

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/04>**Уривський Л.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Шмігель Б.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ БЕЗПРОВОДОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Сучасне суспільство прагне задовольнити потреби з боку отримання інформації за допомогою високої швидкості передачі та достовірності, саме тому проблема постає досить гостро в умовах обмежених ресурсів каналів зв'язку, а саме частотних та енергетичних. Перед науковцями та інженерами стоїть завдання як найефективніше використовувати дані ресурси та при цьому не втрачати показники головних параметрів каналу.

Незважаючи на те, що основним завданням існуючих та перспективних телекомунікаційних систем є передача заданого обсягу інформації, їх побудова часто ґрунтується виключно на критеріях достовірності. Саме тому актуальним для безпроводових систем зв'язку є завдання забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотних ресурсів каналу зв'язку. У той же час, для багатьох відомих систем характерна невиправдана надмірність засобів, що забезпечують достовірність та продуктивність каналу зв'язку, низька ефективність використання частотного та енергетичного ресурсів лінії зв'язку.

Для оцінки ефективності використання ресурсу каналу зв'язку використовується поняття інформаційної ефективності як відношення продуктивності джерела повідомлень, яка характеризує швидкість передачі інформації, яку отримує кінцевий користувач до пропускної здатності каналу зв'язку, яка використовується як для передачі інформації користувача, так і для передачі технічної інформації. Пропускна здатність каналу зв'язку оцінюється границею Шеннона і є максимально можливою швидкістю передачі інформації по каналу зв'язку.

Досягнення найкращої інформаційної ефективності означає прагнення максимально повно використовувати інформаційний ресурс каналу зв'язку з урахуванням перерозподілу енергетичних та частотних ресурсів каналу зв'язку.

У статті розглянуто ефективність використання ресурсів каналів зв'язку з багатопозиційною маніпуляцією та завадостійким кодуванням. Запропоновано комплексну методику оцінки інформаційної ефективності систем передавання дискретних сигналів. При цьому слід зауважити, що однакова інформаційна ефективність може бути досягнута як за низької частотної ефективності, чи за низьких показників енергетичної ефективності. Отже, автономно розглядати параметри інформаційної ефективності не доцільно, а сумісно з іншими показниками ефективності.

**Ключові слова:** енергія сигналу, границя Шеннона, частотна ефективність, енергетична ефективність, BER, багатопозиційні сигнали, сигнально-кодові конструкції.

**Постановка проблеми.** Для вирішення обмежень ресурсу каналу зв'язку, перспективним являється пошук нових методів передачі інформації, вибору ефективного виду модуляції та завадостійкого кодування.

Різні системи зв'язку для передачі дискретних і безперервних повідомлень, незважаючи на їх відмінність як за призначенням, так і за способами реалізації, характеризуються певними кількісними показниками. Основними з них є швидкість і достовірність передачі інформації.

Для забезпечення заданої швидкості передачі інформації  $R$  і заданої достовірності доводиться використовувати деяку потужність сигналу в точці прийому  $P_c$  і займати певну смугу частот в каналі зв'язку. Яка потужність і яка смуга частот при цьому будуть потрібні, залежить від використовуваної системи передачі інформації, а саме, від способу трансформації повідомлення в сигнал (модуляція, кодування і т.д.).

Ефективність використання ресурсів каналу описує показник інформаційної ефективності,

який являє собою відношення продуктивності до пропускної здатності каналу зв'язку. Для досягнення високого показника інформаційної ефективності необхідно оперувати оптимальним вибором сигнально-кодових конструкцій.

Являє інтерес порівняння між собою різні системи зв'язку по мірі ефективності використання ними основних ресурсів каналу — потужності сигналу і займаної смуги частот — і досягнутої при цьому пропускної здатності і продуктивності.

