

УДК 621.3.011.21

## МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ СИГНАЛІВ В ЦИФРОВИХ РАДІОРЕЛЕЙНИХ ТА ТРОПОСФЕРНИХ СТАНЦІЯХ ЗВ'ЯЗКУ

*Бондаренко Г. І., ст. викладач, Зінченко А. К., магістрант;  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», Київ, Україна*

## METHODS OF QUALITY CONTROL SIGNALS IN DIGITAL RADIORELAY AND TROPOSPHERIC COMMUNICATION STATION

*Bondarenko G. I., senior lecturer, Zinchenko A. K., undergraduate student  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

### Вступ

Наземні мікрохвильові телекомунікації набувають все більшого розвитку, які успішно конкурують з кабельними та волоконно – оптичними системами зв'язку. Неперервне удосконалення електронних компонентів, поява нових принципів та технологій призвело до створення нових поколінь пристроїв для безпроводного зв'язку, перевагами якого є висока надійність, малі габарити, низька енергоємність. Один із видів безпроводної технології являється радіорелейний та тропосферний зв'язок. Під радіорелейним зв'язком розуміють радіозв'язок, створений на ретрансляції радіосигналів дециметрового та сантиметрового діапазону станціями, що розташовані на поверхні Землі. Сукупність технічних засобів і середовища розповсюдження радіохвиль для забезпечення радіорелейного зв'язку утворюють радіорелейну лінію зв'язку (РРЛЗ). Найпростіша топологія РРЛЗ представляє собою дві станції, що забезпечують передачу інформації між двома пунктами. На сьогоднішній день широкого розвитку отримали цифрові радіорелейні системи (ЦРРС). ЦРРС вирішують одну з головних задач створення завадостійких каналів зв'язку, що дозволяють передавати інформацію з високою швидкістю та з необхідною достовірністю. Один з найважливіших аспектів в роботі будь-якої цифрової системи, зокрема тропосферної радіорелейної системи зв'язку (ТРРСЗ), є достовірна передача в інформації. Для забезпечення цього сучасна цифрова система зв'язку повинна мати елементи мережевого управління, за допомогою яких розв'язуються такі задачі, як реконфігурування мережі, безперервний моніторинг параметрів системи зв'язку, фіксація аварійних станів [1]. Стрімкий розвиток і використання цифрових систем передачі вимагає розробки методів контролю та вимірювання їх параметрів. В результаті, постає задача застосування найбільш оптимальних методів та інструментів аналізу цифрового

тракту на наявність помилок при передачі даних, тобто без відключення каналу.

### Постановка задачі

У даній статті наводиться огляд сучасних методів моніторингу якості сигналу в режимі реального часу в цифрових системах зв'язку, які працюють на швидкості 2048 кбіт/с, що відповідає цифровому потоку первинного рівня (*E1*) європейського стандарту плезіохронної цифрової ієрархії (*Plesiochronous digital hierarchy, PDH*). Описуються методи оптимального (за критеріями достовірності виміряних даних, простоти реалізації пристрою контролю) визначення помилок в цифровому тракці та їх сигналізація.

### Показники помилок в цифровому тракці

Показники помилок цифрових трактів передачі являються основним фактором у визначенні якості передачі інформації, тому види основних показників помилок та їх норми для різних складових цифрових систем затверджені стандартами *ITU – T*, зокрема рекомендаціями [3 – 6].

Основним каналом систем зв'язку плезіохронної цифрової ієрархії є канал *E1*. В порівнянні з іншими каналами ієрархії *PDH*, канал *E1* має декілька особливостей, що пов'язані з його використанням, а іменню над циклову структуру і канал сигналізації. Інтерес до каналу *E1* викликаний з потребою абонентів — як організацій, так і приватних осіб — в швидкостях, що перевищують 64 кбіт/с. Тому контроль параметрів потоку *E1* являється важливою задачею. Все більш актуальним стає задача моніторингу якості цифрової системи в режимі реального часу, тобто без відключення системи зв'язку [2].

