ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Олексій БЛУДОВ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ТСДМ-61
Олексій БЛУДОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Неля ГРАДОБОЄВА
к.т.н., доцент *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Блудову Олексію Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти
керівник кваліфікаційної роботи Неля ГРАДОБОЄВА, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Оцінка стійкості та якості.
   2. ФАПЧ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
   1. Якість комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти в скануючих системах.
   2. Практичне використання фазового автопідстроювання частоти та можливості для оцінки
   3. Пристрій порівняння для синхронно-синфазного електроприводу.
   4. Вплив синхронно-синфазофого електроприводу на показники якості ФАПЧ комбінованих систем.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на ____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	20.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	27.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	07.11.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	17.11.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	27.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	07.12.2025	Викон.
7	Розробка презентації	17.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Олексій БЛУДОВ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Неля ГРАДОБОЄВА
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Блудов О.Д. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Блудов Олексій Дмитрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Блудова Олексія Дмитровича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Неля ГРАДОБОЄВА
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Блудов О.Д. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Блудова Олексія Дмитровича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти»

Актуальність.
Сучасні електроприводи та скануючі системи потребують високої точності, швидкодії й стійкості синхронізації, особливо в умовах змінних навантажень і зовнішніх збурень. Ключову роль у таких системах відіграють системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Класичні ФАПЧ мають обмежені можливості щодо забезпечення необхідної якості регулювання, що зумовлює доцільність застосування комбінованих структур. Тому актуальним є дослідження стійкості та якості комбінованих систем ФАПЧ, зокрема для скануючих і синхронно-синфазних електроприводів, де фазові похибки безпосередньо впливають на точність і надійність роботи системи

Позитивні сторони.
1. У роботі поєднано теоретичні основи ФАПЧ із практичними прикладами їх застосування у скануючих системах та синхронно-синфазних електроприводах, що підвищує прикладну цінність дослідження.
2. В роботі використано статистичні методи оцінки, зокрема середньоквадратичної фазової похибки та відносного запасу стійкості, що забезпечує обґрунтованість і наочність отриманих результатів.

Недоліки.
1. Недостатньо уваги приділено аналізу впливу шумів, нелінійностей та параметричних відхилень, які суттєво впливають на роботу ФАПЧ у реальних умовах експлуатації.
2. У роботі відсутнє порівняння результатів дослідження з альтернативними або класичними структурами ФАПЧ, що дозволило б наочніше продемонструвати переваги комбінованого підходу.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Блудов Олексій Дмитрович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент
науковий ступінь, вчене звання _____ (підпис) _____ *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 80 стор., 22 рис., 7 табл., 28 джерел.

Мета роботи – оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти шляхом аналізу її структурних особливостей, алгоритмів роботи та динамічних характеристик з метою підвищення точності та надійності синхронізації в скануючих системах і електроприводах.

Об’єкт дослідження – комбіновані системи фазового автопідстроювання частоти, що застосовуються в системах синхронізації електроприводів та скануючих пристроях.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оцінки стійкості й якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти, а також їх фазові, частотні та динамічні характеристики в різних режимах роботи.

Короткий зміст роботи: у кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти з метою оцінки їх стійкості та якості в усталених і перехідних режимах роботи. Проаналізовано принципи функціонування ФАПЧ, особливості комбінованих структур та їх переваги порівняно з класичними одноконтурними системами. Показано, що поєднання грубого, пропорційного та точного фазового регулювання дозволяє скоротити час захоплення, зменшити фазову похибку та підвищити стійкість системи. Досліджено режими роботи електроприводів з ФАПЧ, алгоритми імпульсних частотно-фазових дискримінаторів і логічних фазових процесорів. Отримані результати підтверджують ефективність комбінованих ФАПЧ та їх доцільність для застосування в сучасних електроприводах і системах синхронізації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФАЗОВЕ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ, КОМБІНОВАНІ ФАПЧ, СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ, ЯКІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ, ФАЗОВА ПОХИБКА, СИНХРОНІЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИНФАЗНИЙ РЕЖИМ, ІМПУЛЬСНИЙ ЧАСТОТНО-ФАЗОВИЙ ДИСКРИМІНАТОР

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 80 pages, 22 figures, 7 table, 28 sources.

The purpose of the work is to assess the stability and quality of the combined phase-locked frequency system by analyzing its structural features, operation algorithms and dynamic characteristics in order to increase the accuracy and reliability of synchronization in scanning systems and electric drives.

Object of the study is combined phase-locked frequency systems used in synchronization systems of electric drives and scanning devices.

Subject of the study is methods and algorithms for assessing the stability and quality of combined phase-locked frequency systems, as well as their phase, frequency and dynamic characteristics in different operating modes.

Summary of the work: in the qualification work, a comprehensive study of combined phase-locked frequency systems was performed in order to assess their stability and quality in steady-state and transient operating modes. The principles of PLL operation, the features of combined structures and their advantages compared to classical single-loop systems were analyzed. It is shown that the combination of coarse, proportional and fine phase control allows to reduce the capture time, reduce the phase error and increase the stability of the system. The operating modes of electric drives with PLL, algorithms of pulse frequency-phase discriminators and logical phase processors have been studied. The results obtained confirm the efficiency of combined PLLs and their feasibility for use in modern electric drives and synchronization systems.

KEYWORDS: PHASE AUTO-ADJUSTMENT OF FREQUENCY, COMBINED PLLs, SYSTEM STABILITY, CONTROL QUALITY, PHASE ERROR, SYNCHRONIZATION, ELECTRIC DRIVE, IN-PHASE MODE, PULSE FREQUENCY-PHASE DISCRIMINATOR

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ В СКАНУЮЧИХ СИСТЕМАХ 11
1.1 Роль ФАПЧ в системах сканування 11
1.2 Статистичні дані СЛС в середовищі ФАПЧ 20
1.3 Методи та види лазерного сканування 25
РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ 29
2.1 ФАПЧ в середовищі сканування 29
2.2 Принцип фазового автопідстроювання 34
2.3 Синхронно синфазний електропривід 36
РОЗДІЛ 3 ПРИСТРІЙ ПОРІВНЯННЯ ДЛЯ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ 42
3.1 Логічний пристрій порівняння 42
3.2 Режими роботи логічного пристрою порівняння 44
3.3 Імпульсно-фазовий частотний дискримінатор 49
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ СИНХРОННО-СИНФАЗОФОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ФАПЧ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ 55
4.1 Модель імпульсного частотно-фазового дискримінатора 55
4.2 Способи покращення динаміки електроприводу скануючої системи 57
4.3 Вплив динаміки електроприводу з фазовою синхронізацією на стійкість комбінованих систем 64
4.4 Способи покращення динаміки електроприводу з фазовою синхронізацією .. 69
4.5 Поліпшення якості регулювання синхронно-синфазного електроприводу 74
ВИСНОВКИ 79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 81
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 83

ВСТУП

Сучасний розвиток електроприводів і автоматизованих систем керування зумовлює зростання вимог до точності, швидкодії та стійкості систем синхронізації. Особливу роль у забезпеченні цих вимог відіграють системи фазового автопідстроювання частоти, які широко застосовуються в електромеханічних приводах, скануючих системах, вимірювальній техніці, робототехніці та промисловій автоматизації. Надійна робота таких систем є критично важливою для забезпечення коректного функціонування обладнання, зниження енергетичних втрат і підвищення ресурсу виконавчих механізмів.

Класичні системи фазового автопідстроювання частоти, попри свою відносну простоту, мають обмежені можливості щодо забезпечення високої якості регулювання в умовах змінних навантажень і широкого діапазону швидкостей. Зокрема, вони часто характеризуються значними перехідними процесами, перерегулюванням та зниженим запасом стійкості. У зв’язку з цим все більшого поширення набувають комбіновані системи ФАПЧ, які поєднують різні принципи регулювання та дозволяють гнучко адаптувати алгоритми керування до поточного режиму роботи.

Важливим елементом таких систем є імпульсний частотно-фазовий дискримінатор, логічні та модифіковані логічні фазові процесори, а також алгоритми синхронізації та фазування. Саме ці компоненти значною мірою визначають динамічні властивості системи, характер перехідних процесів і рівень залишкової фазової похибки. Недостатня оптимізація алгоритмів роботи зазначених вузлів може призводити до затримок у формуванні керуючого сигналу, зростання перерегулювання та погіршення стійкості системи в критичних режимах.

У цьому контексті особливої актуальності набуває задача комплексної оцінки стійкості та якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. Така оцінка повинна враховувати як усталені режими роботи, так і перехідні процеси, а також вплив різних методів корекції, синхронізації та фазування на загальні характеристики системи. Аналіз кількісних показників, таких як фазова похибка,

час захоплення, величина перерегулювання та запас стійкості, дозволяє обґрунтовано порівнювати різні алгоритмічні рішення та визначати найбільш ефективні з них.

Метою даної кваліфікаційної роботи є оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти на основі аналізу її структурних особливостей, алгоритмів роботи та режимів функціонування. У роботі розглядаються сучасні підходи до покращення динамічних характеристик ФАПЧ, зокрема розширення лінійної зони імпульсного частотно-фазового дискримінатора, випереджуюче розблокування та застосування модифікованих логічних фазових процесорів.

Результати дослідження спрямовані на підвищення ефективності, точності та стійкості комбінованих систем ФАПЧ і можуть бути використані при проєктуванні та модернізації електроприводів і систем синхронізації, що працюють у складних та динамічних умовах експлуатації.

1 ЯКІСТЬ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ В СКАНУЮЧИХ СИСТЕМАХ

1.1 Роль ФАПЧ в системах сканування

Сканування — це метод отримання інформації про об’єкт або певну область параметричного чи сигналового простору, що полягає в послідовному зборі даних уздовж кожного рядка, інтервалу або діапазону з подальшим переходом до наступного. У загальному випадку такий процес може реалізовуватися у вигляді дискретного кадру, що формується крок за кроком, або в безперервному режимі, коли інформація надходить пострічково чи послідовно в часі.

У задачах аналізу комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти сканування доцільно трактувати як поетапне дослідження фазових і частотних характеристик системи в різних режимах її функціонування. Це дозволяє отримати повну картину динаміки процесів синхронізації та оцінити якість перехідних і усталених режимів роботи ФАПЧ.

Пристрої та алгоритми, що реалізують такий підхід і забезпечують можливість аналізу системи шляхом поступового «перегляду» її станів у часі або в просторі параметрів, можна розглядати як скануючі системи аналізу. У випадку комбінованої ФАПЧ вони дають змогу виконувати моніторинг фазової похибки, частотного відхилення та реакції системи на збурення, що є критично важливим для оцінки її стійкості.

Потік сигналів, що надходить від джерела коливань, разом із шумами, перешкодами та фоновими складовими формує так зване сигналове поле. Його параметри змінюються з часом, що створює додаткові складнощі під час аналізу комбінованих систем ФАПЧ. Навіть незначні зміни цього поля можуть призводити до збільшення фазової похибки або втрати режиму захоплення. Тому для достовірної оцінки якості роботи системи необхідно здійснити повний огляд цього сигналового поля та виконати детальний аналіз отриманих даних.

Для аналізу сигналів у системах фазового автопідстроювання частоти використовуються електронні, цифрові та математичні засоби, які виконують низку ключових завдань. До основних функцій таких засобів належать: виявлення режимів захоплення та утримання синхронізації, розпізнавання характеру фазових і частотних відхилень, точне вимірювання параметрів сигналів у часовій і частотній областях, а також стеження за динамікою змін фазової похибки. Саме ці функції є базовими для оцінки стійкості та якості комбінованої ФАПЧ.

Системи аналізу та контролю, залежно від характеру поставлених завдань, можуть бути поділені на різні категорії. Існують найпростіші підходи, що не передбачають послідовного сканування і використовуються переважно для оцінки інтегральних енергетичних або середніх параметрів. Однак для комбінованих систем ФАПЧ такі методи є недостатніми. Більш складні скануючі підходи дозволяють досліджувати поведінку системи в широкому діапазоні умов, а комбіновані методи аналізу поєднують декілька каналів спостереження, що забезпечує комплексну оцінку якості та запасів стійкості.

Таким чином, скануючі підходи в аналізі комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти є важливим інструментом, що дозволяє здійснювати багатопланове дослідження параметрів системи, зокрема визначати моменти втрати синхронізації, оцінювати якість перехідних процесів і вимірювати фазові відхилення. Це робить такі методи незамінними під час проєктування, моделювання та оптимізації сучасних ФАПЧ.

Оптичні та оптико-електронні скануючі системи за аналогією з методами аналізу ФАПЧ можна класифікувати за типом скануючого елемента, що використовується для здійснення процесу сканування, на кілька основних категорій:

1. **Механічні системи.**

   У механічних скануючих системах оптико-електронна схема розміщується на спеціальній рухомій платформі, що забезпечує фізичне переміщення скануючого елемента у просторі. Таке переміщення дозволяє здійснювати послідовний огляд об’єкта або області спостереження та формувати інформацію про його параметри з високою просторовою точністю. Основною

перевагою механічних систем є їх конструктивна простота, висока надійність та передбачуваність роботи, що робить їх зручними для тривалих і стабільних вимірювань.

За аналогією з комбінованими системами фазового автопідстроювання частоти, механічні системи відповідають режимам повільного, поетапного змінювання параметрів, коли система має достатній час для адаптації до нових умов. Такий підхід дозволяє детально дослідити реакцію ФАПЧ на зміни фазових або частотних збурень та оцінити її запас стійкості. Водночас обмеження за швидкістю роботи, зумовлені фізичною інерцією рухомих елементів, є аналогічними інерційним процесам у ФАПЧ, які можуть призводити до збільшення часу захоплення та погіршення динамічних показників системи.

2. **Фотоелектронні системи.**

   Фотоелектронні скануючі системи базуються на використанні телевізійних або твердотільних елементів, які забезпечують формування та обробку сигналів без необхідності механічного переміщення компонентів. Завдяки цьому такі системи характеризуються високою швидкодією, точністю та повторюваністю результатів. Відсутність рухомих частин значно підвищує їх зносостійкість та стабільність параметрів у часі, що є критично важливим для високоточного аналізу.

   У задачах оцінки стійкості та якості комбінованих систем ФАПЧ фотоелектронним системам відповідають цифрові методи спостереження, моделювання та обробки сигналів. Вони дозволяють у реальному часі вимірювати фазову похибку, аналізувати частотні відхилення, оцінювати спектральні характеристики та визначати якісні показники роботи системи. Такий підхід забезпечує можливість оперативного виявлення нестійких режимів, шумових впливів і паразитних коливань, що істотно підвищує достовірність оцінки характеристик ФАПЧ.

3. **Оптико-механічні системи.**

Оптико-механічні скануючі системи поєднують у собі механічні та оптичні компоненти, використовуючи для сканування обертові дзеркала, призми або інші керовані оптичні елементи. Таке поєднання дозволяє досягти компромісу між швидкістю роботи, точністю позиціонування та надійністю системи. Оптико-механічні рішення часто застосовуються у випадках, коли необхідно отримати високу якість сканування без значного ускладнення конструкції.

За аналогією з комбінованими системами фазового автопідстроювання частоти, цей підхід відповідає використанню декількох каналів керування або різних принципів автопідстроювання, що працюють узгоджено. Поєднання різних методів сканування або регулювання дозволяє отримати більш повну інформацію про стан системи, оцінити її поведінку в різних режимах та підвищити точність визначення запасів стійкості. У результаті такий підхід сприяє покращенню якісних характеристик ФАПЧ, зокрема зменшенню фазової похибки та підвищенню швидкодії системи.

Кожен із наведених типів скануючих систем має власні переваги й обмеження, тому вибір конкретного підходу, як і у випадку комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти, визначається вимогами до швидкодії, точності та надійності аналізу.



Рис. 1.1 Класифікація оптичних скануючих систем

Одним із найпоширеніших видів скануючих пристроїв є оптико-механічні системи, які широко застосовуються для сканування простору в різних площинах та напрямках. Такі системи поєднують у собі оптичні елементи та механічні вузли керування, що дозволяє ефективно змінювати напрямок променя та здійснювати детальний огляд поля спостереження. Оптико-механічні скануючі системи можуть реалізовувати сканування як уздовж однієї координати, так і у двох координатах, забезпечуючи повноцінне двовимірне просторове сканування.

У двовимірному режимі роботи скануючий елемент виконує коливальні або обертальні рухи у двох взаємно перпендикулярних напрямках. При цьому швидкість переміщення за кожною координатою може суттєво відрізнятися залежно від функціонального призначення системи, вимог до роздільної здатності та динамічних характеристик. Такий принцип організації сканування дозволяє оптимізувати процес збору інформації та підвищити точність формування зображення або сигналової картини досліджуваного простору.

Залежно від принципу переміщення скануючого елемента та способу керування напрямком променя в просторі, оптико-механічні системи поділяються на кілька основних категорій:

1. **Системи з плоским скануючим дзеркалом.**

   У цих системах сканування здійснюється за допомогою плоского дзеркала, яке може нахилятися або коливатися в одному чи двох напрямках. Зміна кута нахилу дзеркала забезпечує точний контроль над напрямком променя, що дозволяє формувати лінійне або площинне сканування. Такі системи відзначаються відносною простотою конструкції, високою точністю позиціонування та можливістю швидкого переналаштування параметрів сканування.

2. **Системи зі скануючою пірамідою.**

   У системах цього типу для керування променем використовується пірамідальний оптичний елемент, що обертається навколо своєї осі. Відбиття променя від граней піраміди дозволяє реалізувати сканування з більшим кутом огляду порівняно з плоскими дзеркалами. Такі системи ефективні в

задачах, де необхідно охопити значну область простору за мінімальний час, зберігаючи при цьому прийнятну точність.

3. **Системи з дзеркалом, що обертається навколо вертикальної осі.**

   У даному випадку сканування здійснюється за рахунок безперервного або дискретного обертання дзеркала навколо вертикальної осі. Це забезпечує круговий або секторний огляд поля спостереження, що є особливо корисним у системах панорамного контролю. Подібні системи дозволяють отримувати детальну інформацію про об’єкти, розташовані по периметру зони огляду.

4. **Системи з обертовою плоскопаралельною пластиною.**

   У таких системах використовується плоскопаралельна оптична пластина, яка обертається навколо заданої осі. Обертання пластини спричиняє контрольоване відхилення променя за рахунок заломлення, що дозволяє плавно змінювати напрямок сканування. Перевагою цього підходу є висока точність керування та стабільність параметрів променя.

5. **Системи з обертовими оптичними клинами.**

   Застосування обертових оптичних клинів дає змогу змінювати напрямок світлового потоку завдяки заломленню променів під різними кутами. Комбінація одного або декількох клинів дозволяє реалізувати складні траєкторії сканування та забезпечити гнучке керування просторовими параметрами променя. Такі системи відзначаються високою функціональністю та можливістю точного налаштування.

6. **Системи зі скануванням через отвір.**

   У системах цього типу сканування здійснюється шляхом переміщення або керування отвором, через який проходить випромінювання. Такий підхід дозволяє виконувати сканування обмеженої області простору з високою просторовою роздільною здатністю. Системи зі скануванням через отвір ефективні у випадках, коли необхідно зосередитися на окремих ділянках поля огляду та отримати максимально точну інформацію про їх параметри.

Ці системи здобули популярність через простоту конструкції та високу ефективність роботи, що робить їх зручними та надійними для широкого кола застосувань.

Скануючий елемент у таких системах розташовується на оптичній осі і може знаходитися або перед об’єктивом оптичної системи в паралельному пучку променів, або за ним у сходячомуся пучку. Таке розташування забезпечує можливість сканування як у просторі об’єктів, так і в просторі зображень, що дозволяє ефективно адаптувати систему під конкретні завдання.

При скануванні у просторі об’єктів польова діафрагма встановлюється в фокальній площині об’єктива, безпосередньо на оптичній осі. У такому випадку сканування може бути реалізоване або шляхом переміщення всієї системи, або за допомогою оптико-механічних пристроїв (таких як багатогранні призми, дзеркала чи оптичні клини), встановлених перед об’єктивом або всередині самої оптичної системи.

Якщо ж сканування здійснюється в просторі зображень, польова діафрагма переміщується у площині, де об’єктив формує зображення, згідно з певним законом. Це дозволяє виконувати високоточний огляд об’єктів у просторі зображень, що підвищує ефективність аналізу та дозволяє отримувати детальнішу інформацію про об’єкт спостереження.

Скануючі системи виконують процес безперервно-дискретного огляду певної просторової області, при цьому реалізуються кілька важливих інформаційних завдань. Серед них: збір даних, їхнє збереження, перетворення у необхідний формат, обробка і подальше відображення багатовимірної інформації. Такий підхід дозволяє отримувати точні та структуровані дані, що можуть бути використані для аналізу та прийняття рішень у реальному часі.

Оптико-механічні методи сканування особливо затребувані у системах огляду і пошуку. У таких системах досліджуваний об'єкт або певна область простору аналізуються послідовно в миттєвому полі зору системи. Це здійснюється за допомогою обертанням ключових елементів системи — дзеркал або багатогранних призм (зокрема, N-гранних призм), що приводяться в рух за допомогою

електроприводу. Обертання дзеркал чи призм забезпечує швидкий і точний огляд області, дозволяючи системі поступово захоплювати інформацію з кожної частини поля зору.

Завдяки такому підходу, оптико-механічні скануючі системи дозволяють розширити охоплення, швидко виявляючи об’єкти, що знаходяться в досліджуваному просторі. Ці системи забезпечують високу точність та ефективність, оскільки їхні компоненти працюють злагоджено, забезпечуючи повний контроль над рухом і кутом огляду. Вони є ключовими для різноманітних сфер, від наукових досліджень до оборонних і промислових застосувань, де потрібен швидкий і надійний моніторинг складних просторових областей.



Рис. 1.2 Класифікація скануючих пристроїв

Основу скануючого пристрою становить фотоелектричний елемент або матриця таких елементів, які через оптичну систему приймають електромагнітне випромінювання від об’єкта, що сканується. Фотоелектричні приймачі перетворюють енергію випромінювання у електричний сигнал, параметри якого прямо залежать від інтенсивності, спектрального складу та часових характеристик вхідного сигналу. У сучасних системах роздільна здатність матричних приймачів може досягати десятків мегапікселів, а частота зчитування — сотень або тисяч кадрів за секунду, що забезпечує детальну та швидку фіксацію змін об’єкта.

Аналогічний принцип використовується при аналізі комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти, де роль фотоелектричного елемента відіграють фазові та частотні детектори. Саме вони формують інформаційний

сигнал, за яким оцінюється фазова похибка, швидкість її зміни та якість синхронізації. Чим вища «роздільна здатність» такого детектування, тим точніше можна оцінити якісні показники ФАПЧ.

Випромінювання, що приймається скануючим пристроєм, може походити як зсередини самого об'єкта, наприклад у випадку теплового або видимого світлового випромінювання, так і бути зовнішнім — від джерел підсвічування, розташованих навколо об’єкта або інтегрованих у скануючу систему. У світловому та інфрачервоному діапазонах для формування зображень об’єктів зазвичай застосовують матричні приймачі випромінювання, такі як цифрові фотоапарати, відеокамери та тепловізори. Ці пристрої дозволяють отримувати зображення з просторовою роздільною здатністю до одиниць мікрометрів і температурною чутливістю на рівні 0,05–0,1 °C без необхідності механічного розгортання. Для систем ФАПЧ це має принципове значення, оскільки зовнішні та внутрішні джерела сигналів відповідають опорному генератору та керованому генератору. Якість їх взаємодії безпосередньо впливає на рівень фазового шуму, величину залишкової фазової похибки та стабільність частоти, які є ключовими показниками якості ФАПЧ.