Нижче це порівняння проводиться для деяких систем у випадку, коли сигнали передаються в каналі з адитивним білим гауссовим шумом. При передачі дискретних повідомлень достовірність передачі визначається ймовірністю помилки в прийомі одиночного символу  $P_b$ .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В якості показників, які використовуються для порівняння телекомунікаційних систем на фізичному рівні, проф. Зюко А. Р. запропоновано [1, 2] коефіцієнти енергетичної  $\beta$  і частотної ефективності  $\gamma$ , які кількісно дають оцінку питомої енергетичної і частотної ефективності систем передачі інформації (СП):

$$\beta = \frac{R}{\alpha} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{R}{F} \quad (2)$$

де  $R$  – швидкість передачі символів від джерела (продуктивність джерела)

$\beta$  – коефіцієнт використання каналу по потужності (показник енергетичної ефективності);

$\gamma$  – коефіцієнт використання каналу по смугі частот (показник частотної ефективності);

$\alpha = P_c / N_0$  – енергетичний показник, що відображає відношення потужності сигналу в точці прийому  $P_c$  до спектральної щільності шуму  $N_0$ ;

$\Delta F$  – смуга частот каналу, що надається для передачі сигналу.

Збільшення значень кожного з показників є ознакою зростання ефективності використання ресурсів.

Узагальненим показником ефективності використання ресурсів каналу зв'язку в [1] запропоновано показник інформаційної ефективності  $\eta$ :

$$\eta = \frac{R}{C} = \frac{R}{\Delta F \log(1+Q)} = \frac{\alpha}{\log(1+\frac{\alpha}{\beta})}, \quad (3)$$

де  $C$  – пропускна здатність каналу зв'язку, що визначається формулою Шеннона [2]:

$$C = \Delta F \log(1+Q), \quad (4)$$

де  $Q = P_c / P_{ш}$  – енергетичний показник, що відображає відношення потужності сигналу в точці

прийому  $P_c$  до потужності шуму  $P_{ш}$  у смузі прийому сигналу  $\Delta F$ :

$$P_{ш} = \Delta F * N_0. \quad (5)$$

В припущенні, що значення  $\eta_{max} = 1$ , в [1] запропонована наступна гранична залежність між  $\beta$  і  $\gamma$ , виходячи з співвідношень (1)...(3):

$$\beta = \frac{\gamma}{2^{\gamma} - 1} \quad (6)$$

Формула (6) є граничною і показує найкращий обмін між  $\beta$  і  $\gamma$ . Проте в ній закладено діалектичне протиріччя показників: при незмінному значенні  $\eta_{max} = 1$  показник  $\beta$  досягає максимуму при  $\gamma = 0$ , а  $\gamma$  досягає максимуму при  $\beta = 0$ .

При цьому значення показника  $\gamma$  може змінюватися в широких межах (від 0 до значень, які наближаються до  $\infty$ ), в той час, як  $\beta$  обмежений зверху:  $\beta_{max} = 1 / \ln 2 = 1,443$  при  $\Delta F \rightarrow 0$ .

Отже, при зростанні енергетичної ефективності  $\beta$ , частотна (спектральна) ефективність  $\gamma$  зменшується, тому максимальне значення  $\beta$  досягається при мінімальному  $\gamma$  і навпаки.

Це одна з головних закономірностей побудови нових телекомунікаційних систем: розробник системи має можливість вибрати одну із стратегій – максимум частотної (при мінімальній енергетичній) ефективності, максимум енергетичної (при мінімальній частотній) ефективності або компромісну стратегію.

Лінія показника інформаційної ефективності  $\eta_{max} = 1$  в [1] побудована в площині енергетичної  $\beta$  і частотної  $\gamma$  ефективності у відповідність із співвідношенням (6).

З використанням співвідношень (1), (2), (5) можна показати, що показники  $\beta$ ,  $\gamma$  і  $Q$  пов'язані співвідношенням:

$$\gamma = \beta \cdot Q. \quad (7)$$

Тоді, при використанні логарифмічного масштаба, згідно з співвідношенням (7), лінії з однаковими значеннями перевищення потужності сигналу над потужністю шуму  $Q = \alpha / F = P_c / P_{ш}$  являють собою прями з кутом нахилу  $45^\circ$  в тій же площині, що і лінія показника інформаційної ефективності.

