

К. т. н. І. П. МАКСИМІВ, С. І. АЛТУНІН, д. т. н. А. П. БОНДАРЄВ,  
д. т. н. І. В. ГОРБАТИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕТЕКТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙМАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ФАЗОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

*Наведено результати дослідження впливу параметрів детектора, реалізованого на базі пристрою фазового автопідстроювання частоти, на його ефективність. Проведено математичне моделювання сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією 8-QAM та досліджено вплив параметрів пристрою фазового автопідстроювання частоти на якість приймання цих сигналів за умови дії завади у каналі зв'язку. Визначено найбільш прийнятні параметри, що забезпечують максимальну завадостійкість системи зв'язку, що використовує складні види фазової модуляції сигналів.*

*Ключові слова:* 8-QAM, фазовий детектор, ФАПЧ, завадостійкість.

Невід'ємною складовою сучасних приймачів цифрових радіосигналів є пристрої фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Пристрої ФАПЧ мають декілька застосувань, зокрема їх використовують для частотної фільтрації, частотної модуляції та демодуляції, множення та перетворення частоти сигналу, виділення опорного коливання для когерентного детектування. Пристрої ФАПЧ застосовують у широкій області радіоелектроніки, починаючи від мобільних телефонів та закінчуючи системами космічного зв'язку. Це зумовлено тим, що ці пристрої є порівняно простими та дешевими у схемотехнічній реалізації.

Сучасні системи радіозв'язку використовують сигнали зі складними видами модуляції з метою ефективного використання виділеного частотного діапазону.

Метою цієї роботи є визначення діапазону параметрів фільтра ФАПЧ, за яких система зв'язку з модуляцією 8-QAM має найвищу завадостійкість.

### Опис проблеми

Однією з основних проблем сучасних систем стільникового зв'язку є оптимізація якості надання послуг за критеріями відношення сигнал/шум та ймовірність появи помилки. Співвідношення цих параметрів є головним критерієм в оцінці ефективності системи зв'язку [1]. Існує кілька способів його оптимізації, наприклад за допомогою додаткового антенного обладнання, яке б мінімізувало складову багатопроменевого поширення у суміші шумів, що діють у каналі зв'язку [2], чи оптимізованих алгоритмів обробки отриманої суміші сигналу з шумом.

Також набув поширення метод синхронного детектування з використанням пристрою ФАПЧ, який дозволяє оптимізувати якість зв'язку за допомогою стеження за зміною фази отриманого сигналу.

Принцип роботи ФАПЧ полягає у тому, що він порівнює фази вхідного та опорного сигналів і видає сигнал похибки відповідно до різниці між цими фазами. Сигнал похибки проходить далі через фільтр низьких частот (ФНЧ) та використовується як керуючий для генератора, керованого напругою. Керований генератор у свою чергу генерує в колі негативний зворотний зв'язок. Якщо вихідна частота відхиляється від опорної, сигнал похибки збільшується за модулем, діючи на генератор у сторону зменшення похибки.

Завдяки простоті та доступності фізичної реалізації, найбільшого поширення у сучасній радіоелектроніці набула схема цифрової ФАПЧ, запропонована Р. Бестом (рис. 1) [3]. Ця схема відслідковує напрям зміни фази отриманого сигналу та корегує фазові стрибки, спричинені впливом завад, за допомогою петлі зворотного зв'язку, а відкорегований сигнал подається далі на демодулятор. Передавальна характеристика такого пристрою є наступною:

$$H(z) = \frac{K_p(z-1) + K_i}{(z-1)^2 + K_p(z-1) + K_i}, \quad (1)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$  — коефіцієнти пропорційності та інтегрування відповідно.

