

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

**Класичний фаховий коледж**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171 Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Структурна оптимізація складної динамічної системи

Здобувача групи

ЕІск2-01б

(шифр групи)

Зубчонка Євгенія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Євгеній ЗУБЧОНОК

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст. викладач, к.т.н. Володимир Васильєв

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант<sup>1)</sup>

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

**Конотоп – 2024**

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є структурна оптимізація складної динамічної системи.

Мета роботи полягає у дослідженні ефективності оптимізація складної динамічної системи.

При виконанні роботи використовувалися методи математичного і фізичного аналізу, комп'ютерного моделювання частотних, динамічних властивостей складних технічних, зокрема, електромеханічних систем.

Дослідження, виконані з використанням методів математичного аналізу, функцій комплексної змінної, операційного обчислення, теорії стійкості, методами комп'ютерного моделювання, з використанням сучасних методів простору станів і потужного обчислювального пакету MathCAD для використання методу логарифмічних частотних характеристик при синтезі параметрів корегувального пристрою що забезпечать бажані динамічні властивості системи.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 8 рисунків, список цитованої літератури із 30 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** параметрична і структурна оптимізація керування, динамічні і частотні параметри системи, якість керування систем.

## ЗМІСТ

	с.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИВОДАМИ І ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b> .....	5
1.1 Значення керування в силових електронних системах .....	5
1.2 Цілі методів контролю.....	6
1.3 Огляд різних стратегій контролю.....	8
1.4 Цифрові методи керування.....	10
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ. СИНТЕЗ КОРЕГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ</b> .....	14
2.1 Визначення структури і параметрів корегувального пристрою.....	14
2.2 Опис системи. ....	16
2.3 Визначення функціональної, структурної схеми і передаточних функції замкнутої і розімкнутої системи.....	17
2.4. Частотний і динамічний аналіз системи і синтез корегувального пристрою.....	19
<b>РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКА КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ ЕЛЕКТРОННОЮ СИСТЕМОЮ</b> .....	24
3.1 Методи лінійного керування .....	24
3.2 Методи нелінійного керування.....	26
3.3 Порівняння лінійних і нелінійних методів керування.....	29
3.4 Застосування в різних силових електронних перетворювачах.....	30
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	32
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	33

## ВСТУП

Основною метою керування силовими електронними системами є підтримка бажаної вихідної напруги або струму за вхідних умов і змінного навантаження. Це вимагає налаштування робочих параметрів системи, таких як робочий цикл, частота перемикання або фазовий кут, у відповідь на зміни вхідних даних або обставин навантаження. Оскільки силові електронні системи працюють у динамічному середовищі, що характеризується частими змінами вхідної напруги, струму навантаження та параметрів системи, ефективне керування має вирішальне значення для підтримки бажаної вихідної продуктивності та забезпечення загальної стабільності системи.

Особливістю сучасних підймальних установок є постійне вдосконалення їх експлуатаційних характеристик, таких як вантажопідймальність, швидкість і зниження матеріаломісткості обладнання за рахунок підвищення ефективності, якості роботи і надійності системи керування. При цьому необхідно зберегти і навіть підвищити рівень надійності. Цього неможливо досягти без вдосконалення параметрів систем підймальних установок в аварійних режимах [1]

Лінійні регулятори розроблені та застосовані на основі лінійної моделі керованого підприємства. Лінійні методи керування мають вирішальне значення для підтримки бажаної вихідної напруги в силових електронних системах, одночасно зводячи до мінімуму відхилення, викликані порушеннями або змінами навантаження.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИВОДАМИ І ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 1.1 Значення керування в силових електронних системах

Контроль відіграє фундаментальну роль у силових електронних системах, слугуючи життєво важливим елементом у гарантуванні стабільності, ефективності та надійності таких систем. Силові електронні системи використовуються для перетворення та керування електричною енергією в різних формах, включаючи перетворення змінного струму на постійний, постійного на змінний або регулювання рівнів напруги. Ці системи знаходять застосування в різноманітних сферах, починаючи від основних схем регулювання напруги до складних моторних приводів і систем перетворення енергії з відновлюваних джерел.

Основною метою керування силовими електронними системами є підтримка бажаної вихідної напруги або струму за вхідних умов і змінного навантаження. Це вимагає налаштування робочих параметрів системи, таких як робочий цикл, частота перемикавання або фазовий кут, у відповідь на зміни вхідних даних або обставин навантаження. Оскільки силові електронні системи працюють у динамічному середовищі, що характеризується частими змінами вхідної напруги, струму навантаження та параметрів системи, ефективне керування має вирішальне значення для підтримки бажаної вихідної продуктивності та забезпечення загальної стабільності системи. [2]

Методи керування також сприяють підвищенню ефективності та надійності силових електронних систем шляхом мінімізації втрат, пом'якшення навантаження на компоненти та запобігання таким потенційним проблемам, як перенапруга, перевантаження по струму та перегрівання. Завдяки належному контролю система працює в межах безпечної робочої зони (SOA), подовжує

термін служби компонентів і зменшує потребу в обслуговуванні та заміні.

Крім того, удосконалені методи керування пропонують потенціал для підвищення продуктивності силових електронних систем, забезпечуючи швидшу реакцію на перехідні процеси, покращене регулювання та підвищену стійкість до перешкод і невизначеностей. Ці досягнення важливі для застосувань, де важливі точне керування, висока ефективність і надійність, наприклад, електромобілі, аерокосмічні системи та інтеграція відновлюваної енергії.

Керування є ключовим для силових електронних систем, гарантуючи їх стабільність, ефективність і надійність. Він зберігає бажану вихідну продуктивність, незважаючи на зміну умов входу та навантаження, зменшує втрати та покращує загальну продуктивність системи. У міру того, як силові електронні системи продовжують розвиватися та набувають більшого поширення в різних сферах застосування, важливість керування лише зростатиме. [3]

## **1.2 Цілі методів контролю**

Методи керування в силових електронних системах призначені для досягнення кількох критичних цілей для забезпечення оптимальної продуктивності, ефективності та надійності системи. Ці цілі включають:

Регулювання : Основна мета методів керування полягає в регулюванні вихідної напруги або струму, підтримуючи його постійним, незважаючи на зміни вхідних умов, наприклад коливання вхідної напруги або коливання струму навантаження. Цей регламент гарантує, що силова електронна система може забезпечувати стабільний і постійний вихід, що є вирішальним для багатьох застосувань, таких як джерела живлення, моторні приводи та системи відновлюваної енергії.

Перехідна характеристика : силові електронні системи часто стикаються з раптовими змінами умов входу або навантаження, що може призвести до

відхилення вихідної напруги або струму від необхідного діапазону. Методи керування спрямовані на скорочення часу реакції на перехідний процес, тобто часу, необхідного системі для реакції на ці зміни. Скорочення цього часу дозволяє системі швидко відновлюватись і досягати бажаного рівня виходу, зберігаючи стабільність і мінімізуючи наслідки збоїв.

**Ефективність** : методи керування можуть сприяти загальній ефективності силових електронних систем шляхом оптимізації роботи та мінімізації втрат. Це може передбачати зміну робочого циклу, частоти перемикавання або фазового кута для зменшення провідності та втрат при перемиканні або використання складних алгоритмів керування, які динамічно адаптуються до умов перемикавання для досягнення максимальної ефективності. [4]

**Стійкість** : методи керування повинні забезпечувати стійкість до різних невизначеностей і збурень, таких як коливання значень компонентів, зміни температури та зовнішній шум. Надійні методи керування розроблені для підтримки бажаної вихідної продуктивності навіть за наявності цих невизначеностей, забезпечуючи надійну роботу в широкому діапазоні умов.

**Захист** : силові електронні системи можуть зіткнутися з такими шкідливими ситуаціями, як перенапруга, перевищення струму та надмірна температура. Методи керування забезпечують захист, відстежуючи параметри системи та вживаючи коригувальних дій, як-от налаштування робочого циклу, частоти перемикавань або активації захисних механізмів. Ці заходи запобігають пошкодженням і забезпечують безпечну роботу.

**Гнучкість** : силові електронні системи використовуються в широкому діапазоні застосувань з різними вимогами, тому методи керування повинні бути достатньо гнучкими, щоб адаптуватися до різних робочих умов, типів навантажень і конфігурацій системи. Це може призвести до настроюваних або адаптивних алгоритмів керування, які можна налаштувати відповідно до вимог конкретного застосування.

