

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Алтунін Сергій Ігорович**



УДК 621.372

**ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПРОГРАМНО КЕРОВАНИХ  
ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2019

**Дисертацією є рукопис.**

**Робота виконана** у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бондарєв Андрій Петрович**, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Полікаровських Олексій Ілліч**, Хмельницький національний університет, професор кафедри телекомунікацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Самков Олександр Всеволодович**, Інститут електродинаміки НАН України, заступник директора з науково-технічної роботи.

Захист дисертації відбудеться “11” жовтня 2019 р. о 14<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “05” вересня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради



І. В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційну роботу присвячено питанням підвищення завадостійкості цифрового пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ).

**Актуальність теми.** Пристрої ФАПЧ є необхідною складовою частиною різноманітних радіоелектронних приладів і без них неможливо уявити роботу сучасних приймачів, засобів телекомунікацій, систем радіолокації та навігації. Крім того, у зв'язку зі стрімким розвитком цифрової схемотехніки широкого застосування набули повністю цифрові пристрої ФАПЧ, які мають низку переваг над аналоговими. Зокрема, цифрові пристрої синхронізації є надійнішими, гнучкішими в налаштуванні, мають кращі технологічні показники. Пристрої ФАПЧ використовують у радіоелектронних системах різного призначення для розв'язання великого переліку завдань – від синтезу частот та генерації тактових імпульсів до детектування сигналів із двійковою фазовою маніпуляцією.

Подальший розвиток систем зв'язку стримується пороговим значенням відношення сигнал-шум (ВСШ), при досягненні якого система втрачає працездатність. Порогове значення ВСШ впливає на місткість системи зв'язку, що визначається за модифікованою формулою Віттербі. Оскільки приймачі радіосигналів сучасних систем зв'язку містять пристрої фазової синхронізації, то здатність цих пристроїв зберігати синхронізацію в умовах дії різного роду завад безпосередньо впливає на працездатність приймачів та місткість систем зв'язку в цілому.

Різноманіття номенклатури пристроїв ФАПЧ постійно зростає. Великий внесок у класифікацію та розроблення цих пристроїв внесли Р. Бест, В. Ліндсі, Г. ван Тріс, С. Голдман, Ф. Гарднер, В. В. Шахгільдян, Г. Ф. Зайцев, О. В. Самков, В. К. Стеклов, Є. В. Лебідь. Також велика частина робіт сучасних вітчизняних та зарубіжних авторів стосується опису роботи пристроїв ФАПЧ, що оперують сигналами зі складною фазовою маніпуляцією, розгляду фазових шумів та джитера керованого генератора пристрою ФАПЧ і варіантів реалізації таких пристроїв на різноманітних платформах.

Одним з найдавніших типів цифрових пристроїв ФАПЧ є пристрої з рівномірною дискретизацією, компоненти яких побудовані за прототипами аналогових пристроїв. Теорія їх аналізу була розроблена ще у минулому столітті та узагальнена у працях американського вченого Р. Беста, тому такий тип пристроїв на сьогоднішній день можна вважати класичним. Ці роботи містять математичні моделі пристрою ФАПЧ в часовій та частотній областях, вирази для оцінки частотних характеристик пристрою за його нормалізованими параметрами, а також рекомендовані алгоритми синтезу цих пристроїв та методи вимірювання їх характеристик. Крім того, Р. Бест пропонує свій критерій для покращення працездатності пристрою в умовах дії завад за мінімумом шумової смуги пристрою.

Паралельно було проведено теоретичні дослідження аналогових, а потім і цифрових пристроїв ФАПЧ радянськими вченими, зокрема Шахгільдяном В.В. Науковець вважав, що для покращення завадостійкості пристрою ФАПЧ його слід реалізувати як оптимально-узгоджений фільтр (по відношенню до вхідних сигналів, які на нього надходять), а параметри пристрою слід оптимізувати так, щоб похибка оцінки фази вхідного сигналу була мінімальною.

Попри існування цілісної та ґрунтовної теорії роботи класичних пристроїв ФАПЧ, вони не враховують усіх можливих умов їх роботи. Зокрема, дуже часто моделі цих пристроїв є лінеаризованими для полегшення аналізу їх характеристик, а особливості їх роботи за малих відношень сигнал-шум взагалі не розглядають, оскільки в такому випадку математична модель пристрою перестає бути лінійною. А отже, явище зриву синхронізації ця теорія описати неспроможна. Крім того, у працях цих науковців відсутній аналіз роботи пристрою за умов дії модуляції вхідного сигналу та зовнішніх завад.

Наукові досягнення класиків були розвинуті іншими вітчизняними та зарубіжними вченими. За результатами їх роботи було створено математичні моделі цих пристроїв, що враховують як дії завад, так і модуляцію вхідного сигналу. Кожен із авторів використовував їх для розв'язання різних завдань: аналізу та побудови статистичних характеристик роботи пристрою ФАПЧ, покращення його швидкодії, пошуку шумового порогу. Проте, покращення однієї із властивостей пристрою фазової синхронізації часто призводить до погіршення іншої. Для забезпечення працездатності сучасних приймачів важливо не лише понизити шумовий поріг пристрою, але й зберегти їх динамічні властивості для приймання та оброблення сигналів зі складними видами модуляції. Тому виникає потреба у вдосконаленні будови пристрою фазової синхронізації та модифікації його основних компонентів для розв'язання цього завдання. Підвищена увага до дослідження різноманітних структур детектора цифрових сигналів та оптимізації його параметрів викликана тим, що цей шлях не вимагає збільшення масо-габаритних та вартісних показників приймача.

Крім того, важливо розробити повністю цифровий пристрій ФАПЧ на сучасній елементній базі, який буде володіти покращеними характеристиками та провести експериментальні (а не лише теоретичні) дослідження його граничної завадостійкості та динамічної поведінки. Реалізація такого пристрою ФАПЧ дає можливість проектування сучасних приймачів цифрових радіосигналів, що володітимуть більшою інформаційною місткістю.

Тому підвищення завадостійкості пристроїв фазової синхронізації шляхом оптимального вибору параметрів повністю цифрового пристрою фазового автопідстроювання частоти та структурної модифікації методів керування генератором цифрового синтезу сигналу гетеродина синхронного фазового детектора є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напряму кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка» «Математичне моделювання та оптимізація радіотехнічних пристроїв» та в межах держбюджетної науково-дослідницької роботи «Підвищення ефективності засобів бездротового зв'язку відповідального призначення та процедур моделювання і прогнозування їх характеристик» (ДБ/Зв'язок) (2018-2019 рр.), держ. реєстр. № 0118U000261.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є зменшення шумового порогу цифрових пристроїв фазової синхронізації та створення програмно-апаратної реалізації пристрою фазового автопідстроювання частоти з підвищеною завадостійкістю та зі збереженими динамічними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану розвитку аналогових та цифрових пристроїв фазової синхронізації, досліджень їх завадостійкості та динамічної поведінки.

2. Створити математичну модель цифрового пристрою ФАПЧ із модифікованим фазовим детектором, яка враховує дію широкосмугової випадкової завади та зміну несучої частоти сигналу в процесі синхронізації.

3. Розробити імітаційну модель цифрового пристрою ФАПЧ на основі генератора прямого цифрового синтезу, дослідити його граничну завадостійкість та межі стеження за двома способами фіксації зриву синхронізму.

4. Створити програмно-апаратну реалізацію цифрового пристрою ФАПЧ із класичним та модифікованим фазовим детектором для проведення експериментальних досліджень його завадостійкості.

5. Експериментально дослідити вплив узгодження частотної характеристики пристрою ФАПЧ зі спектром вхідного частотно-модульованого сигналу на зміну смуги утримання та шумового порогу пристрою ФАПЧ за умови дії адитивного білого гаусового шуму на його вході шляхом перебору параметрів цифрового фільтра.

6. Провести оцінку величини зменшення порогового відношення сигнал-шум, при якому відбувається зрив синхронізації у програмно-апаратному пристрої ФАПЧ з модифікованим фазовим детектором.

7. Дослідити динамічну поведінку модифікованого пристрою ФАПЧ шляхом аналізу тривалості перехідних процесів при подаванні на вхід пристрою фазо-маніпульованих сигналів.

*Об'єкт дослідження* – процес синхронізації із модульованими радіосигналами у цифрових пристроях фазового автопідстроювання частоти.

*Предмет дослідження* – методи покращення завадостійкості у програмно-апаратних пристроях фазового автопідстроювання частоти.

*Методи дослідження* – аналітичні методи (побудова математичної моделі цифрового пристрою ФАПЧ у часовій області), імітаційне моделювання (перевірка математичної моделі пристрою ФАПЧ), експериментальне дослідження програмно-апаратної реалізації пристрою ФАПЧ.

**Наукова новизна роботи полягає у тому, що:**

1. Вперше запропоновано метод вибору параметрів цифрового фільтра у програмно-апаратному пристрої ФАПЧ з метою підвищення його завадостійкості, який відрізняється від відомих апріорних методів узгодженням амплітудно-частотної характеристики пристрою ФАПЧ з огинаючою спектра вхідного сигналу за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення; це дало змогу забезпечити працездатність пристрою за відношення сигнал/шум нижчого на 1-2,5 дБ, залежно від параметрів пристрою і, як наслідок, – підвищити граничну завадостійкість пристрою та місткість системи зв'язку, що його використовує.

2. Набула подальшого розвитку математична модель модифікованого фазового детектора із квадратурним цифровим обробленням відліків вхідного сигналу, яка, на відміну від відомих, описує взаємозв'язок амплітудно-частотних характеристик вузькосмугового фільтра та фільтра верхніх частот, узгодження яких дало змогу обґрунтувати вибір структурно-функціональної схеми модифікованої програмно-апаратної реалізації пристрою ФАПЧ, що дала змогу зберегти незмінною смугу утримання пристрою ФАПЧ в статичному режимі та забезпечити відсутність спотворень вхідного сигналу.

3. Удосконалено метод імітаційного моделювання цифрового пристрою ФАПЧ за умови впливу на вхідний сигнал адитивного білого гаусового шуму, який відрізняється від існуючих методів застосуванням двох способів фіксації втрати синхронізму, що враховують вплив шумів постійної інтенсивності та наростаючої з плином часу інтенсивності, та визначення шумового порогу, в першому випадку – за ознакою зменшення середньої тривалості між фазовими проковзуваннями, а в другому – за ознакою фіксації першого фазового проковзування, що дало змогу, на основі збіжності отриманих результатів, підтвердити ефективність модифікованого цифрового пристрою ФАПЧ.

**Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:**

1. Реалізовано програмно-апаратний цифровий пристрій ФАПЧ із модифікованим фазовим детектором на базі програмованої логікової інтегральної схеми (ПЛІС) фірми Xilinx архітектури Artix-7 з діапазоном вхідних сигналів до 50 кГц. Експериментально досягнуто підвищення завадостійкості (пониження шумового порогу) пристрою на 2,5 дБ, у порівнянні з класичним пристроєм ФАПЧ. У цьому пристрої наявні периферійні засоби для регулювання частоти керованого генератора пристрою та додатково передбачено канал обміну даними з комп'ютером (програмою в середовищі MATLAB), по якому пристрій надсилає значення його параметрів та параметрів

вхідного сигналу у режимі реального часу. Такий функціонал пристрою дає змогу в разі пришвидшити його відлагодження та дослідження його шумового порогу шляхом перебору параметрів пристрою, що відрізняє його від багатьох відомих. Це дає змогу використовувати такий пристрій, наприклад, як складову частину сучасних приймачів цифрових радіосигналів із проміжною частотою.

2. Реалізовано допоміжний компонент програмно-апаратного пристрою ФАПЧ – детектор синхронізму, що дало змогу підвищити точність оцінки шумового порогу та моменту часу, в який наступає зрив синхронізації. За умови коректного вибору частотних параметрів цього детектора можливо досягти зменшення похибки визначення моменту зриву синхронізації орієнтовно до 1 %. Блок детектора синхронізму дає змогу чітко визначити стан синхронізації навіть за великих значень відношення сигнал-шум, близьких до порогових значень.

3. Забезпечено цифрове керування опорною частотою генератора та смугою пропускання програмно-апаратного пристрою ФАПЧ, що дало змогу скоротити тривалість перехідних процесів під час оброблення фазоманіпульованих сигналів щонайменше у 1,5 рази.

**Особистий внесок здобувача.** Завдання на дисертаційну роботу було сформульоване та поставлене керівником. Особистий внесок автора в отриманих наукових результатах полягає в тому, що увесь процес розроблення програмно-апаратного пристрою, імітаційне моделювання та експериментальне дослідження були проведені автором самостійно. У роботах, написаних у співавторстві, авторові дисертації належить: [1, 2, 7, 8] – розроблення апаратної та програмної частин цифрового пристрою ФАПЧ, імітаційне моделювання та експериментальне дослідження перехідних процесів під час захоплення частоти; [4] – імітаційне моделювання та експериментальне дослідження процесу зриву синхронізації в програмно-апаратному пристрої ФАПЧ за відсутності шуму та дослідження впливу паразитних гармонік на симетричність смуги утримання за умови недостатньої фільтрації подвійної складової на виході фазового детектора; [5, 9, 11] – імітаційне моделювання та експериментальне дослідження частотної характеристики програмно-апаратного пристрою ФАПЧ, порівняння результатів, отриманих обома шляхами; [6] – математична модель модифікованого пристрою ФАПЧ у часовій області, метод імітаційного моделювання завадостійкості цифрового пристрою ФАПЧ за двома способами фіксації зриву синхронізму, експериментальне дослідження шумового порогу та динамічної поведінки модифікованого програмно-апаратного пристрою ФАПЧ; [10] – експериментальне дослідження завадостійкості програмно-апаратного пристрою ФАПЧ з модифікованим фазовим детектором; [12] – метод підвищення завадостійкості програмно-апаратного пристрою ФАПЧ шляхом вибору параметрів цифрового фільтра для узгодження амплітудно-

частотної характеристики пристрою ФАПЧ зі спектром вхідного частотно-модульованого сигналу та експериментальне дослідження цього методу.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися, на 5-ти міжнародних наукових конференціях: Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Україна, м. Запоріжжя, 2016, 2018 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах PREDT», (Україна, м. Чернівці, 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (Україна, м. Івано-Франківськ, 2017 р.), Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо'2017 (Україна, м. Одеса, 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering» (Україна, м. Львів – Славське, 2018 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 12 публікаціях, із них 6 – у фахових наукових виданнях України, в тому числі 1 – у періодичному виданні, що входить до наукометричної бази даних Scopus, а також 6 публікацій – у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 128 найменувань, 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 184 сторінки, із них 120 сторінок основного тексту, містить 72 рисунки та 6 таблиць, 4 додатки на 14 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі проведено обґрунтування актуальності тематики дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дисертаційних досліджень, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Також наведено список публікацій здобувача та апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг роботи.

У першому розділі – «Сучасний стан розвитку аналогових та цифрових ФАПЧ та проблеми підвищення їх завадостійкості» – представлено базову структурну схему класичного пристрою ФАПЧ та пояснено принцип його роботи. Наведено такі основні параметри, які характеризують його здатність захоплювати та зберігати синхронізацію – смуга утримання та смуга захоплення.

Нижче наведено класифікацію пристроїв ФАПЧ за типом елементної бази, на якій вони реалізовані – аналогові, аналогово-цифрові, повністю



цифрові та програмні пристрої ФАПЧ. Способів реалізації цифрових пристроїв ФАПЧ є досить багато, проте їх кількість також залежить від типу фазового детектора, який використано у пристрої. Наведено схеми деяких різновидів цифрових пристроїв ФАПЧ як з рівномірною, так і з нерівномірною частотою дискретизації та вказано їх ключові особливості.

Проведено аналіз літературних джерел на предмет проблем підвищення завадостійкості пристроїв ФАПЧ. Розглянуто відомі підходи до проектування пристроїв фазової синхронізації у радіоприймачах, що описані у класичних працях Р. Беста та В.В. Шахгільдяна. Обидва ці підходи мають свої недоліки, основний з яких полягає в тому, що математичні моделі цих пристроїв не здатні пояснити їх принцип роботи за низьких відношень сигнал-шум, коли настає зрив синхронізації.

У працях Бондарєва А.П. представлено математичні моделі пристроїв ФАПЧ, що враховують одночасну дію модуляції та зовнішніх завад на поведінку пристрою. Дослідження цих моделей показали, що підвищення завадостійкості для таких пристроїв досягається погіршенням їх динамічних властивостей.

В наступних працях автора приведене розв'язання цієї проблеми, яке полягає у застосуванні синхронного фазового детектування з використанням вузькосмугової фільтрації корисного сигналу та подальшим відновленням динаміки сигналу фільтром верхніх частот. Автори у своїх дослідженнях показали, що шумовий поріг модифікованого пристрою ФАПЧ суттєво знижується для сигналів з високим індексом модуляції, а нелінійні спотворення сигналу на виході пристрою зменшуються. Застосування такого підходу зумовило зменшення шумових і динамічних похибок та підвищення допустимого рівня випадкових завад до 4 разів.

Попри перспективність отриманих результатів та практичну цінність, цим роботам бракує експериментальних досліджень, у яких була би наведена фізична реалізація реальних пристроїв ФАПЧ; крім того, вказані дослідження були проведені лише для аналогових пристроїв ФАПЧ.

Низка інших вітчизняних науковців присвячували свої дослідження вдосконаленню динамічних параметрів пристрою ФАПЧ, а саме – швидкодії та динамічності точності, зменшенню часової нестабільності керованого генератора пристрою та середньоквадратичної похибки фази. Попри те, що дослідженням бракує експериментального підтвердження результатів моделювання, ці роботи наводять приклади успішних способів використання пристроїв ФАПЧ для підвищення енергоефективності систем автоматичного керування у сфері радіолокації. Ще однією проблемою, яку було розглянуто у відомих працях науковців було протиріччя між покращенням динамічних характеристик пристрою та його стійкості. Цю проблему було розв'язано шляхом побудови комбінованої системи фазового автопідстроювання, що поєднує переваги

систем з принципом керування по відхиленню та систем ФАПЧ з диференціальним зв'язком. Проте моделі цих пристроїв, зокрема моделі фазових детекторів є лінійними, а рівень випадкових збурень при математичному моделюванні є вкрай малим, що не дає змоги дослідити шумові пороги цих типів пристроїв.

З розвитком цифрової схемотехніки було суттєво удосконалено принципи побудови цифрових фазових детекторів, що дало змогу зробити їх характеристику більш лінійною, ніж у класичного фазового детектора (перемножувача). Незважаючи на це, при дослідженні граничної завадостійкості відмінності між двома типами характеристик не будуть визначальними і проявлятимуться лише у вузькому діапазоні рівня шуму поблизу області зриву. Для низьких рівнів завад ці характеристики будуть ідентичними, а для великих – завадостійкість визначатиметься не формою, а періодом детекторної характеристики.

На завадостійкість сучасних приймачів мають вплив також способи оброблення сигналів. У деяких роботах вказано, що використанням дискретного перетворення Фур'є та модифікацій вейвлет-перетворень можна досягти покращення завадостійкості пристрою ФАПЧ. Поширеним способом реалізації керованих генераторів є прямий цифровий синтез. Тому важливо забезпечити високий рівень спектральних характеристик цих синтезаторів для мінімізації фазового шуму на виході пристрою фазової синхронізації.

Таким чином, на основі аналізу літературних джерел поставлено завдання фізичної реалізації програмно-апаратного пристрою ФАПЧ із підвищеною завадостійкістю та збереженими динамічними властивостями.

У другому розділі – **«Аналітична модель цифрового пристрою ФАПЧ у складній завадовій обстановці»** – коротко розглянуто математичну модель аналогового пристрою ФАПЧ, параметри та коефіцієнти передавання кожного з його основних компонентів. Наведено вирази для оцінювання смуг утримання та захоплення в залежності від параметрів пристрою, а також фізичний та геометричний зміст шумової смуги пристрою ФАПЧ.

На основі математичної моделі аналогового пристрою ФАПЧ було здійснено перехід до моделі класичного цифрового пристрою ФАПЧ, що приймає дискретизовані вхідні сигнали. Пояснено реалізацію кожного компонента цифрового пристрою ФАПЧ. Зокрема, наведено вирази для обчислення коефіцієнтів цифрового петльового фільтра за параметрами аналогового фільтра прототипу:

$$b_0 = \frac{\pi f_c \Delta t + m}{\pi f_c \Delta t + 1}; b_1 = \frac{\pi f_c \Delta t - m}{\pi f_c \Delta t + 1}; a_1 = -\frac{\pi f_c \Delta t - 1}{\pi f_c \Delta t + 1}. \quad (1)$$

Тут  $f_c = \frac{1}{2\pi T}$  – частота зрізу аналогового ФНЧ,  $\Delta t$  – інтервал дискретизації,  $m$  – коефіцієнт пропорційності фільтра.

