

УДК 621.391

АСАУЛЕНКО І.О., студентка,  
ПРИХОДЬКО С.І., д.т.н., професор,  
ШТОМПЕЛЬ М.А., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

## Аналіз методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів

Проведено дослідження методів повторної передачі та класичного завадостійкого кодування в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. Встановлено, що універсальними для використання в будь-якому каналі зі стиранням, незалежно від статистики стирань, являються завадостійкі стираючі коди та те, що найбільш значущими кодами без фіксованої швидкості передачі є LT коди, що засновані на поєднанні «хорошого» розподілу ймовірностей для формування кодових символів з простим методом декодування.

**Ключові слова:** методи повторної передачі, завадостійке кодування, стираючі коди, LT коди, щільності розподілу степенів

### Постановка проблеми і аналіз літератури

У теперішній час найважливішу роль відіграють телекомунікаційні мережі з комутацією пакетів, що використовуються для передачі значного об'єму різноманітної інформації. В телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів інформація подається у вигляді структурно відокремлених частин даних, які називаються пакетами [1]. Кожен пакет має заголовки, в якому міститься адреса призначення та інша допоміжна інформація, що використовується для доставки пакета отримувачу. При передачі через мережу пакети можуть затримуватися, втрачатися та надходити з помилковими бітами через вплив різних перешкод та шумів в каналі зв'язку. Для виявлення помилок при передачі через мережу пакет може містити службове поле, в якому розміщується контрольна сума.

Тому актуальною задачею є аналіз методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів.

### Мета статті

Аналіз ефективності та особливостей реалізації методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів.

### Основна частина

Процес взаємодії елементів телекомунікаційної мережі з комутацією пакетів описує модель взаємодії відкритих систем, що складається з відповідних рівнів. Більшість додатків для користувачів реалізуються на основі стека протоколів TCP/IP, до складу якого входять технологія Ethernet та протоколи TCP і UDP,

що відповідають каналному та транспортному рівням моделі взаємодії відкритих систем відповідно.

Технології каналного рівня можуть забезпечити достовірність передачі даних, поміщаючи спеціальну послідовність бітів в початок і кінець кадру, а потім додаючи до нього контрольну суму. На стороні одержувача обчислюється контрольна сума отриманих даних і порівнюється результат з контрольною сумою переданих даних. Якщо контрольні суми не співпадають, фіксується помилка. В функції каналного рівня входить не тільки виявлення помилок, але і виправлення, за рахунок повторної передачі пошкоджених пакетів. Таким чином, достовірність передачі інформації на каналному рівні засновується на використанні методів повторної передачі. Однак, дані методи відновлення даних не використовуються в технології Ethernet.

На транспортному рівні забезпечується виявлення і виправлення помилок передачі, таких як спотворення, втрата і дублювання пакетів. Протокол управління передачею (TCP) забезпечує гарантовану доставку даних за рахунок встановлення логічного з'єднання між елементами телекомунікаційної мережі, що дозволяє у разі втрати пакетів організувати повторні передачі, розпізнавати і усувати дублювання, при отриманні двох копій одного пакета тощо. Однак, методи повторної передачі вносять суттєві затримки, особливо критичні для мережевих додатків реального часу. Протокол дейтаграм користувача (UDP) забезпечує доставку по можливості або з максимальними зусиллями та створений з метою доставки пакетів з малою затримкою.

Цей протокол не підтверджує доставку даних, не дбає про коректний порядок доставки і не використовує методи повторної передачі, тому даний протокол використовується лише в порівняно надійних каналах зв'язку з малою ймовірністю помилок.

Відомо, що більшість мережевих додатків (IP-телефонія, IPTV тощо) засновані на топологіях «один-багатьом» та «багато-одному» [2] та використанні протоколу UDP, що не дозволяє застосовувати методи повторної передачі для відновлення даних, тому доцільно розглянути особливості реалізації методів завадостійкого кодування у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів.

Згідно [3] згорткові коди здатні виправляти окремі бітові помилки, а блокові коди, наприклад, коди Ріда-Соломона, – пакки помилок в окремо взятому пакеті. При цьому коди Ріда-Соломона мають жорстку алгебраїчну структуру, що призводить до значної обчислювальної складності методів кодування та декодування інформації. Таким чином, класичні завадостійкі коди не здатні відновити цілий пакет, що обмежує їх використання у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів.

Для формалізації процесу передачі даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів доцільно використовувати математичну модель каналу зі стиранням, характеристики якої розглянуто у [4].

Діаграма перехідних ймовірностей каналу зі стиранням символів (1-бітових пакетів) представлена на рис. 1.

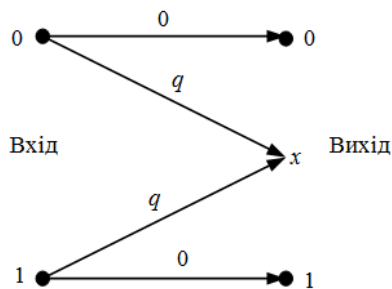


Рис. 1. Діаграма перехідних ймовірностей для каналу зі стиранням символів (1-бітових пакетів)

На рис. 1 вихід  $x$ , являється стираючим, при цьому стирання пакету відбувається з ймовірністю  $q$ . Для даної моделі каналу існують завадостійкі стираючі коди, що дозволяють відновити цілий пакет. Дані коди дозволяють закодувати вихідне повідомлення кінцевої довжини, що складається із символів однакової довжини, потенційно необмеженим потоком кодових символів – при необхідності кодові символи генеруються до тих пір, доки прийняті символи не будуть відновлені. При цьому для стираючих кодів не

важливий порядок передачі та приймання кодових символів в рамках одного повідомлення.

До класу стираючих кодів відносяться: коди з фіксованою швидкістю передачі (код Торнадо) та коди без фіксованої швидкості передачі (випадковий фонтанний код, код Лабі (LT код), код Raptor, код Online) [2].