Для визначення якісного стану цифрового каналу або тракту використовують наступні основні показники помилок:

- *ES (Error Seconds)* — односекундний інтервал, протягом якого має місце принаймні одна помилка (для цифрових каналів) або односекундний інтервал з одним або з декількома блоками з помилками (для цифрових трактів).

- *ESR (Error Seconds Rate)* — коефіцієнт помилок по секундах з помилками, відношення кількості секунд з помилками *ES* до загальної кількості секунд протягом часу готовності з'єднання за визначений період вимірювання.

- *SES (Several Error Seconds)* — односекундний інтервал, протягом якого коефіцієнт помилок по бітах (*BER*) перевищує або дорівнює  $10^{-3}$  (для цифрових каналів), або односекундний інтервал, в якому кількість зіпсованих помилками блоків з фоновими помилками перевищує 30 % або має принаймні один період з серйозними порушеннями (для цифрових трактів).

- *SESR (Several Error Seconds Rate)* — коефіцієнт помилок по секундах, які сильно уражені помилками — відношення кількості сильно уражених помилками секунд *SES* до загальної кількості секунд протягом часу готовності з'єднання за визначений період вимірювання.

- *BER (Bit Error Rate)* — коефіцієнт помилок по бітам, рівний відношенню числа бітових помилок, передані за час проведення тесту по каналу, що знаходиться в стані готовності.

- *BBER (Background Block Error Rate)* — коефіцієнт помилок по блокам з фоновими помилками — відношення числа блоків з фоновими помилками до кількості блоків протягом часу готовності каналу за винятком всіх блоків в *SES*.

Показники помилок підраховуються тільки тоді, коли тракт знаходиться в стані готовності. В [7] визначено, що стан готовності закінчується на початку періоду часу, що містить, по крайній мірі, десять послідовних секунд, що уражені помилками в одному напрямку передачі. Тракт знову стане знаходитись в стані готовності на початку періоду часу, що містить, по крайній мірі, десять послідовних секунд, що не являються секундами, уражені помилками. Приклад визначення стану готовності представлений на рис. 1.

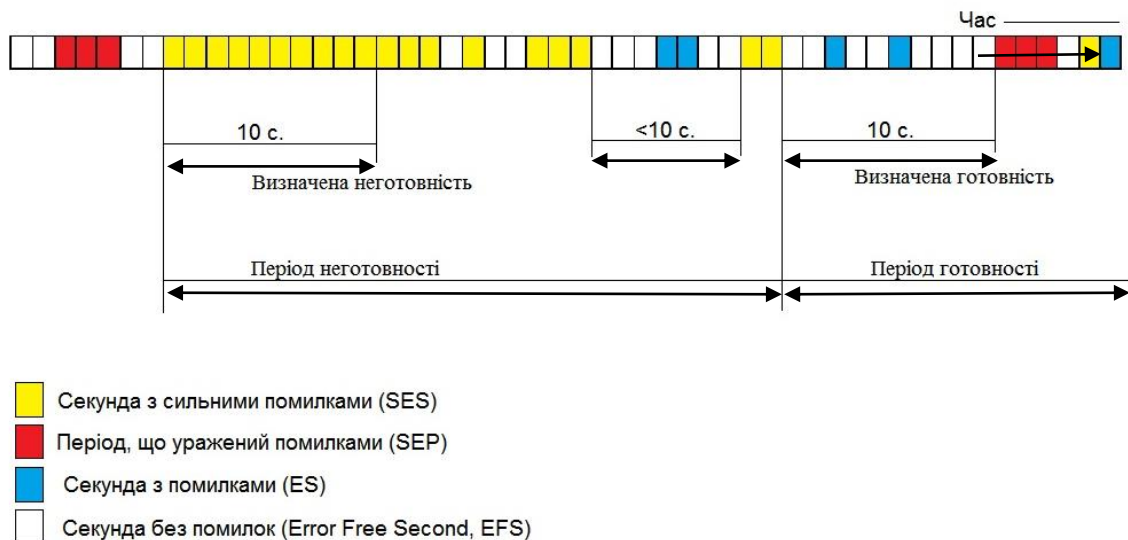


Рис.1 Визначення стану готовності тракту

### Методи оцінки якості цифрового сигналу

В загальному випадку розрізняють два методи вимірювання помилок в цифрових системах — з відключенням та без відключення сеансу зв'язку [7]. Вимірювання показників помилок цифрового тракту *E1* з перервою зв'язку виконуються перед введенням його в експлуатацію, після ремонту, а іноді і в процесі технічного обслуговування.

