

УДК 316.77.002.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.044145

О. М. ТКАЛЕНКО, канд. техн. наук, доцент;  
О. В. ПОЛОНЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент;  
О. О. ЛИТВИН, студент;  
О. Ю. МАРЧЕНКО, студент;  
М. Я. АСМАН, студент,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## **ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ З НАВЧАННЯМ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНОГО СИГНАЛУ В ШУМІ НЕВІДОМОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ**

*Розглянуто основні джерела шумів та завад, особливості виявлення сигналів у шумах, методи боротьби з ними під час передавання на різного роду відстань. У низці задач приймання сигналів за наявності шумів не можна обмежуватися таким загальним критерієм, як відношення сигнал/шум. Постає необхідність використовувати більш тонші статистичні властивості процесів, які дають можливість кількісно оцінити вірогідність даних. Шуми становлять важливу проблему в науці і техніці, оскільки вони визначають нижні межі як стосовно точності будь-яких вимірювань, так і щодо величини сигналів, котрі можуть бути оброблені засобами електроніки. Визначено адаптивне виявлення сигналів у шумах із використанням оптимального алгоритму виявлення для процедур аналізу. Запропоновано алгоритм виявлення сигналу в шумі як під час дискретного спостереження, так і в разі переходу до неперервного спостереження сигналів. Побудовано ймовірнісні характеристики виявлення сигналу в шумі невідомої та відомої інтенсивності алгоритму з навчанням.*

**Ключові слова:** сигнал/шум; завада; алгоритм; величина; технічна система; адаптивне приймання; частота; вито пара.

### **ВСТУП**

Останнім часом проблема взаємного впливу на радіоелектронні пристрої ненавмисних завад стала настільки гострою, що іноді для забезпечення електромагнітної сумісності доводиться штучно знижувати технічні характеристики апаратури. Бажають бути кращими й справи в процесі передавання зображення та звуку на великі відстані [3; 7]. Людське око та вухо — дуже чутливі інструменти, що миттєво помічають найменші порушення якості. Інженерам доводиться відшукувати все більш складні та дорогі технічні вирішення, щоб забезпечити передавання зображення та звуку на великі відстані без істотної втрати якості.

Основними джерелами шумів та завад заведено вважати: індустриальні завади; наведення від сусідніх кіл; розніми низької якості; реактивний опір кабелю та низьку якість кабелю; неточне узгодження кабелю з хвильовим опором передавача та приймача; живлення від різних фаз і наявність петель заземлення. Другорядними джерелами шумів є гальванічні та електролітичні процеси, триобелектричний ефект і вібрації кабелів [1; 5].

Розрізняють пасивні й активні методи боротьби з шумами та завадами [1; 5].

*Пасивні методи* боротьби з шумами та завадами полягають у скороченні довжини кабельних мереж до розумного мінімуму та зменшення кількості кабелів; використанні кабелів та ронімів лише високої якості, від відомих фірм-виробників; прокладанні кабелів із радіусами великого вигину, щоб уникнути завад від так званого триобелектричного ефекту (нагромадження заряду всередині кабелю); розділенні стволів сигнальних та силових кабелів; використанні узгоджених навантажень; у такому використанні апаратури, щоб її робочі режими були значно нижчими від граничних; у використанні найстійкішого до завад інтерфейсу.

*Активні методи* боротьби з шумами та завадами полягають у застосуванні проміжних підсилювачів сигналів, які компенсують їх загасання в лінії через омичний опір і втрати на високих частотах через реактивність кабелю; переході на виту пару [3; 4]; переході на оптоволоконний кабель за потреби передавання сигналу на великі відстані.

### **ОСНОВНА ЧАСТИНА**

Природа влаштована так, що фізичні сигнали — носії інформації — завжди випадкові через наявність багатьох неврахованих факторів випадкового походження. Ці фактори призводять до появи шумів і завад, з якими взаємодіють корисні сигнали. Самі сигнали в процесі передавання по різних каналах, що входять до складу інформаційної системи, піддаються випадковим змінам [1-3]. Прикладами

таких змін можуть бути флуктуації радіосигналів під час поширення радіохвиль через іонізовані середовища або флуктуації радіолокаційних сигналів у процесі їх розсіювання об'єктами, що здійснюють випадкові рухи навколо центрів мас і випадкові переміщення одних елементів об'єкта відносно інших у разі нежорстких конструкцій. Утім, флуктуаційні зміни сигналів спостерігаються під час поширення радіохвиль через іонізовані середовища деяких завад або шумів. Тому всі випадкові зміни сигналів можна пов'язати із завадами. Звичайні ж види шумів виявляються адитивними щодо сигналів. До таких шумів передусім належать шуми всіяких приймачів. Приймачі та шуми в них залежно від виду сигналу цілком різні.