### 1.3 Огляд різних стратегій контролю

Стратегії керування мають вирішальне значення в силових електронних системах для досягнення цілей, викладених у попередньому розділі. Було розроблено кілька стратегій керування, щоб задовольнити конкретні вимоги різних програм силової електроніки. У цьому розділі пропонується огляд деяких поширених стратегій керування, які використовуються в силових електронних системах. [5]

Лінійне керування : методи лінійного керування, такі як ПІ- та ПІД-контролери, зазвичай використовуються в силових електронних системах через їхню простоту та легкість впровадження. Ці контролери використовують лінійні математичні моделі та спрямовані на мінімізацію похибки між бажаними та фактичними результатами. Вони підходять для застосувань з невеликими збуреннями та повільною динамікою.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) : ШІМ є широко використовуваною стратегією керування в силових електронних перетворювачах, таких як перетворювачі постійного струму, інвертори та моторні приводи. Він регулює робочий цикл комутаційного пристрою для регулювання вихідної напруги або струму. Методи ШІМ можна класифікувати як режим напруги, режим струму та синхронне керування ШІМ, кожен з яких має унікальні переваги та області застосування. [6]

Цифрове керування : методи цифрового керування включають використання цифрових процесорів, таких як мікроконтролери, DSP або програмовані вентильні матриці (FPGA) для реалізації алгоритмів керування. Цей підхід пропонує такі переваги, як гнучкість, можливість програмування та покращена продуктивність у різних робочих умовах. Цифрове керування може бути застосоване до електронних систем живлення, таких як джерела живлення, моторні приводи та системи відновлюваної енергії.



Управління нечіткою логікою : Управління нечіткою логікою — це нелінійна стратегія керування, яка базується на теорії нечітких множин і наближених міркуваннях. Це вигідно для систем зі складною, нелінійною поведінкою або невизначеною динамікою. Контролери нечіткої логіки можуть обробляти неточну або неповну інформацію, що робить їх придатними для додатків із змінними робочими умовами, невизначеністю параметрів або зовнішніми перешкодами.

Адаптивне та надійне керування : методи адаптивного та надійного керування призначені для підтримки продуктивності системи за наявності невизначеностей, таких як коливання компонентів, зміни температури або зовнішні перешкоди. Адаптивні методи керування змінюють параметри контролера в режимі реального часу на основі спостережуваної поведінки системи, тоді як надійне керування забезпечує стабільність і продуктивність у попередньо визначених межах, незважаючи на невизначеності. [7]

Управління нейронними мережами : методи керування нейронними мережами використовують штучні нейронні мережі (ШНМ) для моделювання та керування силовими електронними системами. ШНМ чудово вивчають складні, нелінійні зв'язки між входами та виходами, що робить їх придатними для додатків із невизначеною або змінною в часі динамікою. Управління нейронною мережею використовується для ідентифікації системи, оптимізації керування та діагностики несправностей у силових електронних системах.

Контроль без датчиків : метою методів керування без датчиків є оцінка параметрів системи без потреби у фактичних датчиках, таких як положення ротора або швидкість у приводах двигунів. Це може допомогти зменшити складність системи, вартість і вимоги до обслуговування. Безсенсорні методи керування часто покладаються на введення сигналу або методи оцінки на основі моделі для отримання необхідної інформації.

## 1.4 Цифрові методи керування

Реалізація різних алгоритмів керування в силових електронних системах потребує цифрових методів керування. У цьому розділі розглядаються найпоширеніші методи цифрового керування, такі як керування з дискретним часом, цифрові ПІ- та ПІД-регулятори та керування простором станів.

Контроль дискретного часу : контроль дискретного часу є важливою концепцією в цифрових системах керування, оскільки він передбачає обробку вибірових даних у дискретних інтервалах часу. При дискретному управлінні сигнали безперервного часу перетворюються на послідовності дискретних значень за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Алгоритми керування потім застосовуються до цих послідовностей для генерації сигналів керування. Ключові поняття включають системи з дискретним часом, різницеві рівняння, Z-перетворення та цифрові фільтри.

Цифрові ПІ та ПІД контролери : цифрові ПІ та ПІД контролери є цифровими аналогами аналогових версій. Вони поєднують пропорційні, інтегральні та похідні дії для точного та повного керування силовими електронними системами. Основна перевага цифрових ПІ- та ПІД-регуляторів полягає в тому, що вони пропонують легкість впровадження та можливість налаштування відповідно до конкретних вимог до продуктивності. Цифрові ПІ-регулятори обчислюють пропорційні та інтегральні члени за допомогою рівнянь дискретної різниці в часі. Цифрові ПІД-регулятори додають похідний термін, який покращує перехідну характеристику та зменшує перерегулювання. Алгоритм керування для цифрових ПІД-регуляторів може бути реалізований у різних формах, таких як прямий, паралельний або послідовний, залежно від вимог застосування. [8]

Управління простором станів : Управління простором станів — це вдосконалена техніка цифрового керування, яка використовується для проектування контролерів у системах із декількома входами та виходами (МІМО).

Він представляє динаміку системи через набір лінійних диференціальних або різницевих рівнянь першого порядку, який описує зв'язок між змінними стану, входами та виходами. Управління простором станів забезпечує такі переваги, як керування складними системами з кількома входами та виходами, гнучкість проектування контролерів із конкретними цілями продуктивності (наприклад, оптимальне чи надійне керування), а також полегшення розробки спостерігачів або оцінювачів для реконструкції змінних стану, які не піддаються вимірюванню.

Реалізація цифрового керування в силових електронних системах зазвичай передбачає використання мікроконтролерів, процесорів цифрових сигналів (DSP) або програмованих вентильних матриць (FPGA) для виконання алгоритмів керування. Кожен пристрій має свої переваги та компроміси щодо продуктивності, гнучкості, вартості та енергоспоживання. У цьому розділі розглядатимуться основні функції та використання цих пристроїв у контексті цифрового керування.

Мікроконтролери : мікроконтролери — це компактні та економічно ефективні інтегральні схеми, які об'єднують процесор, пам'ять і периферійні пристрої в одному чіпі. Вони широко використовуються в силових електронних системах для реалізації цифрових алгоритмів керування завдяки їхнім зручним якостям, широкій периферійній підтримці та наявності інструментів розробки. Більшість мікроконтролерів використовують процесори загального призначення з різноманітними наборами інструкцій і можуть програмуватися за допомогою мов високого рівня, таких як C або C++. Мікроконтролери добре підходять для завдань керування низької та середньої складності, які вимагають помірної потужності процесора та частоти дискретизації. Крім того, їх можна використовувати для керування додатковими системними функціями, такими як інтерфейс користувача, протоколи зв'язку, виявлення несправностей і захист.

Цифрові сигнальні процесори (DSP) : Цифрові сигнальні процесори (DSP) — це спеціалізовані мікропроцесори, спеціально розроблені для завдань високошвидкісної обробки сигналів. Вони чудово справляються з виконанням

обчислювально інтенсивних операцій, таких як цифрова фільтрація, аналіз Фур'є та виконання алгоритму керування. DSP відомі своєю високою обчислювальною потужністю, можливостями паралельної обробки та спеціальною підтримкою апаратного забезпечення для математичних операцій. У силових електронних системах DSP знаходять широке застосування для реалізації складних алгоритмів керування, які вимагають високої частоти дискретизації та швидкого часу виконання. Вони особливо добре підходять для систем, які вимагають кількох контурів керування та розширених стратегій керування, або для яких досягнення високої продуктивності є надзвичайно важливим.

Програмовані вентильні матриці (FPGA) : FPGA — це гнучкі цифрові інтегральні схеми, які можна запрограмувати для виконання спеціальних цифрових логічних функцій, включаючи алгоритми керування. Вони мають програмовані логічні блоки, з'єднання та ресурси введення/виведення, що дозволяє виконувати складні паралельні операції з високою швидкістю та низькою затримкою. Використання ПЛІС для цифрового керування в силових електронних системах пропонує такі переваги, як висока продуктивність, детермінований час і здатність адаптуватися до змінних алгоритмів керування або системних вимог. Однак FPGA, як правило, дорожчі, споживають більше енергії та мають крутішу криву навчання порівняно з мікроконтролерами та DSP.

Переваги та недоліки цифрового керування. Використання цифрового керування в силових електронних системах зазнало різкого зростання популярності завдяки численним перевагам порівняно з аналоговими методами керування. Однак важливо визнати, що цифрове управління також має свої проблеми та обмеження. У цьому розділі будуть описані основні переваги та недоліки цифрового керування в силових електронних системах.

