



DOI 10.28925/2663-4023.2026.35.1408

УДК 004.056.5:621.391:621.316.1

Пепа Юрій Володимирович

кандидат технічних наук, доцент

професор кафедри технічних систем кіберзахисту

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-2073-1364

yurka14@ukr.net

Петренко Андрій Борисович

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри кібербезпеки

Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-4793-5474

pab.05@ukr.net

Нафєєв Ровіл Касимович

кандидат фізико-математичних наук, доцент

доцент кафедри інформаційних систем та технологій

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-2721-9718

donrkn@gmail.com

**АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ СИГНАЛІВ
У ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ**

Анотація. У статті розглянуто задачу синтезу адаптивного приймача небезпечних сигналів у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц на об'єкті інформаційної діяльності (ОІД). Показано, що після фільтрації промислової частоти та її гармонік залишкові завади можуть мати негаусівський, імпульсний і багатомодальний характер, внаслідок чого функція правдоподібності виявлювача набуває кількох локальних максимумів. Запропоновано квазіоптимальний підхід до спільного виявлення та оцінювання небезпечного сигналу, який ґрунтується на поданні апостеріорної щільності як зваженої суми парціальних складових, формуванні локальних оцінок інформаційного параметра та байєсівському оновленні вагових коефіцієнтів. Розроблено структурну реалізацію адаптивного приймача з блоками попередньої фільтрації, аналізу завадового середовища, парціальної обробки, сумарного оцінювання та прийняття рішення. Для перевірки підходу виконано імітаційне моделювання за бімодальною гаусівською сумішшю. За ймовірності хибної тривоги запропоновано детектор суміші, який забезпечив ймовірність правильного виявлення в заданих межах, і побудованого за еквівалентною гаусівською моделлю, що дозволило середньоквадратичну похибку оцінювання рівня небезпечного сигналу зменшити приблизно у чотири рази. Отримані результати підтверджують доцільність врахування багатомодальності завад під час проведення спеціальних досліджень (СД) проводових технічних каналів витоку інформації через лінії електроживлення на об'єкті інформаційної діяльності.

Ключові слова: технічний захист інформації; лінія електроживлення; небезпечний сигнал; негаусівська завада; функція правдоподібності; адаптивний приймач; спеціальні дослідження.

ВСТУП

Одним із важливих напрямів технічного захисту інформації (ТЗІ) на об'єктах інформаційної діяльності (ОІД) є виявлення та блокування технічних каналів витоку інформації. До таких каналів належать не лише акустичні, віброакустичні, радіоелектронні та оптичні канали, а також проводові канали, що можуть утворюватися через лінії електроживлення, заземлення, сигналізації, зв'язку та інші інженерні комунікації [1]. Нормативні засади організації ТЗІ та проведення відповідних робіт на ОІД визначаються національними стандартами і нормативними документами системи ТЗІ [2–5].



Лінія електроживлення 220 В, 50 Гц є складним електромагнітним середовищем, у якому одночасно присутні основна гармоніка промислової частоти (50 Гц), вищі гармоніки, імпульсні комутаційні завади, відбуваються перехідні процеси, наведення від суміжного обладнання та побічні електричні сигнали, що можуть виникати внаслідок роботи технічних засобів обробки інформації. Для низьковольтних мереж характерні нестационарність, вузькосмугові завади та наявність імпульсних складових, тому припущення про адитивний «білий» гаусівський шум часто є недоречним [6–9].

Постановка проблеми. Небезпечні сигнали у провідних лініях, як правило, мають малу амплітуду та спостерігаються на фоні значно потужнішої завади. Нелінійні навантаження, імпульсні джерела живлення, комутаційні пристрої та перетворювачі напруги формують розподіли з важкими «хвостами», імпульсністю або кількома модами. За таких умов функція правдоподібності виявлювача небезпечних сигналів може мати кілька локальних максимумів, а алгоритм, орієнтований на єдину гаусівську моду, може сформувати зміщену оцінку параметра або хибне рішення щодо наявності небезпечного сигналу. Отже, необхідним є такий приймач, який адаптує статистичну модель до реального завадового середовища та враховує кілька локальних гіпотез щодо параметрів сигналу.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [6] систематизовано особливості передавання сигналів електричними мережами та показано, що статистичні характеристики завад у таких каналах істотно відрізняються від класичної моделі «білого» гаусівського шуму. Для ліній електроживлення характерними є імпульсні складові, вузькосмугові завади, гармонічні компоненти та зміни параметрів шумового середовища в часі. У [7] запропоновано багатопорогову обробку імпульсних завад, що підтверджує доцільність адаптивної реакції приймача на невідомі параметри завад. Робота [8] присвячена стійкій синхронізації сигналів за наявності сильних негаусівських і вузькосмугових завад. У [9] порівняно моделі Міддлтона класу А та марковську модель Міддлтона для імпульсного шуму та показано, що імпульсність і часова залежність завад суттєво впливають на характеристики приймання.

Для оброблення негаусівських і нестационарних процесів у [10] використано суміш нормальних розподілів і байєсівське оцінювання за максимумом апостеріорної ймовірності під час виділення гармонічних сигналів. Адаптивне моделювання невідомої багатомодальної щільності за допомогою суміші гаусівських компонентів розвинено в роботах [11, 12]. Такий підхід дозволяє враховувати наявність декількох статистичних станів завадового середовища та уточнювати їх параметри в процесі оброблення сигналу. Експериментальні дослідження низьковольтних мереж, наведені у [13], також підтверджують імпульсний, кластерний і тривало залежний характер завад.

