

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕГМЕНТОВАНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ У МЕТОДІ НЕЛІНІЙНОЇ РЕАКЦІЇ

Запропонована модель розрахунку пропускної спроможності сумісного телекомунікаційного каналу у сегментованих кабельних лініях кабельних систем охорони периметрів об'єктів, що використовують метод нелінійної реакції для виявлення місця критичного uszkodження. Модель враховує параметри частотного та енергетичного ресурсу сегментованої лінії із нелінійними елементами під час передавання цифрових сигналів.

Ключові слова: метод нелінійної реакції, пропускна спроможність, сегментована кабельна лінія.

OLEG SERGHIOVYCH PYVOVAR
Khmelnitskyi National University

TELECOMMUNICATION PROPERTIES OF A SEGMENTED CABLE LINE IN THE NONLINEAR RESPONSE METHOD

The sensor cable line, along with its main function, can be used as a data link between the detectors and the system control center. In terms of simplicity and cost efficiency, it is advisable to use the nonlinear response method, which implies the use of nonlinear devices as damage control elements. A reasonable choice of the geometrical parameters of the line, the construction of the line segments, the level of misalignment of the segments, the model of consideration of the noise properties of the line was made in order to determine the bandwidth of the telecommunication channel. An analytical model was developed to determine the bandwidth of a segmented cable line with nonlinear elements based on the established limitations of the nonlinear method. The bandwidth estimation of the segmented touch line is estimated while varying the parameters of the cables used. The most optimal parameters for real application were highlighted. A noise scheme model is proposed to estimate the total noise level in a segmented cable line with Zener diodes. For typical Zener diodes and optimal transmission line parameters, the upper limits for the total noise level were set. Based on the nature of the nonlinear response method and the determined frequency and noise parameters for the digital telecommunication sensor channel, the lower bandwidth limit was estimated.

Keywords: nonlinear response method, throughput, segmented cable line.

Постановка проблеми

Системи охоронної сигналізації периметрів, що блокують периметри без огорожі, доцільно використовувати для охорони особливо важливих об'єктів: підгруп АП (сховищ з вибуховими матеріалами, грошових сховищ тощо) та АІ (ядерних реакторів, електростанцій тощо) шляхом встановлення їх перед основною огорожею для попередження можливого несанкціонованого проникнення на об'єкт, що охороняється або територію цього об'єкту. Вибір конкретних типів периметральних систем охоронної сигналізації проводиться [1] залежно від наявності різновиду механічного огороження; наявності смуги відчуження та її ширини; довжини периметра охорони; рельєфу місцевості тощо.

Системи контролю лінії також можуть використовуватись в якості систем сигналізації. Сама лінія для забезпечення низької вартості часто виступає і в якості сенсора, і в якості середовища доставки охоронної інформації. На даний час розроблена велика кількість типів сповіщувачів, що працюють на різноманітних фізичних принципах. Вартість сповіщувачів складає основну вартість усієї системи [2].

Сенсорна функція лінії зв'язку передбачає використання лінії одночасно і як оповіщувача. В такому випадку можливі два варіанти: безрозривний оповіщувач та оповіщувач розривного або контактного типу. В першому випадку зовнішній вплив не змінює параметри або характеристики лінії. Найбільш відомі безконтактні оповіщувачі емнісного або індуктивного типу.

Телекомунікаційна функція в рамках методу нелінійної реакції [3] полягає у можливості визначення зони розташування uszkodженого сегменту на основі сегментів, що залишилися неушкодженими. При цьому фактично реалізується нелінійне параметричне рівневе ущільнення – розділення інформації про аварійний стан (розрив або коротке замикання) сегменту лінії. Одночасно із проведенням контролю лінії цією самою лінією можуть передаватись сигнали контролю та керування від деяких автономних сенсорів або сповіщувачів низького енергоспоживання [2], в такому випадку доцільно провести аналіз пропускної спроможності лінії для обміну інформацією в такій системі.

Метою статті є встановлення вимог та проведення оцінювання пропускної спроможності телекомунікаційного каналу охоронних систем на основі використання сенсорної сегментованої кабельної лінії та методу нелінійної реакції для визначення зони критичного uszkodження.

Аналіз останніх джерел

Запропонований метод [3], що використовує суттєво нелінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ) стабілітронів забезпечує мінімізацію апаратних та кошторисних витрат для контролю сегментованої лінії передачі з можливістю створення телекомунікаційного каналу. Об'єднання функції лінії як сенсора, оповіщувача, енергетичного та телекомунікаційного (командно-телеметричного) каналу дозволяє забезпечити мінімізацію витрат на проектування, виготовлення та розгортання системи контролю лінії охоронних систем сигналізації несанкціонованого доступу.