**Постановка завдання.** Наявність єдиної лінії інформаційної ефективності для значення  $\eta_{max} = 1$  істотно ускладнює вибір компромісної стратегії при альтернативному протиріччі: максимізація  $\beta$  при заданій якості зв'язку (наприклад, при  $P_b = const$  у разі передачі дискретних повідомлень), або максимізувати  $\gamma$  при  $P_b = const$ .

Очевидно, що порівняння систем за узагальненим показником інформаційної ефективності  $\eta$

з використанням єдиної границі для  $\eta = 1$  є недостатньо повним і об'єктивним.

Тому **однією з задач модифікації** існуючої методики є введення узагальненої шкали ефективності  $\eta$  для визначення числових значень в області  $\eta = [0,1]$ , яка обмежена межею Шеннона [1,2].

Така модифікація вперше запропонована в [3], при якій номограма (рис.1) дозволяє провести гнучкий вибір компромісної стратегії з використанням шкали  $\eta = [0,1]$ , оскільки в реальних системах  $\eta < 1$ .

**Друга задача** витікає з принципової можливості використання площини відображення  $\{\beta; \gamma\}$  для оцінки інформаційних можливостей дискретних сигналів.

Незважаючи на те, що знаменник в (3) для показника  $\eta$  визначений для пропускну здатності безперервного сигналу (4), чисельник цього виразу цілком може бути використаний для випадку передачі дискретних повідомлень в заданих частотно-енергетичних умовах при обумовлених умовах достовірної передачі  $P_b \leq P_{b \text{ зад.}}$

Важливо відзначити, що надлишкове кодування, як інструмент досягнення необхідної достовірності, є важливим фактором зміни потрібного для його реалізації частотного та енергетичного ресурсу: при збільшенні швидкості кодування погіршується частотна ефективність, в той же час підвищується енергетична ефективність.

Тому **третьою задачею** є розширення діапазону відображуваних параметрів (достовірності помилки до і після кодування) при оцінці інформаційної ефективності різних систем.

**Четвертою задачею** є відображення ефективності використання сигналів заданого виду модуляції на додатковій шкалі відношення сигнал/шум, накладеної на простір зазначених трьох попередніх показників ефективності. Така шкала використовувалася автором методики [1], однак не була об'єднана в нерозривний комплекс.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для вирішення першої з поставлених задач побудуємо еквіпотенціальні криві, які б відображали точки з однаковою інформаційною ефективністю  $\eta$  неперервного або дискретного каналу. Для цього скористаємося формулою (3), де замість інформаційної ефективності підставимо значення 0,5; 0,25; 0,125; 0,0625. Результати представлені на рис. 1.

Згідно запропонованій шкалі, інформаційна ефективність  $\eta$  зростає з наближенням до межі Шеннона, де вона наближається до 1.

При цьому слід відмітити, що однакова інформаційна ефективність може бути досягнута як при

низькій або високій частотній ефективності  $\gamma$ , чи при низьких або високих значеннях показника енергетичної ефективності  $\beta$ . Отже, автономно розглядати параметр інформаційної ефективності  $\eta$  не доцільно, а лише сумісно з іншими показниками ефективності.

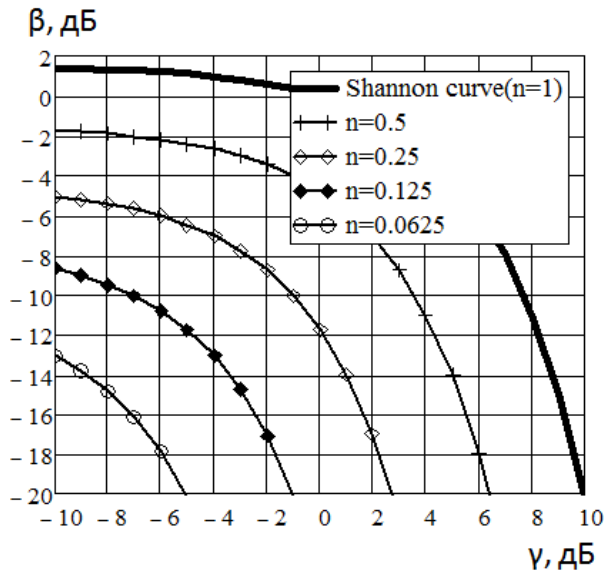


Рис. 1. Границя Шеннона і еквіпотенціальні криві, що відображають рівну інформаційну ефективність