Схема Р. Беста є найбільш поширеною, проте не єдиною існуючою схемою фізичної реалізації ФАПЧ. У [4] запропоновано концепцію оптимально-узгодженого фільтра прийма-

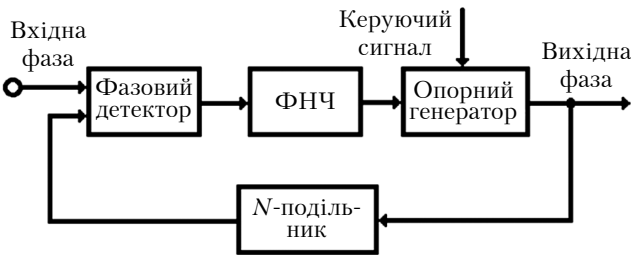


Рис. 1. Структурна схема типового петльового фільтра ФАПЧ

ча радіосигналів з фазовою модуляцією. На базі математичної моделі цього фільтра синтезовано пристрій ФАПЧ (рис. 2) [5], особливістю якого є зменшення величини відхилення фази сигналу за допомогою пропорційно-інтегруючих фільтрів (ПІФ). Передавальна характеристика такого ФАПЧ є наступною:

$$H(p) = \frac{\Omega_y K_0(p)}{p + \Omega_y K_0(p)}, \quad (2)$$

$$\text{де } K_0(p) = \frac{1 + pm_0 T_0}{1 + pT_0};$$

$$p = j\omega;$$

$\Omega_y$  – девіація частоти сигналу;

$m_0$  – коефіцієнт пропорційності;

$T_0$  – стала часу фільтра.

З виразу (2) видно, що ефективність роботи схеми на рис. 2 залежить від параметрів використаних у ній фільтрів. Правильний підбір цих параметрів є критично важливим для ефективною роботи такого ФАПЧ, тому необхідно визначити їхні оптимальні значення [6].

Оптимальні значення параметрів фільтра петлі ФАПЧ необхідно підбирати з урахуванням того, що процес детектування буде проходити для сигналів зі складними видами квадратурної модуляції (QAM), поширених у сучасних системах радіозв'язку. Однією з можливих варіацій квадратурної амплітудної модуляції є модуляція 8-QAM, яка дозволяє передавати вісім мож-

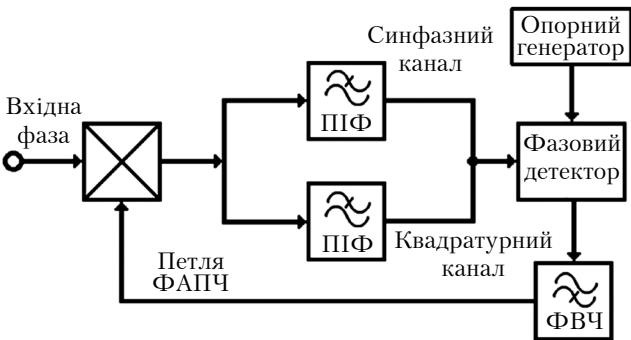


Рис. 2. Структурна схема детектора на базі петльового фільтра ФАПЧ

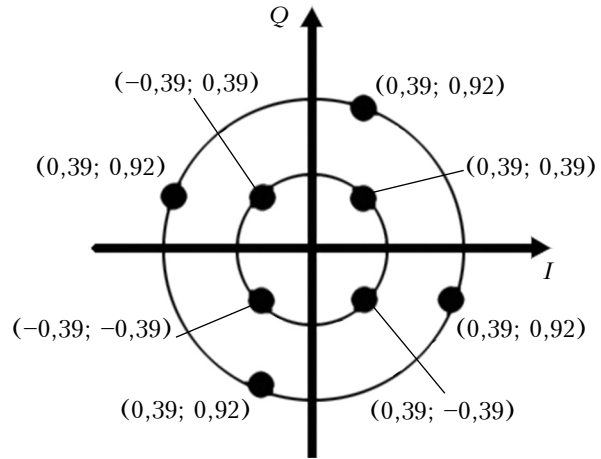


Рис. 3. Сузір'я сигналу з модуляцією 8-QAM

ливих значень фази сигналу, виражених двома значеннями, одне з яких ( $I$ ) є значенням синфазної компоненти, а інше ( $Q$ ) – квадратурної (рис. 3). Її застосовують у цифрових схемах формування радіосигналів. При використанні модуляції 8-QAM два цифрових потоки бітів передаються за допомогою зміни амплітуд двох сигналів-носіїв з застосуванням амплітудної маніпуляції як схеми цифрової модуляції.

