

**Дунець В. Л., к.т.н., Хвостівська Л. В., к.т.н., доцент,  
Паляниця Ю. Б., к.т.н.** (Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль)

## **МАТЕМАТИЧНЕ, АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З БАЛАНСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ**

Проведено дослідження процесу передачі радіосигналу з балансною модуляцією в каналі зв'язку під впливом завад у вигляді суми корисного радіосигналу та завади при застосуванні розробленого програмного забезпечення в середовищі Matlab. Згенеровано тестові сигнали, піддано їх балансній модуляції, здійснено адитивний вплив завади, реалізовано балансну демодуляцію та відображено результати оцінювання рівня завадозахищеності каналів у вигляді графіків за показниками середньоквадратичного відхилення, співвідношення сигнал-шум (signal-to-noise ratio (SNR)) на вході/виході. Для оцінювання показника достовірності виявлення застосовано критерій Неймана – Пірсона та розроблені на його основі алгоритмічне та програмне забезпечення в середовищі Matlab.

**Ключові слова:** завадозахищеність; канал зв'язку; балансна модуляція; matlab.

**Постановка проблеми.** В останні роки спостерігається бурхливий розвиток систем радіозв'язку. Однак проблема підвищення їх завадозахищеності залишилася не вирішеною, так як шуми, завади та завмирання сигналу, що впливають на якість передачі радіосигналів, призводять до появи на приймальній стороні помилок.

Завантаженість радіочастотного спектру та обмеження по потужності випромінювання радіо передаючих пристроїв у населених пунктах, а також прагнення розробників зменшити масу та габарити антенних пристроїв, висунули показник завадостійкості на передові позиції для забезпечення високої якості інформаційного обміну. Збільшення потужності передавача, підвищення чутливості приймача, підсилення антен частково вирішують проблему, але за

рахунок зниження техніко-економічних показників систем зв'язку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробники засобів передачі вимушені вибирати завадостійкі методи модуляції радіосигналів при їх передачі для розроблення систем, виходячи з досвіду експлуатації подібних пристроїв у вже існуючих системах.

Розробки у напрямі розвитку підвищення показників завадостійкості каналів зв'язку вели та ведуть такі вчені як А. J. Viterbi, E. R. Berlekamp, P. Блейхут, Д. Ж. Прокіс, С. Ліін, Д. Ж. Кастелло, Р. У. Хеммінг, Л. М. Фінк, Р. Ч. Боуз, Д. К. Рей-Чоудхурі, А. М. Хоквінгем, І. С. Рід, Г. М. Соломон, Е. М. Габідулін, М. Д. Голей та багато інших [1–6]. Проте складність і гетерогенність каналів передачі радіосигналів, відмінність методів передачі інформаційних потоків та низка інших причин не дозволили знайти найбільш підходящий метод як складової математичного забезпечення та алгоритмічного забезпечення для визначення рівня завадостійкості кодування. Також проблема вибору найкращого виду модуляції радіосигналів для конкретного каналу передавання даних поки що не вирішена.

Експериментальний підбір видів модуляції, методів обробки сигналів і методів визначення рівня завадостійкості, що забезпечує найбільш високу якість передачі в конкретному каналі зв'язку являє собою в даний час актуальним завданням. Зважаючи на викладені вище обставини процес дослідження передачі повідомлень при використанні радіосигналів з балансною модуляцією не здійснювався.

**Мета статті.** Для реалізації такого підходу необхідно провести дослідження, яке дасть змогу шляхом комп'ютерного моделювання та імітації умов передачі радіосигналів, визначати рівень завадозахищеності каналу передачі інформації при баланській модуляції та здійснити обробку радіосигналу на базі адекватного математичного, алгоритмічного та програмного забезпечень, задля досягнення заданої якості інформаційного обміну.

**Виклад основного матеріалу.** Під час реалізації електронних комунікаційних систем розробляють ефективні методи (математичне забезпечення) дослідження їх каналів зв'язку згідно моделі, яку зображено на рис. 1.