Ситуація в процесі роботи будь-якої інформаційної системи полягає в тому, що на її вхід надходить спотворений випадковими завадами сигнал, в якому закодовано деякі відомості, величини параметрів, реалізації процесів [1-3; 5]. Ці відомості і параметри так само випадкові. Інформаційна система містить приймач сигналів — носіїв інформації, в якому здійснюються необхідні для вилучення інформації перетворення. Далі відбувається оброблення інформації, призначеної для забезпечення виконання системою її функцій.

Виявлення сигналів у шумах є окремим випадком перевірки гіпотез. Ці гіпотези можуть бути дво- і багатоальтернативними, простими, які не залежать від додаткових випадкових або невідомих факторів, і складними. Фізичний зміст цих гіпотез може бути найрізноманітнішим. До цього класу належать, зокрема, різні системи виявлення сигналів у шумах і завадах. Це системи виявлення об'єктів на основі приймання випромінювань різних діапазонів електромагнітних хвиль, що створюються ними (світлові, інфрачервоні, радіохвилі тощо); системи виявлення, що використовують радіо- і лазерні локатори, гідроакустичні прилади та ін.

Ще більш широким різновидом систем, що здійснюють перевірку гіпотез, є системи розпізнавання образів або класифікатори різних ситуацій, процесів, об'єктів спостереження. Можна навести велику кількість прикладів, що належать до розпізнавання образів і стосуються різних явищ природи, видів людської діяльності, технічних систем різних призначень [1-7]. Достатньо згадати, наприклад, медичне діагностування захворювань, що ґрунтується на спостереженні випадкових ознак, котрі набувають тих або інших значень у хворих; розпізнавання об'єктів через аналіз відбитих від них радіолокаційних сигналів; розпізнавання людей за їх голосом та почерком; виявлення прихованих дефектів у металевих виробках на основі дослідження розсіяних ними радіаційних випромінювань тощо.

Одним із засобів перевірки гіпотез є виявлення сигналів у шумах. Під час спостереження деякої вибірки або реалізації випадкового процесу  $x(t)$  перевіряється гіпотеза про те, що цей процес описується розподілом імовірностей, властивим шуму, проти гіпотези про те, що він описується розподілом імовірностей, властивим поєднанню сигналу і шуму.

У теорії виявлення [1; 5] зазвичай передбачається, що закони розподілу як сигналів, так і шумів або завад повністю відомі. Водночас на етапі реалізації технічних систем, що здійснюють виявлення сигналів, доводиться стикатися із ситуаціями, в яких низка параметрів як виявлених сигналів, так і шумів невідома. Зокрема, потужність виявленого сигналу залежить переважно від виду об'єкта, з ним пов'язаного, і є випадковою величиною [1; 5]. Якщо сигнал є флуктуючим завдяки умовам його передавання або поширення, або через зміну властивостей об'єкта, який його випромінює або розсіює, параметри функції кореляції сигналу можуть набувати різних значень і є випадковими. Параметри модуляції виявленого сигналу, в яких закладено деяку інформацію, завжди випадкові. Параметри шумів також не завжди можна вважати заданими. Так, інтенсивність шуму, створюваного деякими зовнішніми джерелами, що заважають, може бути різною, навіть якщо вид його густини ймовірності визначено із загальних фізичних або технічних міркувань.

За цих умов закони розподілу сигналів і шумів залежать від невідомих випадкових параметрів і завдання виявлення може вирішуватися на базі теорії адаптивної перевірки гіпотез [1; 5].