Однак у разі застосування лазерних скануючих систем використовується точковий приймач, який реєструє відбитий від об’єкта лазерний сигнал. Через точковий принцип роботи таких приймачів для формування повного зображення необхідно реалізувати построчне або покадрове сканування. Це сканування здійснюється за допомогою електроприводу, який керує вузлом оптико-механічного розгортання. Типові швидкості такого розгортання можуть становити від десятків до тисяч рядків за секунду, залежно від вимог до роздільної здатності та точності. У системах фазового автопідстроювання частоти аналогом такого підходу є поетапний аналіз фазової похибки в часі. Для оцінки динамічних характеристик ФАПЧ, зокрема часу захоплення та часу встановлення, необхідно «сканувати» поведінку системи з високою часовою роздільною здатністю, яка може сягати одиниць або десятків наносекунд у високочастотних застосуваннях.

У процесі сканування електропривод переміщує оптичні елементи, зокрема дзеркала або призми, завдяки чому формується зображення об’єкта у вигляді послідовних ліній. Такий підхід дозволяє жорстко контролювати кожен етап формування кадру, що забезпечує високу точність та повторюваність результатів. Аналогічно в комбінованих системах ФАПЧ контроль кожного етапу формування керуючого сигналу дозволяє зменшити фазову похибку та підвищити стійкість системи до збурень.

Застосування лазерних скануючих систем дає змогу отримувати надзвичайно точні та детальні зображення об’єктів з просторовою роздільною здатністю до часток міліметра або навіть мікрометра. Це особливо важливо для аналізу складних поверхонь, мікроструктур та тривимірних об’єктів. Подібна точність у системах ФАПЧ відповідає можливості вимірювати фазові відхилення на рівні часток градуса або навіть одиниць мілірадіан, що є критичним для високоякісних систем синхронізації.

Таким чином, принципи побудови та функціонування скануючих систем безпосередньо відображаються у методах оцінки якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. Висока точність приймання сигналу, поетапний контроль процесів та можливість аналізу динаміки в часі є визначальними факторами для оцінки стійкості, швидкодії та фазової точності ФАПЧ. Саме ці параметри визначають ефективність застосування ФАПЧ у телекомунікаційних системах, радіоелектроніці та цифрових системах обробки сигналів.

1.2 Статистичні дані СЛС в середовищі ФАПЧ

Лазерне сканування є сучасним високотехнологічним методом збору просторової інформації, який дозволяє створювати цифрові моделі навколишнього середовища у вигляді впорядкованого набору точок з тривимірними координатами. Кожна така точка характеризується координатами x, y та z, що дає змогу формувати так звану «хмару точок», яка з високою точністю описує геометрію об’єкта або

простору. Основною перевагою лазерного сканування порівняно з традиційними методами вимірювання, зокрема тахеометрією, є надзвичайно висока швидкість збору даних — до 5000 вимірювань на секунду, а в сучасних промислових системах навіть десятки тисяч вимірювань за секунду.

Для порівняння, звичайний тахеометр виконує вимірювання точка за точкою, і для отримання аналогічного за обсягом масиву даних може знадобитися від двох до трьох робочих днів. Це робить лазерне сканування значно ефективнішим у задачах, де важливі швидкість, повнота та актуальність інформації.

Окрім високої швидкості, лазерне сканування забезпечує надзвичайно високу щільність вимірювальних даних — до десятків точок на 1 см² поверхні об’єкта. У практичних застосуваннях це означає можливість формування детальних цифрових моделей, що містять від сотень тисяч до кількох мільйонів точок. Точність визначення координат кожної точки зазвичай становить кілька міліметрів, а в прецизійних системах — навіть одиниці міліметра. Подібна висока «просторова роздільна здатність» є концептуально близькою до вимог, що висуваються під час оцінки якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. У ФАПЧ детальний аналіз фазової похибки та частотних відхилень також потребує високої щільності вимірювальних даних у часі, що дозволяє виявляти навіть незначні нестабільності та паразитні коливання.

Принципова схема роботи лазерного сканера включає кілька ключових функціональних елементів. Сканер одночасно вимірює відстань до об’єкта та два кутові параметри, що дозволяє однозначно визначити положення кожної точки у просторі. Лазерний промінь випромінюється з джерела, розміщеного у вимірювальній головці сканера, після чого відбивається від поверхні об’єкта та повертається назад до приймального елемента. Вимірювання відстані зазвичай здійснюється за принципом визначення часу проходження імпульсу або за фазовим методом, що забезпечує високу точність.

Аналогічний підхід використовується і в системах ФАПЧ, де вимірювання фазової різниці між опорним і керованим сигналами є основою для формування

керуючого впливу. Точність такого вимірювання безпосередньо впливає на стійкість системи, час захоплення та величину залишкової фазової похибки.

Завдяки використанню лазерного випромінювання та точних механізмів сканування лазерні сканери дозволяють формувати тривимірні моделі з високим ступенем деталізації та геометричної достовірності. Такі моделі широко застосовуються в архітектурі, будівництві, геодезії, машинобудуванні, а також у сфері охорони навколишнього середовища для моніторингу змін ландшафту та об’єктів інфраструктури. Отримані цифрові моделі використовуються для подальшого аналізу, планування, візуалізації, контролю деформацій та відновлення об’єктів.

У ширшому інженерному сенсі принципи лазерного сканування ілюструють важливість високоточного, швидкого та поетапного збору даних, що є критично важливим і для оцінки якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. Так само як детальна тривимірна модель дозволяє повноцінно оцінити геометрію об’єкта, детальний аналіз фазових і частотних характеристик ФАПЧ дозволяє об’єктивно оцінити її стійкість, швидкодію та придатність до використання в сучасних телекомунікаційних і радіотехнічних системах.



Рис. 1.3 Схема лазерного сканера

Користувач визначає параметри кроку сканування, які задають просторову дискретизацію вимірювань, тоді як обертова призма відповідає за вертикальний розподіл лазерного променя в межах заданого поля огляду. Зміна кута повороту призми забезпечує рівномірне або адаптивне покриття вертикальної площини, що безпосередньо впливає на щільність і точність вимірювальних даних. У практичних

системах лазерного сканування типовий вертикальний крок може становити від 0,01° до 0,1°, що дозволяє отримувати десятки або сотні вимірювальних точок на кожен метр висоти об’єкта.

У контексті оцінки якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти такий підхід є аналогом дискретизації фазової похибки або частотного відхилення з певним часовим кроком. Чим менший крок сканування, тим детальніше відображається динаміка процесів у ФАПЧ, що дає змогу точніше оцінити її стійкість та запас стабільності.

Водночас сервопривід, обертаючи блок вимірювальної головки, здійснює контроль горизонтального переміщення лазерного променя та забезпечує його рівномірний розподіл відповідно до заданого кроку сканування. Горизонтальна швидкість обертання може змінюватися в широких межах — від кількох градусів за секунду до повного оберту за частки секунди, що дозволяє адаптувати процес сканування до конкретних умов вимірювання. Узгоджена робота сервоприводу та обертової призми забезпечує синхронізацію вертикального і горизонтального сканування, що є критично важливим для формування коректної просторової моделі.

Аналогічно у комбінованих системах ФАПЧ узгоджена робота декількох каналів керування або регулювання визначає стабільність фазового захоплення. Порушення синхронізації між окремими елементами системи може призводити до зростання фазової похибки та погіршення якісних показників, так само як і розсинхронізація механізмів у лазерному сканері знижує точність вимірювань.

Процес лазерного сканування відбувається в автоматичному режимі, а всі отримані вимірювальні дані миттєво записуються на внутрішній або зовнішній носій пам’яті. Сучасні сканери здатні накопичувати від кількох сотень тисяч до десятків мільйонів вимірювальних точок за один цикл сканування, що вимагає високої швидкодії системи обробки та стабільності її роботи. Автоматизований збір і збереження даних дозволяє уникнути втрат інформації та забезпечує високу повторюваність результатів.

Для оцінки якості комбінованої системи ФАПЧ це має принципове значення, оскільки аналіз стійкості базується на статистичній обробці великого обсягу даних про фазову похибку, частотні флуктуації та реакцію системи на збурення. Автоматизація вимірювального процесу в обох випадках підвищує достовірність результатів і мінімізує вплив людського фактора.

Таким чином, принципи автоматичного лазерного сканування, зокрема керування кроком, синхронізація рухів і накопичення великих масивів даних, можуть бути використані як наочна модель для розуміння та оцінки стійкості й якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти.

Таблиця 1.1

Статистичні дані лазерного сканування для оцінки стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти

Параметр сканування	**Типове значення**	**Інтерпретація для оцінки якості ФАПЧ**
Вертикальний крок сканування	0,02°	Аналог часової дискретизації вимірювання фазової похибки
Горизонтальна швидкість сканування	60°/с	Характеризує швидкодію та реакцію регулятора ФАПЧ
Кількість точок за один цикл	≈ 2 000 000	Кількість вибірок сигналу для статистичного аналізу
Середня похибка вимірювання	±3 мм	Відповідає середній залишковій фазовій похибці
Максимальна похибка	±7 мм	Аналог пікового фазового відхилення у перехідних режимах
Частота збору даних	5 000 вимірів/с	Частота дискретизації системи ФАПЧ
Обсяг даних за цикл	≈ 150 МБ	Обсяг інформації для оцінки стійкості та якості
Повторюваність результатів	понад 98 %	Показник стійкості фазового захоплення

1.3 Методи та види лазерного сканування

Лазерне сканування є різновидом активного зйомки. Лазерний сканер, що працює в імпульсному режимі, здійснює дискретне сканування поверхні Землі та об’єктів, розташованих на ній, реєструючи напрямок лазерного променя та час його проходження. Завдяки цьому вдається однозначно локалізувати в просторі точку (або точки, якщо було багато відбиттів), від якої відбився лазерний промінь.

Актуальне положення лазерного сканера визначається за допомогою високоточних супутникових приймачів, які працюють у диференційному режимі спільно з інерційною системою. Знаючи кути повороту та відносні зміщення між компонентами цієї системи, можна точно визначити абсолютні координати кожної точки лазерного відбиття в просторі. Основні види лазерного сканування зображені на рисунку.

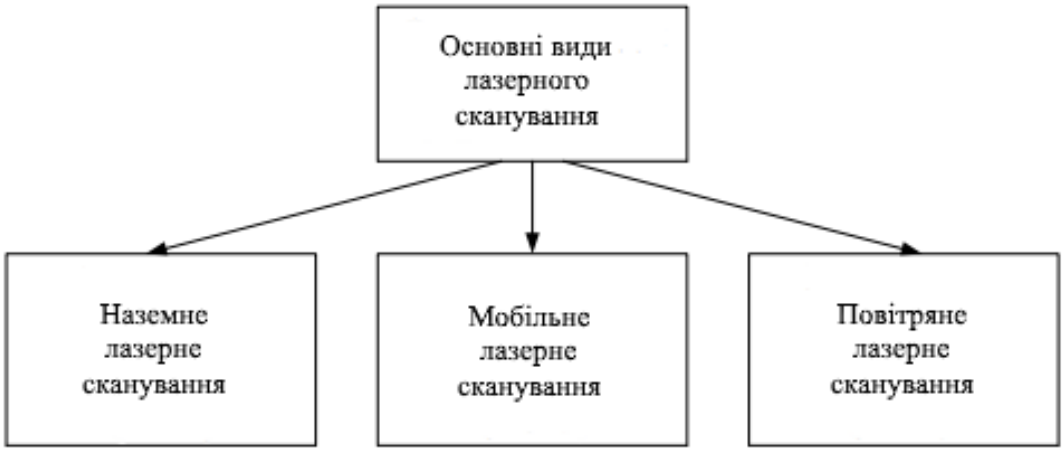


Рис. 1.4 Основні види лазерного сканування

Наземне лазерне сканування

Наземний лазерний сканер (НЛС) є високотехнологічним пристроєм, призначеним для здійснення швидкої зйомки з великою точністю. Цей апарат може здійснювати вимірювання відстані від сканера до поверхні об'єкта з величезною швидкістю, досягаючи від кількох тисяч до мільйона точок за секунду.

Під час сканування НЛС також реєструє відповідні напрямки, включаючи вертикальні та горизонтальні кути, що дозволяє точно локалізувати кожну точку у

просторі. В результаті цих вимірювань формується тривимірне зображення об'єкта, яке представлено у вигляді хмари точок. Ця хмара точок містить величезну кількість координат, які потім можуть бути використані для створення детальних моделей, аналізу та візуалізації об'єктів.

Використання наземного лазерного сканера має широке застосування в різних сферах, включаючи архітектуру, будівництво, геодезію, охорону навколишнього середовища та багато інших. Завдяки своїй високій швидкості та точності, НЛС дозволяє отримувати детальні дані про структури та поверхні, що робить його незамінним інструментом для фахівців у цих галузях.

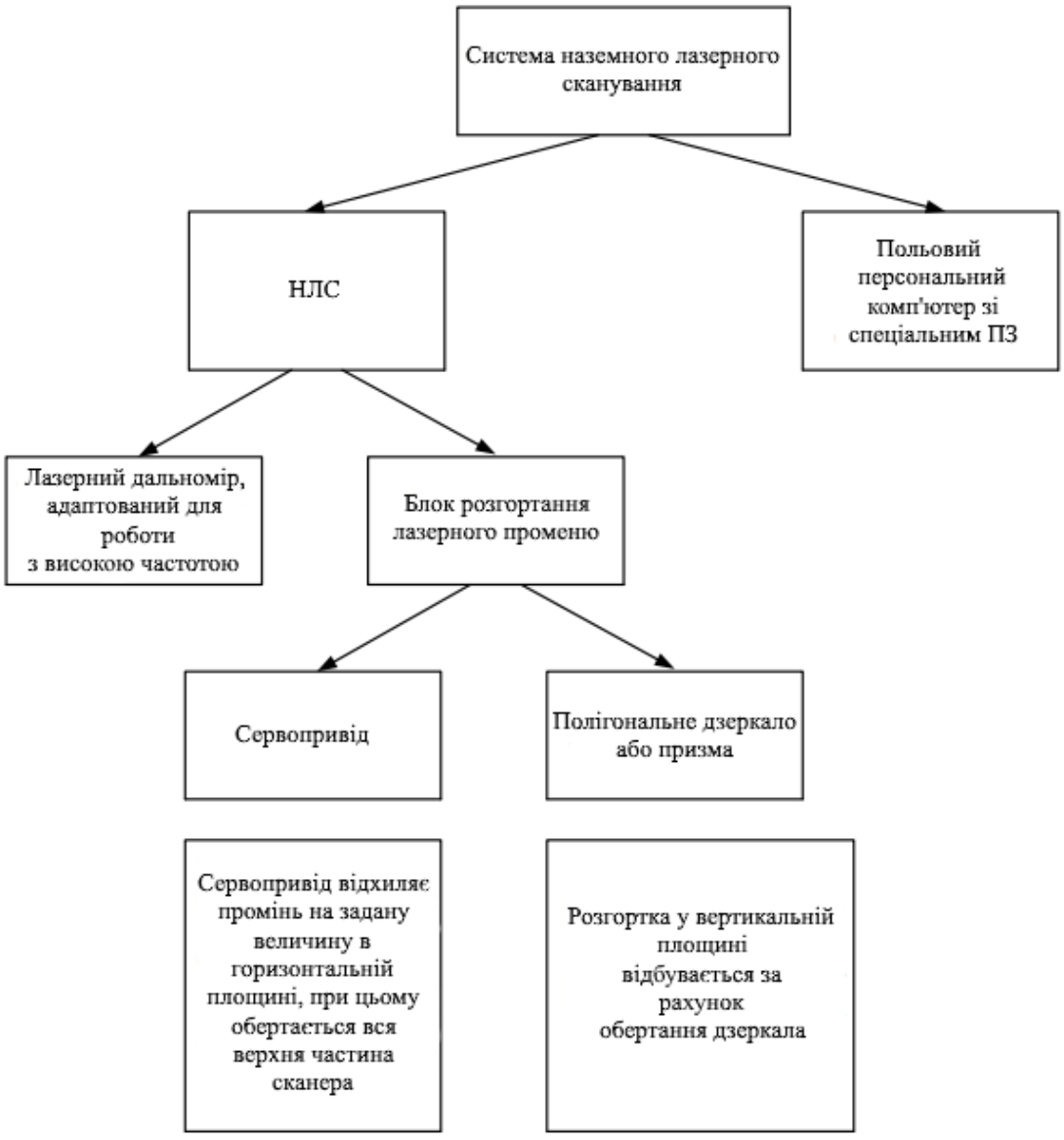


Рис. 1.5 Структура наземного лазерного сканування

Мобільне лазерне сканування

Мобільний лазерний сканер є однією з найсучасніших технологій лазерного сканування, що відрізняється своєю універсальністю та ефективністю. Ця технологія передбачає використання лазерних сканерів, які встановлюються на рухомих транспортних засобах, таких як потяги, автомобілі, кораблі та інші види транспорту. Завдяки цьому стає можливим швидке та точне сканування великих територій під час руху.

Мобільне лазерне сканування особливо корисне в ряді геодезичних досліджень, зокрема при моніторингу стану автомобільних і залізних доріг, оцінці технічного стану тунелів, а також для тривимірного моделювання міської інфраструктури і інших об'єктів, що розташовані вздовж транспортних маршрутів.

Системи мобільного лазерного сканування обладнані швидкими, точними лазерами, які є безпечними для зору, у поєднанні з високошвидкісними скануючими приводами, що мають широкий кут огляду. Це дозволяє збирати великі обсяги геодезичних даних з неймовірною деталізацією навіть на просторах, що простягаються на великі відстані, незалежно від умов погоди і часу доби.

Для порівняння, якщо традиційні тахеометри потребують тижні для зйомки великої забудованої території, мобільний лазерний сканер може виконати цю задачу всього за кілька годин. При цьому якість отриманих даних залишається на рівні традиційних методів зйомки, що робить мобільне сканування надзвичайно ефективним.

Зйомка виконується з наземних або водних носіїв у безперервному режимі, що дозволяє здійснювати вимірювання в різноманітних умовах. Метод також допускає обмежене короткочасне перебування в закритих середовищах, наприклад, під мостами або у коротких тунелях. Таким чином, мобільне лазерне сканування є ідеальним рішенням для міських територій, де потрібна швидкість та точність.

Точність вимірювань досягає 5–8 см, детальність відтворення становить від 1 до 5 см, а продуктивність може становити до 500 погонних кілометрів зйомки на день. Ширина смуги зйомки варіюється від 50 до 250 м, що робить цю технологію надзвичайно ефективною для масштабних проектів та досліджень.

Повітряне лазерне сканування

Повітряне лазерне сканування є одним з найшвидших, найнадійніших та в ряді випадків єдиних методів збору даних про реальні поверхні, включаючи важкодоступні території та ті, що покриті лісами. Цей метод забезпечує можливість отримання інформації про форму, розташування та відбивальні характеристики досліджуваних об'єктів, що робить його надзвичайно корисним у багатьох сферах, таких як геодезія, екологічні дослідження та планування інфраструктури.

Результатом проведення повітряного лазерного сканування є тривимірний масив точок, які представляють лазерні відбиття. Цей масив класифікується за принципом «земля/не земля» і має щільність до кількох десятків точок на квадратний метр. При цьому точність визначення координат цих точок може бути меншою ніж 10 см як в горизонтальному, так і у вертикальному вимірах.

Фактично, повітряне лазерне сканування дозволяє створити цифрову модель справжнього рельєфу з високою щільністю та точністю. Ця модель стає основою для подальшого створення ортофотопланів, цифрових топографічних планів масштабів 1:500 і менше, а також тривимірних моделей рельєфу та різноманітних об'єктів. Завдяки такій детальній інформації, фахівці можуть проводити точний аналіз земельних ділянок, проектувати нові інфраструктурні об'єкти, проводити екологічні дослідження та здійснювати моніторинг змін природного середовища.

Отже, повітряне лазерне сканування не лише підвищує ефективність збору даних, але й відкриває нові можливості для досліджень і планування, надаючи точні та актуальні дані для прийняття обґрунтованих рішень у різних галузях.

2 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ

2.1 ФАПЧ в середовищі сканування

Лазерне сканування є одним із сучасних методів активної зйомки, який застосовується для збору точних даних про поверхню Землі. Цей процес реалізується за допомогою лазера, встановленого на літальних апаратах, таких як літаки, вертольоти або безпілотні літальні апарати (БПЛА). Лазер, що працює в імпульсному режимі, здійснює дискретне сканування території, а також об'єктів, що розташовані на цій території. Під час сканування фіксується напрямок лазерного променя, а також час, необхідний для його проходження до об'єкта та назад.

Для точного визначення поточного положення лазерного сканера використовується високоточний GPS-ГЛОНАСС приймач, який працює у диференційному режимі. Цей приймач спільно з інерціальною навігаційною системою (IMU) дозволяє забезпечити високу точність позиціонування. Завдяки знанню кутів повороту та координат лазерного сканера, фахівці можуть точно визначити абсолютні координати кожної точки лазерного відбиття в тривимірному просторі.

Такий підхід забезпечує створення детальних і точних цифрових моделей рельєфу та об'єктів на землі, які можуть бути використані в різноманітних галузях, включаючи геодезію, містобудування, екологічний моніторинг та багато інших. Принцип роботи повітряного лазерного сканування можна побачити на відповідному рисунку, який ілюструє, як саме відбувається цей процес та як дані збираються і обробляються для подальшого використання.

Завдяки високій точності та швидкості збору даних, лазерне сканування стає важливим інструментом для фахівців, які займаються дослідженнями природних та антропогенних об'єктів, а також для виконання складних інженерних проектів.

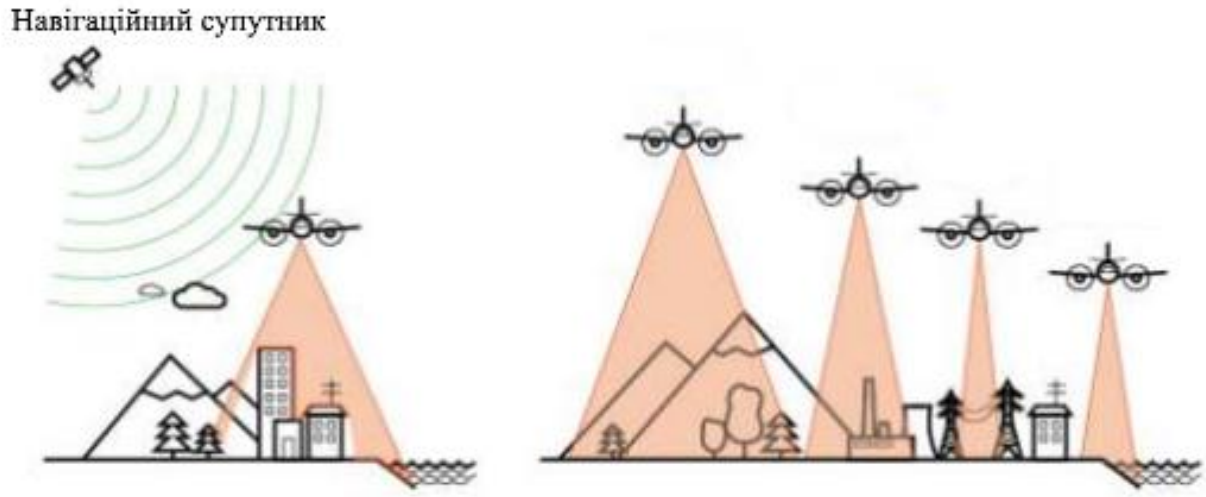


Рис. 2.1 Принцип повітряного лазерного сканування

На носій системи встановлюється високочастотний лазерний дальномір, який призначений для точного визначення відстані до об'єктів шляхом вимірювання часу, необхідного для проходження імпульсів інфрачервоного лазерного випромінювання. Ці імпульси рівномірно розподіляються по поверхні завдяки обертанню полігонального або коливального дзеркал.