У [4] доведена працездатність методу нелінійної реакції для встановлення місця розташування як для випадку розриву лінії, так і для випадку короткого замикання із застосуванням простих засобів вимірювання та за умови однобічного контролю. Запропоновано ряд аналітичних моделей контролю

ушкодження сегментів лінії за методом нелінійної реакції, що побудовані на основі кусково-лінійної апроксимації ВАХ стабілітронів як нелінійних елементів та власних параметрів сегментів сенсорної лінії передачі. Дослідження моделей [4] дозволило встановити комплексні умови для оптимізації параметрів кабельних ліній та використовуваних стабілітронів.

Також у роботі [4] представлено ряд графічних залежностей методу нелінійної реакції для типових кабельних ліній та стабілітронів широкого застосування. Аналіз моделей методу нелінійної реакції показав, що зі збільшенням значення струму витікання стабілітронів в зоні поєднання сегментів посилюється рівень нелінійного характеру залежності вхідної напруги від номера сегменту із критичним ушкодженням, що призводить до зменшення розрізнявальної спроможності щодо точного контролю ураження віддалених сегментів. Компенсація вказаного недоліку можлива за допомогою застосування обернено експоненційної залежності напруги стабілізації стабілітронів вздовж лінії таким чином, щоб різниця напруги стабілізації на початку лінії була меншою за різницю напруги наприкінці лінії.

Телекомунікаційна функція кабелю в охоронних системах [1], в тому числі і сенсорних кабельних лініях передбачає передавання інформації про сервісні та контрольні стани сповіщувачів, наприклад, факту безконтактного несанкціонованого доступу. В переважній більшості випадків об'єктом несанкціонованого доступу є людина або тварина, хоча таким може бути деякий роботизований механізм під зовнішнім керуванням тощо. Швидкість передавання інформації від кожного сповіщувача визначає час реакції усієї системи на загрозу несанкціонованого доступу. Кількість сповіщувачів та швидкість інформування центрального пульта охоронної системи також визначається пропускнуою спроможністю телекомунікаційного каналу.

Особлива увага в рамках телекомунікаційної функції ліній передачі для побудови надійної (а це найважливіше) системи охорони полягає в ущільненні – розділенні [2] сигналів від сповіщувачів різних типів. Із метою багатокористувацької роботи сповіщувачів на сегментовану лінію передачі використовуються різні методи ущільнення та розділення каналів, але найбільш широко застосовуються цифрові методи ущільнення, що часто стандартизовані та уніфіковані з комп'ютерним устаткуванням [5]. Наявність такої системи передачі цифрової інформації від сповіщувачів із прогнозованою пропускнуою спроможністю телекомунікаційного каналу охоронної системи дозволяє більш точно локалізувати порушника або факт аварії.

Виклад основного матеріалу

Для визначення пропускнуої спроможності використовується теорія інформації Шенона, за якою:

$$C_{ш} = \Delta f_{к} \log \left(1 + \alpha_{с} \frac{P_{с}}{P_{ш}} \right), \quad (1)$$

де $C_{ш}$ – шенонівська ємність каналу, Бод; $\Delta f_{к}$ – смуга пропускання каналу зв'язку, Гц; $P_{с}/P_{ш}$ – відношення потужності сигналу до потужності шуму в каналі відповідно; $\alpha_{с}$ – коефіцієнт інформаційних втрат.

Отже для оцінювання реальної пропускнуої спроможності необхідно визначитись із шириною смуги та динамічним діапазоном за умови використання бінарних телекомунікаційних сигналів. В першому наближенні, виходячи із аналогічних ситуацій, описаних в [2], ширина смуги не буде перевищувати декількох кілобод, що цілком достатньо для функціонування комплексної охоронної системи.

Ширина смуги (1) обмежена та визначається такими основними факторами: довжина лінії, або кількість сегментів; конструкція двопровідної лінії; неузгодження у точках стику сегментів. Слід також зазначити, що на величину втрат неузгодження впливає також нелінійний характер ВАХ стабілітронів, розташованих між сегментами.