В теперішній час серед кодів без фіксованої швидкості передачі найбільшого поширення отримав LT код, що заснований на використанні «хорошого» розподілу ймовірностей для формування кодових символів, які відповідають  $k$  інформаційним символам вихідного повідомлення. Щільності розподілу степенів  $p(d)$  являються ймовірністю того, що кодовий символ має степінь  $d$ , яка відповідає кількості вихідних символів, що задіяні для генерації  $i$ -го кодового символу.

Алгоритм кодування LT коду містить наступні кроки.

Крок 1. Вибір степені  $d$  із щільності розподілу степенів  $p(d)$ .

Крок 2. Випадковий вибір  $d$  вихідних інформаційних символів  $X_i$ .

Крок 3. Отримання кодового символу  $C_i$  в результаті виконання операції XOR над  $d$  вибраними інформаційними символами.

Приклад кодування LT коду згідно даного алгоритму подано на рис. 2.

Кодування LT коду може бути засновано на використанні різних щільностей розподілу степенів  $p(d)$ .

Ідеальний розподіл має наступну щільність розподілу ймовірностей:

$$p(d) = \begin{cases} \frac{1}{k}, d = 1, \\ \frac{1}{d(d-1)}, d = 2, \dots, k. \end{cases} \quad (1)$$

Для зниження ймовірності відмови від декодування використовується робастний розподіл степенів кодових символів

$$\mu(d) = \frac{p(d) + \tau(d)}{\beta}, \quad (2)$$

де  $\beta$  – нормуючий множник, що визначається за формулою

$$\beta = \sum_{d=1}^k p(d) + \tau(d). \quad (3)$$

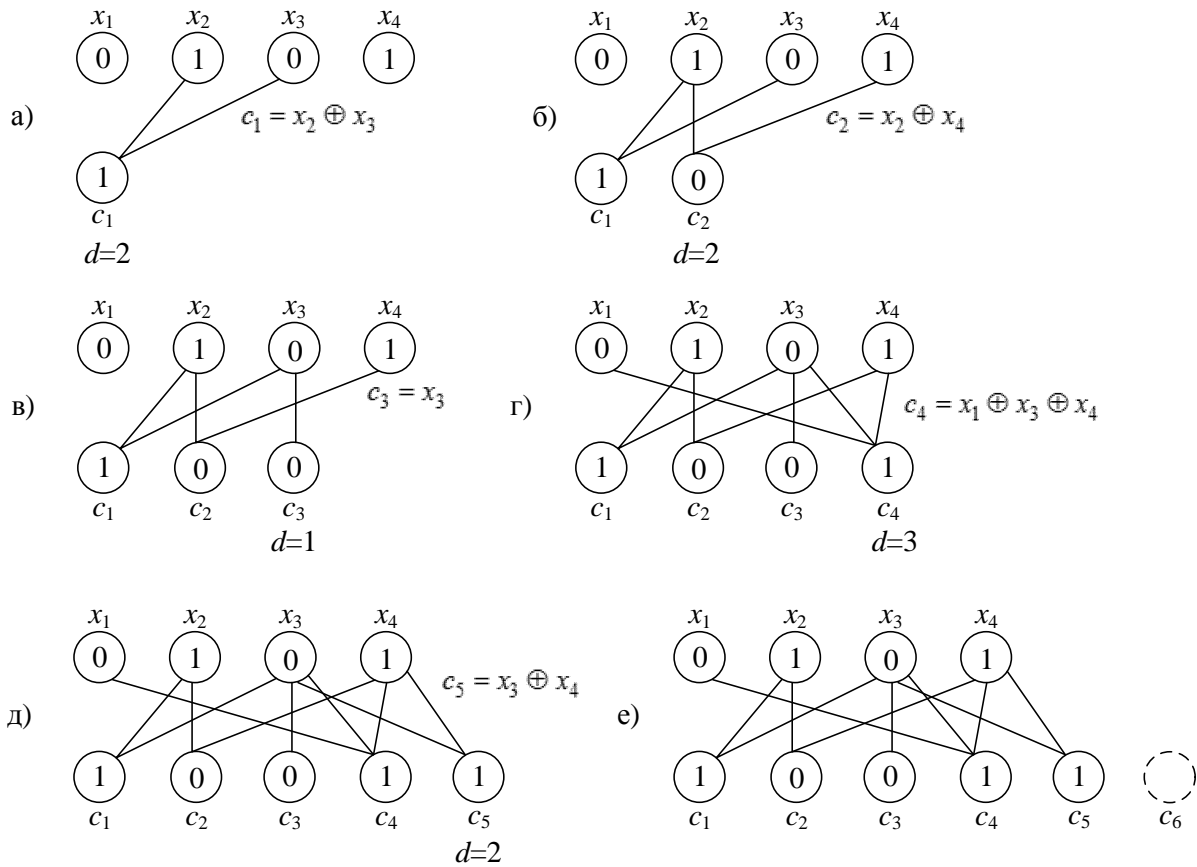


Рис. 2. Приклад кодування LT коду для  $k = 4$

Функція посилення в формулі (2) дорівнює

$$\tau(d) = \begin{cases} \frac{R}{dk}, d = 1, 2, \dots, (k/R) - 1, \\ \frac{R}{k} \ln(R/\delta), d = k/R, \\ 0, d > k/R, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\delta$  – параметр, що визначає ймовірність успішного декодування ( $\delta > 0$ );