Разом з тим зазначені роботи переважно орієнтовані на задачі передавання даних, фільтрації, синхронізації або оцінювання параметрів сигналів. Питання спільного адаптивного оцінювання та виявлення слабких інформаційно небезпечних складових у лініях електроживлення 220 В, 50 Гц під час проведення СД на ОІД з урахуванням багатомодальної функції правдоподібності залишаються недостатньо опрацьованими. Це зумовлює необхідність розроблення підходу, який дозволяє одночасно враховувати декілька локальних гіпотез щодо параметрів небезпечного сигналу та адаптивно змінювати їх вагу залежно від поточного стану завадового середовища.

Мета статті – синтез квазіоптимального алгоритму адаптивного приймання та виявлення небезпечних сигналів у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц за умов дії негаусівських завад і багатомодального характеру функції правдоподібності.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати особливості формування завад у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц на ОІД;
2. Сформулювати математичну модель спостереження небезпечного сигналу в адитивній суміші з негаусівською завадою;
3. Обґрунтувати представлення функції правдоподібності у вигляді суми парціальних складових;
4. Синтезувати квазіоптимальний алгоритм спільного виявлення та оцінювання небезпечного сигналу;
5. Провести імітаційне моделювання та порівняти запропонований алгоритм із детектором, який працює за еквівалентною гаусівською моделлю;
6. Запропонувати структурну реалізацію адаптивного приймача для контролю провідного каналу витоку інформації через лінію електроживлення.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Математична модель завадового середовища. Класична статистична теорія виявлення та оцінювання параметрів сигналів ґрунтується на функції правдоподібності та байєсівських або максимально правдоподібних оцінках [14–18]. Для адаптивної обробки за апіорної невизначеності



доцільно застосовувати рекурсивні та сумішеві моделі [11, 12, 19]. Для провідної лінії 220 В, 50 Гц реальну заваду представимо сукупністю кількох фізично різних компонентів:

$$\xi(t) = u_{50}(t) + u_h(t) + u_i(t) + u_c(t) + n(t), \quad (1)$$

де $u_{50}(t)$ – складова промислової частоти 50 Гц; $u_h(t)$ – сукупність вищих гармонік; $u_i(t)$ – імпульсні комутаційні завади; $u_c(t)$ – корельовані наведення від інших технічних засобів; $n(t)$ – випадкова шумова складова.

Після попередньої фільтрації основної гармоніки та найбільш потужних гармонічних складових залишкова завада може зберігати негаусівський характер. Особливо це проявляється за наявності імпульсних завад, нелінійних спотворень або наведень із вираженою кореляційною структурою. Теоретичні основи негаусівських моделей, зокрема класу Міддлтона та α -стабільних розподілів, наведено в [20, 21].

Математична модель спостереження. Нехай на вхід приймального пристрою, підключеного до лінії електроживлення 220 В, 50 Гц через узгоджувальний, фільтрувальний і гальванічно розв'язаний вимірювальний тракт, у дискретні моменти часу t_k надходять вибірки сигналу:

$$y_k = s(t_k, \lambda_k) + u_{50}(t_k) + \xi_k, \quad (2)$$

де y_k – відлік спостережуваного сигналу; $s(t_k, \lambda_k)$ – небезпечний сигнал або інформаційне наведення, що підлягає виявленню; λ_k – інформаційний параметр сигналу; $u_{50}(t_k)$ – складова промислової частоти 50 Гц та її гармоніки; ξ_k – залишкова негаусівська завада; $t_k = kT_0$, причому T_0 – інтервал дискретизації.

Після придушення основної гармоніки 50 Гц і найбільш інтенсивних гармонічних складових модель набуває наступного вигляду:

$$y_k = s(t_k, \lambda_k) + n_k, \quad (3)$$

де n_k – еквівалентна залишкова завада, що враховує імпульсні, корельовані та випадкові складові.

Інформаційний параметр λ_k може характеризувати амплітуду, фазу, частоту, спектральну складову або інший параметр небезпечного сигналу. Для задач СД практично значущими є випадки, коли параметр λ_k пов'язаний із рівнем наведення, спектральною ознакою або коефіцієнтом модуляції побічного сигналу.

Для узагальнення припустимо, що параметр λ_k змінюється відповідно до марковської моделі:

$$p(\lambda_k | \lambda_{k-1}) = W(\lambda_k, \lambda_{k-1}), \quad (4)$$

де $W(\lambda_k, \lambda_{k-1})$ – перехідна щільність імовірності інформаційного параметра.

Тоді задача приймання полягає у визначенні на основі спостережень $Y_k = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ апостеріорної щільності:

$$p(\lambda_k | Y_k), \quad (5)$$

а також у формуванні рішення щодо наявності або відсутності небезпечного сигналу в лінії електроживлення.

Багатомодальний характер функції правдоподібності. Функція правдоподібності спостереження y_k при заданому значенні параметра λ_k має наступний вигляд:

$$L(y_k | \lambda_k) = p(y_k | \lambda_k). \quad (6)$$

Якщо завада n_k є гаусівською з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ_n^2 , то функція правдоподібності має одномодальний характер:

$$p(y_k | \lambda_k) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \right] \cdot \exp \left\{ -\frac{[y_k - s(t_k, \lambda_k)]^2}{2\sigma_n^2} \right\}. \quad (7)$$

На рис. 1 покажемо щільність розподілу в лінії електроживлення, причому по осі n наведено значення завади, а по осі $p(n)$ – щільність імовірності.