Відношення сигнал – шум в системі сегментованої лінії за методом нелінійної реакції переважно визначається наступними чинниками: максимальне значення сигналу, що обмежене напругою стабілізації стабілітрону останнього сегменту; мінімальне значення сигналу, що обмежене значенням завад у лінії, серед яких домінують частину займає додатковий шум, що створюється стабілітронами, які працюють в режимі лавинного пробою.

Для дротяних кабельних ліній активний опір R_A більший за опір постійному струмові в основному через наявність поверхневого ефекту та ефекту близькості [5]. Загалом, згідно з R_A кабельної лінії змінному струму дорівнює сумі наступних складових:

$$R_A = R_{ш} + R_{ПЕ} + R_{БЛ} + R_M, \quad (1)$$

де $R_{ш}$ – опір сегменту лінії постійному струму; $R_{ПЕ}$ – опір за рахунок поверхневого ефекту; $R_{БЛ}$ – опір за рахунок ефекту близькості; R_M – опір, обумовлений втратами в навколишню жилу металевих елементах (оболонка, броня) (опір оточуючих мас).

Товщина мідної жили кабелю (рис. 1) та довжина кабелю (рис. 2) охоронних систем знизу обмежена збільшенням опору та погіршенням чутливості до розриву останніх сегментів кабелю, а з іншого боку – умовами прихованості розташування та прокладання кабелю, а також його вартістю. Відповідно рис. 1 та рис. 2 очевидно, що для використання в методі нелінійної реакції доцільно застосовувати кабель із діаметром дротяної жили в 0,15 мм та довжиною охоронної ділянки сегменту до 50 м.

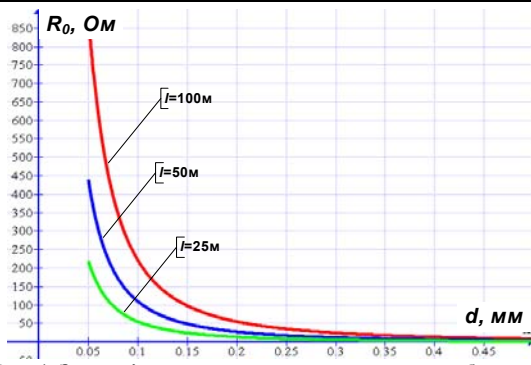


Рис. 1. Залежність опору сегменту охоронного кабелю від діаметру дротяної жили кабелю

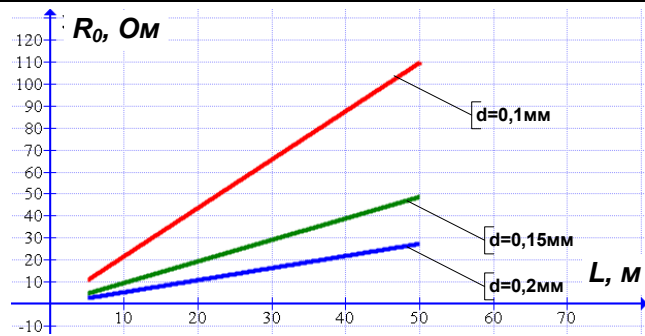


Рис. 2. Залежність опору сегменту охоронного кабелю від довжини сегменту

В охоронних системах використовують сповіщувачі, що устатковані цифровими системами передачі даних [2], тобто в каналі діє цифровий бінарний сигнал, для якого коефіцієнт інформаційних втрат (1) складає 0,03. Застосування цифрових сигналів суттєво зменшує пропускну спроможність лінії, але зменшує вартість системи загалом через відсутність пристроїв оптимального перекодування.

Для спрощення визначення частотного ресурсу сегментованої лінії з достатньо високим ступенем достовірності введемо наступні обмеження досліджуваної моделі лінії: включення між сегментами стабілітронів практично не впливає на режим повного узгодження суміжних сегментів; активний опір сегменту визначається для типової лінії передачі із малими втратами; очікуваний частотний ресурс та довжина сегментів у 25...100 м, дозволяють стверджувати, що така лінія передачі працює в режимі, близькому до RC-типу поширення хвиль [5] та може розглядатись як лінія із малими втратами.

Модуль передавальної функції лінії передачі із малими втратами розраховують так:

$$|K_U(\omega)| \cong e^{-l r_1 / (2Z_0)}; \tag{2}$$

де r_1 – питомий опір лінії передачі; Z_0 – модуль повного (середнього) хвильового опору сегментованої лінії передачі.