$R$  – параметр, що визначається за формулою:

$$R = c \cdot \ln(k/\delta) \cdot \sqrt{k}, \quad (5)$$

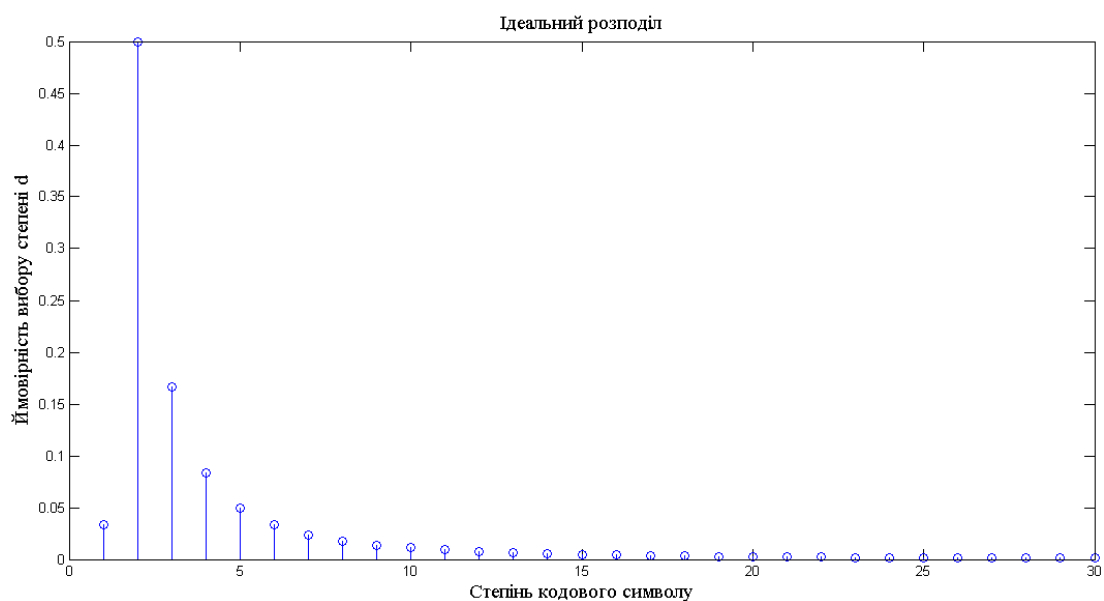
де  $c$  – параметр розподілу ( $c > 0$ ).

Результати отримані за формулами (1) та (2) для різних значень параметрів  $\delta$ ,  $c$  при фіксованій кількості інформаційних символів  $k$  наведено на рис. 3 – 8.

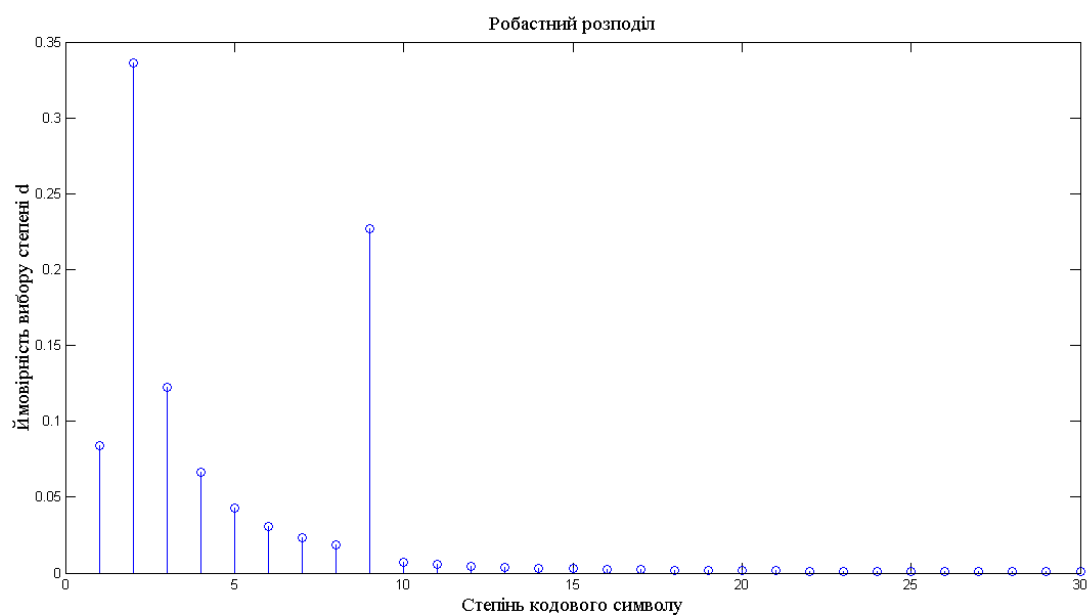
Із рис. 3 випливає, що при ідеальному розподілі для степені  $d = 2$  ймовірність вибору степені становить 0,5, а при робастному розподілі зменшується до 0,35. Однак, на місці степені  $d = 9$  виникає сплеск, для якого ймовірність вибору степені становить 0,23. Із рис. 4 – 5 слідує, що при збільшенні параметру  $c$  найбільша ймовірність вибору степені  $d = 1$ , а отже знижується ймовірність успішного декодування.

Із рис. 6 слідує, що при робастному розподілі для степені  $d = 2$  ймовірність вибору степені зменшується до 0,43. Із рис. 7 випливає, що був здійснений перерозподіл степенів та ймовірність вибору степенів  $d = 1$ ,  $d = 2$  та  $d = 3$  зросла. Із рис. 8 слідує, що при збільшенні параметрів  $\delta$  та  $c$  ймовірність успішного декодування зменшується через збільшення ймовірності вибору степенів малої ваги.

Слід зазначити, що розглянуті розподіли ймовірностей степенів кодового символу доцільно використовувати тільки для значень  $k$  порядку 10000 [5].