У цифровому вигляді значення синфазної та квадратурної компоненти сигналу можна інтерпретувати, використовуючи послідовності з трьох бітів (трибіти), тому проведення імітаційного моделювання такого сигналу реалізовано нами за допомогою програмного забезпечення. Підбір оптимальних параметрів фільтра здійснено за об'єднання програмної реалізації цих сигналів з імітаційною моделлю петльового фільтра ФАПЧ.

### Побудова імітаційної моделі 8-QAM-сигналів

Для побудови 8-QAM-сигналу використане програмне середовище Matlab [7]. Значення кута, амплітуд синфазної та квадратурної компонент сигналу були отримані за допомогою інформаційного цифрового сигналу, який представляє собою послідовність бітів, створену програмно у вигляді масиву. Цю послідовність було розділено на трибіти, та на основі даних табл. 1 було сформовано фазу і амплітуду дійсної та уявної компоненти модульованого сигналу. Отримані значення вносились у двовимірний масив разом зі значеннями часових інтервалів, які задають частоту дискретизації сигналу. На виході було отримано восьмипозиційний інформаційний сигнал (рис. 4, а), готовий до передавання у канал зв'язку. Його фазовий портрет, або сузір'я, (рис. 4, б) відповідає реальному сигналу, що підтверджує адекватність імітаційної моделі.

