

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Алтуніна Сергія Ігоровича на тему «Підвищення завадостійкості програмно керованих пристроїв синхронізації», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Актуальність теми дисертації. На сьогоднішній день пристрої фазової синхронізації можна вважати одними з найпоширеніших елементів радіоелектронних систем через їх універсальну природу – вони здатні виконувати широкий спектр задач, таких як модуляція/демодуляція сигналів з кутовою модуляцією, синтез частот, генерування тактових імпульсів тощо. Ще однією корисною властивістю їх є здатність працювати в умовах впливу різного роду завад як випадкових так і детермінованих.

З кожним роком кількість активних користувачів телекомунікаційних систем непинно зростає. Збільшується також кількість радіоелектронної апаратури зв'язку, а кількість переданої інформації зростає ще швидшими темпами. Ці чинники призводять до того, що сучасні пристрої у системах зв'язку функціонують у складних заводових умовах, які негативно впливають на їх працездатність. Наявність шумового порогу у таких пристроях є обмежуючим фактором, що впливає на завадостійкість приймача радіосигналів.

Питання підвищення завадостійкості пристроїв фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) досліджували багато вітчизняних та іноземних вчених. Проте вказані дослідження не можна назвати цілісними з ряду причин. У багатьох роботах досліджуються методи підвищення завадостійкості пристроїв без врахування їх динамічних показників, таких як тривалість перехідних процесів у разі зміни фази вхідного коливання. Окрім здатності пристрою ФАПЧ здійснювати фільтрацію завад, він також має досить швидко реагувати на зміни інформаційного сигналу, що є важливим при прийманні частотно- та фазо-модульованих коливань з великими індексами модуляції. Тому підвищення завадостійкості пристрою ФАПЧ шляхом погіршення його динамічної поведінки є небажаним результатом.

Деякі вчені досягли суттєвих успіхів у розв'язанні задачі підвищення якості роботи пристроїв ФАПЧ (а саме підвищення швидкодії та динамічної точності) за умов різних збурень на вході пристрою, в тому числі випадкової завади типу білий шум. Проте ці дослідження проводилися для відносно



великих значень відношення сигнал-шум (ВСШ). У випадку наближення рівня завад до шумового порогу детекторна характеристика пристрою ФАПЧ перестає бути лінійною, що призводить до зриву синхронізації, про який у цих роботах не розглядалось.

Крім того, відносно небагато робіт містять експериментальне підтвердження отриманих результатів. Методи дослідження граничної завадостійкості пристроїв ФАПЧ у багатьох працях обмежуються імітаційним моделюванням. Реалізація програмно-апаратного пристрою ФАПЧ дає можливість проектування сучасних приймачів цифрових радіосигналів, що матимуть більшу інформаційну місткість.

Тому підвищення завадостійкості програмно-апаратного цифрового пристрою фазової синхронізації з одночасним збереженням його динамічних властивостей та розроблення програмно-апаратного пристрою ФАПЧ з підвищеною завадостійкістю є **актуальним** науковим завданням.

Структура та зміст дисертації. Дисертаційна робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» і присвячена тематиці підвищення завадостійкості цифрового програмно-апаратного пристрою фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ).

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних літературних джерел, що складає 128 найменувань, загальний обсяг 184 сторінки, в тому числі 120 сторінок загального тексту, 72 рисунки, 6 таблиць та 4 додатки на 14 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, відзначено особистий внесок автора в отриманні оригінальних наукових результатів, сформульовано наукову новизну та практичне значення роботи, наведено інформацію про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі дисертації стисло описано структурно-функціональну схему класичного пристрою ФАПЧ, його принцип роботи та основні параметри. Наведено класифікацію пристроїв цифрових пристроїв ФАПЧ за різними способами реалізації фазових детекторів. Проведено порівняльний аналіз існуючих літературних джерел, присвячених питанням завадостійкості пристроїв ФАПЧ. На основі аналізу літератури було зроблено висновок про необхідність проведення подальших досліджень методів підвищення граничної завадостійкості пристрою ФАПЧ, що забезпечують збереження його динамічної поведінки, а також здійснення програмно-апаратної реалізації такого пристрою ФАПЧ.

У другому розділі наведено та коротко описано математичну модель класичного цифрового пристрою ФАПЧ, побудованого за прототипом аналогового пристрою. Запропоновано метод підвищення завадостійкості



цифрового пристрою ФАПЧ, суть якого полягає в узгодженні амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) пристрою з огинаючою спектра частотно-модульованого (ЧМ) сигналу, що надходить на пристрій, визначено критерій оптимізації такого узгодження. Крім того, зображено структурну схему цифрового пристрою ФАПЧ з модифікованим фазовим детектором. Описано математичну модель такого пристрою у часовій області, а також спосіб синтезу цифрових фільтрів і розрахунок їх коефіцієнтів за параметрами пристрою ФАПЧ.