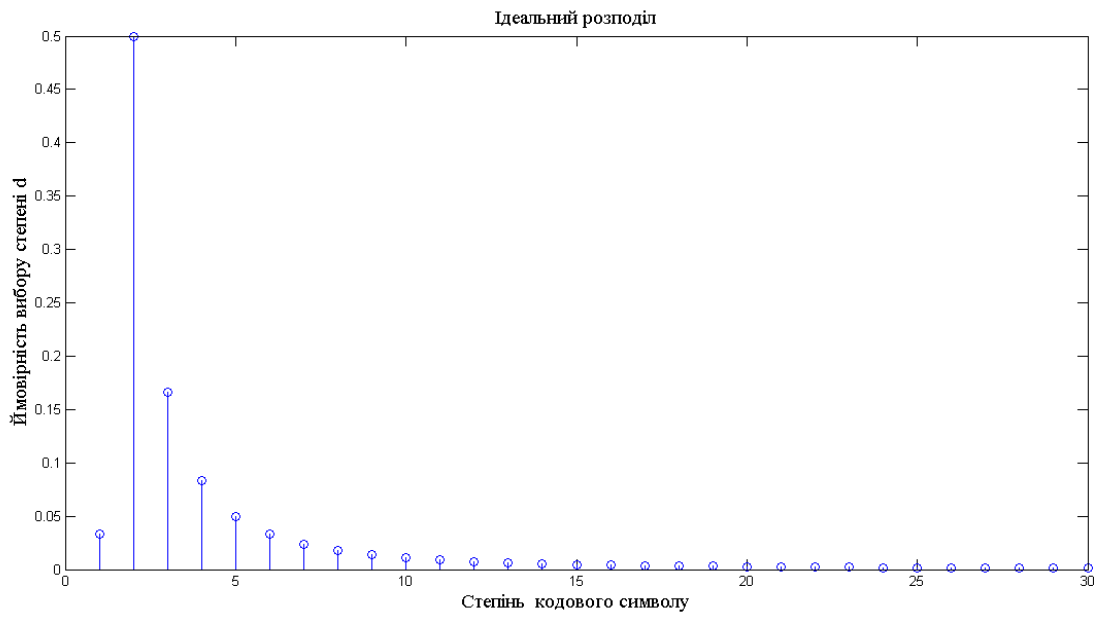


а)

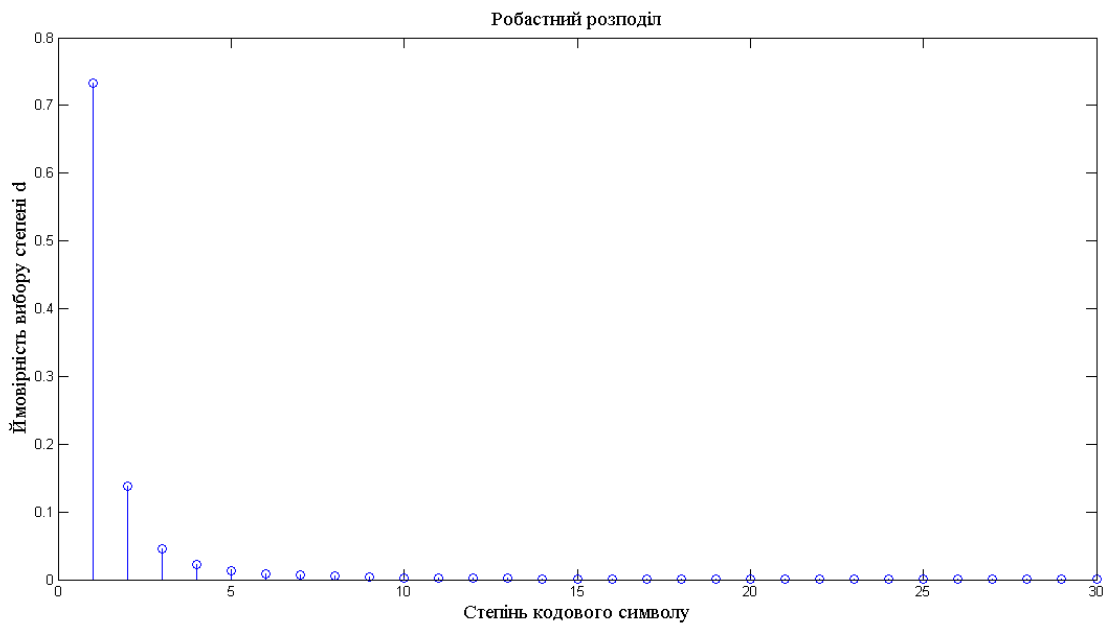


б)

Рис. 3. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодів при  $\delta = 0,1; c = 0,1; k = 30$ :  
 а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл

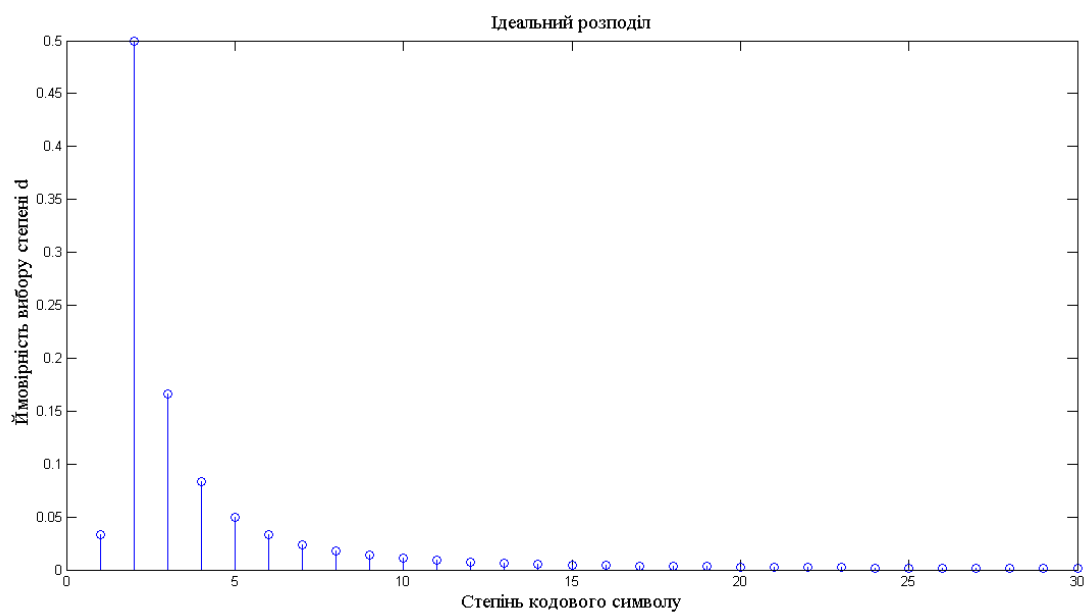


а)

