac{B}{B_e}\omega. \quad (2.21)$$

За допомогою (2.21) замінемо \dot{q}_2 із 2-го рівняння (2.20):

$$L_e \left(\frac{J}{B_e} * \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{B}{B_e} * \frac{d\omega}{dt} \right) = -B_e\omega - R_e \left(\frac{J}{B_e} * \frac{d\omega}{dt} + \frac{B}{B_e}\omega \right) + u, \quad (2.22)$$

$$\frac{L_e J}{B_e} * \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{L_e B + J R_e}{B_e} * \frac{d\omega}{dt} + \left(B_e + \frac{R_e B}{B_e} \right) \omega = u.$$

Отримане рівняння – це окремий випадок рівняння (2.9), в якому:

$$n = 2; a_2 = \frac{L_e J}{B_e}; a_1 = \frac{L_e B + J R_e}{B_e}; a_0 = B_e + \frac{R_e B}{B_e}, B_0 = 1. \quad (2.23)$$

Таким чином, математична модель електроприводу в найпростішому випадку має вигляд:

$$a_2 \frac{d^2\omega}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_0 \omega = u. \quad (2.24)$$

Слід зазначити, що електропривод можна подати у вигляді динамічної ланки з передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (2.25)$$

Таким чином, маємо математичну модель електроприводу як об'єкта автоматизації у формі, зручній для визначення параметрів ПД-регулятора кутової швидкості.

2.3 Визначення параметрів ПД-регулятора кутової швидкості

Основне призначення ПД-регулятора кутової швидкості електроприводу полягає в тому, щоб підтримувати задану кутову швидкість встановившогося режиму.

$$\omega(t) = \bar{\omega}; u(t) = \bar{u}, \quad (2.26)$$

Зрозуміло, що під час роботи будуть присутні різні відхилення, що приводять при постійній напрузі до змін кутової швидкості. У цих умовах основне завдання ПД-регулятора полягає в тому, щоб забезпечити наближену рівність $\omega(t) \approx \bar{\omega}$.

Ця рівність забезпечується ПД-регулятором за рахунок керування напругою.

$$u(t) = \bar{u} - k_p \tilde{\omega} - k_I \int \tilde{\omega}(t) dt - k_D \frac{d\tilde{\omega}}{dt}, \quad (2.27)$$

де k_p, k_I, k_D – параметри ПД-регулятора, а $\omega(t) = \omega(t) - \bar{\omega}$ – відхилення кутової швидкості електроприводу від заданого значення.

Основне завдання полягає в тому, щоб визначити параметри k_p, k_I, k_D ПД-регулятора, що забезпечує виконання наближеної рівності $\omega(t) \approx \bar{\omega}$. Для цього використовуємо диференціальне рівняння (2.26) у якому врахуємо вираз $\omega(t) = \bar{\omega} + \tilde{\omega}(t)$.

З урахуванням цього виразу та співвідношення (2.27) диференціальне рівняння (2.26) набуде вигляду:

$$a_2 \frac{d^2 \tilde{\omega}}{dt^2} + a_1 \frac{d\tilde{\omega}}{dt} + a_0 (\bar{\omega} + \tilde{\omega}) = \bar{u} - k_p \tilde{\omega} - k_I \int \tilde{\omega}(t) dt - k_D \frac{d\tilde{\omega}}{dt}. \quad (2.28)$$

Із співвідношення (2.28) одразу отримуємо:

$$a_0 \bar{\omega} = \bar{u}, a_2 \frac{d^2 \tilde{\omega}}{dt^2} + (a_1 + k_D) \frac{d\tilde{\omega}}{dt} + (a_0 + k_p) \tilde{\omega} + k_I \int \tilde{\omega}(t) dt = 0. \quad (2.29)$$

Щоб перетворити рівняння (2.29), введемо нову невідому: $\tilde{\omega}(t) = \frac{dx}{dt}$.

З урахуванням нової невідомої рівняння (2.30) набуває наступного вигляду:

$$a_2 \frac{d^3 x}{dt^3} + (a_1 + k_D) \frac{d^2 x}{dt^2} + (a_0 + k_p) \frac{dx}{dt} + k_I x = 0. \quad (2.30)$$

Рівняння (2.30) слід розглядати з урахуванням початкових умов:

$$x(t_0) = 0; \frac{dx}{dt}(t_0) = \tilde{\omega}_0; \frac{d^2 x}{dt^2} = \tilde{\varepsilon}_0, \quad (2.31)$$

де t_0 – початковий момент часу;

$\tilde{\omega}_0, \tilde{\varepsilon}_0$ – відхилення кулової швидкості від її потрібного значення $\bar{\omega}$ і швидкість самого відхилення в початковий момент часу $t = t_0$.

