

УДК 621.376.4+004.353.242

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.023136

Т. В. МЕЛЕШКО<sup>1</sup>, здобувач;М. Ю. НЕВГОД<sup>2</sup>, аспірант,<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup> Державний університет телекомунікацій, Київ

## МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАЗОВОЇ ПОМИЛКИ СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ КОГЕРЕНТНОГО ДЕМОДУЛЯТОРА НА ЙМОВІРНІСТІ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ СИГНАЛІВ ІЗ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

У статті розв'язується нове актуальне наукове завдання щодо оцінювання впливу фазової помилки системи синхронізації когерентного демодулятора на завадозахищеність сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією (БФМ). Як критерій оцінювання завадозахищеності когерентного приймання сигналів із багатопозиційною фазовою модуляцією за наявності фазової помилки запропоновано ймовірність біткової помилки. Розроблено та подано модель оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірність біткової помилки сигналів із БФМ. Розглядувану модель засновано на ймовірнісних характеристиках появи біткової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією відносно прийнятого рівня фазової помилки когерентного демодулятора за різних значень відношень сигнал/шум на вході когерентного приймача для сигналів із різною позиційністю.

Результати оцінювання ймовірнісних характеристик появи біткової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією за наявності фазової помилки когерентного демодулятора показали, що зі збільшенням позиційності сигналу з БФМ вплив статичних та випадкових помилок системи синхронізації на ймовірність біткових помилок зростає. У разі великих відношень сигнал/шум незначна помилка оцінювання фази, від  $\pi/180$  до  $\pi/90$ , призводить до значного збільшення ймовірності біткових помилок. Під час випадкових флуктуацій фази для сигналів з  $M \geq 4$ , коли дисперсія  $D_\varphi$  змінюється від 0 до 0,01, ймовірність помилки може бути змінено на один-два порядки. Здобуті результати дають змогу дійти висновку, що під час приймання сигналів із БФМ допустиме значення похибки оцінювання фази частоти-носія залежить від позиційності  $M$  і змінюється від  $\pi/36 - \pi/72$  для 2-ФМ до  $\pi/180$  для 32-ФМ.

**Ключові слова:** багатопозиційна фазова маніпуляція; завадозахищеність дискретних сигналів; нефлуктаційні завади; фазова помилка системи синхронізації.

### ВСТУП

Технологія передавання сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією (БФМ) посідає одне з чільних місць у різноманітні технології цифрового передавання сигналів, що використовуються в сучасних телекомунікаційних мережах. Цифровий сигнал, заснований на багатопозиційній фазовій маніпуляції здатен на високому рівні задовольнити сучасні енергетичні та спектральні вимоги і на противагу іншим видам дискретних сигналів передавання даних забезпечують відносно високу пропускну здатність каналів та завадозахищеність вхідних пристроїв телекомунікаційних мереж (ТКМ) за умов впливу складних завад. Сферою виняткового застосування сигналів на базі технології БФМ є супутникові лінії зв'язку, системи цифрового телебачення формату DVB-S і DVB-S2/S2X, безпроводові та стільникові мережі зв'язку [1].

Під час проведення досліджень щодо вдосконалення процесу передавання сигналів на базі технології БФМ одним із важливих завдань є дослідження впливу зовнішніх та внутрішніх завад, перешкод і збурень на безпосередній перебіг приймання та оброблення вхідного сигналу. Одним із таких процесів, пов'язаних із прийманням та демодуляцією вхідного цифрового сигналу на базі технології БФМ, є його синхронізація з опорним сигналом для подальшого оброблення та демодуляції. Є очевидним, що весь спектр зовнішніх та внутрішніх збурень через вплив на вхідний сигнал та пристрій демодуляції негативно впливає на параметри демодульованого сигналу [2].

Стосовно ефективності синхронізації, то такий вплив буде даватися взнаки певним зміщенням частоти як вхідного, так і опорного вхідного сигналу. Отже, постає проблема появи фазової похибки та пов'язаної з нею похибки демодуляції сигналу, які спричиняють зростання ймовірності біткової помилки, безпосередньо пов'язаної із завадостійкістю приймання вхідного сигналу [3; 4]. Потрібно взяти до уваги, що на цьому етапі знайшли застосування сигнали на базі технології БФМ із різною позиційністю, від ФМ-2 до ФМ-16 і ФМ-32. Є очевидним, що застосування сигналів із БФМ з різними позиційностями на фоні їх переваг та недоліків буде мати також і певні відмінності щодо формування фазової помилки та зумовленим нею зростанням ймовірності біткової помилки сигналу на базі БФМ [2].