Взаємозв'язки між вихідним радіосигналом  $\xi(t)$  та вхідним балансо-модульованим  $s(t)$  відображено при застосуванні оператора [8; 9]:

$$\xi(t) = L\{x(t)\}. \quad (1)$$

Вигляд моделі радіосигналу через рис. 1 та вираз (1) забезпечують опис таких сигналів серед завад  $\xi(t)$  як сума завади  $n(t)$  (зовнішні та внутрішні).

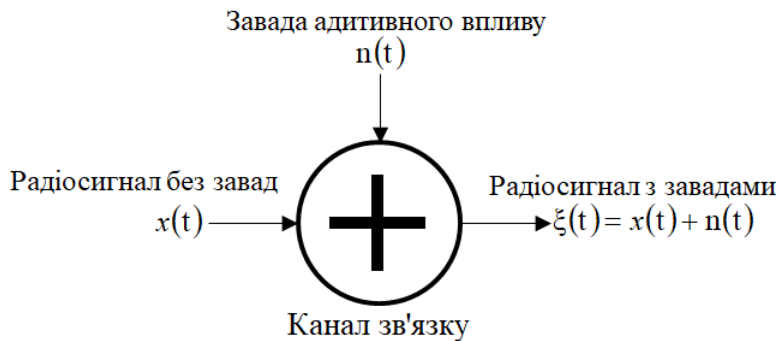


Рис. 1. Вигляд моделі радіосигналів в каналах зв'язку під впливом завад

Для конкретизації властивостей радіосигналів під впливом завад використано аналітичний метод для досліджень варіативностей амплітудних значень реальних радіосигналів, що уможливить забезпечення коректності щодо математичного опису як фундаменту розробки ефективних обчислювальних методів визначення рівня завадозахищеності каналу зв'язку під впливом завад.

На рис. 2 наведено балансно-модульовний радіосигнал під впливом завад.

Радіосигналам балансно-модульованим є характерна випадковість через впливання завад та повторюваність модуляційного процесу передачі при використанні каналу зв'язку. Амплітудні значення радіосигналу з часом варіюють в певних межах відносно середнього значення корисного радіосигналу, а саме спостерігається варіаційний (стохастичний) процес (графічно спостерігається на рис. 2). Якщо вказаний процес досліджувати з часом, тоді, відповідно, можна завчасно виявляти корисні складові завадозахищені радіосигнали під впливом завад.

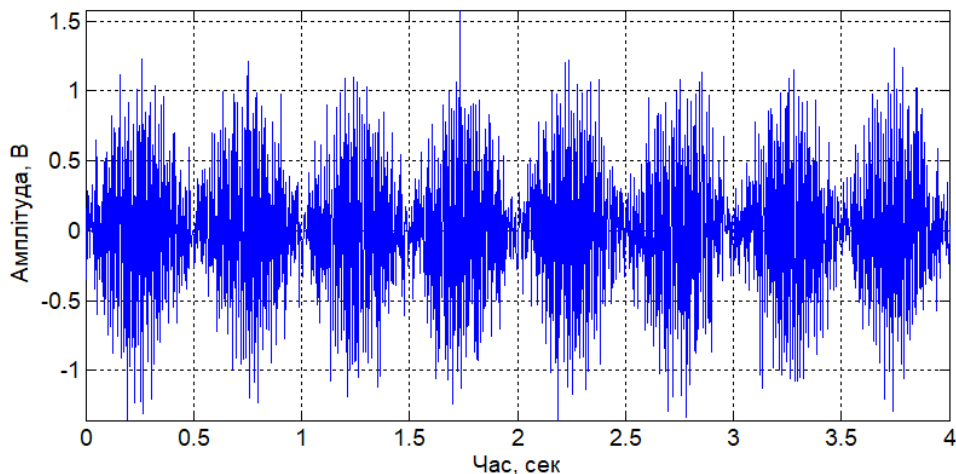


Рис. 2. Балансно-модульовний радіосигнал

Для обчислення достовірності припущено, що балансно-демодульований сигнал  $\xi(t)$  є сумою корисного радіосигналу та шуму:

$$\xi(t) = \theta \cdot s(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (2)$$

де  $n(t)$  – БГШ;

$s(t)$  – корисний радіосигнал;

$\theta$  – випадкове число.