Визначення параметрів ПІД-регулятора кулової швидкості електроприводу зводиться до формулювання умов стійкості відповідного диференціального рівняння (2.31) характеристичного полінома:

$$f(z) = a_2 z^3 + (a_1 + k_D) z^2 + (a_0 + k_p) z + k_I. \quad (2.32)$$

Для формулювання умов стійкості полінома використовуємо критерій Рауса. Для цього поліном (2.32) запишемо у вигляді:

$$f(z) = A_0 z^3 + B_0 z^2 + A_1 z + B_1, \quad (2.33)$$

де $A_0 = a_2$; $B_0 = a_1 + k_D$; $A_1 = a_0 + k_p$; $B_1 = k_I$.

Схема Рауса з урахуванням співвідношень матиме вигляд:

$$\begin{array}{cc} A_0 & A_1 \\ B_0 & B_1, \\ C_0 & \end{array} \quad (2.34)$$

$$\text{де } C_0 = \frac{B_0 A_1 - A_0 B_1}{B_0}.$$

Відповідно до критерію Рауса поліном (2.33) буде стійким, якщо величини A_0 , B_0 , C_0 будуть відмінними від нуля та одного знака відповідно до виразу (2.23) має вид:

$$\begin{aligned} A_0 = a_2 &\rightarrow A_0 = \frac{L_e J}{B_e} > 0, \\ B_0 = a_1 + k_D &\rightarrow \frac{L_e B + J R_e}{B_e} + k_D > 0, \\ C_0 = \frac{B_0 A_1 - A_0 B_1}{B_0} &\rightarrow B_0 A_1 - A_0 B_1 > 0. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Очевидно, що основні початкові умови (2.35) які з урахуванням співвідношень набувають вигляду:

$$(a_1 + k_D)(a_0 + k_p) - a_2 k_I > 0. \quad (2.36)$$

Представляють нерівність (2.36) у такому вигляді:

$$k_I < \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_p)}{a_2}. \quad (2.37)$$

Як показує нерівність (2.37), інтегральна складова ПДД-регулятора кутової швидкості електроприводу повинна бути обмежена.

2.4 Висновки за розділом 2

У цьому розділі було розібрано загальний підхід щодо проектування ПДД-регулятора кутової швидкості електроприводу. Визначена математична модель процесів в електроприводі.

Була розглянута задача визначення параметрів ПДД-регулятора кутової швидкості електроприводу. Основна мета цього регулятора полягає в утриманні заданої кутової швидкості в установленому режимі за допомогою керування напругою. Для досягнення цієї мети використовується рівняння, яке враховує відхилення кутової швидкості та керуючу напругу.

Параметри ПДД-регулятора визначаються так, щоб забезпечити наближену рівність в установленому режимі. Використовуються диференціальні рівняння та критерій Рауса для формулювання умов стійкості системи. Також зазначається, що інтегральна складова ПДД-регулятора повинна бути обмежена з метою забезпечення стійкості системи.

Такий підхід дозволяє визначити оптимальні параметри ПДД-регулятора для досягнення бажаного рівня кутової швидкості електроприводу.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

Моделювання процесів в автоматизованому електроприводі по суті зводиться до вирішення диференціальних рівнянь відповідної математичної моделі, що представляє досить складне завдання і в загальному випадку може бути виконана лише за допомогою численних методів.

Чисельні методи вимагають великих обсягів обчислень, які можна здійснити лише за допомогою комп'ютерів та спеціально розроблених програм. Таким чином отримуємо, що комп'ютерне моделювання є найбільш ефективним інструментом для виконання наукових досліджень та вирішення інженерних завдань.

3.1 Комп'ютерна модель процесів в електроприводі

У електроприводі відбуваються різноманітні процеси електричної та механічної природи. Ці процеси описуються диференціальними рівняннями з початковими умовами:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{b}{J}\omega + \frac{B_e}{J}I, \quad (3.1)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{B_e}{L_e}\omega - \frac{R_e}{L_e}I + \frac{U_e(t)}{L_e}, \quad (3.2)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0, I(t_0) = I_0, \quad (3.3)$$

де ω_0 та I_0 – задані початкові значення кутової швидкості ротора та сила струму в обмотці ротора електродвигуна.

Комп'ютерне моделювання зводиться до чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (3.1), (3.2) із початковими умовами (3.3).

Комп'ютерна модель процесів у електроприводі має вигляд (рис. 3.1).

