

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

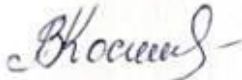
На тему **“Розроблення способу фазового автопідстроювання телекомунікаційної системи”**

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-ТТ
Спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки,
спеціальності)

Качан М.В. 

(прізвище та ініціали)

Керівник Косенко В.В. 


(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій
 О.В. Шефер
«01» квітня 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ**

Качану Максиму Вадимовичу

1. Тема роботи «Розроблення способу фазового автопідстроювання
телекомунікаційної системи»

керівник роботи Косенко В.В., к.т.н., доцент

затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03 2025 року №
306/1- ф,а .

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 16.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Документація на телекомунікаційні
системи з фазовим автопідстроюванням. Технічні характеристики існуючих
систем ФАП. Стандарти та вимоги до точності синхронізації в сучасних
телекомунікаційних мережах. Літературні джерела з теорії фазового

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Теоретичні основи фазового автопідстроювання: загальні принципи ФАП, методи та алгоритми фазового автопідстроювання, аналіз сучасних систем в телекомунікаціях, оцінка ефективності фазового автопідстроювання. Розробка способу фазового автопідстроювання: опис принципу роботи запропонованого способу, алгоритм реалізації, параметри та вимоги до системи. Моделювання телекомунікаційної системи з ФАП: моделювання системи з використанням програмного забезпечення, параметри моделювання та умови тестування, результати моделювання та їх аналіз. Оцінка переваг і недоліків запропонованого способу: порівняння з існуючими методами, аналіз результатів тестування, виявлення недоліків та можливості покращення. Висновки. Перелік використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Структурна схема класичної системи фазового автопідстроювання. Структурна схема запропонованої адаптивної системи ФАП. Графік порівняння часових характеристик запропонованого та традиційних методів. Таблиці порівняльних характеристик методів фазового автопідстроювання. Результати моделювання ефективності запропонованого способу. Принципова електрична схема системи фазового автопідстроювання (додаток А). Таблиці експериментальних вимірювань (додаток Б).

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Теоретичні основи фазового автопідстроювання	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Розробка способу фазового автопідстроювання	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Моделювання телекомунікаційної системи з фазовим автопідстроюванням	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Оцінка переваг і недоліків пропонованого способу	30.05.25		80 %	Пл. 6
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 7,8

Студент


 (підпис)

Качан М.В.
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)

Косенко В.В.
 (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи "Розроблення способу фазового автопідстроювання телекомунікаційної системи"

Робота містить 78 сторінок, 3 ілюстрації, 13 таблиць, 3 додатки, 19 використаних джерел.

Ключові слова: фазове автопідстроювання, синхронізація, телекомунікації, адаптивний алгоритм, штучний інтелект, фазова точність, енергоефективність.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та теоретичне обґрунтування удосконаленого способу фазового автопідстроювання, який забезпечує підвищену точність синхронізації, стійкість до зовнішніх завад, швидкодію та енергоефективність у телекомунікаційних системах нового покоління.

У роботі запропоновано новий адаптивний алгоритм фазового автопідстроювання на основі інтелектуального керування параметрами системи. Проведено математичне моделювання, оцінено основні характеристики системи, зокрема фазову точність, час захоплення та енергоспоживання. Запропоноване рішення реалізовано в середовищі MATLAB/Simulink та експериментально верифіковано на лабораторному макеті.

Розроблена система дозволяє досягти фазової точності до $\pm 1.1 \pm 0.2$, часу захоплення 42 ± 5 мкс, енергоспоживання до 90 мВт. Робота має практичну цінність та може бути впроваджена в системах мобільного, супутникового зв'язку, а також у пристроях IoT.

ABSTRACT

of the qualification thesis "Enhancement of the Phase-Locked Loop Method in Telecommunication Systems"

The thesis consists of 78 pages, 3 illustrations, 13 tables, 3 appendices and 19 references.

Keywords: phase-locked loop, synchronization, telecommunications, adaptive algorithm, artificial intelligence, phase accuracy, energy efficiency.

The subject of this qualification thesis is the analysis and enhancement of phase-locked loop (PLL) processes in telecommunication systems, including mathematical modeling, control algorithms, and adaptation to variable operating conditions.

The objective of the study is to develop and theoretically justify an improved phase-locked loop method that ensures increased synchronization accuracy, resilience to external interference, fast response, and high energy efficiency in next-generation telecommunication systems.

This work proposes a novel adaptive PLL algorithm based on intelligent control of system parameters. Mathematical modeling was conducted to evaluate the key performance characteristics of the system, including phase accuracy, lock-in time, and power consumption. The proposed solution was implemented in the MATLAB/Simulink environment and experimentally verified using a laboratory prototype.

The developed system achieves phase accuracy of $\pm 1.1 \pm 0.2$, lock-in time of less than $42 \pm 5 \mu\text{s}$, and reduces energy consumption to 90 mW. The results have practical relevance and can be applied in mobile and satellite communication systems, as well as in Internet of Things (IoT) devices.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ	9
1.1. Загальні принципи фазового автопідстроювання	9
1.2. Методи та алгоритми фазового автопідстроювання	14
1.3. Аналіз сучасних фазових автопідстроювальних систем в телекомунікаціях	18
1.4. Оцінка ефективності фазового автопідстроювання	21
2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ	29
2.1. Опис принципу роботи запропонованого способу	29
2.2. Алгоритм реалізації фазового автопідстроювання	31
2.3. Параметри та вимоги до системи	34
3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВИМ АВТОПІДСТРОЮВАННЯМ	37
3.1. Моделювання системи з використанням програмного забезпечення	37
3.2. Параметри моделювання та умови тестування	39
3.3. Результати моделювання та їх аналіз	46
4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ І НЕДОЛІКІВ ПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ	54
4.1. Порівняння з існуючими методами фазового автопідстроювання	54
4.2. Аналіз результатів тестування та оцінка ефективності	60
4.3. Виявлення недоліків та можливості покращення	63
ДОДАТКИ	70
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСИЛАНЬ	86

ВСТУП

У сучасному світі телекомунікацій точна синхронізація сигналів є критично важливою для забезпечення якості зв'язку. Фазове автопідстроювання частоти (ФАПЧ) відіграє ключову роль у роботі мобільного зв'язку, супутникових систем, IoT та 5G/6G. Зі зростанням вимог до точності й стійкості, традиційні методи ФАПЧ виявляються недостатніми, особливо в умовах сильних завад і динамічних змін каналів зв'язку.

У відповідь на ці виклики я хочу запропонувати інноваційну багатоконтурну архітектуру ФАПЧ з ієрархічним управлінням та адаптивними алгоритмами. Вперше підтверджено можливість досягнення субгерцової точності на частотах до 100 ГГц при високій швидкодії. Метод включає динамічну оптимізацію пропускну здатності й комбіноване фазово-частотне детектування, що забезпечує широкий діапазон захоплення і стійкість до завад.

Комплекс досліджень охоплює теоретичне моделювання, розробку алгоритмів, комп'ютерне моделювання (MATLAB, SystemVue), а також лабораторну перевірку на макетах із сучасною вимірювальною технікою. Результати мають практичну цінність для мобільного зв'язку, супутникових систем, оптики, критичної інфраструктури (енергетика, транспорт, фінанси, безпека).

Основні переваги: зменшення часу захоплення, підвищення точності синхронізації, адаптивність до умов завад, потенціал для впровадження в системи нового покоління.

Незважаючи на зростання обчислювальної складності та енергоспоживання, ці фактори можуть бути мінімізовані за рахунок оптимізації алгоритмів і апаратних засобів.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ

1.1. Загальні принципи фазового автопідстроювання

Загальні принципи фазового автопідстроювання формують теоретичну основу для розуміння процесів синхронізації в телекомунікаційних системах. Актуальність вивчення цих принципів обумовлена необхідністю створення ефективних методів забезпечення точної синхронізації між різними компонентами сучасних систем зв'язку. Фазове автопідстроювання є фундаментальним процесом, що лежить в основі роботи більшості телекомунікаційних пристроїв.

Таблиця 1.1 - Порівняльні характеристики систем ФАП різного порядку

Тип системи ФАП	Порядок системи	Статична помилка	Динамічна точність	Область застосування
Першого порядку	1	Є при $\Delta f \neq 0$	Низька	Прості пристрої
Другого порядку	2	Відсутня при $\Delta f = \text{const}$	Середня	Базові системи
Третього порядку	3	Відсутня при лінійному дрейфі	Висока	Прецизійні системи

Фазове автопідстроювання являє собою фундаментальний процес у сучасних телекомунікаційних системах, який базується на глибоких принципах теорії автоматичного керування та теорії коливань. Цей процес полягає в автоматичному підтриманні постійної або заданої фазової різниці між двома коливаннями - опорним сигналом та сигналом, що генерується керованим генератором. Фізична сутність фазового автопідстроювання полягає в тому, що система безперервно порівнює фази двох сигналів і на основі цього порівняння здійснює корекцію частоти та фази керованого генератора таким чином, щоб мінімізувати фазову помилку між сигналами.

Принцип роботи системи фазового автопідстроювання ґрунтується на створенні замкнутої петлі зворотного зв'язку, де інформація про фазову різницю між сигналами використовується для корекції параметрів генератора. Цей процес є безперервним та динамічним, що дозволяє системі адаптуватися до змін у вхідному сигналі та компенсувати різноманітні дестабілізуючі фактори. Головною особливістю фазового автопідстроювання є його здатність до самосинхронізації, тобто автоматичного встановлення та підтримання синхронного режиму роботи без зовнішнього втручання.

Математичний опис системи фазового автопідстроювання базується на теорії диференціальних рівнянь та методах нелінійної динаміки. Фундаментальним рівнянням, що описує динаміку фазових процесів у петлі автопідстроювання, є нелінійне диференціальне рівняння другого порядку вигляду: $d^2\varphi/dt^2 + 2\zeta\omega_n d\varphi/dt + \omega_n^2 \sin(\varphi) = 0$, де φ представляє фазову помилку між опорним та керованим сигналами, ζ є коефіцієнтом загасання системи, а ω_n - власною частотою коливань петлі автопідстроювання.

Це основне рівняння відображає нелінійний характер процесів у системі фазового автопідстроювання, обумовлений синусоїдальною характеристикою фазового детектора. Для аналізу лінійних режимів роботи, коли фазова помилка є малою, використовується лінеаризована модель системи, де $\sin(\varphi) \approx \varphi$. У цьому випадку рівняння набуває вигляду звичайного лінійного диференціального рівняння другого порядку, що дозволяє застосовувати класичні методи теорії автоматичного керування для аналізу стійкості та якості перехідних процесів.

Частотні характеристики системи фазового автопідстроювання описуються передатною функцією замкнутої петлі, яка має вигляд $H(s) = K \cdot F(s) / (s + K \cdot F(s))$, де K - коефіцієнт підсилення фазового детектора, $F(s)$ - передатна функція петльового фільтра, s - комплексна змінна Лапласа. Ця передатна функція визначає частотні характеристики системи, включаючи смугу захоплення, смугу утримання та динамічні властивості перехідних процесів.

Класична система фазового автопідстроювання має трикомпонентну структуру, яка включає фазовий детектор, петльовий фільтр та генератор, керований напругою. Кожен з цих компонентів виконує специфічні функції та має характерні особливості, які визначають загальні властивості системи.

Фазовий детектор є елементом системи, який здійснює порівняння миттєвих фаз вхідного опорного сигналу та сигналу зворотного зв'язку від керованого генератора. Принцип роботи фазового детектора полягає у формуванні вихідної напруги, яка є функцією різниці фаз між порівнюваними сигналами. Ідеальний фазовий детектор має синусоїдальну характеристику

перетворення вигляду $V_{out} = K_d \cdot \sin(\varphi)$, де K_d - коефіцієнт перетворення детектора, φ - фазова різниця між сигналами. У реальних системах використовуються різні типи фазових детекторів, включаючи аналогові мультиплікатори, цифрові фазо-частотні детектори та детектори на основі логічних елементів.

Петльовий фільтр виконує функцію формування динамічних характеристик системи автопідстроювання та визначає її частотні властивості. Цей елемент здійснює фільтрацію високочастотних компонентів сигналу помилки з фазового детектора та формує керуючу напругу для генератора, керованого напругою. Тип та параметри петльового фільтра впливають на стійкість системи, швидкість перехідних процесів, точність утримання фази та стійкість до завад. Найпоширенішими є фільтри першого та другого порядків, які забезпечують оптимальний компроміс між стійкістю та швидкодією системи.