Гнучкість: однією з ключових переваг цифрового керування в силових електронних системах є його гнучкість. Алгоритми цифрового керування можна легко модифікувати або оновлювати без зміни апаратного забезпечення. Ця

гнучкість забезпечує оптимізацію системи, адаптацію до мінливих вимог і включення нових функцій.

Точність і стабільність: цифрові системи керування пропонують вищу точність і довгострокову стабільність порівняно з аналоговими системами. Вони менш сприйнятливі до дрейфу компонентів, старіння та зміни навколишнього середовища, що призводить до більш точного та стабільного контролю з часом.

Перешкодостійкість: Цифрові сигнали керування за своєю суттю мають більшу стійкість до шумів і перешкод. Їх можна регенерувати та обробляти без накопичення помилок або спотворень, забезпечуючи надійний контроль навіть у шумному середовищі. [9]

Програмованість: Цифрове керування дозволяє програмувати, уможливлуючи реалізацію різних стратегій керування за допомогою того самого апаратного забезпечення. Кілька циклів керування можна виконувати одночасно, що сприяє покращенню системної інтеграції, оптимізації та налаштування.

Діагностика та моніторинг : цифрові системи керування можуть містити розширені функції моніторингу та діагностики. Це включає виявлення несправностей, реєстрацію даних і можливості зв'язку із зовнішніми пристроями, що спрощує обслуговування системи, усунення несправностей і підвищує загальну надійність.

Масштабованість : Цифрові системи управління мають високу масштабованість. Їх можна легко адаптувати до змін у розмірі системи, складності або вимогах до продуктивності без суттєвих змін базового апаратного забезпечення чи алгоритму керування.

## РОЗДІЛ 2.

# МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ. СИНТЕЗ КОРЕГУВАЛЬНОГО ПРИБРОЮ

### 2.1. Визначення структури і параметрів корегувального пристрою.

Для забезпечення бажаної якості керування складними технічними системами при їх проектуванні використовують методи параметричної або структурної оптимізації. Перший метод використовують при можливості впливу на параметри складових елементів системи що визначають інерційні і частотні властивості системи. Наприклад, для лінійних систем це коефіцієнти підсилення, передачі, стали часу, тощо. Це не завжди можливе. Більш ефективним є застосування структурної оптимізації шляхом включення в основний контур керування частотно залежних елементів з параметрами, що сприяють бажаним умовам якості і точності керування. Для здійснення цих умов застосовують промислові універсальні пристрої пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Або їх аналогів, приклад синтезу якого проведемо в даному розділі.

Мета пристрою – мінімізація динамічних перевантажень в процесі керування в звичайних і аварійних режимах роботи. Це сприяє зниженню перевантажень в механічних вузлах, підвищить надійність і строк експлуатації.

Синтез корегувального пристрою для поліпшення динамічних властивостей системи керування ЕП шляхом оптимізації керуючих впливів на систему визначимо методом комп'ютерного моделювання [9, 10].

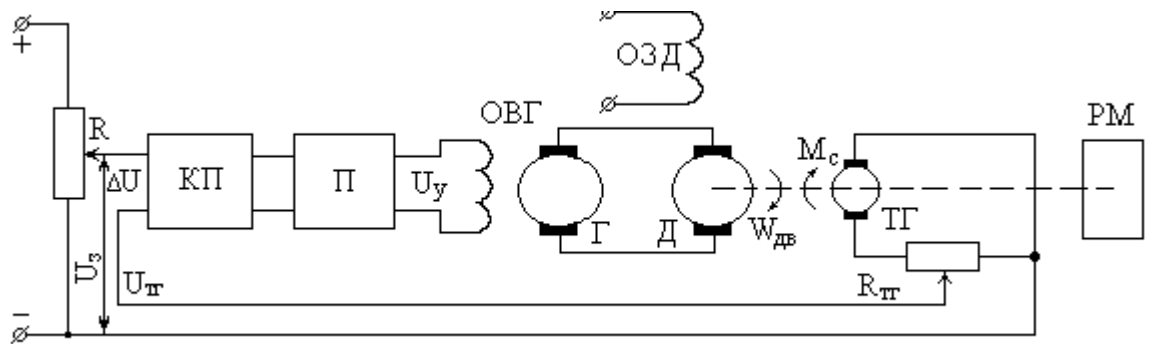


Рис. 2.1. Принципова схема системи автоматичного керування і регулювання швидкістю електроприводу (ЕП) постійного струму. R – керуючий потенціометр; П – електронний підсилювач; Д – електродвигун; Г – генератор; ТГ – тахогенератор; РМ – робочий механізм; КП – корегувальний пристрій;  $\omega_{дв}$  – кутова швидкість двигуна; [11,15]

Рівняння елементів системи:

$$\text{Рівняння замикання системи} - \Delta U = U_3 - U_d$$

$$\text{Підсилювач} - T_y \cdot dU_y/dt + U_y = K_y,$$

$$\text{Двигун} - T_{дв} \cdot d\omega_{дв}/dt + \omega_{дв} = K_{дв} \cdot U_2 - M_c \cdot K_m$$

$$\text{Генератор} - T_2 \cdot dU_2/dt + U_2 = K_2 \cdot U_y$$

$$\text{Тахогенератор} - U_{тг} = K_{тг} \cdot \omega_{дв}$$

$$K_y \underline{\quad 10.0 \quad}$$

$$T_y, c \underline{\quad 0.012 \quad}$$

$$K_2 \underline{\quad 2.2 \quad}$$

$$T_2, c \underline{\quad 0.2 \quad}$$

$$K_{дв}, об/хв \cdot Н \cdot м \underline{\quad 8.0 \quad}$$

$$T_{дв}, c \underline{\quad 0.8 \quad}$$

$$K_{тг}, В \cdot хв/об \underline{\quad 0.06 \quad}$$

$$K_m, об/хв \cdot Н \cdot м \underline{\quad 0.5 \quad}$$

$$M_c, Н \cdot м \underline{\quad 0.4 \quad}$$

$K_{тг},$ $B \cdot хв/об$	$y$	$y, c$	$z$	$z, c$	$K_{об, об/х}$ $в \cdot Н \cdot м$	$об, c$	$K_m,$ $б/хв \cdot Н \cdot м$	$M$ $c, Н \cdot м$
0,06	0	.012	.2	.2	8.0	.8	0.5	0

## 2.2 Опис системи.

Система автоматичного регулювання швидкості обертання електричного приводу постійного струму широко застосовується для регулювання частоти обертання різноманітних машин і механізмів. У якості джерела енергії, якою живиться двигун застосовано генератор постійного струму. Збудження генератора здійснюється магнітним потоком, що формується обмоткою збудження, струм в якій регулюється вихідною напругою підсилювача. В якості датчика швидкості (перетворювача кутової швидкості обертання двигуна в напругу) використовується тахогенератор.

Потенціометр  $R$  задає напругу  $U_3$ . Напруга  $U_{mг}$ , що генерує тахогенератор (датчик швидкості), жорстко з'єднаний із валом двигуна, зрівнюється з  $U_3$ . Різниця напруги (разузгодження)  $\Delta U = U_3 - U_{mг}$  поступає на підсилювач  $У$ . Підсилений сигнал  $U_y$  подається на ОВГ. При зміні напруги  $U_y$  змінюється напруга на затискачах генератора  $U_2$ .  $U_2$  подається на двигун  $Д$ , швидкість обертання ротора у якого залежить від  $U_2$ . Тахогенератор виробляє напругу  $U_{mг}$ , яка пропорційна швидкості обертання двигуна  $\omega_{об}$ . Двигун жорстко з'єднаний з робочим механізмом. [12]

При зміні навантаження на валу змінюється швидкість двигуна  $\omega_{об}$ , що спричиняє за собою зміну  $U_{mг}$ . При цьому змінюється разузгодження  $\Delta U = U_3 - U_{mг}$ , тобто змінюється  $U_y$  на ОВГ, що спричиняє за собою зміну магнітного потоку в генераторі і  $U_2$ . Це веде до зміни  $\omega_{об}$  в сторону, протилежну початковому впливу, що викликає перехідний процес.



Зміна  $\omega_{\text{дв}}$  змінює  $U_{m2}$ , що впливає на величину  $\Delta U = U_3 - U_{m2}$  і перехідний процес продовжується доти, поки  $\omega_{\text{дв}}$  не досягне початкової величини.