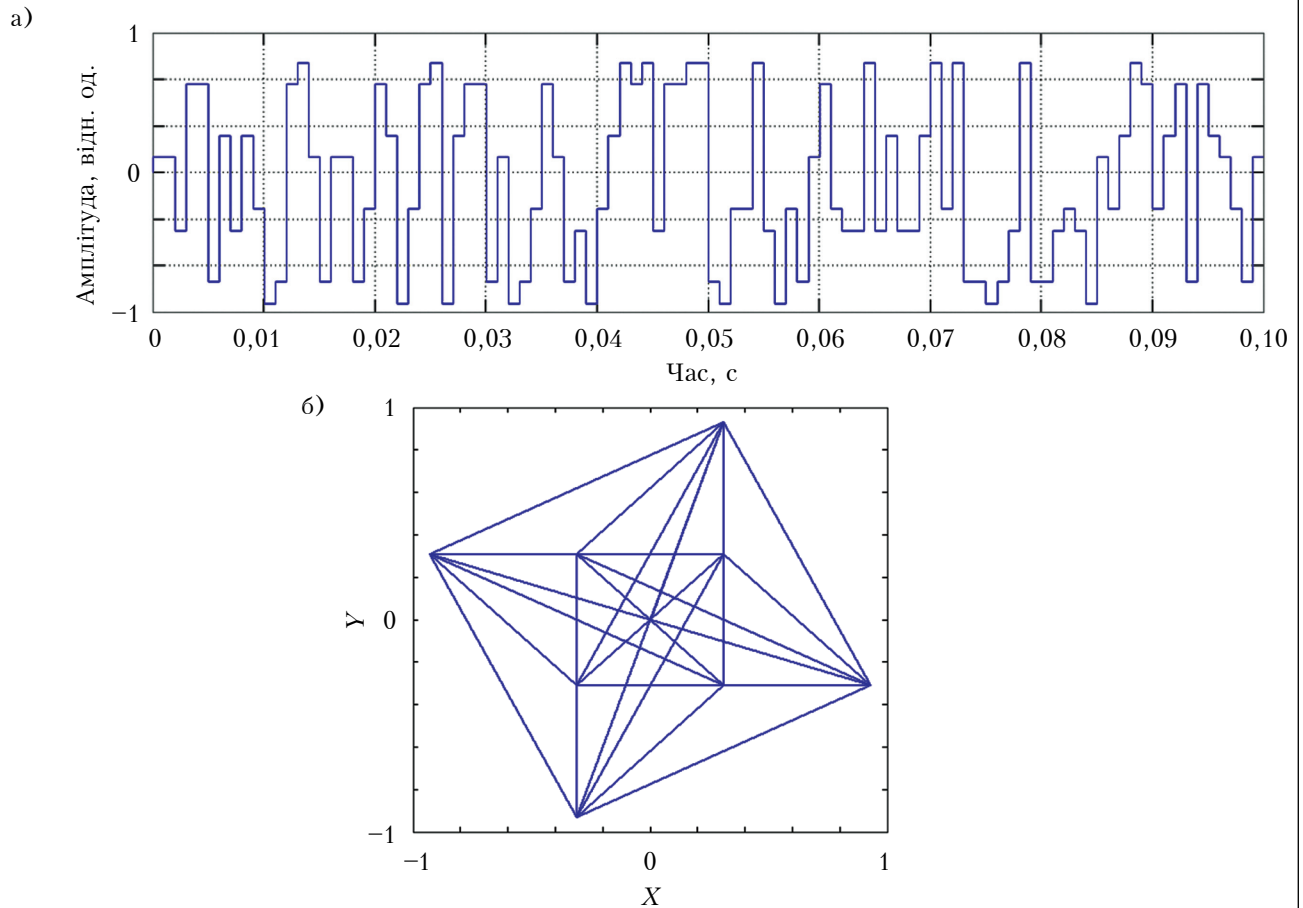


Рис. 4. Часова діаграма (а) та фазовий портрет (б) інформаційного 8-QAM-сигналу

Таблиця 1

## Правила модуляції трибітів інформаційного сигналу

Трибіт	Значення фази та складових амплітуди сигналу		
	$\varphi$	$A_I$	$A_Q$
1, 1, 1	$\pi/4$	0,39	0,39
1, 1, 0	$5\pi/12$	0,39	0,92
0, 1, 0	$3\pi/4$	-0,39	0,39
0, 1, 1	$11\pi/12$	-0,92	0,39
0, 0, 1	$5\pi/4$	-0,39	-0,39
1, 0, 0	$17\pi/12$	-0,39	-0,92
0, 0, 0	$7\pi/4$	0,39	-0,39
1, 0, 1	$23\pi/12$	0,92	-0,39

Сформований сигнал було надіслано у канал зв'язку для подальшого дослідження можливостей його детектування детектором на базі ФАПЧ.

**Побудова імітаційної моделі**

Створення та перевірку адекватності імітаційної моделі системи зв'язку з використанням фазового детектора та петлі ФАПЧ засобами програмного забезпечення Matlab було деталь-

но описано у [8, 9]. Нами для проведення досліджень було побудовано аналогічну імітаційну модель, проте без використання модифікованого детектора (рис. 5). Модель складається з наступних компонентів:

- джерело сигналу, яке транслює модульований сигнал, сформований за допомогою імітаційного моделювання;
- канал зв'язку, в якому можна змінювати значення потужності шуму, що накладається на сигнал під час проходження його через канал;
- детектор, побудований на основі пристрою автоматичного підстроювання частоти.

У фільтрі петлі ФАПЧ реалізовано можливість зміни його параметрів, зокрема інерційності фільтра  $T_f$  та коефіцієнта пропорційності  $m$ . Дослідження проводилось за частоти вхідного сигналу  $f_0 = 1000$  Гц, а смугу утримання петлі ФАПЧ було встановлено у чотири рази більшою, тобто  $\Omega_y = 4000$  Гц.

Потужність одного біту вхідного сигналу встановлено  $P_i = 0,001$  Вт.

Шум, що діє в каналі зв'язку, є адитивним гаусовим шумом з можливістю зміни значення його потужності та, відповідно, відношення сигнал/шум у каналі.