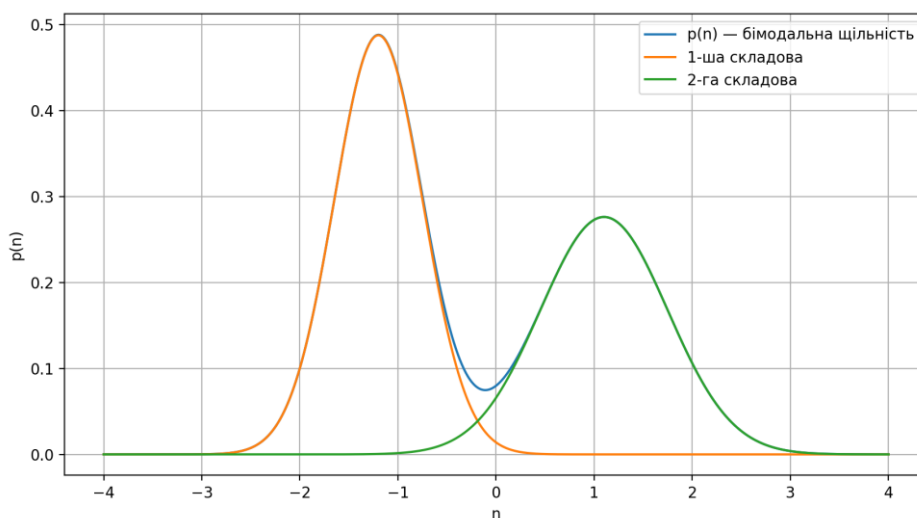


Рис. 1. Приклад бімодальної щільності розподілу завади в лінії електроживлення 220 В, 50 Гц: $\alpha = 0,55$; $m_1 = -1,2$; $m_2 = 1,1$; $\sigma_1 = 0,45$; $\sigma_2 = 0,65$

Два виражені максимуми (рис. 1) показують, що залишкова завада має негаусівський бімодальний характер; відповідно, за певних параметрів сигналу функція правдоподібності може формувати кілька локальних максимумів.

Якщо залишкова завада має бімодальний характер, її щільність подамо як суміш двох нормальних розподілів:

$$p(n_k) = \alpha \cdot N(m_1, \sigma_1^2) + (1 - \alpha) \cdot N(m_2, \sigma_2^2), \quad (8)$$

де α – ваговий коефіцієнт першої моди; m_1, m_2 – математичні сподівання компонентів завади; σ_1^2, σ_2^2 – дисперсії компонентів завади.

У загальному випадку мультимодальна завада описується сумішевою моделлю:

$$p(n_k) = \sum_{j=1}^J \alpha_j p_j(n_k); \quad \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1, \quad (9)$$

де J – кількість мод завадового розподілу; α_j – ваговий коефіцієнт j -ї моди; $p_j(n_k)$ – парціальна щільність розподілу.

Тоді функція правдоподібності (6) набуває вигляду:

$$L(y_k | \lambda_k) = \sum_{j=1}^J \alpha_j p_j[y_k - s(t_k, \lambda_k)]. \quad (10)$$

З виразу (10) видно, що функція правдоподібності може мати кілька локальних максимумів. У такому випадку використання алгоритму, який орієнтується лише на один максимум, здатне призводити до помилкового виявлення або зміщеного оцінювання параметра λ_k .

Для врахування багатомодального характеру функції правдоподібності область можливих значень інформаційного параметра Λ розіб'ємо на M неперетинних інтервалів:

$$\Lambda = \cup_{i=1}^M \Lambda_i; \quad \Lambda_i \cap \Lambda_j = \emptyset, \quad i \neq j. \quad (11)$$

Кожному інтервалу Λ_i відповідає парціальна складова апостеріорної щільності:

$$p_i(\lambda_k | Y_k) = p(\lambda_k | Y_k, \lambda_k \in \Lambda_i). \quad (12)$$

Тоді повну апостеріорну щільність подамо у вигляді зваженої суми:

$$p(\lambda_k | Y_k) = \sum_{i=1}^M q_i(k) p_i(\lambda_k | Y_k), \quad (13)$$



де $q_i(k)$ – апостеріорна ймовірність того, що інформаційний параметр λ_k належить i -му інтервалу:

$$q_i(k) = P\{\lambda_k \in \Lambda_i \mid Y_k\}; \quad \sum_{i=1}^M q_i(k) = 1. \quad (14)$$

Ширину інтервалів доцільно обирати з урахуванням кореляційних властивостей завади та ширини локальних максимумів функції правдоподібності так, щоб у межах одного інтервалу виникало не більше одного домінуючого локального максимуму.

Синтез квазіоптимального алгоритму оцінювання. Спробуємо сформулювати математичну модель для алгоритму оцінювання рівня небезпечного сигналу.