Визначимо адаптивне виявлення сигналів у шумах, відшукавши при цьому оптимальні алгоритми виявлення для процедур аналізу. Застосування таких процедур у разі перевірки двоальтернативних гіпотез дає можливість на  $n$ -му кроці скласти відношення правдоподібності і порівняти його з відповідними порогоми:

$$\left( X_n | a_1^*, a_2^* \right) = \frac{P_1(X_n | a_1^*)}{P_2(X_n | a_2^*)}. \quad (1)$$

У задачах виявлення  $P_1(X_n | a_1^*)$  — густина ймовірності суміші сигналу і шуму (завади);  $a_1^*$  — оцінка максимальної правдоподібності вектора параметрів цієї суміші, здобута на основі спостережень  $X_n$ ;  $P_2(X_n | a_2^*)$  — густина ймовірності шуму (завади);  $a_2^*$  — оцінка максимальної правдоподібності вектора невідомих параметрів шуму.

Визначимо відповідні алгоритми виявлення в разі дискретного спостереження та під час переходу до неперервного спостереження сигналів. Побудуємо також імовірнісні характеристики виявлення, порівнявши їх з випадками відомих параметрів сигналів і шумів, коли оптимальні алгоритми не є адаптивними.

Часто трапляються ситуації, в яких для оцінювання невідомої інтенсивності шуму може бути використана окрема чисто шумова вибірка. У радіолокації, наприклад, шумовий фон може вимірюватися в напрямках, де відсутні цілі, або при дальностях, на яких їх бути не може [1]. Це відповідає завданню з навчанням, під час якого система виявлення, перш ніж виявити сигнал, налаштовується на виставленні параметра обстановки (дисперсії шуму).

Вважатимемо, що спостерігається вибірка  $X_n$  на інтервалі часу  $0 \leq t \leq T$ ,  $T = n\Delta t$ ,  $\Delta t = 1/2\Delta f$ ,  $\Delta f$  — смуга шуму. При цьому можна припустити, що:

$$X_n = \lambda S_n + \Xi_n, \quad (2)$$

де  $\Xi_n$  — вектор некорельованого гауссівського шуму з невідомою дисперсією  $\sigma^2 = 2N_0\Delta f$ ;  $S_n$  — заданий вектор;  $\lambda = 1$  з імовірністю  $p_1$ ;  $\lambda = 0$  з імовірністю  $p_2$  ( $p_1 + p_2 = 1$ ). За спостереженням  $X_n$  потрібно вирішити, чи є в наявності сигнал  $S_n$ .

Однак для визначення невідомої інтенсивності шуму на інтервалі  $t_0 \leq t \leq t_0 + T_1$ , на якому сигналу  $s(t)$  бути не може, здійснюється спостереження вибірки  $Y_m = \{y_1, \dots, y_m\}$ ,  $m = T_1/\Delta t$ . Це процес навчання.

Якщо за вибіркою  $Y_m$  розраховується оцінка максимальної правдоподібності дисперсії шуму, то

$$\sigma^2 = \frac{Y_m^T Y_m}{m} = \sum_{i=1}^m y_i^2 / m. \quad (3)$$

За доволі великої довжини цієї вибірки, коли оцінка  $\sigma^{2*}$  близька до істинного значення  $\sigma^2$ , до оптимального буде наближатися алгоритм виявлення, згідно з яким рішення про наявність сигналу приймається, якщо

$$\Lambda(X_n | \sigma^{2*}) = \frac{P_1(X_n | \sigma^{2*})}{P_2(X_n | \sigma^{2*})} \geq C, \quad (4)$$

де  $P_1(X_n | \sigma^2)$  і  $P_2(X_n | \sigma^2)$  — густина ймовірності для  $X_n$  при дисперсії шуму  $\sigma^2$  і при значеннях відповідно  $\lambda = 1$  і  $\lambda = 0$ . У результаті відношення правдоподібності набирає вигляду:

$$\Lambda(X_n | \sigma^{2*}) = \exp\left(-\frac{S_n^T S_n}{2\sigma^{2*}} + \frac{X_n^T S_n}{\sigma^{2*}}\right). \quad (5)$$

Правило прийняття рішення про наявність сигналу (4) може бути тепер перетворено у вираз:

$$X_n^T S_n \sigma^{2*} \ln C + 0,5 S_n^T S_n \quad (6)$$

або

$$\sum_{i=1}^n x_i s_i \geq \frac{\ln C}{m} (x+a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k} y_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n s_i^2, \quad (7)$$

що можна трактувати як порівняння функції від  $x_i$ , що представляє ліву частину нерівності із змінним порогом, який визначається оцінкою дисперсії шуму за час навчання.