### 2.3. Визначення функціональної, структурної схеми і передаточних функцій замкнутої і розімкнутої системи.

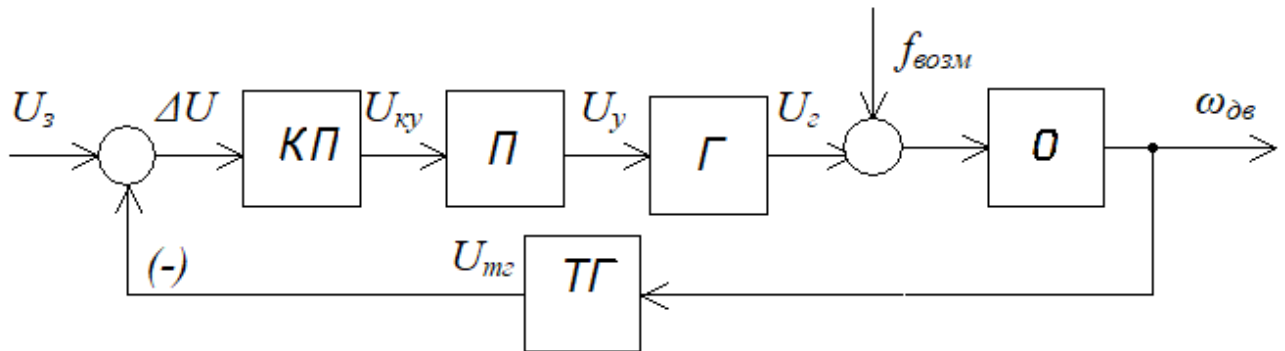


Рис. 2.2 Функціональна схема САР швидкості ЕП.[13]

Елементи (ланки) системи описуються диференційними рівняннями що описують рух вихідної змінної:

$$\text{Підсилювач: } T_y p U_y(p) + U_y(p) = K_y U(p)$$

$$\text{Генератор: } T_z p U_z(p) + U_z(p) = K_z U_y(p)$$

$$\text{Двигун: } T_{\text{дв}} p \omega_{\text{дв}}(p) + \omega_{\text{дв}}(p) = K_{\text{дв}} U_z(p) - K_M M_c$$

$$\text{Тахогенератор: } U_{m2}(p) = K_{m2} \cdot \omega_{\text{дв}}(p)$$

Визначимо передаточні функції елементів системи.

$$\text{Підсилювач: } U_y(p)(T_y p + 1) = K_y U_3(p)$$

$$W_y(p) = \frac{U_y(p)}{U_3(p)} = \frac{K_y}{T_y p + 1} \quad (2.1)$$

$$\text{Генератор: } U_z(p) (T_z p + 1) = K_z U_y(p)$$

$$W_z(p) = \frac{U_z(p)}{U_y(p)} = \frac{K_z}{T_z p + 1} \quad (2.2)$$

$$\text{Двигун по сигналу керування: } \omega_{\text{дв}}(p)(T_{\text{дв}} p + 1) = K_{\text{дв}} U_z(p) - K_M M_c$$

$$W_{\omega_{\partial\theta}}(p) = \frac{\omega_{\partial\theta}(p)}{U_z(p)} = \frac{K_{\partial\theta}}{T_{\partial\theta}p + 1} \quad (2.3)$$

Тахогенератор:  $U_{mz}(p) = K_{mz} \omega_{\partial\theta}(p)$

$$W_{mz}(p) = \frac{U_{mz}(p)}{\omega_{\partial\theta}(p)} = K_{mz} \quad (2.4)$$

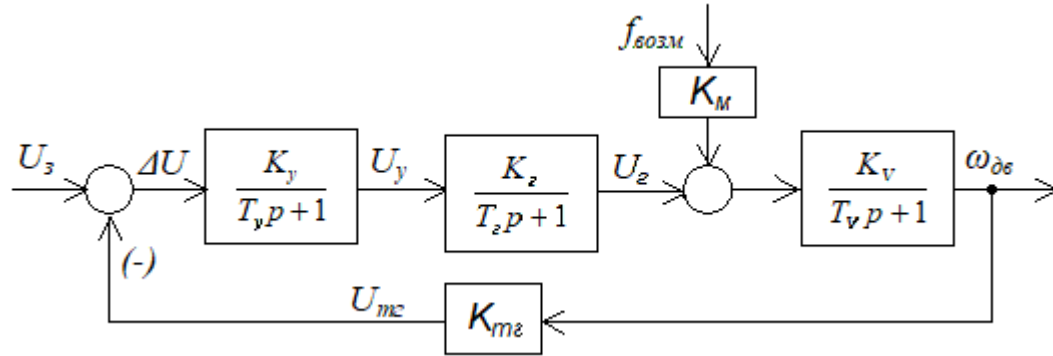


Рис.2.3 Структурна схема САР швидкості ЕП [14]

Передаточна функція розімкненої системи:

$$\begin{aligned} W_{pk}(p) &= W_y(p) \cdot W_z(p) \cdot W_{\omega_{\partial\theta}}(p) \cdot W_{mz}(p) = \frac{K_y}{T_y p + 1} \cdot \frac{K_z}{T_z p + 1} \cdot \frac{K_{\partial\theta}}{T_{\partial\theta} p + 1} \cdot K_{mz} = \\ &= \frac{K_o}{T_y T_z T_{\partial\theta} p^3 + (T_y T_{\partial\theta} + T_y T_z + T_{\partial\theta} T_z) p^2 + (T_y + T_z + T_{\partial\theta}) p + 1} = \\ &= \frac{10.56}{0.00192 p^3 + 0.172 p^2 + 1.012 p + 1} \end{aligned} \quad [2.5]$$

Передаточна функція замкненої системи:

$$\begin{aligned} W_{zn}(p) &= \frac{W_y(p) W_z(p) W_{\text{ДВ}}(p)}{1 + W_y(p) W_z(p) W_{\text{ДВ}}(p) W_{\text{ТГ}}(p)} = \frac{\frac{K_y}{T_y p + 1} \frac{K_z}{T_z p + 1} \frac{K_{\partial\theta}}{T_{\partial\theta} p + 1}}{1 + \frac{K_y}{T_y p + 1} \frac{K_z}{T_z p + 1} \frac{K_{\partial\theta}}{T_{\partial\theta} p + 1} K_{mz}} = \\ &= \frac{K_y K_z K_{\partial\theta}}{T_y T_z T_{\partial\theta} p^3 + (T_y T_z + T_y T_{\partial\theta} + T_z T_{\partial\theta}) p^2 + (T_y + T_z + T_{\partial\theta}) p + K_y K_z K_{\partial\theta} K_{mz} + 1} = \\ &= \frac{10 \cdot 2.2 \cdot 8}{0.012 \cdot 0.2 \cdot 0.8 p^3 + (0.012 \cdot 0.2 + 0.012 \cdot 0.8 + 0.2 \cdot 0.8) p^2 + (0.012 + 0.2 + 0.8) p + 10 \cdot 2.2 \cdot 8 \cdot 0.06 + 1} \\ &= \frac{176}{0.00192 p^3 + 0.172 p^2 + 1.012 p + 11.56} \end{aligned} \quad [2.6]$$

**2.4. Частотний і динамічний аналіз системи і синтез корегувального пристрою.**

В якості інструменту скористаємось комп'ютеризованим методом обчислень в пакеті MathCAD [20]. Де крім числових отримаємо графічні результати.

Прийmemo наступні початкові дані параметрів системи (коефіцієнти передачі, підсилення, сталих часу).

$$k_u := 10.0 \quad k_g := 1.2 \quad k_d := 8.5 \quad k_{tg} := 0.08 \quad T_u := 0.01 \quad T_g := 0.2 \quad T_d := 0.5 \quad U(t) := 10$$

По диференціальним рівнянням, що описують динаміку окремих ланок і користуючись правилами складання і перетворення структурних схем визначаємо передаточні функції ланок системи.