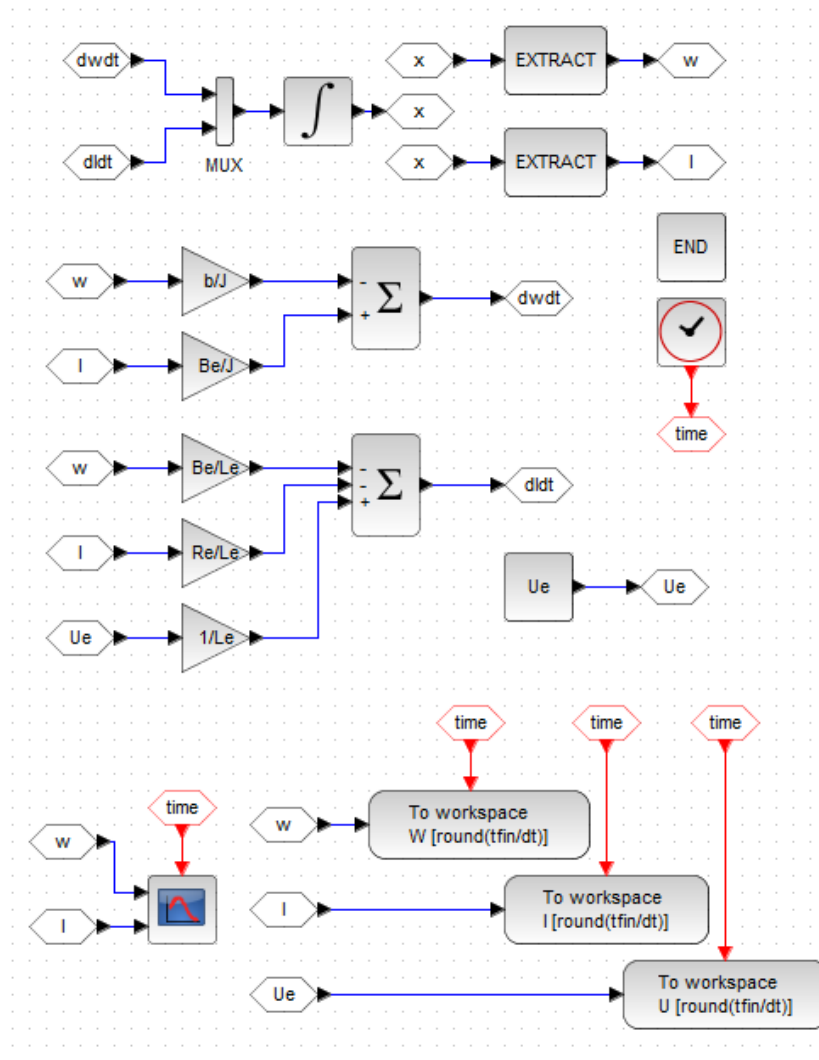


Рисунок 3.1 – Модель процесів у електроприводі

У наступних рисунках (3.2, 3.3) зображені графіки залежності кутової швидкості та сили струму у обмотці ротора від напруги.