Для організації вимірювань з відключенням каналу використовуються два аналізатори потоку, один в якості генератора тестової послідовності,

інший — аналізатора параметрів цифрового каналу. Між генератором і аналізатором тестової послідовності існує синхронізація по тестовій послідовності, тобто процес, в результаті якого аналізатор має можливість передбачати наступне значення кожного біта, що приймається. Тобто, відбувається порівняння послідовності на вході з послідовністю на виході цифрового каналу. За допомогою такої схеми оцінки якості цифрового сигналу отримуємо високу точність вимірювань. Тестовий сигнал представляє собою псевдовипадкову послідовність імпульсів (ПСП) довжина якої для цифрового тракту зі швидкістю 2048 кбіт/с. складає  $2^{15} - 1$ . Вимірювання показників помилок в даному випадку можливе по кожному напрямку передачі даних або по шлейфу [8]. В останньому випадку вимірювальне обладнання передбачається тільки на одному кінці цифрового з'єднання, на іншому — виконується шлейф. В результаті вимірювань отримуємо значення *BER*. Однак такий метод оцінки якості цифрового каналу можливий тільки при налаштуванні лінії зв'язку та виводі з експлуатації. Тому для реальної оцінки стану цифрового тракту при швидкостях передачі даних рівній та вище первинної, необхідно застосовувати методи, які дозволяють здійснювати контроль якості без перерви сеансу зв'язку.

Вимірювання значення *BER* без перерви зв'язку вимагає точного знання структури цифрового сигналу. Таким сигналом в складі циклу, наприклад первинного цифрового сигналу *E1*, являється цикловий синхросигнал, що займає 7 біт нульового каналного інтервалу сигналу *E1*. Цикловий сигнал передається у кожному другому циклі сигналу *E1*, причому кожний цикл *E1* містить 32 каналних інтервалів *i*, відповідно,  $32 \cdot 8 = 258$  біт. Таким чином, відносна доля циклового синхросигналу в сигналі *E1* складає  $7 / (256 \cdot 2) < 1.4\%$ . Тому достовірність оцінки *BER* за допомогою циклового синхросигналу дуже низька [9].

Згідно [4] для більш достовірної оцінки якості цифрового тракту передачі оперують з такими поняттями параметрів помилок, як «секунди з помилками», які можливо виміряти в режимі реального часу. Для каналів зі швидкістю *E1* та вище, враховуючи циклову структуру, використовують поняття не помилковий біт, а блок з помилкою, і відповідний показний  $ES_{E1}$  — як секунду, протягом якої спостерігався один блок, що містить хоча би одну помилку, тобто, використовується метод вимірювання блокових помилок. Всі методи вимірювання блокових помилок передбачають введення збитковості в інформаційний сигнал [9]. Проте внесення збитковості при кодуванні повідомлення призводить до необхідності або збільшувати час, відведений для передачі даного повідомлення, або скорочувати тривалість елемента сигналу. Це в свою чергу призведе до зростання ймовірності бітової помилки. Також надмірна збитковість вимагає розширення смуги робочої частот, але якщо це неможливо, то знижується швидкість передачі

даних. Для вирішення цього питання використовують спосіб контролю на основі методу циклічних контрольних сум.

Найбільш універсальним способом вимірювання помилок без перерви зв'язку являється контроль за допомогою циклового збиткового коду (*Cycle Redundancy Check, CRC*). Метод *CRC* заснований на діленні та множенні многочленів. Інформаційним потік бітів представляють у вигляді інформаційного поліному  $x^n + x^{n-1} + \dots + x^1 + 1$ .