Припустимо, що для кожного інтервалу Λ_i формується парціальна оцінка інформаційного параметра:

$$\hat{\lambda}_{i,k} = E\{\lambda_k \mid Y_k, \lambda_k \in \Lambda_i\}. \quad (15)$$

Відповідна парціальна дисперсія похибки оцінювання дорівнює:

$$D_{i,k} = E\{(\lambda_k - \hat{\lambda}_{i,k})^2 \mid Y_k, \lambda_k \in \Lambda_i\}. \quad (16)$$

Підсумкова квазіоптимальна оцінка параметра формується як зважена сума парціальних оцінок:

$$\hat{\lambda}_k = \sum_{i=1}^M q_i(k) \hat{\lambda}_{i,k}. \quad (17)$$

Сумарну дисперсію похибки оцінювання визначимо як:

$$D_k = \sum_{i=1}^M q_i(k) [D_{i,k} + (\hat{\lambda}_{i,k} - \hat{\lambda}_k)^2]. \quad (18)$$

Вираз (18) враховує два джерела невизначеності: локальну дисперсію оцінювання в межах кожного інтервалу та розкид між парціальними оцінками.

Оновлення вагових коефіцієнтів виконується за байєсівським правилом:

$$q_i(k) = \frac{q_i(k|k-1) L_i(y_k \mid \hat{\lambda}_{i,k})}{\sum_{r=1}^M q_r(k|k-1) L_i(y_k \mid \hat{\lambda}_{r,k})}, \quad (19)$$

де $q_i(k \mid k-1)$ – прогнозована ймовірність належності параметра i -му інтервалу; $L_i(y_k \mid \hat{\lambda}_{i,k})$ – парціальна функція правдоподібності в межах i -го інтервалу.

Прогнозовану ймовірність будемо визначати з урахуванням марковської моделі зміни параметра:

$$q_i(k \mid k-1) = \sum_{r=1}^M P_{ri} q_r(k-1), \quad (20)$$

де P_{ri} – імовірність переходу інформаційного параметра з інтервалу Λ_r до інтервалу Λ_i .

Для початкового моменту часу вагові коефіцієнти задаються на основі апіорної інформації:

$$q_i(0) = P\{\lambda_0 \in \Lambda_i\}. \quad (21)$$

Якщо апіорна інформація відсутня, використовуємо рівномірний розподіл:

$$q_i(0) = \frac{1}{M}; \quad i = 1, \dots, M. \quad (22)$$

Алгоритм прийняття рішення щодо наявності небезпечного сигналу. Для задачі виявлення небезпечного сигналу в лінії електроживлення розглянемо дві гіпотези:

$$H_0: y_k = n_k; \quad (23)$$

$$H_1: y_k = s(t_k, \lambda_k) + n_k. \quad (24)$$

Гіпотеза H_0 відповідає відсутності небезпечного сигналу, а гіпотеза H_1 – його наявності.

Відношення правдоподібності для прийняття рішення запишемо у вигляді:

$$\Lambda(Y_k) = \frac{p(Y_k | H_1)}{p(Y_k | H_0)}. \quad (25)$$

З урахуванням парціального представлення функції правдоподібності:

$$p(Y_k | H_1) = \sum_{i=1}^M q_i(k) p_i(Y_k | H_1), \quad (26)$$

де $p_i(Y_k | H_1)$ – парціальна правдоподібність наявності небезпечного сигналу в i -му інтервалі параметрів.
Рішення приймається за наступним правилом:

$$\Lambda(Y_k) \geq \gamma. \quad (27)$$

Якщо $\Lambda(Y_k) > \gamma$, то приймається рішення про наявність небезпечного сигналу в лінії електроживлення, якщо $\Lambda(Y_k) \leq \gamma$, тоді приймається рішення про відсутність небезпечного сигналу або про недостатність статистичних підстав для його виявлення.

Побудуємо синтезовану структурну схему адаптивного приймача небезпечних сигналів, яка показана на рис. 2.

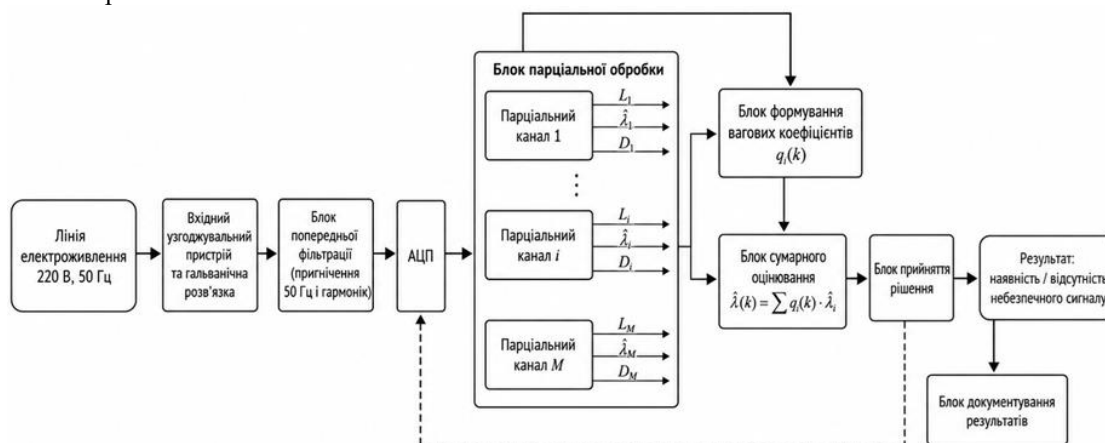


Рис. 2. Узагальнена структурна схема адаптивного приймача небезпечних сигналів у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц

Схема містить наступні блоки (рис. 2):

- вхідний узгоджувальний пристрій, що забезпечує безпечне підключення до лінії електроживлення, гальванічну розв'язку, обмеження рівня сигналу та захист вимірювального тракту;
- блок попередньої фільтрації, призначений для придушення основної гармоніки з частотою 50 Гц, вищих гармонік і потужних низькочастотних завад;
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який формує дискретну послідовність відліків сигналу для подальшої цифрової обробки;
- блок аналізу завадового середовища, що оцінює дисперсію, кореляційні властивості, імпульсність та можливу багатомодальність залишкової завади;
- блок парціальної обробки, який містить декілька паралельних каналів, кожен з яких відповідає окремому інтервалу області можливих значень інформаційного параметра;
- блок формування вагових коефіцієнтів, у якому визначаються апостеріорні ймовірності для кожного парціального каналу;
- блок сумарного оцінювання, що формує підсумкову оцінку інформаційного параметра шляхом зваженого об'єднання парціальних оцінок;
- блок прийняття рішення, у якому відношення правдоподібності порівнюється з пороговим значенням і формується рішення про наявність або відсутність небезпечного сигналу;
- блок документування результатів, який забезпечує збереження параметрів вимірювань, спектральних характеристик, статистичних оцінок та результатів прийняття рішення.



РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Для кількісної перевірки працездатності підходу виконано імітаційне моделювання окремого випадку парціального приймача, коли завадова щільність описується двокомпонентною гаусівською сумішшю (8). Використано наступні параметри (рис. 1): $\alpha = 0,55$; $m_1 = -1,2$; $m_2 = 1,1$; $\sigma_1 = 0,45$; $\sigma_2 = 0,65$. Перед моделюванням суміш центровано відносно її математичного сподівання $\bar{m} = -0,165$. Її еквівалентна дисперсія дорівнює:

$$\sigma_n^2 = \alpha[\sigma_1^2 + (m_1 - \bar{m})^2] + (1 - \alpha)[\sigma_2^2 + (m_2 - \bar{m})^2] = 1,610775. \quad (28)$$

Тестовий небезпечний сигнал задавався як:

$$s_k = A \cdot h_k, \quad (29)$$

де h_k – гармонічна послідовність із одиничною середньою потужністю з довжиною вікна $N = 32$ відліки; A – амплітуда сигналу.

Відношення сигнал/завада визначалося як:

$$SNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{A^2}{\sigma_n^2} \right). \quad (30)$$

Для кожної точки SNR поріг γ визначався окремо з умови $P_{FA} = 0,05$ за 50000 реалізацій згідно гіпотези H_0 ; ймовірність правильного виявлення оцінювалася ще за 50000 незалежних реалізацій гіпотези H_1 . Для оцінки параметра амплітуди використано 5000 реалізацій. Запропонований детектор обчислював правдоподібність за реальною сумішевою моделлю, тоді як базовий детектор використовував єдиний гаусівський розподіл з тією самою еквівалентною дисперсією. Така постановка ізолює ефект урахування багатомодальності завадового розподілу. Результати моделювання приведені в табл. 1, причому $P_{FA} = 0,05$. В табл. 1 також приведені результати розрахунку **середнього квадрату похибки оцінювання** параметра небезпечного сигналу:

$$MSE = \frac{1}{N_{\text{mod}}} \sum_{r=1}^{N_{\text{mod}}} (\hat{A}_r - A)^2, \quad (31)$$

де $\hat{A}_r$ – оцінка амплітуди сигналу A в r -й реалізації; N_{mod} – кількість реалізацій моделювання.

Таблиця 1

Результати імітаційного моделювання

SNR , дБ	P_D , запроп.	P_D , гаус.	MSE , запроп.	MSE , гаус.
-14	0,789	0,304	0,0108	0,0392
-12	0,918	0,408	0,0112	0,0445
-10	0,984	0,554	0,0109	0,0478
-8	0,999	0,722	0,0115	0,0498
-6	1,000	0,880	0,0113	0,0507
-4	1,000	0,972	0,0113	0,0523

За результатами, які наведені в табл. 1 побудуємо залежність ймовірності правильного виявлення від SNR (рис. 3).

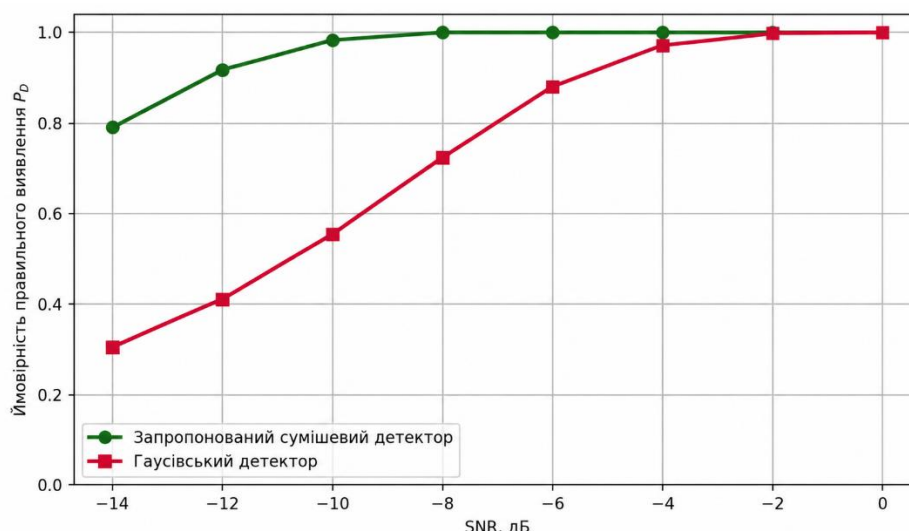


Рис. 3. Залежність ймовірності правильного виявлення від SNR за наявності бімодальної завади

