

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ

Д. т. н. А. П. Бондарев, д. т. н. І. В. Горбатий, к. т. н. М. Д. Кіселичник,
к. т. н. М. В. Мелень

Національний університет «Львівська політехніка»
Україна, м. Львів
bondap@ukr.net

Розглянуто методи підвищення завадостійкості системи радіозв'язку шляхом параметричної оптимізації, схемотехнічної модифікації та вибору оригінальних сигнальних сузір'їв, наведено результати досліджень. Особлива увага приділена програмно-апаратній реалізації цих методів. Також описано розроблені методи автоматизації процедур надійнісного моделювання для забезпечення та прогнозування надійності систем зв'язку.

Ключові слова: радіозв'язок, програмно-апаратні пристрої, завадостійкість, надійність, сигнальне сузір'я.

На сьогоднішній день вимоги до місткості сучасних систем зв'язку постійно підвищуються, оскільки кількість користувачів цих систем постійно зростає. Відомим є протиріччя між збільшенням швидкості передавання даних (спектральною та інформаційною ефективністю) та зменшенням потужності переданого сигналу (енергетичною ефективністю). У той же час, відомі сучасні методи модуляції вже майже досягнули теоретично можливої границі Шеннона (рис. 1). Є два можливі шляхи розв'язання згаданих протиріч: вдосконалення методів цифрової маніпуляції, що дають можливість ефективніше використовувати частотний спектр та зробити експлуатацію системи дешевшою; підвищення граничної завадостійкості пристроїв синхронізації, які є частиною систем зв'язку.

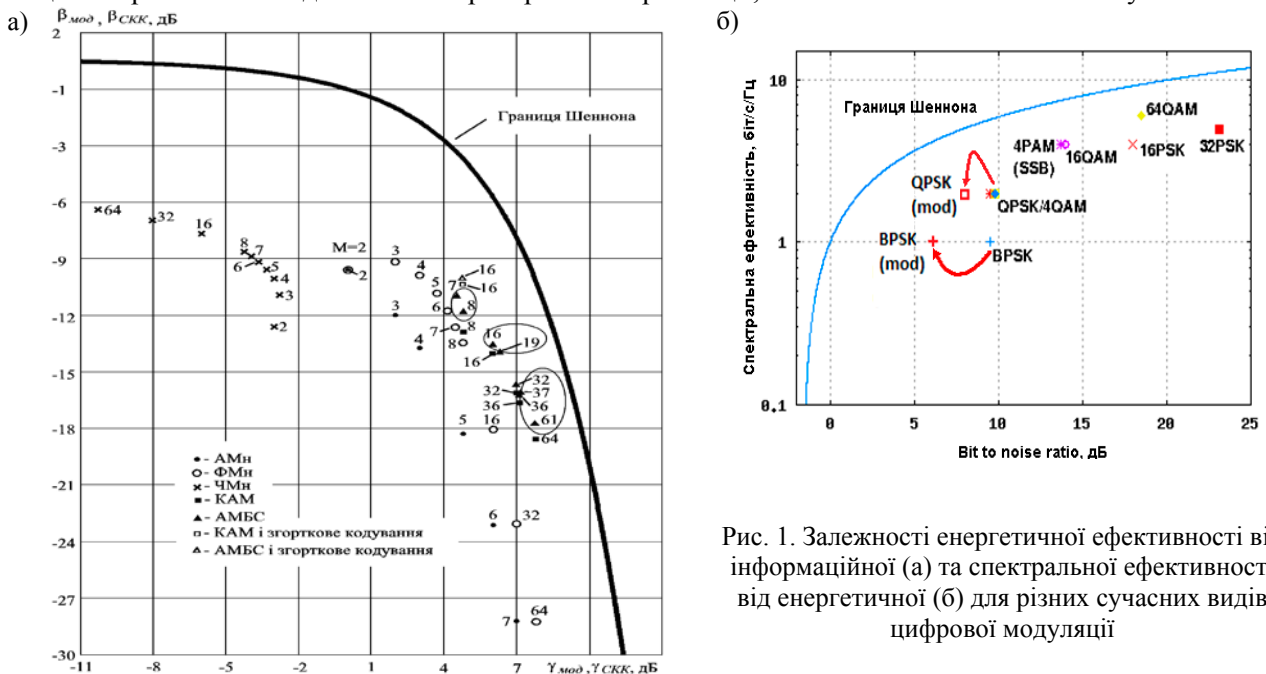


Рис. 1. Залежності енергетичної ефективності від інформаційної (а) та спектральної ефективності від енергетичної (б) для різних сучасних видів цифрової модуляції