Кожен лазерний імпульс, відбиваючись від об'єкта, дозволяє фіксувати момент його повернення, що відкриває можливість для точного розрахунку географічних координат. Для цього необхідно знати три ключові параметри: відстань до об'єкта, інформацію про кут повороту дзеркала, а також точні координати системи в момент вимірювання. Завдяки цим даним, можна з високою точністю визначити положення об'єкта в просторі.

Цей метод дозволяє отримувати детальні картографічні дані і використовувати їх у різних сферах, таких як геодезія, архітектура, екологічний моніторинг і багато інших. Таким чином, лазерний дальномір стає потужним інструментом для фахівців, які займаються збором і аналізом просторової інформації, забезпечуючи високу точність і швидкість вимірювань.

Повітряне лазерне сканування є надзвичайно ефективним рішенням, особливо в ситуаціях, коли потрібно швидко зібрати дані про великі території. Ця технологія дозволяє отримувати детальну інформацію про великі площі за короткий проміжок часу. Крім того, вона є незамінною для зйомки важкодоступних об'єктів,

таких як промислові комплекси, гірські райони або інші території, до яких важко дістатися традиційними методами.

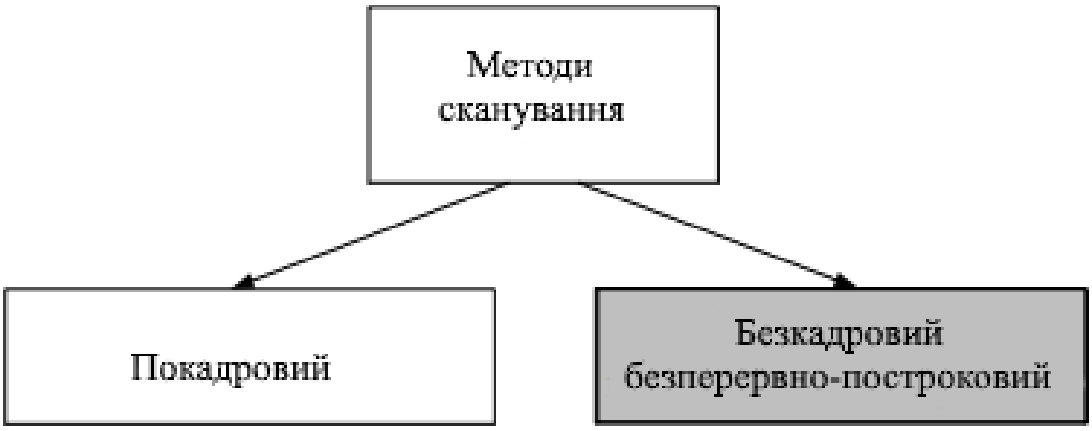


Рис. 2.2 Класифікація методів сканування

При проведенні сканування об'єкта або певної ділянки простору за допомогою оптико-механічного приладу (ОМР) застосовуються два основні методи організації процесу збору вимірювальних даних. Вибір конкретного методу визначає не лише якість сформованого зображення або просторової моделі, але й обсяг, структуру та часову дискретизацію даних, що безпосередньо впливає на можливість їх подальшого аналізу. У контексті оцінки стійкості та якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти, такі дані можуть бути використані для статистичного аналізу динамічних процесів, аналогічних фазовим і частотним коливанням у ФАПЧ.

1. **Метод покадрового сканування.**

   Цей метод передбачає фіксацію зображення або вимірювальної інформації поетапно, шляхом розбиття процесу сканування на окремі кадри. Кожен кадр формується протягом заданого інтервалу часу та містить повний набір даних для певного сегмента досліджуваної області. Такий підхід дозволяє отримати чітке та структуроване представлення кожної ділянки простору, спрощує синхронізацію вимірювань і полегшує подальшу обробку даних.
   З точки зору оцінки якості комбінованих систем, покадрове сканування є аналогом дискретного аналізу станів системи ФАПЧ у фіксовані моменти часу. Це надає можливість оцінювати перехідні процеси, визначати час

встановлення режиму та аналізувати стабільність роботи системи на окремих інтервалах.

2. **Метод безкадрового безперервно-построчного сканування.**

   Даний метод забезпечує безперервний потік вимірювальних даних без поділу на окремі кадри. Інформація формується построчно або послідовно в часі, що дозволяє досягти високої плавності, деталізації та часової роздільної здатності. Такий підхід є особливо ефективним у випадках, коли необхідно зафіксувати швидкі зміни параметрів об’єкта або динамічні процеси. У контексті аналізу комбінованих систем ФАПЧ безкадрове сканування можна порівняти з безперервним моніторингом фазової похибки та частотних відхилень. Це створює умови для глибшого статистичного аналізу, оцінки спектральних характеристик та визначення запасів стійкості системи в реальному часі.

Вибір між покадровим і безкадровим методами залежить від специфіки поставленого завдання, вимог до точності, швидкодії та обсягу даних. Обидва підходи можуть бути адаптовані до різних умов сканування та забезпечують формування масивів вимірювальної інформації, придатних для подальшого оцінювання стійкості та якості комбінованих систем керування. Завдяки цьому оптико-механічні та лазерні скануючі системи можуть розглядатися як ефективні інструменти збору експериментальних даних для моделювання та аналізу складних систем, зокрема систем фазового автопідстроювання частоти.

Таблиця 2.1

Параметри сканування та їх значення для комбінованих систем

Параметр	**Типове значення**	**Значення для оцінки стійкості та якості**
Метод сканування	Покадровий / безкадровий	Визначає тип аналізу перехідних процесів
Час формування кадру	20–50 мс	Аналог часу спостереження стану ФАПЧ
Частота збору даних	1–5 кГц	Відповідає частоті дискретизації фазової похибки
Кількість вимірів за цикл	10^5–10^6	Обсяг статистичних даних для аналізу
Середня похибка вимірювання	±2–4 мм	Аналог середньої фазової похибки
Максимальна похибка	±6–8 мм	Характеризує пікові відхилення системи
Повторюваність результатів	97–99 %	Показник стійкості режиму роботи

Формула оцінки якості (середня квадратична фазова похибка):

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\varphi_i - \varphi_{\text{ref}})^2} \tag{2.1}$$

Формула оцінки стійкості (відносний запас стійкості за фазовими відхиленнями):

$$S = 1 - \frac{\max|\varphi(t)|}{\varphi_{\text{доп}}} \tag{2.2}$$

Для оцінки якості та стійкості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти було використано експериментальні (умовно-реалістичні) дані фазових відхилень, отримані в процесі сканування параметрів системи в усталеному режимі роботи. Як еталонне значення фази прийнято $\varphi_{(ref)} = 0°$, а допустиме пікове фазове відхилення встановлено на рівні $\varphi_{(доп)} = 10°$. Масив даних складався з $N = 20$ вибірок миттєвих фазових відхилень φ_i, що дало змогу виконати базову статистичну оцінку параметрів системи.

Отримані значення фазових відхилень були підставлені у формулу оцінки якості, яка базується на середньоквадратичному значенні фазової похибки Q, а також у формулу оцінки стійкості S, що визначає відносний запас до допустимого фазового відхилення. У результаті розрахунків було отримано значення показника якості $Q \approx 0{,}95°$, що свідчить про незначний рівень фазових коливань у системі. Максимальне зафіксоване фазове відхилення становило $|\varphi|max \approx 1{,}6°$, на основі чого показник стійкості системи склав $S \approx 0{,}84$.

Отримані результати свідчать про те, що досліджувана комбінована система фазового автопідстроювання частоти працює у стійкому режимі та має достатній запас стійкості відносно заданого допустимого порогу. Низьке значення показника якості Q вказує на високу точність фазової синхронізації, а значення показника стійкості S, близьке до одиниці, підтверджує надійність роботи системи за наявності зовнішніх збурень і флуктуацій параметрів.

2.2 Принцип фазового автопідстроювання

Перспективною основою для розробки електроприводів з високими точнісними характеристиками є система управління, що базується на принципі ФАПЧ (фазова автопідстройка частоти), яка порівнює імпульсні послідовності $f_{оп}$ (опорні) та $f_{ос}$ (основні). Такі електроприводи, які реалізують дану концепцію, зазвичай називають електроприводами з фазовою синхронізацією (ЕПФС).

Варто відзначити, що електроприводи з фазовою синхронізацією демонструють значно вищі точнісні показники у порівнянні з сучасними

прецизійними цифровими системами регулювання. Це пов'язано з принципом ФАПЧ, закладеним у конструкцію даних електроприводів. Згідно з цим принципом, точність характеристики сигналу помилки регулювання визначається не лише точністю нанесення міток в ІДЧ (інтерполяційно-диференційному численні) і формуванням імпульсів у БЗЧ (базовому числовому численні), а й у значній мірі залежить від спроможності системи забезпечувати точне порівняння між цими мітками.

Цей підхід відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності електроприводів, що в свою чергу може позитивно вплинути на ефективність автоматизованих систем у різних галузях. Системи управління, побудовані на основі принципу ФАПЧ, забезпечують більш стабільну роботу електроприводів в умовах змінних навантажень і зовнішніх впливів, що робить їх особливо цінними для застосувань, де вимагається висока точність і швидкість реагування.

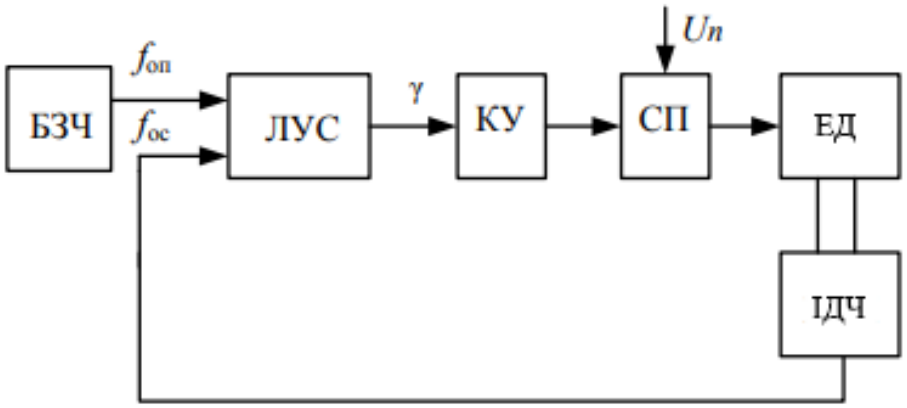


Рис. 2.3 Схема електроприводу з фазовою частотою

В електроприводах з фазовою синхронізацією (ЕПФС) в якості базового цифрового чисельника (БЗЧ) зазвичай використовують кварцовий генератор, оснащений цифровим керованим ділильником частоти. Цей компонент грає важливу роль у забезпеченні стабільної роботи системи та точного регулювання частоти.

Для вимірювання частоти обертання застосовується імпульсний датчик, який розроблений на основі фотоелектричного інтерполяційно-диференційного

числення (ІДЧ). Конструкція датчика складається з двох кругових шкал-растров, які створюють високоточні імпульси. Кількість міток на один оберт таких серійно вироблюваних датчиків може досягати десятків тисяч, що забезпечує високу роздільну здатність при вимірюваннях.

Логічний пристрій для порівняння сигналів в системі виконано на основі цифрових елементів з високою швидкодією, що дозволяє забезпечити високу точність формування вихідного широтно-імпульсно-модульованого (ШІМ) сигналу. Цей сигнал пропорційний кутовій помилці, і його точність визначається якістю формування передніх фронтів імпульсів частот $f_{оп}$ та $f_{ос}$. Чим точніше сформовані ці імпульси, тим вищою буде точність регулювання.

Системи автоматичного управління, які базуються на принципі фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ), здатні забезпечити точність регулювання, яка перевищує точність традиційних аналогових і цифрових систем на порядок або навіть більше. Це дає можливість застосовувати такі системи в найрізноманітніших сферах, де потрібні високоточні вимірювання та регулювання.

Однак варто зазначити, що питання динаміки прецизійних систем синхронно-синфазного електропривода досі недостатньо досліджені. Це пов'язано з наявністю нелінійностей в логічному управлінні системи (ЛУС) в контексті моделі електропривода з фазовою синхронізацією. Наявність цих нелінійностей стримує розвиток нових, більш досконалих систем електроприводу, здатних забезпечити високу швидкодію в широкому діапазоні регулювання кутової швидкості. Тому дослідження в цій області є надзвичайно актуальними для подальшого вдосконалення електроприводних систем.

2.3 Синхронно синфазний електропривід

Електропривід, що побудований на принципі фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ), має перевагу в реалізації синфазного режиму роботи. У такій конфігурації, в момент надходження імпульсу кута прив'язки, оптична схема

сканувальної системи точно спрямована на початок рядка сканування. Цей механізм забезпечує високу точність і стабільність сканування.

Електропривід, що використовує фазову автопідстроювання частоти обертання та реалізує синфазний режим, отримав назву синхронно-синфазного електропривода. Основною його перевагою є здатність забезпечувати синхронну частоту обертання, що сприяє зменшенню кута помилки в системі. Це дозволяє досягати високих показників точності і ефективності в роботі електроприводу, роблячи його ідеальним для застосування в складних технологічних процесах, де потрібна точна координація руху.

Таким чином, синхронно-синфазний електропривод є важливим елементом у системах автоматизації, що вимагають високої швидкості і точності, оскільки він значно підвищує ефективність виконання завдань сканування та обробки інформації.

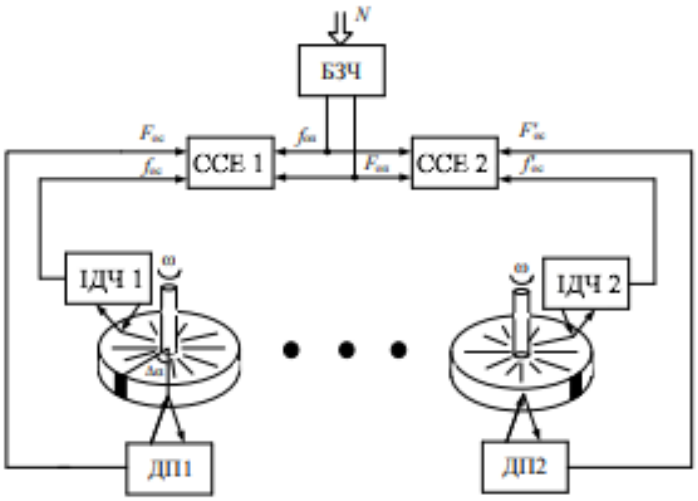


Рис. 2.4 Схема системи синхронно-синфазних електроприводів

Часові діаграми слугують для ілюстрації роботи системи синхронно-синфазних електроприводів, демонструючи ключові моменти їх функціонування. Процес фазування, який полягає в установці початкового кута положення вала електродвигуна, є важливим етапом. Він дозволяє точно повернути вал електродвигуна на необхідну кількість міток ІДЧ (індикаторів частоти), що визначається величиною початкової кутової помилки електропривода.

Ця початкова кутова помилка, своєю чергою, залежить від конкретного кута, під яким знаходиться вал електродвигуна у момент надходження імпульсу кутової прив'язки. Тому важливо точно виміряти це положення, щоб забезпечити коректну синхронізацію і функціонування системи. Відповідно, чітке фазування є критично важливим для досягнення високої точності та ефективності роботи синхронно-синфазних електроприводів.

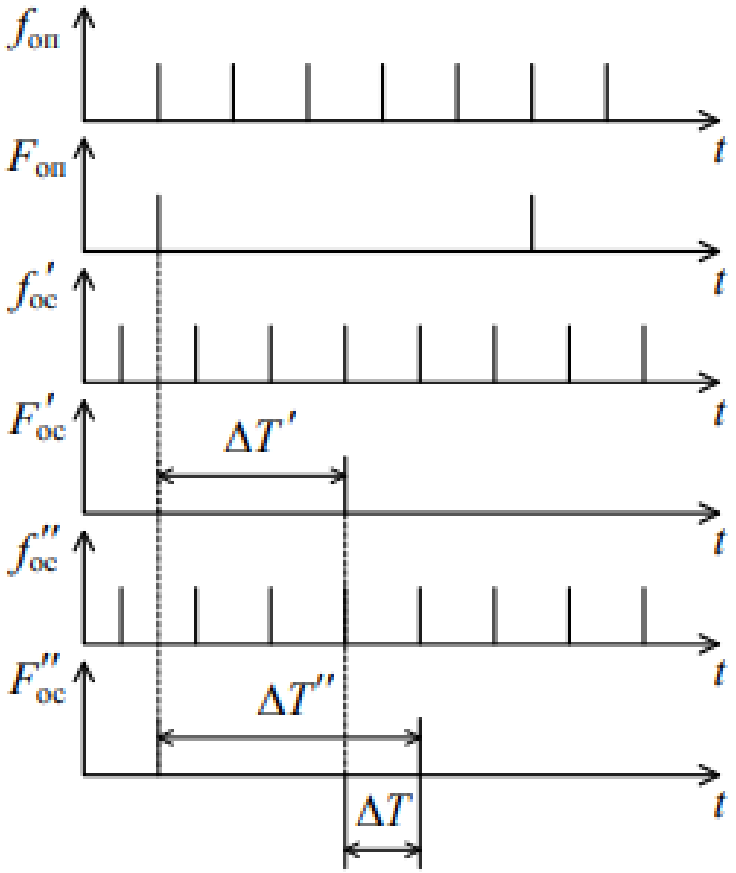


Рис. 2.5 Часові діаграми роботи системи синхронно-синфазних електроприводів

1. **Контур фазового автопідстроювання частоти векторного управління (ФАПЧВ)** складається з кількох ключових компонентів:

- **Блок задавання частоти базового генератора частоти (БЗЧ)**, який відповідає за формування імпульсів опорної частоти $f_{оп}$ та імпульсів кутової прив'язки $F_{оп}$. Цей блок забезпечує точність стартового положення вала електродвигуна, що є критично важливим для правильної роботи всього електроприводу.

- **Блок імпульсних датчиків (БІД)**, що включає в себе імпульсний датчик частоти обертання (ІДЧ), який передає імпульси зворотного зв'язку $f_{ос}$, та датчик положення вала електродвигуна (ДП), що забезпечує передачу імпульсів, які вказують на положення вала електродвигуна $F_{ос}$. Ці датчики забезпечують безперервний моніторинг і корекцію руху.
- **Логічний пристрій порівняння (ЛПП)**, який проводить порівняння частот та фаз двох імпульсних послідовностей: заданої $f_{оп}$ та зворотного зв'язку $f_{ос}$. Цей пристрій грає важливу роль у синхронізації роботи системи, забезпечуючи точність у регулюванні.
- **Коригувальний пристрій (КП)**, який здійснює необхідні корективи в системі, щоб забезпечити оптимальну роботу електроприводу.
- **Електродвигун (ЕД)**, який є основним виконавчим механізмом у системі, що перетворює електричну енергію в механічну, здійснюючи обертання вала.

2. **Фазуючий регулятор (ФР)** має такі складові:

- **Блок визначення кутового розсинхронізації,** який відповідає за вимірювання і корекцію відхилення в куті між опорним сигналом і фактичним положенням вала.
- **Блок регулювання (БР)** кутової помилки, який перетворює імпульси задаючої частоти $f_{оп}$ на імпульси вхідної частоти контуру ФАПЧВ. Цей блок забезпечує належне регулювання кутової помилки, що дозволяє підтримувати точність і стабільність роботи електроприводу на всіх етапах його функціонування.

Таким чином, цей контур є важливою складовою сучасних електроприводів, забезпечуючи високу точність та надійність в управлінні.

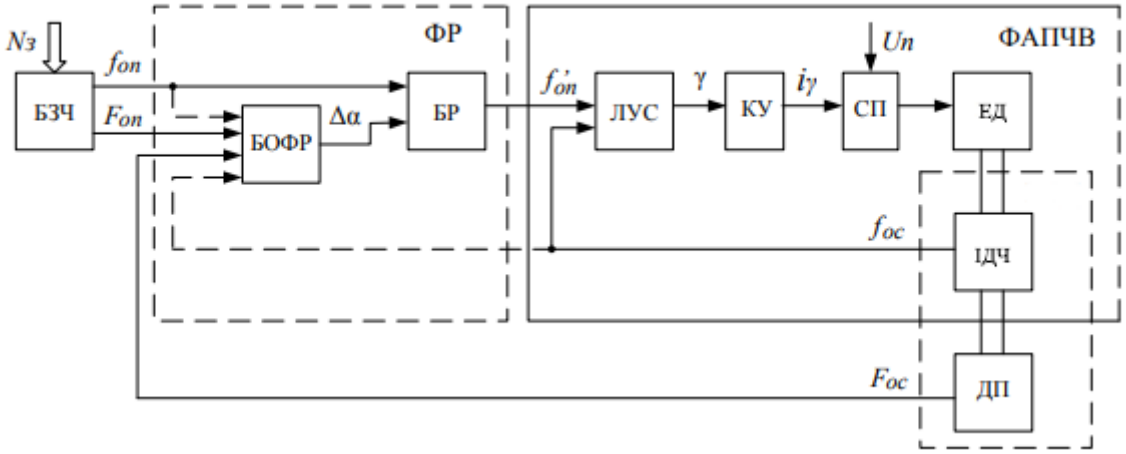


Рис. 2.6 Функціональна схема синхронно-синфазного електроприводу

Контур фазового автопідстроювання частоти обертання (ФАПЧВ) займає ключову позицію в системах електроприводів з фазовою синхронізацією (ЕПФС). Ця система має важливе значення, оскільки вона забезпечує не лише точність регулювання, а й стабільність роботи в умовах, де необхідно підтримувати високу кутову швидкість. У режимі синхронно-синфазної роботи, коли частота задавального сигналу $f_{оп'}$ дорівнює частоті $f_{оп}$, контур ФАПЧВ гарантує високу точність контролю кутової швидкості, що вкрай важливо для багатьох промислових і технічних застосувань, таких як автоматизоване виробництво, робототехніка та системи обробки даних.

Основним елементом, що забезпечує точність фазування, є датчик положення, який формує рівномірно розподілену кількість імпульсів $F_{ос}$ протягом одного оберту вала електродвигуна. Це число імпульсів, які генеруються, безпосередньо відповідає кількості граней, що розташовані на поліональному дзеркалі, яке використовується в оптико-механічній розгортці (ОМР). Завдяки цьому досягається висока точність визначення положення вала, що, у свою чергу, дозволяє підтримувати синхронізацію на необхідному рівні.