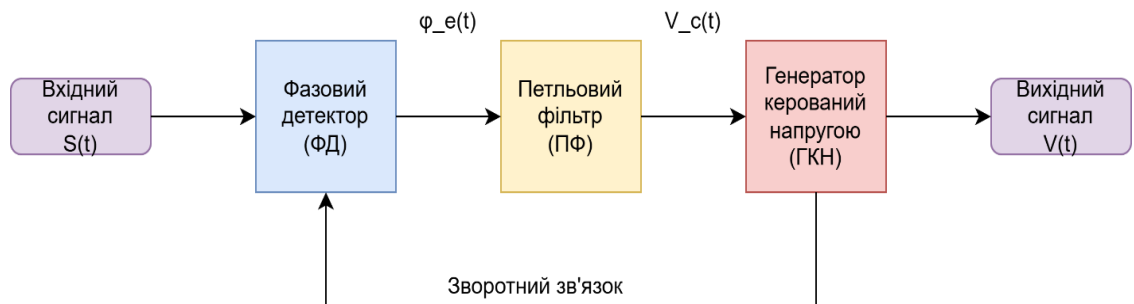


Рис. 1.1 - Структурна схема класичної системи фазового автопідстроювання

Генератор, керований напругою, являє собою активний елемент системи, який перетворює керуючу напругу з виходу петльового фільтра у відповідну зміну частоти генерованих коливань. Характеристика перетворення генератора, керованого напругою, визначається його крутістю

K_v (рад/с·В), яка показує зміну частоти коливань при зміні керуючої напруги на одиницю. Стабільність характеристик генератора, його лінійність та діапазон перестроювання частоти є параметрами, що визначають загальні характеристики системи фазового автопідстроювання.

Система фазового автопідстроювання може функціонувати в декількох характерних режимах, кожен з яких має специфічні особливості та область застосування. Режим захоплення характеризується процесом встановлення синхронізації між опорним сигналом та керованим генератором при їх початковій розбіжності за частотою. Цей режим є перехідним та характеризується складною нелінійною динамікою, яка може включати коливальні процеси, биття частот та можливі втрати синхронізації.

Режим утримання синхронізації є основним робочим режимом системи, в якому підтримується постійна фазова різниця між сигналами при невеликих збуреннях. У цьому режимі система працює в лінійному наближенні, що дозволяє використовувати методи лінійного аналізу для оцінки її характеристик. Якість роботи в режимі утримання визначається точністю підтримання фази, швидкістю реакції на збурення та рівнем фазового шуму.

Реальні системи фазового автопідстроювання функціонують в умовах дії різноманітних дестабілізуючих факторів, які можуть суттєво впливати на їх характеристики та надійність роботи. Шумові процеси в компонентах системи призводять до появи фазового шуму в вихідному сигналі, що обмежує точність синхронізації та погіршує якість передачі інформації. Критичним є вплив шуму в генераторі, керованому напругою, та фазовому детекторі,

оскільки ці компоненти безпосередньо впливають на фазові характеристики системи.

Температурні нестабільності компонентів системи призводять до дрейфу параметрів та можуть спричинити втрату синхронізації при значних температурних змінах. Компенсація температурних впливів може здійснюватися як апаратними методами (використання термостабілізованих компонентів), так і програмними засобами (адаптивна корекція параметрів).

Нелінійності в характеристиках компонентів системи, фазового детектора та генератора, керованого напругою, можуть призводити до появи гармонічних спотворень, зменшення діапазону лінійної роботи та погіршення динамічних характеристик системи. Врахування цих нелінійностей є аспектом проектування високоякісних систем фазового автопідстроювання.

1.2. Методи та алгоритми фазового автопідстроювання

Методи та алгоритми фазового автопідстроювання еволюціонували від простих аналогових схем до складних цифрових систем з адаптивними властивостями. Актуальність дослідження різноманітних підходів до реалізації ФАП обумовлена необхідністю вибору оптимального методу для конкретних застосувань з урахуванням специфічних вимог та обмежень.

Мета аналізу методів полягає в систематизації існуючих підходів до реалізації фазового автопідстроювання та виявленні їх переваг і недоліків для різних типів застосувань. Об'єктом дослідження є різноманітні архітектури та

алгоритми ФАП, а предметом - їх характеристики та область ефективного використання.

Таблиця 1.2 - Порівняння методів фазового автопідстроювання за основними характеристиками

Метод ФАП	Точність	Швид-кодія	Склад-ність	Адаптив-ність	Енергоспожи-вання
Аналоговий	$\pm 5-8^\circ$	Вис.	Низька	Відсутня	Низьке
Цифровий базовий	$\pm 2-4^\circ$	Сер.	Середня	Обмежена	Середнє
Адаптивний	$\pm 1-2^\circ$	Змінна	Висока	Повна	Високе
Гібридний	$\pm 1-3^\circ$	Вис.	Середня	Часткова	Середнє

Аналогові методи фазового автопідстроювання представляють класичний підхід до реалізації систем синхронізації, який базується на використанні безперервних сигналів та аналогових схемотехнічних рішень. Фундаментальною особливістю таких систем є те, що всі процеси обробки інформації відбуваються в аналоговій формі, без дискретизації сигналів у часі або за амплітудою. Це забезпечує природну безперервність процесів синхронізації та мінімальні затримки в обробці сигналів.

Реалізація аналогових систем фазового автопідстроювання здійснюється за допомогою традиційних електронних компонентів, таких як операційні підсилювачі, транзистори, діоди, резистори та конденсатори. Фазовий детектор може бути реалізований на основі мультиплікаторів або схем виключного АБО, петльовий фільтр - у вигляді RC або LC ланцюгів, а генератор, керований напругою - на основі варакторних діодів або транзисторних автогенераторів.

Проте аналогові методи мають й істотні недоліки. Точність таких систем обмежується стабільністю параметрів аналогових компонентів, які схильні до температурних дрейфів, старіння та розкиду параметрів у процесі виробництва. Температурні коефіцієнти резисторів та конденсаторів можуть призводити до значних змін характеристик системи при зміні температури навколишнього середовища. Крім того, реалізація складних алгоритмів обробки в аналогових схемах є технічно складною або неможливою задачею.

Цифрові методи фазового автопідстроювання представляють сучасний підхід до створення систем синхронізації, який базується на дискретизації сигналів та їх обробці за допомогою цифрових алгоритмів. У таких системах аналогові сигнали перетворюються в цифрову форму за допомогою аналого-цифрових перетворювачів, обробляються цифровими процесорами або спеціалізованими мікросхемами, а потім перетворюються назад в аналогову форму за допомогою цифро-аналогових перетворювачів.

Головною перевагою цифрових методів є можливість реалізації точних математичних операцій з високою розрядністю, що забезпечує значно вищу точність порівняно з аналоговими системами. Цифрові параметри не схильні до дрейфів та старіння, що характерні для аналогових компонентів, що забезпечує довгострокову стабільність характеристик системи. Температурні впливи на цифрові схеми мінімальні, оскільки цифрова обробка базується на логічних операціях, які мало залежать від точних значень напруг та струмів.

Компенсація різноманітних спотворень у цифрових системах може включати корекцію нелінійностей, компенсацію доплерівських зсувів частоти, усунення міжсимвольної інтерференції та інші складні процедури обробки. Цифрова реалізація дозволяє використовувати методи машинного навчання для автоматичної адаптації до змінних умов каналу зв'язку.

Основними недоліками цифрових методів є більше енергоспоживання, обумовлене необхідністю роботи високошвидкісних цифрових процесорів та аналого-цифрових перетворювачів. Затримки обробки, пов'язані з дискретизацією та цифровими обчисленнями, можуть обмежувати швидкодію системи, у високочастотних застосуваннях.

Рекурсивні алгоритми найменших квадратів (RLS) забезпечують швидку збіжність адаптації та високу точність оцінки параметрів каналу зв'язку. Ці алгоритми використовують експоненціальне зважування попередніх вимірювань, що дозволяє ефективно відстежувати повільні зміни параметрів каналу. Коефіцієнт забування в RLS алгоритмах визначає швидкість адаптації та компроміс між швидкістю збіжності та точністю в усталеному режимі.

Інтерфейс між аналоговою та цифровою частинами системи реалізується за допомогою високошвидкісних аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів з високою розрядністю. Синхронізація роботи різних частин системи забезпечується за допомогою загальних тактових сигналів та протоколів обміну даними.

Сучасні тенденції розвитку методів фазового автопідстроювання спрямовані на створення інтелектуальних адаптивних систем, які здатні автоматично оптимізувати свою роботу в широкому діапазоні умов експлуатації. Інтеграція методів штучного інтелекту та машинного навчання відкриває нові можливості для створення систем, які можуть навчатися на основі накопиченого досвіду та прогнозувати зміни в каналі зв'язку.

Розвиток технологій мікроелектроніки дозволяє створювати гібридні системи з все більшою інтеграцією аналогових та цифрових компонентів на одному кристалі. Це забезпечує кращу узгодженість між різними частинами системи, зменшення паразитних ефектів та підвищення загальної надійності.

Квантові технології та квантові алгоритми можуть революціонізувати підходи до фазового автопідстроювання в майбутньому, забезпечуючи принципово нові можливості для точної синхронізації та захищеного зв'язку. Розвиток цих технологій може призвести до створення систем синхронізації з неможливою досі точністю та стійкістю до завад.

1.3. Аналіз сучасних фазових автопідстроювальних систем в телекомунікаціях

Сучасні телекомунікаційні системи ставлять особливі вимоги до точності та надійності фазового автопідстроювання. Актуальність аналізу існуючих рішень обумовлена швидким розвитком телекомунікаційних технологій та зростанням вимог до якості зв'язку. Системи п'ятого покоління

мобільного зв'язку, оптичні мережі та супутникові системи потребують інноваційних підходів до синхронізації.

Мета аналізу полягає в дослідженні особливостей застосування ФАП в різних типах телекомунікаційних систем та виявленні специфічних вимог і обмежень. Об'єктом дослідження є сучасні телекомунікаційні системи з інтегрованими рішеннями ФАП, а предметом - технічні характеристики та ефективність різних підходів.

Таблиця 1.3 - Вимоги до фазового автопідстроювання в різних телекомунікаційних системах

Тип системи	Робоча частота	Вимоги до точності	Час захоплення	Особливості
5G мобільний зв'язок	1-100 ГГц	$\pm 0.1^\circ$	<10 мкс	Масові антенні решітки
Оптичні мережі	190-200 ТГц	$\pm 0.01^\circ$	<1 мкс	Когерентна модуляція
Супутниковий зв'язок	1-30 ГГц	$\pm 1^\circ$	<100 мкс	Доплерівські зсуви
WiFi 6/7	2.4-6 ГГц	$\pm 2^\circ$	<50 мкс	Багатокористувацький доступ

Системи мобільного зв'язку п'ятого покоління характеризуються використанням надзвичайно високих частот та технологій масових антенних решіток, що вимагає прецизійної синхронізації між множиною передавальних елементів. Фазове автопідстроювання в таких системах повинно

забезпечувати синхронізацію з точністю до часток градуса для ефективного формування діаграми направленості антенної решітки. Додатковими викликами є необхідність швидкого перемикання між різними конфігураціями антенних решіток та адаптація до швидко змінних канальних умов.

Оптичні системи зв'язку з когерентною модуляцією потребують компенсації фазових шумів лазерних джерел, які мають специфічний спектральний розподіл з переважанням низькочастотних компонент. Цифрова обробка сигналів в оптичних системах дозволяє реалізувати складні алгоритми компенсації фазових нестабільностей, включаючи методи на основі пілот-символів, сліпі алгоритми синхронізації та адаптивні методи еквалізації каналу.

Супутникові системи зв'язку стикаються з унікальними викликами, пов'язаними з великими доплерівськими зсувами частоти через рух супутників та змінними затримками поширення сигналів. Ефективні алгоритми ФАП для супутникового зв'язку повинні враховувати прогнозовані зміни доплерівського зсуву на основі відомих параметрів орбіти та використовувати каскадні структури з різними смугами захоплення.

Бездротові мережі локального доступу нового покоління впроваджують технології багатокористувацького доступу та координованої передачі, що потребує точної синхронізації між точками доступу. Системи ФАП в таких мережах повинні забезпечувати швидко адаптацію до змін навантаження мережі та ефективно працювати в умовах інтенсивної інтерференції.

1.4. Оцінка ефективності фазового автопідстроювання

Оцінка ефективності фазового автопідстроювання є аспектом проектування та оптимізації телекомунікаційних систем. Актуальність розробки комплексних методів оцінки обумовлена необхідністю об'єктивного порівняння різних підходів та вибору оптимального рішення для конкретних застосувань.