**Модифікація та формування комплексної методики оцінки інформаційної ефективності стосовно систем передавання дискретних сигналів.**

При передачі дискретних сигналів з позиційністю  $M$  зі швидкістю  $V$  символів в секунду при ймовірності помилки прийняття символу в каналі  $P_s$  максимальна швидкість передачі інформації у дискретному каналі – пропускну здатність  $C_d$  визначається виразом:

$$C_d = V \cdot \left[ \log M + P_s \log \frac{P_s}{M-1} + (1-P_s) \log(1-P_s) \right]. \quad (8)$$

Слід зазначити, що, згідно з теоремою Шеннона, швидкість  $C_d$  в каналі, де передбачається використання завадостійкого кодування, одночасно є обмеженням для продуктивності джерела дискретних повідомлень  $R_d$ , і, як наслідок, продуктивності системи  $R_d$ . Отже,  $R_d \leq C_d < C_s$ .

В каналі без кодування допустимо  $R_d = C_d$ .

Для цього випадку (без кодування) співвідношення для узагальненої інформаційної ефективності для дискретного каналу зв'язку [4] справедливо:

$$H_{10} = \frac{1}{2} \left( \log M + P_s \log \frac{P_s}{M-1} + (1-P_s) \log(1-P_s) \right) \quad (9)$$

Тоді

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \left( \log M + P_s \log \frac{1}{M-1} + (1-P_s) \log(1-P_s) \right)}{\log(1+h^2)} = \frac{1}{2} H_{10} \quad (10)$$

або

$$\eta_d = \frac{C_d}{C} = \frac{R}{C} = \frac{1}{2} \left( \log M + P_s \log \frac{1}{M-1} + (1-P_s) \log(1-P_s) \right), \quad (11)$$

де  $h^2 = Q = P_c / P_{ш} = \alpha / V$ , виходячи з допущення що  $F = 2V$ . Остаточо

$$\eta = \frac{R}{C} = \frac{H_{1d}}{\log(1+Q)}. \quad (12)$$

Саме єдність фізичної сутності показника  $\eta$  виду (12) дає підстави вважати допустимим використання уніфікованої шкали  $\eta [0,1]$  для всіх видів сигналів.

Відповідно, для дискретних сигналів коефіцієнт енергетичної ефективності визначається виразом:

$$\beta_d = \frac{C_d}{\alpha} = \frac{R}{\alpha} = \frac{\log M + P_s \log \frac{1}{M-1} + (1-P_s) \log(1-P_s)}{h^2} = \frac{\gamma}{Q}, \quad (13)$$

Коефіцієнт частотної ефективності визначається виразом:

$$\gamma_d = \frac{R_d}{\Delta F} = H_{1d} \quad (14)$$

Перейдемо до задачі визначення параметрів ефективності для дискретних сигналів і оцінки впливу значення ймовірності помилки на інформаційні характеристики.

### Визначення параметрів ефективності для дискретних сигналів.

Розглянемо кроки модифікації відомої методики оцінки ефективності СПІ для випадку дискретних сигналів на прикладі сигналів QPSK і QAM-M.

Відомо [2], що завадостійкість сигналів QPSK і QAM-M істотно розрізняється при зміні позиційності  $M$ , тобто кількості біт в одному відліку модульованого сигналу.

Виходячи з виду QAM-M, кожному значенню  $h^2$  можна поставити у відповідність значення  $P_b$ .

На рис. 2 відображені залежності ефективності використання ресурсів багатопозиційної модуляції і СКК для різних вимог до  $P_b$ .