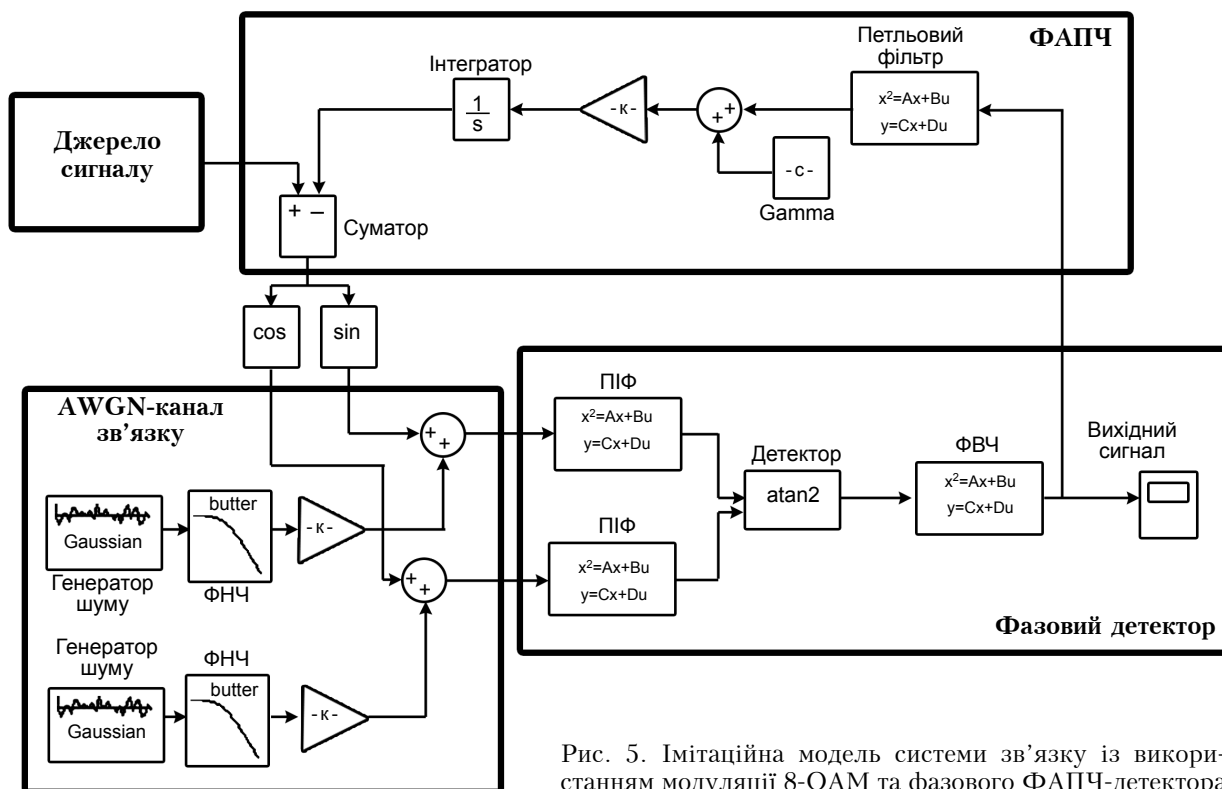


Рис. 5. Імітаційна модель системи зв'язку із використанням модуляції 8-QAM та фазового ФАПЧ-детектора