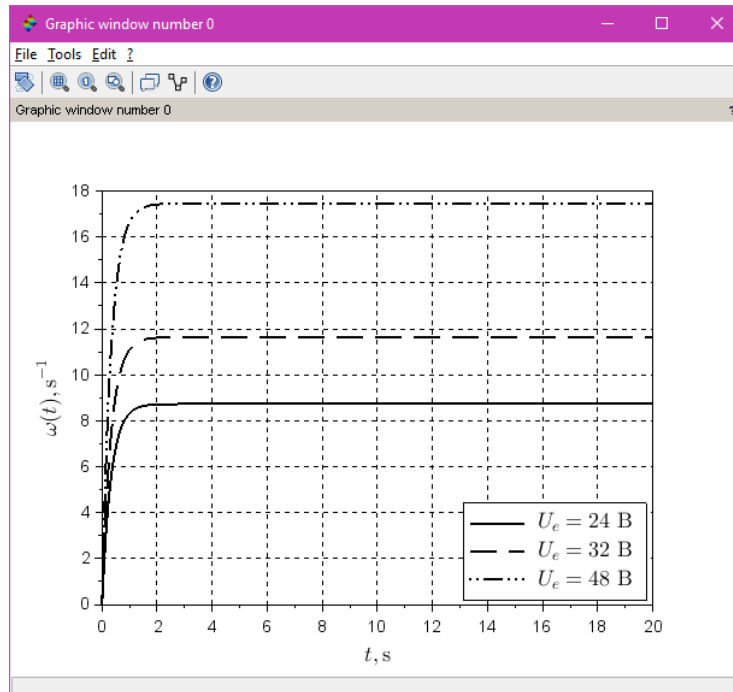


Рисунок 3.2 – Графік кутової швидкості ротора

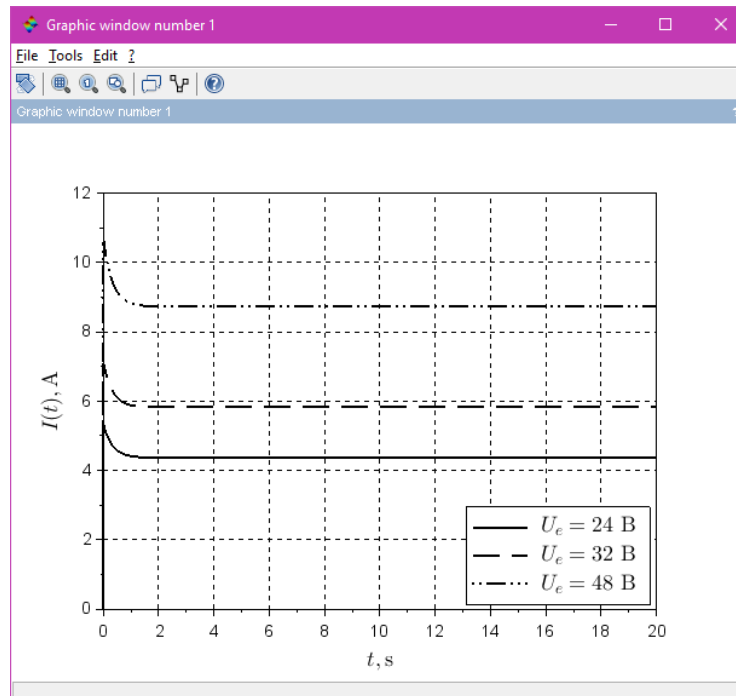


Рисунок 3.3 – Графік сили струму у обмотці ротора

3.2 Комп'ютерна модель електроприводу як об'єкт автоматизації

Під об'єктом автоматизації розуміється визначення керованого параметра та управління, а математична модель об'єкта автоматизації в загальному вигляді представляється у вигляді передавальної функції динамічної ланки, що з'єднує управління і керований параметр.

Для електроприводу математична модель як об'єкт автоматизації має вигляд (2.24), а передатна функція – відповідно (2.25).

З урахуванням ПД-регулятора кутової швидкості математична модель електроприводу як об'єкт автоматизації має вигляд:

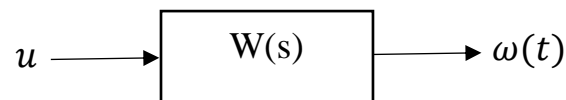


Рисунок 3.4 – Математична модель електроприводу як об'єкт автоматизації

$$x_1 = x, x_2 = \frac{dx}{dt}, x_3 = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (3.4)$$

З урахуванням (3.4) рівняння (2.39) прийме вигляд:

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{k_I}{a_2} x_1 - \frac{a_0 + k_p}{a_2} x_2 - \frac{a_1 + k_D}{a_2} x_3. \quad (3.5)$$

У вигляді (3.4) і (3.5) маємо систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = -\frac{k_I}{a_2}x_1 - \frac{a_0 + k_p}{a_2}x_2 - \frac{a_1 + k_D}{a_2}x_3 \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) слід розглядати за умови початкових умов (2.31), які з урахуванням (3.4) запишуться так:

$$x_1(t_0) = 0, x_2(t_0) = \tilde{\omega}_0, x_3(t_0) = \tilde{\varepsilon}_0. \quad (3.7)$$

Потім ми приймемо:

$$t_0 = 0, \tilde{\varepsilon}_0 = 0, k_p = 0,5 * a_0, k_D = 0,5 * a_1. \quad (3.8)$$

Параметр інтегральної частини ПД-регулятора виберемо з умови (2.36)

$$k_I = 0,005 * \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_p)}{a_2}. \quad (3.9)$$

Отже, для подальших досліджень, зробимо математичну модель електроприводу з ПД-регулятором (рисунок 3.5).