Детально описано принцип роботи керованого цифрового генератора, побудованого на базі генератора прямого цифрового синтезу (англ. direct digital synthesis, DDS), що є еквівалентом ГКН в аналоговому пристрої. Зображено графічне обґрунтування впливу характеристики фазового детектора (ФД) на смугу утримання при відсутності завад (рис. 1) та вираз для обчислення цієї смуги.

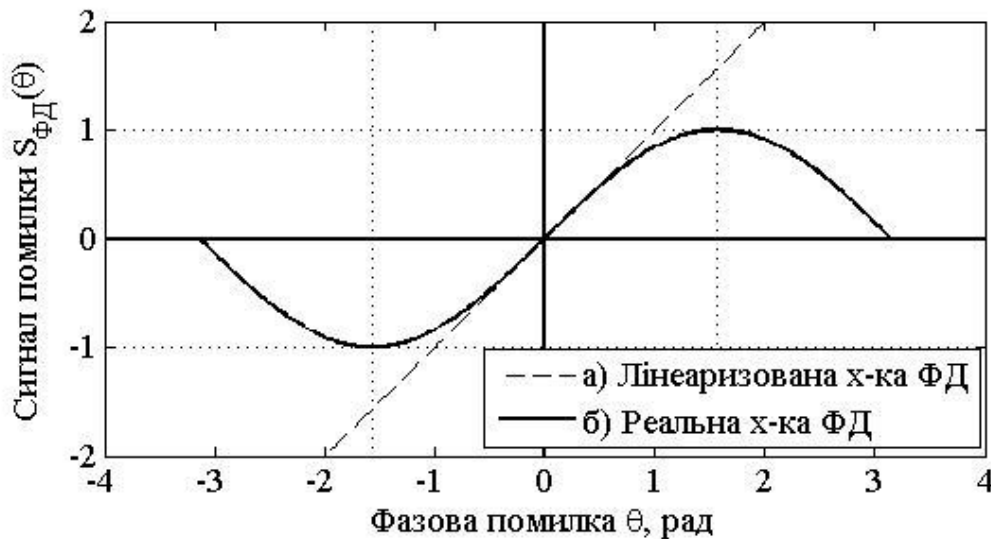


Рис.1. Лінійаризована та реальна характеристики ФД при  $K_{\Phi D} = 1$ .

Смуга утримання  $f_y$  пристрою ФАПЧ:

$$f_y = \frac{K_0 K_{\Phi D}}{2\pi}. \quad (2)$$

Тут  $K_0$  та  $K_{\Phi D}$  – коефіцієнти підсилення ФД та ГКН відповідно.

У цьому розділі запропоновано параметричний метод підвищення завадостійкості цифрового пристрою ФАПЧ, що полягав в узгодженні частотної амплітудно-частотної характеристики пристрою зі спектром вхідного модульованого сигналу. Цей метод є альтернативним до іншого відомого методу, метою якого є забезпечення мінімального значення шумової смуги пристрою. Перевага запропонованого методу над останнім полягає в тому, що він враховує вплив модуляції вхідного сигналу, як додаткового фактора, який обмежує діапазон стеження пристрою.

На рис. 2 показано приклад такого узгодження для трьох реалізацій ЧМ-сигналів із різними індексами модуляції. Критерієм такого узгодження є мінімальне значення дисперсії суми квадратів відхилень спектральних складових модульованих сигналів від нормованої амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) пристрою ФАПЧ.

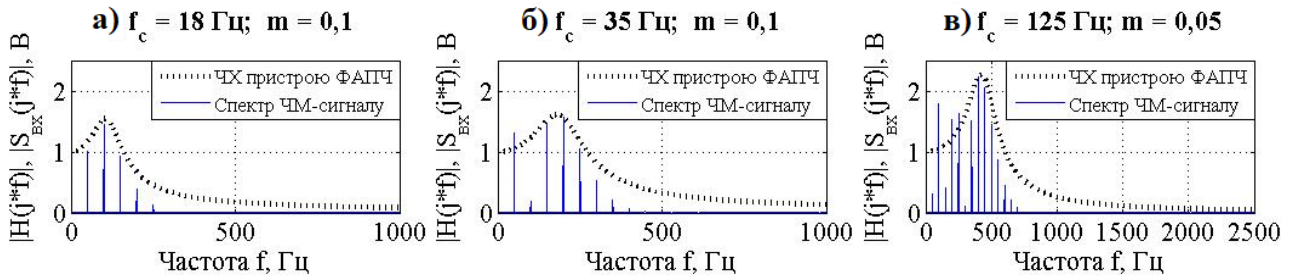


Рис. 2. Узгодження спектра ЧМ-сигналу з амплітудно-частотною характеристикою пристрою ФАПЧ для індексів модуляції: (а)  $\mu_1 = 3$ ; (б)  $\mu_2 = 5$ ; (в)  $\mu_3 = 10$ .

Нижче представлено структурну схему цифрового пристрою ФАПЧ із модифікованим ФД, що містить в собі блок вузькосмугового фільтра (ВСФ) для максимальної фільтрації випадкової завади і зменшення пікових значень цих завад з метою забезпечення роботи ФД в межах його детекторної характеристики. На виході детектора присутній додатковий фільтр верхніх частот для компенсації придушення динаміки зміни корисного сигналу. АЧХ цього фільтра є оберненою до характеристики фільтра нижніх частот модифікованого фазового детектора (ФНЧ<sub>0</sub>).

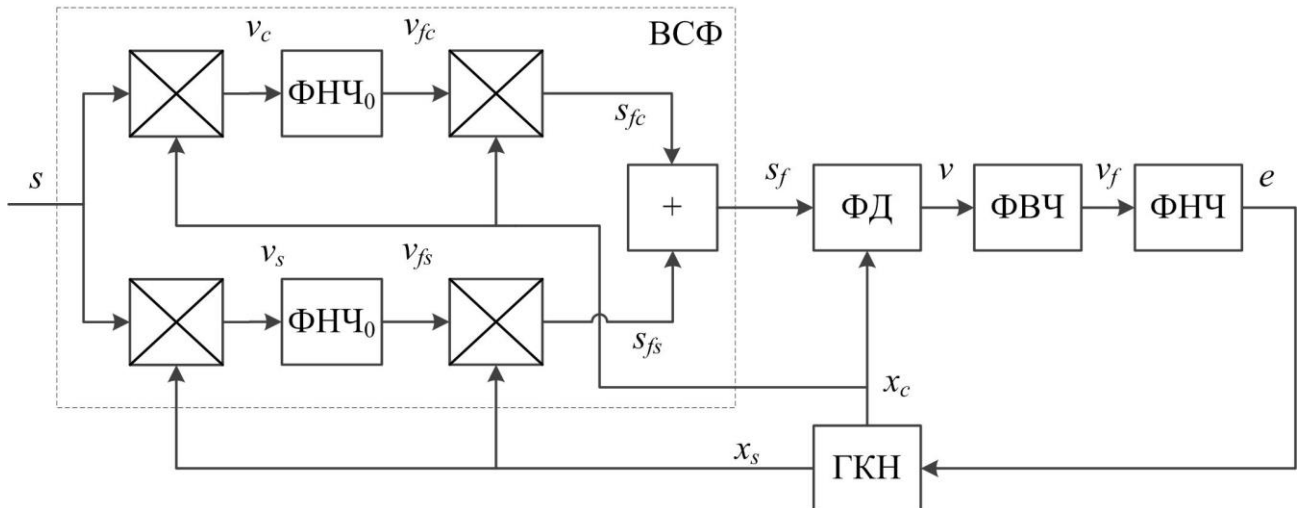


Рис. 3. Структурна схема модифікованого пристрою ФАПЧ із модифікованим ФД.

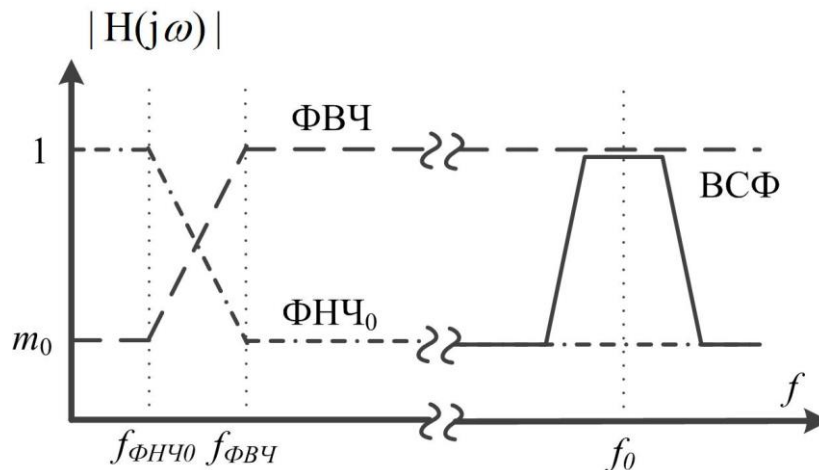


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики фільтра нижніх частот ФНЧ<sub>0</sub> модифікованого ФД, фільтра верхніх частот та вузькосмугового фільтра.

Математичну модель модифікованого пристрою описує система рівнянь

(3):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x_c(n) = \cos(\omega_0 n \Delta t + \theta(n)); \\
 x_s(n) = \sin(\omega_0 n \Delta t + \theta(n)); \\
 v_c(n) = s(n)x_c(n); \\
 v_s(n) = s(n)x_s(n); \\
 y_{fc}(n) = b_0(f_{BC\Phi})v_c(n) + b_1(f_{BC\Phi})v_c(n-1) + a_1(f_{BC\Phi})y_{fc}(n-1); \\
 y_{fs}(n) = b_0(f_{BC\Phi})v_s(n) + b_1(f_{BC\Phi})v_s(n-1) + a_1(f_{BC\Phi})y_{fs}(n-1); \\
 v_{fc}(n) = y_{fc}(n) + m_0v_c(n); \\
 v_{fs}(n) = y_{fs}(n) + m_0v_s(n); \\
 s_{fc}(n) = v_{fc}(n)x_c(n); \\
 s_{fs}(n) = v_{fs}(n)x_s(n); \\
 s_f(n) = s_{fc}(n) + s_{fs}(n); \\
 v(n) = s_f(n)x_c(n); \\
 y_{vr}(n) = b_0(f_{\Phi BC})v(n) + b_1(f_{\Phi BC})v(n-1) + a_1(f_{\Phi BC})y_{vr}(n-1); \\
 y_e(n) = b_0(f_c)v_s(n) + b_1(f_c)v_s(n-1) + a_1(f_c)y_e(n-1); \\
 v_r(n) = (v(n) - y_{vr}(n))/m_0; \\
 e(n) = y_e(n) + mv_r(n); \\
 \varphi(n) - \varphi(n-1) = \Omega_0 - K_0e(n-1).
 \end{array} \right. \quad (3)$$

В (3) коефіцієнти вузькосмугового фільтра, ФВЧ та ФНЧ виражені через частоти зрізу  $f_{zp}$  цих фільтрів:

$$b_0(f_{zp}) = b_1(f_{zp}) = \frac{\pi f_{zp} \Delta t (1-m)}{\pi f_{zp} \Delta t + 1}; \quad a_1(f_{zp}) = -\frac{\pi f_{zp} \Delta t - 1}{\pi f_{zp} \Delta t + 1}. \quad (4)$$

Параметрами вхідного та вихідного сигналів пристрою є  $\omega_0$  – опорна частота пристрою;  $\theta(n)$  – поточна фаза ГКН;  $\Omega_0$  – початковий частотний розбаланс;  $\varphi_n(n)$  – перерахована у фазовий шум випадкова завада;  $\varphi_0(n) = \mu \sin(\Omega n T)$  при ФМ або  $\varphi_0(n) = \mu \operatorname{sign} \sin(\Omega n T)$  при фазовій маніпуляції;  $\mu$  – індекс модуляції,  $\Omega$  – частота модуляції.