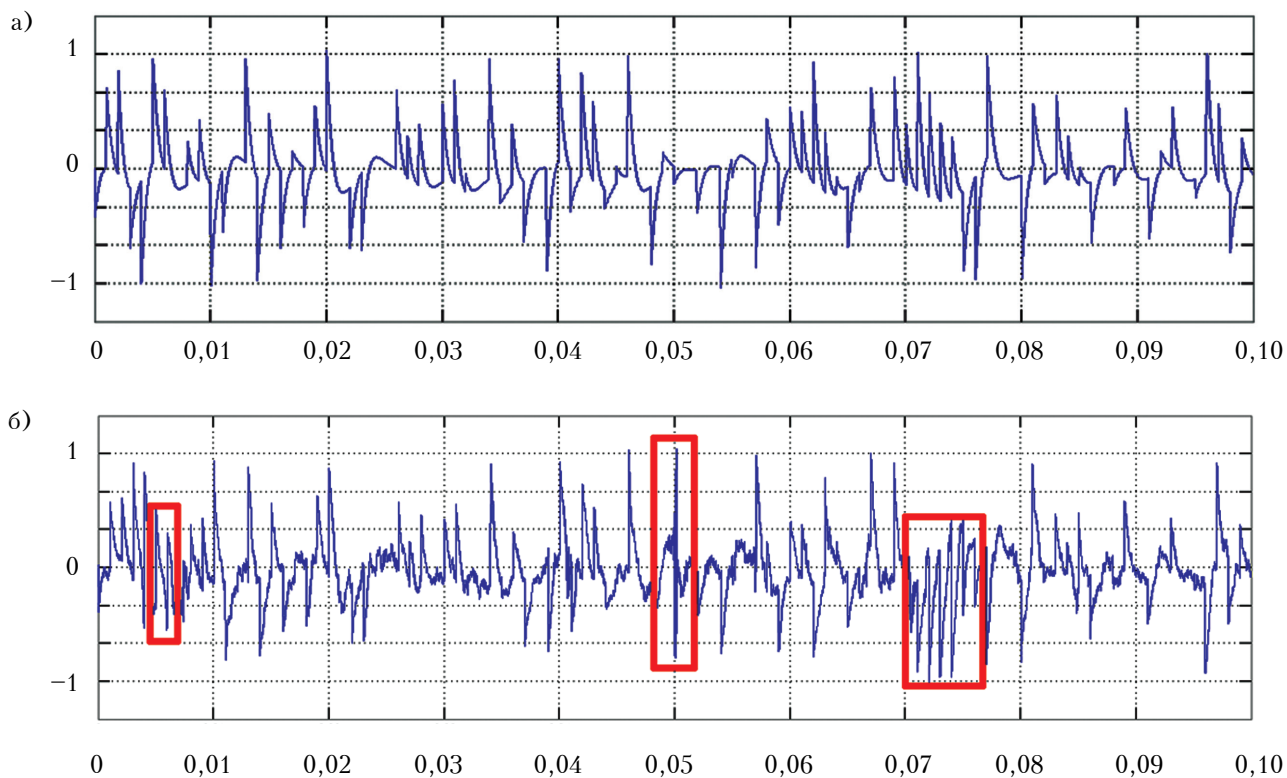


Рис. 6. Сигнал на виході детектора без впливу шуму (а) та сигнал за потужності шуму, яка призводить до порогового ефекту (б)  
(на б рамками виділені ділянки, де спостерігається пороговий ефект)

## Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження було проведено за наступною методикою: змінюючи потужність адитивного шуму в каналі зв'язку при заданих параметрах фільтра петлі ФАПЧ, знаходили таке її значення, за якого у каналі зв'язку спостерігається пороговий ефект, тобто під час детектування відбувається зрив стеження за фазою сигналу. При цьому у деяких місцях було неможливо визначити значення фази через аномальні стрибки, а у інших величина фази сигналу набувала протилежного значення. Для цих випадків були проведені повторні дослідження за інших параметрів фільтра.

На рис. 6, а зображено часову діаграму сигналу на виході детектора без завади у каналі зв'язку, а на рис. 6, б — діаграму цього ж сигналу після проходження через канал зв'язку з потужною адитивною завадою, де у центрі видно зрив стеження за фазою сигналу, тобто появу порогового ефекту.

Шляхом ітерації параметрів фільтра петлі, а саме сталої часу  $T_f$  та коефіцієнта пропорційності  $m$ , було визначено граничну потужність шуму  $P_N$ , за якої настає пороговий ефект.