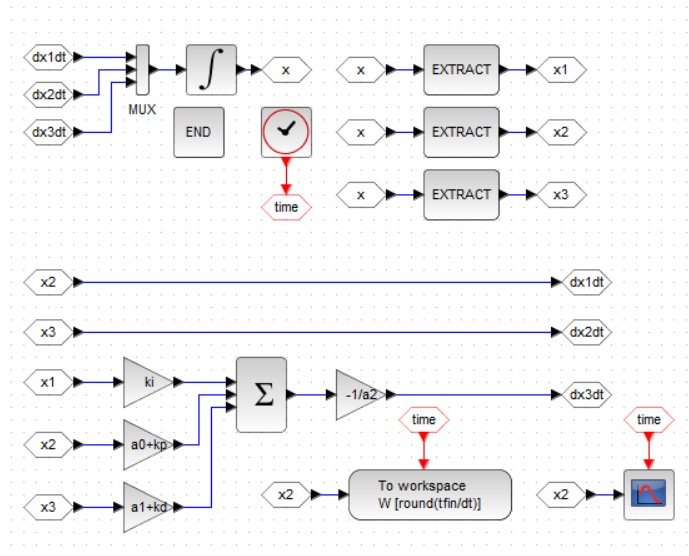


Рисунок 3.5 – Модель електропривода з ПІД-регулятором

Досліджуючи вплив відхилень початкових умов (3.7) та відхилення кутової швидкості отримуємо два графіка (рисунок 3.6, 3.7).

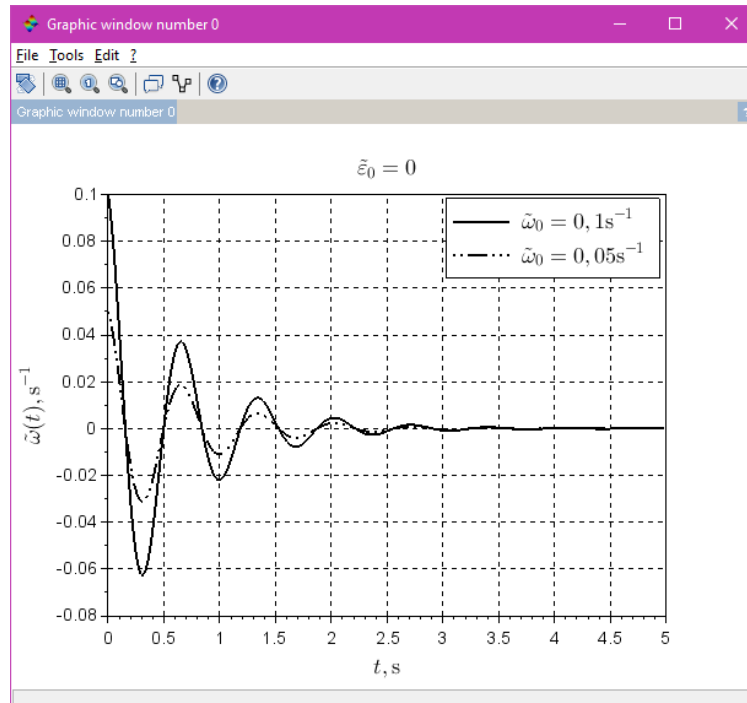


Рисунок 3.6 – Графік відхилення кутової швидкості від заданого

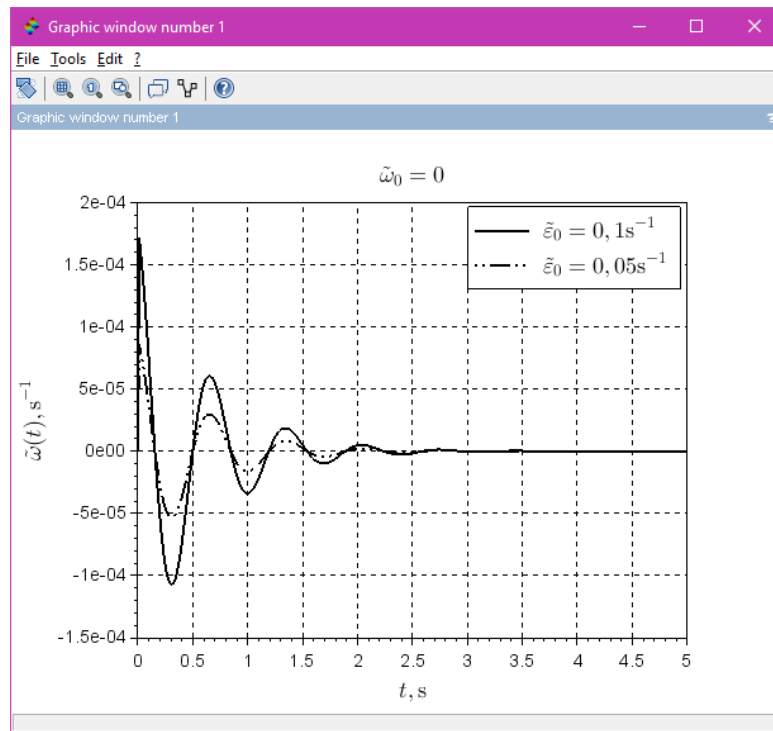


Рисунок 3.7 – Графік відхилення кутового прискорення від заданого

3.3 Дослідження впливу інтегральної складової ПД-регулятора

$$k_I < \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_p)}{a_2}.$$

Розглянемо такі значення k_I :