Процедура виявлення радіосигналу  $s(t)$  є частковою задачею статистичного процесу перевірок гіпотез  $H_0$  та  $H_1$ . При гіпотезі  $H_0$  випадкове число  $\theta$  рівне 0 (констатація відсутності сигналу), а при гіпотезі  $H_1$  випадкове число  $\theta$  рівне 1 (констатація присутності сигналу). За реалізацією  $\xi(t)$ ,  $0 \leq t \leq T$  по завершенню спостереження потрібно приймати рішення щодо вірності однієї з гіпотез. Для розрізнення гіпотез застосовано критерій Неймана – Пірсона (далі критерій).

Відповідно до критерію треба задати значення ймовірності тривоги хибної  $p_F$ , а саме ймовірність перевищування шумом на виході за  $t = T$  деякого порогу рівня  $h$ :

$$p = \int_h^{\infty} p_0(q) dq = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{2E}}\right), \quad (3)$$

де  $\Phi(x)$  – ймовірнісний інтеграл.

Значення ймовірності правильного виявлення обчислюється виразом:

$$p = \int_h^{\infty} p_1(q) dq = 1 - \Phi\left(\frac{h}{\sqrt{\frac{2E}{N}}} - \sqrt{\frac{2E}{N}}\right). \quad (4)$$

Ймовірнісний інтеграл обчислюється з виразу:

$$\Phi(U) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (5)$$

Вирази (3) та (4) математично відображають, що показник ймовірності тривоги хибної  $p_F$  та показник ймовірності правильного виявлення  $p_D$ , синхронно залежать від відношення рівня порогу  $h$  та піку  $\text{SNR} = \sqrt{2E/N}$ .

Під час експериментального оцінювання завадозахищеності каналів зв'язку варто встановлювати послідовність операцій у вигляді алгоритмічного забезпечення, яке відображає усі кроки дослідження процесу модуляції/демодуляції щодо оцінювання показника завадозахищеності.

- 1) Завантаження даних радіосигналу;
- 2) Процес модуляції даних при використанні програмної функції `ammod`;
- 3) Процес генерування шуму гаусівського за допомогою функції `normrnd`;
- 4) Адитивне накладання генерованих шумів на модульований радіосигнал;
- 5) Процес демодуляції даних за допомогою `amdmod`;
- 6) Обчислення рівня завадозахищеності, зокрема за показниками енергетичними у вигляді відношень сигнал/шум та значеннями достовірності отриманих результатів.
- 7) Побудова графіків, зокрема:
  - залежність даних радіосигналу, шуму, модульованих/демодульованих реалізацій в залежності від часу;
  - енергетичні взаємозалежності між корисним радіосигналом, модульованою/демодульованою реалізацією, завадним радіосигналом та завадами різних потужностей.
  - графічна залежність достовірності від енергетичних показників відношення сигнал/шум.

Розроблений алгоритм забезпечує процедуру проведення

експерименту по оцінюванню рівня завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією.

На рис. 3 зображено алгоритмічне забезпечення обчислення показника достовірності.

Для розробки програмного забезпечення щодо оцінювання завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією використано середовище Matlab.

На рис. 4 відображено тестовий корисний радіосигнал як об'єкт дослідження та балансно-модульований (частота несучої 100 Гц).

Процес балансної модуляції організовано при використанні програмного коду:

```
Fcchannel=100;  
Fsradioin=350;  
radiomod=ammod(x,Fcchannel,Fsradioin);
```