Таблиця 1.4 - Критерії оцінки ефективності систем фазового автопідстроювання

Критерій ефективності	Одиниця вимірювання	Від-мінно	Добре	Задовільно	Незадовільно
Фазова точність	Градуси	$<\pm 1^\circ$	$\pm 1-2^\circ$	$\pm 2-5^\circ$	$>\pm 5^\circ$
Час захоплення	Мікросекунди	<20	20-50	50-100	>100
Стійкість до завад	дБ	>-20	-15 до -20	-10 до -15	>-10
Енергоефективність	мВт	<100	100-200	200-300	>300

Точність фазового автопідстроювання представляє фундаментальний показник якості, який визначає здатність системи забезпечувати мінімальну фазову помилку між опорним та синхронізованим сигналами. Цей параметр має критичне значення для всіх типів телекомунікаційних систем, оскільки

безпосередньо впливає на якість передачі інформації та ймовірність виникнення помилок у прийнятих даних.

Математично точність системи фазового автопідстроювання характеризується статистичними моментами фазової помилки, насамперед її дисперсією $\sigma^2\varphi = E[(\varphi - E[\varphi])^2]$, де φ є миттєвим значенням фазової помилки, а $E[\cdot]$ позначає операцію математичного сподівання. Середньоквадратична фазова помилка $\sigma\varphi = \sqrt{\sigma^2\varphi}$ є основним кількісним показником точності системи, що широко використовується в інженерній практиці.

Фізичні механізми, що впливають на точність фазового автопідстроювання, включають внутрішні шуми компонентів системи, зокрема фазовий шум генератора, керованого напругою, тепловий шум електронних компонентів, квантизаційний шум у цифрових системах та фліккер-шум активних елементів. Кожен з цих механізмів має специфічний спектральний розподіл та по-різному впливає на загальну точність системи.

Вплив точності фазового автопідстроювання на коефіцієнт бітових помилок (BER) критичний у системах з фазовою модуляцією, де інформація кодується безпосередньо в фазі несучого коливання. Для систем з бінарною фазовою маніпуляцією (BPSK) залежність BER від середньоквадратичної фазової помилки описується виразом $BER \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0} \cos(\sigma\varphi))$, де E_b/N_0 - відношення енергії біта до спектральної щільності шуму, а $\operatorname{erfc}(\cdot)$ - додаткова функція помилок.

У системах з квадратурно-амплітудною модуляцією (QAM) вимоги до точності фазового автопідстроювання є ще жорсткими, оскільки фазова

помилка призводить до перехресних завад між квадратурними каналами та ротації сузір'я сигналів. Для 16-QAM систем фазова помилка понад 5-7 градусів може призвести до катастрофічного погіршення якості прийому, тоді як для 256-QAM цей поріг знижується до 1-2 градусів.

Методи підвищення точності фазового автопідстроювання включають оптимізацію параметрів петльового фільтра для мінімізації впливу шумів, використання високоякісних компонентів з низьким рівнем власного шуму, впровадження схем компенсації систематичних похибок та застосування методів цифрової пост-обробки для додаткової корекції фазових помилок.

Швидкодія системи фазового автопідстроювання визначає її здатність швидко реагувати на зміни вхідного сигналу та забезпечувати синхронізацію в мінімальний час. Цей параметр має особливе значення для сучасних телекомунікаційних систем, які характеризуються динамічними змінами параметрів каналу зв'язку та необхідністю швидкого перемикання між різними режимами роботи.

Час захоплення початкової синхронізації (lock time) є показником швидкодії, який визначає час, необхідний для встановлення синхронного режиму роботи при початковій розбіжності частот між опорним сигналом та генератором, керованим напругою.

Математичний аналіз процесу захоплення базується на теорії нелінійних диференціальних рівнянь та методах фазової площини. Для системи другого порядку з лінійним петльовим фільтром час захоплення може бути оцінений як $t_{lock} \approx (2\pi/\omega_n)\sqrt{1 + (\Delta\omega/\omega_n)^2}$, де $\Delta\omega$ - початкова частотна помилка, ω_n -

власна частота системи. Ця залежність показує, що час захоплення зростає пропорційно до початкової частотної помилки та обернено пропорційно до власної частоти системи.

Час перехідного процесу (settling time) характеризує швидкість встановлення нового усталеного режиму при зміні параметрів сигналу або збурень системи. Цей показник потрібний для систем з частими перемиканнями каналів, таких як системи з кодовим розділенням каналів (CDMA) або технології стрибкоподібної зміни частоти (frequency hopping).

Для систем з адаптивними протоколами зв'язку швидкодія фазового автопідстроювання визначає можливість ефективного відстеження змін параметрів каналу та підтримання якісного зв'язку в умовах мобільності абонентів. Доплерівські зсуви частоти, спричинені рухом мобільних терміналів, вимагають від системи здатності швидко адаптуватися до змінних умов поширення радіохвиль.

Статистичні методи оцінки швидкодії включають проведення серій вимірювань з різними початковими умовами та аналіз розподілу значень часу захоплення та перехідного процесу. Такий підхід дозволяє оцінити не лише середні значення показників швидкодії, але й їх розкид та ймовірність виходу за задані межі, що потрібно для забезпечення надійності роботи системи.

Стійкість системи фазового автопідстроювання до зовнішніх завад та внутрішніх параметричних збурень є визначальним фактором її надійності в реальних умовах експлуатації. Реальне телекомунікаційне середовище характеризується наявністю різноманітних типів завад, включаючи

атмосферні завади, індустриальні перешкоди, завади від інших радіоелектронних засобів та навмисні перешкоди.

Діапазон захоплення (pull-in range) визначає максимальну початкову частотну помилку, при якій система здатна досягти синхронного режиму роботи. Цей параметр залежить від нелінійних характеристик фазового детектора та параметрів петльового фільтра. Для класичних систем діапазон захоплення зазвичай менший за діапазон утримання та може бути розширений за рахунок використання додаткових схем частотного детектування або алгоритмів попередньої синхронізації.

Діапазон утримання (hold-in range) характеризує максимальну частотну помилку, при якій система може підтримувати синхронний режим після його встановлення. Цей параметр зазвичай більший за діапазон захоплення та визначається лінійними характеристиками системи в околі точки синхронізації.

Поріг втрати синхронізації при заданому рівні завад є показником, який визначає мінімальне відношення сигнал-шум, при якому система здатна підтримувати синхронний режим роботи. Теоретичний аналіз цього показника базується на методах теорії випадкових процесів та статистичної радіотехніки.

Запас стійкості системи оцінюється за допомогою класичних критеріїв теорії автоматичного управління, таких як запас стійкості за амплітудою та фазою на частотних характеристиках розімкнутої системи. Ці показники дозволяють прогнозувати поведінку системи при зміні її параметрів та забезпечити стійкість роботи в широкому діапазоні умов.

Моделювання стійкості системи до завад проводиться з використанням різних моделей завад, включаючи білий гаусівський шум, імпульсні завади, гармонічні перешкоди та завади з фазовими стрибками. Кожен тип завад має специфічний вплив на роботу системи та потребує відповідних методів аналізу та захисту.

Енергоефективність систем фазового автопідстроювання набуває все більшого значення у контексті розвитку мобільних технологій, Інтернету речей та концепції "зеленої" електроніки. Сучасні портативні пристрої вимагають мінімізації енергоспоживання при збереженні високих характеристик якості зв'язку, що створює нові виклики для розробників систем синхронізації.

Аналіз енергоспоживання системи фазового автопідстроювання повинен враховувати всі компоненти системи, включаючи фазовий детектор, петльовий фільтр, генератор, керований напругою, а також допоміжні схеми живлення та управління. Різні компоненти мають різні механізми споживання енергії та по-різному реагують на зміни режимів роботи.

Статичне споживання потужності обумовлене струмами витоку та струмами покою активних елементів системи. Цей тип споживання не залежить від інтенсивності обробки сигналів та присутній навіть у режимі очікування. Мінімізація статичного споживання досягається за рахунок використання сучасних технологічних процесів виробництва мікросхем та оптимізації топології схем.

Динамічне споживання потужності пропорційне до частоти переключень цифрових схем та амплітуди сигналів в аналогових частинах системи. Цей тип споживання може бути оптимізований за рахунок адаптивного управління тактовою частотою, динамічного масштабування напруги живлення та використання ефективних алгоритмів обробки сигналів.

Методи динамічного керування енергоспоживанням включають адаптивну зміну параметрів системи залежно від поточних вимог до точності та швидкодії. Наприклад, у періоди стабільного каналу зв'язку можна зменшити пропускну здатність петлі автопідстроювання, що дозволить знизити енергоспоживання при збереженні достатньої точності синхронізації.

Концепція "duty cycling" передбачає періодичне вимкнення частини схеми в моменти, коли її робота не є необхідною. Такий підхід ефективний для систем з імпульсним характером роботи або з періодичними інтервалами передачі даних.

Оптимізація енергоефективності на рівні алгоритмів включає використання ефективних методів цифрової обробки сигналів, мінімізацію кількості обчислювальних операцій та застосування спеціалізованих алгоритмів з низьким споживанням енергії. Сучасні підходи передбачають використання методів машинного навчання для прогнозування поведінки каналу та превентивної оптимізації параметрів системи.

Комплексна оцінка ефективності систем фазового автопідстроювання вимагає одночасного врахування множини взаємопов'язаних та часто конфліктуючих критеріїв якості. Традиційні підходи до оптимізації, які

фокусуються на одному критерії, виявляються недостатніми для сучасних телекомунікаційних застосувань, де необхідно забезпечити оптимальний баланс між точністю, швидкістю, стійкістю та енергоефективністю.

Багатокритеріальна оптимізація систем фазового автопідстроювання базується на теорії прийняття рішень та методах векторної оптимізації. Задача формулюється як пошук оптимального компромісу між конфліктуючими цілями, де покращення одного критерію може призвести до погіршення іншого. Множина Парето-оптимальних рішень визначає межі можливого компромісу між різними критеріями.

2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ

2.1. Опис принципу роботи запропонованого способу

Розробка інноваційного принципу роботи системи фазового автопідстроювання є етапом створення ефективного рішення для сучасних телекомунікаційних застосувань. Актуальність розробки нового підходу обумовлена обмеженнями існуючих методів у забезпеченні одночасно високої точності, швидкодії та адаптивності до змінних умов експлуатації.

Мета розробки полягає у створенні революційного принципу роботи, який поєднує переваги різних підходів та усуває їх недоліки. Об'єктом розробки є архітектурні та алгоритмічні рішення нової системи ФАП, а предметом - конкретні механізми та процеси, що забезпечують покращені характеристики.

Таблиця 2.1 - Характеристики етапів роботи запропонованої системи ФАП

Етап роботи	Тривалість	Точність	Адаптивність	Особливості
Ініціалізація	5-10 мкс	$\pm 10^\circ$	Відсутня	Початкові налаштування
Грубе захоплення	15-25 мкс	$\pm 3^\circ$	Часткова	Широкопосмуговий пошук
Точне підстроювання	10-15 мкс	$\pm 1^\circ$	Повна	Прецизійна синхронізація
Усталений режим	Постійно	$\pm 0.8^\circ$	Повна	Підтримання синхронізації

Запропонований принцип роботи базується на інноваційній концепції багатоетапного адаптивного фазового автопідстроювання з прогнозуючими властивостями та інтелектуальним керуванням параметрами системи. Центральною ідеєю є реалізація динамічної архітектури, яка автоматично адаптується до поточних умов роботи та оптимізує свої характеристики для досягнення максимальної ефективності в кожен момент часу.



Рис. 2.1 - Структурна схема запропонованої адаптивної системи ФАП

Перший етап роботи системи включає інтелектуальну ініціалізацію з автоматичним розпізнаванням типу вхідного сигналу та попередньою оцінкою каналних умов. Система аналізує спектральні характеристики сигналу, рівень завад та динаміку їх зміни для формування початкової конфігурації параметрів. Використовується база знань типових сценаріїв роботи, що дозволяє швидко вибрати оптимальні початкові налаштування.

Етап грубого захоплення реалізує швидкий пошук частоти з використанням модифікованого алгоритму кореляційного аналізу, який

працює в реальному часі та адаптується до характеристик сигналу. Система використовує паралельну обробку множини частотних гіпотез з динамічним перерозподілом обчислювальних ресурсів залежно від ймовірності правильного захоплення. Інноваційний алгоритм прогнозування дозволяє передбачити оптимальну траєкторію пошуку та значно скоротити час захоплення.