Також в моделі присутні позначення:

- $\varphi(n) = \Omega_0 n T - \theta(n)$  – поточне значення фазової похибки;
- $\varphi_1(n) = \Omega_0 n T + \varphi_0(n) + \varphi_n(n) - \theta(n)$  – різниця фаз вхідного та вихідного

сигналів на входах ВСФ.

Параметрами математичної моделі є:  $K_0$ ,  $K_{\Phi Д}$  – коефіцієнти передачі ГКН та ФД відповідно,  $f_{ВСФ}$  – частота зрізу ФНЧ модифікованого ФД,  $f_{ВСФ}$  – частота зрізу ФВЧ,  $m_0$  – коефіцієнт пропорційності ВСФ та ФВЧ,  $f_c$  та  $m$  – частота зрізу ФНЧ та коефіцієнт пропорційності пристрою ФАПЧ.

Аналіз математичної моделі показав, що в порівнянні з класичними пристроєм із аналогічними параметрами, модифікований пристрій має менший коефіцієнт підсилення через наявність ВСФ, адже його коефіцієнт передачі становить:

$$K_{ВСФ} = \frac{1 + m_0}{4}, \quad (5)$$

де  $m_0$  – коефіцієнт пропорційності ВСФ.

Також виявлено, що в модифікованому пристрої ФАПЧ гірше відбувається фільтрація подвійної складової на виході ФНЧ. Для мінімізації цього ефекту слід вибирати якомога більшу частоту несучого сигналу, а також – збільшувати коефіцієнт пропорційності ВСФ по відношенню до аналогічного показника ФНЧ.

Третій розділ – «**Розробка і дослідження імітаційної моделі цифрового пристрою ФАПЧ**» – присвячений імітаційному моделюванню класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ у програмних середовищах Matlab та QT Creator. Необхідність моделювання роботи пристроїв у двох різних середовищах зумовлена їх перевагами для виконання різних завдань. Середовище Matlab дає можливість представити результати спостереження багатьох змінних при одноразовому моделюванні в зручному для сприйняття графічному вигляді, а також містить велику бібліотеку вбудованих математичних функцій, які спрощують текст програми. Написання моделі пристрою на мові C++ в середовищі QT Creator уможливорює проведення багаторазових серій експериментів для аналізу завадостійкості обох пристроїв, що необхідно через статистичну природу шуму. Крім того, середовище дає можливість створити спеціалізований графічний інтерфейс для керування параметрами пристрою.

Нижче пояснено основні структурні частини програми, що описує математичну модель пристрою ФАПЧ в Matlab та ієрархію класів у програмі QT Creator. Додатково, зображено основні елементи графічного користувацького інтерфейсу в програмі QT Creator та пояснення того, за що відповідають конкретні комірки вікна (рис. 5).

Першим об'єктом імітаційного моделювання пристрою ФАПЧ стали перехідні процеси при захопленні синхронізму та вплив параметрів пристрою на їх тривалість. Досліди показали, що для зменшення тривалості перехідних

процесів слід зменшувати величини резонансної частоти пристрою та коефіцієнту загасання.

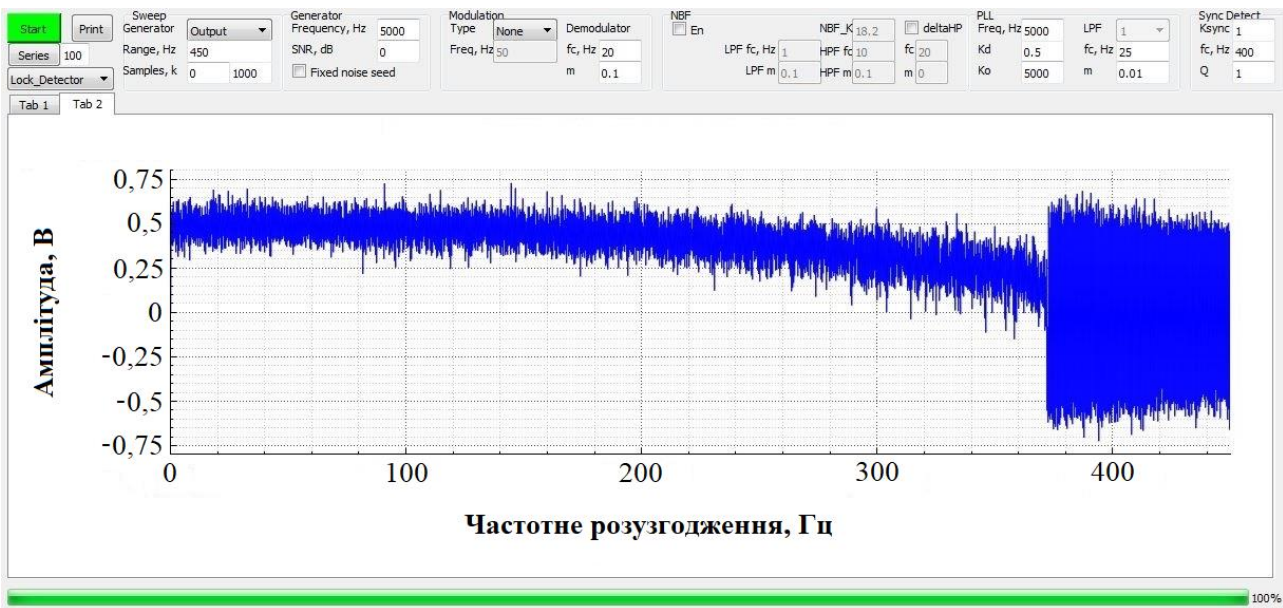


Рис. 5. Досягнення порогового розузгодження частоти (в середовищі QT Creator).

Імітаційне моделювання граничної завадостійкості класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ проводилося для трьох наборів параметрів при частоті дискретизації  $F_s = 100$  кГц:

- 1)  $K_1 = 2500 \text{ с}^{-1}$ ;  $f_{c1} = 25$  Гц;  $m_1 = 0,0025$ ;  $f_{\Phi ВЧ1} = 100$  Гц;
- 2)  $K_2 = 5000 \text{ с}^{-1}$ ;  $f_{c2} = 50$  Гц;  $m_2 = 0,005$ ;  $f_{\Phi ВЧ2} = 200$  Гц;
- 3)  $K_3 = 10000 \text{ с}^{-1}$ ;  $f_{c3} = 100$  Гц;  $m_3 = 0,01$ ;  $f_{\Phi ВЧ3} = 500$  Гц,

де  $K_i = K_{0i}K_{\PhiД}$  – коефіцієнт підсилення контура ФАПЧ;  $f_c$  – частота зрізу ФНЧ;  $m$  – коефіцієнт пропорційності ФНЧ;  $f_{\Phi ВЧ}$  – частота зрізу ФВЧ.

Дослідження завадостійкості класичного та модифікованого пристроїв шляхом імітаційного моделювання проводилося за двома критеріями визначення зриву синхронізму. Згідно з першим критерієм, зрив синхронізації настає при різкому збільшенні кількості проковзувань фази сигналу з виходу ГКН, коли середній час між стрибками фази стає співмірним із часом перехідного процесу входження в синхронізм. Результати імітаційного моделювання показують, що багаторазові зриви стеження за короткий час спостерігаються для класичного пристрою ФАПЧ за менших рівнів шуму, а для випадку модифікованого ФАПЧ – за більшого рівня шуму (рис. 6).