Збільшення позиційності  $M$  сигналів QAM-M змінює підхід до динаміки взаємозалежності частотної та енергетичної ефективності: з зростанням  $M$  покращується інформаційна ефективність  $\eta$ , частотна ефективність  $\gamma$  СПІ, а також енергетична ефективність  $\beta$ .

Найбільша зміна узагальненої ефективності  $\eta$  має місце при переході від QPSK до QAM-16 (від значення  $\eta = 0,3$  до значень  $\eta = 0,5 \dots 0,6$ ).

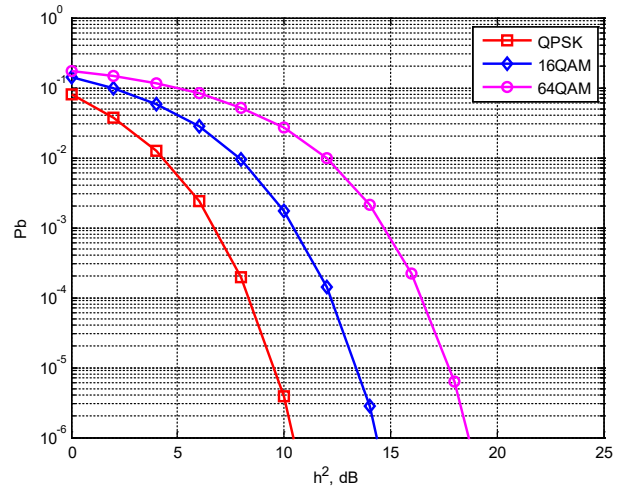


Рис. 2. Графік залежності ймовірності помилок біту від  $h^2$  для QPSK, QAM-16, QAM-64

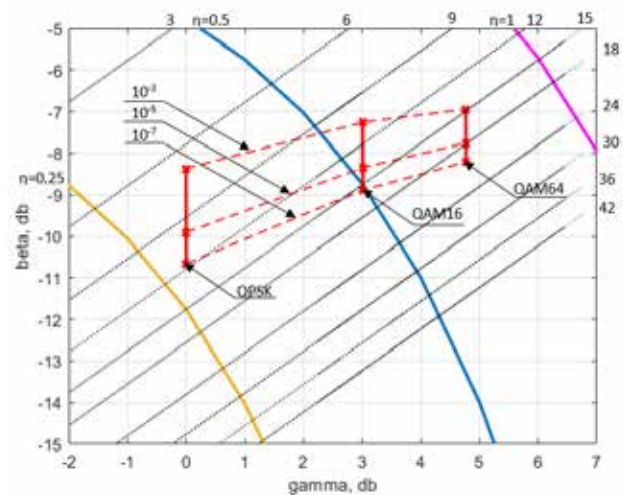


Рис. 3. Показники ефективності використання ресурсів каналів з багатопозиційними сигналами

Яскраво виражена тенденція витрати енергетичного ресурсу для забезпечення більш високої достовірності. В одиницях показника енергетичної ефективності діапазон  $-8 \dots -11$  дБ для QPSK при динаміці досяжної достовірності  $10^{-3} \dots 10^{-7}$ , для QAM-16 – це  $-7 \dots -8,5$  дБ.

Завдяки додатковій шкалі абсолютних енергетичних ресурсів ( $h^2 = Q$ ) можна судити про те, що зазначений діапазон достовірності для QPSK пов'язаний з енергетичним ресурсом каналу зв'язку  $h^2 = 7 \dots 15$  дБ, а для QAM-16 – це  $h^2 = 15 \dots 20$  дБ.

Отже, велика сукупна ефективність сигналів з великим значенням  $M$  вимагає більшої потужності сигналу в точці прийому. В умовах обмежень на потужність випромінювання базових станцій мобільного зв'язку подібна обставина, зокрема обумовлює істотне скорочення розмірів сот в системах нових поколінь (замість

радіусів в тисячу метрів в системах 2G, 3G до сотень метрів системах 4G і до десятків метрів в системах 5G).