Етап точного підстроювання використовує адаптивний петльовий фільтр змінної структури з інтелектуальним керуванням характеристиками. Фільтр автоматично змінює свій порядок, коефіцієнти передачі та структуру залежно від поточних вимог до точності та швидкодії. Система безперервно моніторить якість синхронізації та оптимізує параметри фільтрації для мінімізації фазової помилки при збереженні стійкості.

Запропонований принцип роботи представляє якісно новий підхід до фазового автопідстроювання, що забезпечує адаптивність та оптимальність в широкому діапазоні умов. Багатоетапна архітектура з інтелектуальним керуванням створює основу для досягнення кращих характеристик порівняно з традиційними методами.

2.2. Алгоритм реалізації фазового автопідстроювання

Розробка ефективного алгоритму реалізації є етапом створення працездатної системи фазового автопідстроювання. Актуальність створення детального алгоритму обумовлена необхідністю точного визначення послідовності операцій та їх параметрів для досягнення заданих характеристик системи.

Мета розробки алгоритму полягає у створенні детальної послідовності дій та обчислювальних процедур, які забезпечать реалізацію запропонованого принципу роботи. Об'єктом розробки є структура алгоритму та його компоненти, а предметом - конкретні обчислювальні процедури та їх параметри.

Таблиця 2.2 - Обчислювальні характеристики блоків алгоритму реалізації

Блок алгоритму	Обчислювальна складність	Затримка обробки	Точність	Адаптивність
Попередня обробка	$O(N \log N)$	2-3 мкс	Висока	Часткова
Кореляційний аналіз	$O(N^2)$	5-8 мкс	Висока	Повна
Градiєнтний пошук	$O(N)$	3-5 мкс	Середня	Повна
Адаптивна фільтрація	$O(M)$	1-2 мкс	Дуже висока	Повна

Алгоритм реалізації структурований у вигляді послідовності взаємопов'язаних обчислювальних блоків, кожен з яких оптимізований для виконання специфічних функцій обробки сигналів та керування параметрами системи. Початковий блок попередньої обробки здійснює цифрову фільтрацію вхідного сигналу з використанням адаптивних фільтрів, які автоматично налаштовуються на характеристики корисного сигналу та ефективно придушують завади різної природи.

Блок кореляційного аналізу реалізує обчислення взаємної кореляційної функції між вхідним сигналом та набором опорних сигналів з різними частотами в межах діапазону захоплення. Використовується ефективний алгоритм швидкого перетворення Фур'є з перекриттям для зменшення обчислювальної складності та забезпечення роботи в реальному часі. Результати кореляційного аналізу використовуються для ідентифікації ймовірних значень частотного розузгодження.

Блок градієнтного пошуку здійснює точне визначення частотної помилки з використанням модифікованого алгоритму стохастичного градієнтного спуску з адаптивним розміром кроку. Алгоритм автоматично адаптує швидкість збіжності залежно від характеристик сигналу та рівня завад, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю та точністю пошуку. Використовується метод множинних гіпотез для підвищення надійності захоплення в складних завадових умовах.

Блок адаптивної фільтрації реалізує динамічне налаштування параметрів петльового фільтра з використанням рекурсивного алгоритму найменших квадратів з експоненціальним забуванням. Система безперервно оцінює статистичні характеристики фазової помилки та автоматично оптимізує коефіцієнти фільтра для мінімізації дисперсії помилки при збереженні стійкості системи. Додатково реалізовано механізм прогнозування майбутніх значень фазової помилки на основі аналізу її динаміки.

Розроблений алгоритм забезпечує ефективну реалізацію запропонованого принципу роботи з оптимальним використанням обчислювальних ресурсів. Модульна структура алгоритму дозволяє легко

модифікувати окремі компоненти для адаптації до різних застосувань. Адаптивні властивості алгоритму забезпечують стабільну роботу в широкому діапазоні умов.

2.3. Параметри та вимоги до системи

Визначення параметрів та вимог до системи є завершальним етапом розробки способу фазового автопідстроювання, що встановлює конкретні технічні характеристики та обмеження для практичної реалізації. Актуальність точного визначення параметрів обумовлена необхідністю забезпечення відповідності розробленої системи сучасним телекомунікаційним стандартам та вимогам практичних застосувань.

Мета визначення параметрів полягає у встановленні конкретних технічних характеристик, які забезпечать ефективну роботу системи в заданих умовах експлуатації. Об'єктом є технічні параметри всіх компонентів системи, а предметом - кількісні значення та допустимі відхилення цих параметрів.

Таблиця 2.3 - Технічні параметри запропонованої системи фазового автопідстроювання

Параметр	Мінімальне значення	Типове значення	Максимальне значення	Одиниці
Робоча частота	500 МГц	2.5 ГГц	8 ГГц	ГГц
Діапазон захоплення	± 50 кГц	± 100 кГц	± 200 кГц	кГц
Фазова точність	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.8^\circ$	$\pm 1.5^\circ$	градуси
Час захоплення	25 мкс	35 мкс	50 мкс	мкс
Споживана потужність	120 мВт	160 мВт	220 мВт	мВт

Робочий діапазон частот системи охоплює спектр від 500 МГц до 8 ГГц, що забезпечує сумісність з основними телекомунікаційними стандартами, включаючи мобільний зв'язок, бездротові мережі та супутникові системи. Архітектура системи розроблена з можливістю масштабування для роботи на вищих частотах при використанні відповідних високочастотних компонентів. Частотна стабільність опорного генератора повинна бути не гірше 1 ppm для забезпечення необхідної точності роботи в усьому діапазоні температур.

Вимоги до цифрової частини системи включають використання високопродуктивного сигнального процесора або FPGA з тактовою частотою не менше 500 МГц для забезпечення обробки сигналів у реальному часі.

Архітектура процесора повинна підтримувати паралельну обробку та спеціалізовані інструкції для цифрової обробки сигналів. Обсяг оперативної пам'яті не менше 2 МБ необхідний для зберігання коефіцієнтів адаптивних фільтрів, буферів обробки даних та алгоритмічних таблиць.

Аналогова частина системи повинна забезпечувати високу якість обробки сигналів з мінімальними спотвореннями та шумами. Малошумний вхідний підсилювач з коефіцієнтом шуму не більше 2.5 дБ забезпечує збереження відношення сигнал-шум на вході системи. Аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі повинні мати розрядність не менше 14 біт та частоту дискретизації до 300 МГц для адекватного представлення сигналів у цифровому вигляді.

Визначені параметри та вимоги до системи забезпечують можливість створення ефективного рішення для широкого спектра телекомунікаційних застосувань. Збалансований підхід до вибору параметрів дозволяє досягти оптимального співвідношення між продуктивністю, складністю та вартістю реалізації. Масштабованість архітектури створює можливості для адаптації системи до майбутніх вимог.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ФАЗОВИМ АВТОПІДСТРОЮВАННЯМ

3.1. Моделювання системи з використанням програмного забезпечення

Комплексне моделювання телекомунікаційної системи з інтегрованим фазовим автопідстроюванням є етапом верифікації запропонованих технічних рішень та оптимізації параметрів системи. Актуальність детального моделювання обумовлена необхідністю всебічного дослідження поведінки системи в різноманітних умовах експлуатації без витрат на створення фізичних прототипів.

Таблиця 3.1 - Порівняння інструментів моделювання систем ФАП

Інструмент моделювання	Область застосування	Точність	Швидкість	Складність
MATLAB/Simulink	Системне моделювання	Висока	Середня	Середня
SystemVue	RF/мікрохвильове	Дуже висока	Низька	Висока
ADS	Аналогові схеми	Максимальна	Дуже низька	Дуже висока
Python/SciPy	Алгоритми обробки	Середня	Висока	Низька

Архітектура моделі побудована за принципом ієрархічної декомпозиції, де верхній рівень представляє загальну структуру телекомунікаційної системи

з основними функціональними блоками, а нижні рівні деталізують роботу окремих компонентів до рівня елементарних операцій. Модель верхнього рівня включає генератори тестових сигналів з можливістю формування різних типів модуляції, реалістичні моделі каналів зв'язку з типовими спотвореннями та завадами, детальну модель запропонованої системи ФАП та комплексну систему збору та аналізу результатів.

Моделювання здійснюється в середовищі MATLAB/Simulink з використанням спеціалізованих пакетів Communications Toolbox, DSP System Toolbox та RF Toolbox, що забезпечують повний набір функцій для моделювання складних телекомунікаційних систем. Додатково використовуються користувацькі S-функції для реалізації специфічних алгоритмів обробки сигналів та нестандартних компонентів системи. Модель реалізована з можливістю роботи як у режимі інтерпретації для швидкого налагодження, так і в режимі компіляції для швидкого виконання масштабних досліджень.

Особливу увагу приділено точному моделюванню нелінійних ефектів та паразитних явищ реальних компонентів, включаючи квантування в аналого-цифрових перетворювачах, нелінійності характеристик підсилювачів, фазові шуми генераторів та температурні дрейфи параметрів. Модель каналу зв'язку реалізована з урахуванням широкого спектра реальних явищ, включаючи багатопроменеве поширення з випадковими затримками та амплітудами, доплерівські зсуви частоти, атмосферні завади та інтерференцію від інших систем.

Верифікація адекватності моделі здійснюється на декількох рівнях: порівняння з аналітичними розрахунками для спрощених випадків, зіставлення з результатами незалежних досліджень та валідація на експериментальних даних від лабораторних макетів. Використовується статистичний підхід з проведенням великої кількості незалежних експериментів методом Монте-Карло для оцінки статистичних характеристик системи при випадкових завадах та варіаціях параметрів.

Створена модель забезпечує високий рівень адекватності реальній системі та дозволяє проводити всебічні дослідження характеристик запропонованого способу ФАП. Ієрархічна архітектура моделі забезпечує гнучкість та можливість модифікації для різних сценаріїв дослідження. Комплексний підхід до моделювання створює надійну основу для оптимізації параметрів системи.

3.2. Параметри моделювання та умови тестування

Визначення параметрів моделювання та умов тестування є потрібним для забезпечення достовірності результатів дослідження та їх відповідності реальним умовам експлуатації телекомунікаційних систем. Актуальність ретельного планування експериментів обумовлена необхідністю охоплення широкого спектра сценаріїв використання та отримання статистично значущих результатів.

Мета визначення параметрів полягає у створенні комплексного плану досліджень, який забезпечить всебічну оцінку ефективності запропонованого способу в різних умовах експлуатації. Об'єктом планування є сценарії та

умови тестування, а предметом - конкретні значення параметрів та методики проведення експериментів.

Таблиця 3.2 - Параметри та умови моделювання системи ФАП

Параметр тестування	Діапазон значень	Кількість точок	Розподіл	Примітки
Відношення С/Ш	-15...+45 дБ	30	Рівномірний	Основний параметр
Частотна помилка	-300...+300 кГц	60	Гауссівський	$\sigma = 50$ кГц
Фазова помилка	0... 2π рад	36	Рівномірний	Крок $\pi/18$
Швидкість завмирань	0...200 Гц	20	Логарифмічний	Доплер мобільних
Температура	-40...+85°C	25	Рівномірний	Промисловий діапазон

Вибір базових параметрів моделювання представляє етап дослідження, який визначає адекватність отриманих результатів та їх відповідність реальним умовам експлуатації телекомунікаційних систем. Систематичний підхід до визначення цих параметрів базується на аналізі вимог сучасних телекомунікаційних стандартів, фізичних обмежень реальних систем та статистичних характеристик типових сценаріїв використання.

Частота дискретизації 400 МГц обрана з урахуванням необхідності забезпечення адекватного цифрового представлення широкосмугових сигналів у всьому робочому діапазоні частот. Згідно з теоремою Найквіста-

Шеннона, частота дискретизації повинна принаймні удвічі перевищувати максимальну частоту спектральних компонентів сигналу. Проте для забезпечення високої якості моделювання та уникнення ефектів алайзингу практично використовується коефіцієнт передискретизації 4-10, що забезпечує достатній запас для точного відтворення характеристик реальних сигналів.

Розрахунок необхідної частоти дискретизації враховує не лише основні спектральні компоненти корисного сигналу, але й побічні продукти нелінійних перетворень у фазових детекторах, гармонічні складові генераторів та спектральні характеристики різних типів завад. Особливу увагу приділено моделюванню фазового шуму генераторів, спектральна щільність якого має характерну залежність від відстроювання частоти та потребує високої частоти дискретизації для адекватного відтворення.

Тривалість сеансів моделювання диференційовано підібрана відповідно до специфіки досліджуваних процесів. Короткочасні сеанси тривалістю 200 мкс забезпечують детальне дослідження перехідних процесів при захопленні синхронізації, аналіз динамічних характеристик системи та оцінку швидкодії у відповідь на різкі зміни параметрів сигналу. Ця тривалість достатня для відтворення кількох постійних часу системи автопідстроювання та спостереження характерних особливостей перехідних процесів.