Подаючи (7) у вигляді

$$\sum_{i=1}^n x_i s_i - s \sum_{i=1}^n y_i^2 \geq \frac{E}{2}, \quad (8)$$

де  $a = C_0/m$ ;  $C_0 = \ln C$ ;  $\sum_{i=1}^n s_i^2$ , можна вважати, що операція оброблення  $X_n$  і  $Y_m$ , яка визначається лівою частиною (8), порівнюється з постійним порогом.

Якщо цікавитися операціями над сигналами, які підлягають постійним спостереженням, що наближаються до оптимальних, то, перемножуючи (8) на  $\Delta t$  та переходячи до межі при  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $n \rightarrow \infty$ , дістаємо такий алгоритм виявлення сигналу:

$$\int_0^T x(t)s(t)dt - a \int_{t_0}^{t_0+T_1} x^2(t)dt \geq \frac{E_0}{2}, \quad (9)$$

де, як і раніше,  $E_0 = \int_0^T s^2(t)dt$ . Функціональну схему детектора, що відповідає (9), зображено на рис. 1, де 1 — генератор сигналу  $s(t)$ ; 2 — квадратор; 3 — інтегратор за час  $T_1$ ; 4 — інтегратор за час  $T$ ; 5 — підсилювач із коефіцієнтом підсилення  $a$ ; 6 — лінія затримки на час  $T - T_1 - t_0$  ( $t^0 \leq -T_1$ ); 7 — реле.

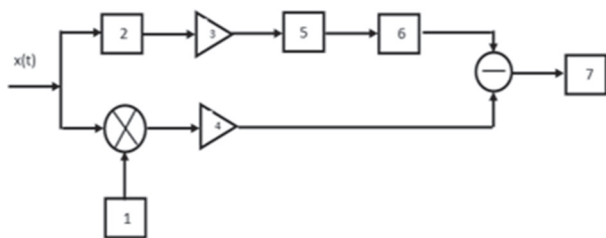


Рис. 1. Функціональна схема детектора сигналу в шумі невідомої інтенсивності (алгоритм із навчанням)

Для визначення характеристик детектора, що відповідають алгоритму (8), подамо останній у вигляді

$$u = u_1 - u_2 \geq E/2, \tag{10}$$

де

$$u_1 = \sum_{i=1}^n x_i s_i, \quad u_2 = \sum_{i=1}^n y_i^2, \tag{11}$$

і знайдемо закони розподілу ймовірностей для  $u_1$  і  $u_2$ .

Беручи до уваги, що  $x(t)$  — нормальний процес, з (11) маємо:

$$P_1(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left[-\frac{(u_1 - \bar{u}_1)^2}{2\sigma_1^2}\right], \tag{12}$$

де

$$\bar{u}_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } \lambda = 0, \\ E & \text{при } \lambda = 1, \end{cases} \tag{13}$$

а

$$\sigma_1^2 = \overline{(u_1 - \bar{u}_1)^2} = \sigma^2 E. \tag{14}$$

З огляду на те, що  $y_i$  — незалежні нормально розподілені величини,  $u_2$  описується  $\chi^2$  — розподілом з  $m$  ступенями свободи, а за великих  $m$  справедливе нормальне наближення і

$$P_2(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp\left[-\frac{(u_2 - \bar{u}_2)^2}{2\sigma_2^2}\right], \tag{15}$$

причому

$$\bar{u}_2 = a \sum_{i=1}^m \bar{y}_i = am\sigma^2 = C_0\sigma^2, \tag{16}$$

$$\sigma_2^2 = \overline{(u_2 - \bar{u}_2)^2} = a^2 \sum_{i=1}^m \overline{(y_i - \bar{y}_i)^2} = 2a^2 m\sigma^4 = \frac{2}{m} C_0^2 \sigma^4. \tag{17}$$