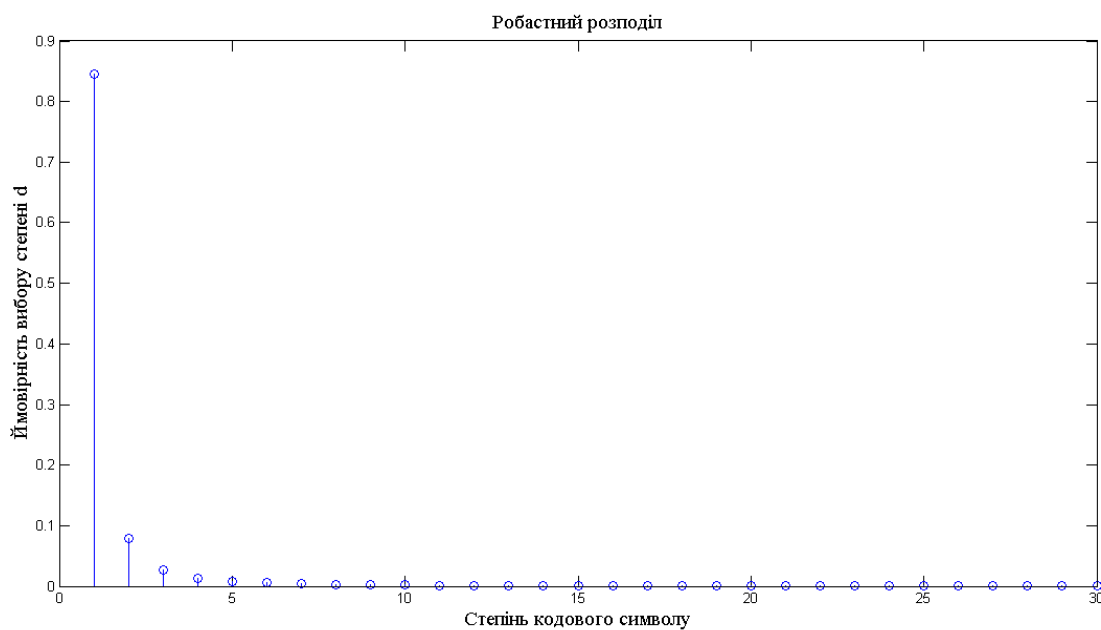


б)

Рис. 4. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодового символу при  $\delta = 0,1$ ;  $c = 0,5$ ;  $k = 30$ :  
а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл

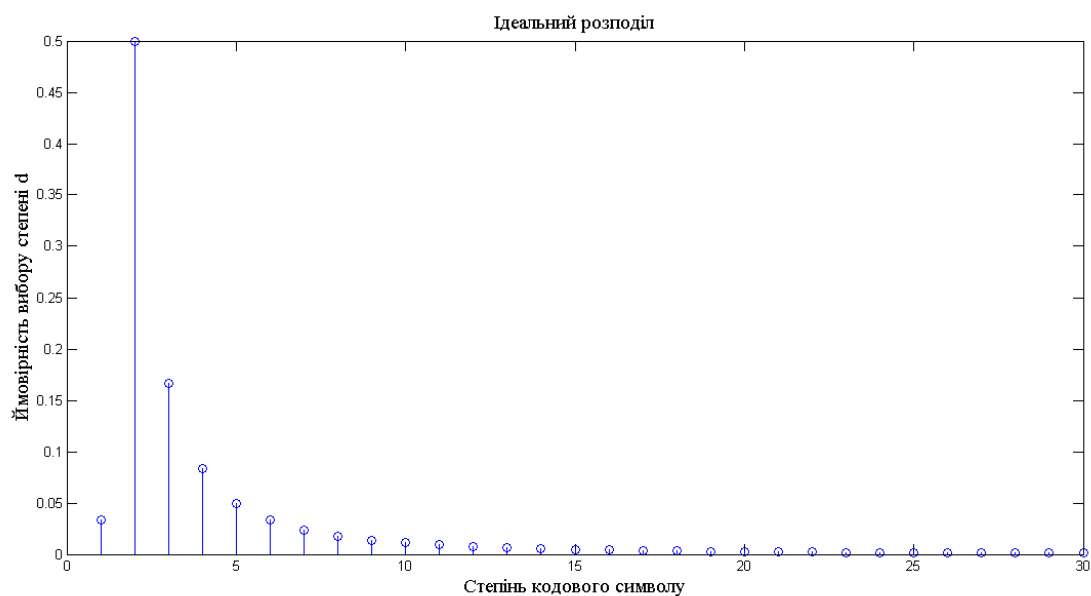


а)

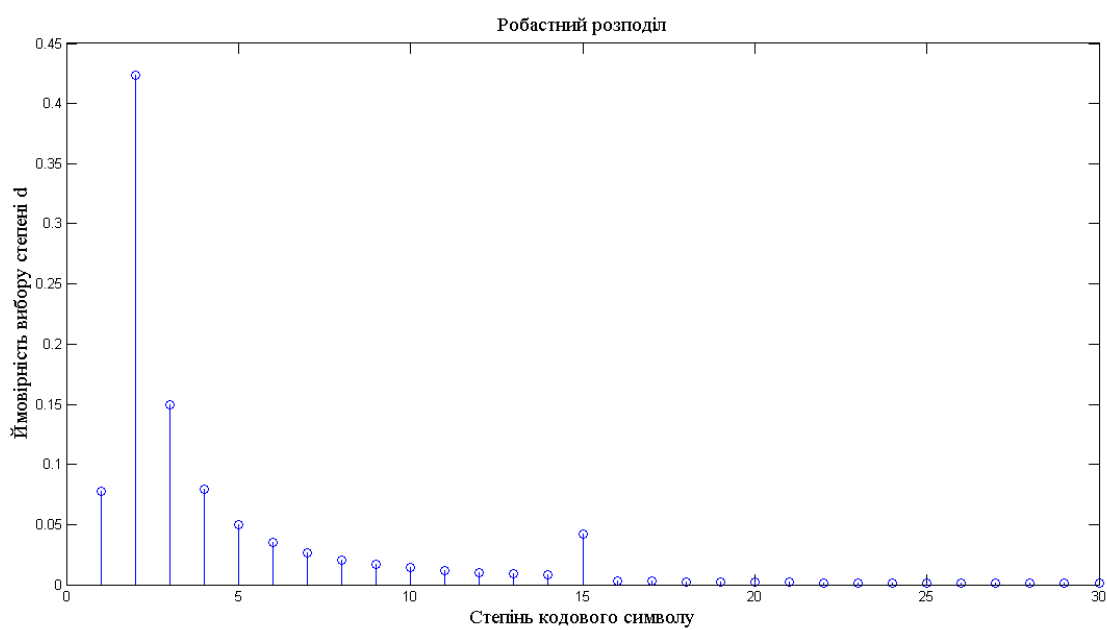


б)