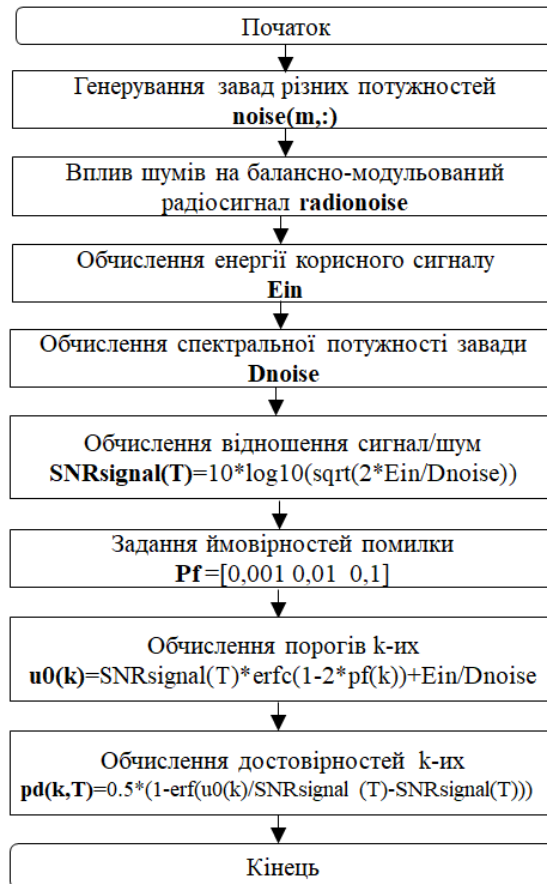
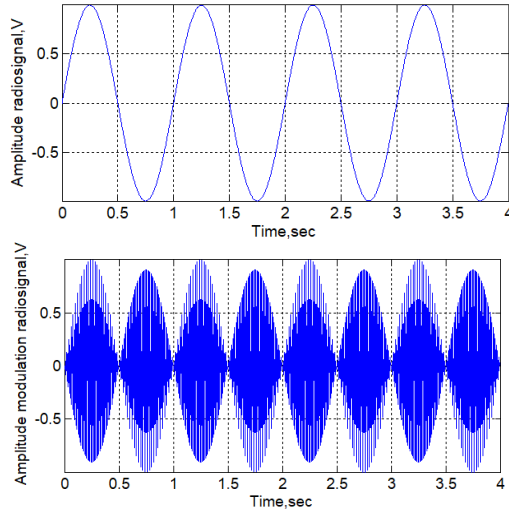


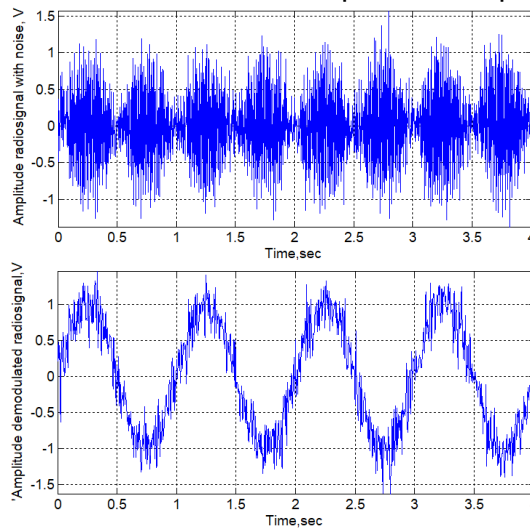
Рис. 3. Алгоритм обчислення показника достовірності



(а) (б)

Рис. 4. Вигляд корисного тестового радіосигналу (а) та балансно-модульований з частотою несучою 100 Гц

Для визначення рівня завадозахищеності дані балансно-модульованих сигналів корисний сигнал (рис. 5) піддано адитивному впливу білого гаусівського шуму. Модульований та демодульований радіосигнали під впливом завади відображено на рис. 5.



(а) (б)

Рис. 5. Реалізація демодульованого балансно-модульованого радіосигналу із БДГШ (несуча 100 Гц) (а) та демодульований радіосигнал (б)

Процес демодуляції радіосигналу організовано програмним кодом:

```
radiodemod=amdemod(addnoise,Fcchannel,Fsradioin)
```

Шумова складова після демодуляція зображена на рис. 6.

