

УДК 621.391

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.016169

Б. О. ШМІГЕЛЬ¹, аспірант;А. П. БОНДАРЧУК², доктор техн. наук, професор,¹ Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ² Державний університет телекомунікацій, Київ

ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВІРОГІДНОСТІ

У класичній теорії телекомунікацій показником надійності є ймовірність інформаційної бітової помилки. У сучасних міжнародних стандартах і рекомендаціях існує ієрархія показників якості каналу зв'язку на основі вимірювань, яка не пов'язана з класичною теорією завадостійкості.

Процедури вимірювання показників якості передавання інформації можливі лише в разі використання вже наявної телекомунікаційної системи. Застосування класичної теорії завадостійкості дає змогу забезпечити відповідність енергетичних параметрів необхідним показникам якості майбутньої системи зв'язку.

Ключові слова: цифровий канал зв'язку; помилковий блок; коефіцієнт секунд із помилками; коефіцієнт секунд із численними помилками; коефіцієнт блоків із фоновими помилками.

ВСТУП

Актуальність. У класичній теорії телекомунікацій показником вірогідності виступає ймовірність помилки інформаційного біта. У сучасних міжнародних стандартах і рекомендаціях існує своя ієрархія показників якості каналу зв'язку, заснована на вимірюваннях, яка не пов'язана з класичною теорією завадостійкості. Отже, єдиної методики визначення показників якості каналів телекомунікацій не існує.

Процедури вимірювання показників якості передавання інформації можливі лише за умов використання вже створеної системи телекомунікацій. Застосування класичної теорії завадостійкості дає змогу передбачати відповідність енергетичних параметрів майбутньої системи зв'язку необхідним показникам якості.

Методики для оцінювання якості цифрових каналів зв'язку, запропоновані в стандартах ITU-T G.821 та ITU-T G.826, розглядають параметри і норми наскрізних характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів і з'єднань із постійною бітовою швидкістю, але не конкретизують якість каналу та не дають його точні характеристики у вимірі класичних показників вірогідності.

Існує потреба у створенні методики порівняльного оцінювання якості цифрових каналів зв'язку для мультисервісних систем зв'язку з відомими характеристиками вірогідності за заданими параметрами і за різних умов експлуатації.

Методи та постановка проблеми. Для цифрових трактів, працюючих на первинній швидкості або вищій, Рекомендація ITU-T G.826 ґрунтується на використанні блоків, на які поділяється бітова інформація, а цифрові з'єднання, що працюють на меншій швидкості, оцінюються за допомогою помилок у бітах і коефіцієнта помилок на біт, що не дає змоги оцінити канал під час проектування, до початку експлуатації.

У стандарті G.826 подано таблицю розрахованих параметрів оцінювання цифрових каналів зв'язку із заданими характеристиками (табл. 1). Розглянуті варіанти взято для різних типів віртуальних контейнерів із певними значеннями швидкості, кількості блоків за одиницю часу та значеннями BER, відповідно до цього розраховано ESR, SESR, SEPI та BBER.

Таблиця 1

Характеристики цифрових каналів зв'язку за Рекомендацією ITU-T G.826

Швидкість, кбіт/с (параметри)	1664 (VC-11)	2240 (VC-12)	6848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 344 (VC-4-4c)	2 405 376 (VC-4-16c)	9 621 504 (VC-4-64c)
Блоки/с	2000	2000	2000	8000	8000	8000	8000	8000
ESR (відповідно до Рекомендації ITU-T G.826, додаток 2)	0,005	0,005	0,005	0,01	0,02	NA	NA	NA
Відсоток, %, часу SESR	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
SEPI подія/с (додаток 3)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	$0,8 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
BBER (відповідно до Рекомендації ITU-T G.826, додаток 2)	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}

© Б. О. Шмігель, А. П. Бондарчук, 2022

У табл. 1 подано граничні параметри для віртуальних контейнерів VC-11, VC-12, VC-2, VC-3, VC-4, VC-4-4с, VC-4-16с, VC-4-64с зі швидкостями відповідно 1664, 2240, 6858, 48 960, 150 336, 601 344, 2 405 376, 9 621 504 кбіт/с. Кожний із цих типів віртуальних контейнерів відповідає своєму набору характеристик із певними типами цифрових та операційних шляхів підімкнення та передавання, що і пояснює різну швидкість передавання даних. Існує потреба в розрахунку граничних значень для якісних параметрів цифрових каналів зв'язку. Виконаємо постановку задачі відповідно до наших потреб. Розглянемо цифровий канал із заданими характеристиками та розрахуємо основні параметри для оцінювання каналу.

Мета і задачі дослідження. *Метою* дослідження є створення уніфікованої методики оцінювання якості зв'язку, за допомогою якої на етапі проектування визначаються показники вірогідності, пропонувані в класичній теорії завадостійкості, які встановлюють їх відповідність сучасним міжнародним рекомендаціям та стандартам на етапі експлуатації телекомунікаційної системи.