Оскільки шум у каналі є адитивним гаусовим шумом, на кожен біт інформаційного сигналу припадає потужність  $N_0 = 0,00001P_N$ . Звідси було розраховано відношення сигнал/шум (SNR), за якого настав пороговий ефект у каналі зв'язку:  $SNR = 10 \lg(P_N/N_0)$ . Результати представлено у табл. 2. Тут видно, що найбільш стійкою до завад є конфігурація фільтра з параметрами  $T_f = 0,1$  с та  $m = 0,1$ .

Таблиця 2

Значення порогової потужності шуму та відношення сигнал/шум, отримані за різних значень параметрів фільтра петлі

$m$	$P_N$ (Вт) та SNR (дБ) за величини $T_f$ :			
	0,1 с	0,3 с	0,5 с	0,7 с
0,1	13,3 Вт; 8,76 дБ	13,2; 8,79	12,5; 9,03	12,9; 8,89
0,3	12,3 Вт; 9,1 дБ	12,6; 9,0	12,5; 9,03	12,6; 9,0
0,5	12,4 Вт; 9,07 дБ	12,4; 9,07	12,4; 9,07	12,4; 9,07
0,7	12,5 Вт; 9,03 дБ	12,3; 9,1	12,3; 9,1	12,3; 9,1

## Висновки

Проведені дослідження процесу детектування 8-QAM сигналів фазовим детектором, побудованим на базі ФАПЧ, за умови дії завади великої потужності в каналі зв'язку показали, що використання рекомендованих параметрів дозволяють досягнути виграша завадостійкості у порівнянні з класичним ФАПЧ більш ніж 1,3 дБ. Отримані параметри можна застосувати як орієнтовні під час проектування реальних детекторів сигналів зі складною фазовою та амплітудно-фазовою модуляцією.

У подальших дослідженнях планується проаналізувати ефективність запропонованого методу щодо детектування сигналів з іншими складними видами амплітудно-фазової модуляції.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Rajesh M. N., Shrisha B. K., Rao Nishith, Kumaraswamy H. V. An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation // Proc. of 2016 IEEE Int. Conf. on Recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT). — 2016. — P. 241–245. — <http://dx.doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807820>
2. Seimeni M. A., Gkonis P. K., Kaklamani D. I. et al. On BER evaluation of a Regional Anti-Jamming Subcarrier strategy for MIMO-OFDMA systems // Proc. of 9<sup>th</sup> European conf. on antennas and propagation (EuCAP). — 2015. — P. 1–5.
3. Best R. E. Phase-locked loops: Design, simulation, and applications. — New-York: McGraw-Hill Education, 2007.
4. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. — Москва: Сов. радио, 1977.
5. Пат. України на винахід № 66435. Пристрій фазового автопідстроювання частоти // А. П. Бондарев, М. С. Мартинів. — 2004. — Бюл. № 5.
6. Bondarev A., Maksymiv I., Maksymyuk T. Method of improving the power efficiency of QPSK signals // Proc. of 13<sup>th</sup> Int. conf. on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. — Slavske, Ukraine. — 2016. — <http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452028>
7. Mathuranathan Viswanathan. Digital Modulations using MATLAB. Building Simulation Models from Scratch. — India, Pilani, 2017.
8. Бондарев А. П., Максимів І. П. Шляхи значного підвищення завадостійкості у системах коміркового зв'язку // Вісник НУ «ЛП», сер. «Радіоелектроніка та телекомунікації». — 2012. — С. 173–177.
9. Bondarev A., Maksymiv I. Method of improvement of quality indexes of detecting in cellular communication systems // Electronics and electrical engineering. — Kaunas, 2012. — N 10. — P. 85–88. — <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3070>

Дата надходження рукопису  
в редакцію 19.09 2018 р.

И. П. МАКСЫМИВ, С. И. АЛТУНИН, А. П. БОНДАРЕВ, И. В. ГОРБАТЫЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»  
E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ СО СЛОЖНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Приведены результаты исследования влияния параметров детектора, реализованного на базе устройства фазовой автоподстройки частоты, на его эффективность. Проведено математическое модели-



рование сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией 8-QAM и исследовано влияние параметров устройства фазовой автоподстройки частоты на качество приема этих сигналов в условиях действия помехи в канале связи. Установлены наиболее приемлемые параметры, обеспечивающие максимальную помехоустойчивость системы связи, использующей сложные виды фазовой модуляции сигналов.