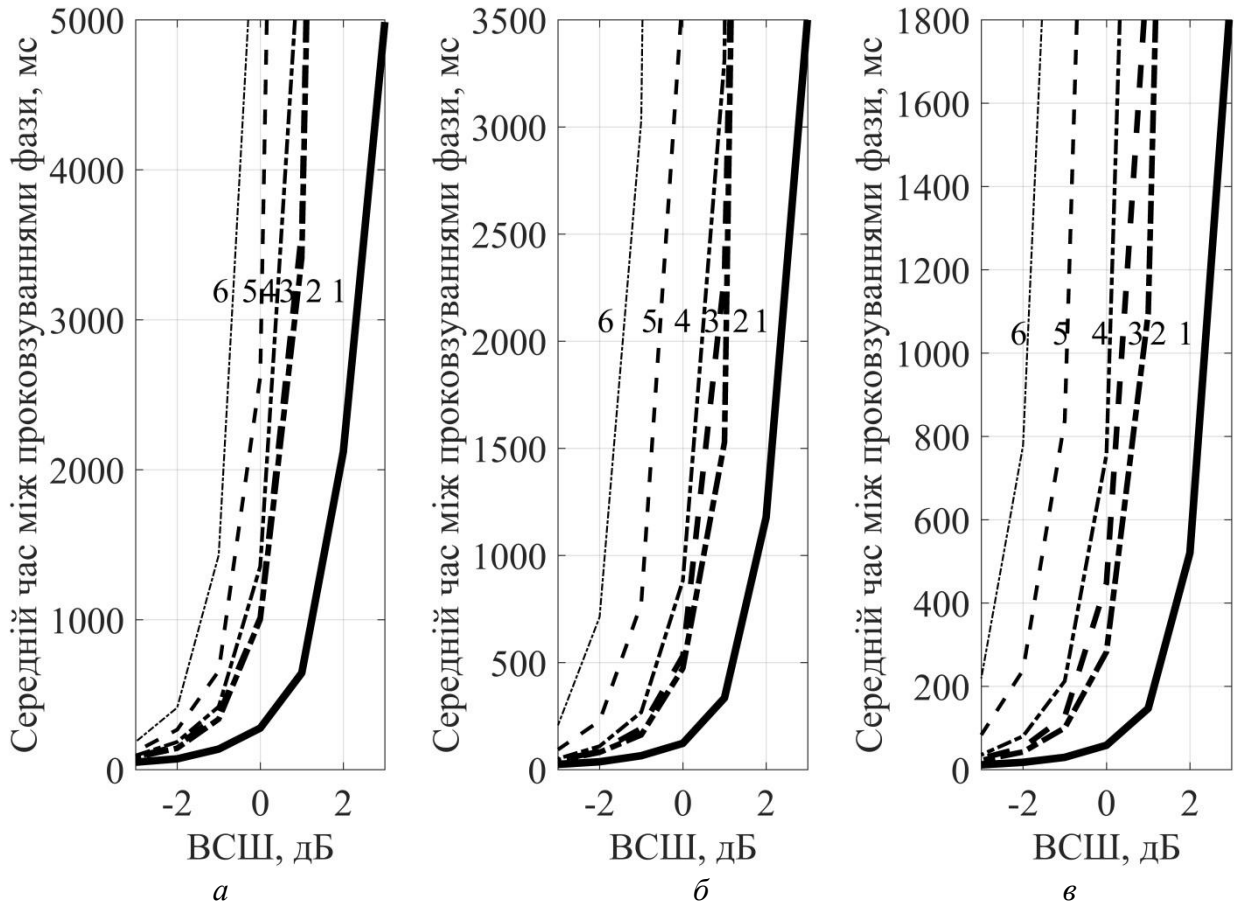


Рис. 6. Залежність середнього значення інтервалів часу між проковзуваннями фази від ВСШ для серії значень коефіцієнта пропорційності ВСФ  $m_0$  (1 –  $m_0 = 1$ , класичний пристрій; 2 –  $m_0 = 0,2$ ; 3 –  $m_0 = 0,1$ ; 4 –  $m_0 = 0,05$ ; 5 –  $m_0 = 0,02$ ; 6 –  $m_0 = 0,01$ ) та трьох параметрів модифікованого пристрою  $K_1, K_2, K_3$ : (а)  $K_1 = 2500 \text{ c}^{-1}$ , (б)  $K_2 = 5000 \text{ c}^{-1}$ ; (в)  $K_3 = 10000 \text{ c}^{-1}$ .

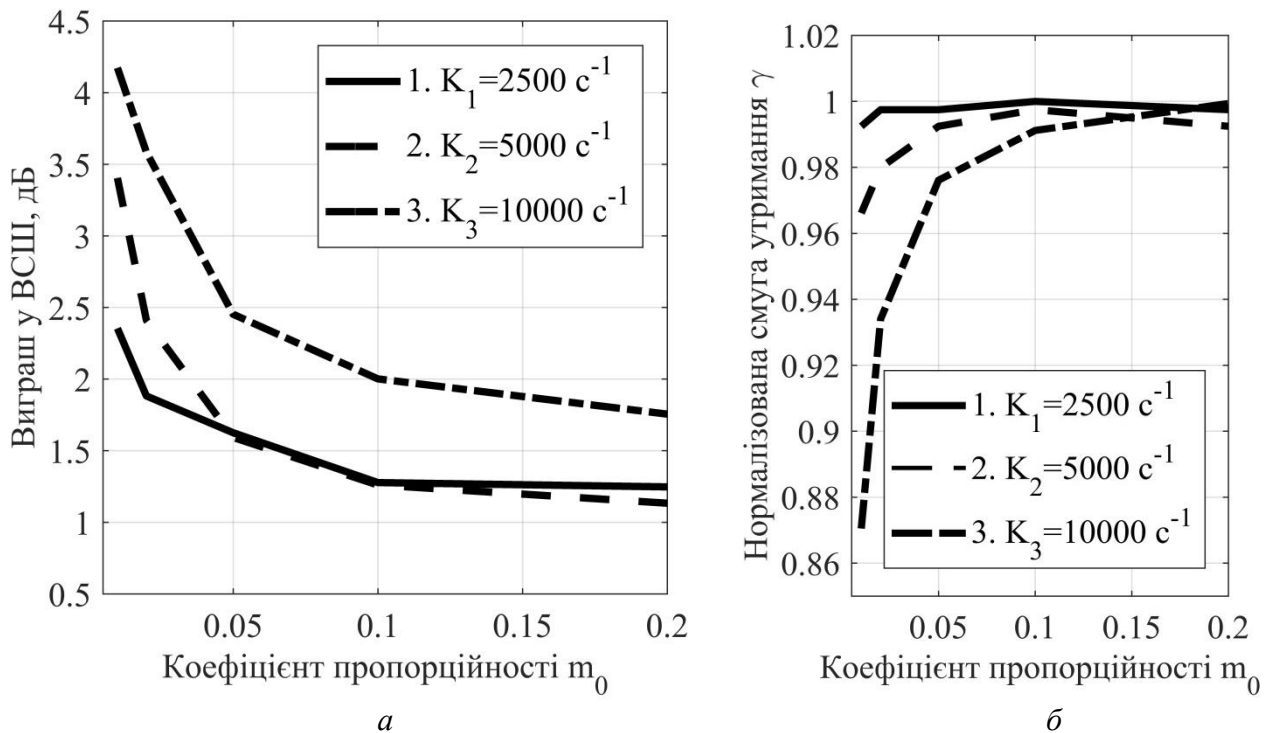


Рис. 7. Вплив коефіцієнта пропорційності ВСФ для різних коефіцієнтів передачі пристрою  $K$  на: а – виграш за заводстійкістю модифікованого пристрою ФАПЧ, б – смуги утримання модифікованого пристрою ФАПЧ.



Згідно з іншим критерієм, за шумовий поріг вважають те значення ВСШ, при якому спостерігається перше проковзування фази сигналу на виході з ГКН на  $2\pi$ . Моделювання показало, що використання модифікованого пристрою забезпечує вигравш у пороговому ВСШ як мінімум на 1 дБ, а у випадку великих смуг утримання та малого коефіцієнта пропорційності ВСФ – до 4 дБ (рис. 7 а), проте за останніх умов таке збільшення завадостійкості супроводжується зменшенням смуги утримання пристрою та гіршою фільтрацією паразитних гармонік з виходу ФД (рис. 7 б). Аналіз результатів показав, що існує певне оптимальне значення параметрів вузькосмугового фільтра що дозволяє отримати пристойний вигравш у завадостійкості (до 2,5 дБ) і водночас зберегти статичну характеристику пристрою незмінною.

В процесі імітаційного моделювання виявилось, що вигравш у значенні порогового ВСШ не є сталим через статистичну природу шуму, тому при моделюванні поведінки пристроїв ФАПЧ за тих же самих параметрів кожного разу результат дещо відрізнявся. На рис. 8 зображені графіки густин розподілу імовірності значень вигравшу ВСШ для серії зі 100 експериментів для двох різних параметрів пристрою (при  $m_0 = 0,1$  та  $m_0 = 0,05$ ), за допомогою яких можна оцінити середній вигравш за граничною завадостійкістю та розкид кінцевих результатів. Вигравш за завадостійкістю для цих параметрів складає 2 та 2,45 дБ відповідно, а середнє квадратичне відхилення результатів в обох випадках складає 1,2 дБ.

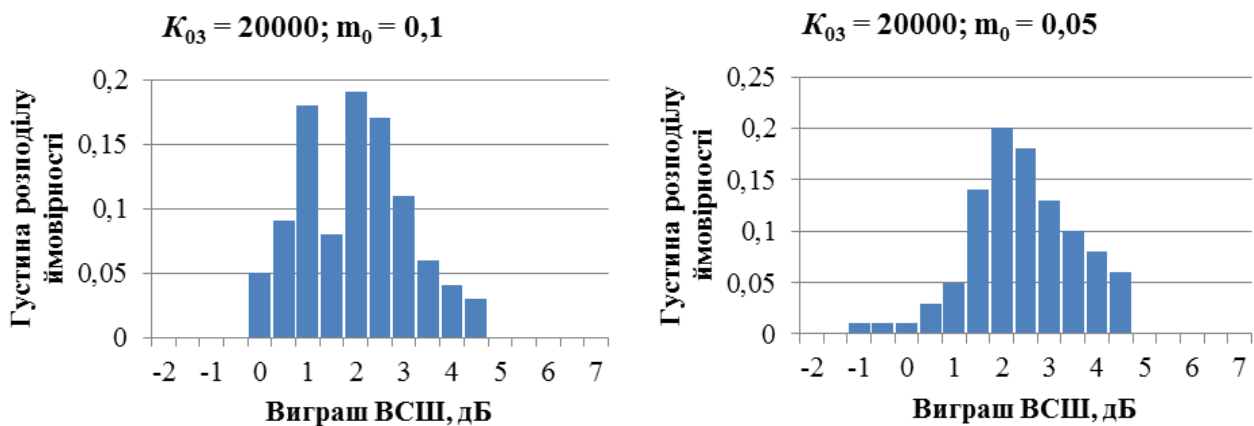


Рис. 8. Результати багаторазового імітаційного моделювання пристроїв ФАПЧ з метою визначення середнього значення вигравшу в завадостійкості.

Тобто, результати порівняння завадостійкості за обома критеріями показують зниження шумового порогу пристрою ФАПЧ.

Четвертий розділ – «Експериментальне дослідження завадостійкості цифрового пристрою ФАПЧ» – присвячений розробленню програмно-апаратного пристрою ФАПЧ із модифікованим ФД та експериментальному дослідженню його завадостійкості. Реалізація класичного пристрою ФАПЧ

була виконана на платформі мікроконтролера STM. Перші експериментальні дослідження стосувалися перехідних процесів при схопленні синхронізму за тих же значень параметрів, що й при імітаційному моделюванні. На рис. 9 відображено порівняння динаміки зміни ключових сигналів пристрою для імітаційної моделі та експериментального пристрою для одного з наборів параметрів.