Метою даної доповіді є представлення досягнутих результатів щодо теоретичного та практичного підвищення завадостійкості та надійності систем радіозв'язку.

Розробка оригінального сигнального сузір'я є одним зі шляхів підвищення завадостійкості приймання радіосигналів [1—3]. Приклад одного з таких сузір'їв (19-АМБС) наведено на рис. 2, а. Ця сигнальна конструкція відрізняється від відомої 19-КАМ наявністю додаткової складової у просторі демодуляції (у 19-КАМ дві складових, у 19-АМБС – три). За відсутності завад властивості цих конструкції тотожні.

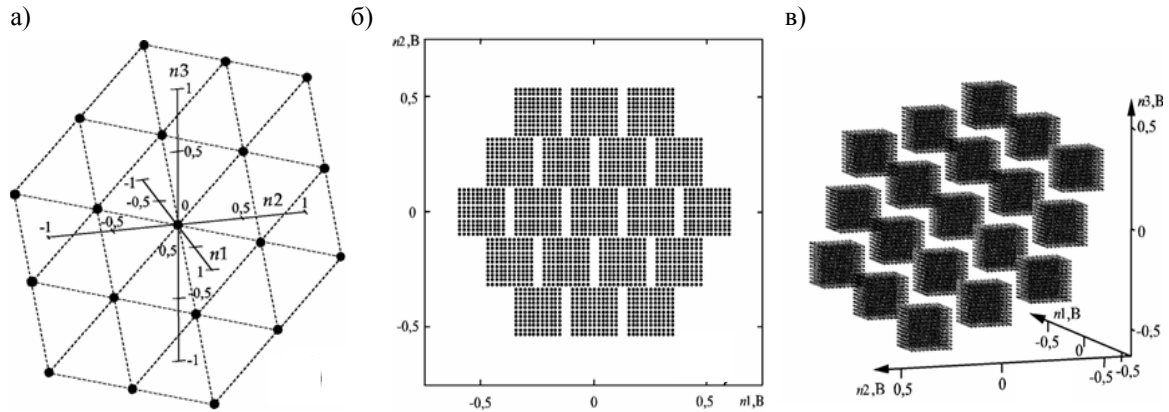


Рис. 2. Сигнальне сузір'я 19-АМБС без шуму (а) та з шумом (в), сузір'я 19-КАМ з шумом (б)

За наявності завад у вигляді дрейфу нуля каналів та шуму точки сузір'я на рис. 2, а перетворюються на розпливчасті області (рис. 2, б, в). У цьому випадку збільшення рівня завади для сузір'я 19-КАМ призведе до перекриття “плям” (рис. 2, б) і, відповідно, до виникнення символної помилки. Для сузір'я 19-АМБС (рис. 2, в) таке перекриття можна спостерігати у будь якій проекції простору детектування, але завдяки наявності третьої сигнальної складової символна помилка не виникає.

Порівняльний аналіз цих сузір'їв показав вигравш 19-АМБС на 25% за потужністю (1,25 дБ) по сигнальній відстані та відсутність символної помилки, коли її імовірність у 19-КАМ сягає 20%.

Забезпечення завадостійкості приймання радіосигналів шляхом параметричної оптимізації. Для оптимізації класичних аналогових ФАПЧ традиційно використовують критерій мінімальної фазової похибки [4, с. 245; 5, с. 211], а у нашій розробці — критерій максимального діапазону стеження [6]. Результати оптимізації для різних індексів модуляції та рівнів шумів наведено на рис. 3.