Якщо конструкція лінії передачі являє собою два провідника круглого діаметру із деякою відстанню між ними, співрозмірною із діаметром мідного дроту, яка заповнена діелектричним матеріалом та працює в RC режимі, то розрахунок хвильового опору такої передавальної структури проводиться за [5] наступним виразом:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r_1}{\omega C_1}}, \tag{3}$$

де C_1 – питома ємність кабелю, що для вказаної конструкції кабелю можливо наближено знайти як $C_1 = 27,8 \cdot 10^{-12} \epsilon / \ln(2b/d)$; $\epsilon \approx 2,3$; b – відстань між двома дротами у симетричному кабелі; d – діаметр дроту; μ, ϵ – відносна магнітна та діелектрична проникності відповідно.

Питомий сумарний опір лінії передачі за умови знехтування дією ефекту близькості та впливу оточуючих ліній мас складатиме:

$$r_\Sigma = r_1 = \sqrt{r_2^2 + r_3^2} = \sqrt{\left(\rho \frac{4}{\pi d^2}\right)^2 + \left(2,61 \cdot 10^{-7} \frac{\sqrt{f}}{\pi d}\right)^2}, \tag{4}$$

де r_2 – питомий опір за постійним струмом, r_3 – питомий опір, що викликано поверхневим ефектом.

Звідки повний вираз для АЧХ лінії передачі довжини l , за умов математичної моделі АЧХ (2) складатиме:

$$\begin{aligned} |K_U(\omega)| &\cong e^{-al} = e^{-l r_\Sigma / (2Z_0)} = \exp\left\{-\frac{l r_\Sigma}{2\sqrt{\frac{r_\Sigma}{\omega C_1}}}\right\} = \exp\left\{-\frac{l\sqrt{r_\Sigma}}{2\sqrt{\frac{1}{\omega C_1}}}\right\} = \exp\{-0,5l\sqrt{\omega r_\Sigma C_1}\} = \\ &= \exp\left\{-0,5l\sqrt{27,8 \cdot 10^{-12} \frac{2\pi\epsilon \cdot f}{\ln\left(\frac{2b}{d}\right)} \sqrt{\left(\rho \frac{4}{\pi d^2}\right)^2 + \left(2,61 \cdot 10^{-7} \frac{\sqrt{f}}{\pi d}\right)^2}}\right\} \end{aligned} \tag{5}$$

Якщо $d=0,15$ мм, то вираз (5) спрощується до:

$$|K_U(f)| \cong \exp \left\{ -0,5l \sqrt{27,8 \cdot 10^{-12} \frac{2\pi\epsilon \cdot f}{\ln\left(\frac{2b}{d}\right)} \sqrt{\left(\rho \frac{4}{\pi d^2}\right)^2 + \left(2,61 \cdot 10^{-7} \frac{\sqrt{f}}{\pi d}\right)^2}} \right\} \cong \exp \left\{ -10^{-5} l \sqrt{\frac{f}{\ln(13,3b)}} \right\} \quad (6)$$

$\left. \begin{matrix} b]=mm \\ f < 100kHz \end{matrix} \right\}$

Таким чином, ширина смуги лінії (рис. 3) передачі можливо оцінити як таку, що обмежена сотнями герц. Подібні невеликі значення пояснюються малим діаметром дроту та зазорами між провідниками в симетричній лінії передачі.

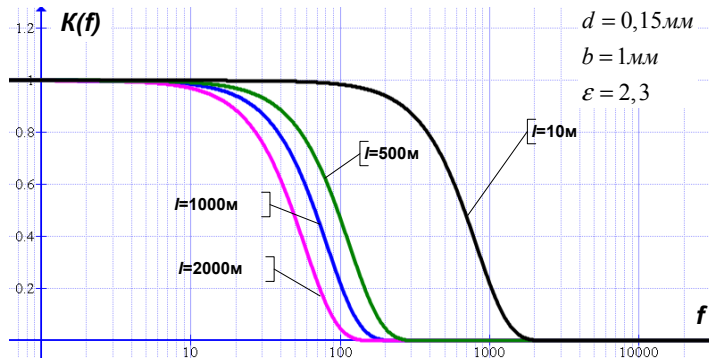


Рис. 3. Залежність передавальної функції сегментованої лінії від довжини лінії

Особливістю використання лінії передачі в методі нелінійної реакції є застосування принципово-нелінійних елементів – стабілітронів. Крім того, що стабілітрон має нелінійну ВАХ, стабілітрон є принципово елементом, що генерує значний шум. В нашому випадку шум є деструктивним фактором, рівень якого обмежує пропускну спроможність телекомунікаційного каналу сегментованої лінії.