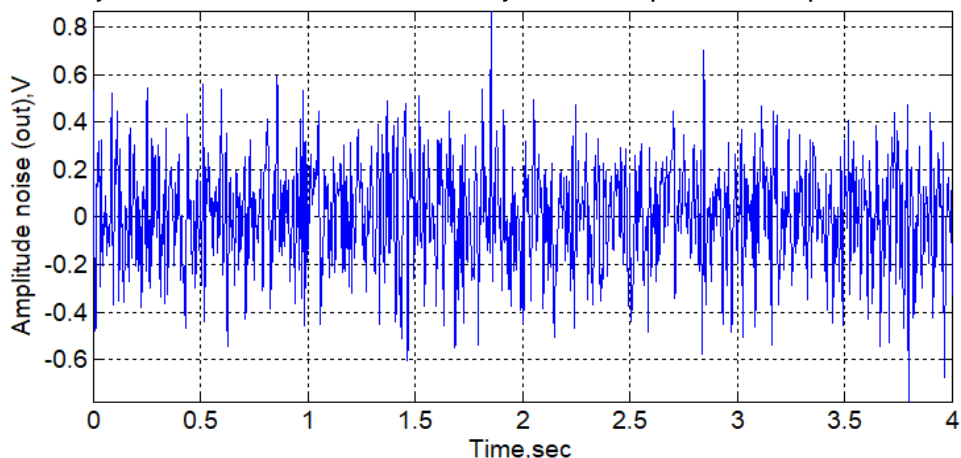


Рис. 6. Шум після демодуляції

Відстежено як енергія шуму після демодуляції є залежною від СКВ БГШ на вході у вигляді рис. 7.

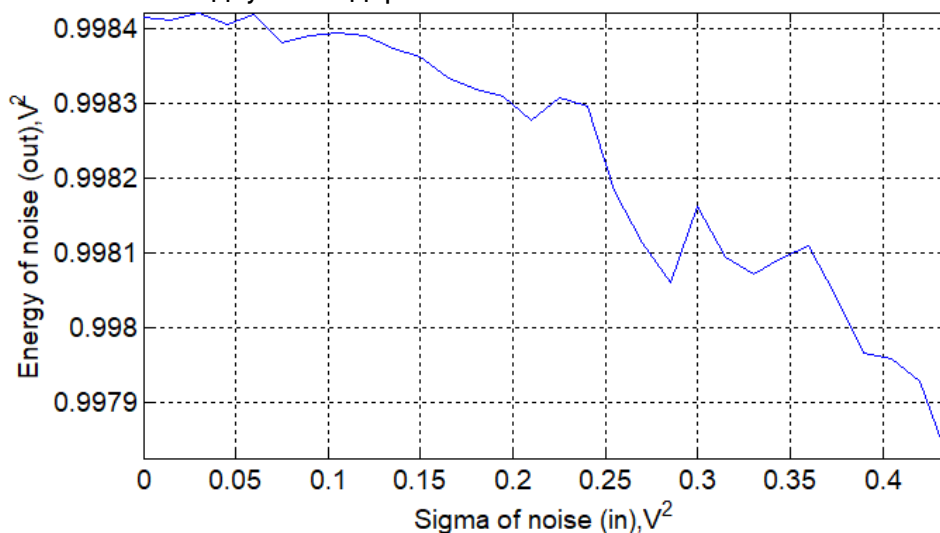


Рис. 7. Залежність енергії шуму на виході від СКВ шуму на вході



З рис. 7 видно, що при прирості потужності БГШ шумова компонента демодельованого радіосигналу знижується.

Для відображення рівня завадозахищеності застосуємо також залежність SNR від середньоквадратичного відхилення вхідного шуму розроблено код:

```
Eout=sum(radiodemod.^2);
for lev=1:length(level)
snr(lev)=10*log(Eout/E(lev));
end
```

Результат роботи коду відображено на рис. 8.

Встановлено, що при збільшенні середньоквадратичного відхилення вхідного шуму, який впливає на кала зв'язку, з меншою пропорційністю експоненційно збільшується відношення сигнал/шум на виході.

На основі виразів (3–4) розраховано криві виявлення радіосигналу при використанні коду додатку В, відображено на рис. 9.