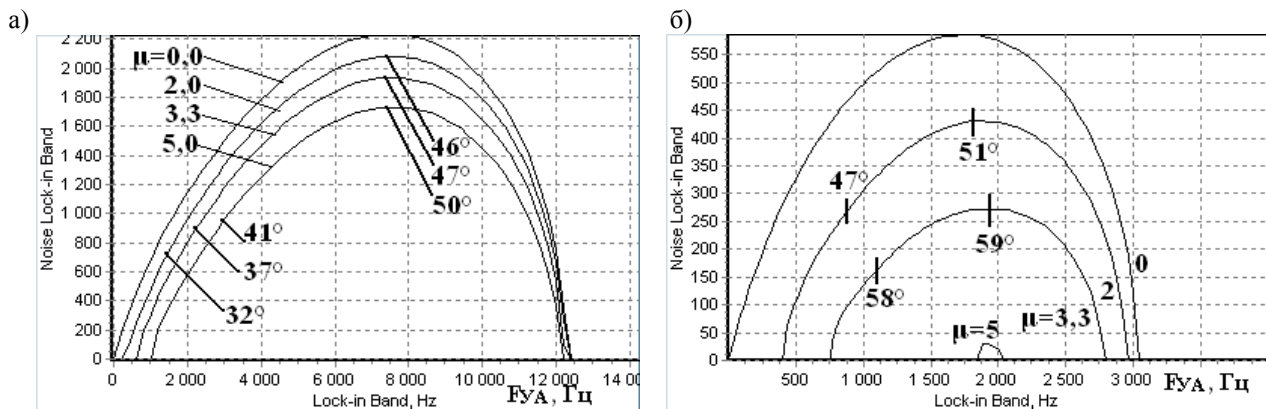


Рис. 3. Результати оптимізації ФАПЧ за малого (а) та великого (б) рівня шуму

За малих шумів (рис. 3, а) критерій максимального діапазону програє 10—15° по якості, але виграє в 2—3 рази по діапазону. За великого рівня шуму (рис. 3, б) відповідний програш становить 1—5°, а вигравш — 1,5—2 рази. Отже, у випадку використання ФАПЧ як оптимального фільтра слід обирати параметри за критерієм мінімальної фазової похибки, а коли ФАПЧ використовується як стежний пристрій синхронізації, для якого втрата синхронізму критичніша за миттєві похибки частоти, — за критерієм максимального діапазону стеження.

Забезпечення завадостійкості приймання радіосигналів шляхом схемотехнічної модифікації. Важливим фактором, який обмежує завадостійкість систем радіозв'язку, є порогові явища у фазовому детекторі. У авторській роботі [7] був запропонований схемотехнічний спосіб зниження шумового порогу (рис. 4). Його сутність полягає у зменшенні фазового розузгодження на входах ФД шляхом використання вузькосмугового фільтра (ВСФ) із одночасною втратою динаміки сигналу, проходження ФД нижче рівня порогу, відновлення динаміки сигналу у фільтрі верхніх частот (ФВЧ).

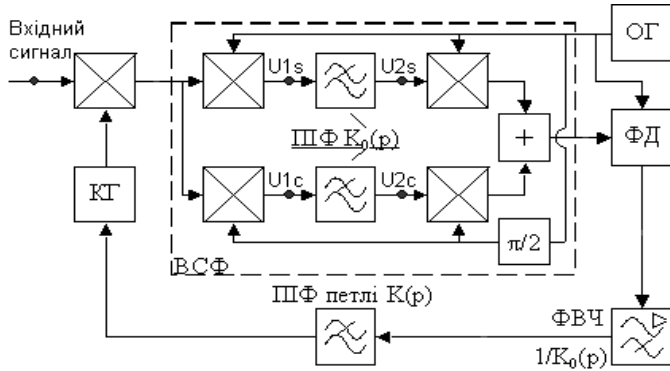


Рис. 4. Функціональна схема модифікованого пристрою ФАПЧ із підвищеною завадостійкістю

Подальші детальні дослідження запропонованого пристрою були проведені за допомогою аналітично-імітаційної моделі, зображеної на рис. 5 [8]. Модель дозволяє змінювати інформаційну послідовність та тип модуляції вхідного сигналу, оперативно змінювати параметри приймального пристрою, а також параметри завад — адитивного шуму у каналі та розузгодження несучої частоти сигналу і частоти внутрішнього гетеродина. Також модель уможливило зручне спостереження та фіксацію результатів за допомогою осцилографа, дисплею фазових портретів та лічильника бітових помилок.