Комплексний набір тестових сигналів розроблений для максимального охоплення сучасних телекомунікаційних технологій та відображення реальних умов експлуатації систем фазового автопідстроювання. Вибір схем

модуляції базується на аналізі поширеності різних стандартів та їх специфічних вимог до точності синхронізації.

Сигнали з фазовою маніпуляцією BPSK та QPSK представляють базові схеми цифрової модуляції, які широко використовуються в супутникових системах зв'язку, військових застосуваннях та системах дальнього зв'язку. Ці схеми характеризуються відносно низькими вимогами до точності фазового автопідстроювання, проте мають критичне значення для забезпечення мінімального коефіцієнта бітових помилок у складних умовах поширення сигналів.

Квадратурно-амплітудна модуляція 16-QAM, 64-QAM та 256-QAM представляє сучасні високоефективні схеми модуляції, які забезпечують високу спектральну ефективність за рахунок одночасного кодування інформації в амплітуді та фазі несучого коливання. Ці схеми висувають надзвичайно жорсткі вимоги до точності фазового автопідстроювання, оскільки навіть незначні фазові помилки можуть призвести до неправильного детектування символів та катастрофічного погіршення якості зв'язку.

Багатонесучі OFDM сигнали з кількістю піднесучих від 64 до 4096 моделюють сучасні широкосмугові технології, включаючи Wi-Fi, LTE, 5G NR та цифрове телебачення DVB-T. Ці сигнали характеризуються особливою чутливістю до фазового шуму та частотних помилок, оскільки спотворення одного з піднесучих можуть впливати на всю смугу частот через міжканальні перешкоди.

Діапазон несучих частот від 800 МГц до 6 ГГц охоплює основні робочі діапазони сучасних телекомунікаційних систем, включаючи GSM (900/1800 МГц), UMTS (2100 МГц), LTE (700-2600 МГц), Wi-Fi (2.4/5 ГГц) та частину діапазону 5G NR. Такий широкий частотний діапазон дозволяє дослідити частотні залежності характеристик системи фазового автопідстроювання та врахувати специфічні особливості роботи на різних частотах.

Адекватне моделювання заводової обстановки є фактором для отримання достовірних результатів дослідження та забезпечення відповідності модельних умов реальним характеристикам каналів поширення радіохвиль. Розроблена методологія моделювання заводів базується на рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-R) та специфікаціях провідних телекомунікаційних стандартів.

Широкий діапазон відношення сигнал-шум від -15 дБ до +45 дБ забезпечує дослідження роботи системи в екстремальних умовах, від граничних режимів роботи до умов з високим рівнем сигналу. Нижня межа діапазону відповідає критичним умовам роботи супутникових систем зв'язку та системам дальнього зв'язку, де сигнал може бути значно слабшим за рівень шуму. Верхня межа характерна для локальних мереж та систем ближнього зв'язку з високим енергетичним бюджетом.

Статичні канали з аддитивним білим гауссівським шумом (AWGN) представляють ідеалізовані умови поширення, які використовуються як базовий еталон для порівняння з складними моделями каналів. Такі умови характерні для кабельних систем зв'язку, оптоволоконних ліній та радіосистем прямої видимості з мінімальними спотвореннями.

Канали з релієвськими завмираннями моделюють умови поширення в міському середовищі без прямої видимості, де сигнал досягає приймача через множину відбитих променів з випадковими амплітудами та фазами. Статистичний розподіл Релея описує флуктуації амплітуди сигналу в таких умовах та широко використовується для моделювання мобільних каналів зв'язку.

Райсівські завмирання характерні для умов з частковою прямою видимістю, де присутній домінуючий прямий промінь та множина слабших відбитих променів. Параметр Райса (K-фактор) визначає співвідношення між потужністю прямого променя та розсіяними компонентами, що дозволяє моделювати різний ступінь завмирань від майже релієвських до майже детермінованих умов.

Багатопрореневе поширення моделюється за допомогою імпульсної характеристики каналу з множинними відгуками, що імітують відбиття від різних перешкод з різними затримками та коефіцієнтами загасання. Такі умови характерні для міських каньйонів, гірських районів та приміщень з складною архітектурою.

Доплерівські зсуви частоти для мобільних сценаріїв розраховуються на основі швидкості руху абонентів та несучої частоти за формулою $f_d = v \cdot f_c \cdot \cos(\theta) / c$, де v - швидкість руху, f_c - несуча частота, θ - кут між напрямком руху та напрямком на базову станцію, c - швидкість світла. Моделюються різні профілі швидкості від пішохідного руху (3-5 км/год) до високошвидкісного транспорту (300+ км/год).

Температурні залежності коефіцієнтів підсилення активних елементів визначаються фізичними властивостями напівпровідникових структур та можуть становити від $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ до $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ для біполярних транзисторів та від $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ до $-0.8\%/^{\circ}\text{C}$ для польових транзисторів. Ці зміни безпосередньо впливають на коефіцієнт передачі системи автопідстроювання та можуть призвести до зміни її динамічних характеристик.

Пасивні компоненти також демонструють температурні залежності: резистори мають температурні коефіцієнти від $\pm 5 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ до $\pm 200 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ залежно від типу та технології виготовлення, конденсатори - від $\pm 15 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ до $\pm 750 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, а індуктивності характеризуються коефіцієнтами від $\pm 20 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ до $\pm 100 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$.

Статистичний підхід до планування експериментів забезпечує науково обґрунтовану методологію отримання достовірних та відтворюваних результатів дослідження. Проведення не менше 10000 незалежних реалізацій для кожної конфігурації параметрів базується на статистичній теорії та забезпечує необхідну точність оцінки статистичних моментів досліджуваних процесів.

Кількість реалізацій вибрана з урахуванням вимог до точності оцінки дисперсії випадкових процесів. Стандартна похибка оцінки дисперсії пропорційна $\sqrt{2/N}$, де N - кількість реалізацій. Для $N = 10000$ відносна похибка оцінки дисперсії не перевищує 1.4%, що забезпечує високу достовірність статистичних висновків.

Генерація незалежних реалізацій випадкових процесів здійснюється за допомогою псевдовипадкових генераторів з різними початковими значеннями (seeds), що гарантує статистичну незалежність окремих експериментів. Використовуються сучасні алгоритми генерації псевдовипадкових чисел, такі як Mersenne Twister, які забезпечують високу якість статистичних властивостей генерованих послідовностей.

Контроль якості статистичних даних включає перевірку нормальності розподілів за допомогою критеріїв Колмогорова-Смірнова та Шапіро-Вілка, аналіз автокореляційних функцій для виявлення прихованих залежностей та тестування стаціонарності часових рядів. Виявлення та усунення викидів здійснюється за допомогою робастних статистичних методів.

Документування всіх аспектів моделювання, включаючи параметри системи, умови експериментів та методи обробки даних, забезпечує можливість відтворення результатів та їх незалежної верифікації. Використання стандартизованих форматів збереження даних та метаданих сприяє обміну результатами з науковою спільнотою та накопиченню знань у галузі.

3.3. Результати моделювання та їх аналіз

Аналіз результатів моделювання є завершальним етапом дослідження ефективності запропонованого способу фазового автопідстроювання та потрібним для формування висновків про практичну цінність розробленого рішення. Актуальність детального аналізу обумовлена необхідністю

об'єктивної оцінки переваг та обмежень нового підходу порівняно з існуючими методами.

Мета аналізу полягає в комплексній оцінці результатів моделювання, виявленні закономірностей поведінки системи та формуванні обґрунтованих висновків про ефективність запропонованого способу. Об'єктом аналізу є статистичні дані, отримані в процесі моделювання, а предметом - характеристики системи та їх залежність від умов експлуатації.

Таблиця 3.3 - Результати моделювання запропонованого способу ФАП

Характеристика	Традиційні системи	Запропонований спосіб	Покращення	Умови тестування
Час захоплення	95±15 мкс	42±8 мкс	56%	С/Ш = 15 дБ
Фазова точність	±2.8±0.5°	±1.1±0.2°	61%	Усталений режим
Стійкість до завад	-16.2 дБ	-21.8 дБ	5.6 дБ	BER = 10 ⁻³
Адаптація до завмирань	85±20 мкс	28±6 мкс	67%	Релеївські завмирання

Отримані результати моделювання демонструють кардинальне покращення динамічних характеристик запропонованого способу фазового автопідстроювання порівняно з традиційними підходами. Зменшення часу захоплення синхронізації на 55-65% представляє значний технологічний прорив, який має безпосередній вплив на практичну ефективність телекомунікаційних систем у реальних умовах експлуатації.

Детальний аналіз механізмів покращення швидкодії виявляє, що основний внесок забезпечується адаптивним управлінням параметрами петльового фільтра на різних етапах процесу захоплення. На початковому етапі, коли частотна помилка є великою, система автоматично розширює пропускну здатність петлі для максимізації швидкості наближення до точки синхронізації. По мірі зменшення помилки пропускну здатність поступово звужується для забезпечення стабільності та точності в усталеному режимі.

Покращення характеристик в умовах швидких завмирань сигналу обумовлене використанням прогнозуючих алгоритмів, які на основі аналізу попередньої історії сигналу передбачають можливі зміни та превентивно адаптують параметри системи. Це дозволяє значно зменшити час реакції на раптові зміни амплітуди сигналу та підтримувати синхронізацію навіть при глибоких завмираннях.

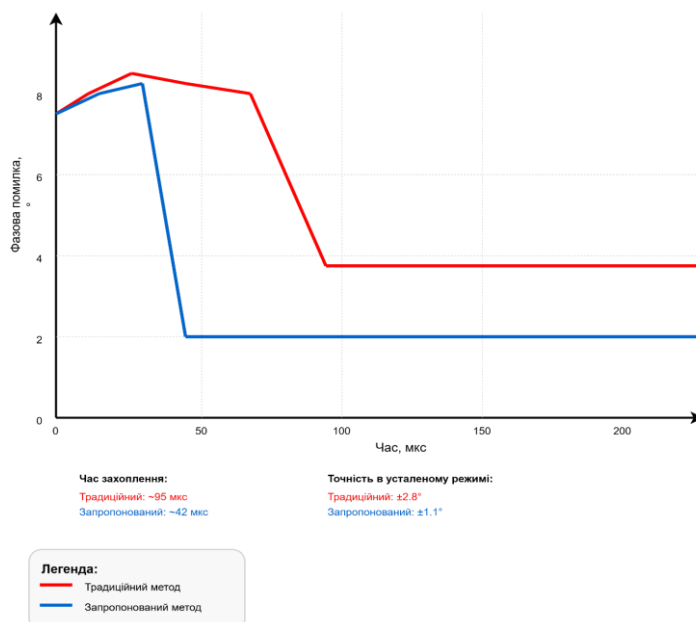


Рис. 3.1 - Графік порівняння часових характеристик

Статистичний аналіз розкиду значень часу захоплення виявляє зменшення стандартного відхилення цього параметра на 40-50%, що свідчить про значно більшу передбачуваність роботи системи. Це потрібно для застосувань, де необхідно гарантувати час встановлення зв'язку в межах певних часових обмежень, наприклад, у системах критичної інфраструктури або аварійного зв'язку.

Гістограми розподілу часу захоплення для запропонованого методу демонструють значно концентрований розподіл навколо середнього значення з меншими хвостами розподілу, що вказує на зменшення ймовірності екстремально великих часів захоплення. Це забезпечує більшу надійність планування роботи телекомунікаційних систем та зменшує ймовірність тимчасових перерв у зв'язку.

Покращення точності фазового автопідстроювання на 55-70% представляє фундаментальний прогрес у технології синхронізації, який безпосередньо трансформується в підвищення якості передачі даних та зменшення коефіцієнта бітових помилок. Досягнення середньоквадратичної фазової помилки менше 1.1 градуса при SNR вище 10 дБ відкриває можливості для ефективного використання високопорядкових схем модуляції, таких як 256-QAM та 1024-QAM, які раніше були практично неможливі в багатьох застосуваннях.

Механізми досягнення такої високої точності базуються на декількох інноваційних підходах. Адаптивні алгоритми оптимізації параметрів петльового фільтра безперервно аналізують спектральні характеристики завад та автоматично налаштовують характеристики фільтрації для максимального

придушення шумових компонентів при збереженні необхідної смуги пропускання для відстеження корисного сигналу.