Результати показують найбільшу перевагу сумішевого детектора в області низьких SNR. Так, при $SNR = -12$ дБ, P_D зростає з 0,408 до 0,918, тобто на 0,510, а при $SNR = -8$ дБ, P_D теж зростає з 0,722 до 0,999. Одночасно середньоквадратична похибка оцінювання амплітуди в діапазоні від -12 до -4 дБ зменшується приблизно у 4,0–4,6 раза. За високого рівня SNR обидва детектори наближаються до $P_D = 1$, тому вигреш від точної моделі завади закономірно зменшується.

Особливості застосування під час СД на ОІД. Під час проведення СД на ОІД запропонований адаптивний приймач може використовуватися для контролю проводного каналу витоку інформації через лінії електроживлення. Практичний порядок застосування містить такі етапи:

- попереднє обстеження ОІД;
- визначення контрольованих ліній електроживлення;
- підключення вимірювального тракту через пристрої гальванічної розв'язки;
- реєстрація фонових сигналів у лінії електроживлення;
- оцінювання статистичних характеристик завад;
- виявлення ознак негаусівського або багатомодального розподілу;
- запуск алгоритму парціальної обробки;
- формування оцінки інформаційного параметра небезпечного сигналу;
- прийняття рішення щодо наявності або відсутності небезпечного сигналу;
- документування результатів СД.

Особливо важливим є етап реєстрації фонових сигналів, оскільки саме він дозволяє визначити реальну структуру завадового середовища. Якщо розподіл залишкової завади близький до гаусівського, достатнім може бути класичний алгоритм виявлення. Якщо ж розподіл має бімодальний або мультимодальний характер, доцільно активувати парціальну сумішеву обробку та адаптивне оновлення ваг.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запропонований підхід має кілька принципових переваг порівняно з класичними алгоритмами приймання сигналів. По-перше, він не вимагає жорсткого припущення про гаусівський характер завади, що є суттєвим для низьковольтних електромереж із множинними джерелами імпульсних і вузькосмугових впливів [6–9, 13]. По-друге, алгоритм враховує можливість існування кількох локальних максимумів функції правдоподібності та не зводить рішення до єдиної локальної моди. По-третє, апостеріорні вагові коефіцієнти дозволяють адаптивно змінювати внесок парціальних каналів залежно від поточної структури сигналу та завади. По-четверте, запропонована структура безпосередньо орієнтована на цифрову реалізацію та може бути інтегрована у програмно-апаратний комплекс СД.

Імітаційний експеримент підтвердив, що врахування бімодальної статистичної моделі дає найбільший ефект саме в області слабких сигналів. Водночас отримані результати мають модельний характер. Для перенесення кількісних оцінок на конкретний ОІД необхідно попередньо ідентифікувати



параметри суміші за експериментально зареєстрованим фоном, перевірити стаціонарність на вибраному часовому вікні та оцінити стабільність порога хибної тривоги.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі вирішено задачу синтезу адаптивного приймача небезпечних сигналів у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц на ОІД. Обґрунтовано модель завадового середовища, яка після придушення промислової гармоніки допускає негаусівський і багатомодальний характер залишкової завади. Запропоновано парціальне представлення апостеріорної щільності, квазіоптимальну оцінку інформаційного параметра як зважену суму локальних оцінок та байєсівське оновлення вагових коефіцієнтів.

За результатами імітаційного моделювання бімодальної гаусівської суміші при $P_{FA} = 0,05$ та $SNR = -12$ дБ запропонований детектор забезпечив $P_D = 0,918$ проти 0,408 для детектора за еквівалентною гаусівською моделлю. У діапазоні SNR від -12 дБ до -4 дБ середньоквадратична похибка оцінювання амплітуди зменшилась приблизно у 4,0–4,6 раза. Це підтверджує доцільність використання сумішевої моделі завад при слабких інформаційно небезпечних складових.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методу адаптивного виявлення небезпечних сигналів у лінії електроживлення 220 В, 50 Гц, який, на відміну від алгоритмів, побудованих за одномодальною гаусівською моделлю завад, враховує багатомодальний характер функції правдоподібності шляхом її парціального подання та байєсівського зважування локальних оцінок. Це дає змогу зменшити вплив хибної локальної моди на оцінювання інформаційного параметра і підвищити ймовірність виявлення слабких інформаційно небезпечних складових за негаусівської завади.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його використання під час СД на ОІД для виявлення небезпечних сигналів у провідних лініях електроживлення. Алгоритм може бути реалізований у складі програмно-апаратних комплексів контролю технічних каналів витоку інформації, що виконують цифрову обробку сигналів, спектральний аналіз, адаптивне фільтрування та статистичне прийняття рішень.