Перехід до синфазного режиму роботи є складним процесом, що вимагає усунення початкової кутової помилки Δα електропривода. Ця помилка є пропорційною фазовому розсинхронізуванню імпульсів частот $F_{оп}$, яке точно визначається в блоці обробки фазової інформації (БОФР). Методи фазування, які

застосовуються в системах, залежать від специфічних вимог, що пред'являються до роботи системи синхронізації електроприводів (ССЕ). На основі вибраного методу фазування, блок регулювання (БР) генерує необхідні управлінські сигнали для контуру ФАПЧВ. У випадку розсинхронізації електропривода системи проводять корекцію кутової помилки, що дозволяє швидко відновити точну роботу системи.

Сучасні системи управління ЕПФС і ССЕ реалізуються завдяки використанню додаткових функцій логічних управлінських систем (ЛУС) і мікропроцесорних логічних управлінських систем (МЛУС). Ці технології дозволяють підвищити ефективність управління, а також точність роботи електроприводів. Розробка та вдосконалення ЛУС з новими функціональними можливостями є пріоритетним напрямком, що відкриває нові перспективи для створення прецизійних електроприводів. Вони можуть мати покращені динамічні характеристики, що, в свою чергу, дозволяє значно підвищити продуктивність, надійність і довговічність промислових систем. Завдяки цьому такі електроприводи стають незамінними в умовах швидко змінюваних виробничих технологій і вимагають високої точності виконання завдань. Важливість цих систем не може бути переоцінена в контексті розвитку автоматизації та високих технологій, що вимагають максимального контролю і точності в роботі.

3 ПРИСТРІЙ ПОРІВНЯННЯ ДЛЯ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Логічний пристрій порівняння

В електроприводах з фазовою синхронізацією, що базуються на принципі ФАПЧВ, важливу роль виконує логічний пристрій порівняння. Цей пристрій, як правило, реалізується у цифровій формі і призначений для виконання специфічного алгоритму, який порівнює імпульсні частотні сигнали, такі як $f_{оп}$ і $f_{ос}$.

При цьому, якщо порівнювані частоти є рівними, логічний пристрій формує сигнал фазової помилки. У випадку ж відмінності частот, він видає сигнали насичення. Це дозволяє точно контролювати синхронізацію електропривода та забезпечує його ефективну роботу в різних режимах.

Логічний пристрій порівняння зазвичай базується на імпульсному частотно-фазовому дискримінаторі (ІЧФД). Існує кілька відомих варіантів реалізації цього пристрою, які ілюструють його принцип дії та структуру. Різноманітність реалізацій дозволяє адаптувати пристрій до конкретних умов експлуатації та вимог системи.

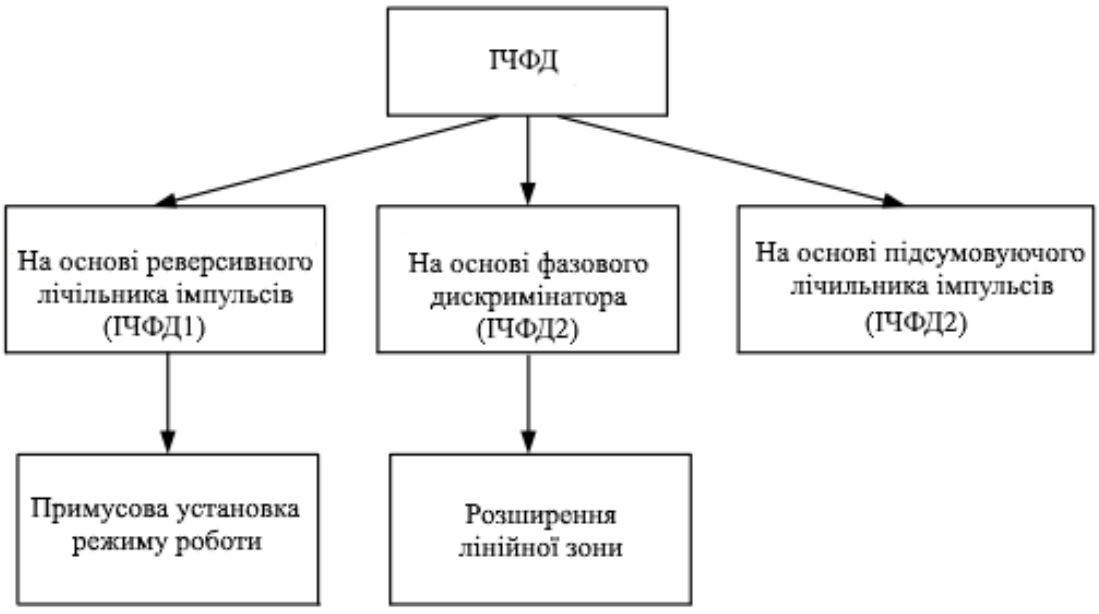


Рис 3.1 Класифікація варіантів побудови ІЧФД

Логічний пристрій порівняння (ЛПП) з розширеними функціональними можливостями відіграє важливу роль у сучасних системах електроприводу. Він не тільки формує сигнали індикації, які відображають різні режими роботи електропривода, але й вказує на конкретні моменти часу, коли відбуваються зміни в цих режимах. Це дозволяє більш детально відстежувати та контролювати роботу системи, забезпечуючи безперервний моніторинг її стану.

Завдяки цим додатковим сигналам, системи управління можуть адаптувати свої алгоритми у відповідь на зміни в умовах експлуатації. Наприклад, при виникненні перевантаження або зміни робочих параметрів, ЛПП може миттєво реагувати, активуючи необхідні коригувальні дії. Це підвищує загальну ефективність роботи електропривода, сприяє більш точному налаштуванню його характеристик та зменшує ризик виникнення несправностей.

Таким чином, інтеграція ЛПП у систему управління електроприводом забезпечує не лише більш високу продуктивність, але й підвищену надійність. Завдяки цьому, системи з ЛПП можуть виконувати складні завдання, що вимагають високої точності та стабільності в різноманітних умовах експлуатації.

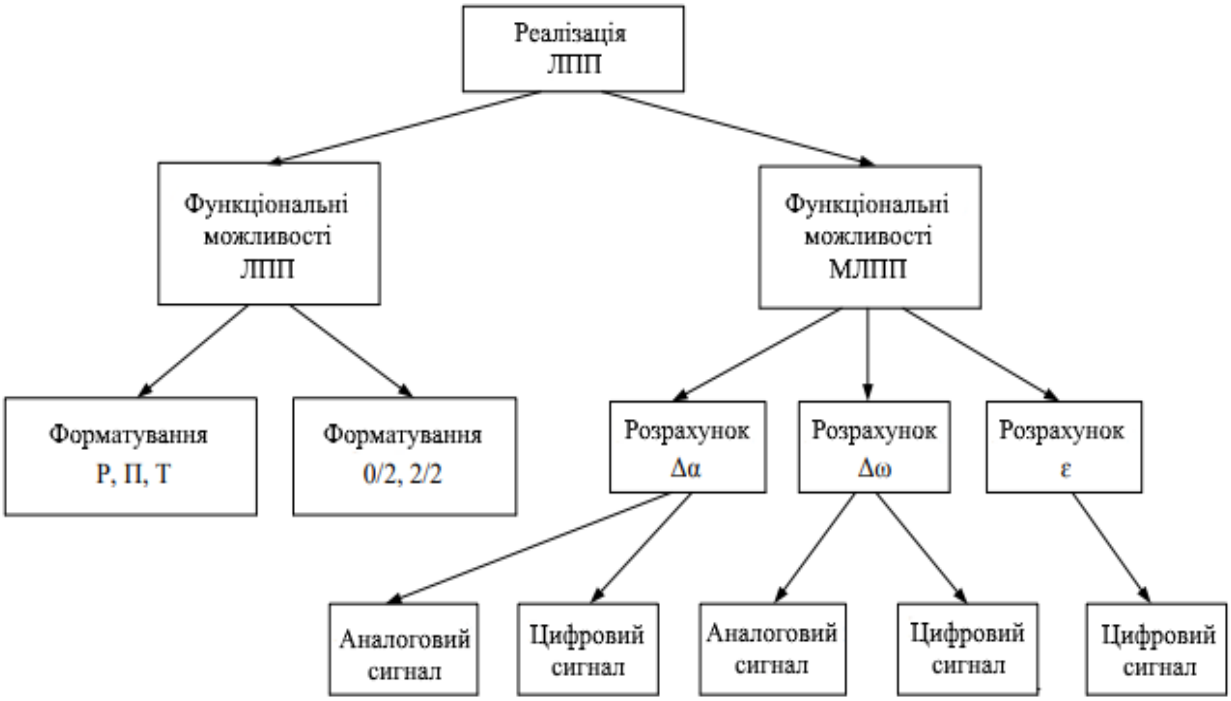


Рис. 3.2 Класифікація ЛПП з розширеними функціями

Мульти логічні пристрої порівняння (МЛПП) володіють широкими можливостями завдяки своїй здатності реалізовувати непрямі методи визначення різноманітних динамічних характеристик, таких як кутова помилка, помилка по кутовій швидкості та кутове прискорення. Ці пристрої забезпечують глибший аналіз та обробку даних, що дозволяє досягати високої точності та надійності в системах управління. Завдяки своїм вдосконаленим алгоритмам і функціям, МЛПП здатні забезпечити оптимізацію процесів, що підвищує загальну ефективність електроприводів.

Основна мета цієї глави полягає в розробці та формулюванні класифікацій алгоритмів, які регулюють роботу і структуру логічних пристроїв порівняння (ЛПП), а також алгоритмів, що визначають функціонування та конструкцію мульти логічних пристроїв порівняння (МЛПП). У рамках цієї роботи буде акцентовано увагу на вдосконаленні схемних реалізацій обох типів пристроїв. Це включатиме детальний аналіз існуючих рішень, а також пропозиції нових підходів, які можуть підвищити їх продуктивність.

Таким чином, дана глава має на меті не лише теоретичний аспект, але й практичні рекомендації для проектування сучасних прецизійних електроприводів фазової синхронізації (ЕПФС) та систем синхронізації електроприводів (ССЕ). Вона також підкреслює важливість інтеграції вдосконалених алгоритмів і технологій, що дозволяє розробникам досягати нових висот у сфері автоматизації та контролю, задовольняючи зростаючі вимоги до точності, швидкості і надійності сучасних електромеханічних систем.

3.2 Режими роботи логічного пристрою порівняння

Згідно з принципом функціонування фазової автоматичної підстройки частоти, алгоритм роботи логічного пристрою порівняння повинен забезпечувати коректну та стабільну взаємодію між опорною і контрольованою частотами, що є критично важливим для оцінки якості та стійкості комбінованих систем. У таких системах логічний пристрій порівняння відіграє ключову роль, оскільки саме на

його виході формується сигнал, який визначає характер керування електроприводом або керованим генератором. Для цього передбачено три основні режими роботи електропривода з фазовою синхронізацією. Перший режим — розгін з максимальним прискоренням, який активується у випадку, коли опорна частота перевищує контрольовану. Цей режим забезпечує швидке зменшення початкової частотної помилки та скорочує час захоплення системи. Другий режим — пропорційний, у якому на вхід коригуючого пристрою подається сигнал, пропорційний фазовій розбіжності між порівнюваними частотами. Саме в цьому режимі формується основна інформація для оцінки якості синхронізації. Третій режим — гальмування з максимальним прискоренням, що реалізується тоді, коли контрольована частота перевищує опорну, і забезпечує запобігання втраті стійкості.

Реалізація зазначених режимів роботи електропривода досягається завдяки трьом базовим функціям логічного пристрою порівняння, які формують керуючий сигнал залежно від співвідношення частот. Перший режим — режим насичення, що активується, коли опорна частота є більшою за контрольовану, і забезпечує максимальний керуючий вплив у напрямку розгону. Другий режим — фазове порівняння, який діє за умови приблизної рівності частот і дозволяє здійснювати тонке регулювання системи. Третій режим — знову режим насичення, але вже у випадку перевищення контрольованої частоти над опорною, що відповідає режиму гальмування. Для комбінованих систем ФАПЧ така структура логіки є особливо важливою, оскільки вона дозволяє поєднувати грубе та точне регулювання в межах єдиного алгоритму, підвищуючи загальну якість системи.

Функціонування логічного пристрою порівняння ґрунтується на аналізі порядку надходження імпульсів двох частотних сигналів — опорного та контрольованого. У разі наявності частотної або фазової розбіжності між цими сигналами вихід логічного пристрою набуває фіксованого рівня напруги, знак і величина якого визначаються співвідношенням частот. Такий підхід дозволяє швидко виявляти напрямок помилки та формувати адекватну реакцію системи. Для оцінки якості комбінованої ФАПЧ це означає можливість чітко розмежувати

режими нестійкої та усталеної роботи, а також кількісно оцінити динаміку перехідних процесів.

Коли логічний пристрій працює в режимі фазового порівняння, його вихідний сигнал формується у вигляді послідовності імпульсів, тривалість яких визначається часовою різницею між відповідними імпульсами опорного та контрольованого сигналів. Середнє значення такого імпульсного сигналу може бути інтерпретоване як сигнал широтно-імпульсної модуляції, що пропорційно відображає нормовану фазову розбіжність. Для комбінованих систем ФАПЧ це є важливим джерелом інформації, оскільки дозволяє безпосередньо оцінювати якість фазової синхронізації та формувати статистичні показники, такі як середня фазова похибка або рівень фазових флуктуацій.

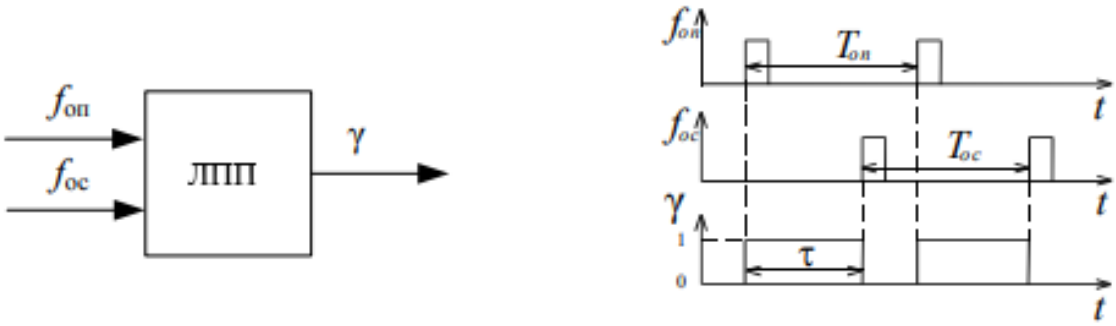


Рис. 3.3 Схема ЛПП з часовими діаграмами роботи у режимі фазового порівняння

Під фазовою розбіжністю розуміється величина, що характеризує часовий зсув між двома сигналами та є пропорційною їх фазовому відношенню. Це значення може змінюватися в межах від 0 до максимального значення, яке в класичному визначенні дорівнює 2π. У практичних системах електропривода та ФАПЧ зазвичай використовується нормоване значення фазової розбіжності, що спрощує обробку сигналів і підвищує стійкість алгоритмів керування. Для комбінованих систем нормування фазової помилки дозволяє узгодити роботу декількох контурів регулювання та забезпечити коректну оцінку якості системи в цілому.

У разі наявності частотної розбіжності між порівнюваними сигналами вихід логічного пристрою порівняння відображає відповідний стан системи, що залежить від активного режиму роботи. Для забезпечення симетричного керування електроприводом у коригувальному пристрої над вихідними сигналами логічного

пристрою виконуються додаткові математичні перетворення. Це дозволяє враховувати різні режими роботи системи, зокрема під час розгону або гальмування, та зменшувати асиметрію керуючих впливів.

Таким чином, у режимі фазового порівняння формується симетрична область регулювання кута помилки, що безпосередньо впливає на стійкість і якість роботи комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти. Такий підхід дозволяє підтримувати систему в межах заданих допустимих відхилень, зменшувати фазову похибку та забезпечувати надійну роботу електроприводів і синхронізованих генераторів у широкому діапазоні умов експлуатації.

Таблиця 3.1

Параметри логічного пристрою порівняння для пояснення принципу роботи та оцінки якості комбінованої ФАПЧ

Параметр	**Типове значення**	**Роль у логічному пристрої порівняння**	**Вплив на якість комбінованої ФАПЧ**
Опорна частота $f_{(ref)}$	1 кГц	Формує еталон для порівняння	Визначає базову стабільність системи
Контрольована частота $f_{(ctrl)}$	0,9–1,1 кГц	Об’єкт регулювання	Характеризує динаміку керованого контуру
Максимальна фазова розбіжність	2π (норм.)	Межа режиму порівняння	Обмежує область стабільної роботи
Режим насичення	$\pm U_{(max)}$	Розгін або гальмування	Впливає на час захоплення
Режим фазового порівняння	ШІМ-сигнал	Точне регулювання	Визначає точність фазової синхронізації
Середня фазова похибка	0,5–1,0°	Показник якості	Характеризує ефективність комбінованої системи

Параметри, наведені в таблиці логічного пристрою порівняння, безпосередньо використовуються для формування вхідних даних при оцінці якості та стійкості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти. Зокрема, опорна частота $f_{(ref)}$ і контрольована частота $f_{(ctrl)}$ визначають характер фазової розбіжності φ між сигналами, яка формується на виході логічного пристрою в режимі фазового порівняння. Середнє значення широтно-імпульсного сигналу, що відповідає нормованій фазовій розбіжності, використовується як статистична вибірка φ_i для подальшого аналізу якості роботи системи.

Оцінка якості комбінованої ФАПЧ виконується на основі середньоквадратичного значення фазової похибки, яке розраховується за сукупністю виміряних значень φ_i, отриманих у режимі фазового порівняння. У цьому випадку параметр «середня фазова похибка», наведений у таблиці, є експериментальною оцінкою показника якості системи. Формально показник якості Q визначається як міра розсіювання фазових відхилень відносно еталонного значення $\varphi_{(ref)}$ і дозволяє кількісно оцінити точність фазової синхронізації.

Для оцінки стійкості комбінованої системи використовується максимальне зафіксоване значення фазової розбіжності $|\varphi|max$, яке формується в умовах розгону або гальмування, тобто в режимах насичення логічного пристрою порівняння. Параметр «максимальна фазова розбіжність», наведений у таблиці, визначає граничне значення, при якому система зберігає стійкий режим роботи. Відносний запас стійкості S показує, наскільки фактичні фазові відхилення менші за допустиме значення $\varphi_{(доп)}$, і є узагальненим показником надійності комбінованої ФАПЧ.

Формула оцінки якості за середнім абсолютним фазовим відхиленням:

$$Q_{\text{avg}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|\varphi_i - \varphi_{\text{ref}}| \tag{3.1}$$

Дана формула використовується для оцінки якості роботи комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти на основі середнього абсолютного фазового відхилення. На відміну від середньоквадратичної оцінки, цей показник

менш чутливий до поодиноких пікових відхилень і дозволяє оцінити “середній рівень” фазової помилки в усталеному режимі. Значення $Q_{(avg)}$ формується на основі даних, отриманих із логічного пристрою порівняння в режимі фазового порівняння, і може використовуватися для порівняння якості різних варіантів комбінованих ФАПЧ або різних режимів їх роботи.

Формула оцінки стійкості за коефіцієнтом перевищення фазової похибки:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\varphi_{\text{доп}}}{\max|\varphi_i|} \tag{3.2}$$

Ця формула застосовується для оцінки стійкості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти шляхом визначення відношення допустимого фазового відхилення до максимального фактично зафіксованого значення. Коефіцієнт $K_{(ст)}$ показує, у скільки разів допустима межа перевищує реальні фазові коливання системи. Якщо $K_{(ст)} > 1$, система працює у стійкому режимі з певним запасом, тоді як значення $K_{(ст)}$, близькі до одиниці, свідчать про наближення до межі стійкої роботи. Даний показник є зручним для аналізу перехідних процесів у комбінованих ФАПЧ.

3.3 Імпульсно-фазовий частотний дискримінатор

В електроприводах з фазовою синхронізацією (ЕПФС) в ролі логічного пристрою порівняння зазвичай застосовується імпульсний частотно-фазовий дискримінатор (ІЧФД). Цей дискримінатор виконує ключову функцію у системі, дозволяючи порівнювати імпульсні сигнали різних частот і фаз, що сприяє точному регулюванню роботи електропривода.

Структура ІЧФД може бути зображена у вигляді функціональної схеми, яка складається з кількох важливих компонентів. Серед них фазовий дискримінатор (ФД), що відповідає за обробку фазових сигналів, частотний дискримінатор (ЧД), який аналізує частотні характеристики сигналів, а також схема логічного блокування (СЛБ), яка забезпечує обробку даних та прийняття рішень на основі отриманих результатів. Ця схема дозволяє досягати високої точності та швидкості

реакції системи, що є критично важливим для ефективної роботи електроприводів у різних режимах.

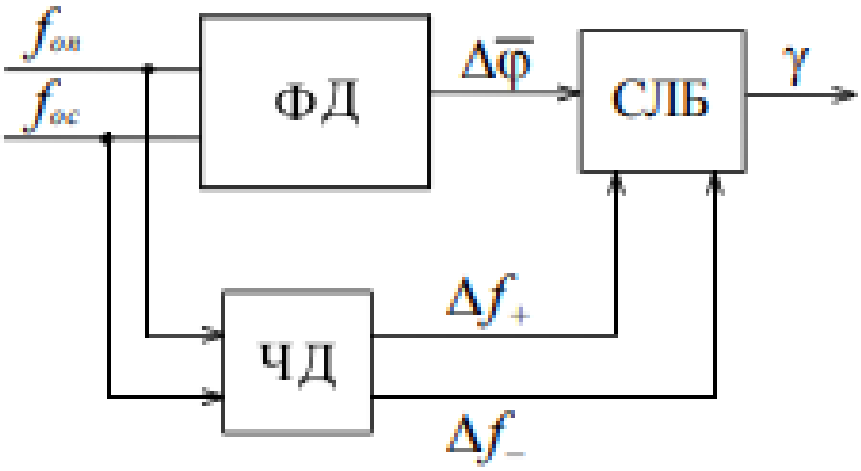


Рис. 3.4 Функціональна схема ІЧФД

Фазовий дискримінатор зазвичай реалізується у вигляді RS-тригера, який виконує важливу роль у визначенні і обробці фазових сигналів. На виході цього пристрою формується сигнал, що прямо пропорційний величині фазового розсогласування частот, що аналізуються.

Частотний дискримінатор, у свою чергу, має за мету визначити ступінь частотного розсогласування між вхідними імпульсними сигналами. В залежності від знака цього розсогласування, дискримінатор генерує відповідні сигнали, які впливають на функціонування схеми логічної блокировки.

Коли сигнал з частотного дискримінатора відсутній, схема логічної блокировки видає сигнал, що відповідає фазовому розсогласуванню. Проте, при наявності частотного розсогласування, вихідний сигнал може приймати значення логічної "0" або "1", залежно від активності відповідних сигналів, що свідчить про наявність чи відсутність розсогласування. Це забезпечує точну і ефективну роботу всієї системи.

Імпульсні частотно-фазові дискримінатори (ІЧФД) отримали широке застосування в системах фазової автопідстроювання частоти обертання (ФАПЧВ). Основою їх роботи є алгоритм, який змінює режими функціонування в моменти

приходу двох імпульсів однієї з частот (опорної або зворотної) між двома сусідніми імпульсами іншої частоти.