Це вимагає проведення певних досліджень, спрямованих на оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірність біткової помилки, безпосередньо пов'язаної із завадостійкістю приймання сигналів із БФМ.

© Т. В. Мелешко, М. Ю. Невгод, 2023

Питання оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на завадостійкість приймання сигналів із БФМ достатньо широко досліджувались у працях [5–8].

У статті [5] проаналізовано основні види багатопозиційних сигналів, які застосовуються в системах широкосмугового радіодоступу. Проведено оцінювання їх спектральної та енергетичної ефективності. Визначено види перешкод та завад, що можуть вплинути на ефективність передавання сигналу з БФМ та зазначено їх вплив на завадостійкість. Оцінювання впливу різних завад та перешкод, а також безпосередньо фазової помилки на загальну завадозахищеність сигналів із БФМ у цій статті не розглядалося.

Статтю [6] присвячено розробленню математичних моделей каналу зв'язку із сигналами OFDM та навмисними завадами. Відносно завад, тут було запропоновано аналітичні залежності для розрахунку пропускної здатності за умов їх впливу. Вплив завад різного характеру безпосередньо на завадозахищеність сигналів із БФМ в цій роботі не досліджувалося.

У [7] подано математичну модель багатоканального дискретно-неперервного каналу зв'язку за умов впливу флукуційного шуму та навмисних завад. Визначено, що зазначені шуми та завади впливають на завадозахищеність дискретних сигналів. Проте оцінювання впливу таких завад на завадозахищеність у статті не розглядалося.

Праці [7; 8] присвячено розгляду нефлукуційних завад, у переліку яких подано фазову помилку, на завадозахищеність дискретних сигналів. Безпосередньо оцінювання впливу фазової помилки тут не досліджувалося.

Аналіз розглянутих джерел показав, що через виявлені в них невідповідності та недоліки зазначені праці не можуть бути використані для проведення оцінювання впливу похибки синхронізації на ймовірність бітової помилки під час приймання сигналу на базі технології БФМ.

Отже, формується нове актуальне наукове завдання, щодо оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на завадостійкість приймання сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

**Метою статті** є підвищення ефективності приймання цифрових сигналів на базі технології БФМ за умови впливу помилки синхронізації вхідного сигналу.

Для досягнення мети потрібно:

- розробити модель оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірність бітової помилки сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією;
- методами математичного моделювання оцінити дію впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірність бітової помилки сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

У ТКМ для приймання сигналів із БФМ використовуються два методи – когерентний (багатоканальний або квадратурний) та некогерентний автокореляційний [1; 2]. Структурна схема когерентного демодулятора сигналів із БФМ, що є оптимальним за критерієм максимальної правдоподібності (рис. 1), являє собою багатоканальний корелятор із блоком вибору максимуму [2].

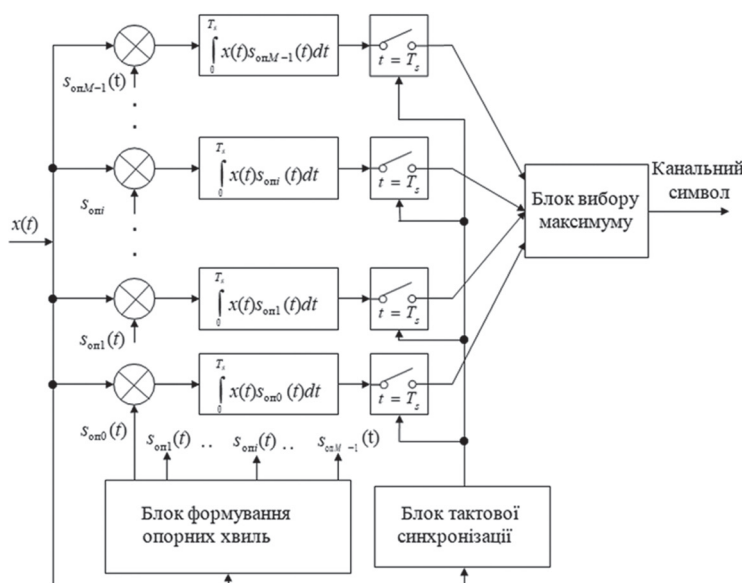


Рис. 1. Структурна схема оптимального когерентного демодулятора сигналів із БФМ

Подана схема оптимального когерентного демодулятора сигналів із БФМ містить  $M$  кореляційних каналів, блок вибору максимуму та елементи системи синхронізації: блок формування опорних коливань та блок тактової синхронізації. Сигнали системи синхронізації, по-перше, використовуються як опорні під час обчислення кореляційних інтегралів і, по-друге, керують роботою інтеграторів зі скиданням, що виконують інтегрування добутку сигналів протягом інтервалу часу.