Запропонований підхід може застосовуватися для контролю ліній електроживлення з іншими параметрами; оцінювання побічних електричних наведень від технічних засобів оброблення інформації; підвищення достовірності СД у складній завадовій обстановці; документування результатів контролю провідних каналів витоку інформації; формування рекомендацій щодо фільтрації, екранування, заземлення та просторового рознесення технічних засобів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну ідентифікацію статистичних моделей завад у реальних лініях 220–230 В, 50 Гц та 380 В, 50 Гц, автоматичний вибір кількості парціальних мод, адаптацію параметрів суміші в реальному масштабі часу, дослідження стійкості алгоритму до корельованих імпульсних завад та натурну перевірку приймача під час СД на ОІД.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жилін А.В., Шаповал О.М., Успенський О.А. (2021) *Технології захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах: навчальний посібник*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 213 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45723/1/NP_TZI_ITS.pdf
2. ДСТУ 3396.0-96. *Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення*. Київ: Держстандарт України, 1996. 6 с.
3. ДСТУ 3396.1-96. *Захист інформації. Технічний захист інформації. Порядок проведення робіт*. Київ: Держстандарт України, 1996. 5 с.
4. ДСТУ 3396.2-97. *Захист інформації. Технічний захист інформації. Терміни та визначення*. Київ: Держстандарт України, 1997. 11 с.
5. НД ТЗІ 1.1-005-07. *Захист інформації на об'єктах інформаційної діяльності. Створення комплексу технічного захисту інформації. Основні положення*. Київ: Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України, 2007. 5 с.
6. Ndolo A., Çaydar İ.H. (2021) Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. Vol. 8. Article 9. <https://doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9>
7. Liong A.A.G., Juwono F.H., Gopal L., Chiong C.W.R., & Rong Y. (2021) Multiple blanking preprocessors for impulsive noise mitigation in OFDM-based power-line communication systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 130. Article 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106911>



8. Liu S., Yang F., Li D., Yao R., & Song J. (2022) Power Line Communication with Robust Timing and Carrier Recovery against Narrowband Interference for Smart Grid. *Sensors*. Vol. 22. No. 11. Article 4013. <https://doi.org/10.3390/s22114013>
9. Rajkumarsingh B., Edoo M.H. (2022) BER Performance Comparison of the Markov-Middleton and Middleton Class A Noise Models in the MIMO Power Line Communication Channel. *4th International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)*, Mauritius. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ELECOM54934.2022.9965263>
10. Yu L., Chen Y., Zhang Y., Wang R., & Zhang Z. (2022) On-line harmonic signal denoising from the measurement with non-stationary and non-Gaussian noise. *Signal Processing*. Vol. 201. Article 108723. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108723>
11. Cui H., Wang X., Gao S., & Li T. (2022) A Gaussian mixture regression model based adaptive filter for non-Gaussian noise without a priori statistic. *Signal Processing*. Vol. 190. Article 108314. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108314>
12. Fu H., Cheng Y., Huang W. (2023) A novel variational robust filter with Gaussian mixture model for unknown non-Gaussian noises. *Measurement*. Vol. 221. Article 113417. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113417>
13. Awino S.O., & Nleya B. (2026) Multifractal Random Walk Model for Bursty Impulsive PLC Noise. *Applied Sciences*. Vol. 16. No. 1. Article 49. <https://doi.org/10.3390/app16010049>
14. Костенко П.Ю., Фалькович С.Я. (2021) *Основи статистичної теорії інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем: підручник*. Харків: ХНУІС. 612 с. [ISBN 978-966-468-099-5](https://doi.org/10.3390/app16010049)
15. Kay S.M. (1993) *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Volume I: Estimation Theory*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 595 p. ISBN: 978-0-13-345711-7
16. Kay S.M. (1998) *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Volume II: Detection Theory*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 560 p. ISBN: 978-0-13-504135-2
17. Van Trees H.L. (2001) *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I*. New York: Wiley. 716 p. ISBN: 978-0-471-09517-0
18. Candy J.V. (2009) *Bayesian Signal Processing: Classical, Modern, and Particle Filtering Methods*. Hoboken: Wiley. 480 p. ISBN: 978-0-470-18094-5
19. Haykin S. (2014) *Adaptive Filter Theory*. 5th ed. Boston: Pearson. 912 p. ISBN: 978-0-13-267145-3
20. Middleton D. (1999) Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models. *IEEE Transactions on Information Theory*. Vol. 45. No. 4. 1129–1149. <https://doi.org/10.1109/18.761256>
21. Nikias C.L., Shao M. (1995) *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications*. New York: Wiley. 168 p. ISBN: 978-0-471-10647-0

**Реза Юрій Володимирович**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Professor at the Department of Technical Cybersecurity Systems
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0003-2073-1364
yurka14@ukr.net

Петренко Андрій Борисович

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Cybersecurity
National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4793-5474
pab.05@ukr.net

Нафієв Ровіл Касымович

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Information Systems and Technologies
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID: 0000-0003-2721-9718
donrkn@gmail.com