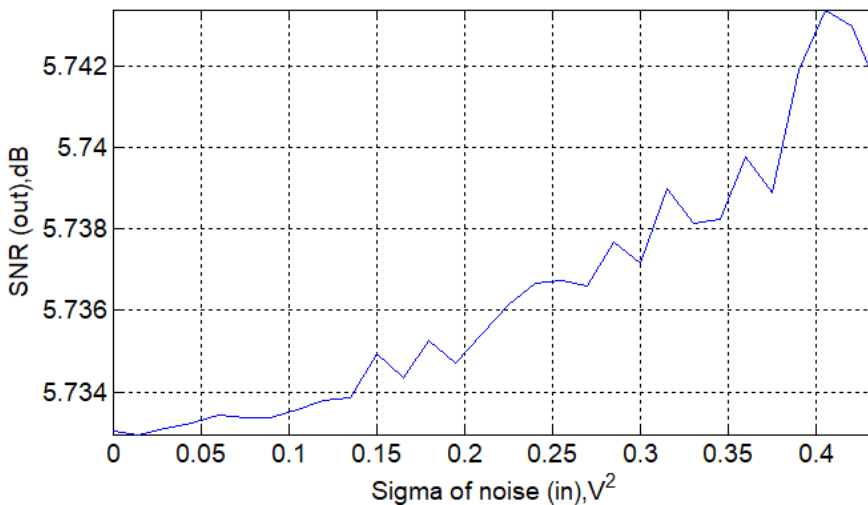


Рис. 8. Залежність відношення вихідного сигнал-шум (SNR) від середньоквадратичного відхилення вхідного БГШ (0,001–0,07)

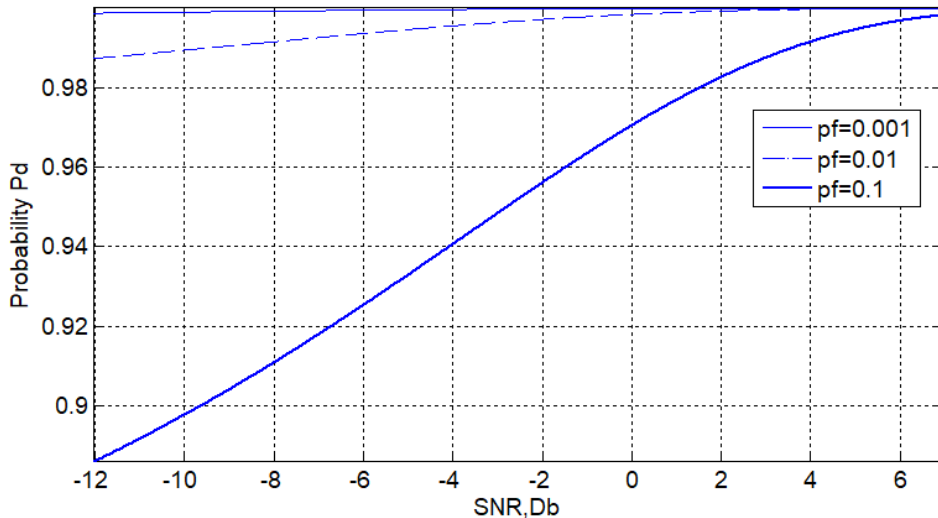


Рис. 9. Криві достовірності виявлення корисного радіосигналу

За отриманими результатами обчислення кривих достовірностей встановлено, що ймовірності  $p_F$  і  $p_D$  не є залежними від форми радіосигналу, а визначається лише піком вихідного відношення SNR. При збільшенні SNR ймовірність виявлення є вищою, а при меншій ймовірності помилки достовірність також є вищою при порівнянні з більшими показниками помилок.

На базі алгоритму, розроблено програмний код обчислення показника достовірності:

```
m=0;
for stdlevel=0.1:0.05:1.5
m=m+1;
noise(m,:)=normrnd(0,stdlevel,length(radioin),1);
end;
for lev=1:m
radionoise(lev,:)=radiomod+noise(lev,:);
end
Ein=sum(radioin.^2)*dt;
for T=1:m
Dnoise=sum((radionoise(T,:)-radioin).^2);
Dnoise=Dnoise/(length(radioin)-1);
SNRsignal(T)=10*log10(sqrt(2*Ein/Dnoise));
for k=1:3
u0(k)=SNRsignal(T)*erfc(1-2*pf(k))+Ein/Dnoise;
```

```
pd(k,T)=0.5*(1-erf(u0(k)/SNRsignal (T)-SNRsignal(T)))
end;
end;
figure
plot(pd(1,:)); hold on; plot(pd(2,:)); plot(pd(3,:)); hold off
ylabel('Probability Pd');
xlabel('SNR,Db');
```

Результати обчислення показників достовірності відображено у вигляді графічної залежності достовірності каналу зв'язку з балансною модуляцією від SNR на рис. 10–11.