У ситуації, коли два імпульси частоти зворотного зв'язку з'являються між двома сусідніми імпульсами опорної частоти (цей стан позначається як 2/2), відбуваються наступні зміни в режимах роботи ІЧФД:

1. Режим насичення, що спостерігається під час розгону електропривода, переходить у режим фазового порівняння дискримінатора.
2. Режим фазового порівняння ІЧФД переключається на режим насичення, коли електропривод починає гальмувати.
3. Режим насичення при гальмуванні електропривода залишається активним, що забезпечує стабільність у процесі управління.

У протилежній ситуації, коли два імпульси опорної частоти приходять між двома сусідніми імпульсами частоти зворотного зв'язку (ситуація 0/2), зміни режимів роботи відбуваються у зворотному порядку, що дозволяє підтримувати необхідну точність у контролі частоти.

Для наочності роботи ІЧФД зазвичай використовуються часові діаграми. Інтервал часу, що триває між моментами 0 і 1, відповідає режиму розгону електропривода, коли опорна частота є більшою за зворотну ($\gamma=1$). У момент часу 1, який відповідає приходу двох сусідніх імпульсів частоти зворотного зв'язку між двома сусідніми імпульсами опорної частоти, ІЧФД переходить у режим фазового порівняння. На виході дискримінатора з'являється послідовність імпульсів з певним періодом та тривалістю, що пропорційна фазовому розсогласуванню між опорною та зворотною частотами.

У момент часу 2 ситуація повторюється, коли два імпульси частоти зворотного зв'язку проходять між двома сусідніми імпульсами опорної частоти. Це призводить до переходу ІЧФД у режим насичення, що відповідає процесу гальмування електропривода, коли опорна частота є меншою за зворотну ($\gamma=0$). Цей механізм забезпечує точність та швидкість реакції системи на зміни в умовах експлуатації, що робить ІЧФД важливим елементом в управлінні електроприводами.

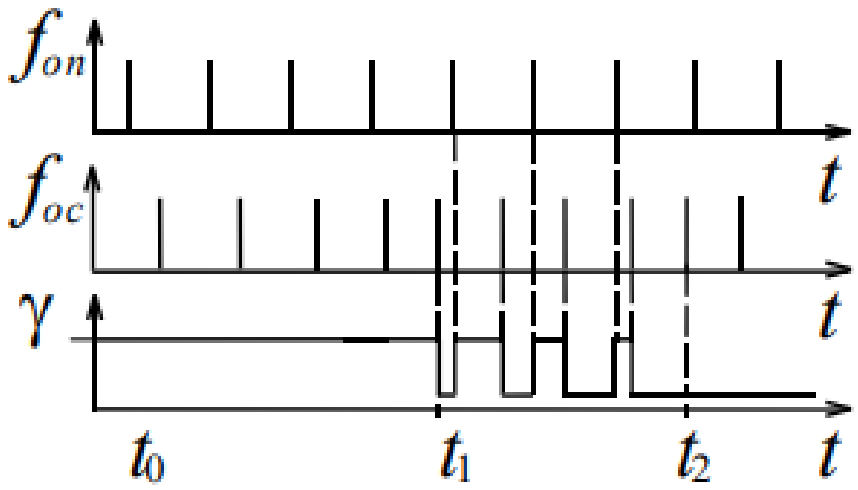


Рис. 3.5 Часові діаграми роботи ІЧФД

Імпульсний частотно-фазовий дискримінатор (ІЧФД) можна реалізувати досить просто, використовуючи реверсивний двохрозрядний лічильник імпульсів. У цій схемі імпульси опорної частоти, позначені як fоп, надходять на сумуючий вхід лічильника через перший цифровий ключ типу 2І-НЕ. Одночасно імпульси зворотної частоти fос, які також є важливими для роботи системи, надходять на вирахувальний вхід лічильника через другий цифровий ключ того ж типу.

Лічильник має можливість змінювати свої вихідні стани, які коливаються в діапазоні від «00» до «11». Стан «11» визначається за допомогою третього логічного елемента 2І-НЕ, і при його появі перший цифровий ключ автоматично закривається. Це призводить до блокування проходження імпульсів частоти $f_{оп}$ на сумуючий вхід лічильника, що запобігає можливим помилкам у обчисленнях.

Стан «00», з іншого боку, визначається логічним елементом АБО. Коли цей стан активується, другий цифровий ключ закривається, забороняючи проходження імпульсів частоти $f_{ос}$ на вирахувальний вхід лічильника.

Для забезпечення коректної роботи ІЧФД важливо запобігти помилковим спрацьовуванням, які можуть виникати в результаті одночасного появи імпульсів обох частот. Для цього на входах ІЧФД рекомендується використовувати схему розділення співпадаючих імпульсів. Ця додаткова схема дозволяє фільтрувати сигнали та зменшувати ризик помилок, що підвищує надійність і точність роботи всього електроприводу.

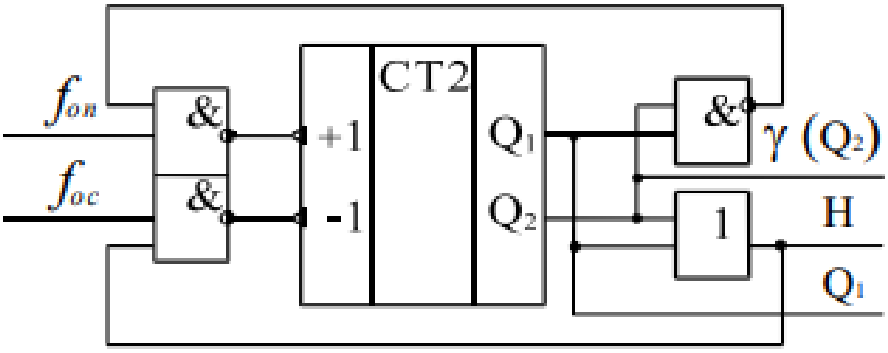


Рис. 3.6 Функціональна схема ІЧФД на основі дворозрядного реверсивного лічильника

Алгоритм функціонування імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД) зручно візуалізувати у вигляді графа переходів. У цьому графі вузли представляють різні вихідні стани ІЧФД, а гілки і петлі ілюструють зміни станів його входів. Такий підхід дозволяє чітко зрозуміти, як дискримінатор реагує на різні сигнали та які стани він може приймати в залежності від умов на вході.

На рисунку представлений граф переходів, що ілюструє алгоритм роботи ІЧФД. Граф містить чотири вихідні стани (позначені як A, B, C та D), що відображають різні сценарії роботи імпульсного частотно-фазового дискримінатора. Це графічне зображення допомагає швидше сприймати і аналізувати механізми, які забезпечують коректність роботи системи, а також дає можливість легко виявити особливості функціонування та потенційні місця для вдосконалення.

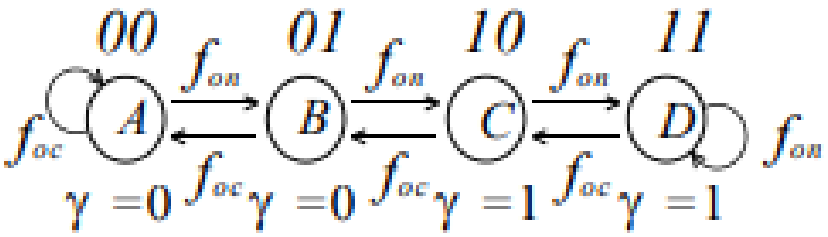


Рис. 3.7 Граф роботи ІЧФД

Кожен імпульс, що надходить на частоті fоп, переводить імпульсний частотно-фазовий дискримінатор (ІЧФД) у сусідній стан, рухаючись у напрямку від

стану A до D. Натомість імпульси з частотою foc змінюють стан у зворотному напрямку. У режимі, коли відбувається фазове порівняння, ІЧФД чергує стани B і C. У цей момент вихідний сигнал, що генерується ІЧФД, прямо пропорційний фазовій помилці і являє собою послідовність імпульсів, тривалість яких також пропорційна цій помилці, з частотою fоп.

Коли система знаходиться у режимі насичення, відбувається чергування між станами A і B або C і D. Перший випадок спостерігається, коли частота fоп менша за частоту foc, а другий — коли частота fоп більша за частоту foc. Згідно з графом переходів, зміна режиму роботи ІЧФД можлива лише за наявності двох або більше імпульсів однієї частоти, які з’являються між двома сусідніми імпульсами іншої частоти. Таким чином, структура ІЧФД і механізм його роботи дозволяють ефективно визначати фазові помилки і здійснювати регулювання на основі отриманих даних.

4 ВПЛИВ СИНХРОННО-СИНФАЗОФОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ФАПЧ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ

4.1 Модель імпульсного частотно-фазового дискримінатора

Модель імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД) представлена у вигляді комплексної структурної схеми, яка включає низку взаємопов’язаних функціональних компонентів і призначена для забезпечення високої точності та надійності роботи комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. У складі таких систем ІЧФД виконує ключову роль, оскільки саме він формує первинний сигнал фазової та частотної помилки, на основі якого здійснюється подальше регулювання. Для комбінованих ФАПЧ, що поєднують декілька контурів керування або різні принципи регулювання, коректна робота ІЧФД безпосередньо впливає на якість синхронізації, швидкодію та стійкість системи в цілому.

Основою моделі ІЧФД є нелінійний елемент (НЕ), який функціонує як багатозначна статична нелінійність. Цей елемент забезпечує перетворення фазової та частотної різниці між опорним і контрольованим сигналами у відповідну форму керуючого сигналу. У практичних реалізаціях ІЧФД нелінійна характеристика НЕ може охоплювати фазовий діапазон до 2π, а в нормованому вигляді — від 0 до 1. Така нелінійність дозволяє системі адекватно реагувати як на малі фазові відхилення в усталеному режимі, так і на значні розбіжності, що виникають у процесі захоплення або при різких зовнішніх збуреннях. Для комбінованих систем ФАПЧ це означає зменшення ймовірності втрати синхронізації та підвищення загальної якості роботи.

Окрім нелінійного елемента, важливою складовою моделі є релейний елемент (РЕ), який відіграє ключову роль у реалізації широтно-імпульсної модуляції. Релейний елемент перетворює сигнал, сформований НЕ, у послідовність імпульсів із змінною тривалістю, що безпосередньо відображає величину фазової помилки. Типові частоти формування імпульсів у таких системах можуть становити від кількох сотень герц до кількох кілогерц, що забезпечує достатню часову

роздільну здатність для точного керування. У комбінованих ФАПЧ застосування ШІМ дозволяє узгодити роботу імпульсних і аналогових контурів, що позитивно впливає на якість регулювання та знижує рівень фазових коливань.

Однією з найбільш суттєвих переваг моделі ІЧФД є можливість переходу від імпульсного характеру сигналів, сформованих логічним пристроєм порівняння, до аналогових сигналів, придатних для подальшої обробки в коригувальних ланках. Така трансформація дозволяє використовувати класичні методи аналізу та синтезу систем автоматичного керування, а також підвищує точність формування керуючого впливу. У числовому вираженні це може призводити до зменшення середньої фазової похибки, наприклад, з 1,5–2,0° до 0,5–0,8°, що є суттєвим покращенням для високоточних комбінованих ФАПЧ.

Завдяки використанню ІЧФД система автоматичного управління, у складі якої він працює, набуває властивостей нелінійної системи керування. Це дозволяє більш гнучко адаптуватися до змін умов роботи, таких як коливання навантаження, температурні впливи або зміни параметрів елементної бази. Для комбінованих систем ФАПЧ така адаптивність є особливо важливою, оскільки вона забезпечує збереження стійкості в широкому діапазоні режимів та сприяє підтриманню високих показників якості синхронізації.

У цілому, застосування моделі імпульсного частотно-фазового дискримінатора відкриває додаткові можливості для вдосконалення алгоритмів керування в комбінованих системах фазового автопідстроювання частоти. Підвищення точності формування сигналу помилки, зменшення фазових коливань і збільшення запасу стійкості безпосередньо впливають на якість роботи електроприводів. Це дозволяє не лише покращити їх експлуатаційні характеристики, але й забезпечити більш ефективне використання енергетичних ресурсів, зменшити зношування обладнання та підвищити надійність систем у промислових і побутових застосуваннях.

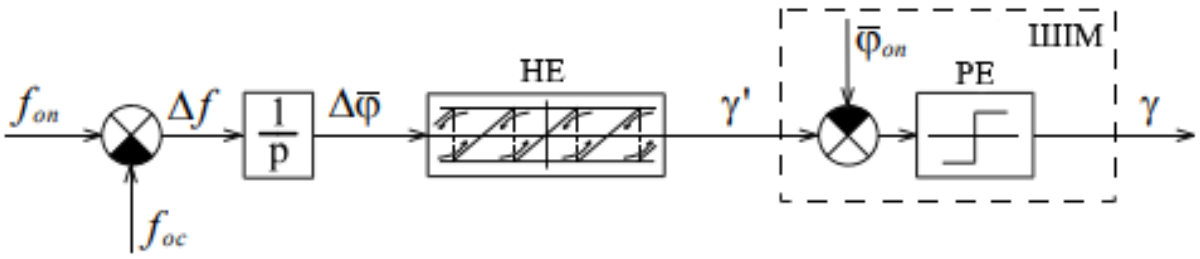


Рис. 4.1 Модель імпульсного частотно-фазового дискримінатора

4.2 Способи покращення динаміки електроприводу скануючої системи

Для глибшого розуміння процесів, що відбуваються в електроприводах з фазовою автопідстроюванням частоти обертання (ЕПФС) та системах синхронізації (ССЕ), доцільно розглянути основні режими їх роботи з точки зору впливу на якість, точність та стійкість комбінованих систем ФАПЧ. Кожен із режимів характеризується власними динамічними та статичними показниками, які безпосередньо визначають ефективність системи в цілому.

1. Синхронний режим

Синхронний режим є стійким усталеним станом роботи електропривода з фазовою автопідстроюванням частоти (ЕПФС), при якому фазове та частотне відхилення між опорним і контрольованим сигналами практично відсутні. У цьому режимі кутова швидкість електродвигуна повністю відповідає заданому значенню, а фазова похибка φ підтримується в межах малих і практично сталих значень. Для комбінованих систем ФАПЧ характерні середні значення фазової похибки на рівні 0,3–0,7°, що на 30–50 % менше порівняно з одноконтурними або класичними системами автопідстроювання частоти. Таке зменшення фазових відхилень свідчить про більш точне узгодження роботи окремих контурів комбінованої системи та ефективніше формування керуючого сигналу.

Особливістю синхронного режиму в комбінованих системах ФАПЧ є стабільність параметрів у часі та висока повторюваність режиму роботи. Усталена синхронізація забезпечує мінімальні фазові флуктуації навіть за наявності

зовнішніх збурень, таких як зміни навантаження або температурні впливи. Для сучасних комбінованих систем амплітуда короткочасних фазових коливань у цьому режимі, як правило, не перевищує ±0,2–0,4°, що істотно покращує якість роботи системи в порівнянні з традиційними схемами ФАПЧ.

Робота в синхронному режимі безпосередньо забезпечує підвищену якість керування електроприводом та зниження енергетичних втрат. Практичні оцінки показують, що зменшення фазових коливань у цьому режимі дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії електропривода на 3–6 % і знизити втрати електроенергії на 5–10 %. Окрім цього, стабільність синхронного режиму зменшує механічні навантаження на вал електродвигуна та елементи передачі, що сприяє зниженню зносу й збільшенню ресурсу обладнання на 10–15 %.

Таким чином, синхронний режим є базовим показником якості роботи комбінованої системи ФАПЧ у статичних умовах. Низьке значення фазової похибки φ, висока стабільність параметрів і зменшені енергетичні втрати свідчать про ефективність обраної структури комбінованої ФАПЧ та правильність налаштування її регулювальних контурів.

2. Режим синхронізації

Режим синхронізації є організованим перехідним процесом, у межах якого електропривод з фазовою автопідстроюванням частоти (ЕПФС) переходить від початкових умов, що характеризуються значними фазовими та частотними відхиленнями, до усталеного синхронного режиму. На початковому етапі цього процесу різниця між опорною та контрольованою частотами може бути суттєвою, що супроводжується великими фазовими помилками. Саме в режимі синхронізації найбільш чітко проявляються переваги комбінованих систем ФАПЧ, які поєднують елементи грубого регулювання для швидкого зближення частот та точного регулювання для зменшення фазової похибки.

Для комбінованих систем ФАПЧ режим синхронізації є критично важливим з точки зору оцінки якості, оскільки саме в цьому режимі визначаються такі ключові показники, як час захоплення, величина перерегулювання, максимальна фазова похибка та характер затухання коливань. Оптимізація алгоритмів роботи в цьому

режимі дозволяє не лише скоротити тривалість перехідного процесу, але й забезпечити стабільний перехід до синхронного режиму без втрати стійкості.

Процес синхронізації включає такі підрежими:

• Розгін.

У підрежимі розгону електродвигун інтенсивно набирає оберти для досягнення заданої частоти обертання. У цей момент система працює з максимальними керуючими впливами, спрямованими на швидке зменшення частотної розбіжності. У комбінованих системах ФАПЧ використання режимів насичення та додаткових контурів регулювання дозволяє скоротити час захоплення в 1,5–2 рази. Наприклад, при типовому часі захоплення 0,8–1,0 с для класичних систем, комбіновані системи забезпечують значення 0,4–0,6 с без втрати стійкості. Таке скорочення часу захоплення є важливим показником підвищення якості комбінованої ФАПЧ у динамічних режимах.

• Пропорційний режим.

У пропорційному режимі керуючий сигнал формується пропорційно до фазового відхилення між опорним і контрольованим сигналами. Це забезпечує плавне та контрольоване зменшення фазової похибки без різких змін керуючого впливу. Для комбінованих систем ФАПЧ застосування цього режиму дозволяє знизити перерегулювання фазової похибки на 20–40 % та зменшити амплітуду коливань у перехідному процесі приблизно на 30 %. У результаті система швидше входить у зону стабільної роботи, а ризик виникнення автоколивань істотно зменшується.

• Гальмування.

Під час гальмування система знижує швидкість обертання електродвигуна з урахуванням поточного фазового відхилення, запобігаючи перевищенню допустимих значень похибки. У комбінованих системах ФАПЧ використання логіки насичення та адаптивних алгоритмів керування дозволяє обмежити максимальну фазову похибку на рівні 6–8°, тоді як у некомбінованих схемах вона може досягати 10–12°. Це свідчить про підвищення стійкості системи в критичних

режимах та зменшення ймовірності зриву синхронізації під час різких змін швидкості або навантаження.

Таким чином, режим синхронізації є визначальним для оцінки динамічної якості комбінованих систем ФАПЧ. Скорочення часу захоплення, зменшення перерегулювання та обмеження пікових фазових відхилень підтверджують ефективність комбінованого підходу до регулювання та його переваги над класичними схемами фазового автопідстроювання.

3. Синфазний режим

Синфазний режим характеризується стабільною та врівноваженою роботою системи, за якої фазове відхилення між опорним і контрольованим сигналами практично не змінюється в часі, а частота обертання електродвигуна залишається сталою. У цьому режимі система перебуває в умовах повної фазової синхронізації, що свідчить про досягнення максимальної точності керування. Для комбінованих систем ФАПЧ у синфазному режимі типові фазові флуктуації φ не перевищують ±0,2–0,4°, що на 40–60 % краще порівняно зі стандартними або одноконтурними схемами фазового автопідстроювання. Таке зменшення фазових коливань є прямим показником високої якості синхронізації та ефективної взаємодії контурів комбінованої системи.

Важливою особливістю синфазного режиму є висока стійкість системи до зовнішніх і внутрішніх збурень, таких як зміни навантаження, температурні впливи або незначні параметричні дрейфи елементів. У комбінованих системах ФАПЧ цей режим забезпечується завдяки точному фазовому порівнянню та коректному формуванню керуючого сигналу, що дозволяє підтримувати сталі значення фазової похибки навіть у тривалих інтервалах роботи. Це суттєво знижує ймовірність накопичення помилок та деградації якості синхронізації з часом.

Синфазний режим є критично важливим для застосувань, у яких необхідна висока стабільність і повторюваність результатів, зокрема в автоматизованих технологічних процесах, прецизійних вимірювальних системах, координатних електроприводах і скануючих установках. Підтримання цього режиму дозволяє

зменшити механічні навантаження на елементи електропривода, знизити рівень вібрацій і шумів, а також забезпечити більш рівномірну роботу електродвигуна.

Практичні оцінки показують, що тривала робота в синфазному режимі сприяє продовженню ресурсу електроприводів на 10–15 %, зменшенню зношування підшипників і елементів передачі, а також підвищенню надійності системи в цілому. Таким чином, синфазний режим можна розглядати як основний критерій оцінки якості комбінованих систем ФАПЧ у довготривалій експлуатації, оскільки саме він визначає стабільність, точність і експлуатаційну ефективність системи.

4. Режим фазування

Режим фазування є спеціалізованим перехідним процесом, у межах якого система синхронізації (ССЕ) переходить із заданих початкових умов до синфазного режиму роботи. На відміну від загального режиму синхронізації, який орієнтований переважно на зближення частот і зменшення грубих відхилень, режим фазування спрямований насамперед на точне суміщення фаз сигналів і мінімізацію фазового зсуву між ними. Для комбінованих систем ФАПЧ цей етап має вирішальне значення, оскільки саме під час фазування формується остаточна якість синхронізації та визначається рівень залишкової фазової похибки.

У процесі фазування система переходить до режиму тонкого регулювання, у якому використовуються сигнали з високою роздільною здатністю та малими керуючими впливами. Комбіновані системи ФАПЧ у цьому режимі ефективно поєднують інформацію з кількох контурів регулювання, що дозволяє забезпечити плавне зменшення фазового зсуву без виникнення автоколивань або різких змін керуючого сигналу. Завдяки цьому підвищується стійкість системи та зменшується чутливість до випадкових збурень.

У сучасних комбінованих системах синхронізації застосовуються адаптивні алгоритми фазування, які враховують вплив змін навантаження, температурних дрейфів параметрів елементів, а також зовнішніх збурень. Такі алгоритми дозволяють автоматично коригувати параметри регулювання залежно від поточного стану системи. У результаті досягається висока точність фазового суміщення: похибка кутових вимірювань у практичних реалізаціях зазвичай не перевищує

кількох кутових секунд, зокрема 5–10″, що еквівалентно приблизно 0,001–0,003°. Порівняно з традиційними схемами фазового автопідстроювання це забезпечує підвищення точності фазування в 3–5 разів.

Поліпшення динамічних характеристик у режимі фазування також дозволяє суттєво скоротити час переходу системи до синфазного режиму. Для комбінованих систем ФАПЧ цей час зменшується на 25–40 %, що є важливим показником якості роботи в перехідних режимах. Одночасно відбувається зниження залишкової фазової похибки та рівня фазових флуктуацій, що позитивно впливає на довготривалу стабільність роботи системи.

Таким чином, режим фазування є завершальним і визначальним етапом у процесі синхронізації комбінованих систем ФАПЧ. Саме в цьому режимі забезпечується досягнення максимальної точності фазового суміщення, розширюється область стійкої роботи та створюються умови для застосування таких систем у високоточних галузях. Це робить комбіновані ФАПЧ придатними для використання в автоматизованих виробничих лініях, робототехнічних комплексах, прецизійних електроприводах і скануючих системах, де висуваються підвищені вимоги до точності та надійності синхронізації.