Шум стабілітрона виникає в початковій ділянці лавинного пробію напівпровідникового приладу та характеризується діапазоном значень напруги та струмів (рис. 4). Якщо умовно розташувати ВАХ стабілітронів вздовж лінії передачі на одному графіку (рис. 5), то легко побачити, що струми передачі інформаційного сигналу розташовані в ділянках лавинного пробію стабілітронів. В результаті цього, в найгіршому випадку, всі стабілітрони будуть створювати сильний шум для інформаційного сигналу.

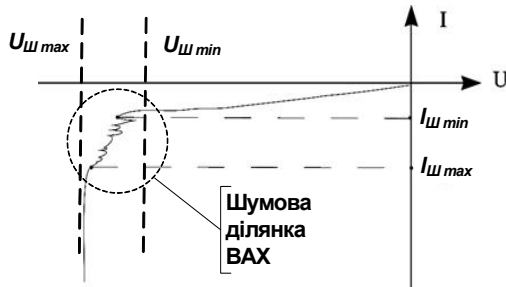


Рис. 4. Шумова ділянка стабілітрона на зворотній гілці ВАХ

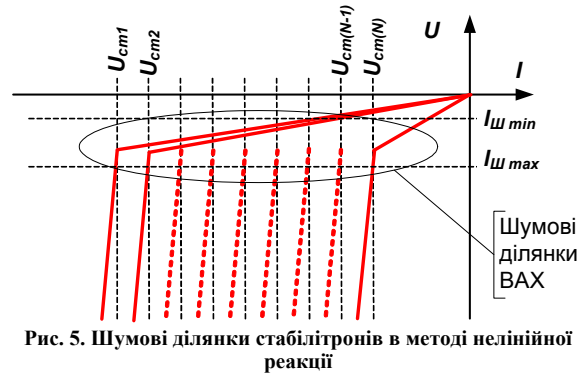


Рис. 5. Шумові ділянки стабілітронів в методі нелінійної реакції

Основним параметром стабілітронів з точки зору генерації шуму в шумовій ділянці є спектральна густина ефективного значення шумової напруги (N_D), що наводиться в паспортних даних [5]. Характер шумового процесу під час лавинного пробію в обмеженому діапазоні частот наближено відповідає білому шуму. Верхня оцінка середнього рівня шуму стабілітрона, за умови знехтуванням рівнем теплових шумів стабілітрона та суміжних ділянок лінії, складатиме:

$$V_{ш1} = N_{D1} \sqrt{\Delta f_K} = 1000 \cdot 10^{-9} \sqrt{1000} \approx 32(\text{мкВ}), \quad (7)$$

де Δf_K – частотний ресурс телекомунікаційного каналу (див. рис. 3).

Шуми можливо вважати незалежними для різних стабілітронів, в результаті чого сумарна напруга шуму із (7) буде оцінюватись так:

$$V_{ш\epsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^N V_{ш1}^2} = V_{ш1} \sqrt{N} = 32\sqrt{20} = 0,15(\text{мВ}), \quad (8)$$

де $V_{ш1}$ – шумова напруга стабілітрона.

Виходячи із (8), динамічний діапазон рівнів цифрового сигналу знизу обмежено шумами стабілітронів $V_{ш\epsilon}$, а зверху мінімальним значенням різниці напруг стабілізації [4] (близько 2В), звідки за (1)

пропускна спроможність оцінюється так:

$$C = \Delta f_k \log_2 \left(1 + \alpha_c \frac{P_c}{P_{ш}} \right) = \Delta f_k \log_2 \left(1 + \alpha_c \left(\frac{\Delta V_{CT}}{V_{шз}} \right)^2 \right) \approx 1000 (\text{Бод}) \quad (9)$$

Значення, отримане у (9), невелике, але цілком достатнє для передавання інформації від сенсорів та сповіщувачів у цифровому вигляді у реальних ділянках часу.

Під час вибору стабілітронів в методі нелінійної реакції особливу увагу слід приділити різниці напруги стабілізації [4], завдяки тому, що від неї залежить точна локалізація критичного uszkodження лінії та пропускна спроможність лінії передачі у випадку одночасного використання методу контролю та передачі інформаційного сигналу. Оцінка залежності пропускної спроможності від мінімальної різниці напруги стабілізації стабілітронів для лінії загалом (ліворуч) та окремого сегмента (праворуч) наведена на рис. 6.