Рис. 5. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодів символу при  $\delta = 0,1$ ;  $c = 0,9$ ;  $k = 30$  :  
 а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл

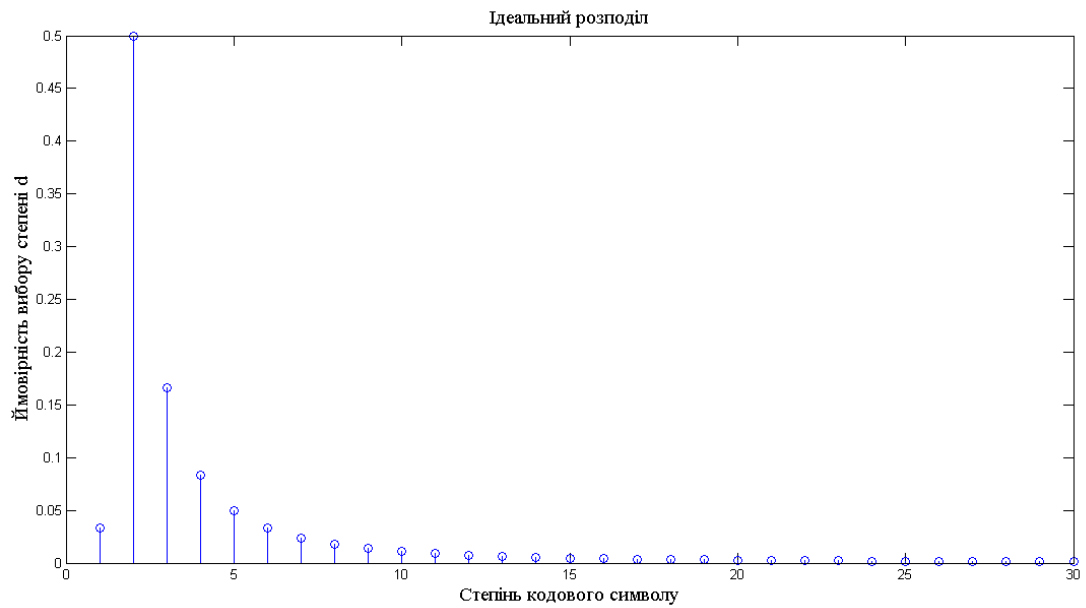


а)

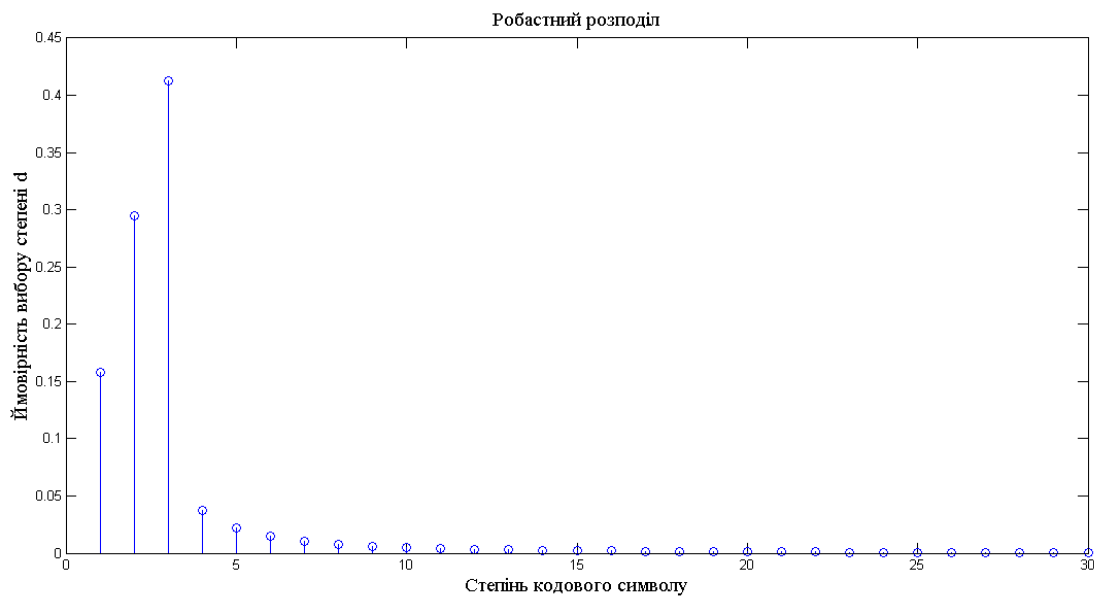


б)

Рис. 6. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодового символу при  $\delta = 0,9$ ;  $c = 0,1$ ;  $k = 30$ :  
а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл



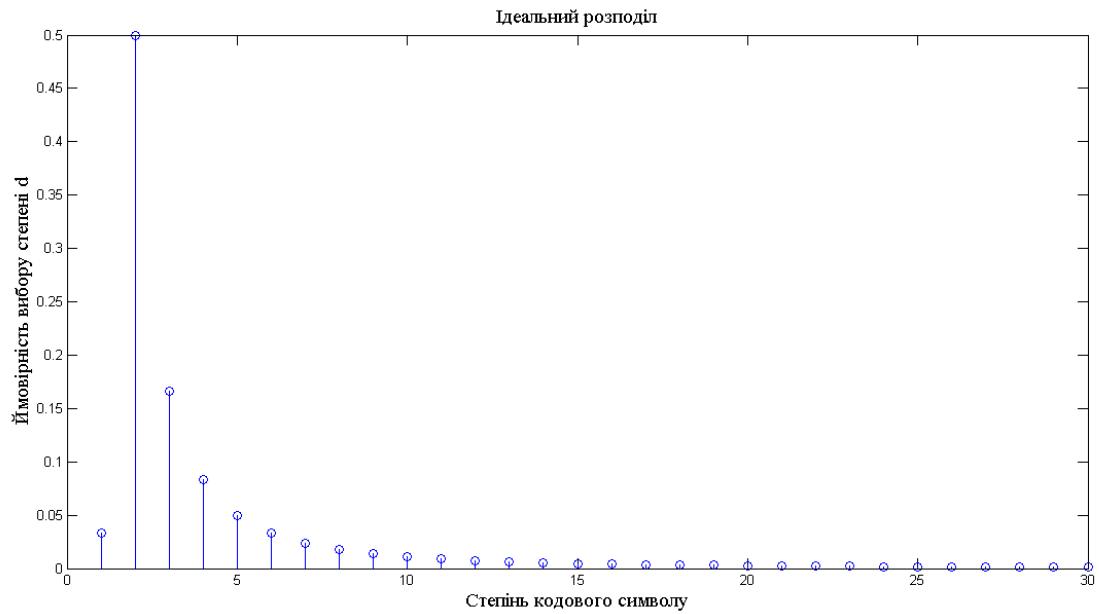
а)



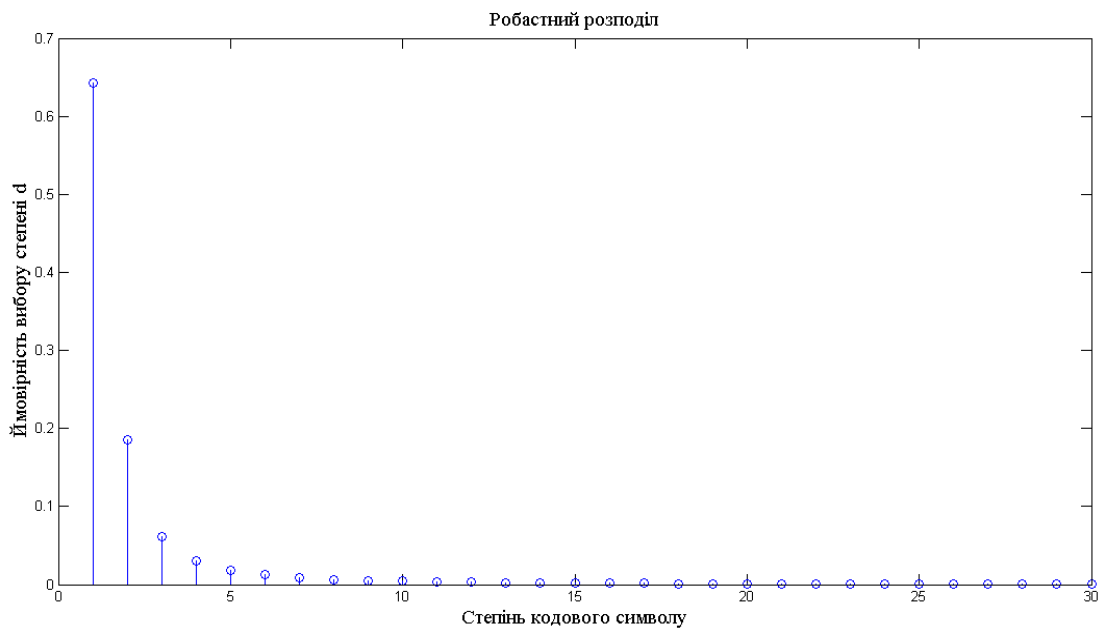
б)

Рис. 7. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодового символу при  $\delta = 0,9$ ;  $c = 0,5$ ;  $k = 30$ :  
а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл





а)



б)

Рис. 8. Залежність розподілу ймовірностей степенів кодового символу при  $\delta = 0,9$ ;  $c = 0,9$ ;  $k = 30$ :  
а) ідеальний розподіл; б) робастний розподіл

Декодування передбачає наявність інформації від кодера про степінь кожного кодового символу і список номерів вихідних символів. На прийомній стороні процес декодування починається з прийому першого символу. Процес декодування LT коду представлено в вигляді алгоритму, що складається з таких кроків.

Крок 1. Знаходження кодового символу  $P_i$  зі степеню  $d=1$ . Якщо такого символу немає – відмова від декодування.

Крок 2. Знаходження  $j$ -го символу вихідного інформаційного символу, шляхом установаження  $b_j = P_i$ .

Крок 3. Оновлення значень вузлів  $P_i$ , котрі приєднані до  $b_j$ .

Крок 4. Видалення копії  $j$ -го символу із всіх кодових символів, в яких він брав участь при кодуванні, таким чином знижуючи їх степінь  $d_i$  на одиницю.

Крок 5. Якщо не всі вихідні інформаційні символи відновлено здійснюється перехід до кроку 1.

На рис. 9 представлено приклад декодування LT коду на основі даного алгоритму.