$$k_I = \kappa * \frac{(a_1 + k_D)(a_0 + k_p)}{a_2},$$

де $\kappa > 0$ – параметр що характеризує інтегральну складову ПД-регулятора,

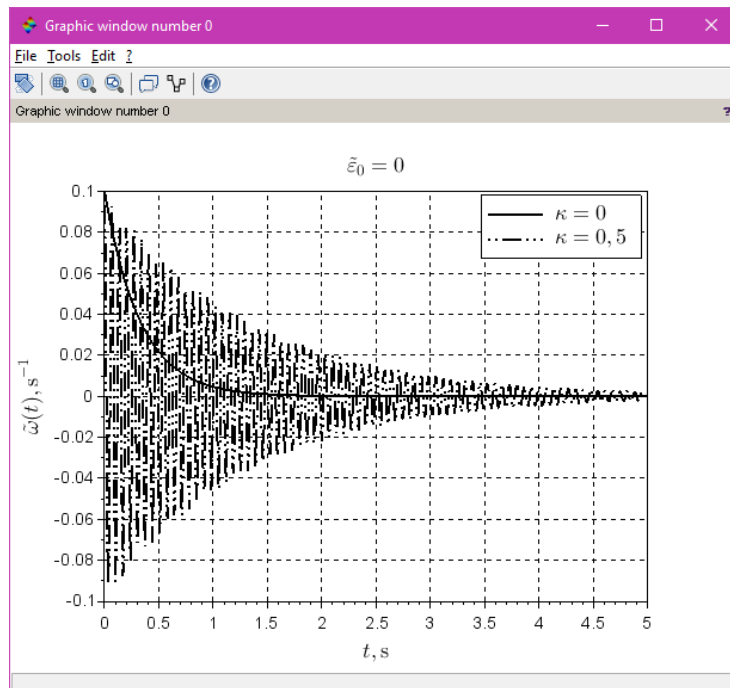


Рисунок 3.8 – Графік стійкості системи при $\kappa = 0$ та $\kappa = 0,5$

Як ми можемо побачити на рисунку 3.8, якщо κ буде ближче до 0, то графік буде стійкий.

Раніше отримані для величини k_I нерівність виконуватимуться для $\kappa \leq 1$.

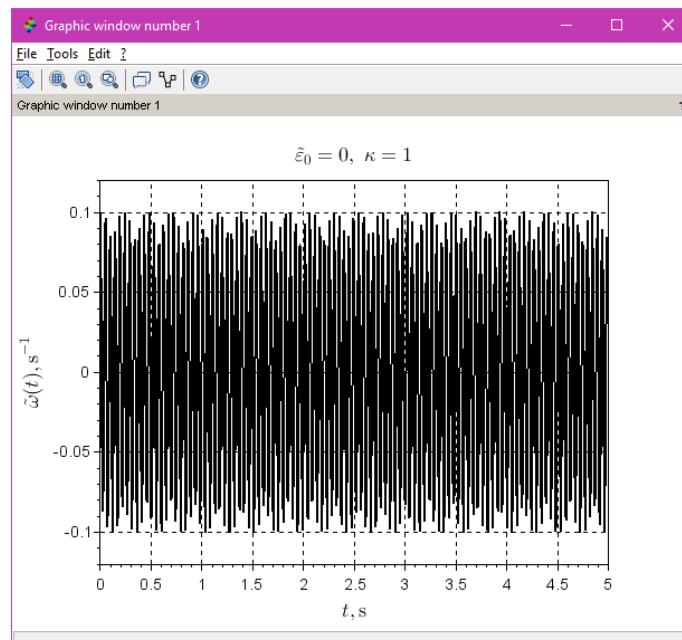


Рисунок 3.9 – Графік стійкості системи при $\kappa = 1$

На рисунку 3.9 ми можемо побачити, що при $\kappa = 1$ ми маємо орбітальну стійкість системи.

Раніше отримані для величини k_I нерівність не буде виконуватися для $\kappa > 1$.