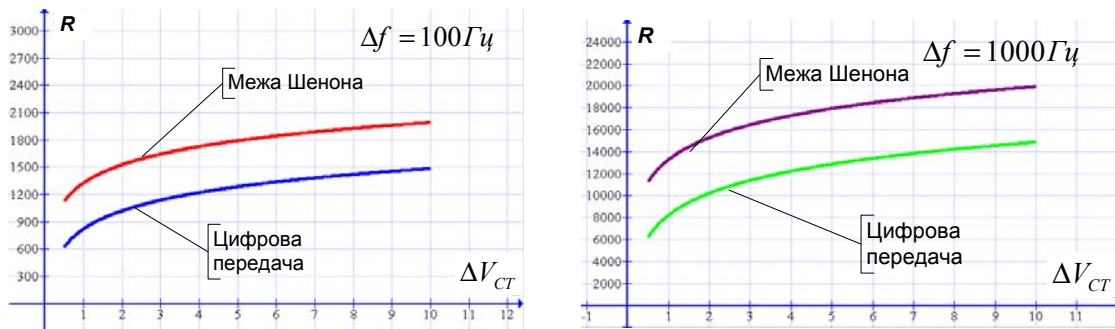


Рис. 6. Залежність пропускної спроможності лінії від мінімальної різниці напруги стабілізації стабілітронів

Слід зазначити, що підвищення мінімальної різниці між рівнями стабілізації стабілітронів суміжних сегментів призводить до необхідності підвищення напруги джерела постійного струму схеми вимірювання або зменшення кількості контрольованих ділянок лінії в межах охоронної сигналізації. Тому значення напруги має обиратись компромісно, виходячи із конкретних функціональних навантажень системи, в тому числі і необхідної пропускної спроможності.

Висновки

1. Запропонована модель для визначення ширини смуги пропускання сумісного телекомунікаційного каналу в методі контролю критичних uszkodжень сегментованої кабельної лінії. Показано, що для реальних умов використання на об'єктах охорони ширина смуги становить близько 100 Гц.
2. Використовуючи модель сегментованої кабельної лінії у методі нелінійної реакції, проведено оцінку нижньої межі телекомунікаційного каналу сегментованої кабельної лінії (одиниці кілобод), та побудовано залежності пропускної спроможності від параметрів суміщеного телекомунікаційного каналу.

Література

1. Груба И.И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения / И.И. Груба. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 220 с.
2. Елементи і пристрої фізичної та електронної охорони об'єктів : конспект лекцій / П. В. Мокренко ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л. : Фенікс, 2000. – 186 с.
3. Пивовар О.С. Метод нелінійної реакції у сегментованих кабельних лініях діагностичних та охоронних систем / О.С. Пивовар, Я.В. Вержбицький // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 4(275). – С. 154–157.
4. Пивовар О.С. Моделювання методу нелінійної реакції у сегментованих кабельних лініях / О.С. Пивовар, В.Д. Бидюк, Я.В. Вержбицький // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 5(276). – С. 147–151.
5. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи / И.Г. Бакланов. – М. : Изд-во «Эко-Трендз», 1999. – 278 с.

References

1. Gruba I.I. Sistemy ohrannoy signalizatsii. Tehnicheskie sredstva obnaruzheniya / I.I. Gruba. – M. : SOLON-PRESS, 2012. – 220 s.
2. Elementy i prystroi fizychnoi ta elektronnoi okhorony ob'ektiv : konspekt leksii / P. V. Mokrenko ; Nats. un-t «Lviv. politehnika». – L. : Feniks, 2000. – 186 s.
3. Pyvovar O.S. Metod nelineinoy reaktzii u sehmentovanykh kabelnykh liniyakh diaagnostychnykh ta okhoronnykh system / O.S. Pyvovar, Ya.V. Verzhbyskiy // Herald of Khmelnytskyi National university. – 2019. – № 4(275). – С. 154–157.
4. Pyvovar O.S. Modeliuvannya metodu nelineinoy reaktzii u sehmentovanykh kabelnykh liniyakh / O.S. Pyvovar, V.D. Bydiuk, Ya.V. Verzhbyskiy // Herald of Khmelnytskyi National university. – 2019. – № 5(276). – С. 147–151.
5. Baklanov I.G. Metody izmerenij v sistemah svyazi / I.G. Baklanov. – M. : Izd-vo «Eko-Trendz», 1999. – 278 s.

Рецензія/Peer review : 22.1.2020 р.

Надрукована/Printed : 14.2.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією