

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.2:004.358

К. В. ГОНЧАРОВ^{1*}, Р. В. РИБАЛКА^{2*}, В. В. МАЛОВІЧКО^{3*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077

^{2*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

^{3*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

Підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації

Мета. Удосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації шляхом підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних через рейкову лінію. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено аналіз існуючих рішень щодо вдосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації. Проведено порівняльну оцінку ємності каналу передачі даних в системі автоматичної локомотивної сигналізації з числовим кодуванням АЛСН та потенційної ємності каналу через рейкову лінію. Запропонована система команд багатозначної автоматичної локомотивної сигналізації, яка крім традиційних команд АЛСН дає змогу передавати на локомотив інформацію про обмеження швидкості на станціях, постійні обмеження відповідно до особливостей залізничних ділянок, а також інформацію про поточну поїзну ситуацію на перегоні з урахуванням можливого збільшення швидкостей до 250 км/год. Для підвищення завадостійкості каналу передачі даних запропоновано використовувати код Файра та квадратурну фазову маніпуляцію QPSK. Визначено твірний поліном коду Файра, розрахована інформаційна швидкість та час передачі однієї команди. **Результати.** Для дослідження завадостійкості запропонованої системи розроблено імітаційну модель, програмний код якої написаний мовою Python. Встановлено, що код Файра (12,6) гарантовано виявляє всі помилки, крім чотирикратних, шестикратних та восьмикратних. Для усунення таких помилок запропоновано виконувати багатократний прийом кожної команди. Відповідно до результатів моделювання загальний коефіцієнт невиявлення для однократного прийому дорівнює 0,0087, для двократного прийому – $1,6 \cdot 10^{-5}$. У разі трикратного прийому невиявлення помилок під час моделювання не фіксувалось. **Наукова новизна.** Авторами цієї роботи запропоновано комплекс рішень для удосконалення неперервної системи автоматичної локомотивної сигналізації: збільшення ентропії джерела; зменшення інформаційних втрат завдяки застосуванню завадостійкого коду Файра та чотирипозиційної фазової маніпуляції; підвищення частоти передачі повідомлень та багатократний прийом. **Практична значимість.** Впровадження запропонованих рішень дозволить підвищити ємність та завадостійкість каналу передачі даних через рейкову лінію, розширити систему команд автоматичної локомотивної сигналізації з урахуванням обмежень швидкості на станціях, інформації про встановлену швидкість для швидкісних залізничних ліній, а також постійних обмежень відповідно до особливостей залізничних ділянок.

Ключові слова: автоматична локомотивна сигналізація; рейкова лінія; ємність каналу передачі; ентропія джерела; завадостійке кодування; код Файра; чотирипозиційна фазова маніпуляція; імітаційне моделювання

Вступ

Система автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) забезпечує передачу на локомотив інформації про сигнали колійних світлофорів, здійснює контроль швидкості руху поїзда, перевірку пильності машиніста та керування електропневматичним клапаном автостопу. Від надійної та ефективної роботи АЛС багато в чому залежить безпека руху поїздів [10, 20].

Наразі в Україні застосовується система автоматичної локомотивної сигналізації безперервної дії з числовим кодуванням АЛСН. У такій системі для утворення каналу зв'язку між колійними та локомотивними пристроями застосовується рейкова лінія (РЛ), через яку можуть передаватись три кодових сигнали (три команди): *З*, *Ж* та *ЧЖ*. Це дає змогу машиністу отримати інформацію про вільність двох блок-ділянок попереду поїзда та вжити заходів для підтримання безпечної швидкості руху з можливістю зупинитися перед перешкодою за напрямком руху [20].

В умовах підвищення швидкостей руху поїздів збільшується їх гальмівний шлях. Це викликає необхідність передавати на локомотив інформацію про вільність більшої кількості блок-ділянок попереду. В системі команд АЛСН також не враховуються постійні та тимчасові швидкісні обмеження на шляху прямування, обмеження швидкості в залежності від маршруту руху станцією. Крім низької інформативності до недоліків системи АЛСН відносяться: висока інерційність, низька завадостійкість, реалізація на застарілій елементній базі, а також нестабільна робота в межах станції на коротких рейкових колах.

Застосування цифрового радіоканалу замість каналу зв'язку на базі РЛ дає змогу суттєво підвищити інформативність системи АЛС. Зокрема, в Європейській системі керування залізничними перевезеннями ERTMS для передачі команд керування на локомотив використовується канал радіозв'язку GSM-R [16, 15, 19, 20]. В роботі [14] для забезпечення безпечної передачі даних на локомотив пропонується використовувати транкінговий радіозв'язок TETRA у поєднанні з технологією мобільного зв'язку 5G. На даний час замість застарілого стандарту GSM-R на базі технології 5G NR розробляється майбутня система мобільного

зв'язку для залізничного транспорту FRMCS, впровадження якої забезпечить телекомунікаційні потреби всіх залізничних служб та сприятиме розвитку «розумної залізниці» [21]. В Україні система GSM-R не використовується, а впровадження мережі мобільного зв'язку FRMCS чи інших сучасних телекомунікаційних систем потребує дуже великих фінансових ресурсів. На жаль, у зв'язку із воєнним станом та складною економічною ситуацією такі системи найближчим часом навряд чи з'являться в Україні. Тому головним каналом передачі даних на локомотив залишається канал через рейкову лінію.

У роботі [1] проаналізовано статистику відмов системи АЛСН. Визначено, що основною причиною відмов є зношеність апаратури, перш за все це стосується локомотивного дешифратора. Встановлено також, що причинами збоїв у системі АЛСН зокрема є спотворення часових параметрів коду, намагніченість рейок та нестабільне живлення.

Одним із напрямів вдосконалення системи АЛСН є оновлення локомотивної апаратури та впровадження більш ефективних методів обробки сигналів. В роботі [12] для підвищення завадостійкості системи АЛСН запропонований удосконалений метод дешифрування сигналів, який базується на застосуванні спектрального аналізу та Wavelet перетворення. Автори роботи [6] пропонують використовувати неймережеву модель для розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН. У [9] для своєчасного виявлення спотворень сигналу в системі АЛСН запропоновано використовувати адаптивну систему нейронечіткого логічного висновку (ANFIS) та ентропію Шеннона енергії вейвлет-пакетів (WPESE). Для захисту локомотивної сигналізації від завад в роботі [17] пропонується метод обробки сигналів із застосуванням алгоритму оптимізації PSO та глибокої нейронної мережі DBN. Проте все це не вирішує проблему низької інформативності та швидкодії системи АЛСН.

Інший напрям вдосконалення системи АЛС пов'язаний із застосуванням більш досконалих методів передачі даних через РЛ, що крім підвищення завадостійкості дасть змогу передавати більшу кількість команд та збільшити швидкість передачі. В роботі [13] для передачі ко-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

манд АЛС запропоновано використовувати множинний доступ з кодовим розділенням (CDMA) та диференціальну бінарну фазову маніпуляцію (DBPSK), а в [11] – ортогональне мультиплексування з частотним розділенням (OFDM) та квадратурну фазову маніпуляцію (QPSK). Технології CDMA та OFDM передбачають застосування широкосмугових каналів зв'язку, проте рейкова лінія має відносно вузьку смугу пропускання, яка суттєво залежить від довжини РЛ. Тому впровадження таких технологій на ділянках з довгими РЛ може бути проблемним.

Враховуючи вказане, актуальною залишається задача вдосконалення системи АЛС та пошуку більш ефективних методів передачі даних через рейкову лінію.

Мета

Метою роботи є вдосконалення системи автоматичної локомотивної сигналізації шляхом підвищення ємності та завадостійкості каналу передачі даних через рейкову лінію.

Методика

Оцінка ємності каналу в системі АЛСН. Система зв'язку складається з джерела повідомлень, каналу передачі та отримувача повідомлень (рис. 1) [4, 18]. В цифрових системах на передавальній стороні також застосовується кодер, який може виконувати одну або кілька функцій: зменшення інформаційної надмірності повідомлення, шифрування даних, завадостійкості кодування. На приймальній стороні декодер виконує зворотні функції. Канал містить перетворювач повідомлення на сигнал, середовище передачі та перетворювач сигналу на повідомлення. Через вплив завад та спотворення форми сигналу в каналі відбуваються інформаційні втрати.

В системі АЛСН джерело формує одне з трьох повідомлень a_1, a_2, a_3 (коди *З*, *Ж* та *ЧЖ*) відповідно до стану колійного світлофора та кількості вільних блок-ділянок. Повідомлення перетворюється на числовий кодовий сигнал, який передається через РЛ (середовище передачі) та завдяки індуктивному зв'язку наводиться у локомотивних котушках АЛСН. Локомотивний приймач виконує фільтрацію та підсилення отриманого сигналу. Дешифратор числових ко-

дових сигналів розшифровує отримане повідомлення та вмикає відповідний сигнал на локомотивному світлофорі. Завдяки цьому повідомлення передається машиністу.

Припустимо, що джерело повідомлень (рис. 1) генерує повідомлення a_i (одна з трьох команд АЛСН), тобто має алфавіт $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ об'ємом $N = 3$; отримувач повідомлень (локомотивні пристрої АЛСН) має алфавіт B . Тоді швидкість передачі інформації в дискретному каналі із завадами (середня кількість пересланої інформації за [2]) визначається наступним виразом [4]:

$$R = f_{\text{сер}} [H(A) - H(A|B)] \quad [\text{біт/с}], \quad (1)$$

де $H(A)$ – ентропія джерела повідомлень АЛСН за Шенноном [2, 4]; $H(A|B)$ – умовна ентропія [2, 4], що характеризує втрати інформації у каналі зв'язку (через дію завад та спотворення форми сигналу); $f_{\text{сер}} = 1/T_{\text{сер}}$ – середня частота повідомлень; $T_{\text{сер}}$ – середня тривалість одного повідомлення (визначається типом трансмітера – КПТШ–5 або КПТШ–7).

За фіксованого $f_{\text{сер}}$, максимально можлива інформаційна швидкість (1) в каналі АЛСН досягається за максимального значення $H(A)$ та мінімального значення $H(A|B) = 0$ (тобто втрати інформації в каналі відсутні). Визначимо максимально можливу ентропію джерела для випадку, коли всі повідомлення незалежні та рівновірогідні [2]:

$$H_{\text{max}}(A) = \log_2 N = \log_2 3 \approx 1,585 \text{ (біт)}. \quad (2)$$

Тоді з (1) оцінка максимально можливої інформаційної швидкості в каналі АЛСН має такий вигляд:

$$R_{\text{max}} = \frac{H_{\text{max}}(A)}{T_{\text{сер}}} [\text{біт/с}]. \quad (3)$$

Тривалість кодового циклу АЛСН при використанні трансмітера КПТШ–5 складає $T_{\text{сер}} = 1,6$ с, а КПТШ–7 – $T_{\text{сер}} = 1,86$ с. Тому відповідно виразу (3) за умови використання КПТШ–5:

$$R_{\max} \approx 1,585/1,6 \approx 0,99 \text{ (біт/с)},$$

а за умови використання КПТШ–7:

$$R_{\max} \approx 1,585/1,86 \approx 0,85 \text{ (біт/с)}.$$

В системі АЛСН перемикавання локомотивного світлофору відбувається тільки після прийому трьох кодових циклів, тобто застосовується велика інформаційна надмірність. З урахуванням цього, інформаційна швидкість в каналі АЛСН зменшується ще втричі і становить 0,28 біт/с та 0,33 біт/с, відповідно.

Оцінимо ємність каналу передачі даних через рейкову лінію. Розглянемо РЛ як безперер-

вний канал передачі з обмеженими потужностями сигналу та шуму. Відповідно до теореми Шеннона-Гартлі [4] ємність такого каналу при адитивному білому гаусовому шумі залежить від ширини смуги пропускання F_k та відношення сигнал/шум SNR :

$$C = F_k \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) \text{ [біт/с]}, \quad (4)$$

де P_c – середня потужність сигналу АЛСН;

$P_{\text{ш}}$ – середня потужність шуму (завади).

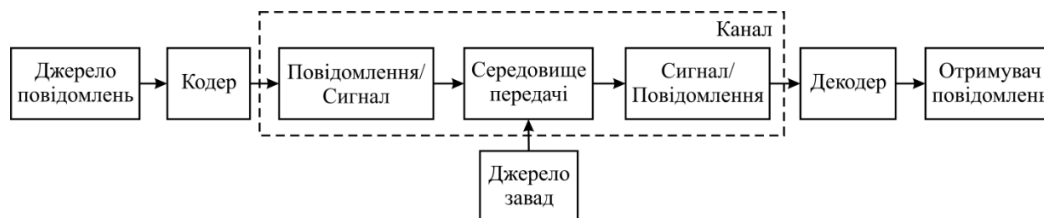


Рис. 1. Структурна схема системи зв'язку

Fig. 1. Communication system block diagram

Ширина F_k частотної смуги пропускання РЛ залежить від її довжини, стану баласту, типу рейок, стикових з'єднувачів та інших факторів. Система АЛС повинна забезпечувати надійну передачу повідомлень на локомотив для будь-якої довжини РЛ, яка для деяких типів рейкових кіл (РК) може досягати значення 2,6 км. В доступних джерелах, на жаль, не вдалось виявити інформацію про натурні експерименти з визначення частотної характеристики РЛ довжиною 2,6 км. Під час моделювання передачі сигналу через РЛ на відстань 1 км в [11] використано OFDM зі смугою частот 5,12...7,39 кГц, при цьому починаючи з 10 кГц загасання в РЛ оцінено як високе. З практики експлуатації тональних рейкових кіл (ТРК) в Україні, для несучої частоти сигнального струму 5 кГц гранично допустима довжина РЛ складає 0,2 км; для 420 Гц – 1 км. Враховуючи оцінки ефективної смуги частот РЛ у [8] і [11] та досвід експлуатації ТРК, в якості досить помірної оцінки в даній роботі припускається $F_k = 300$ Гц.

Припустимо, що $SNR = 1$, тобто потужність завади дорівнює потужності сигналу АЛСН. Тоді за (4):

$$C = 300 \log_2 (1 + 1) = 300 \text{ (біт/с)}. \quad (5)$$

Білий гаусів шум має найбільшу ентропію серед безперервних завад обмеженої потужності. Проте завади в каналі передачі АЛСН суттєво відрізняються від білого шуму. Там діють потужні зосереджені за спектром завади (гармоніки тягового струму, завади від контактної мережі, сигнали контролю вільності рейкового кола тощо) та імпульсні завади, які виникають внаслідок перемикавання обмоток тягових двигунів електровозів, короткочасного порушення контакту між пантографом та контактною мережею та інших комутаційних процесів. Ємність каналу з такими завадами також можна розрахувати відповідно до виразу (4). При цьому в якості потужності шуму необхідно використовувати ентропійну потужність, тобто потужність еквівалентного білого шуму, який має таку саму ентропію, як дана завада [4].

Визначення ентропійної потужності завад, що діють в РЛ, потребує окремих досліджень. Для таких завад відношення сигнал/шум може сильно відрізнятися від одиниці. Тому отримане у виразі (5) значення ємності каналу передачі на базі РЛ (300 біт/с) є дуже приблизним.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Проте, навіть при дуже низькому відношенні сигнал/шум, значення ємності буде суттєво більшим, ніж інформаційна швидкість в системі АЛСН (0,33 біт/с або 0,28 біт/с залежно від типу трансмітера). Таким чином, є суттєвий ресурс для збільшення ємності каналу передачі в системі АЛС. Дуже низька інформаційна швидкість каналу АЛСН пов'язана з низькою значністю системи (використовуються тільки три кодових сигнали) та великою тривалістю кодового циклу.

Ємність дискретного каналу із завадами визначається наступним чином [4]:

$$C = f_{\text{сеп}} \cdot \max[H(A) - H(A|B)] \quad [\text{біт/с}], \quad (6)$$

де максимум враховує всі можливі джерела повідомлень на вході каналу.

Відповідно до (6) можна виділити наступні напрямки підвищення ємності каналу АЛС:

1) збільшення ентропії джерела $H(A)$ за рахунок розширення алфавіту (використання більшої кількості команд);

2) зменшення інформаційних втрат $H(A|B)$ завдяки використанню завадостійких методів кодування повідомлень і модуляції сигналів, підвищення відношення сигнал/шум;

3) підвищення частоти передачі повідомлень $f_{\text{сеп}}$.

Система команд АЛС. В роботі [13] нами запропонована система команд для багатозначної автоматичної локомотивної сигналізації, яка враховує можливе підвищення швидкості руху поїздів до 250 км/год. Дана система містить:

1) три команди для регулювання руху поїздів в межах перегону при використанні тризначного автоблокування (аналог кодів *З*, *Ж* та *ЧЖ*);

2) одну додаткову команду для регулювання руху при чотиризначному автоблокуванні;

3) чотири команди для передачі інформації про встановлену швидкість руху на станції при установці маршруту прийому на бокову колію з відхиленням по стрілочних переводах, які мають хрестовини різних марок;

4) п'ять команд для передачі інформації про встановлену швидкість 160, 180, 200, 220 та 250 км/год (дані команди передбачені для високошвидкісних поїздів);

5) три резервних команди, які можуть застосовуватись для передачі додаткової інфор-

мації з урахуванням конкретних умов експлуатації лінії.

Таким чином, об'єм алфавіту запропонованої системи АЛС дорівнює 16. Для передачі команд будемо використовувати двійкові кодові комбінації (КК). Визначимо мінімально необхідну кількість інформаційних елементів в кожній комбінації

$$k \geq \log_2 N = \log_2 16 = 4. \quad (7)$$

Завадостійке кодування. Для компенсації інформаційних втрат у каналі передачі застосовуються різні види завадостійких кодів [4, 5, 18]. При використанні блокових роздільних кодів до інформаційних елементів додаються перевірочні елементи, що забезпечує інформаційну надмірність повідомлення та дає можливість виявляти та/або виправляти помилки на приймальній стороні.

В РЛ діють гармонічні завади великої тривалості, що може призвести до одночасного спотворення кількох елементів КК, тобто до появи пакету помилок. У зв'язку з цим для забезпечення завадостійкості команд АЛС пропонуємо використовувати циклічний код Файра, так як він дає можливість виявляти та виправляти пакетні помилки.

Твірний поліном коду Файра $G_\Phi(x)$ визначається наступним чином [4]:

$$G_\Phi(x) = G(x)(x^c \oplus 1). \quad (8)$$

де $G(x)$ – незвідний поліном ступеня t ; c – постійне число, яке не повинно ділитись без остачі на число $m = 2^t - 1$.

Ступені поліномів t та c обираються з урахуванням довжини можливих пакетів помилок. Припустимо, що $t = 2$, $c = 4$. Для обраних значень $m = 3$. Число c не ділиться без остачі на m , що задовольняє вимогам до (8).

Обираємо незвідний поліном другого ступеня $G(x) = x^2 \oplus x \oplus 1$ [4]. Відповідно до виразу (8) визначаємо твірний поліном коду Файра:

$$\begin{aligned} G_\Phi(x) &= (x^2 \oplus x \oplus 1)(x^4 \oplus 1) = \\ &= x^6 \oplus x^5 \oplus x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1. \end{aligned} \quad (9)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Обраний код Файра дає змогу [4]:

1) виявити будь-який одиничний пакет помилок із довжиною, що не перевищує $\rho = c + 1 = 5$;

2) виявити будь-яку комбінацію із двох пакетів помилок, довжина найменшого з яких не перевищує $t = 2$, а сума обох пакетів не перевищує $\rho = c + 1 = 5$.

Загальна кількість елементів КК визначається як найменше спільне кратне чисел m та c

$$n = HCK(m, c) = HCK(3, 4) = 12, \quad (10)$$

а кількість перевірочних елементів $r = t + c = 6$.

Таким чином, для передачі команд багатозначної системи АЛС пропонуємо використовувати циклічний код Файра (12,6), твірний поліном якого заданий виразом (9). Кожна двійкова комбінація такого коду містить шість інформаційних елементів, що відповідає умові (7). Обраний формат коду дає змогу передавати $2^6 = 64$ різних повідомлення. Це надає можливість розширити систему команд АЛС, запропоновану в роботі [13]. Зокрема, можна додати команди для передачі постійних обмежень швидкості з урахуванням особливостей залізничної ділянки, інформації про вільність або зайнятість залізничних переїздів, до яких наближається поїзд, та інше.

Схема модуляції. В системі АЛСН застосовується амплітудна маніпуляція (ASK), яка порівняно з частотною (FSK) та фазовою (PSK) маніпуляціями є найменш завадозахищеною. FSK та PSK мають значно кращу стійкість до впливу завад. Проте, одним із недоліків FSK є широкий частотний спектр маніпульованого сигналу, який займає суттєво більшу смугу частот порівняно з ASK та PSK [4].

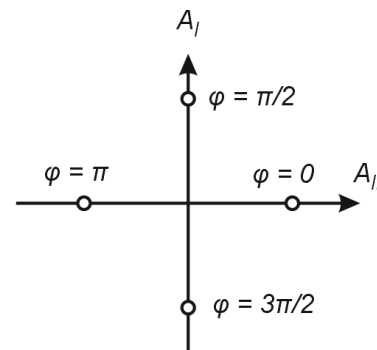
Спектр сигналу АЛС розташовується між гармонік тягового струму, частоти яких кратні значенню 50 Гц. При цьому з урахуванням перехідних ділянок амплітудно-частотної характеристики локомотивного фільтру ширина спектру сигналу АЛС не може перевищувати 25...30 Гц. Через це використовувати частотну модуляцію в системі АЛС недоцільно.

Для передачі сигналів АЛС через РЛ пропонуємо використовувати завадостійку квадратурну фазову маніпуляцію QPSK. Для спрощення процесу демодуляції сигналу обираємо диференціальну фазову маніпуляцію DQPSK, при

якій інформаційним параметром є не абсолютне значення початкової фази, а відносний фазовий зсув між двома сусідніми символами [3, 4, 7].

Сигнальне сузір'я для маніпуляції QPSK та приклад фазо-маніпульованого сигналу представлені на рис. 2. Фаза несучого сигналу може приймати одне з чотирьох значень, що дає змогу передавати два біта інформації за один символ. Таким чином, при використанні QPSK інформаційна швидкість вдвічі більше ніж швидкість передачі символів.

a – a



b – b

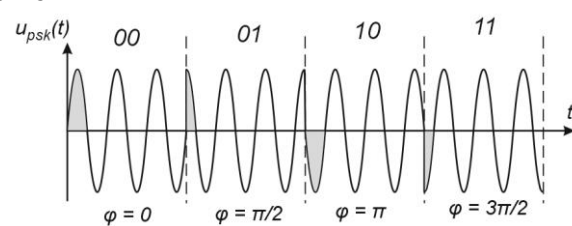


Рис. 2. Сигнальне сузір'я для схеми модуляції QPSK (а) та приклад фазо-маніпульованого сигналу (б)

Fig. 2. Signal constellation for QPSK modulation scheme (a) and example of phase-shift keyed signal (b)

Виберемо параметри QPSK сигналу АЛС. Частоти несучого сигналу систем АЛСН, які використовуються в Україні, дорівнюють 25 або 75 Гц. Для забезпечення можливості одночасного застосування рішення, запропонованого в даній роботі, та існуючих систем АЛСН, обираємо частоту несучого сигналу 125 Гц, яка розташовується між гармонік тягового струму 100 та 150 Гц. Таким чином пропонуємо наступні параметри QPSK сигналу АЛС:

- 1) частота несучого сигналу – 125 Гц;
- 2) ефективна ширина спектру – 20 Гц;
- 3) символна швидкість – 10 симв/с;
- 4) інформаційна швидкість (R) – 20 біт/с.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Визначимо час передачі одного повідомлення довжиною $n = 12$ біт:

$$T_{\text{ц}} = \frac{n}{R} = \frac{12 \text{ біт}}{20 \text{ біт/с}} = 0,6 (\text{с}). \quad (11)$$

Запропонована в даній роботі система дає змогу передавати одну із 64-х команд АЛС за 0,6 с, в той час як система АЛСН забезпечує передавання однієї з трьох команд за 5...6 с (тривалість трьох циклів кодового трансмітера). Таким чином, впровадження запропонованого рішення дозволить отримати значно кращі інформативність та швидкодію порівняно з АЛСН.

Результати

Для дослідження завадостійкості запропонованої системи на рівні повідомлень виконано моделювання методом Монте Карло. Відповідний програмний код написаний мовою Python. При проведенні моделювання обрано наступні параметри:

- 1) кількість інформаційних елементів в кожній КК – $k = 6$;
 - 2) кількість перевірочних елементів в КК – $r = 6$;
 - 3) твірний поліном коду Файра – $G_{\text{ф}}(x)$ відповідно до виразу (9);
 - 4) кількість ітерацій для кожної кратності помилки – $N_{\text{заг}} = 10^6$;
 - 5) кратності помилок – $l_{\text{пом}} = 1 \dots 12$.
- Моделювання проводили за наступним алгоритмом:

- 1) задати кратність помилки $l_{\text{пом}} = 1$;
- 2) сформувати 12-ти елементний двійковий вектор помилки $\bar{\xi}_i$, в якому кількість одиниць дорівнює $l_{\text{пом}}$, а розташування одиниць – випадкове (за рівномірним законом розподілу);
- 3) генерувати випадкову шестибітну інформаційну КК $\bar{u}_i$;
- 4) утворити завадостійку КК $\bar{v}_i$ шляхом застосування кодування кодом Файра до $\bar{u}_i$ за допомогою твірного поліному $G_{\text{ф}}(x)$;
- 5) обчислити КК на вході декодера $\hat{\bar{v}}_i$ як $\hat{\bar{v}}_i = \bar{v}_i \oplus \bar{\xi}_i$;
- 6) обчислити синдром помилки $\bar{s}_i$ шляхом декодування $\hat{\bar{v}}_i$ за допомогою твірного поліному $G_{\text{ф}}(x)$;
- 7) якщо $\bar{s}_i \neq 0$, то врахувати помилку як невиявлену;
- 8) виконати кроки 2)–7) $N_{\text{заг}}$ разів;
- 9) обчислити коефіцієнт невиявлення помилок:

$$K_{\text{нев}} = \frac{N_{\text{нев}}}{N_{\text{заг}}}. \quad (12)$$

де $N_{\text{нев}}$ – кількість невиявлених помилок;
 $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість КК з помилками.

- 10) виконати кроки 2)–9) для $l_{\text{пом}} = (2, 3, \dots, 12)$.

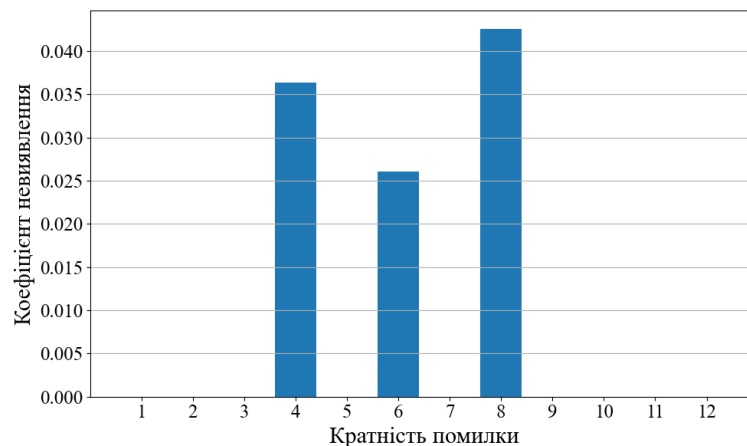


Рис. 3. Залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок для коду Файра (12,6)

Fig. 3. Dependence of the non-detection coefficient on the error rate for the Fire code (12,6)

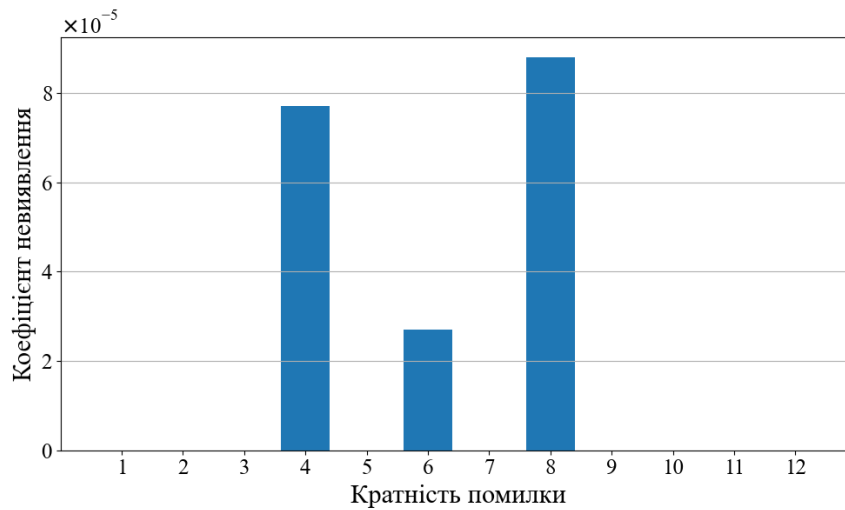


Рис. 4. Залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок при використанні коду Файра (12,6) та двократного прийому повідомлень

Fig. 4. Dependence of the non-detection coefficient on the error rate when using the Fire code (12,6) and double message receiving

Отримана в результаті моделювання залежність коефіцієнту невиявлення від кратності помилок представлена на рис. 3 та у табл. 1. Відповідно до результатів моделювання, код Файра (12,6) виявляє всі помилки крім чотирикратних, шестикратних та восьмикратних. Загальний коефіцієнт невиявлення (відношення кількості всіх невиявлених помилок будь-якої кратності до загальної кількості ітерацій $12N_{\text{заг}}$) дорівнює 0,0087.

В системах АЛС неперервної дії в межах блок-ділянки через рейкову лінію передається одна й та сама команда доки поїзна ситуація залишається без змін. Це створює умови для багатократного прийому кожної команди: рішення про отримання певної команди АЛС приймається тільки після того, як відповідна КК буде декодована без помилок кілька разів поспіль.

На рис. 4 та у табл. 1 представлені результати моделювання у разі використання коду Файра (12,6) та двократного прийому кожної команди. Як видно, завадостійкість суттєво покращилась: загальний коефіцієнт невиявлення помилок складає $1,6 \cdot 10^{-5}$. При моделюванні системи з трикратним прийомом команд випадків невиявлення помилок не зафіксовано.

Таблиця 1

Результати моделювання

Table 1

Simulation results

Кратність помилок	Коефіцієнт невиявлення	
	однократний прийом	двократний прийом
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0,0362	$7,7 \cdot 10^{-5}$
5	0	0
6	0,0263	$2,7 \cdot 10^{-5}$
7	0	0
8	0,0422	$8,8 \cdot 10^{-5}$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Наукова новизна та практична значимість

Авторами цієї роботи запропоновано комплекс рішень для вдосконалення неперервної системи автоматичної локомотивної сигналізації: збільшення ентропії джерела; зменшення інформаційних втрат завдяки застосуванню завадостійкого коду Файра та чотирипозиційної фазової маніпуляції; підвищення частоти передачі повідомлень та багатократний прийом.

Впровадження запропонованих рішень дозволить підвищити ємність та завадостійкість каналу передачі даних через рейкову лінію, розширити систему команд АЛС з урахуванням обмежень швидкості на станціях, інформації про встановлену швидкість для швидкісних залізничних ліній, а також постійних обмежень відповідно до особливостей залізничних ділянок.

Висновки

1. Система автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН, яка застосовується в Україні, має низьку інформативність, високу інерційність та низьку завадостійкість, реалізована на застарілій елементній базі. Один із напрямів вдосконалення системи АЛС пов'язаний із за-

стосуванням більш досконалих методів передачі даних.

2. Запропонована в даній роботі система дає змогу передавати на локомотив одну із 64-х команд АЛС. В тому числі інформацію про обмеження швидкості на станціях, а також інформацію про поточну поїзну ситуацію на перегоні з урахуванням можливого збільшення швидкостей до 250 км/год. Для забезпечення високої завадостійкості кожна команда кодується кодом Файра (12,6). Крім цього, для передачі команд через РЛ пропонується використовувати завадостійку квадратурну фазову маніпуляцію.

3. Завадостійкість запропонованої системи на рівні повідомлень підтверджується результатами імітаційного моделювання. Отримано залежність загального коефіцієнту невиявлення від кратності прийому кожної команди АЛС: при однократному прийомі – 0,0087, двократному – $1,6 \cdot 10^{-5}$, трикратному – невиявлення помилок не зафіксовано.

4. Дана робота передбачає проведення подальших досліджень за наступними напрямками: моделювання РЛ як лінії зв'язку, визначення ширини її смуги пропускання; дослідження завад, що діють в РЛ; дослідження інших завадостійких кодів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гололобова О. О., Буряк С. Ю., Гаврилюк В. І., Маркуль Р. В., Афанасов А. М., Білухін Д. С. Визначення причин порушень у роботі автоматичної локомотивної сигналізації. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6(96). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/257914>
2. ДСТУ ISO/IEC 2382:2017. Інформаційні технології. Словник термінів. (ISO/IEC 2382:2015, IDT). [Чинний від 2017-12-19]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 464 с.
3. Дудар О., Мішан В., Горященко К. Моделювання сигналів QPSK в середовищі SIMULINK. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*. 2023. Том 327, № 5(2). С. 167–172. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-167-172>
4. Кузьмін І. В., Троцишин І. В., Кузьмін А. І., Кедрус В. О., Любчик В. Р. *Основи теорії інформації та кодування* : підручник / за ред. І. В. Кузьміна ; вид. 3-тє., переробл. та допов. Хмельницький : ХНУ, 2009. 373 с.
5. Мартинюк Т., Войналович О. Класифікаційна модель методів цифрового кодування. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2024. Том 47, № 1. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-42-49>
6. Сотник В. О., Бабаєв М. М., Чепцов М. М. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2013. № 36. С. 67–79.
7. Ali A., Chimen M. F., Azpúrua M. A. Resilience of QPSK Radio Links Under Narrowband and Broadband Electromagnetic Interferences. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2024. Vol. 5. P. 2391–2400. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2024.3387339>

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

8. Alvarenga T. A., Cerqueira A. S., Filho L. M. A., Nobrega R. A., Honorio L. M., Veloso H. Identification and Localization of Track Circuit False Occupancy Failures Based on Frequency Domain Reflectometry. *Sensors*. 2020. Vol. 20, Iss. 24. P. 7259. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247259>
9. Havryliuk V. Detecting of Signal Distortions in Cab Signaling System Using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. (Istanbul, 7–11 Sep. 2020). Istanbul, 2020. P. 231–236. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165>
10. Havryliuk V., Radzikhovskiy K., Voznyak O. Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004>
11. Higuchi R., Mochizuki H., Nakamura H., Ishikawa R., Sano M., Nishida S. Application of OFDM transmission method for railway signaling system via track circuit. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1780, № 1. P. 012037. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1780/1/012037>
12. Hololobova O. O., Havryliuk V. I. Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress*. 2017. № 1(67). C. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92771>
13. Honcharov K. V., Rybalka R. V. Multi-Valued Automatic Cab Signaling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress*. 2021. № 6(96). C. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258171>
14. Hsiao L.-S., Lin I.-L. Integrating 5G and Terrestrial Trunked Radio into Railway Communication System for Railway Safety and Information Security. *Sensors and Materials*. 2024. Vol. 36, № 3. P. 1275–1285. DOI: <https://doi.org/10.18494/sam4875>
15. Knutsen D., Olsson N. O. E., Fu J. ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*. 2023. Vol. 6, № 1. P. 34–45. DOI: <https://doi.org/10.26599/jicv.2023.9210003>
16. Knutsen D., Olsson N. O. E., Fu. J. Capacity evaluation of ERTMS/ETCS hybrid level 3 using simulation methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2024. Vol. 30. 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100444>
17. Liu S., Yang S., Liu C., Liu T., Xiong Q. Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. Shenzhen, China. 2020. P. 248–254. DOI: <https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349>
18. Moon K. *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. Hoboken, New Jersey : Wiley-Interscience, 2005. 800 p.
19. Rosberg T., Thorslund B. Radio communication-based method for analysis of train driving in an ERTMS signaling environment. *European Transport Research Review*. 2022. Vol. 14, Iss. 18. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00542-5>
20. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg : Eurailpress, 2009. 448 p.
21. Vatakov V., Pencheva E., Dimitrova E. New Radio and Internet of Things Technologies for Future Railway Communications. *2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM)*. Sofia, Bulgaria. 2022. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/telecom56127.2022.10017323>

K. V. HONCHAROV^{1*}, R. V. RYBALKA^{2*}, V. V. MALOVICHKO^{3*}

^{1*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail k.v.honcharov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-0432-1077

^{2*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

^{3*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

Increasing the Capacity and Interference Immunity of the Data Transmission Channel in the Automatic Cab Signalling System

Purpose. Improvement of the automatic cab signaling (ACS) system by increasing the capacity and interference immunity of the data transmission channel based on the rail line. **Methodology.** To achieve the purpose, the analysis of existing solutions for improving the automatic cab signaling system has been performed. The comparative assessment of capacity the data transmission channel in the automatic cab signaling system ALSN with numerical coding and the potential capacity of the channel based on the rail line has been carried out. The system of commands of the multi-valued ACS has been proposed, that in addition to traditional ALSN commands, allows transmitting to the locomotive information about speed limits at stations, permanent restrictions according to the characteristics of railway sections, as well as information about the current train situation on the section, taking into account the possible increase in speeds to 250 km/h. To increase the interference immunity of the data transmission channel, it was proposed to use Fire code and quadrature phase shift keying QPSK. The generator polynomial of the Fire code has been determined, the information rate and transmission time of one command have been calculated. **Findings.** To study the interference immunity of proposed system, the simulation model has been developed, the program code of which is written in Python. It was determined that the Fire code (12,6) is guaranteed to detect all errors except for quadruple, sixfold and eightfold. To eliminate such errors, it is proposed to perform multiple receiving of each command. According to the simulation results, the total non-detection coefficient for single reception is 0.0087, for double reception is $1.6 \cdot 10^{-5}$. In the case of triple reception, no errors were detected during the simulation. **Originality.** The authors of this work proposed a set of solutions for improving the continuous system of automatic cab signaling: increasing the source entropy; reducing information losses by using the error-correcting Fire code and quadrature phase shift keying; increasing the frequency of message transmission and multiple receiving. **Practical value.** The implementation of the proposed solutions will allow increasing the capacity and interference immunity of the data transmission channel based on the rail line, expanding the ACS command system taking into account speed limits at stations, information about the set speed for high-speed railway lines, as well as permanent restrictions in accordance with the characteristics of railway sections.

Keywords: automatic locomotive signaling; rail line; transmission channel capacity; source entropy; noise-resistant coding; Faira code; four-position phase manipulation; simulation modeling

REFERENCES

- Hololobova, O. O., Buriak, S. Yu., Havryliuk, V. I., Markul, R. V., Afanasov, A. M., & Bilukhin, D. S. (2021). Determination of the Origin of Failures in the Operation of the Automatic Locomotive Signaling. *Science and Transport Progress*, 6(96), 5-13. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/257914> (in Ukrainian)
- Informatsiini tekhnologii. Slovyk terminiv, 464 DSTU ISO/IEC 2382:2017. (2017). (in Ukrainian)
- Dudar, O., Mishan, V., & Horiashchenko, K. (2023). Modeling QPSK Signals in SIMULINK Environment. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 327(5(2)), 167-172. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-167-172> (in Ukrainian)
- Kuzmin, I. V., Trotsyshyn, I. V., Kuzmin, A. I., Kedrus, V. O., & Liubchik, V. R. (2009). *Osnovy teorii informatsii ta koduvannia*. Khmelnytskyi: KhNU. (in Ukrainian)
- Martyniuk, T., & Voinalovych, O. (2024). Classification model of digital coding methods. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 47(1), 42-49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-42-49> (in Ukrainian)
- Sotnyk, V. O., Babaiev, M. M., & Cheptsov, M. M. (2013). Neiromerezheva model rozpoznavannia tryvalosti impulsiv ta intervaliv kodiv ALSN. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT*, 36, 67-79. (in Ukrainian)
- Ali, A., Chimen, M. F., & Azpúrua, M. A. (2024). Resilience of QPSK Radio Links Under Narrowband and Broadband Electromagnetic Interferences. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5, 2391-2400. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojcoms.2024.3387339> (in English)
- Alvarenga, T. A., Cerqueira, A. S., Filho, L. M. A., Nobrega, R. A., Honorio, L. M., & Veloso, H. (2020). Identification and Localization of Track Circuit False Occupancy Failures Based on Frequency Domain Reflectometry. *Sensors*, 20(24), 7259. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20247259> (in English)
- Havryliuk, V. (2020). Detecting of Signal Distortions in Cab Signalling System Using ANFIS and WPESE. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* (pp. 231-236), Istanbul, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263165> (in English)

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

10. Havryliuk, V., Radzikhovskiy, K., & Voznyak, O. (2024). Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*, 390, 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004> (in English)
11. Higuchi, R., Mochizuki, H., Nakamura, H., Ishikawa, R., Sano, M., & Nishida, S. (2021). Application of OFDM transmission method for railway signaling system via track circuit. *Journal of Physics: Conference Series*, 1780(1), 012037. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1780/1/012037> (in English)
12. Hololobova, O. O., & Havryliuk, V. I. (2017). Application of Fourier transform and Wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code. *Science and Transport Progress*, 1(67), 7-17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/92771> (in English)
13. Honcharov, K. V., & Rybalka, R. V. (2021). Multi-Valued Automatic Cab Signalling System Based on the CDMA Technology. *Science and Transport Progress*, 6(96), 14-21. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258171> (in English)
14. Hsiao, L.-S., & Lin, I.-L. (2024). Integrating 5G and Terrestrial Trunked Radio into Railway Communication System for Railway Safety and Information Security. *Sensors and Materials*, 36(3), 1275-1285. DOI: <https://doi.org/10.18494/sam4875> (in English)
15. Knutsen, D., Olsson, N. O. E., & Fu, J. (2023). ERTMS/ETCS Level 3: Development, assumptions, and what it means for the future. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, 6(1), 34-45. DOI: <https://doi.org/10.26599/jicv.2023.9210003> (in English)
16. Knutsen, D., Olsson, N. O. E., & Fu, J. (2024). Capacity evaluation of ERTMS/ETCS hybrid level 3 using simulation methods. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 30, 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100444> (in English)
17. Liu, S., Yang, S., Liu, C., Liu, T., & Xiong, Q. (2020). Research on Anti-interference Algorithm for Cab Signal Demodulation Based on Deep Learning. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)* (pp. 248-254). Shenzhen, China. DOI: <https://doi.org/10.1109/icarcv50220.2020.9305349> (in English)
18. Moon, K. (2005). *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. (in English)
19. Rosberg, T., & Thorslund, B. (2022). Radio communication-based method for analysis of train driving in an ERTMS signaling environment. *European Transport Research Review*, 14(18). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00542-5> (in English)
20. Theeg, G., & Vlasenko, S. (2009). *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg: Eurailpress. (in English)
21. Vatakov, V., Pencheva, E., & Dimitrova, E. (2022). New Radio and Internet of Things Technologies for Future Railway Communications. *2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM)* (pp. 1-4). Sofia, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1109/telecom56127.2022.10017323> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.08.2025

Прийнята до друку: 15.12.2025