Однак будь-яка система фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ) має похибки, які призводять до неточностей формування опорних коливань та неточностей фіксування тактових моментів. Ці наближення спричиняють додаткові помилки під час демодуляції сигналу, які можуть значно погіршити ймовірності бітових помилок [10].

У разі досить великого відношення сигнал/шум можна вважати, що розподіл густини ймовірності випадкових флюктуацій фази частоти-носія та тактової частоти на виходах блоків системи синхронізації добре описуються гауссівськими законами розподілу [9; 10].

Відповідно до схеми (див. рис. 1) блок формування опорних сигналів подає гармонічні коливання з частотою-носієм і множиною  $M$  фаз. Після перемноження коливань вхідного сигналу та опорного сигналу сигнал кожного каналу надходить на інтегратор зі скиданням, який виконує інтегрування добутку впродовж інтервалу часу  $T_s$ . Блок вибору максимуму вибирає максимальне значення з сигналів інтеграторів і ухвалює рішення щодо каналного сигналу, а також відповідно про комбінації інформаційних бітів.

Проведемо дослідження впливу похибок системи синхронізації, а саме, блока формування опорних коливань (фаза частоти-носія) та блока тактової синхронізації на завадостійкість когерентного приймача сигналів БФМ.

Для незалежності висновків розрахунки було виконано окремо та під час приймання сигналу на тлі тільки білого гауссівського шуму [2]:

$$x(t) = s_1(t) + n(t).$$

За наявності похибки роботи системи ФАПЧ за фазою частоти-носія опорні сигнали у схемі когерентного приймання БФМ матимуть деяке фазове зміщення  $\varphi_{3M}$  щодо номінальних значень:

$$s_{0ni}(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_{3M}), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0, T_s], \quad i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Інтеграл згортки за умов появи фазового зміщення набере такого вигляду [2; 9]:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt. \quad (1)$$

Після відповідного коригування моделі розрахунку статистичних параметрів розподілу на виходах усіх кореляторів [2; 9] модель середніх значень, взаємних моментів та дисперсій розподілів статистичних параметрів на виходах усіх кореляторів із урахуванням (1) можна подати в наведеному далі вигляді.

◆ Середні значення  $m_0$  і  $m_i$  з огляду на фазове зміщення визначатимуться в такий спосіб:

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle I_0 \rangle = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt = \\ &= \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt = \frac{A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_0 + \varphi_{3M}) dt + \frac{A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos \varphi_{3M} dt = \frac{2E_s}{N_0} \cos \varphi_{3M}. \\ m_i &= \langle I_0 \rangle = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt = \\ &= \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos\left(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt = \frac{A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos\left(2\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt + \frac{A_0^2}{N_0} \int_0^{T_s} \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M} - \varphi_{3M}\right) dt = \\ &= \frac{2E_s}{N_0} \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M} - \varphi_{3M}\right). \end{aligned}$$

◆ Дисперсії обчислюватимуться за виразами

$$\begin{aligned} D_0 &= \langle I_0^2 \rangle - \langle I_0 \rangle^2 = \langle I_0^2 \rangle - m_0^2 = \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1) x(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos(\omega_0 t_2 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ &= \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle s_0(t_1) s_0(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos(\omega_0 t_2 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt_1 dt_2 + \\ &+ \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle n(t_1) n(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos(\omega_0 t_2 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) dt_1 dt_2 - m_0^2 = m_0^2 + \frac{4A_0^2}{N_0^2} \frac{N_0 T_s}{4} - m_0^2 = \frac{2E_s}{N_0}. \end{aligned}$$

$$D_i = \langle I_0^2 \rangle - \langle I_i \rangle^2 = \langle I_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle \cos\left(\omega_0 t_1 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) \cos\left(\omega_0 t_2 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt_1 dt_2 - m_i^2 =$$