Застосування моделі для простих видів модуляції, таких як BPSK та QPSK, показало виграш у пороговій завадостійкості на 4,5 та 3 дБ відповідно. Для складніших видів, наприклад 8OQPSK, виграш склав біля 1,5 дБ [9]. Для типового у сучасному мобільному зв'язку сигналу OQPSK енергетичний виграш (SNR) сягав 2,5 дБ, а інформаційний (BER) — до 10 дБ за інших рівних умов.

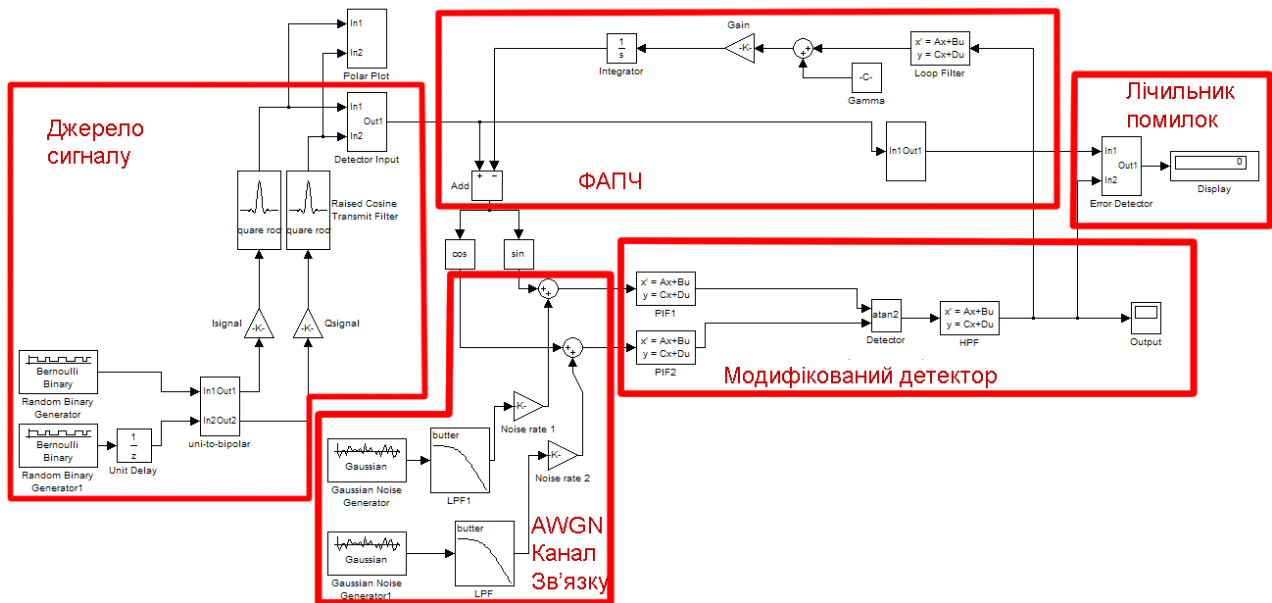


Рис. 5. Аналітично-імітаційна модель неавтономної ФАПЧ у середовищі MathLab

Моделювання проковзувань фази на відносно тривалих проміжках часу (рис. 6) показало [10], що зриви синхронізації у модифікованому ФАПЧ відбуваються приблизно у 10 разів рідше, ніж у класичному. Крім того, з огляду на числові значення по вертикальній осі, у модифікованому пристрої проковзування відбувається на один період, а у класичному на декілька періодів поспіль.