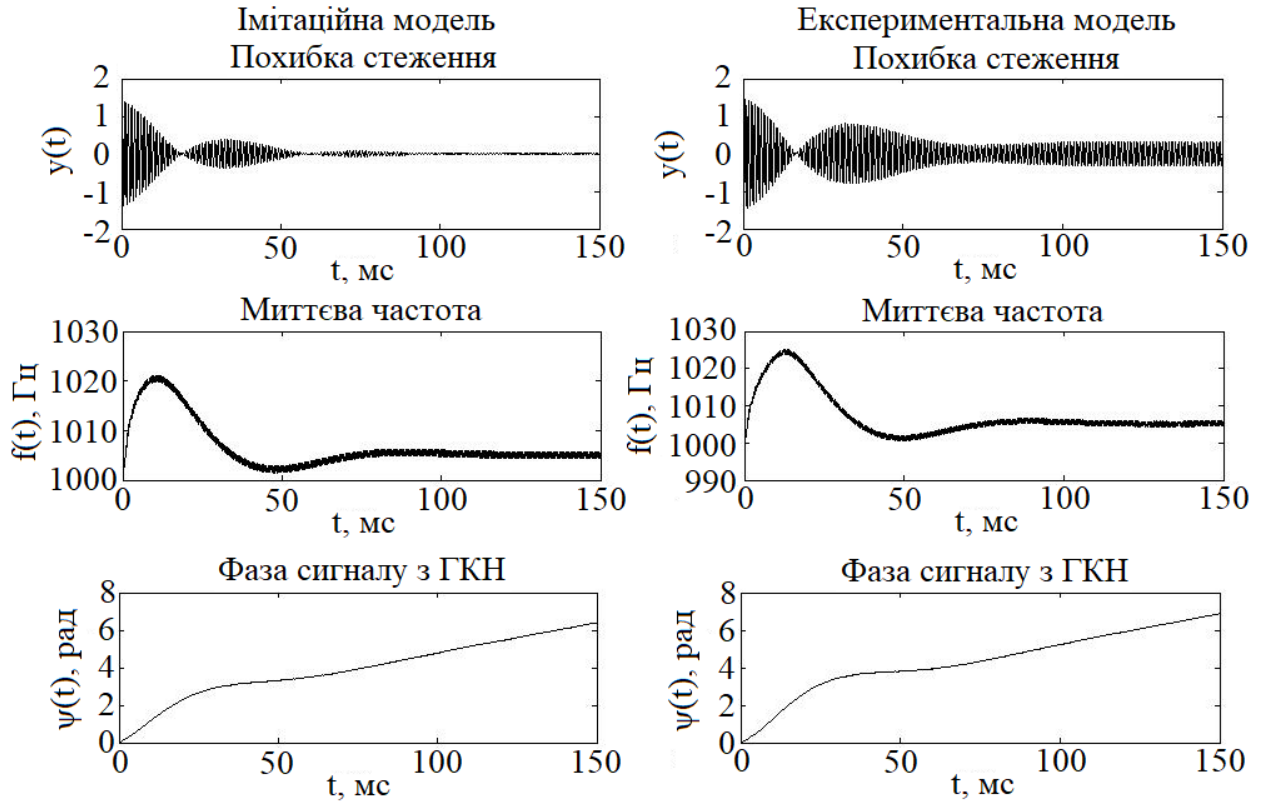


Рис. 9. Результати дослідження імітаційної моделі та експериментального пристрою для параметрів  $\omega_p = 2\pi \cdot 20$  рад/с,  $\zeta = 0,707$ .

Також експериментально були досліджені умови зриву синхронізації за відсутності завад. Експерименти показали, що зрив синхронізації відбувається при значеннях частотного розбалансу більших, ніж смуга утримання пристрою (рис. 10). Крім того, можлива недостатня фільтрація подвійної складової чинить шкідливий вплив на статичні характеристики пристрою та порушує симетричність смуги утримання пристрою відносно опорної частоти генератора.

Експериментальні дослідження впливу узгодження АЧХ пристрою ФАПЧ з огинаючою спектра як методу підвищення його граничної завадостійкості були проведені для різних параметрів пристрою в їх широкому діапазоні.

У роботі, з міркувань наочності, відображено результати порівняння граничної завадостійкості пристрою з наборами параметрів, числові значення яких вказані у таблиці 1.

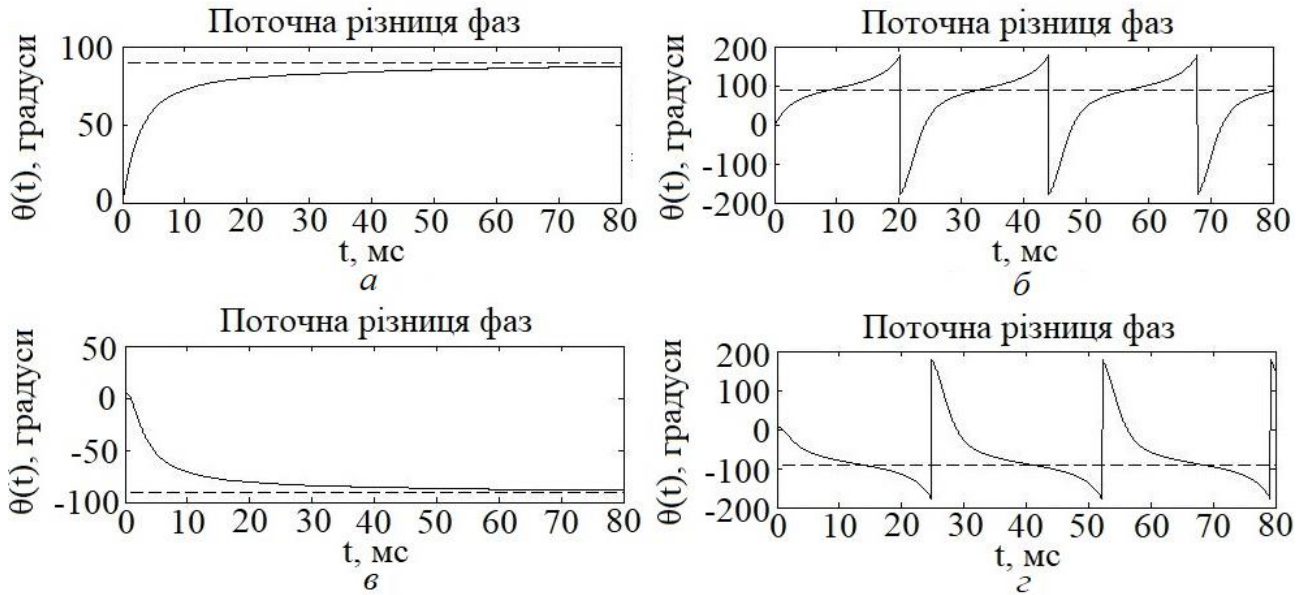


Рис. 10. Різниця фаз між сигналами на вході та виході ФАПЧ для різних значень початкового частотного розузгодження  $\Delta f$ : (а)  $\Delta f_1 = 79$  Гц; (б)  $\Delta f_2 = 89$  Гц; (в)  $-\Delta f_1 = -79$  Гц; (г)  $-\Delta f_2 = -89$  Гц.

Табл. 1. Перелік параметрів вхідного ЧМ-сигналу та параметрів пристрою ФАПЧ для дослідження його граничної завадостійкості.

№	Параметри вхідного сигналу			Параметри пристрою ФАПЧ			$\sigma^2, \text{В}^2$			
	$\Omega_0, \text{Гц}$	$\mu$	$\Delta\omega, \text{Гц}$	$K_0 K_{\Phi D}, \text{с}^{-1}$	$f_c, \text{Гц}$	$m$				
1	50	3	150	10000	15	0,05	0,0873			
					18	0,1	0,0557			
					50	0,05	0,7933			
2					15	0,05	0,3272			
					35	0,1	0,1728			
					500	0,2	0,5791			
3					10	500	20000	25	0,05	0,7835
								125	0,05	0,3757
								1000	0,1	0,6757

Результати експериментів показали, що узгодження АЧХ пристрою ФАПЧ з огинаючою спектра вхідного сигналу дає змогу понизити шумовий поріг пристрою та збільшити діапазон стеження пристрою в діапазоні малого ВСШ поблизу порогового значення. На рис. 11 показано шумові властивості пристрою для різних його параметрів при подаванні на вхід ЧМ-сигналу з частотою модуляції  $\Omega = 50$  Гц та індексом модуляції  $\mu_2 = 5$ .

Результати були підтверджені для вхідних ЧМ-сигналів з іншими індексами модуляції ( $\mu_1 = 3$  та  $\mu_3 = 10$ ) з тою різницею, що для сигналів з більшим індексом модуляції пристрій розширення АЧХ пристрою в меншій мірі впливає на величину його шумового порогу.

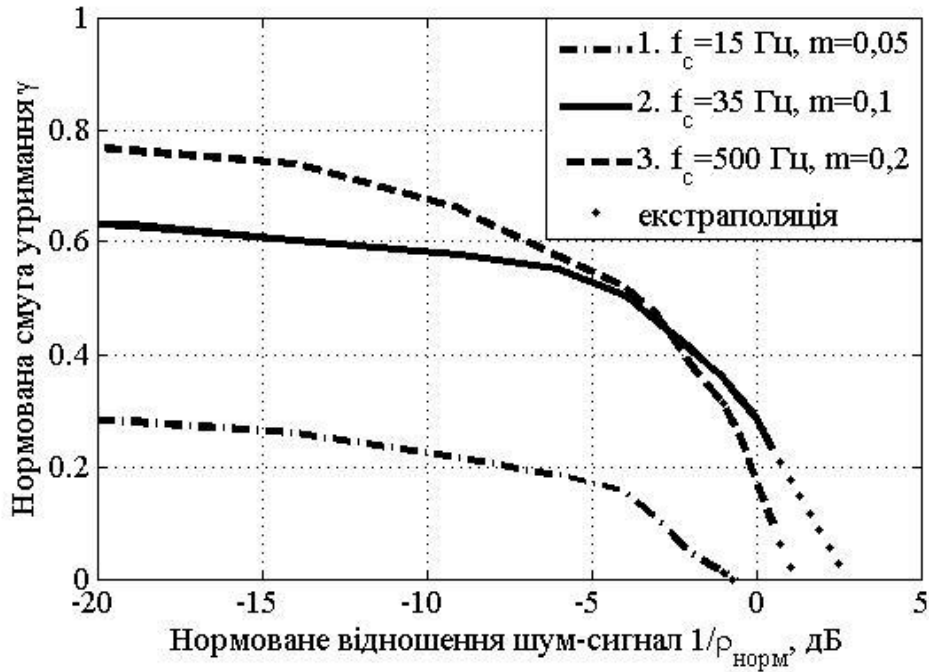


Рис. 11. Залежність нормованої смуги утримання  $\gamma$  пристрою від відношення шум-сигнал для параметрів пристрою 2а-2в (див. табл. 1).

З метою дослідження та порівняння граничної завадостійкості класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ була створена програмно-апаратна реалізація пристрою на платформі ПЛІС (рис. 12). Для забезпечення кращої швидкодії пристрою та додаткових можливостей його дослідження створено механізм обміну даними з комп'ютером, зокрема для зміни параметрів ФАПЧ в реальному часі та спостереження за параметрами вхідного та вихідного сигналів.