Звідси випливає, що  $u = u_1 - u_2$  також описується (при великих  $m$ ) нормальним розподілом з математичним сподіванням  $\bar{u} = \bar{u}_1 - \bar{u}_2$  та дисперсією  $\sigma_u^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ . Згідно з (13), (16), (17) маємо

$$\bar{u} = \begin{cases} -C_0\sigma^2 & \text{при } \lambda = 0, \\ E - C_0\sigma^2 & \text{при } \lambda = 1, \end{cases} \tag{18}$$

і

$$\sigma_u^2 = \sigma^2 E + \frac{2C_0^2\sigma^4}{m}. \tag{19}$$

Ймовірність помилкової тривоги визначається так:

$$F = \int_{E/2}^{\infty} P(u|0) du = \Phi\left(-\frac{\frac{E}{2} + \sigma^2 C_0}{\sigma_u}\right), \tag{20}$$

а ймовірність правильного виявлення за формулою

$$D = \int_{E/2}^{\infty} P(u|1) du = \Phi\left(-\frac{\frac{E}{2} + \sigma^2 C_0 - E}{\sigma_u}\right). \tag{21}$$

Під  $P(u|0)$  і  $P(u|1)$  розуміють густину ймовірності для величини  $u$  при відповідно  $\lambda = 0$  і  $\lambda = 1$ ;  $\Phi(\dots)$  — інтеграл імовірності. Вводячи відношення сигнал/шум  $h = E/2\sigma^2$  з (20) і (21), дістаємо:

$$F = \Phi\left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{C_0 - h}{\sqrt{h + \frac{C_0^2}{m}}}\right), \quad D = \Phi\left(-\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{C_0 - h}{\sqrt{h + \frac{C_0^2}{m}}}\right). \tag{22}$$

Характеристики (22) справедливі і під час неперервного спостереження сигналів. У цьому разі відношення сигнал/шум  $h = E_0/2N_0$ , а під  $m$  слід розуміти  $m = 2T_1\Delta f$ .

Характеристику виявлення, здобуту за (22) при  $h = 1$  і  $m = 10$ , унаочнює рис. 2.

## ВИСНОВКИ

Проектування систем передавання сигналів на великі відстані має проводитися з урахуванням їх захисту від шумів і завад. Усі можливі джерела завад слід передбачати на етапі проектування і тоді закладати в систему методи та засоби протидії їм. Захищати від впливу шумів та завад уже спроектовані без урахування електромагнітної сумісності системи, як правило, складно, дорого та мало-ефективно. Пасивні методи боротьби з шумами та завадами, загалом, дешевші, але менш ефективні. Найбільший ефект дають активні методи, що полягають у використанні спеціальних проміжних підсилювачів сигналу, передаванні балансного сигналу по витій парі і переходу на оптоволоконні лінії зв'язку. З характеристики виявлення сигналу в шумі невідомої та відомої інтенсивності алгоритму з навчанням видно, що за допомогою застосування розглянутого алгоритму з навчанням можна досягти результатів, досить близьких до тих, яких здобуто при відомій інтенсивності шуму.

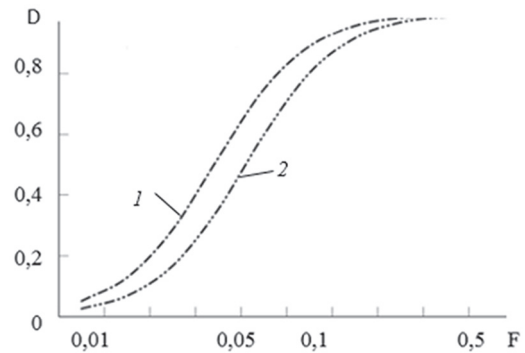


Рис. 2. Характеристика виявлення сигналу в шумі невідомої (1) та відомої (2) інтенсивності алгоритму з навчанням