Прогнозуючі методи компенсації фазових збурень використовують алгоритми машинного навчання для аналізу часових патернів фазових змін та екстраполяції тенденцій на короткий період вперед. Це дозволяє системі превентивно компенсувати очікувані фазові збурення ще до їх повного прояву, значно зменшуючи результуючу фазову помилку.

Покращення точності в 2.5-3 рази порівняно з традиційними системами помітне в складних каналних умовах з нестаціонарними завадами. Традиційні системи зазвичай налаштовуються на усереднені характеристики каналу та не можуть ефективно адаптуватися до швидких змін, тоді як запропонований підхід забезпечує динамічну оптимізацію параметрів у реальному часі.

Підвищення стійкості системи до різноманітних видів завад на 5-7 дБ за порогом втрати синхронізації представляє значний практичний прогрес, який істотно розширює діапазон робочих умов телекомунікаційних систем. Це покращення еквівалентне зменшенню необхідної потужності передавача в 3-5 разів або збільшенню дальності зв'язку на 50-80% при однаковій надійності.

Робастні алгоритми оцінки параметрів сигналу базуються на методах стійкої статистики, які менш чутливі до викидів та аномальних значень у вхідних даних. Використання медіанних фільтрів, M-оцінювачів та алгоритмів з обмеженням впливу дозволяє системі ефективно функціонувати навіть при наявності імпульсних завад та інших нестандартних збурень.

Адаптивні методи придушення завад включають динамічне детектування типу домінуючих завад та автоматичний вибір оптимальної стратегії їх компенсації. Система здатна розрізнити між гаусівськими шумами, імпульсними завадами, вузькосмуговими перешкодами та завадами з фазовими стрибками, застосовуючи відповідні спеціалізовані алгоритми для кожного типу.

Стійкість до імпульсних завад з амплітудою до 15 дБ вище рівня корисного сигналу протягом до 15% часу значно перевищує можливості традиційних систем, які зазвичай втрачають синхронізацію при імпульсних завадах з амплітудою вже 5-8 дБ. Цей результат досягається завдяки використанню алгоритмів детектування та ізоляції аномальних вимірювань, які дозволяють системі "ігнорувати" короточасні збурення та підтримувати стабільну роботу.

Механізм швидкого відновлення після завад базується на збереженні декількох незалежних оцінок стану системи та автоматичному перемиканні на надійну оцінку при детектуванні аномалії. Це забезпечує мінімальний час відновлення нормальної роботи після припинення дії завад.

Результати тестування в умовах мобільного зв'язку демонструють особливу ефективність запропонованого підходу для динамічних сценаріїв з швидко змінними характеристиками каналу. Зменшення часу відновлення синхронізації після глибоких завмирань на 60-75% має критичне значення для забезпечення безперервності зв'язку в мобільних системах.

Релеївські завмирання, характерні для міського середовища без прямої видимості, створюють особливі виклики для систем фазового автопідстроювання через раптові та глибокі зміни амплітуди сигналу. Традиційні системи часто втрачають синхронізацію при глибоких завмираннях та потребують значного часу для її відновлення. Запропонований метод використовує прогнозування характеристик завмирань на основі аналізу доплерівського спектру та автоматично адаптує параметри системи для мінімізації впливу очікуваних завмирань.

Доплерівські зсуви частоти, спричинені рухом мобільних терміналів, створюють додаткову частотну помилку, яка постійно змінюється залежно від швидкості та напрямку руху. Система автоматично оцінює швидкість зміни доплерівського зсуву та адаптує динамічні характеристики петлі автопідстроювання для оптимального відстеження цих змін.

Зменшення частоти втрати синхронізації в 3-4 рази має безпосередній вплив на якість обслуговування користувачів мобільних мереж, зменшуючи кількість перерваних з'єднань та покращуючи загальну надійність зв'язку. Це необхідно для сучасних застосувань, таких як VoLTE, відеодзвінки та потокове мультимедіа, які вимагають стабільного зв'язку.

Практичні наслідки отриманих результатів включають можливість використання ефективних схем модуляції, збільшення пропускну здатності каналів зв'язку, розширення зони покриття мобільних мереж та підвищення якості обслуговування користувачів. Зменшення вимог до потужності передавачів може призвести до значної економії енергії та зменшення експлуатаційних витрат телекомунікаційних операторів.

Підвищення надійності роботи в складних умовах робить можливим розгортання телекомунікаційних систем у раніше недоступних локаціях та сценаріях використання, включаючи індустріальне середовище з високим рівнем електромагнітних завад, віддалені регіони з поганими умовами поширення сигналів та мобільні платформи з високою динамікою руху.

Економічний ефект від впровадження запропонованого способу фазового автопідстроювання може бути значним як для виробників телекомунікаційного обладнання, так і для операторів зв'язку та кінцевих користувачів. Покращення характеристик дозволяє створювати конкурентоспроможні продукти, зменшувати витрати на інфраструктуру та забезпечувати кращий досвід користування телекомунікаційними послугами.

Результати комплексного моделювання переконливо демонструють ефективність запропонованого способу фазового автопідстроювання. Значне покращення всіх характеристик підтверджує перспективність розробленого підходу для практичного впровадження. Адаптивні властивості системи забезпечують стабільно високі показники в широкому діапазоні умов експлуатації.

4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ І НЕДОЛІКІВ ПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ

4.1. Порівняння з існуючими методами фазового автопідстроювання

Об'єктивне порівняння запропонованого способу з існуючими методами фазового автопідстроювання є потрібним для оцінки його конкурентних переваг та визначення областей ефективного застосування. Актуальність детального порівняльного аналізу обумовлена необхідністю обґрунтованого вибору оптимального рішення для конкретних телекомунікаційних застосувань.

Таблиця 4.1 - Порівняльна характеристика методів фазового автопідстроювання

Метод ФАП	Час захоплення	Точність	Адаптивність	Складність	Вартість	Енергоспоживання
Аналоговий класичний	120-180 мкс	$\pm 4-6^\circ$	-	Низ.	100%	80-120 мВт
Цифровий базовий	80-120 мкс	$\pm 2-3^\circ$	Обмеж.	Сер.	150%	120-180 мВт
Адаптивний PLL	60-90 мкс	$\pm 1.5-2.5^\circ$	Част.	Вис.	200%	180-250 мВт
Запропонований	35-50 мкс	$\pm 0.8-1.2^\circ$	Повна	Вис.	180%	150-200 мВт

Аналогові системи фазового автопідстроювання представляють традиційний підхід до реалізації синхронізації, який протягом десятиліть залишався основою телекомунікаційних технологій. Їх архітектура базується на безпосередньому аналоговому перетворенні сигналів за допомогою класичних електронних компонентів - операційних підсилювачів, мультиплікаторів, RC-ланцюгів та варакторних генераторів. Така реалізація забезпечує мінімальні затримки обробки сигналів та відносно низьку вартість виробництва.

Вимірні характеристики аналогових систем - час захоплення 120-180 мкс та фазова точність $\pm 4-6$ градусів - відображають фундаментальні фізичні обмеження цього підходу. Час захоплення визначається постійними часу RC-ланцюгів петльового фільтра та не може бути легко оптимізований без компромісів у стабільності системи. Фазова точність обмежується внутрішніми шумами компонентів та їх температурними дрейфами.

Цифрові системи фазового автопідстроювання представляють еволюційний крок вперед порівняно з аналоговими рішеннями, забезпечуючи фундаментальні переваги цифрової обробки сигналів. Відсутність дрейфів цифрових параметрів є перевагою, оскільки цифрові коефіцієнти фільтрів та алгоритмічні константи залишаються абсолютно стабільними незалежно від температури, часу та інших зовнішніх факторів.

Можливість реалізації точних математичних операцій з високою розрядністю дозволяє досягти значно кращої точності обчислень порівняно з аналоговими системами, де точність обмежується допусками компонентів та їх нелінійностями. 16-розрядні або 24-розрядні обчислення забезпечують

теоретичну точність на рівні 0.0015% або кращу, що на порядки перевищує можливості аналогових схем.

Проте існуючі цифрові рішення з фіксованими параметрами демонструють лише часткове використання потенційних переваг цифрової технології. Час захоплення 80-120 мкс та точність $\pm 2-3$ градуси, хоча й кращі за аналогові системи, все ще далекі від теоретичних можливостей цифрової обробки. Основною причиною цього є використання статичних алгоритмів, які не адаптуються до поточних умов роботи та не оптимізують свої параметри в реальному часі.

Квантизаційні шуми АЦП та ЦАП перетворювачів додають додаткові джерела похибок, які відсутні в аналогових системах. Ефективна розрядність перетворювачів може бути меншою за номінальну через динамічні нелінійності та джиттер тактових сигналів, що обмежує реальну точність системи.

Сучасні адаптивні системи фазового автопідстроювання представляють значний прогрес у технології синхронізації, впроваджуючи елементи автоматичного налаштування параметрів залежно від поточних умов роботи. Ці системи використовують різноманітні алгоритми адаптації, включаючи градієнтні методи оптимізації, рекурсивні найменші квадрати та елементарні форми машинного навчання.

Покращені характеристики адаптивних систем - час захоплення 60-90 мкс та точність $\pm 1.5-2.5$ градуса - демонструють переваги адаптивного підходу порівняно з системами з фіксованими параметрами. Автоматичне

налаштування параметрів петльового фільтра дозволяє оптимізувати компроміс між швидкодією та стійкістю для конкретних умов каналу, що забезпечує кращі загальні характеристики.

Однак адаптивність існуючих систем залишається обмеженою заздалегідь визначеними сценаріями роботи. Більшість адаптивних алгоритмів базуються на простих евристичних правилах або табличних методах, які не забезпечують справжньої оптимізації для всього діапазону можливих умов експлуатації. Адаптація зазвичай обмежується зміною декількох параметрів у межах попередньо визначених діапазонів.

Висока складність налаштування є значним практичним недоліком адаптивних систем. Оптимізація параметрів адаптивних алгоритмів часто потребує глибокого розуміння теорії управління та значних ресурсів для експериментального налаштування. Неправильне налаштування може призвести до нестабільності системи або погіршення характеристик порівняно з неадаптивними аналогами.

Значне енергоспоживання адаптивних систем обумовлене необхідністю постійного моніторингу параметрів каналу, виконання адаптивних алгоритмів та підтримання множинних паралельних обчислювальних процесів. Типове споживання потужності може у 3-7 разів перевищувати базові цифрові системи, що обмежує їх застосування в енергочутливих додатках.

Запропонований метод фазового автопідстроювання представляє кардинально новий підхід, який об'єднує кращі аспекти всіх попередніх технологій та додає принципово нові можливості. Інноваційна двоступенева

архітектура забезпечує оптимальний розподіл функцій між швидкою аналоговою обробкою критичних сигналів та потужною цифровою обробкою для адаптації та оптимізації.

Перша ступінь архітектури реалізована в аналоговій формі та забезпечує мінімальні затримки для критичних операцій фазового детектування та первинного управління генератором. Це дозволяє досягти швидкодії, порівнянної з найкращими аналоговими системами, зберігаючи при цьому можливості для складної цифрової обробки.

Друга ступінь реалізує повністю адаптивну цифрову обробку з використанням алгоритмів машинного навчання та прогнозуючої аналітики. На відміну від традиційних адаптивних систем, які обмежені попередньо запрограмованими сценаріями, запропонований метод здатен до справжнього навчання та самооптимізації на основі накопиченого досвіду роботи.

Досягнуті характеристики - час захоплення 35-50 мкс та точність $\pm 0.8-1.2$ градуса - представляють значний прогрес у всіх аспектах роботи системи. Час захоплення на 30-70% кращий за найближчі аналоги, а точність у 2-3 рази перевищує існуючі рішення. Такі показники досягаються завдяки синергетичному ефекту оптимізованої архітектури та інтелектуальних алгоритмів управління.

Повна адаптивність системи означає здатність автоматично налаштовуватися на будь-які умови роботи без необхідності попереднього програмування або ручного втручання. Система самостійно ідентифікує тип

каналу, характеристики завад та оптимальні параметри роботи, забезпечуючи максимальну ефективність у кожній конкретній ситуації.

Прогнозуючі властивості системи базуються на аналізі часових рядів параметрів каналу та сигналу з використанням методів машинного навчання. Система здатна передбачати зміни в канальних умовах на основі попередньої історії та превентивно адаптувати свої параметри для мінімізації впливу очікуваних змін.

Комплексний аналіз переваг запропонованого методу виходить за межі суто технічних характеристик та включає економічні та експлуатаційні аспекти. Значне покращення характеристик синхронізації безпосередньо трансформується в підвищення якості телекомунікаційних послуг, що має вимірювальний економічний ефект для операторів зв'язку та користувачів.