Процедура обчислення перевірочних бітів полягає в наступному:

- інформаційний поліном множиться на одночлен  $x^r$ , де  $r$  — старша степінь породжуючого поліному. Множення еквівалентно зсуву інформаційного поліному вліво на  $r$  розрядів

- отриманий добуток ділиться на породжуючий поліном. Породжуючий поліном визначається в відповідності з рекомендаціями *ITU – T* в залежності від швидкості передачі. Для цифрового тракту *E1*, породжуючий поліном має вид:  $P(x) = x^4 + x + 1$ . В результаті отримуємо залишок від ділення, який використовується в якості контрольної інформації і передається з інформаційним сигналом.

- аналогічна обробка отриманого блоку даних виконується на приймальній стороні, і залишок ділення многочленів порівнюється з переданим залишком. Відмінність вказаних залишків многочленів являється ознакою помилки в цифровому сигналі.

Проте спосіб контролю якості цифрового каналу з використанням процедури *CRC* має деякі особливості. По-перше, кожна помилка, що визначена з допомогою циклічного коду не обов'язково пов'язана з помилкою одного біта інформації. Декілька бітових помилок в одному сверхциклі можуть дати тільки одну помилку *CRC* для блоку. По-друге, декілька бітових помилок можуть скомпенсувати одна одну і не ввійти в значення суми *CRC*. Таким чином, при використанні процедури контролю *CRC* можна говорити не про істинний рівень помилок в каналі, а тільки про оцінку їх величини. Тим не менше, *CRC* являється зручним методом контролю помилок при проведенні сервісного спостереження працюючого каналу, коли практично неможливо виміряти реальні параметри бітових помилок [2].

На сьогоднішній день один із варіантів оцінки якості цифрових сигналів — отримати ймовірнісні співвідношення між параметрами на основі *BER* і *ES/SES*, використовуючи моделі ймовірнісних процесів, що відбуваються при вимірюваннях. Сучасні стандарти для оцінки показників якості пропонують використовувати не одноточкові (усереднені по гістограмі на інтервалі  $T$ ) показники, типу *BER*, а багатоточкові (інтегровані) показники типу *BER* (*Bit Error Probability*) — ймовірності бітової помилки. Якщо *BER* — це частота (в термінології теорії ймовірності) і задається гістограмою або (частіше) одно точковим середнім значенням, то *BER* — це ймовірність і задається вона кривою розподілу функції від відсотку (%) інтерва-

лу інтегрування, яку можна апроксимувати в декількох характерних точках інтервалу  $T$ , сформував багатоточкову маску (рис. 2).