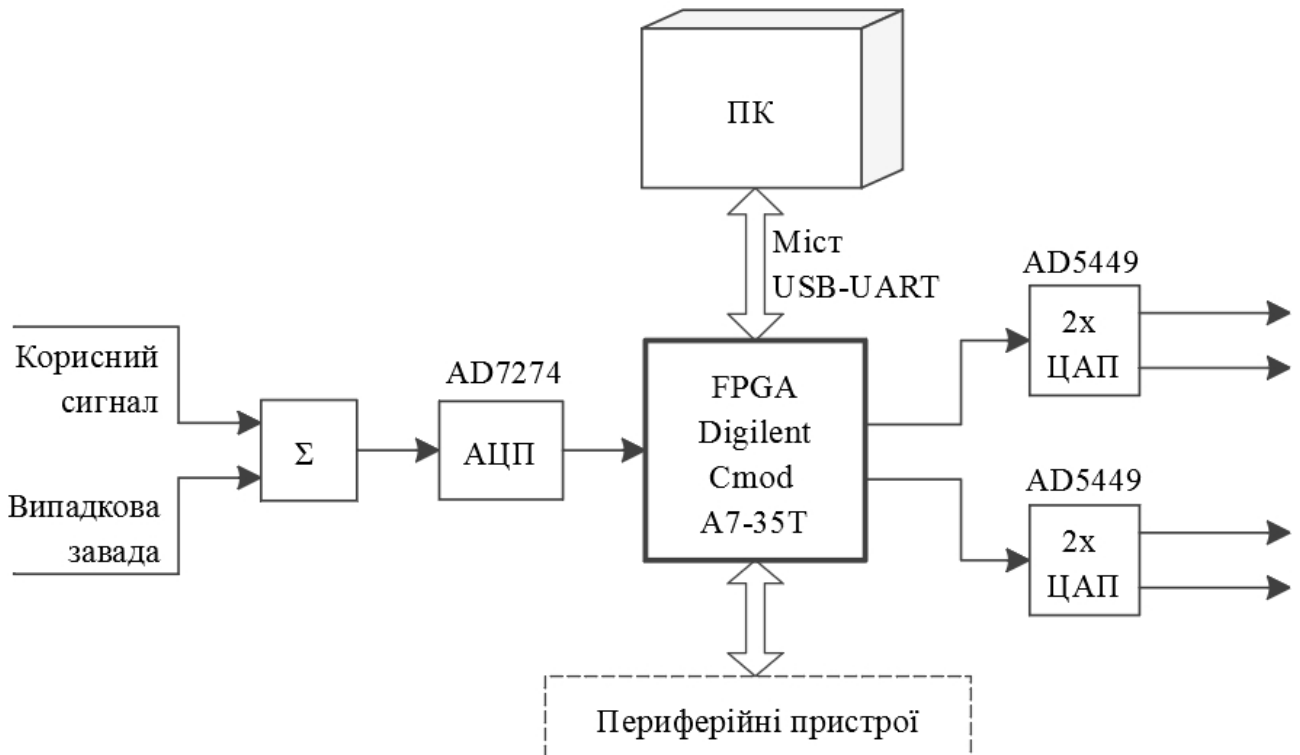


Рис. 12. Структурна схема програмної реалізації пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти.

Експериментальне дослідження завадостійкості обох пристроїв було проведене для тих же параметрів, що і при імітаційному моделюванні. Результати експериментів якісно повторюють моделювання та вказують на вигреш у завадостійкості модифікованого ФД на 2,5 дБ у порівнянні з класичним пристроєм (рис. 13).

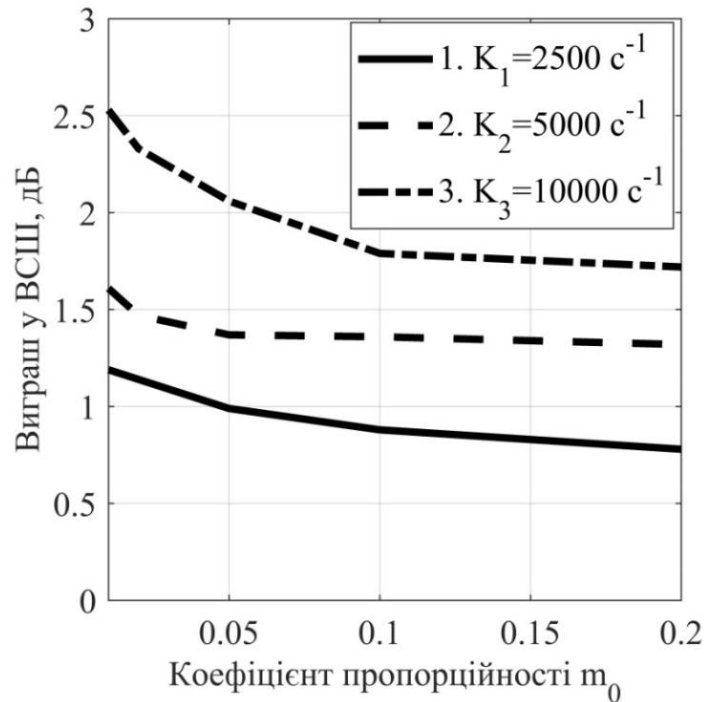
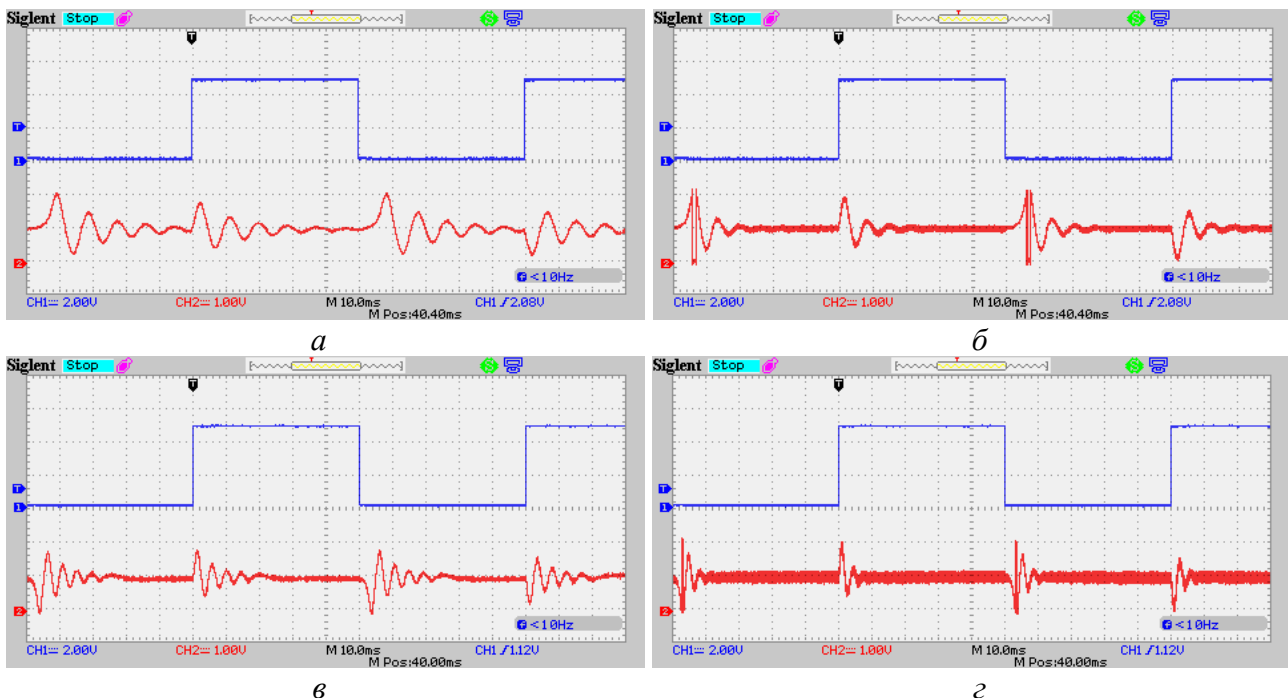


Рис. 13. Результати експериментальних досліджень завадостійкості модифікованого пристрою ФАПЧ для трьох наборів його параметрів (1–3, див. с. 13).

Додатково проведено експериментальне дослідження динамічних параметрів модифікованого пристрою ФАПЧ шляхом аналізу тривалості перехідних процесів при поданні на вхід фазо-маніпульованого сигналу (рис.14).



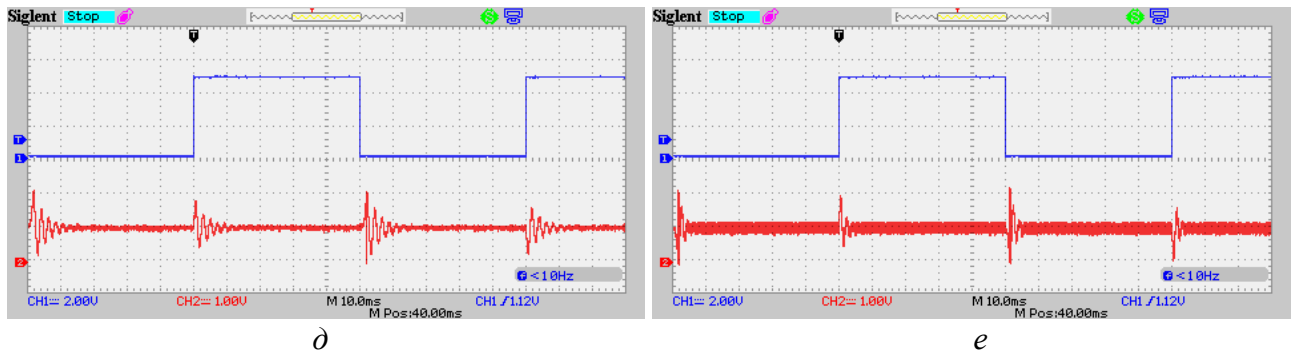


Рис. 14. Сигнали помилки на виході класичного (а, в, д) та модифікованого (б, з, е) пристроїв при: (а)  $K_1 = 2500 \text{ c}^{-1}$ , (б)  $K_1$  та  $m_0=0,05$ ; (в)  $K_2 = 5000 \text{ c}^{-1}$ , (з)  $K_2$  та  $m_0=0,1$ ; (д)  $K_3 = 10000 \text{ c}^{-1}$ , (е)  $K_3$  та  $m_0=0,2$ .