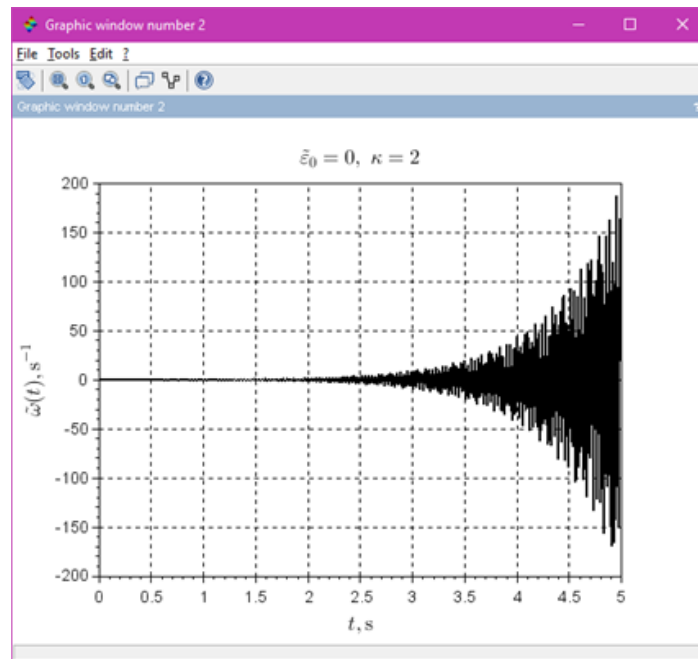


Рисунок 3.10 – Графік стійкості системи при $\kappa = 2$

На рисунку 3.10 ми вже бачимо графік при $\kappa = 2$, який наочно показує нам якщо $\kappa > 1$ то система буде не стійка.

Отже досліджуючи результати експерименту впливу інтегральної складової можна зробити такий висновок, що при використанні ПД-регулятора найкраще буде при $k_I \approx 0$.

3.4 Висновки за розділом 3

Зазначається, що моделювання процесів у електроприводі вимагає розв'язання складних диференціальних рівнянь, що у загальному випадку може бути здійснене лише чисельними методами.

Представлен підхід до визначення параметрів ПД-регулятора, спрямований на забезпечення стабільності системи електроприводу. Зазначено важливість дотримання умов стійкості для правильного функціонування автоматизованого електроприводу.

Проведено дослідження впливу параметрів ПД-регулятора кутової швидкості на стійкість системи електроприводу. Виявлено, що оптимальні результати досягаються при використанні підконтрольних значень параметрів.

Проведено дослідження впливу інтегральної складової ПД-регулятора на стійкість системи. Зроблено висновок, що оптимальні результати спостерігаються при обмеженні інтегральної складової, що свідчить про важливість правильного підбору цього параметру.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Небезпека ураження електричним струмом

Вимоги електробезпеки в приміщеннях, де встановлені електронно-обчислювальні машини і персональні комп'ютери відображені в ДСТУ 12.1.009-76. Дія електричного струму на організм людини може бути тепловою (опік), механічною (розрив тканини), хімічною (електроліз) та біологічною (скорочення м'язів, параліч дихання та серця).

При ураженні електричним струмом можуть виникати місцеві та загальні електротравми. При місцевих електротравмах виникає місцеве ушкодження організму людини. До них відносяться: електричні опіки, металізація шкіри, механічні пошкодження та електрофтальмія. Загальні електротравми (електричні удари) призводять до ураженню всього організму – порушенню чи повній зупинці діяльності органів дихання, кровообігу та інших систем.

Ураження електричним струмом може виникати при дотиках: до струмоведучих частин, які знаходяться під напругою; відключених струмоведучих частин, на яких залишився заряд чи з'явилася напруга після помилкового включення; до металічних не струмоведучих частин електрообладнання, після переходу на них напруги з струмоведучих частин.

4.2 Електробезпека

Вимоги електробезпеки в приміщеннях, де встановлені електронно-обчислювальні машини і персональні комп'ютери відображені в ДНАОП 0.00-1.31-99. Відповідно цьому нормативному документу під час проектування систем електропостачання, монтажу основного електроустаткування і електричного освітлення будівель і приміщень для обслуговування

комп'ютерних систем та мереж необхідно дотримуватися його вимогам. Лінія електромережі для живлення комп'ютерів, периферійних пристроїв і устаткування для обслуговування, ремонту і відладки виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладення фазового, нульового робочого і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів і прокладається від стійки групового розподільного щита, розподільного пункту до розеток живлення.

У приміщенні, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному і доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, окрім освітлення. Штепсельні з'єднання і електричні розетки, окрім контактів фазового і нульового робочого провідників, повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника.