**ADAPTIVE ESTIMATION AND DETECTION OF HAZARDOUS SIGNALS
IN POWER SUPPLY LINES OF AN INFORMATION ACTIVITY FACILITY**

Abstract. The article considers the problem of synthesizing an adaptive receiver for hazardous signals in a 220 V, 50 Hz power supply line at an information activity facility (IAF). It is shown that, after filtering the power-frequency component and its harmonics, the residual interference may exhibit non-Gaussian, impulsive, and multimodal characteristics, causing the detector likelihood function to have several local maxima. A quasi-optimal approach to the joint detection and estimation of a hazardous signal is proposed. The approach is based on representing the posterior probability density as a weighted sum of partial components, forming local estimates of the information parameter, and Bayesian updating of the weighting coefficients. A structural implementation of the adaptive receiver has been developed, comprising preliminary filtering, interference environment analysis, partial processing, aggregate estimation, and decision-making units. To verify the proposed approach, simulation modeling was performed for a bimodal Gaussian mixture. For a given false-alarm probability, the proposed mixture-based detector provided the required probability of correct detection and, compared with a detector based on an equivalent Gaussian model, reduced the mean-square error in estimating the hazardous signal level by approximately four times. The obtained results confirm the feasibility of accounting for the multimodal nature of interference when conducting special investigations (SI) of wired technical information leakage channels through power supply lines at an information activity facility.

Keywords: technical information protection; power supply line; hazardous signal; non-Gaussian interference; likelihood function; adaptive receiver; special investigations.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Zhylin A.V., Shapoval O.M., & Uspenskyi O.A. (2021) *Tekhnologii zakhystu informatsii v informatsiino-telekomunikatsiynykh systemakh: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 213 p. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45723/1/NP_TZI ITS.pdf
2. DSTU 3396.0-96. *Zakhyst informatsii. Tekhnichniy zakhyst informatsii. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1996. 6 p.
3. DSTU 3396.1-96. *Zakhyst informatsii. Tekhnichniy zakhyst informatsii. Poriadok provedennia robot*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1996. 5 p.
4. DSTU 3396.2-97. *Zakhyst informatsii. Tekhnichniy zakhyst informatsii. Terminy ta vyznachennia*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1997. 11 p.



5. ND TZI 1.1-005-07. *Zakhyst informatsii na ob'ekтах informatsiinoi diialnosti. Stvorennia kompleksu tekhnichnogo zakhystu informatsii. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Derzhavna sluzhba spetsialnogo zviazku ta zakhystu informatsii Ukrainy, 2007. 5 p.
6. Ndolo A., Çavdar İ.H. (2021) Current state of communication systems based on electrical power transmission lines. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. Vol. 8. Article 9. <https://doi.org/10.1186/s43067-021-00028-9>
7. Liong A.A.G., Juwono F.H., Gopal L., Chiong C.W.R., & Rong Y. (2021) Multiple blanking preprocessors for impulsive noise mitigation in OFDM-based power-line communication systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 130. Article 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106911>
8. Liu S., Yang F., Li D., Yao R., & Song J. (2022) Power Line Communication with Robust Timing and Carrier Recovery against Narrowband Interference for Smart Grid. *Sensors*. Vol. 22. No. 11. Article 4013. <https://doi.org/10.3390/s22114013>
9. Rajkumarsingh B., Edoo M.H. (2022) BER Performance Comparison of the Markov-Middleton and Middleton Class A Noise Models in the MIMO Power Line Communication Channel. *4th International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)*, Mauritius. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ELECOM54934.2022.9965263>
10. Yu L., Chen Y., Zhang Y., Wang R., & Zhang Z. (2022) On-line harmonic signal denoising from the measurement with non-stationary and non-Gaussian noise. *Signal Processing*. Vol. 201. Article 108723. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108723>
11. Cui H., Wang X., Gao S., & Li T. (2022) A Gaussian mixture regression model based adaptive filter for non-Gaussian noise without a priori statistic. *Signal Processing*. Vol. 190. Article 108314. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108314>
12. Fu H., Cheng Y., Huang W. (2023) A novel variational robust filter with Gaussian mixture model for unknown non-Gaussian noises. *Measurement*. Vol. 221. Article 113417. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113417>
13. Awino S.O., & Nleya B. (2026) Multifractal Random Walk Model for Bursty Impulsive PLC Noise. *Applied Sciences*. Vol. 16. No. 1. Article 49. <https://doi.org/10.3390/app16010049>
14. Kostenko P.Yu., & Falkovych S.Ya. (2021) *Osnovy statystychnoi teorii informatsiino-vymiriuvalnykh radiotekhnichnykh system: pidruchnyk*. Kharkiv: KhNUPS. 612 p. ISBN 978-966-468-099-5
15. Kay S.M. (1993) *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Volume I: Estimation Theory*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 595 p. ISBN: 978-0-13-345711-7
16. Kay S.M. (1998) *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Volume II: Detection Theory*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 560 p. ISBN: 978-0-13-504135-2
17. Van Trees H.L. (2001) *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I*. New York: Wiley. 716 p. ISBN: 978-0-471-09517-0
18. Candy J.V. (2009) *Bayesian Signal Processing: Classical, Modern, and Particle Filtering Methods*. Hoboken: Wiley. 480 p. ISBN: 978-0-470-18094-5
19. Haykin S. (2014) *Adaptive Filter Theory*. 5th ed. Boston: Pearson. 912 p. ISBN: 978-0-13-267145-3
20. Middleton D. (1999) Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models. *IEEE Transactions on Information Theory*. Vol. 45. No. 4. 1129–1149. <https://doi.org/10.1109/18.761256>
21. Nikias C.L., Shao M. (1995) *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications*. New York: Wiley. 168 p. ISBN: 978-0-471-10647-0

Отримано редакцією журналу / Received: 28.07.26

Прорецензовано / Revised: 14.08.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.10.26