$$= m_i^2 + \frac{4A_0^2 N_0 T_s}{N_0^2 4} - m_i^2 = \frac{2E_s}{N_0}.$$

◆ Змішані моменти наберуть такого вигляду:

$$M_{0-i} = \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos\left(\omega_0 t_2 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt_1 dt_2 - m_0 m_i =$$

$$= \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle s_0(t_1)s_0(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos\left(\omega_0 t_2 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt_1 dt_2 +$$

$$+ \frac{4A_0^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle n(t_1)n(t_2) \rangle \cos(\omega_0 t_1 + \varphi_0 + \varphi_{3M}) \cos\left(\omega_0 t_2 + \frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) dt_1 dt_2 - m_0 m_i =$$

$$= m_0 m_i + \frac{4A_0^2 N_0 T_s}{N_0^2 4} \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) - m_0 m_i = \frac{2E_s}{N_0} \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right).$$

◆ Середні значення комбінації кореляційних каналів  $m_{0-i}$  можна подати так:

$$m_{0-i} = m_i - m_0 = \frac{2E_s}{N_0} \cos\varphi_{3M} - \frac{2E_s}{N_0} \cos\left(\frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) = \frac{2E_s}{N_0} \left[ \cos\varphi_{3M} - \cos\left(\frac{i2\pi}{M} + \varphi_{3M}\right) \right] = \frac{4E_s}{N_0} \left[ \sin\frac{i\pi}{M} \sin\left(\varphi_{3M} + \frac{i\pi}{M}\right) \right],$$

◆ Сумарні дисперсії дістанемо з формули

$$D_{0-i} = \frac{4E_s}{N_0} \left( 1 - \cos\frac{i2\pi}{M} \right).$$

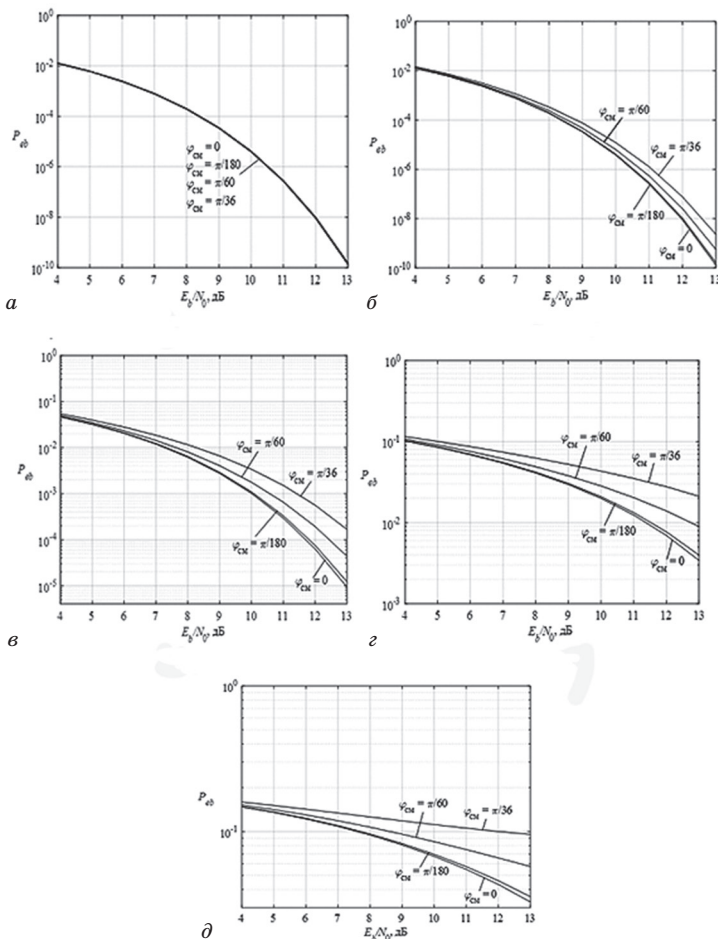


Рис. 2. Залежність імовірності бітової помилки  $P_{eb}$  від ВСП  $E_b/N_0$  під час статичного зміщення фази опорних коливань  $\varphi_{3M}$  для БФМ: а — 2-ФМ; б — 4-ФМ; в — 8-ФМ; з — 16-ФМ; д — 32-ФМ

◆ Умовні за параметром частоти зміщення  $\varphi_{3M}$  імовірності можуть бути обчислені за виразом

$$P_i(I_0 > I_i)|_0 = 1 - \Phi \left\{ \frac{\frac{4E_s}{N_0} \left[ \sin\frac{i\pi}{M} \sin\left(\varphi_{3M} + \frac{i\pi}{M}\right) \right]}{\sqrt{\frac{4E_s}{N_0} \left( 1 - \cos\frac{i2\pi}{M} \right)}} \right\}.$$

Здійснимо розрахунки ймовірності бітових помилок за умови, що  $\varphi_{3M}$  була або постійною величиною (статична помилка), або динамічно змінювалася (випадкові флуктуації).