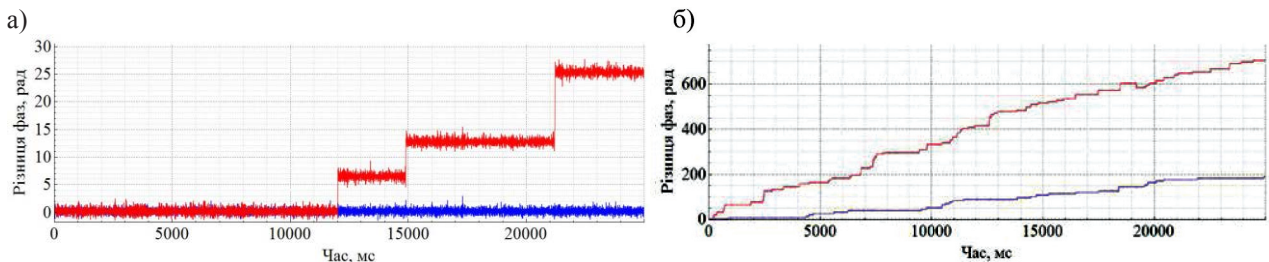


Рис. 6. Стрибки фази за відношення сигнал/шум 2,5 дБ (а) та 0 дБ (б) (верхні лінії — для класичного пристрою ФАПЧ, нижні — для модифікованого)

Особливості програмно-апаратної реалізації завадостійких методів приймання радіосигналів. Наведені вище результати підвищення завадостійкості пристроїв зв'язку отримані шляхом аналітичного та імітаційного моделювання. Роботи щодо апаратної реалізації цих заходів ще тривають, але вже отримані результати експериментальної перевірки програмно-апаратної реалізації [10].

Програмно-апаратний пристрій фазової синхронізації було реалізований на двох платформах: STM32F407 Discovery з мікроконтролером STM32F407VGT6 (ARM-Cortex M4, 168 МГц, 1 Мб Flash, 192 Кб ОЗП) (рис. 7, а) та Digilent Cmod A7-35T (розробницька плата на базі ПЛІС [11] фірми Xilinx архітектури Artix-7) (рис. 7, б). Плата STM32F407 Discovery містить мікроконтролер та вбудовані 12-розрядні АЦП і ЦАП, засоби для реалізації обміну даними через послідовні порти. Платформа Digilent Cmod A7-35T на базі ПЛІС має більшу швидкодію та паралельну архітектуру, але вимагає додаткового підключення зовнішніх АЦП і ЦАП.

Експериментальне дослідження реалізованих на цих платформах ФАПЧ із класичним та модифікованим ФД показало, що шумові характеристики (частота проковзування фази) практично збігаються із результатами моделювання, наведеними на рис. 6, а динамічні характеристики внаслідок модифікації ФД не погіршуються (рис. 7, в, г).