Постановка задачі: схарактеризувати наявну методику оцінювання цифрового каналу зв'язку та здійснити розрахунок для таких граничних значень:

- показників коефіцієнта помилок по секундах із помилками (ESR);
- відсотка часу залежно від коефіцієнта помилок по вражених секундах із помилками (SESR);
- коефіцієнта фонових помилок блока (BBER).

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Визначення граничних параметрів для якісного оцінювання цифрових каналів зв'язку

Встановлені параметри потрібно розрахувати відносно заданих характеристик оцінюваного каналу.

1. Імовірність події, протилежної тому, що жоден з n біт у блоці не був спотворений:

$$P_{EB} = 1 - (1 - p)^n. \quad (1)$$

2. Передбачається, що за одну секунду передається кількість блоків M , що є цілим числом. Отже, за одну секунду передається M блоків по n біт. Водночас кількість бітів за секунду — це швидкість V . Тож маємо

$$M = V/n. \quad (2)$$

Знаючи кількість блоків за секунду (2), а також імовірність того, що блок помилковий (1), можна записати наочну формулу:

$$P_{ES} = 1 - (1 - P_{EB})^{V/n}. \quad (3)$$

3. Зважаючи на вирази (1) і (2), а також вдаючись до біноміального розподілу, можна визначити ймовірність появи певної кількості помилкових блоків за одну секунду.

Нехай y — кількість помилкових блоків за секунду,

$$y = 0, 1, 2 \dots k, \quad (4)$$

тоді

$$P(y = k) = \frac{M!}{(M - k)!k!} P_{EB}^k (1 - P_{EB})^{M - k}. \quad (5)$$

Для виникнення секунди с численними помилками потрібно, щоб 30% і більше блоків у секунді були помилковими, тобто

$$y \geq 0,3M. \quad (6)$$

Тоді, скориставшись (2) і (5) з урахуванням умов (4) і (6), дістанемо:

$$P_{SEs} = 1 - \sum_{k=0}^{k < 0,3M} P(y = k). \quad (7)$$

Підставимо конкретні значення k у вираз із формули (7), що містить факторіали, і здобудемо оптимізований вираз для розрахунку частини формули (7), що містить факторіали:

$$P_{SEs} = 1 - \left(1 + \frac{M}{1!} + \frac{(M-1)M}{2!} + \dots + \frac{(M-0,3M+1) \dots (M-1)M}{(0,3M)!} \right) \sum_{k=0}^{k < 0,3M} P_{EB}^k (1 - P_{EB})^{M - k}. \quad (8)$$

Формула (8) є оптимальною з погляду потреби розрахунку факторіалів. Обчислення трьох факторіалів у виразі $\frac{M!}{(M - k)!k!}$ ми замінили на розрахунок факторіала в знаменнику $(0,3M)!$ та розрахунок чисельника $(M - 0,3M + 1) \dots (M - 1)M$, що є добутком останніх $M - 0,3M$ множників факторіала числа M .

Отже, для розв'язання цієї задачі скористаємося формулами (1), (3) і (8) та, застосувавши пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB, розрахуємо встановлені задачею значення, використовуючи задані параметри. Основні параметри для розрахунку — це швидкості потоків відповідно до типів тракту, довжина блока та вірогідність помилки в неперервному потоці BER. Максимальне значення блока для протоколів TCP-IP — 65 535. Щодо заданих характеристик: розміру блока, швидкості

та значення помилкового біта, розраховані характеристики вибрано згідно з рекомендаціями ESR, SESR, SEPI і BBER та визначено граничні значення BER.

У разі збільшення значення BER якісні показники каналу різко спадають, а вірогідність передавання в такому каналі наднизька для його продуктивного використання.

Змінюючи задані параметри, розраховуємо і заповнюємо значення таблиці граничних характеристик цифрових каналів зв'язку (табл. 2).

Зі зростанням швидкості передавання в каналі вірогідність приймання знижуватиметься, тому потрібно підлаштовувати параметри для отримання показників якісної роботи каналу.

Маніпулюючи значенням BER у межах норми для цифрових каналів, здобуємо необхідні значення ESR, SESR, SEPI та BBER.