Практично кожен блок живлення комп'ютера або периферійного пристрою має фільтр мережі. Конденсатори цього фільтру призначені для шунтування високочастотних перешкод живлячої мережі на землю через дріт захисного заземлення і відповідно три полюсну вилку і розетку. "Земляний" дріт з'єднується з контуром заземлення, а також допустимо його з'єднання і з "нулем" силовій мережі.

Для високочастотних (імпульсних) перешкод, які приходять як по мережі, так і від вхідного перетворювача блоку живлення, ті ж конденсатори є у багато разів меншим опором і струмом короткого замикання може вирости у багато разів. Така напруга і струм небезпечні для людини. Потрапити під напругу можливо, доторкнувшись одночасно до не фарбуючих металевих частин корпусу комп'ютера і, наприклад, до батареї опалювання. Ця напруга є одним з джерел різниці потенціалів між пристроями, від якого страждають інтерфейсні схеми.

Найважчий режим для елементів блоку живлення має місце у момент включення. Після виключення блоку живлення (будь-якій конструкції) включати його повторно рекомендується не раніше ніж через 10 сек. Невиконання цієї рекомендації може укоротити життя блоку живлення.

Електромережа штепсельних розеток для живлення персональних ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ і устаткування для обслуговування, ремонту і відладки ЕОМ при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд із стінами приміщення, як правило, металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відведеннями відповідно затвердженому плану розміщення оснащення і технічних характеристик оснащення. Металеві труби і гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Під час виконання ремонтних робіт слід користуватися електроінструментом, напруга живлення якого не перевищує 36 В.

До робіт з обслуговуванням, відладкою і ремонтом ЕОМ допускаються особи, які мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III. Працівники, які виконують роботи по експлуатації, обслуговуванню, відладці і ремонту ЕОМ, згідно із статтею 10 Закону України "Об охороні праці" забезпечуються належними засобами індивідуального захисту відповідно нормам[13].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання аналізу літератури за темою кваліфікаційної роботи були розглянуті загальні поняття, класифікації та принципи будови електроприводів, а також визначення параметрів ПД-регулятора електроприводу.

Проведен аналіз електричної та механічної частин електроприводу, принципи його керування та автоматизації.

На основі отриманих знань в наступних розділах був визначений загальний підхід щодо проектування ПД-регулятора кутової швидкості електроприводу. Побудована математична модель автоматизованого електроприводу, та визначені параметри ПД-регулятора.

Було зроблено комп'ютерне моделювання в середовище Scilab, у якому було промодельовані математичні моделі процесів в електроприводі, також виконана ідентифікація електропривода як об'єкт автоматизації.

Також були проведені дослідження впливу параметрів ПД-регулятора на процеси в електроприводі, та дослідження впливу інтегральної складової на ПД-регулятор.

ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf

4. Невлюдов І. Ш., Олександров Ю. М., Андрусевич А. О., Чала О. О. Основи наукових досліджень: Навч. посібник. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.

5. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Филипенко О. І., Демська Н. П., Новоселов С. П. Технічні засоби автоматизації: Підручник. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

6. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря

Сікорського ; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношапка, М.Я. Островерхов. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.

7. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.

8. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання) / – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.

9. Rajs V., Rašević N. Lj., Bodić M. Z., Zuković M. M., Babković K. B., PID Controller Design for Motor Speed Regulation with Linear and Non-Linear Load. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55.4: 225–229.

10. HUANG, Guoming, et al. A BP-PID controller-based multi-model control system for lateral stability of distributed drive electric vehicle. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356.13: 7290–7311.

11. Mamalis A.G., Nevliudov I., Romashov Yu. An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms. Journal of Instrumentation. 2021, 16.10. – doi: 10.1088/1748-0221/16/10/P10006.

12. Baz R., El Majdoub K., Giri F., Taouni A. Self-tuning fuzzy PID speed controller for quarter electric vehicle driven by In-wheel BLDC motor and Pacejka's tire model. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55.12: 598–603.

13. Навчальний посібник "Безпека життєдіяльності" / Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк, І. І. Хондак ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2018. 336 с. – ISBN 978-966-659-246-3.

14. Nevliudov I., Korotkov V., Romashov Yu. General Approaches to Design Improved Angular Velocity PID Controllers of Automated Electrical Drives // Manufacturing & Mechatronic Systems 2023: Proceedings of VIIst International Conference, Kharkiv, October 19-20, 2023: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] . – Kharkiv .: [electronic version], 2023. – 163 p. – pp. 93–98.