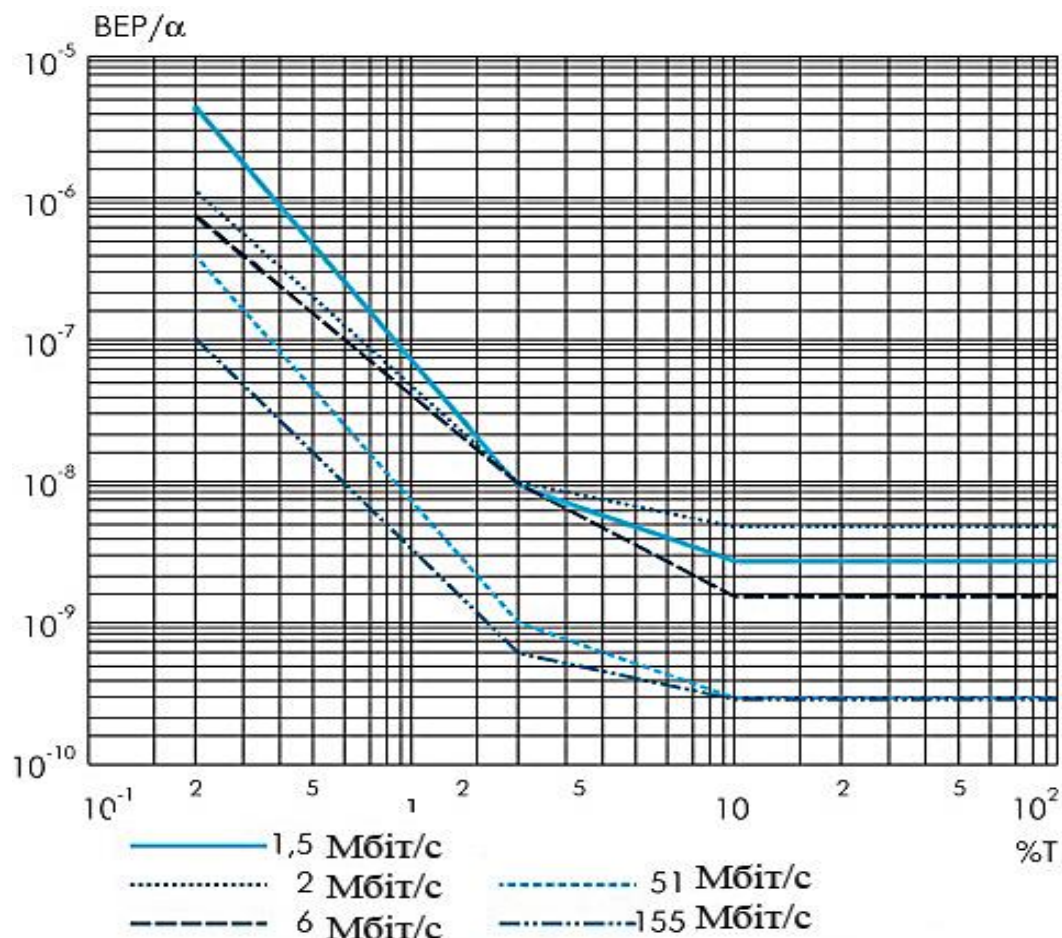


Рис.2 Маска  $BER/\alpha$  для каналів з різною пропускною здатністю

Суть методики полягає в тому, що помилки контролюють за допомогою того ж  $BER$  — тестеру в багатьох точках на великій послідовності підінтервалів вимірювання, але гістограму значень  $BER$  не усереднюють, а формують на її основі інтегральну функцію розподілу  $BER(t)$  спочатку експоненціального вигляду. Потім  $BER(t)$  кусочно — лінійно апроксимують, по крайній мірі, в трьох інтервалах між точками  $t = 0,2\%$ ,  $2\%$ ,  $10\%$  і  $100\%T$ , де  $T$  — стандартний інтервал вимірювання. Графік, що з'єднує ці точки, відповідає так званій масці  $BER$ . Якщо фактична маска  $BER$  не перевищує в еталонних точках стандартизовані значення  $BER$  (тобто покривається еталонною маскою), то рівень помилок в каналах цифрової передачі задовольняє вимогам стандартів [4].

Якщо по такому набору характерних точок побудувати ймовірнісну математичну модель  $BER$  на основі [10,11] і провести ідентифікацію її параметрів по набору відповідних оцінок  $ES$  і  $SES$  [4,3], то можна отримати

співвідношення, що зв'язують ймовірності отримання певних  $ES$  і  $SES$  по  $BER$  і числу біт в блоці, що використовується в якості досліджуваного [12].

Маска  $BER$  представляє собою нормовану функцію  $BER/\alpha(T)$ , де  $T$  — період часу експлуатації, що має найгірші показники, а  $\alpha$  — параметр помилок, що відповідає середньому числу помилок в одному блоці на інтервалі  $T$ . Причому  $\alpha$  залежить від статистики помилок, довжини  $CRC$  — блоків, схеми кодування, наявності процедур шифрування.

Для розрахунку  $BER/\alpha$  використовується певна (правдоподібна) модель помилок в заданому каналі зв'язку. Величина  $\alpha$  для потоку 2048 кбіт/с в відповідності [11] вибрана рівною 10 по результатам досліджень лабораторії *Intelsat* для кодексів з відносною швидкістю кодування 3/4 і скремблюванням.

### Висновки

Проаналізувавши методи контролю та оцінки якості цифрового тракту, можна сказати, що метод вимірювання помилок в цифрових системах зв'язку з відключенням каналу дозволяє отримати істинне значення  $BER$  з точністю до одиничної бітової помилки шляхом порівняння прийнятої послідовності з відомою генерованою тестовою послідовністю. Однак результати такого методу не відповідають реальній роботі системи, і його можливо використовувати тільки при налаштуванні, перед введенням обладнання в експлуатацію та виводі з експлуатації.