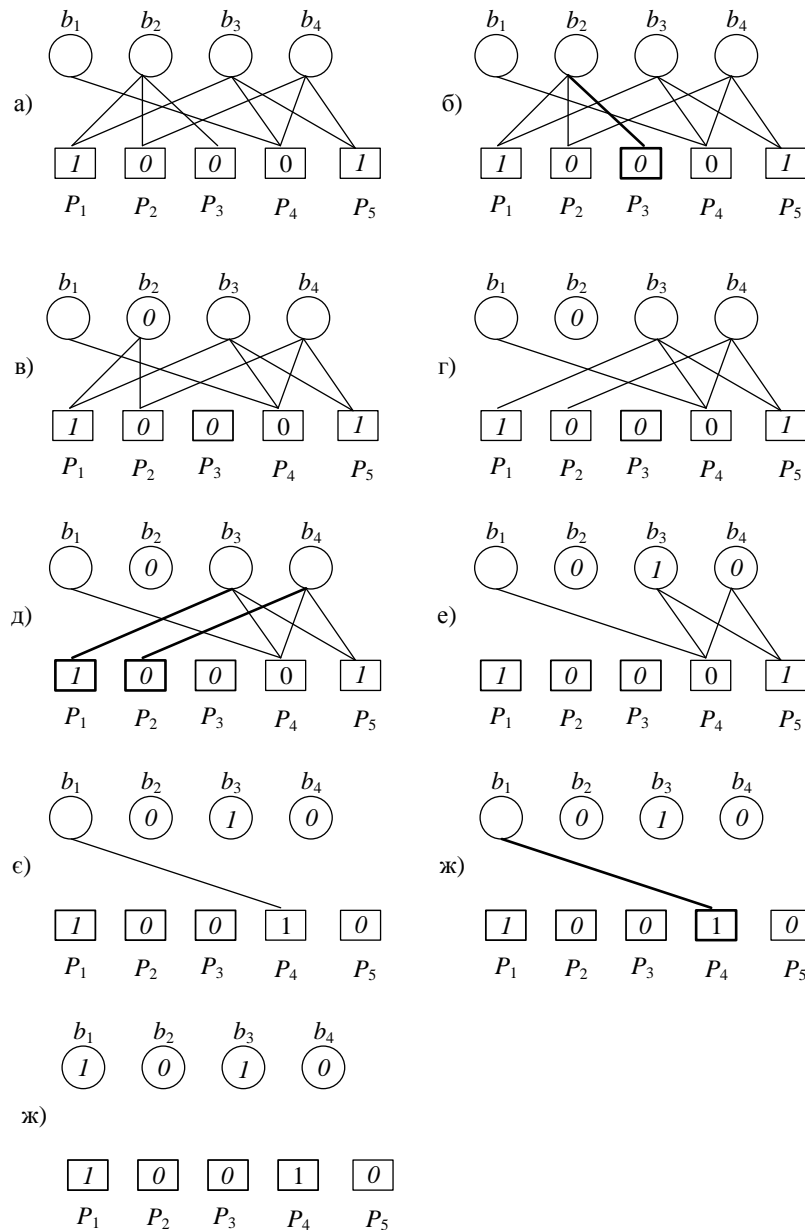


Рис. 9. Приклад декодування LT коду

**Висновки**

Методи повторної передачі та класичного завадостійкого кодування являються недостатньо ефективними в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. Встановлено, що завадостійкі стираючі коди являються універсальними, оскільки можуть бути використані в будь-якому каналі зі стиранням, незалежно від статистики стирань. З проведеного аналізу випливає, що найбільш значущими кодами без фіксованої швидкості передачі є LT коди, що засновані на поєднанні «хорошого» розподілу ймовірностей для формування кодових символів з простим методом декодування. Проте існує деяке обмеження ефективності кодування невеликих об'ємів даних LT кодами, що потребує оптимізації розподілів ймовірностей степенів кодового символу для даного випадку.

**Література**

1. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст]: учебник для вузов. 4-е изд. / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.: ил.
2. Варгаузин, В. Помехоустойчивое кодирование в пакетных сетях [Текст] / В. Варгаузин // ТелеМультиМедиа. – 2005. – №3. – С. 10 – 16.
3. Асауленко, І. О. Аналіз способів відновлення інформації в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів [Текст] / І. О. Асауленко, М. А. Штомпель // XV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (м. Київ, 8 – 9 квітня 2015 р.). – Тези доповідей. – Київ: НАУ, 2015. – С. 33.
4. Асауленко, І. О. Дослідження характеристик телекомунікаційних систем з використанням програмних реалізацій каналів зв'язку [Текст] / І. О. Асауленко, М. А. Штомпель // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 1. – С. 34 – 41.
5. Шинкаренко, К. В. Помехоустойчивое кодирование мультимедиа данных в компьютерных сетях [Текст] / К. В. Шинкаренко, А. М. Кориков // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, №5. – С. 37– 41.

**Асауленко І.А., Приходько С.І., Штомпель Н.А.** Аналіз методів відновлення даних в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. Проведено дослідження методів повторної передачі і класичного помехоустойчивого кодування в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. Установлено, що універсальними для використання в будь-якому каналі зі стиранням, незалежно від статистики стирань, являються помехоустойчиві стираючі коди і то,

что наиболее значимыми кодами без фиксированной скорости передачи являются LT коды, основанные на сочетании «хорошего» распределения вероятностей для формирования кодовых символов с простым методом декодирования.

**Ключевые слова:** методы повторной передачи, помехоустойчивое кодирование, стирающие коды, LT коды, плотности распределения степеней.

**Asaulenko I.A., Prihodko S.I., Shtompel N.A.** The analysis of data recovery methods in telecommunication packet-switching networks. Telecommunication packet-switching networks used to transfer a significant amount of diverse information and which play the most important role at present have been investigated. The information in telecommunication packet-switching networks is served as structurally separate parts of data which are called packets. To deliver the package to the recipient each packet must have a header, which contains the destination address and other auxiliary information. Because of the influence of different obstacles and noises in the communication channel packets can be delayed, lost and come with erroneous bits during the transmission across the network. To detect errors during the transmission through the network a packet may include a service field, which contains the checksum. Also the methods of retransmission and classic error-correcting coding in telecommunication packet-switching networks have been analyzed. It has been established that erasing noise combating codes are universal in any channel with erasure, regardless of the erasure statistics. It has also been established that LT codes based on a combination of "good" probability distribution for the formation of code symbols with a simple method of decoding are the most important codes without fixed transmission rate.

**Key words:** methods the retransmission, error-correcting coding, erasure codes, LT codes, the density of degree distribution.

Рецензент д.т.н., професор Краснобаєв В.А. (Полтавський національний технічний університет ім. Ю.Кондратюка)

Поступила 26.06.2015г.

*Asaulenko I.A., student, Ukrainian State University Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.*

*Prihodko S.I., Vice-rector for scientific and pedagogical work of Ukrainian State University of Railway Transport, Doctor of Technical Sciences, professor, Ukrainian State University Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.*

*Shtompel N.A., candidate of techn. sciences, docent of "Transport connection" Department, Ukrainian State University Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.*

*Асауленко Ірина Олександрівна, студентка, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.*

*Приходько Сергій Іванович, проректор з науково-педагогічної роботи, доктор технічних наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.*

*Штомпель Микола Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.*