У третьому розділі показано стислий опис програмного середовища для проведення імітаційного моделювання цифрового пристрою ФАПЧ. Описано загальний алгоритм роботи програми у середовищі MATLAB та графічний інтерфейс користувача для наочного представлення результатів у середовищі QT Creator. Шляхом імітаційного моделювання було досліджено вплив нормалізованих параметрів пристрою на тривалість перехідних процесів у разі захоплення частоти у пристрої ФАПЧ. Автор провів порівняльне дослідження завадостійкості класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ за двома різними способами визначення моменту зриву синхронізації, у обох випадках він показав, що можливо домогтися зниження шумового порогу пристрою ФАПЧ орієнтовно на 2-2,5 дБ, не спотворюючи при цьому його статичні характеристики.

У четвертому розділі наведено способи програмно-апаратної реалізації пристрою на двох різних сучасних апаратних платформах - на демонстраційній платі STM32F4Discovery з мікроконтролером фірми STM та платі Cmod A7-35T на базі програмованої логічної інтегральної схеми фірми Xilinx. Реалізація на першій платформі є швидшою та зручнішою у відлагодженні, тоді як реалізація на другій платформі володіє кращою швидкодією і більшими обчислювальними ресурсами, хоча є більш трудомісткою та складнішою у виготовленні. Експериментальним шляхом підтверджено результати імітаційного моделювання процесу захоплення частоти класичним пристроєм ФАПЧ. Також автор провів експериментальне дослідження впливу форми АЧХ пристрою на його граничну завадостійкість у разі приймання ЧМ-сигналів з великим індексом модуляції. Було показано, що узгодження форми АЧХ пристрою ФАПЧ з огинаючою спектра вхідного сигналу найбільше виявляється за малих значень ВСШ і дає змогу знизити шумовий поріг пристрою в середньому на 0,5-1,5 дБ для різних сигналів. Також автор експериментально підтвердив результати дослідження завадостійкості класичного та модифікованого пристроїв ФАПЧ, здобуті шляхом імітаційного моделювання, та показав можливість шляхом пониження шумового порогу для модифікованого пристрою до значень, нижчих на 2,5 дБ, ніж для класичного.



Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Алтуніна С. І., підтверджуються результатами проведених автором імітаційного моделювання та експериментальних досліджень цифрового пристрою фазової синхронізації, застосуванням теорії кореляційної обробки сигналів та теорії розробки програмно-апаратних засобів, актами впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Алтунін С. І. у своїй дисертаційній роботі використовує низку методів дослідження: теоретичний аналіз (побудова математичної моделі пристрою ФАПЧ у часовій області), імітаційне моделювання та експериментальне дослідження. Збіжність теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень та імітаційного моделювання підтверджує достовірність роботи.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у такому:

- Уперше запропоновано метод вибору параметрів цифрового фільтра у програмно-апаратному пристрої ФАПЧ з метою підвищення його завадостійкості, який відрізняється від відомих апріорних методів узгодження 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.

- 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 можливість зберегти незмінною смугу утримання пристрою ФАПЧ у статичному режимі та забезпечити відсутність спотворень вхідного сигналу.

- Удосконалено метод імітаційного моделювання цифрового пристрою ФАПЧ за умови впливу на вхідний сигнал адитивного білого гаусівого шуму, який відрізняється від існуючих методів застосування 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.

Повнота викладення наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях. Дисертація Алтуніна С.І. є завершеним науковим дослідженням, яке спрямовано на розв'язання актуальної наукової задачі. Матеріали роботи викладено у зрозумілий для сприйняття спосіб. Автор чітко та послідовно описує методи вирішення поставленої проблеми, а також наводить вичерпні обґрунтування результатів, отриманих шляхом імітаційного моделювання та експериментального дослідження завадостійкості пристроїв ФАПЧ.

Результати дисертаційної роботи опубліковані та апробовані у 12 наукових працях: 5 статтях у виданнях, які включені до переліку (реєстру) наукових фахових видань України, 1 статті в журналі, що індексується в Scopus, 6 публікаціях у збірниках праць науково-технічних конференцій, із яких дві проіндексовано в Scopus.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертація Алтуніна С.І. оформлена відповідно до вимог, що висувається до дисертаційних робіт. Вона написана літературною мовою, прийнятою у науково-технічній літературі. Велика кількість інформативних і наочних рисунків доповнює роботу та сприяє кращому розумінню змісту дисертаційної роботи.