Підсилювач: 
$$W_u(p) := \frac{k_u}{(T_u \cdot p + 1)} \rightarrow \frac{10.0}{(1 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1)}$$

генератор: 
$$W_g(p) := \frac{k_g}{(T_g \cdot p + 1)} \rightarrow \frac{1.2}{(0.2 \cdot p + 1)}$$

двигун: 
$$W_d(p) := \frac{k_d}{(T_d \cdot p + 1)} \rightarrow \frac{8.5}{(0.5 \cdot p + 1)}$$

Для корегування застосуємо метод структурної оптимізації шляхом додавання в контур регулювання послідовного пристрою призначеного для корегування ЛАЧХ і ФЧХ системи в необхідну форму при перетинанні вісі в області середніх частот з бажаним нахилом, при якому нахил ЛАЧХ не перевищує – 20 дБ/дек. Це також дасть можливість забезпечення необхідних

Передавальна функція розімкнутої системи

$$k := k_u \cdot k_g \cdot k_d \rightarrow 102.000$$

$$W_r(p) := \frac{k}{(T_u \cdot p + 1) \cdot (T_g \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)} \rightarrow \frac{102.000}{[(1 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1) \cdot (0.2 \cdot p + 1) \cdot (0.5 \cdot p + 1)]} \quad [2.7]$$

$$W_{rc}(p) := W_r(p) \cdot W_{cd}(p) \rightarrow \frac{102.000}{[(1.000000000000000000000000000000 \cdot 10^{-2} \cdot p + 1)^2 \cdot (0.5 \cdot p + 1)]} \quad [2.8]$$

$$W_{rc}(p) := W_{cd}(p) \cdot W_r(p) \quad [2.9]$$



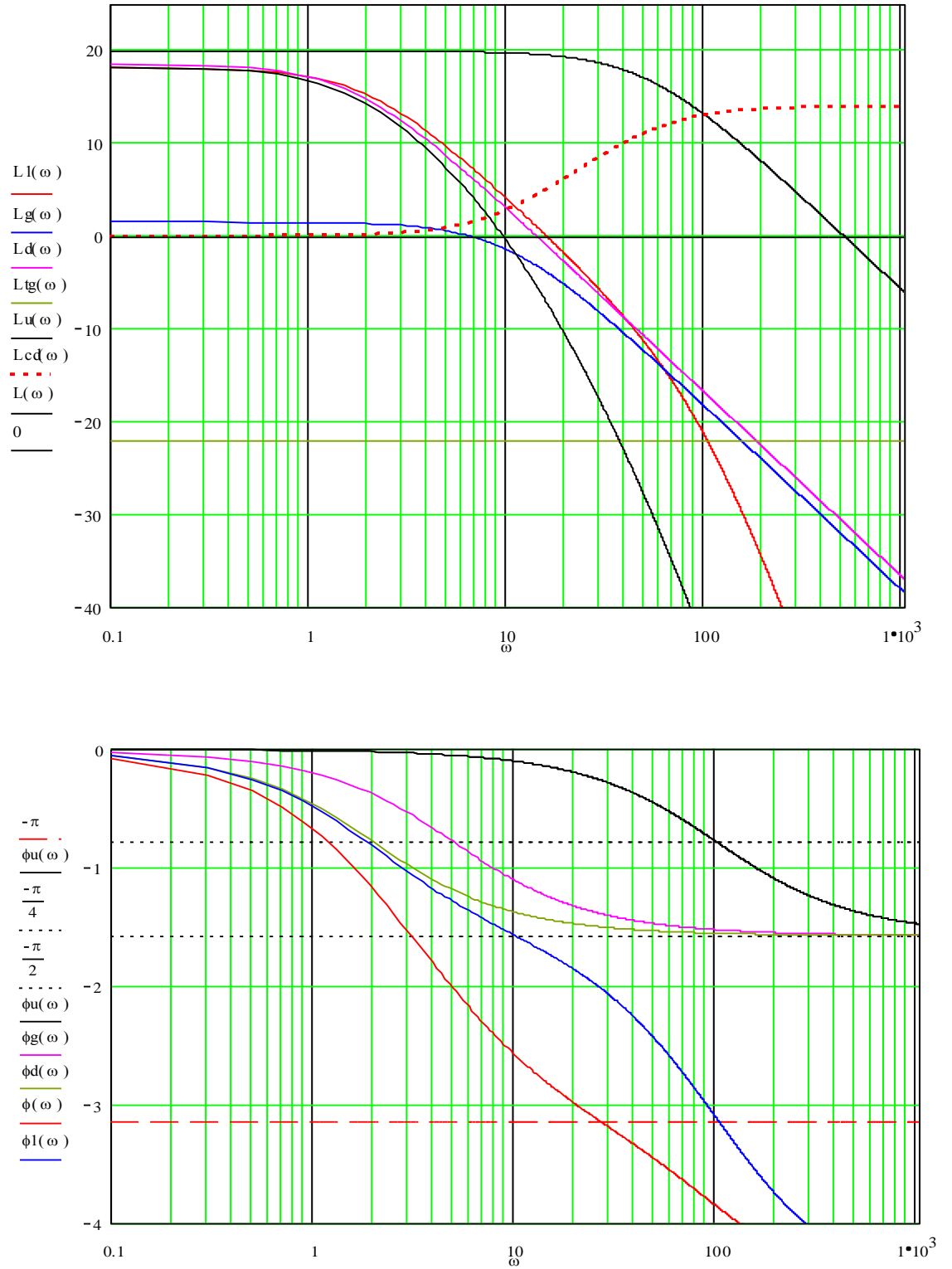


Рис 2.4 ЛАЧХ і ФЧХ скорегованої системи і без корегування. [16]

На отриманій ЛАЧХ в області середніх частот, в зоні перетину сумарної ЛАЧХ системи (без коригувального пристрою) з віссю частот,  $L=0$  визначаємо найближчі частоти сполучення. В генераторі і підсилювачі.

$$T_g = \frac{1}{\omega_g} = 0.2s, \quad T_u = \frac{1}{\omega_u} = 0.012s$$

При цьому  $T_g > T_u$ . Тому нахил буде із знаком +, а передавальна схема згідно довіднику [9, 19].

$$W_{cd}(p) = \frac{T_g p + 1}{T_u p + 1}. \quad [2.10]$$

Вносимо зміни в MathCAD і додаємо в контур передавальну функцію корегувального пристрою отримаємо удосконалену ЛАЧХ і ФЧХ і їх графіки.

Аналіз частотних і динамічних характеристик системи свідчить про суттєвий вплив комплексних коренів на систему що підтверджується нахилом більш ніж 20 дБ/дек на частоті зрізу (перетинання з віссю частот  $L=1$  при  $\omega = \omega_{зр}$ ). Тому для зменшення нахилу до 20 дБ/дек потрібний послідовний коригуючий пристрій з диференціюючими властивостями що забезпечує позитивний нахил ЛАЧХ в області частоти зрізу  $\omega_{зр}$ . Прийmemo, згідно з [9, 19] орієнтовну передавальну функцію типового коригувального пристрою:

$$W_{cd}(p) = k \frac{T_g p + 1}{T_u p + 1} = k \left( \frac{T_g p}{T_u p + 1} + \frac{1}{T_u p + 1} \right) \quad [2.11]$$

при тому,  $k = 1$ ,  $T_u < T_g$   $k = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1$ ;  $T_g = R_2 \cdot C$ ;  $T_u = k \cdot T_g$

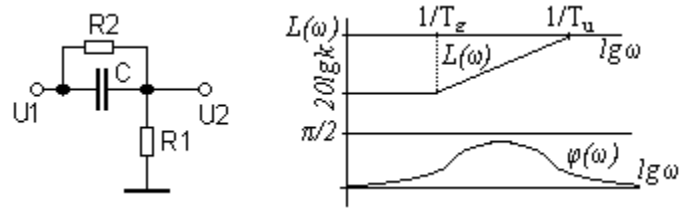


Рис. 2.5 Принципова схема і частотні характеристики корегувального пристрою [22]