Моделювання випадкових флуктуацій виконувалося за методом Монте-Карло та вважалося, що помилка оцінювання фази  $\varphi_{3M}$  є гауссівською випадковою величиною з нульовим середнім і дисперсією  $D_\varphi$ , рад<sup>2</sup> [9; 11].

Залежності бітової помилки  $P_{eb}$  від відношення сигнал/шум (ВСП)  $E_b/N_0$  за різних значень зміщення фази опорних коливань щодо номінальної для  $M = 2, 4, 8, 16$  та 32 наведено на рис. 2 (для статичного зміщення фази) та на рис. 3 (для випадкових флуктуацій фази).

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2 та рис. 3, показав, що зі збільшенням позиційності сигналів із БФМ вплив статичних та випадкових помилок оцінювання фази на ймовірність бітових помилок зростає.

Для 2-ФМ при  $P_{eb} = 10^{-3}$  статична помилка оцінювання фази  $\varphi_{3M} = \pi/36$  еквівалентна погіршенню ВСП на 0,04 дБ, а 8-ФМ — уже



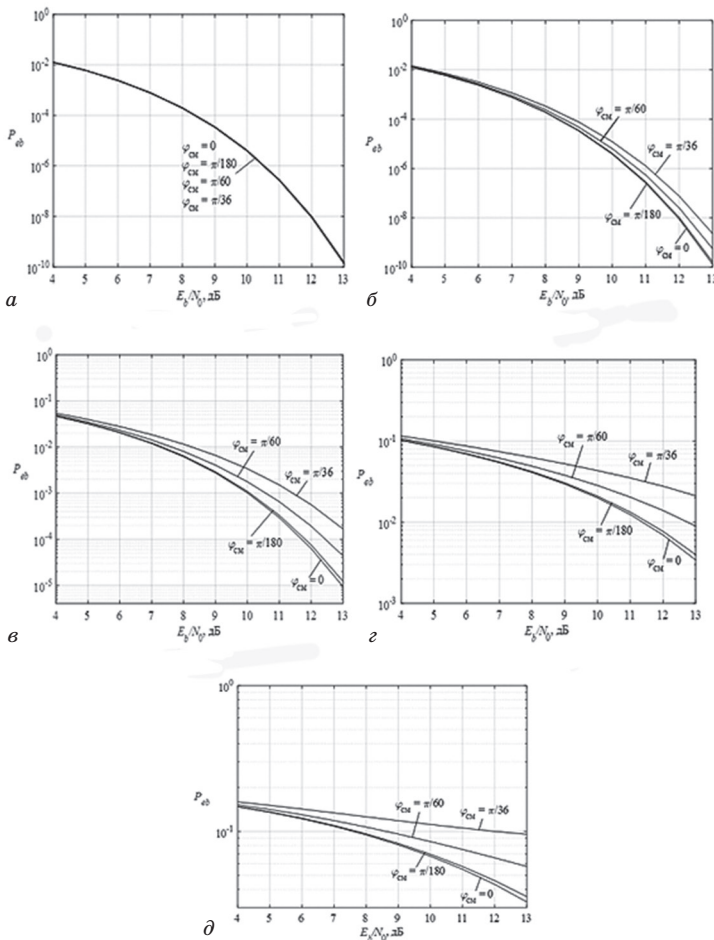


Рис. 3. Залежність імовірності бітової помилки  $P_{об}$  від ВСП  $E_b/N_0$  при випадкових флуктуаціях фази опорних коливань  $D_\phi$  для М-ФМ: а — 2-ФМ; б — 4-ФМ; в — 8-ФМ; г — 16-ФМ; д — 32-ФМ

Здобуті результати дають можливість стверджувати, що під час приймання сигналів із БФМ допустиме значення похибки оцінювання фази частоти-носія залежить від позиційності  $M$  і змінюється від  $\pi/36 - \pi/72$  для 2-ФМ до  $\pi/180$  для 32-ФМ.