Разом з тим, новим є наочне відображення тенденції погіршення узагальнених показників інформаційної ефективності при покращенні достовірності сигналів QPSK, QAM-16 та QAM-64. Можна бачити, що при покращенні достовірності, інформаційний показник  $\eta$  суттєво зменшується на фоні значного погіршення енергетичної ефективності  $\beta$  при практичній стабільності показника частотної ефективності  $\gamma$ .

Перевагою наведеної методики є те, що вона дозволяє порівняти між собою не тільки системи з різними видами маніпуляції, але системи зв'язку, які для підтримки високої завадостійкості використовують різні види кодування.

Введення ступені кодування впливає на (1) і (3) наступним чином [5]:

$$\beta = \frac{k \left( \log M + P_b \log \frac{P_b}{M-1} + (1-P_b) \log(1-P_b) \right)}{h^2}; \quad (15)$$

$$\eta = \frac{k \left( \log M + P_b \log \frac{P_b}{M-1} + (1-P_b) \log(1-P_b) \right)}{\log(1+h^2)}, \quad (16)$$

де  $k$  – кількість інформаційних символів в кодовому блоці довжиною  $n$  (відношення  $r_k = k / n$  називається швидкістю кодування);

$M$  – позиційність символу.

$P_b$  – ймовірність помилки біта на виході декодера.

Результати розрахунку ефективності з урахуванням маніпуляції та завадостійкого кодування дозволяють при необхідній достовірності вибрати спосіб і оцінити ціну досягнення цієї достовірності.

Так, на прикладі сигналів з модуляцією QPSK (рис. 4) показано [5], як варіюються ефективності для досягнення необхідної бітової достовірності помилки  $10^{-7}$ . При вихідній бітовій ймовірності  $10^{-3}$  в каналі (точка 1), можна використовувати завадостійкий блоковий код (127,99,4) для досягнення  $P_b = 10^{-7}$  (точка 4), а при вихідній бітовій ймовірності  $10^{-5}$  в каналі (точка 2), можна використовувати завадостійкий блоковий код (127,113,2) для досягнення  $P_b = 10^{-7}$  (точка 5).

Як можна помітити з рис. 4, застосування ступені завадостійкого кодування завжди призводить до зниження частотної ефективності, і чим більше швидкість коду, тим меншу частотну ефективність воно забезпечує. Водночас, слід зауважити, що при застосуванні завадостійкого кодування енергетична ефективність покращується.

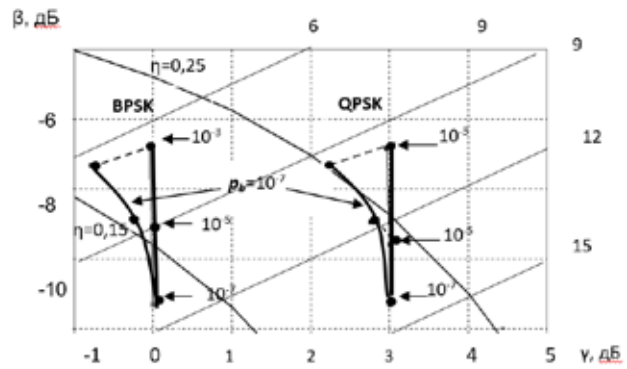


Рис. 4. Показники ефективності використання ресурсів при  $P_b = 10^{-7}$

Отже, застосування нової модифікованої шкали ефективності дозволяє провести комплексну оцінку системи за показниками частотної, енергетичної та узагальної (інформаційної) ефективності, а також за показником задіяного енергетичного ресурсу  $h^2$ .

При цьому модифікована шкала ефективності дозволяє комплексно оцінити частотну та енергетичну ефективність використання багатопозиційної маніпуляції та завадостійкого кодування. Такий спосіб оцінки розширює спектр пошуку оптимальних за відносним критерієм енергетичної і частотної ефективності систем передачі, а також абсолютним енергетичним показником  $h^2$ , оскільки забезпечує великі можливості варіювання параметрами для досягнення максимальної продуктивності при мінімальних витратах ресурсів каналу зв'язку.