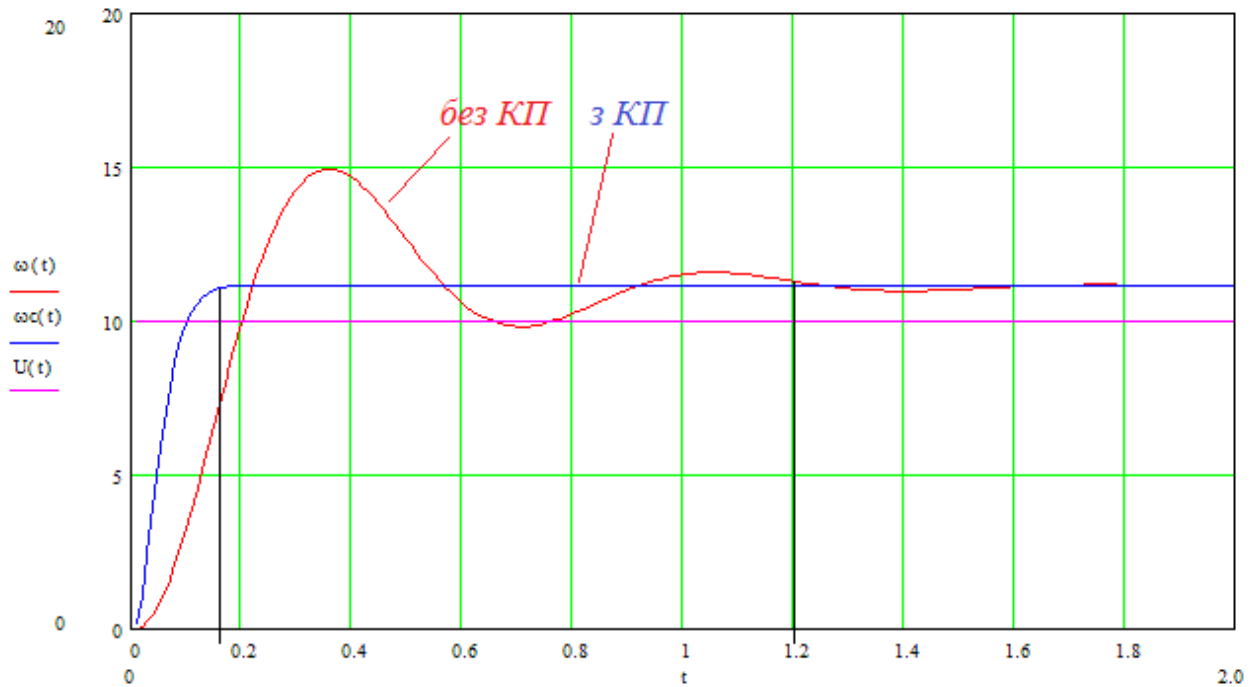


Рис 2.6. Графічні результати перехідних процесів в системі на східчасту керуючу функцію. [17]

На рис. 2.4 видно користь корегування, яка свідчить що швидкість керування корегованої системі більш ніж в 6 раз перевищує не скореговану (менше 0.2 с проти 1.2 с).

## РОЗДІЛ 3

### ТЕХНІКА КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ ЕЛЕКТРОННОЮ СИСТЕМОЮ

#### 3.1 Методи лінійного керування

Лінійні регулятори розроблені та застосовані на основі лінійної моделі керованого підприємства. Лінійні методи керування мають вирішальне значення для підтримки бажаної вихідної напруги в силових електронних системах, одночасно зводячи до мінімуму відхилення, викликані порушеннями або змінами навантаження. У цьому розділі розглядаються чотири широко використовувані методи лінійного керування: пропорційно-інтегральне (PI) керування, пропорційно-інтегрально-похідне (PID) керування, керування розміщенням полюсів та керування безперервним ритмом.

Пропорційно-інтегральне (PI) керування широко використовується в силових електронних системах завдяки своїй простоті та ефективності. Він поєднує пропорційний член (P) та інтегральний член (I). Пропорційний член реагує на різницю між бажаною вихідною напругою та фактичною вихідною напругою, тоді як інтегральний член накопичує похибку з часом. [18]

ПІ-регулятор регулює керуючий сигнал на основі суми компонентів, згаданих раніше. Пропорційний член забезпечує швидку реакцію на зміни помилок, тоді як інтегральний член усуває стаціонарні помилки та забезпечує тривалу підтримку бажаної вихідної напруги. PI-регулятори підходять для застосувань з невеликими збуреннями та повільною динамікою.

Керована установка в силових електронних системах часто є трифазним дворівневим перетворювачем джерела напруги (VSC). На рисунку 3.1 зображено схему керування ПІ-регулятором, який використовується для керування струмом у ВКЗ. Напруга мережі в точці загального з'єднання дорівнює  $U_{gabc}$ , струм мережі –  $I_{gabc}$ ,  $Z_f$  – опір фільтра, який може бути простим L-фільтром або фільтром LCL,



$Z_g$  — опір слабкої мережі,  $v_{cabc}$  — напруга перетворювача,  $v_{dc}$  — напруга постійного струму, а  $C$  — ємність постійного струму. [19]

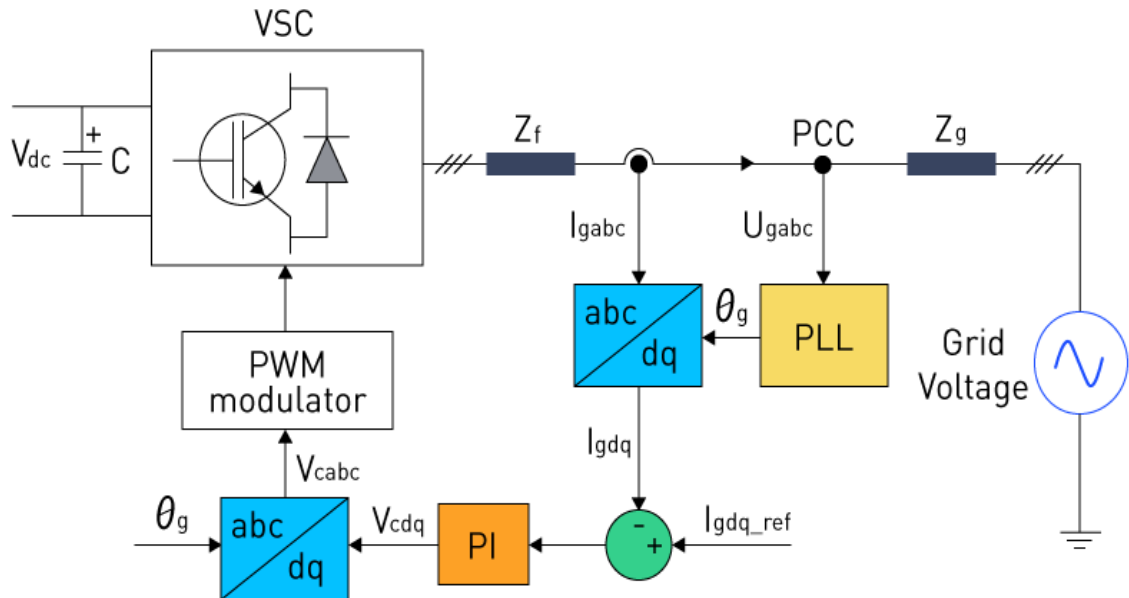


Рис. 3.1: Схема керування пропорційним та інтегральним контролером, застосованим у перетворювачі джерела трифазної напруги для керування струмом [20]

Пропорційно-інтегрально-похідна (PID) керування є розширенням методу PI-регулювання, яке додає похідний член (D) до закону керування. Похідний член пропорційний швидкості зміни помилки, покращуючи продуктивність контролера та розуміння динаміки системи. [21]

ПІД-регулятор регулює керуючий сигнал на основі суми пропорційної, інтегральної та похідної складових. Додавання похідного терміна дозволяє контролеру швидше реагувати на зміни системи, що призводить до покращення перехідних характеристик. ПІД-регулювання широко застосовується в силових електронних системах, які вимагають точного регулювання напруги та покращених динамічних характеристик.

Розміщення полюсів — це метод керування зі зворотним зв'язком, який дозволяє розташувати домінуючі полюси замкнутого циклу установки в потрібному місці в  $s$ -площині. Коли всі змінні стану системи можна вимірювати та контролювати, зворотний зв'язок за станом із відповідною матрицею підсилення дає можливість розміщення полюсів. Розташування полюсів визначає корені рівняння характеристики системи, які визначають характеристики відгуку системи. Шляхом регулювання домінуючих полюсів замкнутого циклу можна регулювати коефіцієнт демпфування та незатухаючу власну частоту, пропонуючи гнучку конструкцію динамічних і стаціонарних характеристик.

Deadbeat control — це техніка дискретного керування, яка прагне зменшити помилку відстеження контрольованого струму до нуля протягом короткого часу, як правило, за один або два інтервали вибірки. Він розраховує керуючу дію на основі різниці між бажаним і фактичним значеннями струму, а також параметрами системи. [22]

Deadbeat control забезпечує швидку перехідну реакцію та фіксовану частоту перемикавання, що спрощує конструкцію фільтруючих елементів. Однак він може бути чутливим до коливань параметрів і шуму вимірювання. Для забезпечення стабільності та продуктивності необхідно точне моделювання системи та надійні алгоритми керування.