Автореферат достатньо повно та ідентично розкриває зміст дисертації, адекватно висвітлює зміст роботи. Стиль викладення матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

Рекомендації щодо використання результатів роботи. Практичні результати досліджень дають змогу проектувати приймачі радіосигналів із підвищеною завадостійкістю у телекомунікаційних системах, що працюють на низьких проміжних частотах (до 100 кГц). Результати рекомендуються до застосування у таких установах як ПрАТ «Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань» та Державний університет телекомунікацій.

Наукові результати можуть бути використані для подальшого розвитку теорії завадостійкості приймання сигналів, зокрема – для розроблення цифрових радіоприймачів сигналів зі складною фазовою маніпуляцією,



амплітудно-фазовою маніпуляцією та їх різновидами, а також у навчальному процесі у підготовці спеціалістів з радіотехніки та телекомунікацій.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У роботі досить часто зустрічаються формулювання "динамічна поведінка пристрою ФАПЧ" та "динамічні параметри пристрою ФАПЧ", зміст яких важко зрозуміти без ознайомлення з усією роботою. Пояснення суті цього поняття стає зрозумілим, коли автор демонструє результати порівняльного дослідження тривалості перехідних процесів у класичному та модифікованому пристроях ФАПЧ. Цей аспект слід було обґрунтувати на початку роботи.

2. У першому розділі роботи автором представлено класифікацію цифрових пристроїв ФАПЧ (с.38-41). Назви деяких із різновидів цих пристроїв наведено англійською мовою без чіткого перекладу українською мовою (наприклад: "Zero-Crossing DPLL" на с.40, "Digital Tanlock Loop" на с.53 тощо).

3. У другому розділі автор пояснює принцип роботи блоку детектора синхронізму (с. 73-85) і вказує, що при правильному підборі його параметрів можна з кращою точністю визначити момент зриву синхронізації. Проте у наступних розділах, присвячених імітаційному моделюванню та експериментальним дослідженням пристрою ФАПЧ, не описано як автор вибирав параметри цього блоку і якої точності результатів було таким чином досягнуто.

4. У роботі не було згадано про інші показники пристрою ФАПЧ, такі як середньоквадратична похибка фази вихідного сигналу та джитер, які також є важливими і мають враховуватися у процесі розроблення приймачів радіосигналів. Відповідно не було досліджено як змінюються ці параметри при модифікації фазового детектора пристрою.

5. Авторіві слід було детальніше описати, яким чином визначалося ВСШ під час експериментальних досліджень.

6. Дослідження завадостійкості пристрою ФАПЧ проводилися у відносно низькому частотному діапазоні (одиниці-десятки кілогерц). Більшість сучасних телекомунікаційних систем працює у значно вищому діапазоні частот (десятки-сотні мегагерц). Отже постає питання, чи можливо буде реалізувати запропонований метод підвищення завадостійкості пристрою ФАПЧ на вказаній програмно-апаратній платформі для цього діапазону частот і чи буде там спостерігатися такий самий вигравш за завадостійкістю. В своїй роботі автор про це не згадав.

7. Запропонований у п. 1 наукової новизни метод підвищення завадостійкості матиме більшу практичну цінність, якщо пристрій ФАПЧ



буде спроможний оперативно відслідковувати зміни спектральних характеристик вхідних інформаційних сигналів та коригувати свої параметри відповідним чином. У своїй роботі автор не аналізує, чи можливо забезпечити реалізацію такого адаптивного механізму керування параметрами в реальному часі на вказаній апаратній платформі.

8. В тексті на окремих рисунках є деякі неточності. Зокрема, на рис. 4.13 на с.138-139 у "легенді" написано "ЧХ пристрою ФАПЧ", а в підписуночному написанні - АЧХ.

Наведені зауваження не зменшують позитивного враження від дисертаційної роботи, яка є завершеною кваліфікаційною науковою працею та відповідає чинним вимогам МОН України.

Висновок. Дисертація Алтуніна Сергія Ігоровича «Підвищення завадостійкості програмно керованих пристроїв синхронізації» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання підвищення завадостійкості пристроїв фазової синхронізації шляхом оптимального вибору параметрів повністю цифрового пристрою ФАПЧ та структурної модифікації методів керування генератором цифрового синтезу сигналу гетеродина синхронного фазового детектора.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю і оформленням відповідає всім вимогам положення про „Порядок присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року, а її автор Алтунін Сергій Ігорович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент

доктор техн. наук, старший науковий співробітник,  
заступник директора з науково-технічної роботи  
Інституту електродинаміки НАН України



О.В. Самков