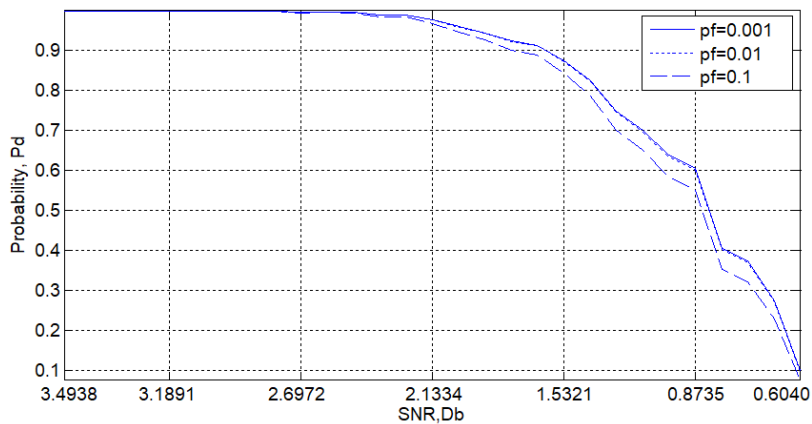


Рис. 10. Залежність показника достовірності від SNR при різних ймовірностях помилок (частота несучої 100 Гц)

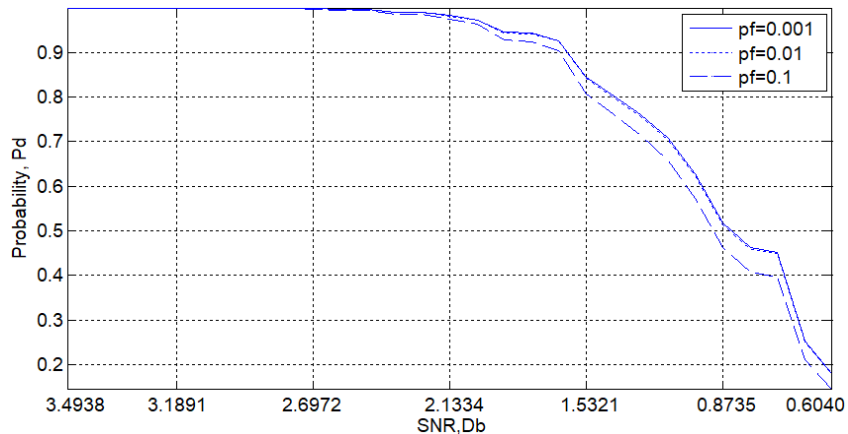


Рис. 11. Залежність показника достовірності від SNR при різних ймовірностях помилок (частота несучої 150 Гц)

Згідно отриманих даних достовірності (рис. 10, 11) встановлено, що при зменшенні відношенні SNR показник достовірності зменшується, і не залежить від частоти несучої при передачі сигналів по каналу зв'язку з балансною модуляцією.

**Висновки.** Реалізовано математичне та алгоритмічне забезпечення для визначення рівня завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією на основі показників середньоквадратичного відхилення, відношення SNR на вході/виході та достовірності виявлення згідно критерію Неймана – Пірсона. Реалізовано програмне забезпечення в середовищі Matlab для визначення рівня завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією за наявності впливу завад. Проведено дослідження експериментальним шляхом комп'ютерного моделювання та імітації умов передачі радіосигналів для визначати рівня завадозахищеності каналу передачі даних при баланській модуляції за наявності впливу завад різної потужності.