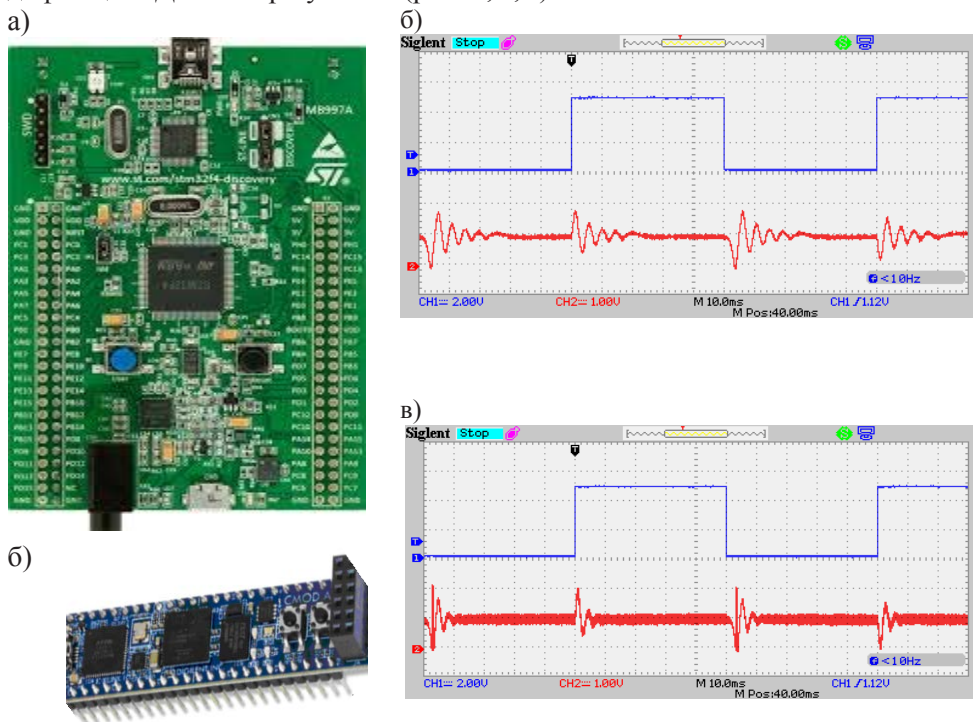


Рис. 7. Платформи STM32F407 Discovery (а), Digilent Cmod A7-35T (б) та результати їхнього експериментального дослідження для реалізації класичного (в) та модифікованого (г) ФАПЧ

Надійнісне моделювання для забезпечення та прогнозування надійності систем зв'язку. Одним з питань забезпечення безперебійного функціонування систем зв'язку є забезпечення їх надійності. Для цього до системи необхідно вводити додаткові вузли резервування, контролю та комутації. Це значно ускладнює не тільки аналіз, а навіть опис таких систем, змушує переходити до еквівалентних схем надійності та імовірнісних методів їхнього опису. Приклад графу станів і переходів порівняно нескладного контрольованого модуля системи зв'язку наведено на рис. 8, а. Розглянемо способи спрощення еквівалентних схем надійності та автоматизацію цього процесу.

Як відомо [12, 13], інтенсивність відмов апаратури значно менша інтенсивності її збоїв, а час до відмови контрольованого модуля значно більший інтервалу часу між наступними моментами планового програмного контролю правильності його функціонування [13]. Скориставшись зазначеною особливістю переходів випадкового процесу, усю множину його станів можна розбити на підмножини так, щоб частота переходів між станами кожного з них значно перевищувала частоту переходів між ними. Приклад такого спрощення наведено на рис. 8, б.

У ході виконання роботи були розроблені процедури аналізу та прогнозування надійності системи зв'язку, які реалізують вибір показників надійності [14], та метод ефективності комплексної системи контролю правильності функціонування телекомунікаційних систем бездротового зв'язку [15]. Діаграму варіантів використання таких процедур наведено на рис. 9.

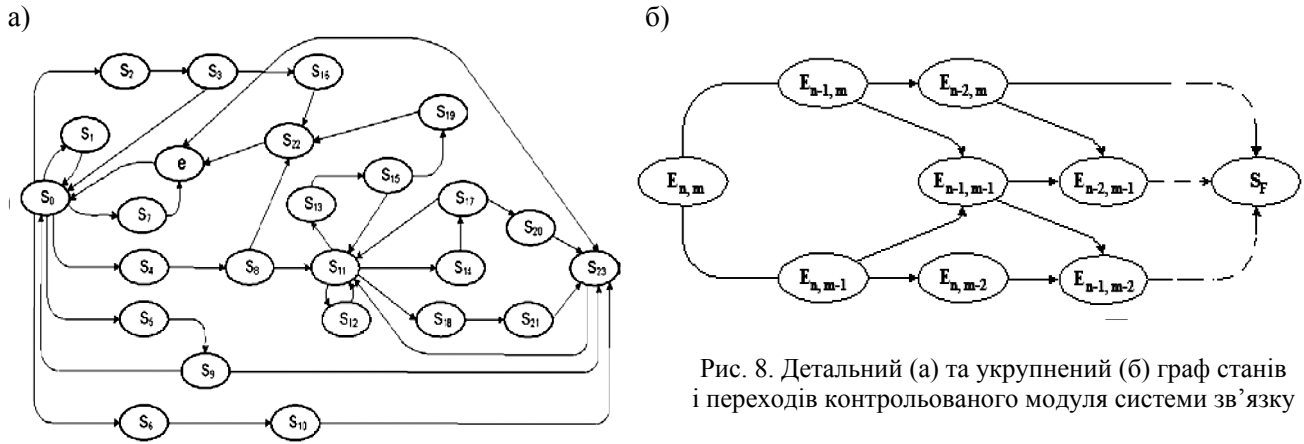


Рис. 8. Детальний (а) та укрупнений (б) граф станів і переходів контрольованого модуля системи зв'язку