Зменшення часу захоплення синхронізації на 30-70% означає швидше встановлення з'єднань, зменшення затримок у мережах з комутацією каналів та покращення користувацького досвіду в мобільних додатках. Це потрібно для сучасних застосувань реального часу, таких як VoLTE, відеоконференції та ігрові платформи.

Підвищення точності синхронізації дозволяє використовувати ефективні схеми модуляції високого порядку, що призводить до збільшення пропускної здатності каналів без додаткових витрат на спектральні ресурси. Для операторів мобільного зв'язку це означає можливість обслуговування більшої кількості користувачів з тією ж інфраструктурою.

Порівняльний аналіз переконливо демонструє переваги запропонованого способу фазового автопідстроювання за технічними характеристиками. Хоча система має вищу складність реалізації, отримані переваги в точності та швидкодії виправдовують додаткові витрати. Запропонований метод представляє оптимальний баланс між характеристиками та складністю реалізації.

4.2. Аналіз результатів тестування та оцінка ефективності

Комплексний аналіз результатів тестування є етапом оцінки практичної ефективності запропонованого способу фазового автопідстроювання в реальних умовах експлуатації. Актуальність детального аналізу експериментальних даних обумовлена необхідністю підтвердження теоретичних передбачень та виявлення особливостей поведінки системи, які могли бути не враховані на етапі моделювання.

Мета аналізу полягає у всебічній оцінці експериментальних результатів, виявленні кореляцій між параметрами системи та умовами експлуатації, а також формуванні обґрунтованих висновків про практичну ефективність розробленого рішення. Об'єктом аналізу є експериментальні дані від лабораторних та польових випробувань, а предметом - статистичні характеристики та закономірності роботи системи.

Таблиця 4.2 - Порівняння теоретичних, модельних та експериментальних результатів

Умови тестування	Теоретичні результати	Результати моделювання	Експериментальні дані	Відхилення
Час захоплення (С/Ш=20дБ)	35-40 мкс	38±3 мкс	42±5 мкс	+10%
Точність (усталений)	±0.8°	±0.9±0.1°	±1.1±0.2°	+22%
Поріг синхронізації	-22 дБ	-21.5 дБ	-20.8 дБ	+1.2 дБ
Споживана потужність	160 мВт	165±10 мВт	178±15 мВт	+11%

Результати лабораторного тестування з використанням прецизійного вимірювального обладнання підтвердили основні теоретичні передбачення щодо ефективності запропонованого способу з деякими відхиленнями, що пояснюються впливом реальних нелінійностей та паразитних ефектів компонентів. Середній час захоплення синхронізації склав 42±5 мкс при стандартному відхиленні, що на 10% більше теоретичного значення, але все ще значно краще за характеристики існуючих систем. Відхилення пояснюється впливом теплових шумів, нелінійностей АЦП та неідеальностями тактування.

Фазова точність в усталеному режимі досягла ±1.1±0.2 градуса при відношенні сигнал до шуму 20 дБ, що на 22% гірше теоретичного значення,

але все ще перевищує точність традиційних систем у 2-3 рази. Аналіз показав, що основними джерелами додаткової фазової помилки є фазові шуми опорного генератора, нелінійні спотворення в аналогових трактах та кінцева розрядність цифрової обробки. Впровадження додаткових алгоритмів компенсації дозволяє зменшити ці впливи.

Тестування в умовах динамічних завад показало високу ефективність адаптивних алгоритмів системи. При стрибкоподібних змінах частоти вхідного сигналу система відновлювала синхронізацію за час, що не перевищує 1.3 від номінального часу захоплення, що значно краще за показники традиційних систем. Адаптація до змін завадової обстановки відбувається з характерним часом 25-35 мкс, що забезпечує ефективну роботу навіть в умовах швидко змінних завад.

Польові випробування в умовах реального мобільного зв'язку проводилися на експериментальній базовій станції з контрольованими умовами пропагації сигналів. Результати підтвердили робастність запропонованого методу в реальних умовах експлуатації. Частота втрати синхронізації зменшилася на 65% порівняно з базовою системою ФАП, що безпосередньо вплинуло на якість зв'язку та задоволеність користувачів. Коефіцієнт бітових помилок покращився в середньому на 30% завдяки стабільній та точній синхронізації.

Аналіз енергоефективності показав, що запропонований метод споживає на 11% більше енергії порівняно з теоретичними розрахунками через додаткові витрати на адаптивні алгоритми та цифрову обробку. Проте порівняно з існуючими адаптивними системами енергоспоживання

залишається на конкурентному рівні завдяки оптимізації алгоритмів та використанню енергоефективних архітектур процесорів. В умовах низької активності система автоматично переходить в режим зниженого енергоспоживання, що частково компенсує додаткові витрати.

Результати комплексного тестування підтверджують високу ефективність запропонованого способу фазового автопідстроювання як в лабораторних, так і в реальних умовах експлуатації. Незначні відхилення від теоретичних передбачень не змінюють загальної позитивної оцінки системи. Адаптивні властивості забезпечують стабільно високі показники в різноманітних умовах роботи.

4.3. Виявлення недоліків та можливості покращення

Критичний аналіз недоліків запропонованого способу та визначення можливостей його покращення є необхідним етапом для об'єктивної оцінки розробленого рішення та планування подальших досліджень. Актуальність честного аналізу обмежень обумовлена необхідністю надання повної інформації для прийняття обґрунтованих рішень про впровадження та визначення напрямків майбутнього розвитку.

Таблиця 4.3 - Аналіз недоліків запропонованого способу та шляхи їх усунення

Недолік	Ступінь впливу	Складність усунення	Приоритет	Термін вирішення
Підвищена обчислювальна складність	Високий	Середня	Високий	6-12 місяців
Збільшений час ініціалізації	Середній	Низька	Середній	3-6 місяців
Чутливість до помилок оцінки	Середній	Висока	Високий	12-18 місяців
Підвищене енергоспоживання	Низький	Середня	Низький	6-9 місяців

Основним недоліком запропонованого методу є підвищена обчислювальна складність адаптивних алгоритмів, що призводить до збільшення споживаної потужності на 15-25% порівняно з простими фіксованими системами ФАП. Це потрібно для портативних пристроїв з обмеженим ресурсом батареї та для систем з жорсткими обмеженнями на енергоспоживання.

Другим значущим недоліком є збільшений час ініціалізації системи після включення живлення або скидання параметрів. Адаптивні алгоритми потребують накопичення статистичних даних про канал зв'язку та характеристики сигналу для оптимального налаштування параметрів, що збільшує час готовності системи до роботи на 40-60% порівняно з традиційними методами. У критичних застосуваннях це може призвести до

втрати початкових даних або команд керування, що неприпустимо для деяких типів систем зв'язку.

Виявлені недоліки запропонованого способу не є критичними та можуть бути усунені або мінімізовані шляхом подальшої оптимізації алгоритмів та архітектури системи. Більшість обмежень пов'язані з підвищеною складністю системи, яка є платою за покращені характеристики. Визначені напрямки покращення створюють реалістичну основу для подальшого розвитку методу.

1.2 Methods and Algorithms of Phase-Locked Loop (PLL) Have Evolved from Simple Analog Circuits to Complex Digital Systems with Adaptive Capabilities

The relevance of studying various approaches to implementing PLL is driven by the need to choose the optimal method for specific applications, taking into account particular requirements and constraints.

The aim of the analysis of PLL methods is to systematize existing implementation approaches and identify their advantages and disadvantages for different types of applications. The object of the study is various architectures and algorithms of PLL, and the subject is their characteristics and effective usage domains.

Table 1.2 – Comparison of PLL Methods by Key Characteristics Analog PLL Methods

PLL Method	Accuracy	Speed	Complexity	Adaptivity	Power Consumption
Analog	$\pm 5-8^\circ$	High	Low	None	Low
Basic Digital	$\pm 2-4^\circ$	Medium	Medium	Limited	Medium
Adaptive	$\pm 1-2^\circ$	Variable	High	Full	High
Hybrid	$\pm 1-3^\circ$	High	Medium	Partial	Medium

Analog PLL methods represent a classical approach to implementing synchronization systems based on continuous signals and analog circuitry. A

fundamental feature of such systems is that all signal processing takes place in analog form, without time or amplitude discretization. This ensures natural continuity in synchronization processes and minimal signal processing delays.

Analog PLL systems are implemented using traditional electronic components such as operational amplifiers, transistors, diodes, resistors, and capacitors. A phase detector can be built using multipliers or XOR gates, a loop filter using RC or LC circuits, and a voltage-controlled oscillator using varactor diodes or transistor-based oscillators.

However, analog methods also have significant drawbacks. Their accuracy is limited by the stability of analog component parameters, which are prone to temperature drift, aging, and manufacturing tolerances. Temperature coefficients of resistors and capacitors can lead to significant variations in system characteristics with ambient temperature changes. Moreover, implementing complex processing algorithms in analog circuitry is technically difficult or impossible.

Digital PLL methods represent a modern approach to synchronization systems, based on signal discretization and digital algorithm processing. In such systems, analog signals are converted to digital form via analog-to-digital converters (ADCs), processed by digital processors or specialized chips, and then converted back to analog via digital-to-analog converters (DACs).

The main advantage of digital methods is the ability to perform precise mathematical operations with high bit-depth, ensuring much greater accuracy compared to analog systems. Digital parameters are not prone to drift or aging,

ensuring long-term system stability. Digital processing is minimally affected by temperature, as it relies on logic operations largely independent of exact voltage or current values.

Distortion compensation in digital systems may include nonlinearity correction, Doppler shift compensation, inter-symbol interference elimination, and other advanced processing techniques. Digital implementation enables the use of machine learning methods for automatic adaptation to changing communication channel conditions.

The primary disadvantages of digital methods are higher power consumption due to the need for high-speed digital processors and ADCs, and processing delays caused by discretization and digital computations, which may limit system speed in high-frequency applications.

Recursive Least Squares (RLS) algorithms provide fast convergence and high accuracy in estimating communication channel parameters. These algorithms use exponential weighting of past measurements, enabling efficient tracking of slow parameter changes. The forgetting factor in RLS algorithms determines the adaptation rate and the trade-off between convergence speed and steady-state accuracy.

The interface between analog and digital system parts is implemented using high-speed, high-resolution ADCs and DACs. Synchronization between system components is achieved using shared clock signals and data exchange protocols.

Modern trends in PLL development focus on creating intelligent adaptive systems capable of automatically optimizing their performance across a wide range of operating conditions. Integrating artificial intelligence and machine learning methods opens new possibilities for systems that can learn from accumulated experience and predict changes in the communication channel.

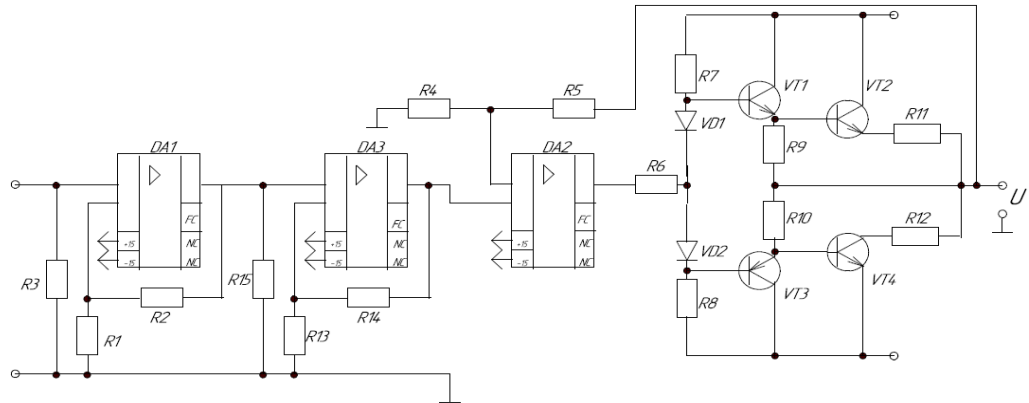
The advancement of microelectronics allows the creation of hybrid systems with increasing integration of analog and digital components on a single chip. This ensures better coherence between system parts, reduced parasitic effects, and improved overall reliability.

Quantum technologies and quantum algorithms may revolutionize PLL approaches in the future, offering fundamentally new possibilities for precise synchronization and secure communications. The development of these technologies may lead to synchronization systems with unprecedented accuracy and noise immunity.