### **3.2 Методи нелінійного керування**

Лінійні методи керування можуть бути неефективними при роботі з агресивними середовищами, такими як незбалансована або спотворена напруга мережі. Крім того, нелінійні контролери краще підходять для покращення надійності та адаптивності до різних ситуацій, коли розглядають зміну параметрів системи та невизначеність збурень. Нелінійні методи керування використовуються в силових електронних системах для регулювання потоку струму через різні

компоненти, забезпечуючи стабільність і оптимальну продуктивність. У цьому розділі розглядаються три широко використовувані методи нелінійного керування: керування гістерезисом, прогнозне керування за моделлю та штучний інтелект.

Регулювання гістерезису, також відоме як керування струмом, є широко використовуваним і простим методом контролю струму. Він порівнює фактичну форму хвилі струму з осциллами еталонного струму та підтримує струм у попередньо визначеній смузі гістерезису. Коли струм перевищує верхню або нижню межу діапазону, контролер перемикає стан пристрою живлення, щоб повернути струм у діапазон. [23]

Контроль гістерезису забезпечує швидку реакцію та є відносно простим у реалізації. Однак на його продуктивність може вплинути змінна частота перемикавання, яка може викликати гармонічні спотворення та ускладнити конструкцію фільтруючих елементів.

Логіка керування для контролера гістерезису для кожної фази показана на рис. 3.2

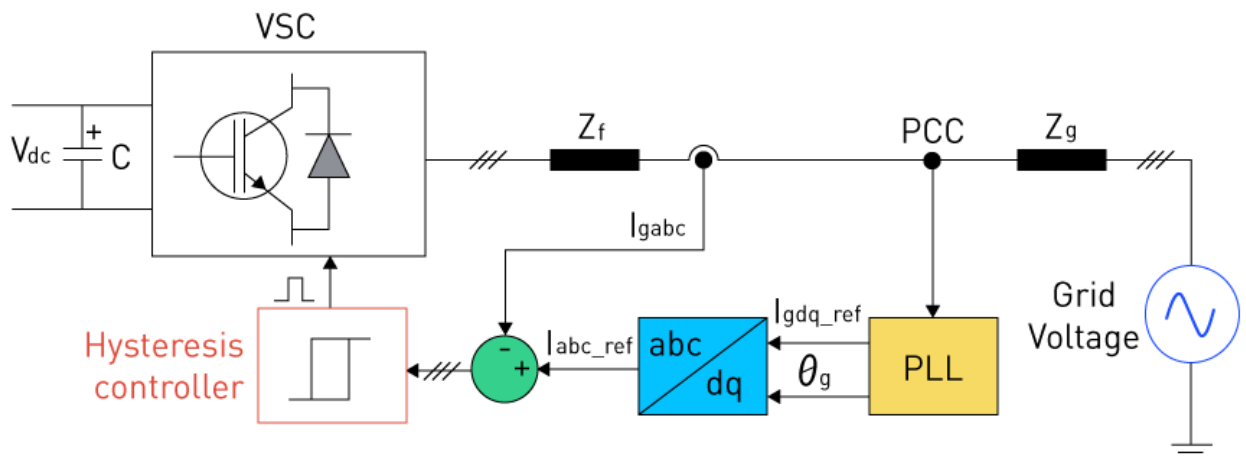


Рис. 3.2: Схема керування гістерезисом, застосована в трифазному перетворювачі джерела напруги [24]

Прогнозне керування, також відоме як прогнозне керування за моделлю (MPC), — це передова техніка керування струмом, яка використовує математичну

модель силової електронної системи для передбачення майбутньої поточної поведінки. Використовуючи ці передбачення, контролер визначає оптимальні керуючі дії для мінімізації попередньо визначеної функції вартості, такої як поточна помилка відстеження або втрати при перемиканні. [25]

Прогнозне керування забезпечує виняткову продуктивність і здатне адаптуватися до змін параметрів системи. Однак це потребує значних обчислювальних ресурсів і може створити проблеми впровадження порівняно з іншими методами керування.

Управління нечіткою логікою та керування нейронною мережею є методами штучного інтелекту (AI), які стали значно популярними в управлінні енергетичними електронними системами. Ці методи забезпечують надійне та адаптоване керування, що дозволяє системам ефективно керувати невизначеністю та складністю, типовою для силової електроніки.

Fuzzy Logic Control забезпечує систематичний підхід до роботи з невизначеними та неточними системами, які важко моделювати математично. Включаючи ступені істинності, це дає змогу наближено міркувати, що є життєво важливим для складних силових електронних систем. Управління нечіткою логікою використовує функції приналежності та лінгвістичні правила для перетворення нечітких наборів у вихідні дії, дозволяючи керувати електронними системами нелінійної та змінної потужності. [26]

Neural Network Control черпає натхнення у взаємопов'язаній нейронній структурі людського мозку. Він використовує штучні нейронні мережі (ШНМ) для керування системою. ШНМ навчаються та адаптуються на основі досвіду, що робить їх цінними для керування нелійними та складними силовими електронними системами, де може бути складно отримати точні математичні моделі. Розуміючи поведінку системи за допомогою пар даних вводу-виводу, ШНМ генерують відповідні виходи для даного набору вхідних даних, пропонуючи

надійні рішення для динамічних та змінних проблем керування силовою електронною системою.

### 3.3 Порівняння лінійних і нелінійних методів керування

Методи керування відіграють вирішальну роль у силових електронних системах, оскільки вони впливають на динамічну реакцію та роботу в стаціонарному режимі. Лінійні та нелінійні методи керування є двома основними категоріями, які використовуються в цих системах. Однак кожен підхід має унікальні особливості, які можуть зробити один більш відповідним для певної програми. [27]

Методи лінійного керування, такі як PI-регулювання, PID-регулювання, керування розміщенням полюсів і керування мертвою частотою, ґрунтуються на теорії лінійних систем. Вони пропонують надійний контроль у стабільних умовах роботи та є відносно простими у проектуванні та впровадженні. Однак їх продуктивність має тенденцію до погіршення, коли вони стикаються зі значною нелінійністю або змінними параметрами, наприклад, під час великих збурень або швидких змін навантаження.

З іншого боку, методи нелінійного керування, такі як керування гістерезисом, прогнозне керування моделлю та методи штучного інтелекту, такі як нечітка логіка та нейронні мережі, спеціально розроблені для роботи з нелінійними системами. Ці методи виявляють гнучкість і адаптивність, що робить їх придатними для складних силових електронних систем, які характеризуються нелінійною поведінкою та змінними робочими умовами. Методи нелінійного керування чудово справляються з великими збуреннями та швидкими змінами в стані системи чи робочих умовах. Тим не менш, їх конструкція та реалізація, як правило, є більш складними порівняно з методами лінійного керування.

Крім того, методи штучного інтелекту привносять компонент навчання в систему управління, підвищуючи її адаптивність. Ці методи чудово справляються з системними невизначеностями та складнощами, які можуть створювати проблеми для традиційних лінійних і нелінійних методів. [28]

Підсумовуючи, вибір між лінійними та нелінійними методами керування залежить від застосування та характеристик системи. Лінійні методи добре підходять для систем, що працюють поблизу фіксованої точки, в той час як нелінійні методи більше підходять для систем з вираженими нелінійними характеристиками або змінними робочими умовами. Слід також брати до уваги складність техніки керування, зважаючи переваги продуктивності та складності проектування та впровадження.

### **3.4 Застосування в різних силових електронних перетворювачах**

Лінійні та нелінійні методи керування відіграють важливу роль у роботі силових електронних перетворювачів, оптимізуючи стабільність, продуктивність та ефективність. У цьому розділі розглядаються застосування цих методів керування в різних силових електронних перетворювачах, включаючи перетворювачі постійного струму в постійний струм, випрямлячі змінного струму в постійний струм, інвертори постійного струму в змінний струм і перетворювачі змінного струму в змінний струм. [29]

Перетворювачі постійного струму: перетворювачі постійного струму необхідні для регулювання та перетворення напруги в джерелах живлення, зарядних пристроях і системах відновлюваної енергії. Лінійні методи керування, такі як ПП- та ППД-регулятори, зазвичай використовуються в цих перетворювачах для підтримки стабільної вихідної напруги, незважаючи на коливання вхідної напруги та умови навантаження. Методи нелінійного керування, такі як гістерезис

і прогнозне керування моделлю, регулюють струм індуктора, покращують перехідну характеристику та зменшують пульсації вихідної напруги.