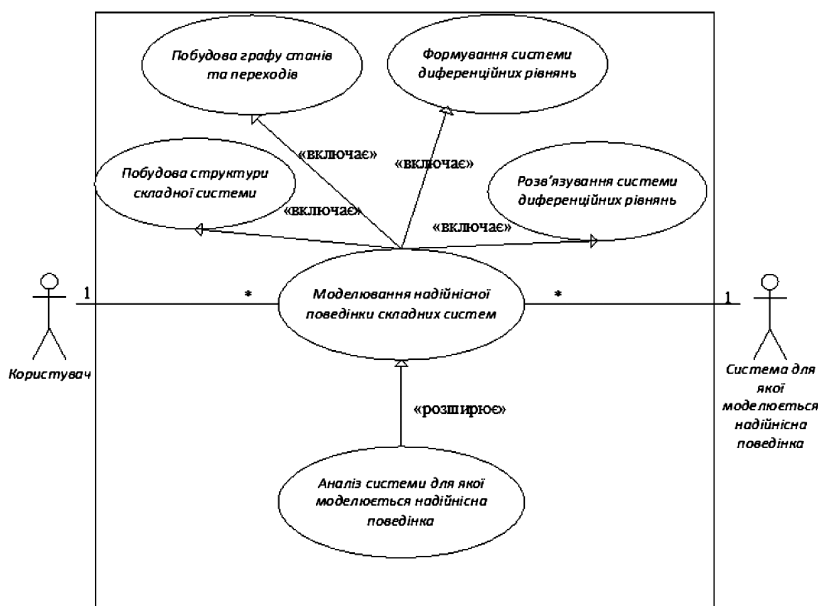


Рис. 9. Діаграма варіантів використання автоматизованої процедури прогнозування надійності

На закінчення підіб'ємо підсумки.

1) Запропановане оригінальне сигнальне сузір'я у тривимірному просторі детектування у порівнянні із відомими сузір'ями показало вигреш у 25% за потужністю (1,25 дБ) по сигнальній відстані та відсутність символної помилки, коли її імовірність у відомого сузір'я сягає 20%.

2) Параметрична оптимізація детектору на базі пристрою ФАПЧ сигналів із кутовою модуляцією на фоні шумів дозволила у 2—3 рази збільшити діапазон стеження за змінною носійною частотою сигналу із незначним (на 4—10°) погіршенням фазової похибки детектування.

3) Запропонована модифікація цифрового пристрою фазової синхронізації дозволяє понизити його шумовий поріг і водночас зберегти динамічні параметри при обробці сигналів з двійковою фазовою маніпуляцією.

4) Результати проведеного імітаційного моделювання модифікованого пристрою фазової синхронізації з метою пошуку його шумового порогу показали, що регулярні втрати синхронізації у цифровому пристрої ФАПЧ з модифікованим фазовим детектором відбуваються за менших відношень сигнал-шум (на 1—2,5 дБ залежно від параметрів пристрою). Ці результати були підтверджені експериментально на програмно-апаратному реалізованому пристрої. Крім того, експериментальні дослідження показали, що наявність модифікованого фазового детектора не погіршує динамічних параметрів пристрою.

5) Засобами уніфікованої мови моделювання UML розроблено інформаційну модель програмної системи для автоматизованого моделювання надійності поведінки складних систем. Розроблено діаграми варіантів використання, класів, станів, діяльності та компонент, які в сукупності описують логічну модель програмної системи.