#### Висновки:

Запропонована методика оцінки ефективності передавання дискретних сигналів дозволяє наочно відобразити різні шкали, які визначають динаміку зміни відношення потужності сигнал шум на вході демодулятора в залежності від енергетичної ефективності  $\beta$ , частотної ефективності  $\gamma$  та узагальної інформаційної ефективності  $\eta$ , тобто оцінювати ефективність використання ресурсів каналів зв'язку при всьому різноманітті засобів підвищення інформаційних можливостей цих каналів, включаючи використання сигнально-кодових конструкцій на основі сигналів багатопозиційної маніпуляції, що особливо актуально в каналах зі слабкою енергетикою, зокрема, в системах безпроводового зв'язку.

Методика дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів каналів зв'язку з багатопозиційною маніпуляцією та завадостійким кодуванням, а також кількісно оцінити витрати на реалізацію

заходів щодо підвищення достовірності або продуктивності у вимірі запропонованих показників. Такий спосіб оцінки розширює сферу пошуку

оптимальних систем передачі, оскільки враховує можливість варіювання параметрами сигналів в каналах зв'язку в широкому діапазоні значень.

#### Список літератури:

1. Зюко, А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. Москва: Связь, 1972. 359 с.
2. Основи теорії телекомунікацій / О. В. Корнейко, О. В. Кувшинов, О. П. Лежнюк та ін.; за ред. М. Ю. Ільченка. Київ: ІССЗІ НТУУ «КПІ», 2010. 786 с.
3. Уривський Л.О., Мошинська А.В., Прокопенко К.А. Модифікована методика оцінки ефективності систем передачі інформації. Наукові вісті НТУУ «КПІ». Київ, 2010. № 6. С. 24-29.
4. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. Москва: Сов.радио, 1974. 720 с.
5. Уривский Л.А., Прокопенко Е.А. Оценка эффективности использования передачи с многопозиционными сигналами на основе модифицированной методики Зюко А.Г. Научно-техническая конференция «Проблемы телекоммуникаций»: Сборник тез. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. С. 127.

#### **Uryvsky L.O., Shmigel B.O. EFFICIENCY EVALUATION OF RESOURCES IN WIRELESS COMMUNICATION CHANNELS**

*Modern society seeks to satisfy the needs of receiving information with high transmission speed and reliability, which is why the problem is quite acute in conditions of limited resources of communication channels, namely frequency and energy. Scientists and engineers are faced with the task of how to use these resources most efficiently and at the same time not to lose the main parameters of the channel.*

*Despite the fact that the main task of existing and future telecommunication systems is to transmit a given amount of information, their construction is often based solely on reliability criteria. That is why the task of ensuring the efficiency of the use of limited energy and frequency resources of the communication channel is relevant for wireless communication systems. At the same time, many well-known systems are characterized by unjustified redundancy of means that ensure the reliability and performance of the communication channel, low efficiency of use of frequency and energy resources of the communication line.*

*To assess the effectiveness of the communication channel resource, the concept of information efficiency is used as the ratio of the productivity of the message source, which characterizes the speed of transmission of information received by the end user to the bandwidth of the communication channel, which is used both for the transmission of user information and for the transmission of technical information. The bandwidth of the communication channel is estimated by the Shannon boundary and is the maximum possible speed of information transmission over the communication channel.*

*Achieving the best information efficiency means striving to make the most of the information resource of the communication channel, taking into account the redistribution of energy and frequency resources of the communication channel.*

*The article considers the efficiency of using the resources of communication channels with multi-position manipulation and noise immune coding. A comprehensive methodology for assessing the information efficiency of discrete signal transmission systems is proposed. It should be noted that the same information efficiency can be achieved either at low frequency efficiency or at low energy efficiency. Therefore, it is not advisable to consider the parameters of information efficiency independently, but in conjunction with other performance indicators.*

**Key words:** *signal energy, Shannon limit, frequency efficiency, energy efficiency, BER, multi-position signals, signal-code constructions.*