1. Бабак В. П., Хандецький В. С., Шрюфер Е. Обробка сигналів : підручник. Київ, 1999. 250 с. 2. Сверхширокополосные технологии в радиолокации / под редакцией Тейлора Д. Д. Бока Ратон; Лондон; Нью-Йорк; Вашингтон, 2000. 3. Haworth D. P., Smith N. G., Bardelli R., Clement T. Interference localization for Eutelsat satellites – the first European transmitter location system. *International Journal of satellite communications*. 1997. Vol. 15. Pp. 155–183. 4. Haworth D. P. Locating the source of an unknown signal : U.S. Patent 6018312, Jan. 25, 2000. 5. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing. *IEEE Trans. on acoustics, speech and signal process*. 1981. Vol. ASSP-29, no. 3. Pp. 588–599. 6. Wu R., Zhang Y., Huang Y., Xiong J., Deng Z. A Novel Long-Time Accumulation Method for Double-Satellite TDOA/FDOA Interference Localization. *Radio Science*. 2018. No. 53. Pp. 129–142. 8. Дунець В. Л., Шилівський Н. І., Щирба О. Ю., Гуменюк Д. О., Чирський Т. В. Алгоритм оцінювання завадозахищеності каналу зв'язку. *Актуальні задачі сучасних технологій* : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 грудня 2022) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя та ін. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 202 с. ISBN 978-617-7875-49-8. 9. Куц Ю., Трач Н., Дунець В. Моделювання радіосигналу із фазовою модуляцією для оцінювання завадостійкості зв'язку. *Інформаційні моделі, системи та технології* : матеріали ІХ науково-технічної конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 8–9 грудня 2021 р.). Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2021. С.10.

## REFERENCES:

1. Babak V. P., Khandetskyi V. S., Shriufer E. Obrobka syhnaliv : pidruchnyk. Kyiv, 1999. 250 s.
2. Sverkhshyrokopolosnye tekhnolohii v radyolokatsii / pod redaktsyei Teilora D. D. Boka Raton; London; Niu-York; Vashynhton, 2000.
3. Haworth D. P., Smith N. G., Bardelli R., Clement T. Interference localization for Eutelsat satellites – the first European transmitter location system. *International Journal of satellite communications*. 1997. Vol. 15. Pp. 155–183.
4. Haworth D. P. Locating the source of an unknown signal : U.S. Patent 6018312, Jan. 25, 2000.
5. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing. *IEEE Trans. on acoustics, speech and signal process*. 1981. Vol. ASSP-29, no. 3. Pp. 588–599.
6. Wu R., Zhang Y., Huang Y., Xiong J., Deng Z. A Novel Long-Time Accumulation Method for Double-Satellite TDOA/FDOA Interference Localization. *Radio Science*. 2018. No. 53. Pp. 129–142.
8. Dunets V. L., Shylivskyi N. I., Shchyrba O. Yu., Humeniuk D. O., Chyrskyi T. V. Alhorytm otsiniuvannia zavadozakhyshchenosti kanalu zviazku. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii* : zb. tez dopovidei XI mizhnar. nauk.-prakt. konf. Molodykh uchenykh ta studentiv, (Ternopil, 7–8 hrudnia 2022) / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Tern. natsion. tekhn. un-t im. I. Puliuia ta in. Ternopil : FOP Palianytsia V.A., 2022. 202 s. ISBN 978-617-7875-49-8.
9. Kuts Yu., Trach N., Dunets V. Modeliuvannia radiosyhnalu iz fazovoii moduliatsiieiu dlia otsiniuvannia zavadozakhyshchenosti zviazku. *Informatsiini modeli, systemy ta tekhnolohii* : materialy IX naukovo-tekhnichnoi konferentsii Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puliuia, (Ternopil, 8–9 hrudnia 2021 r.). Ternopil : Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichniy universytet imeni Ivana Puliuia, 2021. S.10.

---

**Dunets V. L., Candidate of Engineering (Ph.D.), Khvostivska L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Palianytsia Y. B., Candidate of Engineering (Ph.D.)** (Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil)

### **MATHEMATICAL, ALGORITHMIC AND SOFTWARE PROVISION OF ASSESSMENT OF INTERFERENCE PROTECTION OF COMMUNICATION CHANNELS WITH BALANCED MODULATION**

**A study was conducted on the process of transmitting a radio signal with balanced modulation in a communication channel under the influence of interference, which is represented as the sum of the useful radio signal and interference, using developed software in the**

**Matlab environment. Test signals were generated, subjected to balanced modulation, subjected to additive interference, and then underwent balanced demodulation. The results of evaluating the interference immunity of the channels were displayed in the form of graphs, based on the indicators of root mean square deviation and signal-to-noise ratio (SNR) at the input/output. To evaluate the reliability of detection, the Neyman – Pearson criterion was applied, and algorithmic and software tools based on this criterion were developed in the Matlab environment.**

***Keywords:* interference immunity; communication channel; balanced modulation; Matlab.**