### ВИСНОВКИ

У статті розв’язується нове актуальне наукове завдання щодо оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на завадозахищеність сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

1. Визначено критерій оцінювання завадозахищеності когерентного приймання сигналів із багатопозиційною фазовою модуляцією за наявності фазової помилки. Як зазначений критерій у статті запропоновано ймовірність бітової помилки.

2. Розроблено та подано модель оцінювання впливу похибки системи синхронізації когерентного демодулятора на ймовірності бітової помилки сигналів із багатопозиційною фазовою маніпуляцією.

Подану модель засновано на ймовірнісних характеристиках появи бітової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією відносно прийнятого рівня фазової помилки когерентного демодулятора для різних значень відношення сигнал/шум на вході когерентного приймача.

3. Результати оцінювання ймовірнісних характеристик появи бітової помилки сигналу з багатопозиційною фазовою модуляцією за наявності фазової помилки когерентного демодулятора показали, що зі збільшенням позиційності сигналу з БФМ вплив статичних та випадкових помилок системи синхронізації на ймовірність бітових помилок зростає.

на 1,4 дБ. Слід зауважити, що в разі великих відношень ВСП  $E_b/N_0$  навіть мала помилка оцінювання фази ( $\pi/180 - \pi/90$ ) призводить до істотного збільшення ймовірності бітових помилок у системах передавання даних, що використовують БФМ високого порядку. Під час випадкових флуктуаціях фази для сигналів із  $M \geq 4$ , коли дисперсія  $D_\phi$  змінюється від 0 до 0,01, ймовірність помилки може бути змінена на один-два порядки.

Цей висновок підтверджують залежності, зображені на рис. 4 та рис. 5

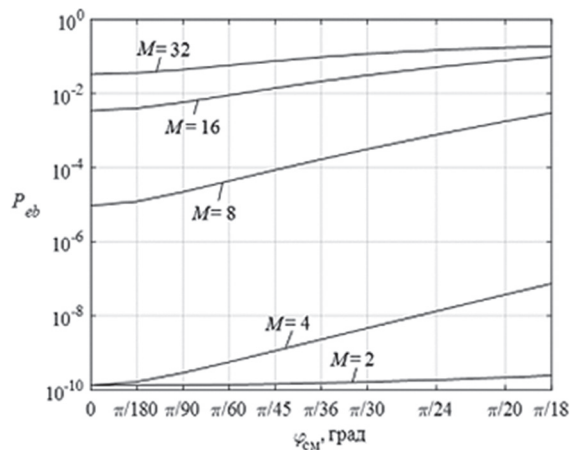


Рис. 4. Залежність імовірності бітової помилки  $P_{об}$  від статичного фазового зміщення опорних сигналів  $\phi_{cm}$

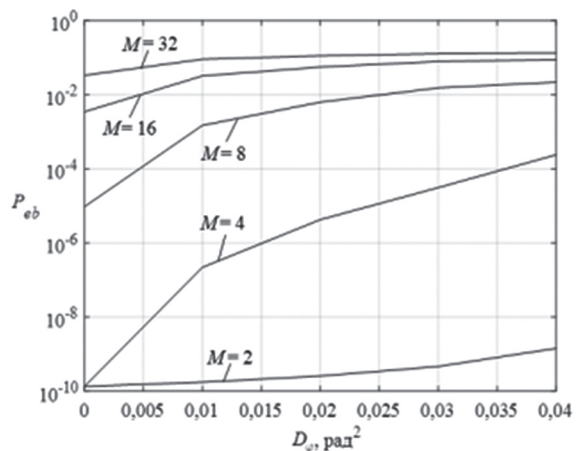


Рис. 5. Залежність імовірності бітової помилки  $P_{об}$  від дисперсії флуктуацій фази опорних сигналів  $D_\phi$

За великих співвідношень сигнал/шум незначна помилка оцінювання фази, від  $\pi/180$  до  $\pi/90$ , зумовлює значне збільшення ймовірності бітових помилок. При випадкових флуктуаціях фази для сигналів із  $M \geq 4$ , коли дисперсія  $D_\phi$  змінюється від 0 до 0,01, імовірність помилки може бути змінено на один-два порядки.