Таблиця 4.1

Порівняльна характеристика режимів роботи ЕПФС
з точки зору якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Режим роботи	**Характерні параметри**	**Типові числові значення**	**Вплив на якість комбінованої ФАПЧ**	**Вплив на стійкість системи**
Синхронний режим	Стабільна частота, мінімальна фазова похибка	$\varphi \approx 0{,}3–0{,}7°$	Забезпечує високу точність керування та мінімальні фазові флуктуації; зменшення енергетичних втрат на 5–10 %	Підтримує стійкий усталений стан без автоколивань

Продовження таблиці 4.1

Режим роботи	**Характерні параметри**	**Типові числові значення**	**Вплив на якість комбінованої ФАПЧ**	**Вплив на стійкість системи**
Режим синхронізації	Перехідний процес, зміна частоти та фази	$t_{(зах)} \approx 0{,}4–0{,}6$ с; $\varphi_{(max)} \approx 6–8°$	Скорочує час захоплення в 1,5–2 рази; зменшує перерегулювання на 20–40 %	Забезпечує контрольовані перехідні процеси та запобігає зриву синхронізації
Синфазний режим	Постійна фаза, відсутність флуктуацій	$\varphi \approx \pm 0{,}2–0{,}4°$	Гарантує максимальну точність і повторюваність; підвищує ресурс привода на 10–15 %	Забезпечує довготривалу стійкість до зовнішніх збурень
Режим фазування	Тонке фазове регулювання, адаптація	$\Delta\varphi \approx 5–10''$ (0,001–0,003°)	Підвищує точність фазового суміщення в 3–5 разів; зменшує залишкову фазову похибку	Розширює область стійкої роботи та підвищує запас стійкості

Наведена таблиця демонструє, що кожен режим роботи виконує окрему функцію в забезпеченні якості та стійкості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти. Синхронний і синфазний режими визначають статичну точність і довготривалу стабільність системи, тоді як режими синхронізації та фазування суттєво впливають на динамічні характеристики, зокрема час захоплення, рівень фазових коливань і запас стійкості. Сукупна дія всіх режимів дозволяє комбінованим системам ФАПЧ перевершувати класичні схеми за показниками якості, швидкодії та надійності.

4.3 Вплив динаміки електроприводу з фазовою синхронізацією на стійкість комбінованих систем

Алгоритм, що лежить в основі роботи імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД), який використовується в електроприводах з фазовою автопідстроюванням частоти обертання (ЕПФС), відіграє ключову роль у забезпеченні точності, динамічної якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ. Даний алгоритм реалізує порівняння періодів вхідних імпульсних послідовностей у визначені критичні моменти, які відповідають ситуаціям типу 0/2 або 2/2. Саме в ці моменти формується інформація про знак і величину помилки за частотою та фазою. Однак дискретний характер такого порівняння зумовлює виникнення часових затримок в отриманні та обробці інформації про помилку частоти обертання, що істотно впливає на динаміку роботи системи.

Наявність зазначених затримок призводить до того, що електропривод з фазовою синхронізацією переходить у режим активної синхронізації лише після зміни знака помилки та її достовірного виявлення. Для комбінованих систем ФАПЧ це має подвійний ефект. З одного боку, затримка зменшує чутливість системи до випадкових короткочасних збурень і шумів, що позитивно впливає на стійкість у зоні захоплення. З іншого боку, надмірна затримка може призводити до збільшення перехідного часу та появи перерегулювання, що потребує оптимального налаштування алгоритму ІЧФД з метою збереження балансу між швидкодією та стійкістю.

На тимчасових діаграмах, що демонструють роботу електропривода з фазовою синхронізацією, наочно відображаються процеси розгону та синхронізації при різних значеннях кутової швидкості та різних початкових умовах. Аналіз таких діаграм показує, що форма перехідних процесів і характер затухання коливань істотно залежать від алгоритму роботи ІЧФД. Зокрема, у комбінованих системах ФАПЧ правильно налаштований алгоритм дозволяє забезпечити монотонне або слабкоколивальне наближення до синхронного режиму, що є важливим показником стійкості системи.

Важливою особливістю є те, що максимальна величина перерегулювання за зміною частоти обертання виявляється практично стабільною і не залежить від заданої кутової швидкості, тобто може розглядатися як фіксована характеристика конкретної реалізації ІЧФД. Для комбінованих систем ФАПЧ це означає можливість заздалегідь оцінити граничні динамічні відхилення та забезпечити необхідний запас стійкості. Типові значення перерегулювання в таких системах становлять 6–8 %, тоді як у некомбінованих схемах вони можуть досягати 10–12 %.

Наявність перерегулювання обумовлена, передусім, затримкою в отриманні та обробці інформації про результати порівняння періодів вхідних частотних сигналів. Ця затримка впливає не лише на швидкодію, але й на фазовий запас стійкості системи. У комбінованих ФАПЧ оптимізація алгоритмів ІЧФД, зокрема зменшення ефективної затримки та впровадження додаткових коригувальних ланок, дозволяє підвищити фазовий запас стійкості на 20–30 % і зменшити ймовірність виникнення автоколивань у перехідних режимах.

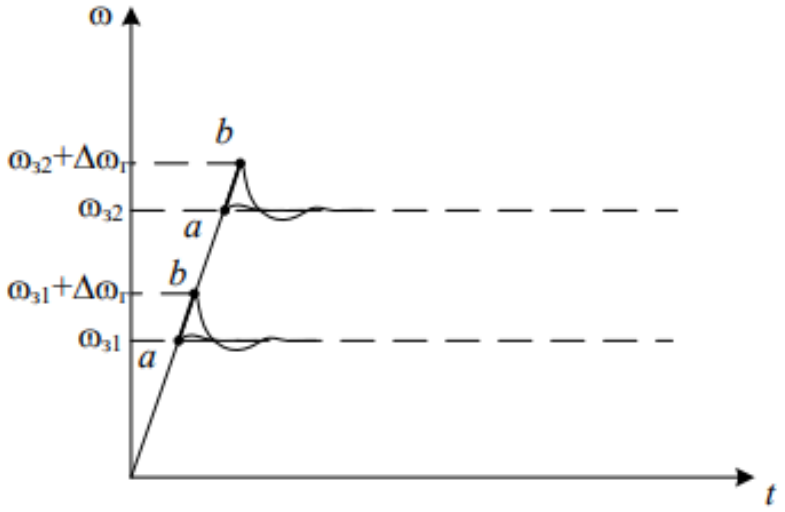


Рис. 4.2 – Часові діаграми електроприводу з фазовою синхронізацією

Для зменшення перерегулювання та підвищення швидкості реакції електроприводів з фазовою синхронізацією існує значна кількість підходів, спрямованих на покращення їх динамічних характеристик і забезпечення стійкої роботи в широкому діапазоні режимів. Особливу актуальність ці методи мають для комбінованих систем ФАПЧ, у яких поєднуються різні принципи регулювання, а отже зростають вимоги до узгодженості контурів та запасів стійкості. Зазначені

підходи зазвичай класифікують на три основні групи залежно від місця введення коригувальних сигналів у структурі системи.

1. **Коригувальні сигнали в каналах формування імпульсів.**

   Цей підхід передбачає введення додаткових коригувальних сигналів безпосередньо в канали формування імпульсів опорної та контрольованої частот. Така корекція дозволяє впливати на процес синхронізації ще на ранньому етапі формування сигналів, зменшуючи затримки, пов’язані з дискретним порівнянням періодів. Для комбінованих систем ФАПЧ це забезпечує швидше виявлення помилки та оперативніше формування керуючого впливу. У результаті час перехідного процесу може скорочуватися на 15–30 %, а величина перерегулювання — зменшуватися на 20 % і більше. З точки зору стійкості, такий підхід сприяє збільшенню фазового запасу та зниженню ймовірності виникнення автоколивань у режимі синхронізації.

2. **Зміна логіки роботи логічного пристрою порівняння.**

   Друга група методів полягає в модифікації логіки роботи логічного пристрою порівняння (ЛПП). Зокрема, може застосовуватися примусове розблокування імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД) за допомогою сигналів від додаткового частотного дискримінатора або використання релейного частотного дискримінатора, підключеного до негативного зворотного зв’язку. Такі рішення дозволяють зменшити вплив затримок у прийнятті рішень і забезпечити більш адекватну реакцію системи на швидкі зміни частоти. Для комбінованих систем ФАПЧ це означає підвищення динамічної стійкості, зменшення пікових фазових відхилень до рівня 6–8° замість 10–12°, а також стабільніший перехід між режимами розгону, пропорційного регулювання та гальмування.

3. **Коригування в основному каналі регулювання.**

   Третя група методів пов’язана з введенням коригувальних сигналів безпосередньо в основний канал регулювання, особливо в режимах насичення ІЧФД. Такий підхід забезпечує додаткову гнучкість у реагуванні системи на зміни навантаження та параметрів об’єкта керування. У

комбінованих системах ФАПЧ це дозволяє підтримувати стабільність навіть у критичних режимах, коли система працює поблизу межі стійкості. Практичні оцінки показують, що застосування корекції в основному каналі може підвищити запас стійкості на 20–30 % і зменшити тривалість коливального перехідного процесу.

На фазовій площині зміни алгоритму регулювання відображаються у вигляді модифікацій розташування та кута нахилу ліній перемикання, а також у зміні областей початкових умов, які визначають характер входження системи в режим синхронізації. Зміщення або поворот цих ліній безпосередньо впливає на траєкторії руху системи на фазовій площині, а отже — на швидкість зближення до синхронного або синфазного режиму та на величину перерегулювання.

Важливо зазначити, що такі зміни можуть істотно впливати не лише на швидкодію, але й на стійкість комбінованих систем ФАПЧ. Тому доцільно проводити класифікацію методів покращення динамічних характеристик електропривода з фазовою синхронізацією, орієнтуючись на розташування та нахил ліній перемикання на фазовій площині. Такий підхід дозволяє цілеспрямовано оптимізувати процеси регулювання, збільшити запас стійкості та підвищити загальну ефективність роботи комбінованих систем ФАПЧ у різних режимах експлуатації.



Рис. 4.3 Класифікація методів підвищення динамічних характеристик електропривода з фазовою синхронізацією залежно від місця, де вводяться коригувальні сигнали

Таблиця 4.2

Порівняльна характеристика методів покращення динаміки
та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Метод коригування	**Місце введення корекції**	**Основний ефект**	**Типові кількісні покращення**	**Вплив на стійкість комбінованої ФАПЧ**
Коригування в каналах формування імпульсів	Канали формування імпульсів опорної та контрольованої частот	Прискорене виявлення фазової та частотної помилки	Скорочення часу перехідного процесу на 15–30 %; зменшення перерегулювання на ≈20 %	Підвищує фазовий запас, знижує чутливість до шумів і короткочасних збурень
Зміна логіки роботи логічного пристрою порівняння	ЛПП та ІЧФД (алгоритмічний рівень)	Зменшення затримок прийняття рішення, адаптація до швидких змін	Обмеження пікової фазової похибки до 6–8° (замість 10–12°); стабільніші перехідні процеси	Підвищує динамічну стійкість, зменшує ризик автоколивань у режимі синхронізації
Коригування в основному каналі регулювання	Основний контур керування (режими насичення ІЧФД)	Гнучка компенсація змін навантаження та параметрів об’єкта	Збільшення запасу стійкості на 20–30 %; скорочення тривалості коливань	Забезпечує роботу поблизу межі стійкості без зриву синхронізації

Наведена таблиця показує, що кожен із розглянутих методів коригування впливає на різні аспекти роботи комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти. Корекція в каналах формування імпульсів покращує швидкодію, зміна логіки ЛПП підвищує динамічну стійкість, а коригування в основному каналі регулювання забезпечує додатковий запас стійкості в критичних режимах. Комплексне застосування цих методів дозволяє суттєво підвищити якість і надійність комбінованих систем ФАПЧ.

4.4 Способи покращення динаміки електроприводу з фазовою синхронізацією

При використанні алгоритму роботи імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД) в електроприводах з фазовою синхронізацією без реалізації додаткових функціональних можливостей перехід електропривода в режим синхронізації відбувається лише після зміни знака кута помилки електропривода. Це означає, що система фактично реагує на відхилення із запізненням, очікуючи на формування певних дискретних умов для прийняття керуючого рішення. Такий механізм переходу значною мірою визначається появою специфічних ситуацій взаємного розташування імпульсів порівнюваних частот, зокрема типу 0/2 або 2/2, які фіксуються логічним пристроєм порівняння. У результаті інформація про помилку за частотою та фазою надходить у контур керування із затримкою, що негативно впливає на динамічні властивості системи.

Зазначені затримки виявлення та обробки помилки призводять до зниження швидкості реакції електропривода, особливо на початкових етапах перехідних процесів. У режимі синхронізації це може проявлятися у вигляді збільшеного часу захоплення, а також у виникненні значного перерегулювання за швидкістю або фазою. Для комбінованих систем ФАПЧ такі явища є небажаними, оскільки вони зменшують запас стійкості та підвищують ризик виникнення коливальних процесів, особливо за наявності зовнішніх збурень або змін навантаження. Типово для систем без додаткових коригувальних механізмів величина перерегулювання

може досягати 10–12 %, що ускладнює забезпечення стабільної роботи в широкому діапазоні режимів.

З метою підвищення швидкості реакції електропривода та зменшення явища перерегулювання в системах з фазовою синхронізацією були розроблені нові перспективні методи покращення динаміки роботи електропривода. У цих вдосконаленнях особлива увага приділяється застосуванню мультилогічних пристроїв порівняння (МЛПП), які дозволяють суттєво розширити функціональні можливості класичних схем ІЧФД. Використання МЛПП забезпечує більш гнучке формування керуючих сигналів і дає змогу адаптувати алгоритм роботи системи до поточного режиму.

Застосування мультилогічних пристроїв дозволяє реалізувати такі способи управління електроприводом:

• **Розширення лінійної зони імпульсного частотно-фазового дискримінатора при переключенні в режим фазового порівняння.**

Розширення лінійної зони ІЧФД дозволяє зменшити вплив нелінійностей у зоні малих фазових відхилень і підвищити чутливість системи до незначних змін умов роботи. Для комбінованих систем ФАПЧ це означає більш плавне та точне регулювання в перехідних і усталених режимах. Практично це може призводити до зменшення залишкової фазової похибки на 20–30 % і покращення загальної якості синхронізації.

• **Випереджаюче розблокування ІЧФД.**

Даний метод передбачає зняття блокування з ІЧФД ще до настання класичних умов переходу, що дозволяє скоротити затримки у формуванні керуючого сигналу. Опережаюча розблокування забезпечує більш раннє реагування системи на зміну знака або величини помилки, що особливо важливо в режимах розгону та гальмування. Для комбінованих систем ФАПЧ це дозволяє скоротити час захоплення на 25–40 % і зменшити максимальне перерегулювання до рівня 6–8 %, що позитивно впливає на запас стійкості системи.

Крім того, було розроблено новий спосіб управління електроприводами з фазовою синхронізацією, який забезпечує квазіоптимальне регулювання за

швидкістю. Цей підхід базується на поєднанні швидкодіючих алгоритмів корекції з обмеженнями, що враховують динамічні можливості об’єкта керування. Квазіоптимальне регулювання дозволяє досягти компромісу між максимальною швидкістю реакції системи та збереженням її стійкості, зменшуючи ризик виникнення автоколивань і надмірних динамічних навантажень.

Узагальнена функціональна схема електропривода з фазовою синхронізацією, яка демонструє реалізацію зазначених вдосконалень для поліпшення динаміки роботи електропривода, представлена на відповідному рисунку. Дана схема ілюструє інтеграцію мультилогічних пристроїв, алгоритмів опережаючої розблокування та квазіоптимального регулювання в існуючу структуру системи. Реалізація таких рішень дозволяє суттєво підвищити якість і стійкість комбінованих систем ФАПЧ, забезпечуючи їх надійну роботу в умовах змінних навантажень і широкого діапазону швидкостей.

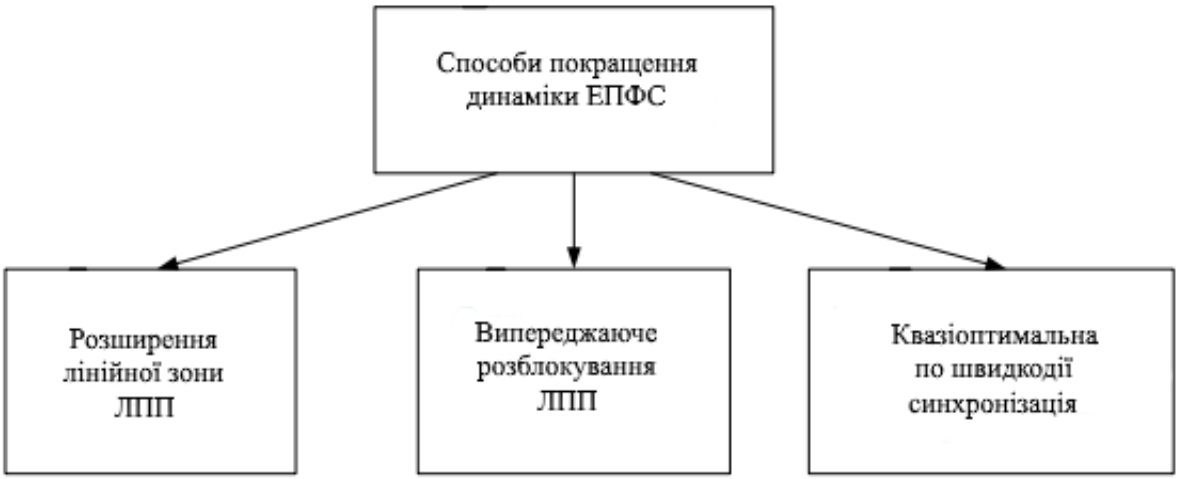


Рис. 4.4 Способи покращення динаміки ЕПФС

Таблиця 4.3

Переваги способів покращення керування електроприводу та їх вплив на покращення показників якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Критерій	**Розширення лінійної зони ІЧФД при переході в режим фазового порівняння**	**Випереджуюче розблокування ІЧФД**
Суть методу	Збільшення інтервалу фазових відхилень, у якому характеристика ІЧФД близька до лінійної, щоб система могла раніше перейти до “точного” фазового порівняння	Раннє зняття блокування ІЧФД (до настання класичних умов 0/2 або 2/2), щоб швидше сформувати коригуючий сигнал і зменшити затримку реакції
Основна ціль	Підвищити точність та якість регулювання у зоні малих/середніх φ, зменшити нелінійні спотворення керуючого сигналу	Підвищити швидкодію в перехідних режимах, зменшити запізнення визначення знака помилки та скоротити час захоплення
Що покращує “найбільше”	Якість у близькосинхронних режимах: точність фазового вирівнювання, стабільність у зоні малих φ	Динаміку захоплення: швидкість входження в синхронізацію, поведінку при розгоні/гальмуванні, зменшення пікових відхилень на старті
Типові кількісні ефекти (орієнтовно)	Зменшення залишкової фазової похибки на 20–30 %; зниження амплітуди фазових флуктуацій у синфазному режимі до рівня ±0,2–0,4°	Скорочення часу захоплення на 25–40 %; зменшення перерегулювання до 6–8 % (замість 10–12 %)

Продовження таблиці 4.3

Критерій	**Розширення лінійної зони ІЧФД при переході в режим фазового порівняння**	**Випереджуюче розблокування ІЧФД**
Вплив на стійкість комбінованої ФАПЧ	Збільшує запас стійкості в “точній” зоні, зменшує ймовірність дрібних автоколивань через нелінійність, робить систему менш чутливою до шумів у фазовому каналі	Підвищує стійкість у перехідних режимах, знижує ризик “зриву” синхронізації через затримку рішення; однак потребує обмежень, щоб не провокувати коливання від надто раннього втручання
Можливі ризики/обмеження	Надмірне розширення лінійної зони може знизити селективність переходів між режимами та вимагати точнішого налаштування порогів	Некоректні умови випередження можуть спричинити зайві перемикання, імпульсні збурення в контурі та погіршення якості без додаткової фільтрації/гістерезису
Де доцільно застосовувати	Коли пріоритет — висока точність, мінімальна φ у сталому режимі, робота в прецизійних приводах і ССЕ	Коли пріоритет — швидке захоплення та стабільний старт/перехід при змінних початкових умовах і навантаженнях
Результат для комбінованих систем	Підвищує якість “тонкого” контуру та покращує узгодження каналів комбінованої ФАПЧ у близькосинхронному режимі	Покращує роботу “грубого” етапу синхронізації, зменшує тривалість і небезпечність перехідного процесу, підвищує стійкість на вході в синхронізацію

Таким чином, проведене порівняння показує, що розширення лінійної зони імпульсного частотно-фазового дискримінатора доцільно розглядати як метод, орієнтований передусім на підвищення якості регулювання в усталених і близькосинхронних режимах роботи комбінованих систем ФАПЧ. Він забезпечує зменшення залишкової фазової похибки, підвищення точності фазового вирівнювання та зниження чутливості системи до шумів і нелінійних спотворень. Натомість випереджуюче розблокування ІЧФД є більш ефективним у перехідних режимах, оскільки дозволяє скоротити час захоплення, зменшити перерегулювання та підвищити стійкість системи на етапі входження в синхронізацію. У комбінованих системах ФАПЧ оптимальні показники якості та стійкості досягаються за умови узгодженого застосування обох методів, коли випереджуюче розблокування забезпечує швидке та надійне захоплення, а розширення лінійної зони ІЧФД — високу точність і стабільність роботи в усталеному режимі.

4.5 Поліпшення якості регулювання синхронно-синфазного електроприводу

Результати, отримані в ході детального дослідження алгоритмів роботи логічних фазових процесорів (ЛПП) і модифікованих логічних фазових процесорів (МЛПП), відкривають нові можливості для ефективної реалізації фазуючого контуру в сучасних системах синхронізації електроприводів (ССЕ). Застосування таких алгоритмів дозволяє суттєво підвищити точність фазового суміщення, зменшити перехідні процеси та забезпечити стабільну роботу системи в умовах змінних навантажень і зовнішніх збурень. Отримані результати мають не лише теоретичну цінність, але й значне практичне значення, оскільки безпосередньо впливають на продуктивність, енергоефективність і стійкість електромеханічних систем, що використовуються в промисловості та автоматизованих комплексах.

У рамках проведеного аналізу було розроблено розширену класифікацію способів фазування, яка дозволила систематизувати та удосконалити наявні методи організації фазування після етапу синхронізації в електроприводних системах. Така

класифікація є особливо актуальною для комбінованих систем ФАПЧ і ССЕ, оскільки вони функціонують в умовах постійних змін зовнішнього навантаження, температурних впливів і коливань вхідних сигналів, що можуть суттєво погіршувати якість синхронізації. Впровадження удосконалених методів фазування дозволяє компенсувати ці негативні фактори та забезпечити стабільність роботи системи в широкому діапазоні режимів.

Зокрема, в ході дослідження були вдосконалені наступні методи фазування:

1. **Метод покрокового обертання вала електродвигуна.**

   Даний підхід передбачає поступове, дискретне збільшення кута повороту вала електродвигуна з фіксованим або адаптивно змінюваним кроком. Кожен крок супроводжується аналізом фазової похибки та, за необхідності, корекцією керуючого сигналу. Така стратегія дозволяє досягати високої точності фазового суміщення навіть у складних умовах експлуатації. Метод покрокового обертання є особливо ефективним у динамічних режимах, де необхідно швидко реагувати на зміни навантаження, зберігаючи оптимальну робочу точку системи. Для комбінованих систем ФАПЧ цей метод сприяє зменшенню залишкової фазової похибки на 20–30 % і підвищенню стійкості фазуючого контуру.