Експерименти показують, що тривалість перехідних процесів у модифікованому пристрої скоротилася приблизно в 1,5 рази, що свідчить про покращення динамічних властивостей у порівнянні з класичним пристроєм.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання підвищення завадостійкості пристроїв фазової синхронізації шляхом оптимального вибору параметрів повністю цифрового пристрою фазового автопідстроювання частоти та структурної модифікації методів керування генератором цифрового синтезу сигналу гетеродина синхронного фазового детектора.

На підставі цього було зроблено такі висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку аналогових та цифрових пристроїв фазової синхронізації. Вказано ряд переваг цифрових пристроїв над аналоговими. Проведено огляд класифікації цифрових пристроїв ФАПЧ та особливості реалізації їх основних компонентів. Визначено конкретний різновид цифрового пристрою ФАПЧ для подальшого експериментального дослідження його граничної завадостійкості.

2. Побудовано математичну модель цифрового пристрою ФАПЧ з модифікованими ФД та показано приклад його роботи в часовій області. Визначено критерії вибору параметрів вузькосмугового фільтра та фільтра верхніх частот (які містить ФД) для досягнення кращої завадостійкості пристрою та збереження його статичних та динамічних властивостей.

3. Розроблено імітаційну модель цифрового пристрою ФАПЧ з прямим цифровим синтезатором частоти, яка дає можливість провести наочне порівняння шумового порогу пристроїв ФАПЧ з класичним та модифікованим ФД. Результати імітаційного моделювання показали, що використання модифікованого ФД забезпечує отримання виграшу за завадостійкістю до 2,5 дБ без помітних змін смуги утримання пристрою в статичному режимі.

4. Розроблено та виготовлено програмно-апаратний цифровий пристрій ФАПЧ на базі програмованої логікової інтегральної схеми (FPGA) Xilinx архітектури Artix-7, що здатний працювати в діапазоні частот вхідних сигналів до 50 кГц. Додатково було реалізовано канал передавання даних між пристроєм ФАПЧ та персональним комп'ютером, що забезпечило можливість керувати параметрами пристрою та спостерігати за ними в реальному часі, а також

оцінити дисперсію випадкової завади. Такий пристрій можна використовувати у сучасних радіоприймачах для синхронізації та обробки сигналів на проміжній частоті.

5. Шляхом перебору параметрів було експериментально підтверджено метод підвищення завадостійкості пристрою ФАПЧ, що полягає в узгодженні частотної характеристики пристрою ФАПЧ зі спектром вхідного ЧМ-сигналу. Виявлено, що такий пристрій має більше значення смуги утримання у вузькому діапазоні інтенсивності випадкової завади поблизу шумового порогу.

6. Експериментальні дослідження граничної завадостійкості модифікованого пристрою ФАПЧ підтверджують результати імітаційного моделювання і вказують на вигравш за значенням порогового ВСШ в діапазоні від 1 до 2,5 дБ, у залежності від параметрів пристрою.

7. Проведено дослідження поведінки модифікованого пристрою ФАПЧ. Результати дослідження показують, що тривалість перехідного процесу після стрибка фази вхідного коливання є меншою у 1,5 рази, ніж у випадку пристрою ФАПЧ з класичним ФД. Це свідчить про те, що було розв'язано наукове завдання підвищення граничної завадостійкості цифрового пристрою ФАПЧ без погіршення його динамічних властивостей.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті в наукових фахових виданнях України:**

1. Бондарев А.П. Програмно-апаратна реалізація цифрового пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Серія Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2016. - № 849. – С. 83 – 90.

2. Алтунін С. И. Экспериментальное исследование переходных процессов в программно-аппаратном цифровом устройстве фазовой автоподстройки частоты / С. И. Алтунин, А.П. Бондарев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2016. – № 4-5. – С. 15-22.

3. Алтунін С. І. Аналіз статичних характеристик програмно реалізованого пристрою ФАПЧ / С.І. Алтунін // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 121-126.

4. Бондарев А. П. Дослідження умов зриву синхронізації у програмно реалізованому пристрої ФАПЧ / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2017. - № 2. - С. 91-96.

5. Бондарев А.П. Дослідження частотної характеристики програмно реалізованого пристрою ФАПЧ / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2017. - № 874. – С. 3-9.

6. Bondariev A. Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity / A. Bondariev, S. Altunin, I. Horbatiy, I. Maksymiv // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, series Information and Controlling System. – 2018. – Vol. 5. - №9 (95). – P. 17-25. (Scopus)

**Публікації у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій:**

7. Бондарев А.П. Програмно-апаратна реалізація цифрового пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (21–23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – с. 95-96.

8. Бондарев А.П. Апаратний цифровий пристрій фазового автоматичного підстроювання частоти з програмним керуванням / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах». – 3-5 листопада 2016 р., м. Чернівці – с. 46-47.

9. Бондарев А.П. Експериментальне вимірювання частотної характеристики програмно реалізованого пристрою ФАПЧ / А. П. Бондарев, С. І. Алтунін // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». – 5-7 квітня 2017 р., м. Івано-Франківськ. – с. 107.

10. Бондарев А.П. Підвищення завадостійкості програмно реалізованого пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти/ А. П. Бондарев, С. І. Алтунін, І. В. Горбатий, І. П. Максимів // Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (3–5 жовтня 2018 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – с. 26-27.

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus):**

11. Bondariev A.P. Measurement of The Phase-Transfer Function of The Software Phase-Locked Loop / A.P. Bondariev, S.I. Altunin // Proceedings of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo-2017), 11-15 Sep. 2017, Odessa, Ukraine – p. 151-154.

12. Bobalo Yu. Research of the noise influence on software phase-locked loop dynamic performance / Yu. Bobalo, A. Bondariev, S. Altunin, M. Kiselychnyk, I. Maksymiv // Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 20-24 Feb. 2018, Slavske, Ukraine – p. 1228-1232.

**АНОТАЦІЯ**

**Алтунін С. І. Підвищення завадостійкості програмно керованих пристроїв синхронізації.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, м. Львів, 2019.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання підвищення завадостійкості пристроїв фазової синхронізації та створення



програмно-апаратної реалізації цифрового пристрою фазової синхронізації, який володіє кращою граничною завадостійкістю. Для цього було використано метод цифрового синхронного детектування, який дав змогу понизити шумовий поріг пристрою ФАПЧ та водночас зберегти його динамічні характеристики.

Модифіковане фазове детектування відрізняється від класичного детектування наявністю додаткової фільтрації корисного сигналу від випадкових завад шляхом придушення частини його спектральних складових із подальшим їх відновленням. Це уможливило пониження шумового порогу пристрою на 1-2,5 дБ, залежно від параметрів пристрою.

При виконанні дисертаційної роботи був уперше запропонований метод оптимізації параметрів цифрового фільтра у програмно-апаратному пристрої ФАПЧ. Він відрізняється від відомих апріорних методів узгодженням амплітудно-частотної характеристики пристрою ФАПЧ зі спектром вхідного сигналу. Це дає змогу забезпечити працездатність пристрою за меншого відношення сигнал/шум і підвищити граничну завадостійкість пристрою та місткість системи зв'язку, у якій він буде використовуватися.

**Ключові слова:** пристрій ФАПЧ, модифікований фазовий детектор, вузько-смуговий фільтр, гранична завадостійкість, шумовий поріг, динамічні властивості.

## АННОТАЦІЯ

**Алтунин С. И. Повышение помехоустойчивости программно управляемых устройств синхронизации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.12.13 – радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерство образования и науки Украины, г. Львов, 2019.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача повышения помехоустойчивости устройств фазовой синхронизации и создания программно-аппаратной реализации цифрового устройства фазовой синхронизации, которое обладает лучшей предельной помехоустойчивостью. Для этого был использован метод цифрового синхронного детектирования, который дал возможность снизить шумовой порог устройства ФАПЧ и одновременно сохранить его динамические характеристики.

Модифицированное фазовое детектирование отличается от классического детектирования наличием дополнительной фильтрации полезного сигнала от случайных помех путем подавления части его спектральных составляющих с последующим их восстановлением. Это сделало возможным понижение шумового порога устройства на 1-2,5 дБ, в зависимости от параметров устройства.

При выполнении диссертационной работы впервые был предложен метод оптимизации параметров цифрового фильтра в программно-аппаратном устройстве ФАПЧ. Он отличается от известных апріорных методов согласованием амплитудно-частотной характеристики устройства ФАПЧ со спектром входного сигнала. Это позволяет обеспечить работоспособность

устройства при меньшем отношении сигнал / шум и повысить предельную помехоустойчивость устройства, а также емкость системы связи, в которой он будет использоваться.

**Ключевые слова:** устройство ФАПЧ, модифицированный фазовый детектор, узкополосный фильтр, предельная помехоустойчивость, шумовой порог, динамические свойства.

## ABSTRACT

**Altunin S. I. Improvement the noise immunity of software-controlled synchronization devices.** – On the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfilment of the candidate of science (Ph.D.) degree in technical sciences on specialty 05.12.13 – Radio Engineering Devices and Telecommunication Means». – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis presents the contribution to the solution of the scientific task of development of methods for noise immunity improvement of software-controlled synchronization devices, and creation of firmware implementation of digital phase-locked loop (PLL) which possesses better marginal noise immunity. The method of digital synchronous detection was used to achieve this task, which allowed to reduce the noise threshold of the PLL and at the same time to maintain its dynamic characteristics.

From the analysis of the references it was discovered that the available ways of noise immunity improvement are controversial because decreasing of the noise threshold is achieved by worsening of dynamic properties of the device. Some scientific works present solution to this problem, but the results of their research apply to analog PLLs and their research methods are limited by simulation and does not include experimental studies.

The thesis presents a block diagram and mathematic model of a digital PLL with a modified phase detector (PD) containing a narrow-band filter (NBF) to maximize the filtering of noise and reduce the peak values of these interferences in order to provide the PD operation within the range of detector characteristics. High-pass filter (HPF) at the output of the detector compensates the suppression of the dynamic change of the useful signal.

Simulation of the of classical and modified PLLs marginal noise immunity was carried out according to two criteria for determining the loss of synchronization. In both cases the use of modified phase detection allowed to decrease noise threshold by 2.5 dB without changing the static characteristic of the device.

The results of the experiments qualitatively repeat the simulation and show the noise immunity improvement of the modified PD up to 2.5 dB in comparison with the classical device. Duration of transient processes in the modified device was reduced by approximately 1.5 times, indicating an improvement of dynamic properties compared to the classical device.

**Key words:** PLL, modified phase detector (PD), narrow-band filter (NBF), marginal noise immunity, noise threshold, dynamic properties.