Випрямлячі змінного струму та постійного струму : випрямлячі змінного струму перетворюють вхідну напругу змінного струму на регульовану вихідну напругу постійного струму та мають вирішальне значення в джерелах живлення, приводах двигунів і зарядці акумуляторів. Для регулювання вихідної напруги використовуються лінійні методи керування, такі як PI-регулятори та контроль розміщення полюсів. Методи нелінійного керування, такі як прогнозне керування та керування гістерезисом, формують форму хвилі вхідного струму, зменшують гармонічні спотворення та досягають корекції коефіцієнта потужності.

Інвертори DC-AC : інвертори DC-AC перетворюють вхідну напругу постійного струму на вихідну напругу змінного струму та знаходять застосування в моторних приводах, системах відновлюваної енергії та джерелах безперебійного живлення. Методи лінійного керування використовуються для керування величиною та частотою вихідної напруги, що забезпечує належну роботу підключених навантажень. Методи нелінійного керування, такі як керування гістерезисом і прогнозне керування, регулюють вихідний струм, покращують динамічні характеристики та пом'якшують гармонічні спотворення. [30]

Перетворювачі AC-AC : перетворювачі AC-AC використовуються для перетворення напруги та частоти в таких програмах, як керування швидкістю двигуна, підвищення якості електроенергії та регулювання напруги. Методи лінійного керування, такі як PI та контроль розташування полюсів, реалізовані для контролю величини та частоти вихідної напруги. Методи нелінійного керування, такі як керування гістерезисом і прогнозне керування, застосовуються для керування вихідним струмом, мінімізації гармонік і забезпечення максимальної продуктивності.

## ВИСНОВКИ

1. Було встановлено що методи керування також сприяють підвищенню ефективності та надійності силових електронних систем шляхом мінімізації втрат, пом'якшення навантаження на компоненти та запобігання таким потенційним проблемам, як перенапруга, перевантаження по струму та перегрівання.

2. Визначена закономірність що використання цифрового керування в силових електронних системах зазнало різкого зростання популярності завдяки численним перевагам порівняно з аналоговими методами керування. Однак важливо визнати, що цифрове управління також має свої проблеми та обмеження. У цьому розділі будуть описані основні переваги та недоліки цифрового керування в силових електронних системах.

3. Визначено більш ефективним є застосування структурної оптимізації шляхом включення в основний контур керування частотно залежних елементів з параметрами, що сприяють бажаним умовам якості і точності керування. Для здійснення цих умов застосовують промислові універсальні пристрої пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Або їх аналогів, приклад синтезу якого проведемо в даному розділі.

4. Методи керування відіграють вирішальну роль у силових електронних системах, оскільки вони впливають на динамічну реакцію та роботу в стаціонарному режимі. Лінійні та нелінійні методи керування є двома основними категоріями, які використовуються в цих системах. Однак кожен підхід має унікальні особливості, які можуть зробити один більш відповідним для певної програми.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Киричок Ю.Г. Привод шахтных подъемных установок большой мощности / Ю. Г. Киричок, В. М. Чермалых // – М. : Недра, 1972. – 336 с. 20
2. Чермалых В.М. Исследование сложных электромеханических систем / В. М. Чермалых // – К.: КПИ, 1979. – 63 с. 21
3. Католиков В.Е. Автоматизированный электропривод подъемных установок глубоких шахт / В.Е. Католиков, А.Д. Динкель, А.М. Седунин // – М. : Недра, 1983. – 270 с. 23
4. Беликов Н.Л. Динамические явления при регулируемом предохранительном торможении / Н.Л. Беликов, В.И. Васильев, С.Н. Шапочка, И. Е. Траубе // Уголь Украины – 1983. – № 1. – С. 26 – 27. 44
5. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Бен Куо // – М.: Машиностроение, 1986, – 448 с.
6. Чермалых В.М. Многоканальные системы оптимального управления электроприводом промышленных установок / В. М. Чермалых // – Изв. Вузов “Горный журнал”, 1982, №7. – С. 123-129. 58
7. А.с. № 1447743 СССР, МКИ В 66 В 5/00 / Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Васильев В.И., Дубовик В.Г., Чермалых В.М. // Открытия. Изобретения. - 1988. Бюл. № 48. 59
8. Блэкборн Дж.Ф. Гидравлические и пневматические системы управления. / Дж.Ф. Блэкборн, Г. Ритхоф, Дж. Л. Шерер //– М.: ИИЛ, 1962. – 612 с. 60
9. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов //– К.: Вища школа., 1982. – 472 с.
10. Краскевич В.Е. Численные методы в инженерных исследованиях / В.Е. Краскевич, К.Х. Зеленский, В.И. Гречко //– К. : Вища школа, 1986, – 263 с.

11. Васильев В.И. Применение нелинейных фильтров в системе управления предохранительным торможением подъемных установок / В.И. Васильев, Л.А. Козьякова, Е.И. Алтухов // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Горная электромеханика и автоматика. - К.: 1984. – Вып. 15. – С. 13 – 15. 85
12. А.с. № 1296500 (СССР) Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Чермалых В. М., Васильев В. И., Матвиенко Н. П. // Открытия. Изобретения. - 1987. Бюл. № 10. 86
13. Васильев В.И. Компьютерное моделирование предохранительного торможения шахтной подъемной установки / В.И. Васильев // АСУ и приборы автоматки: Всеукр. межвед. н.-техн. сб. – 2002. – Вып. 121. – С. 48-51.
14. Васильев В.И. Выбор рациональных законов управления методом цифрового моделирования / В.И. Васильев // Сб. научных трудов по материалам 8-й Международной научной конференции “Теория и техника передачи, приема и обработки информации” “ИИСТ-2002” – 17-19 сентября 2002 г.:– Харьков: ХНУРЭ, 2002. – С. 429-431.
15. Сиденко А.Ф. Аппаратура управления тормозными приводами шахтных подъемных машин / А. Ф. Сиденко, А.П. Солоха, Б.С. Роженцов //– М. : Недра, 1974. – 226 с.
16. Чермалых В. М. Многоканальная система оптимального управления / В. М. Чермалых, Н. Ю. Борисюк, А. В. Чермалых // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Горная электромеханика и автоматика., К., 1982, вып. 13. – С. 3 – 6. 110
17. Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. / МАИСК. – Одесса: “Астропринт”, 2010, №8. – С. 18-29. 133
18. Васильев В.И. Компьютерное исследование динамики остановки ШПУ при предохранительном торможении / В. И. Васильев // Вісник Сум ДУ. Серія Технічні науки, 2011, №1 – С. 84-88.

19. Методичні вказівки по виконанню курсовий роботи з ТАУ. КПТ, 2000.
20. Дьяконов В.П. Mathcad 8—12 для студентов, Серия “Библиотека студента” М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 632 с.:
21. Shao, L.; Karci, A.E.H.; Tavernini, D.; Sorniotti, A.; Cheng, M. Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles—A review. *IEEE Access* 2020, 8, 116900–116913.
22. Nair, R.; Gopalaratnam, N. Emulation of wind turbine system using vector controlled induction motor drive. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2020, 56, 4124–4133.
23. Khatri, P.; Wang, X. Comprehensive review of a linear electrical generator for ocean wave energy conversion. *IET Renew. Power Gener.* 2020, 14, 949–958.
24. Salem, A.; Narimani, M. A review on multiphase drives for automotive traction applications. *IEEE Trans. Transport. Electrification* 2019, 5, 1329–1348. \
25. . Li, L.; Liu, Q. Research on IPMSM drive system control technology for electric vehicle energy consumption. *IEEE Access* 2019, 7, 186201–186210.
26. Razaq, M.S.; Jung, J.-W. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 4747–4758.
27. Tanvir, A.A.; Merabet, A. Artificial neural network and Kalman filter for estimation and control in standalone induction generator wind energy DC microgrid. *Energies* 2020, 13, 1743.
28. Liu, X.; Zhang, Q. Robust current predictive control-based equivalent input disturbance approach for PMSM drive. *Electronics* 2019, 8, 1034.
29. Wu, D.; Feng, L. On-off control of range extender in extended-range electric vehicle using bird swarm intelligence. *Electronics* 2019, 8, 1223.
30. Zhang, W.; Ning, Y.; Suo, C. A method based on multi-sensor data fusion for UAV safety distance diagnosis. *Electronics* 2019, 8, 1467.