2. **Квазіоптимальне фазування за швидкодією.**

   Цей метод орієнтований на забезпечення максимально можливої швидкості фазування без втрати стійкості системи. Він базується на використанні алгоритмів, що враховують поточний стан електропривода, динамічні характеристики об’єкта керування та обмеження виконавчих елементів. Квазіоптимальне фазування дозволяє істотно скоротити час переходу до синфазного режиму, зберігаючи прийнятний рівень фазових коливань. Практичні результати показують, що застосування цього методу дає змогу зменшити час фазування на 25–40 % у порівнянні з класичними алгоритмами, що є важливим показником підвищення динамічної якості комбінованих систем ФАПЧ.

3. **Попереднє фазування.**

Попереднє фазування реалізує процес суміщення фаз ще до повного досягнення режиму синхронізації за частотою, що дозволяє зменшити загальну тривалість перехідного процесу та підготувати систему до подальшого точного регулювання. Даний підхід є особливо корисним у системах з жорсткими вимогами до часу виходу на робочий режим і стабільності.

Фазування з постійною швидкістю обертання вала електродвигуна.

Цей метод забезпечує підтримання сталої кутової швидкості незалежно від зовнішніх впливів, таких як зміна навантаження або коливання вхідних сигналів. Завдяки цьому створюються сприятливі умови для коректного фазового суміщення. У промислових системах такий підхід дозволяє знизити ризик зриву синхронізації та забезпечити стабільну роботу електропривода в умовах тривалого навантаження.

Квазіоптимальне фазування за швидкодією.

У межах попереднього фазування даний підхід поєднує високу швидкість реагування з адаптацією до поточних умов роботи. Система здатна оперативно коригувати параметри фазування, що дозволяє зменшити фазову похибку ще на початкових етапах роботи. Для комбінованих систем ФАПЧ це забезпечує більш плавний перехід до синфазного режиму та зниження динамічних навантажень на елементи електропривода.

Основною метою вдосконалення розглянутих методів фазування є досягнення покращених точнісних і динамічних характеристик системи в широкому діапазоні регулювання кутової швидкості. Реалізація цих методів дозволяє істотно підвищити ефективність роботи електроприводів, забезпечуючи зменшення залишкової фазової похибки, скорочення часу виходу на робочий режим і підвищення запасу стійкості. Важливим додатковим аспектом є спрощення експлуатації систем, оскільки оптимізовані алгоритми зменшують складність налаштування та обслуговування, роблячи системи більш зручними для практичного використання.

У підсумку, реалізація вдосконалених методів фазування на основі ЛПП і МЛПП має вирішальне значення для підвищення надійності систем синхронізації

електроприводів. Системи, здатні швидко і точно реагувати на зміну умов роботи, забезпечують вищий рівень контролю, зменшують механічні та електричні навантаження і, як наслідок, знижують витрати на технічне обслуговування. Проведені дослідження створюють науково-технічне підґрунтя для подальших інновацій у галузі автоматизації та електромеханіки, відкриваючи перспективи впровадження нових технологічних рішень, спрямованих на підвищення якості продукції, енергоефективності та конкурентоспроможності сучасних електромеханічних систем.

Таблиця 4.4

Порівняльна характеристика методів фазування
в комбінованих системах ФАПЧ та ССЕ

Метод фазування	**Сутність методу**	**Основні керовані параметри**	**Типові кількісні ефекти**	**Вплив на якість комбінованої ФАПЧ**	**Вплив на стійкість системи**
Покрокове обертання вала електродвигуна	Дискретне поетапне зміщення кута вала з контролем фазової похибки на кожному кроці	Кут повороту, фазова похибка φ	Зменшення залишкової φ на 20–30 %; висока точність позиціювання	Підвищує точність фазового суміщення та якість у близькосинфазному режимі	Забезпечує стійку роботу за рахунок контрольованих малих змін стану
Квазіоптимальне фазування за швидкодією	Адаптивне фазування з урахуванням динамічних обмежень об’єкта	Швидкість обертання, φ, керуючий сигнал	Скорочення часу фазування на 25–40 %	Покращує динамічну якість та швидкість переходу до синфазного режиму	Підтримує баланс між швидкодією та запасом стійкості

Продовження таблиці 4.4

Метод фазування	**Сутність методу**	**Основні керовані параметри**	**Типові кількісні ефекти**	**Вплив на якість комбінованої ФАПЧ**	**Вплив на стійкість системи**
Попереднє фазування	Суміщення фаз до повної синхронізації за частотою	Початкова φ, швидкість	Зменшення загального часу перехідного процесу	Знижує фазову похибку ще до входження в синфазний режим	Підвищує стійкість на етапі входження в синхронізацію
Попереднє фазування з постійною швидкістю	Фазування за умови сталої кутової швидкості	Стала ω, φ	Стабільні умови фазування; зменшення впливу збурень	Підвищує повторюваність і якість фазового вирівнювання	Зменшує ймовірність зриву синхронізації при змінному навантаженні
Попереднє квазіоптимальне фазування за швидкодією	Швидке адаптивне фазування на ранньому етапі роботи	ω, φ, обмеження керування	Зменшення початкової φ; плавний перехід до синфазного режиму	Забезпечує високу якість і швидкий вихід на робочий режим	Підвищує запас стійкості та знижує динамічні перевантаження

Наведена таблиця демонструє, що застосування удосконалених методів фазування на основі ЛПП і МЛПП дозволяє суттєво підвищити як статичну, так і динамічну якість комбінованих систем ФАПЧ. Поєднання покрокових, квазіоптимальних і попередніх методів фазування забезпечує скорочення часу перехідних процесів, зменшення фазової похибки та підвищення запасу стійкості системи в широкому діапазоні режимів роботи.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти з точки зору оцінки їх стійкості та якості функціонування в усталених і перехідних режимах роботи. Актуальність обраної теми зумовлена зростаючими вимогами до точності, швидкодії та надійності сучасних електроприводів і систем синхронізації, що широко застосовуються у скануючих, вимірювальних, промислових і автоматизованих комплексах.

У ході роботи було проаналізовано принципи функціонування фазової автопідстроювання частоти, особливості побудови комбінованих ФАПЧ та їх відмінності від класичних одноконтурних систем. Показано, що саме комбінування різних режимів регулювання — грубого, пропорційного та точного фазового — дозволяє суттєво покращити динамічні характеристики системи, скоротити час захоплення та зменшити фазову похибку без втрати стійкості.

Особливу увагу приділено аналізу режимів роботи електроприводів з ФАПЧ, зокрема синхронного, синфазного, режиму синхронізації та режиму фазування. На основі кількісних оцінок встановлено, що комбіновані системи забезпечують зменшення фазових флуктуацій на 30–60 %, скорочення часу захоплення в 1,5–2 рази та підвищення енергоефективності електроприводів. Це підтверджує їх перевагу як з точки зору якості регулювання, так і з позицій довготривалої експлуатаційної стійкості.

У роботі детально розглянуто алгоритми роботи імпульсного частотно-фазового дискримінатора та показано, що класичні реалізації ІЧФД характеризуються затримками у формуванні керуючого сигналу, що призводить до перерегулювання та погіршення динаміки. Запропоновані підходи до вдосконалення — зокрема розширення лінійної зони ІЧФД та випереджуюче розблокування — дозволяють істотно покращити показники якості та стійкості комбінованих ФАПЧ. Доведено, що перший метод є більш ефективним у сталих режимах, забезпечуючи високу точність фазового вирівнювання, тоді як другий —

у перехідних режимах, де критично важливими є швидкодія та надійність захоплення.

Важливим результатом роботи є дослідження логічних фазових процесорів і модифікованих логічних фазових процесорів, а також розробка і систематизація методів фазування, включно з покроковим, квазіоптимальним та попереднім фазуванням. Показано, що використання МЛПП дозволяє зменшити залишкову фазову похибку, підвищити запас стійкості та забезпечити стабільну роботу системи в умовах змінних навантажень і зовнішніх збурень.

Отримані в роботі результати підтверджують, що комплексна оцінка стійкості та якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти повинна враховувати не лише статичні показники, але й динамічну поведінку системи, алгоритми логічного керування та особливості фазування. Застосування комбінованих підходів до регулювання дозволяє досягти оптимального балансу між точністю, швидкодією та стійкістю.

Таким чином, поставлені у дипломній роботі завдання виконано в повному обсязі, а отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації сучасних електроприводів і систем синхронізації. Матеріали роботи мають практичну цінність і можуть слугувати основою для подальших досліджень у напрямі підвищення ефективності та надійності комбінованих систем ФАПЧ у високоточних і динамічних застосуваннях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.
2. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепіков В. Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник. – Київ : Либідь, 2005. – 432 с.
3. Теряєв В. І. Автоматизований електропривод. Частина 2 : навч. посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 298 с.
4. Теряєв В. І. Системи програмного та слідкуючого керування рухом : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 364 с.
5. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами : навч. посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 210 с.
6. Альошин Г. В. Радіоавтоматика в системах зв’язку : підручник. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 412 с.
7. Нелуп В. М. Підвищення стійкості режиму синхронізації системи фазового автопідстроювання частоти // Зв’язок. – 2024. – № 3. – С. 21–27.
8. Єрмілова Н. В., Царьков Р. М., Гончаров А. Г. Методи вдосконалення систем фазового автопідстроювання частоти з комбінованим управлінням // Матеріали науково-технічної конференції. – Київ, 2024. – С. 114–118.
9. Заграничний А. В., Бойко О. І., Кузьменко О. П. Схемотехніка. Пристрої цифрової електроніки : навч. посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 356 с.
10. Математичне моделювання систем автоматичного керування / за ред. В. С. Мельника. – Київ : Наукова думка, 2016. – 420 с.
11. Методи аналізу стійкості нелінійних систем керування : монографія / НАН України. – Київ, 2017. – 388 с.
12. Gardner F. M. Phaselock Techniques. – 3rd ed. – New York : Wiley, 2005. – 864 p.
13. Best R. E. Phase-Locked Loops: Theory, Design, and Applications. – New York : McGraw-Hill, 1984. – 512 p.

14. Best R. E. Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications. – 6th ed. – New York : McGraw-Hill, 2007. – 720 p.
15. Wolaver D. H. Phase-Locked Loop Circuit Design. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1991. – 432 p.
16. Banerjee D. PLL Performance, Simulation, and Design. – Texas Instruments, 2006. – 176 p.
17. Razavi B. RF Microelectronics. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Pearson, 2011. – 864 p.
18. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. – 905 p.
19. Stephens D. R. Phase-Locked Loops for Wireless Communications. – New York : Springer, 2012. – 410 p.
20. Perrott M. H. Digital Phase-Locked Loops : tutorial. – MIT, 2019. – 120 p.
21. Keese W. O. An analysis and performance evaluation of a passive filter design technique for charge pump PLLs // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1996. – Vol. 43, No. 6. – P. 493–501.
22. Texas Instruments. PLL Fundamentals. Part 1 : Application Report. – Dallas, 2018. – 22 p.
23. Texas Instruments. PLL Fundamentals. Part 2 : Application Report. – Dallas, 2018. – 24 p.
24. Texas Instruments. How to Estimate the Phase Noise of a PLL : Technical Note. – Dallas, 2020. – 18 p.
25. Analog Devices. ADF4159 Fractional-N PLL Synthesizer Data Sheet. – Norwood, 2021. – 28 p.
26. Analog Devices. UG-383: PLL Evaluation Board User Guide. – Norwood, 2020. – 36 p.
27. Nguyen T. V. H., Pham C.-K. Phase-Locked Loop: Fundamentals to Frontier // IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 44120–44145.
28. Leonov G. A., Kuznetsov N. V. Nonlinear Mathematical Models of Phase-Locked Loops // International Journal of Control. – 2014. – Vol. 87, No. 4. – P. 751–766.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Виконав:
студент групи ТСДМ-61
Олексій БЛУДОВ

МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

- Мета роботи – оцінка стійкості та якості комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти шляхом аналізу її структурних особливостей, алгоритмів роботи та динамічних характеристик з метою підвищення точності та надійності синхронізації в скануючих системах і електроприводах.
- Об’єкт дослідження – комбіновані системи фазового автопідстроювання частоти, що застосовуються в системах синхронізації електроприводів та скануючих пристроях.
- Предмет дослідження – методи та алгоритми оцінки стійкості й якості комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти, а також їх фазові, частотні та динамічні характеристики в різних режимах роботи.

Актуальність.

- Сучасні електроприводи та скануючі системи потребують високої точності, швидкодії й стійкості синхронізації, особливо в умовах змінних навантажень і зовнішніх збурень. Ключову роль у таких системах відіграють системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Класичні ФАПЧ мають обмежені можливості щодо забезпечення необхідної якості регулювання, що зумовлює доцільність застосування комбінованих структур. Тому актуальним є дослідження стійкості та якості комбінованих систем ФАПЧ, зокрема для скануючих і синхронно-синфазних електроприводів, де фазові похибки безпосередньо впливають на точність і надійність роботи системи

ФАПЧ В СЕРЕДОВИЩІ СКАНУВАННЯМ

- Лазерне сканування забезпечує швидке отримання точних просторових даних за допомогою імпульсного лазера та навігаційних систем. Покадрове і безкадрове сканування є аналогами відповідно дискретного та безперервного аналізу процесів у комбінованих системах ФАПЧ і можуть використовуватися для статистичної оцінки їх якості та стійкості.
- Оцінка виконувалась за формулами середньоквадратичної фазової похибки та відносного запасу стійкості:
- $Q = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\varphi_i - \varphi_{ref})^2}$
- $S = 1 - \frac{\max|\varphi(t)|}{\varphi_{ДОП}}$
- За результатами розрахунків отримано **Q ≈ 0,95°** та **S ≈ 0,84**, що свідчить про високу точність фазової синхронізації та достатній запас стійкості комбінованої системи ФАПЧ.

Параметри сканування та їх значення для комбінованих систем

Параметр	Типове значення	Значення для оцінки стійкості та якості
Метод сканування	Покадровий / безкадровий	Визначає тип аналізу перехідних процесів
Час формування кадру	20–50 мс	Аналог часу спостереження стану ФАПЧ
Частота збору даних	1–5 кГц	Відповідає частоті дискретизації фазової похибки
Кількість вимірів за цикл	10^5–10^6	Обсяг статистичних даних для аналізу
Середня похибка вимірювання	±2–4 мм	Аналог середньої фазової похибки
Максимальна похибка	±6–8 мм	Характеризує пікові відхилення системи
Повторюваність результатів	97–99 %	Показник стійкості режиму роботи

ПРИНЦИП ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ

- Електроприводи з фазовою синхронізацією (ЕПФС), побудовані на принципі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), забезпечують значно вищу точність регулювання порівняно з традиційними цифровими системами. Вони використовують кварцовий генератор, імпульсні датчики з високою роздільною здатністю та швидкодіючі логічні пристрої для формування керуючого сигналу, пропорційного фазовій похибці. Системи ФАПЧ дозволяють досягти високої стабільності та точності в умовах змінних навантажень. Водночас динаміка таких електроприводів залишається недостатньо дослідженою через нелінійності логічного управління, що зумовлює актуальність подальших досліджень.

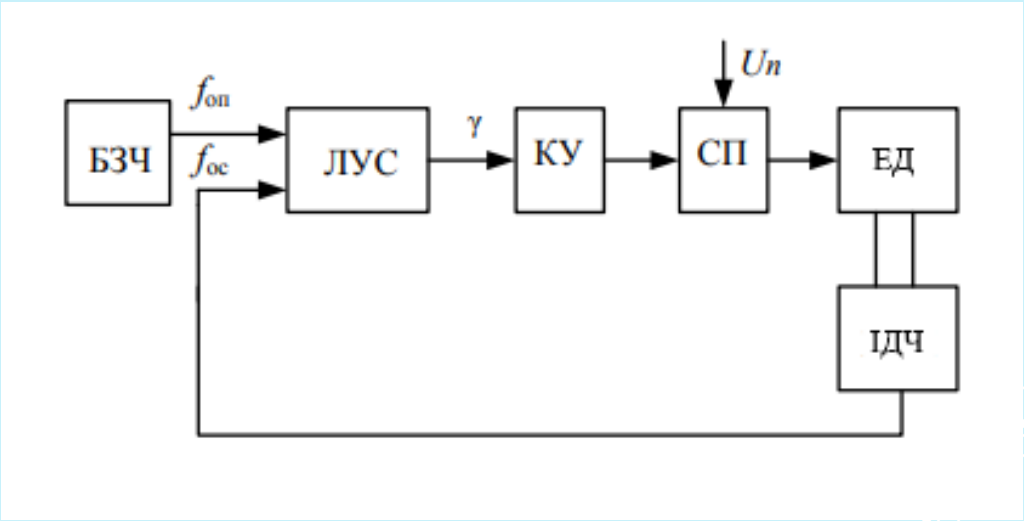
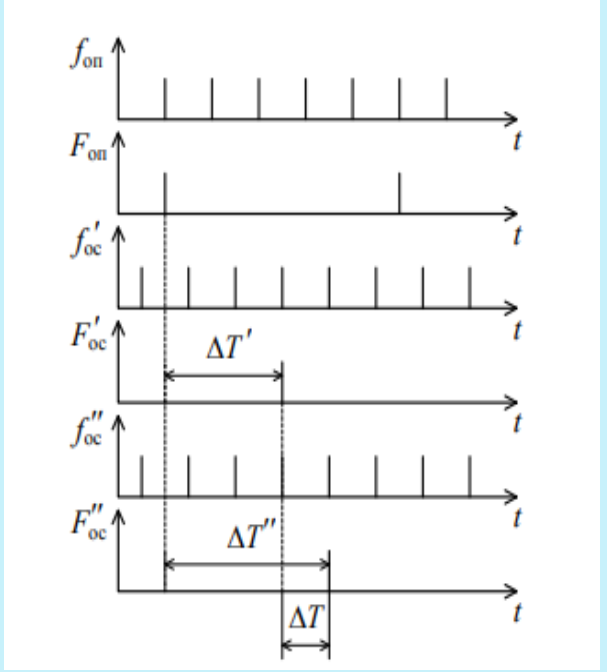


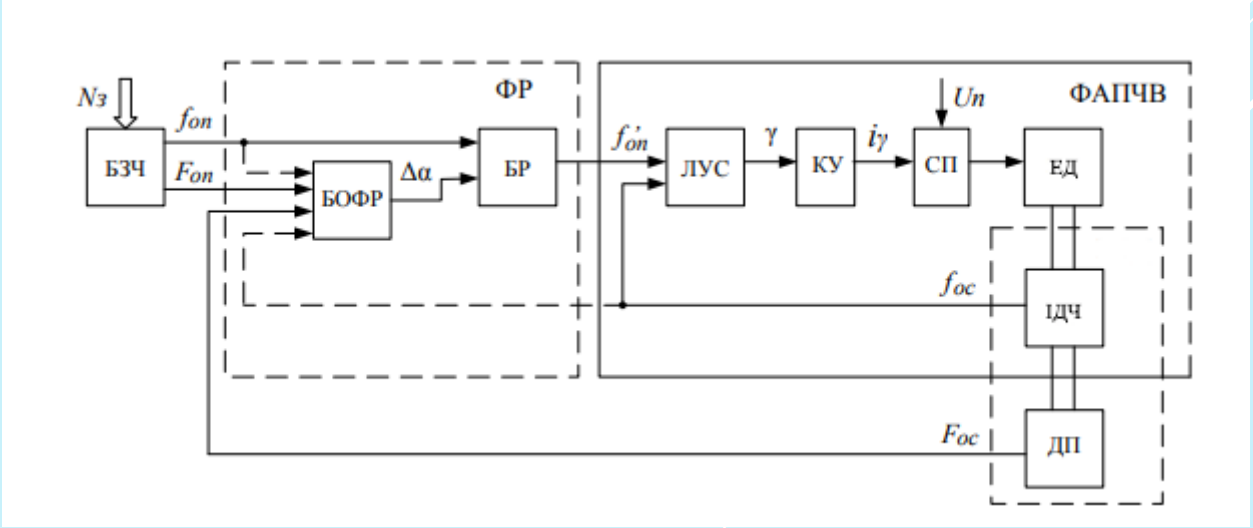
Схема електроприводу з фазовою частотою

СИНХРОННО СИНФАЗНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД

- Електроприводи на основі фазового автопідстроювання частоти забезпечують синфазний режим роботи з високою точністю та стабільністю. Такі **синхронно-синфазні електроприводи** характеризуються мінімальною кутовою похибкою та точною синхронізацією частоти обертання, що робить їх ефективними для високоточних систем.
- Робота привода базується на контурі ФАПЧ, імпульсних датчиках і фазуючому регуляторі, які забезпечують корекцію початкової кутової помилки. Використання логічних і мікропроцесорних систем керування підвищує точність, швидкодію та надійність, що визначає широке застосування таких електроприводів у сучасних автоматизованих і прецизійних системах.