Здобуті результати дають змогу дійти висновку, що під час приймання сигналів із БФМ допустиме значення похибки оцінювання фази частоти-носія залежить від позиційності  $M$  і змінюється від  $\pi/36 - \pi/72$  для 2-ФМ до  $\pi/180$  для 32-ФМ.

#### Список використаної літератури

1. Системи передавання ширококуговими сигналами / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, Л. М. Ляховецький, В. В. Педаш // Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2012. 336 с.
2. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с.
3. Turovskiy O. L. Estimation of the possibilities of the combined synchronization system with open-link to minimize the dispersion of the phase error when tracking the carrier frequency under the conditions of the influence of additive noise // Technology audit and production reserves. 2020. 3(4). P. 16–22.
4. Designing a system to synchronize the input signal in a telecommunication network under the condition for reducing a transitional component of the phase error / L. Berkman, O. Tkachenko, O. Turovskiy [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №1(9). (109). P. 66–76. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225514>
5. Міночкін Д. А. Аналіз основних видів багатопозиційних сигналів для систем ширококугового радіодоступу // Вісник Хмельн. нац. ун-ту. 2012. №6. С. 184–189.
6. Зайцев С. В. Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами // Математичні машини і системи. 2011. №4. С. 166–175. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83639>.
7. Голь В., Овчаров О. Математична модель багатоканального дискретно-неперервного каналу зв'язку в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад // Information Technology and Security. 2020. Vol. 8. Iss. 1 (14). January-June. P. 67–81.
8. Невгод М. Ю. Мінімізація середньоквадратичної помилки системи синхронізації когерентного демодулятора супутникової телекомунікації при умові обмеження перехідної складової фазової помилки // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. №1(74). С. 19–25.
9. Швець В., Мелешко Т. Оцінювання завадозахищеності когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією при наявності нефлуктуаційних завад // Measuring and computing devices in technological processes. 2023. №2. P. 167–178. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-21>
10. Бойко Ю. М. Оцінювання якісних показників пристроїв синхронізації сигналів засобів телекомунікацій // Вісник Хмельн. нац. ун-ту. 2015. № 1. С. 204–213.
11. Палагін В. В., Палагіна О. А., Зорін О. С. Комп'ютерне моделювання системи обробки шумових сигналів на фоні негаусових завад: зб. наук. пр. Кам'янець-Подільськ. нац. ун-ту // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 16. С. 104–113.

T. Meleshko, M. Nevgod

#### THE MODEL FOR EVALUATING THE INFLUENCE OF THE PHASE ERROR OF THE COHERENT DEMODULATOR SYNCHRONIZATION SYSTEM ON THE BIT ERROR PROBABILITY OF MULTI-POSITION PHASE MANIPULATION SIGNALS

In the article, a new topical scientific task is solved regarding the assessment of the impact of the error of the synchronization system of the coherent demodulator on the immunity of signals with multi-position phase manipulation. The probability of a bit error is proposed in the article as a criterion for evaluating the immunity of coherent reception of signals with multi-position phase modulation in the presence of a phase error. A model for evaluating the effect of the error of the coherent demodulator synchronization system on the bit error probabilities of signals with multi-position phase manipulation is developed and presented. The presented model is based on the probabilistic characteristics of the appearance of a bit error of a signal with multi-positional phase modulation relative to the accepted level of the phase error of the coherent demodulator at different values of the signal-to-noise ratio at the input of the coherent receiver for signals with different positions.

The results of the evaluation of the probability characteristics of the appearance of a bit error in a signal with multi-positional phase modulation in the presence of a phase error of a coherent demodulator showed that with an increase in the positionality of the BFM signal, the influence of static and random errors of the synchronization system on the probability of bit errors increases. At large signal-to-noise ratios, a small phase estimation error, from  $\pi/180$  to  $\pi/90$ , leads to a significant increase in the probability of bit errors. With random phase fluctuations for signals with  $M \geq 4$ , when the variance  $D_\phi$  changes from 0 to 0.01, the error probability can be changed by one or two orders of magnitude. The obtained results allow us to come to the conclusion that during the reception of BFM signals, the permissible value of the carrier phase estimation error depends on the positionality of  $M$  and varies from  $\pi/36 - \pi/72$  for 2-FM to  $\pi/180$  for 32-FM.

**Keywords:** multi-position phase manipulation; interference immunity of discrete signals; non-fluctuation interference; phase error of the synchronization system.