Таблиця 2

Розраховані граничні характеристики цифрових каналів зв'язку

Швидкість, кбіт/с (параметри)	1664 (VC-11)	2240 (VC-12)	6848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 344 (VC-4-4c)	2 405 376 (VC-4-16c)	9 621 504 (VC-4-64c)
Довжина блока	832	1120	3424	6120	18792	75168	300672	1202688
Блоки/с	2000	2000	2000	8000	8000	8000	8000	8000
BER	$6,02 \times 10^{-6}$	$4,44 \times 10^{-6}$	$1,46 \times 10^{-6}$	$0,82 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	NA	NA	NA
ESR (віповідно до Рекомендації ITU-T G.826, див. додаток 2)	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}	2×10^{-2}	NA	NA	NA
ESR (відповідно до розрахунків)	$5,01 \times 10^{-3}$	$4,98 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}	$5,00 \times 10^{-3}$	$7,04 \times 10^{-3}$	NA1	NA1	NA1
Відсоток, %, часу SESR	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001
SEPI подія/с (віповідно до Рекомендації ITU-T G.826, див. додаток 3)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	$0,8 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
SEPI подія/с (відповідно до розрахунку)	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
BBER (віповідно до Рекомендації ITU-T G.826, див. додаток 2)	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
BBER (віповідно до розрахунку)	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$2,49 \times 10^{-5}$	$4,93 \times 10^{-5}$	NA	NA	NA

Примітка. ESR зазвичай втрачають значення для каналів із високою швидкістю передавання, тому вони не задані для каналів із бітовою швидкістю понад 160 Мбіт/с. Проте синхронні цифрові канали є безпомилковими протягом тривалих періодів часу навіть за швидкостях Гбіт/с, а високий ESR вказує на деградовану систему передавання. Тому для цілей технічного обслуговування ES моніторинг має здійснюватися в межах будь-яких вимірювальних пристроїв, що працюють із помилками на цих швидкостях.

ВИСНОВКИ

Методики для оцінювання якості цифрових каналів зв'язку, запропоновані в стандартах ITU-T G.821 та ITU-T G.826, розглядають параметри і норми наскрізних характеристик помилок для міжнародних цифрових трактів і з'єднань із постійною бітовою швидкістю, але не можуть повноцінно оцінити якість каналу в процесі експлуатації та не дають його точні характеристики.

У статті досліджено стандарти і Рекомендації ITU-TG.826. На базі здобутих із цих стандартів формул розраховано значення характеристик цифрових каналів зв'язку із заданими показниками вірогідності та визначено граничні характеристики для якісної роботи в мультисервісних мережах.

На основі математичних виразів створено програмний код, який за заданими параметрами обчислює шукані характеристики цифрового каналу. Він дає можливість дістати граничні значення для якісного передавання інформації в цифрових каналах зв'язку із заданою вірогідністю на етапі проектування системи телекомунікацій.

Список використаної літератури

1. *Основи теорії телекомунікацій: підручник / Л.О. Уривський, О.В. Корнейко, О.В. Кувшинов [та ін.]; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. Київ: Вид-во ІСЗІ НТУУ «КПІ», 2010. 786 с.*
2. *Мошинська А. В., Ольховик Д. М. Методика оцінки якості цифрових каналів в мультисервісних системах зв'язку // Перспективи телекомунікації 2019: тринадцята міжнар. наук.-техн. конф., 15-19 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 49–51.*

3. *ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. 2002. P. 6–9.*

4. *Roger L. Freeman Telecommunication System Engineering. John Wiley & Sons Inc; 4th edition. 2004. 1024 p.*

B. O. Shmigel, A. P. Bondarchuk

ASSESSMENT OF DIGITAL CHANNELS OF COMMUNICATION WITH DEFINED RELIABILITY CHARACTERISTICS

In the classical theory of telecommunications, an indicator of reliability is the probability of an information bit error. In modern international standards and recommendations, there is a hierarchy of quality indicators of the communication channel based on measurements, which is not related to the classical theory of noise immunity.

The procedures for measuring the quality indicators of information transmission are possible only when using an already existing telecommunication system. The use of the classical theory of noise immunity makes it possible to provide for the correspondence of the energy parameters to the necessary quality indicators for the future communication system.

The research aims to develop a unified methodology to assess the quality of communication channels and combine the classical theory of telecommunications with international recommendations and standards. To find the relationship between them, we analyzed existing methods of assessing the quality of communications channels, developed an algorithm for assessing the quality parameters and analyzed the characteristics of the channel.

The methodology helps to assess the level of compliance of the quality parameters of information transmission through the channels of existing digital telecommunication systems with the requirements of international standards and recommendations. It is possible to research the behavior of quality indicators and optimize the operation of existing and design new digital communication channels according to the criteria of the quality of information transmission in accordance with the requirements of international standards and recommendations.

Keywords: digital communication channel; errored block; errored seconds; severely errored second; background block error ratio.

ЗВ'ЯЗОК

Наукове фахове видання

Редакційна обробка та коректура

Т. В. Ількевич

Комп'ютерна верстка та дизайн

Г. С. Тимченко

Відповідальний за випуск

І. І. Тищенко

Формат 60×84/8. Папір друкарський.
Гарнітура SchoolBookC, EuropeCond. Зам. 500
Наклад 300 прим.

Державний університет телекомунікацій
03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7
Тел. (044) 249-25-75
E-mail: zviaz-ok@ukr.net