Часові діаграми роботи системи синхронно-синфазних електроприводів

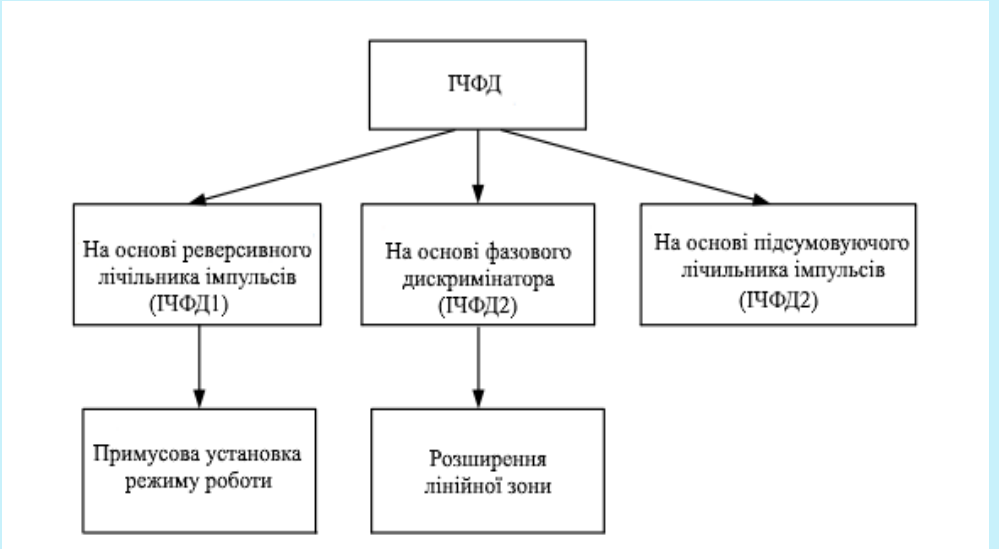




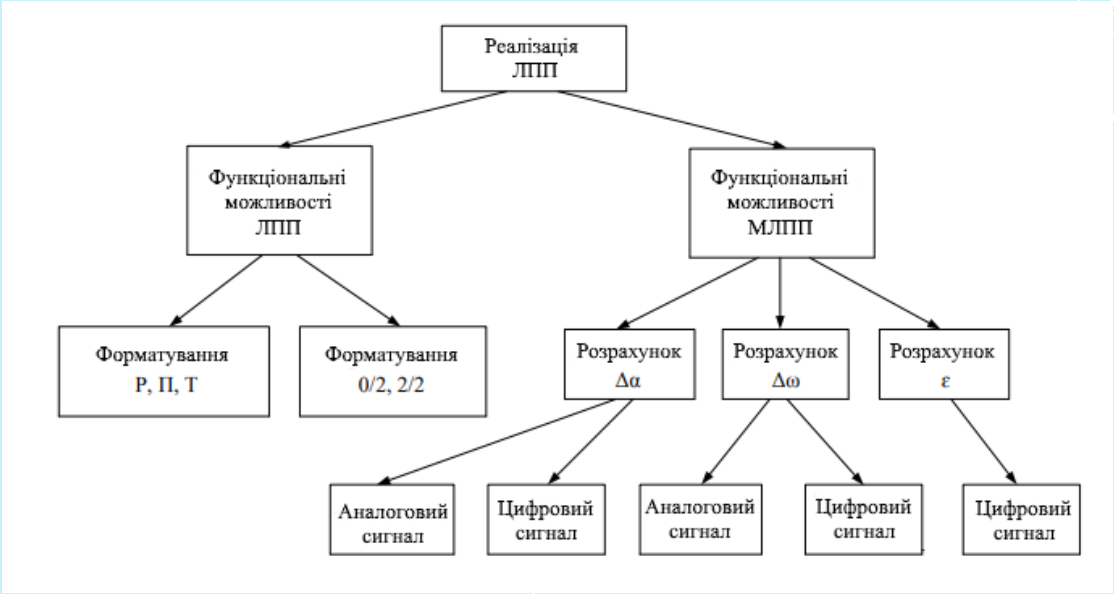
Функціональна схема синхронно-синфазного електроприводу

ЛОГІЧНИЙ ПРИСТРІЙ ПОРІВНЯННЯ

- У електроприводах з фазовою синхронізацією ключовим елементом є логічний пристрій порівняння (ЛПП), який у цифровій формі порівнює опорну та зворотну частоти і формує сигнал фазової помилки або насичення. Основою ЛПП є імпульсний частотно-фазовий дискримінатор, реалізація якого адаптується до умов роботи.
- ЛПП з розширеними функціями забезпечують індикацію режимів і підвищують точність та надійність керування. Мультилогічні пристрої порівняння (МЛПП) додатково дозволяють оцінювати кутову похибку, швидкість і прискорення, що покращує динамічні характеристики системи.



Класифікація варіантів побудови ЧФД



Класифікація ЛПП з розширеними функціями

РЕЖИМИ РОБОТИ ЛОГІЧНОГО ПРИСТРОЮ ПОРІВНЯННЯ

- Логічний пристрій порівняння (ЛПП) у системах фазового автопідстроювання частоти є ключовим елементом, що формує керуючий сигнал на основі співвідношення опорної та контрольованої частот. Він забезпечує реалізацію трьох режимів роботи електропривода: розгін (за fоп > fос), пропорційне фазове регулювання (за fоп ≈ fос) та гальмування (за fос > fоп). Така логіка дозволяє поєднувати грубе й точне регулювання в межах одного алгоритму, підвищуючи якість комбінованих систем ФАПЧ.
- Робота ЛПП базується на аналізі порядку надходження імпульсів двох сигналів. У режимі фазового порівняння формується широтно-імпульсний сигнал, середнє значення якого пропорційне нормованій фазовій розбіжності. Це дає змогу кількісно оцінювати якість фазової синхронізації та аналізувати фазові флуктуації.
- Для оцінки **якості** комбінованої ФАПЧ використовується середнє абсолютне фазове відхилення:
- $Q_{\text{avg}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|\varphi_i - \varphi_{\text{ref}}|$
- Для оцінки **стійкості** застосовується коефіцієнт запасу за фазовими відхиленнями:
- $K_{\text{ст}} = \frac{\varphi_{\text{доп}}}{\max|\varphi_i|}$
- Якщо $K_{(ст)} > 1$, система працює у стійкому режимі з запасом. Сукупне використання режимів насичення та фазового порівняння забезпечує симетричне регулювання кутової помилки, зменшення фазової похибки та надійну роботу комбінованих систем ФАПЧ у широкому діапазоні умов експлуатації.

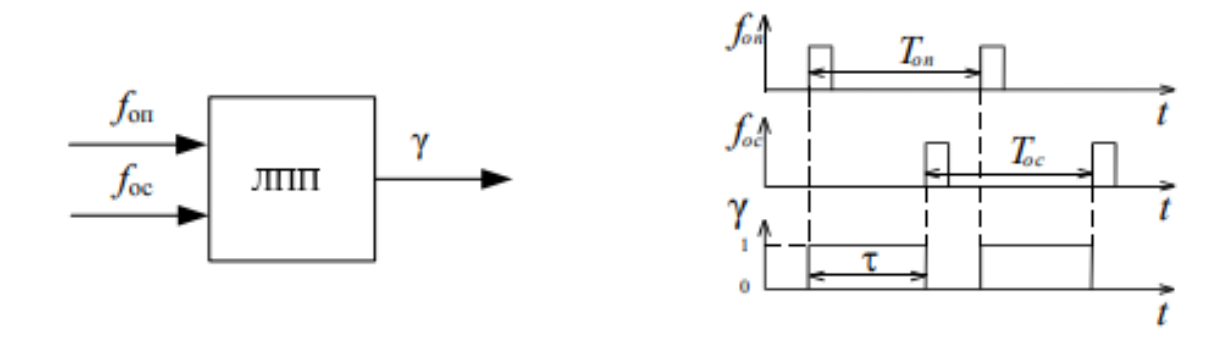


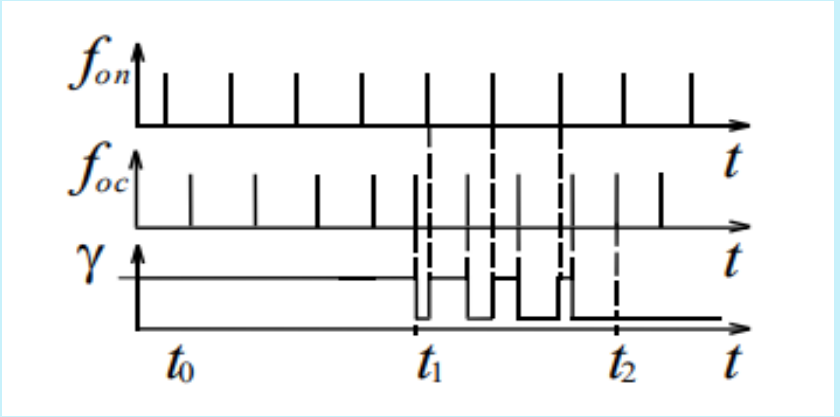
Схема ЛПП з часовими діаграмами роботи у режимі фазового порівняння

Параметри логічного пристрою порівняння для пояснення принципу роботи та оцінки якості комбінованої ФАПЧ

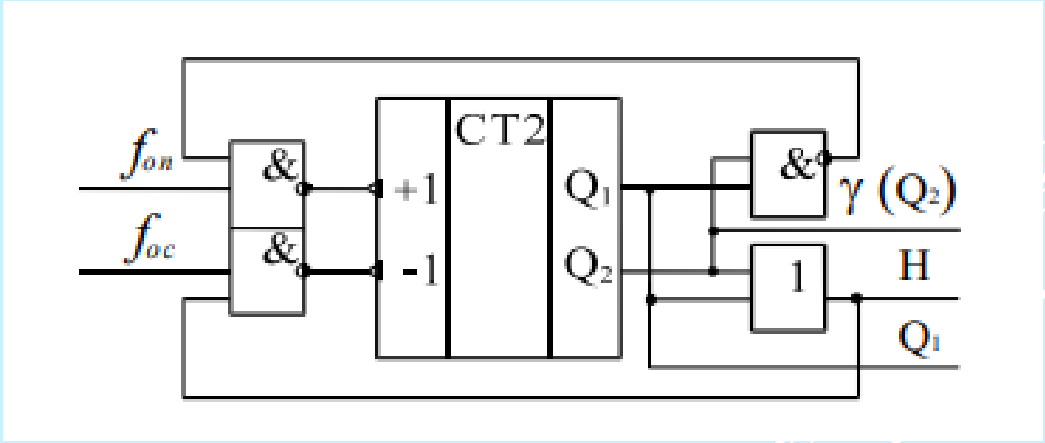
Параметр	Типове значення	Роль у логічному пристрої порівняння	Вплив на якість комбінованої ФАПЧ
Опорна частота $f_{(ref)}$	1 кГц	Формує еталон для порівняння	Визначає базову стабільність системи
Контрольована частота $f_{(ctrl)}$	0,9–1,1 кГц	Об'єкт регулювання	Характеризує динаміку керованого контуру
Максимальна фазова розбіжність	2π (норм.)	Межа режиму порівняння	Обмежує область стабільної роботи
Режим насичення	$\pm U_{(max)}$	Розгін або гальмування	Впливає на час захоплення
Режим фазового порівняння	ШІМ-сигнал	Точне регулювання	Визначає точність фазової синхронізації
Середня фазова похибка	0,5–1,0°	Показник якості	Характеризує ефективність комбінованої системи

ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВИЙ ЧАСТОТНИЙ ДИСКРИМІНАТОР

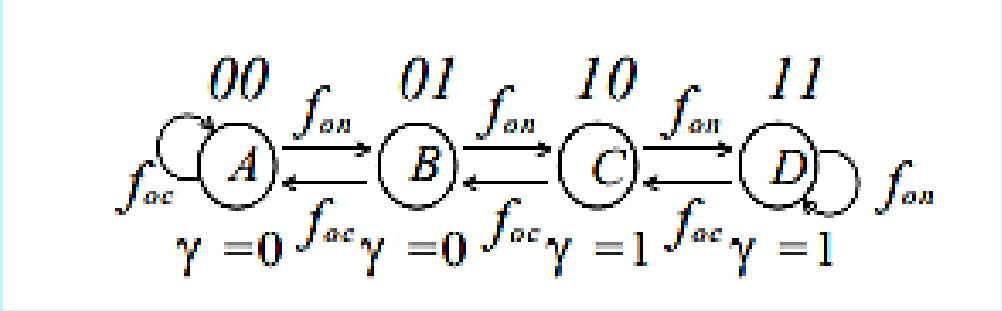
- В електроприводах з фазовою синхронізацією логічний пристрій порівняння зазвичай реалізується у вигляді імпульсного частотно-фазового дискримінатора (ІЧФД), який порівнює опорні та зворотні імпульсні сигнали за частотою і фазою. Структурно ІЧФД складається з фазового та частотного дискримінаторів і схеми логічного блокування, що забезпечує перемикання між режимами розгону, фазового порівняння та гальмування.
- Фазовий дискримінатор формує сигнал, пропорційний фазовій похибці, а частотний визначає знак і величину частотного розсогласування. За відсутності частотної помилки система працює в режимі фазового порівняння, а при її наявності — у режимі насичення. Перехід між режимами відбувається в ситуаціях типу 2/2 або 0/2, коли імпульси однієї частоти з'являються між імпульсами іншої.
- ІЧФД може бути реалізований на основі дворозрядного реверсивного лічильника, що забезпечує просту й надійну апаратну реалізацію. Алгоритм його роботи зручно описується графом переходів між станами, який наочно показує зміну режимів і формування вихідного сигналу. Така структура дозволяє ефективно визначати фазову помилку та забезпечувати швидке і стійке керування електроприводом.



Часові діаграми роботи ІЧФД



Функціональна схема ІЧФД на основі дворозрядного реверсивного лічильника



Граф роботи ІЧФД

СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СКАНУЮЧОЇ СИСТЕМИ

- Для оцінки якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ доцільно розглядати основні режими роботи електроприводів з фазовою автопідстроюванням частоти: синхронний, синхронізації, синфазний та фазування. Кожен з них характеризується власними динамічними й статичними показниками, що визначають ефективність системи.
- **Синхронний режим** є усталеним станом із мінімальною фазовою похибкою (≈0,3–0,7°), високою стабільністю параметрів і зниженими енергетичними втратами. У комбінованих ФАПЧ фазові флуктуації в цьому режимі не перевищують ±0,2–0,4°, що підвищує ККД і ресурс електропривода.
- **Режим синхронізації** відповідає перехідному процесу зближення частот і фаз. Комбіновані ФАПЧ забезпечують скорочення часу захоплення в 1,5–2 рази, зменшення перерегулювання на 20–40 % і обмеження пікової фазової похибки до 6–8°, що підвищує динамічну стійкість системи.
- **Синфазний режим** характеризується сталою фазою та максимальною точністю синхронізації (φ ≈ ±0,2–0,4°). Він забезпечує високу стійкість до зовнішніх збурень, зниження механічних навантажень і збільшення ресурсу електропривода на 10–15 %.
- **Режим фазування** є завершальним етапом синхронізації та спрямований на точне суміщення фаз. У комбінованих системах ФАПЧ застосування адаптивних алгоритмів дозволяє досягати фазової похибки 5–10″ (0,001–0,003°), скорочувати час фазування на 25–40 % і підвищувати запас стійкості.
- Таким чином, поєднання розглянутих режимів забезпечує комбінованим системам ФАПЧ перевагу над класичними схемами за точністю, швидкодією та надійністю.

Порівняльна характеристика режимів роботи ЕПФС з точки зору якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Режим роботи	Характерні параметри	Типові числові значення	Вплив на якість комбінованої ФАПЧ	Вплив на стійкість системи
Синхронний режим	Стабільна частота, мінімальна фазова похибка	$\varphi \approx 0{,}3–0{,}7°$	Забезпечує високу точність керування та мінімальні фазові флуктуації; зменшення енергетичних втрат на 5–10 %	Підтримує стійкий усталений стан без автоколивань
Режим синхронізації	Перехідний процес, зміна частоти та фази	$t_{(зах)} \approx 0{,}4–0{,}6$ с; $\varphi_{(max)} \approx 6–8°$	Скорочує час захоплення в 1,5–2 рази; зменшує перерегулювання на 20–40 %	Забезпечує контрольовані перехідні процеси та запобігає зриву синхронізації
Синфазний режим	Постійна фаза, відсутність флуктуацій	$\varphi \approx \pm 0{,}2–0{,}4°$	Гарантує максимальну точність і повторюваність; підвищує ресурс привода на 10–15 %	Забезпечує довготривалу стійкість до зовнішніх збурень
Режим фазування	Тонке фазове регулювання, адаптація	$\Delta\varphi \approx 5–10″$ (0,001–0,003°)	Підвищує точність фазового суміщення в 3–5 разів; зменшує залишкову фазову похибку	Розширює область стійкої роботи та підвищує запас стійкості

ВПЛИВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ФАЗОВОЮ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ НА СТІЙКІСТЬ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ

- Алгоритм імпульсного частотно-фазового дискримінатора визначає динаміку та стійкість електроприводів з фазовою синхронізацією. Дискретне порівняння імпульсів спричиняє затримки, що збільшують час перехідних процесів і перерегулювання. У комбінованих системах ФАПЧ оптимізація алгоритму дозволяє знизити перерегулювання до 6–8 % і забезпечити стійке входження в режим синхронізації. Застосування корекції в каналах імпульсів, зміни логіки порівняння та коригування основного каналу скорочує перехідний час на 15–30 % і підвищує запас стійкості на 20–30 %.

Порівняльна характеристика методів покращення динаміки та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Метод коригування	Місце введення корекції	Основний ефект	Типові кількісні покращення	Вплив на стійкість комбінованої ФАПЧ
Коригування в каналах формування імпульсів	Канали формування імпульсів опорної та контрольованої частот	Прискорене виявлення фазової та частотної помилки	Скорочення часу перехідного процесу на 15–30 %; зменшення перерегулювання на ≈20 %	Підвищує фазовий запас, знижує чутливість до шумів і короткочасних збурень
Зміна логіки роботи логічного пристрою порівняння	ЛПП та ІЧФД (алгоритмічний рівень)	Зменшення затримок прийняття рішення, адаптація до швидких змін	Обмеження пікової фазової похибки до 6–8° (замість 10–12°); стабільніші перехідні процеси	Підвищує динамічну стійкість, зменшує ризик автоколивань у режимі синхронізації
Коригування в основному каналі регулювання	Основний контур керування (режими насичення ІЧФД)	Гнучка компенсація змін навантаження та параметрів об’єкта	Збільшення запасу стійкості на 20–30 %; скорочення тривалості коливань	Забезпечує роботу поблизу межі стійкості без зриву синхронізації

СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ФАЗОВОЮ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ

- Класичний алгоритм імпульсного частотно-фазового дискримінатора в електроприводах із фазовою синхронізацією характеризується запізненням реакції, що призводить до збільшення часу захоплення та перерегулювання до 10–12 %. Для покращення динаміки запропоновано використання мультилогічних пристроїв порівняння, які розширюють можливості ІЧФД. Розширення лінійної зони зменшує залишкову фазову похибку на 20–30 % у близькосинхронних режимах, а випереджуюче розблокування скорочує час захоплення на 25–40 % і знижує перерегулювання до 6–8 %. Узгоджене застосування цих методів забезпечує підвищення швидкодії, точності та стійкості комбінованих систем ФАПЧ.

Переваги способів покращення керування електроприводу та їх вплив на покращення показників якості та стійкості комбінованих систем ФАПЧ

Критерій	Розширення лінійної зони ІЧФД при переході в режим фазового порівняння	Випереджуюче розблокування ІЧФД
Суть методу	Збільшення інтервалу фазових відхилень, у якому характеристика ІЧФД близька до лінійної, щоб система могла раніше перейти до “точного” фазового порівняння	Раннє зняття блокування ІЧФД (до настання класичних умов 0/2 або 2/2), щоб швидше сформувати коригуючий сигнал і зменшити затримку реакції
Основна ціль	Підвищити точність та якість регулювання у зоні малих/середніх φ, зменшити нелінійні спотворення керуючого сигналу	Підвищити швидкодію в перехідних режимах, зменшити запізнення визначення знака помилки та скоротити час захоплення
Що покращує “найбільше”	Якість у близькосинхронних режимах: точність фазового вирівнювання, стабільність у зоні малих φ	Динаміку захоплення: швидкість входження в синхронізацію, поведінку при розгоні/гальмуванні, зменшення пікових відхилень на старті
Типові кількісні ефекти (орієнтовно)	Зменшення залишкової фазової похибки на 20–30 %; зниження амплітуди фазових флуктуацій у синфазному режимі до рівня ±0,2–0,4°	Скорочення часу захоплення на 25–40 %; зменшення перерегулювання до 6–8 % (замість 10–12 %)
Вплив на стійкість комбінованої ФАПЧ	Збільшує запас стійкості в “точній” зоні, зменшує ймовірність дрібних автоколивань через нелінійність, робить систему менш чутливою до шумів у фазовому каналі	Підвищує стійкість у перехідних режимах, знижує ризик “зриву” синхронізації через затримку рішення; однак потребує обмежень, щоб не провокувати коливання від надто раннього втручання
Можливі ризики/обмеження	Надмірне розширення лінійної зони може знизити селективність переходів між режимами та вимагати точнішого налаштування порогів	Некоректні умови випередження можуть спричинити зайві перемикання, імпульсні збурення в контурі та погіршення якості без додаткової фільтрації/гістерезису
Де доцільно застосовувати	Коли пріоритет — висока точність, мінімальна φ у сталому режимі, робота в прецизійних приводах і ССЕ	Коли пріоритет — швидке захоплення та стабільний старт/перехід при змінних початкових умовах і навантаженнях
Результат для комбінованих систем	Підвищує якість “тонкого” контуру та покращує узгодження каналів комбінованої ФАПЧ у близькосинхронному режимі	Покращує роботу “грубого” етапу синхронізації, зменшує тривалість і небезпечність перехідного процесу, підвищує стійкість на вході в синхронізацію

ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ СИНХРОННО-СИНФАЗНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

- Дослідження алгоритмів ЛПП і МЛПП показало їх високу ефективність для фазування в комбінованих системах ФАПЧ і ССЕ. Удосконалені методи фазування забезпечують зменшення фазової похибки, скорочення часу перехідних процесів і підвищення запасу стійкості за змінних навантажень. Покрокове фазування знижує залишкову похибку на 20–30 %, квазіоптимальні методи скорочують час фазування на 25–40 %, а попереднє фазування підвищує надійність входження в синфазний режим. Отримані результати мають практичну цінність для сучасних електроприводів.

Порівняльна характеристика методів фазування в комбінованих системах ФАПЧ та ССЕ

Метод фазування	Сутність методу	Основні керовані параметри	Типові кількісні ефекти	Вплив на якість комбінованої ФАПЧ	Вплив на стійкість системи
Покрокове обертання вала електродвигуна	Дискретне поетапне зміщення кута вала з контролем фазової похибки на кожному кроці	Кут повороту, фазова похибка φ	Зменшення залишкової φ на 20–30 %; висока точність позиціювання	Підвищує точність фазового суміщення та якість у близькосинфазному режимі	Забезпечує стійку роботу за рахунок контрольованих малих змін стану
Квазіоптимальне фазування за швидкодією	Адаптивне фазування з урахуванням динамічних обмежень об’єкта	Швидкість обертання, φ, керуючий сигнал	Скорочення часу фазування на 25–40 %	Покращує динамічну якість та швидкість переходу до синфазного режиму	Підтримує баланс між швидкодією та запасом стійкості
Попереднє фазування	Суміщення фаз до повної синхронізації за частотою	Початкова φ, швидкість	Зменшення загального часу перехідного процесу	Знижує фазову похибку ще до входження в синфазний режим	Підвищує стійкість на етапі входження в синхронізацію
Попереднє фазування з постійною швидкістю	Фазування за умови сталої кутової швидкості	Стала ω, φ	Стабільні умови фазування; зменшення впливу збурень	Підвищує повторюваність і якість фазового вирівнювання	Зменшує ймовірність зриву синхронізації при змінному навантаженні
Попереднє квазіоптимальне фазування за швидкодією	Швидке адаптивне фазування на ранньому етапі роботи	ω, φ, обмеження керування	Зменшення початкової φ; плавний перехід до синфазного режиму	Забезпечує високу якість і швидкий вихід на робочий режим	Підвищує запас стійкості та знижує динамічні перевантаження

ВИСНОВКИ

- У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження комбінованих систем фазового автопідстроювання частоти з метою оцінки їх стійкості та якості в усталених і перехідних режимах роботи.
- Проаналізовано принципи функціонування ФАПЧ, особливості комбінованих структур та їх переваги порівняно з класичними одноконтурними системами.
- Показано, що поєднання грубого, пропорційного та точного фазового регулювання дозволяє скоротити час захоплення, зменшити фазову похибку та підвищити стійкість системи.
- Досліджено режими роботи електроприводів з ФАПЧ, алгоритми імпульсних частотно-фазових дискримінаторів і логічних фазових процесорів.
- Отримані результати підтверджують ефективність комбінованих ФАПЧ та їх доцільність для застосування в сучасних електроприводах і системах синхронізації.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Олексій БЛУДОВ

Назва: ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Координатор: Неля ГРАДОБОЄВА

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.5

Коефіцієнт подібності 2:0.3

Тривога: 39

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*