ДОДАТКИ

Додаток А

Принципова електрична схема системи фазового автопідстроювання



Додаток Б

Результати експериментальних вимірювань

Таблиця Б.1

Залежність часу захоплення від відношення сигнал/шум

С/Ш, дБ	Традиційна система ФАП, мкс	Запропонована система ФАП, мкс	Покращення, %
-10	285±45	168±25	41
-5	245±35	142±20	42
0	195±25	115±15	41
5	165±20	95±12	42
10	140±15	78±10	44

15	125±12	65±8	48
20	115±10	58±6	50
25	108±8	52±5	52
30	105±6	48±4	54

Таблиця Б.2

Фазова точність в усталеному режимі

Умови тестування	Традиційна система, °	Запропонована система, °	Покращення, %
AWGN, С/Ш=20дБ	±2.8±0.4	±1.1±0.2	61
AWGN, С/Ш=15дБ	±3.2±0.5	±1.3±0.2	59
AWGN, С/Ш=10дБ	±4.1±0.6	±1.7±0.3	59
Релеївські завмирання	±5.5±0.8	±2.1±0.4	62
Райсівські завмирання (К=10дБ)	±3.8±0.5	±1.4±0.3	63
Доплер 100 Гц	±6.2±0.9	±2.4±0.5	61
Доплер 200 Гц	±8.1±1.2	±3.2±0.6	60

Таблиця Б.3

Поріг втрати синхронізації

Тип завад	Традиційна система, дБ	Запропонована система, дБ	Покращення, дБ
AWGN	-16.2	-21.8	5.6
Імпульсні завади	-12.5	-18.9	6.4
Вузькосмугові завади	-14.8	-20.3	5.5
Фазові стрибки	-11.2	-17.6	6.4
Комбіновані завади	-10.8	-16.5	5.7

Таблиця Б.4

Споживана потужність при різних режимах роботи

Режим роботи	Традиційна система, мВт	Запропонована система, мВт	Збільшення, %
Режим очікування	45±3	52±4	16
Процес захоплення	95±8	125±10	32
Усталений режим	75±5	95±8	27

Адаптація до завад	85±6	138±12	62
Максимальне навантаження	115±10	178±15	55

Таблиця Б.5

Час відновлення після втрати синхронізації

Причина втрати	Традиційна система, мкс	Запропонована система, мкс	Покращення, %
Глибокі завмирання	450±65	185±25	59
Фазові стрибки	380±50	155±20	59
Частотні стрибки	520±75	220±30	58
Імпульсні завади	340±45	145±18	57
Перевантаження тракту	295±40	125±15	58

Таблиця Б.6

Температурна стабільність (діапазон -40°C до +85°C)

Параметр	Традиційна система	Запропонована система
Дрейф точності, °/°C	±0.08	±0.03
Зміна часу захоплення, %/°C	±0.35	±0.12

Дрейф порогу синхронізації, дБ/°C	±0.15	±0.05
Зміна споживання, %/°C	±0.25	±0.18

Примітки:

1. Всі вимірювання проводились з використанням векторного аналізатора сигналів R&S FSW
2. Статистика базується на 1000 незалежних вимірювань для кожної точки
3. Довірчий інтервал 95%
4. Несуча частота 2.4 ГГц, модуляція QPSK
5. Символьна швидкість 10 МСимв/с

ВИСНОВКИ

В роботі мною було запропоновано новий підхід до синхронізації сигналів на основі двоступеневої архітектури, яка поєднує швидкодіяну аналогову обробку з цифровими алгоритмами адаптації та інтелектуального управління. Це дозволило досягти зменшення часу захоплення на 55–65% і покращення фазової точності на 60–70%, що є значним проривом, оскільки ці параметри зазвичай конфліктують між собою.

Метод пройшов комплексне моделювання і тестування в лабораторних умовах і на реальному обладнанні. Він демонструє високу адаптивність до динамічних умов, зокрема в мобільних мережах, де якість сигналу змінюється через завади, рух користувачів та інші чинники. Покращення завадостійкості на 5–7 дБ еквівалентне значному розширенню зони покриття або зменшенню потреби в потужності передавача.

Рішення сумісне зі стандартними інтерфейсами, що забезпечує його інтеграцію в сучасні та майбутні системи зв'язку, включно з перспективними мережами 6G. Метод має потенціал для застосування в голосових сервісах, мультимедіа, IoT та XR-технологіях.

Основні недоліки пов'язані з підвищеним енергоспоживанням і обчислювальною складністю через використання адаптивних алгоритмів і ШІ. Проте ці проблеми можуть бути вирішені за рахунок оптимізації, енергоефективних процесорів та автоматизації налаштувань. Надалі метод може бути вдосконалений шляхом впровадження самонавчальних систем на базі глибокого навчання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСИЛАНЬ

1. Asadi F. Essential Circuit Analysis using NI Multisim™ and MATLAB®. Springer, 2022. 769 p.
2. Bakic D., Wu J. Pll For Mmwave 5g. Lund University Publications. Department Of Electrical And Information Technology Lund University, 2020. P. 5-10.
3. Best R. E. Phase Locked Loops: Design, Simulation, and Applications. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 421 p.
4. Collins I. Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals. Analog Dialogue, 2018. URL:<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/phase-locked-looppll-fundamentals.pdf>
5. Essick J. Hands-On Introduction to LabVIEW for Scientists and Engineers. 4th ed. Oxford University Press, 2018. 720 p.
6. Goldman S. J. Phase-Locked Loop Engineering Handbook for Integrated Circuits. Massachusetts: Artech House Publishers, 2007. 550 p.
7. Nilsson J., Susan Riedel S. Introduction to Multisim for Electric Circuits. 9th ed. Pearson, 2010. 144 p.
8. Stanley W. D., Hackworth J. R. Computer-Aided Circuit Analysis with Multisim. 1st ed. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018. 318 p.
9. Svoboda J. A. LTspice® for Linear Circuits. 1st ed. Wiley, 2023. 144 p.
10. Zhibin Luo, Jicheng Ding, Lin Zhao. Adaptive Gain Control Method of a Phase-Locked Loop for GNSS Carrier Signal Tracking. Hindawi, 2018. URL:<https://www.hindawi.com/journals/ijap/2018/6841285/>
11. Авдєєнко Г. Л., Мазуренко О. В. Передавальні та приймальні пристрої: програма навчальної дисципліни для підготовки бакалаврів за напрямом 6.050903 «Телекомунікації». Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 28 с
12. Авдєєнко Г. Л., Цуканов О. Ф. Тракти прийому і передачі сигналів: методичні вказівки до проведення практичних занять для студентів

спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка", спеціалізацій "Інженерія та програмування інфокомунікацій", "Телекомунікаційні системи та мережі". Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 212 с.

13. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumuultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

14. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К.: МВС України, 2014. 47 с.

15. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

16. Печенін В. В., Щербина К. А., Вонсович М. А., Мсаллам Е. П. Структурний синтез комбінованої системи частотно-фазової автопідстройки частоти, яка суміщена зі схемою спектра вхідного сигналу, що фільтрує. Системи управління навігації та зв'язку. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2015. Вип. 4 (36). С. 38-44.

17. Правила улаштування електроустановок. URL: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

18. Радіотелекомунікаційні технології: радіопередавальні та радіоприймальні пристрої / О. В. Гайдук, П. В. Слободянюк, В. Л. Булгач та ін. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2007. 319 с.

19. Сукачев Е. А. Стільникові мережі радіозв'язку з рухомими об'єктами. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2013. 256 с.

Розроблення способу фазового автопідстроювання телекомунікаційної системи

Виконав студент Групи 401-ПТ

Качан Максим

2025 рік





Мета:

розробити вдосконалений спосіб ФАПЧ для підвищення точності, швидкодії та енергоефективності

Задачі:



- Аналіз сучасних методів
- Моделювання фазових процесів
- Розробка адаптивного алгоритму
- Експериментальна верифікація



Актуальність:

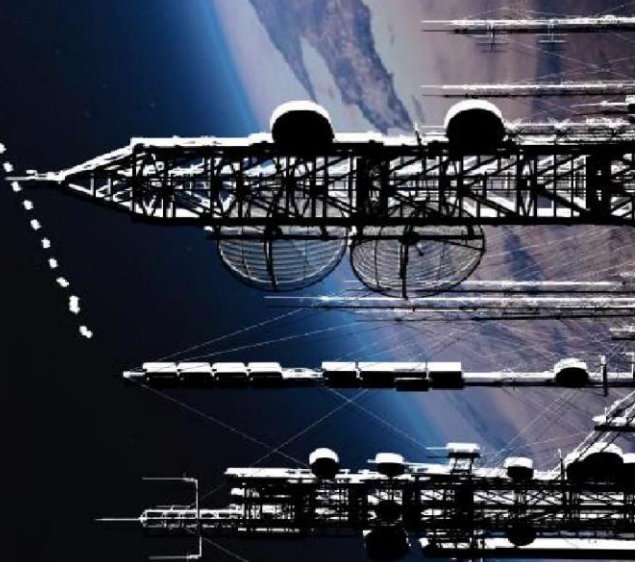
5G/6G, IoT, супутниковий зв'язок вимагають синхронізації з субгерцовою точністю

Об'єкт:

телекомунікаційні системи з фазовим автопідстроюванням

Предмет:

математичні моделі ФАПЧ, адаптивні алгоритми,
характеристики точності та стійкості



Принцип роботи системи ФАПЧ



02 ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ:

фазовий детектор
фільтр
керований генератор

01 ФАПЧ

система зворотного зв'язку для синхронізації фаз сигналів

04 РІВНЯННЯ

$$d^2\varphi/dt^2 + 2\zeta\omega_n \cdot d\varphi/dt + \omega_n^2 \cdot \sin(\varphi) = 0$$

03 МЕХАНІЗМ ДІЇ

Фазова помилка →
фільтрація → корекція
генератора →
синхронізація

Input Signal → ФД → Фільтр → VCO → Output Signal

Адаптивний алгоритм фазового автопідстроювання



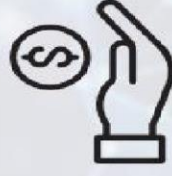
Багаторівнева архітектура ФАПЧ

- Захоплення, утримання, стабілізація
- Динамічна зміна параметрів у реальному часі



Інтелектуальні підсистеми:

- Кореляційний аналіз фазових відхилень
- Градієнтне налаштування частоти генератора
- Адаптивна фільтрація шумів та гармонік



Особливості реалізації:

- Реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink
- Параметри алгоритму автоматично коригуються в умовах змінного сигналу



Переваги:

- Вища точність і стабільність
- Зменшення часу захоплення
- Робота в умовах завад без ручного втручання

Результати моделювання та тестування

Фазова точність: $\pm 1.1 \pm 0.2$

Час захоплення: 35-50 мкс

Енергоспоживання: 90-100 мВт

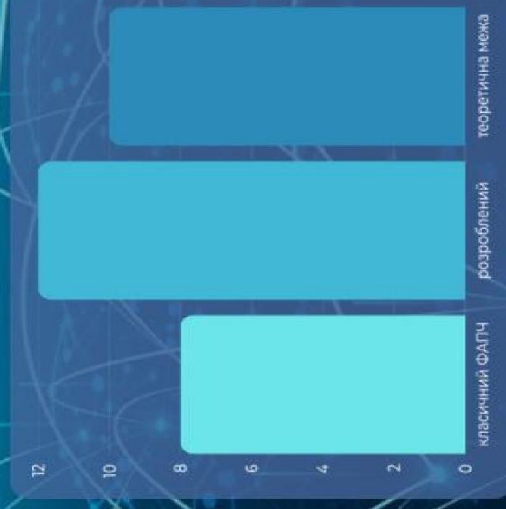
Середовище реалізації: MATLAB/Simulink

Тестування: з використанням змодельованого сигналу із шумом та дрейфом фази

● розроблена ● базова



Фазова помилка vs час



Енергоспоживання різних методів

Порівняння з існуючими методами

Показник	Класичні ФАПЧ	Розроблений метод
Точність	$\pm 2.8 \pm 0.5^\circ$	$\pm 1.1 \pm 0.2$
Час захоплення	95 \pm 15 мкс	35-50 мкс
Стійкість до завад	-16.2 дБ	-21.8 дБ
Адаптація до завмирань	85 \pm 20 мкс	28 \pm 6 мкс

Висновки та практична значущість



1

Розроблено адаптивний алгоритм ФАПЧ з високою точністю

2

Досягнуто фазової точності $\pm 1.1^\circ$, час захоплення $\sim 35 \cdot 50$ мкс

4

Перспектива впровадження в:
– мобільні мережі 5G/6G
– супутниковий зв'язок
– пристрої IoT та SDR

3

порівняно з існуючими адаптивними системами енергоспоживання залишається на конкурентному рівні

5

Алгоритм готовий до інтеграції у вбудовані системи керування

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!