Ключевые слова: 8-QAM, фазовый детектор, ФАПЧ, помехоустойчивость.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.24  
UDC 621.372

I. P. MAKSYMIV, S. I. ALTUNIN,  
A. P. BONDARIEV, I. V. HORBATYI

Ukraine, Lviv Polytechnic National University  
E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## THE INFLUENCE OF DETECTOR'S PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF RADIO SIGNALS WITH COMPLEX PHASE MODULATION RECEIVING

The paper presents the results of simulation of a detector, implemented on the basis of a phase locked loop device (PLL), the mathematical modeling of signals with 8-QAM modulation, and investigates the influence of PLL parameters on the receiving quality of these signals with the interference in the communication channel. As a result of the study, the optimal parameters were found to provide the maximum noise-immunity for the communication system, which uses complex types of signals phase modulation.

Two methods of signal detector composition were considered and compared in terms of noise-immunity. The first one is classic detector based on PLL synchronization and the second one – modified detector with specific additional filters. Modified detector was chosen for maintaining the further experiments due to its potential higher noise-immunity.

The second part of the work was dedicated to the research of detection efficiency of modified detector using complex phase modulated signal 8-QAM. The simulation of this signal and the model adequacy check were carried out using Matlab software. The next step was the research of influence of filter parameters on the modified detector's noise-immunity during the 8-QAM signal detection.

The results of simulation show the optimum parameters at which the maximum noise-immunity of phase detector was achieved. These parameters may be useful for further researches or for the process of phase detector design.

Keywords: 8-QAM, phase detector, PLL, noise immunity.

### REFERENCES

1. Rajesh M. N., Shrisha B. K., Rao Nishith, Kumaraswamy H. V. An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation. *Proc. of 2016 IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 241–245. <http://dx.doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807820>
2. Seimeni M. A., Gkonis P. K., Kaklamani D. I. et al. On BER evaluation of a Regional Anti-Jamming Subcarrier strategy for MIMO-OFDMA systems. *Proc. of 9<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1–5.
3. Best R. E. *Phase-Locked Loops: Design, Simulation and Applications*. New-York, McGraw-Hill Education, 2007.
4. Tikhonov V. I., Mironov M. A. *Markovskie protsessy* [Markov processes]. Moscow, Sov. radio, 1977. (Rus)
5. Bondariev A. P., Martyniv M. S. Patent 66435 UA. [Frequency phase auto-adjustment device]. 2004, bull. No. 5.
6. Bondarev A., Maksymiv I., Maksymyuk T. Method of improving the power efficiency of QPSK signals. *Proc. of 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Slavske, Ukraine, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452028>
7. Mathuranathan Viswanathan. *Digital Modulations using MATLAB. Building Simulation Models from Scratch*. India, Pilani, 2017.
8. Bondariev A. P., Maksymiv I. P. [Ways of significant increase of noise immunity in cellular communication systems]. *Radio Electronics and Telecommunication*, Lviv Polytechnic National University, 2012, pp. 173–177. (Ukr)
9. Bondariev A., Maksymiv I. Method of improvement of quality indexes of detecting in cellular communication systems. *Electronics and Electrical Engineering*, Kaunas, 2012, no. 10, pp. 85–88. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3070>

### Опис статті для цитування:

Максимів І. П., Алтунін С. І., Бондарев А. П., Горбатий І. В. Вплив параметрів детектора на ефективність приймання радіосигналів зі складною фазовою модуляцією. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 5-6, с. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.24>

### Cite the article as:

Maksymiv I. P., Altunin S. I., Bondariev A. P., Horbatyi I. V. The influence of detector's parameters on the efficiency of radio signals with complex phase modulation receiving. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.24>