6) Розроблено надійнішу модель довільного контрольованого модуля системи бездротового зв'язку, що представляє собою напівмарковський і двомірний марковський процеси переходів між станами цього модуля. Для дослідження запропонованої надійнішої моделі довільного контрольованого модуля використано метод, який оснований на фазовому укрупненні її станів, що дає змогу звести вивчення цієї моделі до вивчення випадкового процесу переходів між укрупненими станами й часу перебування його в цих станах, а також перетворенні моделі, завдяки якому процес переходів між її станами повністю описують напівмарковським процесом.

7) Розроблена надійніша модель і метод її дослідження дали можливість отримати аналітичне співвідношення для визначення ймовірності перебування довільного контрольованого модуля системи бездротового зв'язку в працездатному стані. Це співвідношення описане параметрами напівмарковського процесу (значеннями середнього часу перебування напівмарковського процесу у виділених станах і ймовірностями його переходів між ними), які повністю виражені через надійнісні характеристики контрольованого модуля і характеристики засобів контролю правильності його функціонування.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Horbatiy I. Research on properties of devices for shaping and processing of signals based on amplitude modulation of many components // *Radioelectronics and Communications Systems*.— 2018.— Vol. 61.— N 10.— P. 467–476.
2. Gorbatiy I.V. Optimization of signal-code constructions using the maximum efficiency criterion // *Radioelectronics and communications systems*.— 2013.— Vol. 56, iss. 12.— P. 560–567.
3. Пат. № 91950 України. Пристрій для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий.— 2010.— Бюл. №17.
4. Шахильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты.— Москва: Связь, 1972.
5. Кантор Л.Я. Помехоустойчивость приема ЧМ-сигналов.— Москва: Связь, 1977.
6. Бондарев А.П. Нелінійний параметричний синтез слідкуючого фазового детектора // *Радіоелектроніка і інформатика*.— 2006.— №1(32).— С. 27–30.
7. Пат. № 66435 України. Пристрій фазової автопідстройки частоти / Бондарев А.П., Мартинів М.С.— 2004.— Бюл. №5.
8. Bondariev A., Maksymiv I. Method of reducing the noise influence on phase – shiftkeying signals // *American Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*.— 2015.— Vol. 1, № 3.— P. 120–124.
9. Максимів І. П., Алтунін С. І., Бондарев А. П., Горбатий І. В. Вплив параметрів детектора на ефективність приймання радіосигналів зі складною фазовою модуляцією // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2018.— № 5–6.— С. 24–29.— <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.24>
10. Bondariev A., Altunin S., Horbatiy I., Maksymiv I. Firmware implementation and experimental research of the phase-locked loop with improved noise immunity // *Східно-Європейський журнал передових технологій*.— 2018.— № 5/9 (95).— P. 17–25.
11. Xilinx “7 Series FPGAs Data Sheet: Overview” [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds180_7Series_Overview.pdf - 2018
12. Волочий Б.В., Калашников И.Д., Мазепа Р.Б., Мандзий Б.А. Проектирование отказоустойчивых микропроцессорных информационно-измерительных систем.— Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1987.
13. Журавлёв Ю.П., Котельюк Л.А., Циклинский Н.И. Надежность и контроль ЭВМ.— Москва: Сов. радио, 1978.
14. Мелень М.В., Назарук І.Я. Вибір показника надійності телекомунікаційних високонадійних систем // *Тези доп. ІХ МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*.— Україна, м. Запоріжжя.— С. 51–52.
15. Мелень М.В., Козунь В.І. Метод оцінки ефективності комплексної системи контролю правильності функціонування телекомунікаційних систем бездротового зв'язку // *Тези доп. ІХ МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»*.— Україна, м. Запоріжжя.— С. 49–50.

A. P. Bondariev, I. V. Horbatiy, M. D. Kiselychnyk, M. V. Melen

Models and methods ensuring the reliability and noise immunity of communication software and hardware

The paper presents the methods and results of increasing the noise immunity of the radio communication system by parametric optimization, schematic modification and by choosing original signal constellations. Particular attention is paid to hardware and software implementation of these methods. Also described are the developed methods for automation of reliable modeling procedures to ensure and predict the reliability of communication systems.

Keywords: radio communication, firmware devices, noise immunity, reliability, signal constellation.