## Список використаної літератури

1. Іващенко П. В. Основи теорії інформації: навч. посіб. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2015. 53 с.
2. Основи теорії процесів в інформаційних системах: підручник (у 2-х кн.). Кн. 1. Аналіз детермінованих процесів / М. Б. Гумен, В. М. Співак, С. К. Мещанінов [та ін.]. 2-е вид., зі змінами і доповн. Київ: Кафедра, 2017. 281 с.
3. Пошук, обробка та аналіз інформації: навч. посіб. / К. П. Сторчак, О. М. Ткаленко, О. В. Полоневич [та ін.]. Київ: ДУТ, 2018. 127 с.
4. Комп'ютерні мережі: навч. посіб. для техн. спеціальностей вищих навч. закладів / А. Г. Микитишин, М. М. Митник, П. Д. Стухляк, В. В. Пасічник. Львів, Магнолія 2006, 2017. 256 с.
5. Pianykh B. Ye., Aznakayev E. G., Bidnyi M. S. Electric and electronic circuit theory. Electric circuits: manual. Kyiv: NAU, 2015. 244 p.
6. Аналіз та обробка потоків даних засобами обчислювального інтелекту: монографія / Є. В. Бодяньський, Д. Д. Пелешко, О. А. Винокурова [та ін.]. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016. 236 с.
7. Tkalenko O. Модель сигнального трафіку для передавання повідомлень в режимі реального часу // Polish Science Journal (ISSUE 1(22), 2019). Warsaw: Sp.z o.o. "iScience", 2020. P. 27–32.

О. Н. Ткаленко, О. В. Полоневич, А. А. Литвин, Е. Ю. Марченко, М. Я. Асман

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА С ОБУЧЕНИЕМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО СИГНАЛА В ШУМЕ НЕИЗВЕСТНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Рассмотрены основные источники шумов и помех, особенности обнаружения сигналов в шумах, методы борьбы с ними при передаче на разного рода расстояние. В ряде задач приема сигналов при наличии шумов нельзя ограничиваться таким общим критерием, как отношение сигнал/шум. Возникает необходимость использовать более тонкие статистические свойства процессов, позволяющих количественно оценить достоверность данных. Шумы представляют собой важную проблему в науке и технике, поскольку они определяют нижние пределы как в отношении точности любых измерений, так и в отношении величины сигналов, которые могут быть обработаны средствами электроники. Определено адаптивное обнаружение сигналов в шумах с использованием оптимального алгоритма обнаружения для анализа. Предложен алгоритм обнаружения сигнала в шуме как при дискретном наблюдении, так и при переходе к непрерывному наблюдению сигналов. Построены вероятностные характеристики обнаружения сигнала в шуме неизвестной и известной интенсивности алгоритма с обучением.

**Ключевые слова:** сигнал/шум; помеха; алгоритм; величина; техническая система; адаптивный прием; частота; витая пара.

O. Tkalenko, O. Polonevych, O. Lytvyn, O. Marchenko, M. Asman

## USING A LEARNED ALGORITHM FOR DETECTING A DETERMINISTIC SIGNAL IN A NOISE OF UNKNOWN INTENSITY

The main sources of noise and interference, the features of detecting signals in noises, methods of dealing with them during transmission over various distances are considered. Passive methods of dealing with noise and interference are to reduce the length of cable networks to a reasonable minimum and reduce the number of cables; using only high quality cables and connectors from well-known manufacturers; laying cables with large bending radii to avoid interference from the so-called triboelectric effect; separation of signal and power cable trunks; using matched loads; in such a use of equipment so that its operating conditions are significantly lower than the limiting ones; in using the most interference-resistant interface. Active methods of dealing with noise and interference consist in the use of intermediate signal amplifiers that compensate for their attenuation in the line due to ohmic resistance and losses at high frequencies due to cable reactivity; switching to a twisted pair; switching to fiber-optic cable when it is necessary to transmit a signal over long distances. In a number of problems of signal reception in the presence of noise, one cannot be limited by such a general criterion as the signal-to-noise ratio. There is a need to use more subtle statistical properties of processes that allow one to quantify the reliability of the data. Noise is an important problem in science and technology because it defines lower limits both in terms of the accuracy of any measurement and in terms of the magnitude of signals that can be processed electronically. An adaptive detection of signals in noise is defined, using an optimal detection algorithm for analysis. An algorithm is proposed for detecting a signal in noise both in discrete observation and in the transition to continuous observation of signals. Probabilistic characteristics of signal detection in noise of unknown and known intensity of the learning algorithm are constructed.

**Keywords:** signal/noise; interference; algorithm; value; technical system; adaptive reception; frequency; twisted pair.