Методи вимірювання показників помилок без відключення каналу більш складні в реалізації, проте дозволяють отримати реальні показники працездатності каналу, коли немає можливості вимкнути передачу даних для визначення значення помилок.

Проте для вимірювання значення  $BER$  без перерви сеансу зв'язку згідно першого методу розглянутого в даній статті, необхідно точно знати структуру цифрового сигналу. Достовірність оцінки  $BER$  за допомогою циклового синхросигналу, який передається у кожному другому циклі сигналу  $E1$ , дуже низька, так як відносна доля циклового синхросигналу складає менше 1,5 %.

Метод контролю, що використовує циклічні збиткові коди, тобто з використання процедури  $CRC$ , оперує з поняттями, як блок з помилками, і дозволяє отримати значення параметру  $ES_{E1}$  — як секунду, протягом якої спостерігався один блок, що містить хоча би одну помилку. При використанні процедури контролю  $CRC$  можна говорити не про істинний рівень помилок в каналі, а тільки про оцінку їх величини. Тим не менше,  $CRC$  являється зручним методом контролю помилок при проведенні сервісного спостереження працюючого каналу, коли практично неможливо виміряти реальні параметри бітових помилок.

Один із методів для кількісної оцінки якості цифрового тракту припускає перерахунок одних показників помилок в інші, але для вирішення цієї

задачі детермінованих співвідношень не існує, тому пропонується отримати ймовірнісні співвідношення між параметрами на основі *BER* і *ES/SES*, використовуючи моделі ймовірнісних процесів, що відбуваються при вимірюваннях. Даний метод оперує з поняттям ймовірності бітової помилки *BER* і задається вона кривою розподілу функції від відсотку інтервалу інтегрування, яку можна апроксимувати в декількох характерних точках інтервалу *T*, сформувавши багатоточкову маску. Згідно такого підходу слідє, що для об'єктивної оцінки цифрового тракту необхідно приводити опорні значення *BER*, отримані в результаті добового моніторингу і усереднені на основі *BER* по стандартним інтервалам часу (0,2%, 2,0% і 10% *T*, де *T*=24 год. ).

### Література

1. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM); (2-е издание, исправленное) / Н. Н. Слепов — М. : Радио и связь, 2000. — 421 с.
2. Канаков В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации / В. А. Канаков — Н. Новгород, 2006. — 91 с.
3. ITU-T G.821 — Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an integrated services digital network.
4. ITU-T G.826 — Error performance parameters and objectives for international constant bit rate digital paths at or above the primary rate.
5. ITU-T G.828 — Error performance parameters and objectives for international, constant bit – rate synchronous digital paths.
6. ITU-T G.829 — Error performance events for SDH multiplex and regenerator sections.
7. Бакланов И. Г. Технология измерений в современных телекоммуникациях / И. Г. Бакланов — М. : Изд-во «ЭКО-Трендз», 1997 г. — 139 с.
8. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов – М.: «ЭКО-Трендз», 2001 г. — 261 с.
9. Иванцов И. Измерения в цифровых системах связи — режим доступа: <http://www.osp.ru/lan/2005/10/377334/> — назва за екрана.
10. ITU-R Rec. S.1062-2. Allowable error performance for a hypothetical reference digital path operating at or above the primary rate (11/99).
11. ITU-R Rec. S.614-3. Allowable error performance for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service operating below 15 GHz when forming part of an international connection in an integrated services digital network (11/93).
12. Волоконно – оптическая техника: Современное состояние и перспективы. 2 – е изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. Дмитриева С. А. и Слепова Н. Н. — М. : ООО «Волоконно – оптическая техника», 2005. — 576 с.

### References

1. Slepov N. N. Sovremennue tehnologii tsufrovukh optovolokoonukh setei sviazi (ATM, PDH, SDH, SONET i WDM), (2-e izdanie, ispravlenoe). M.: Radio i sviaz, 2000, 421 p.
2. Kanakov V. A. Novie tekhnologii izmereniia v tsufrovuh kanalakh peredachi informatsii. N. Novgorod, 2006, 91 p.



3. ITU-T G.821 – Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an integrated services digital network.
4. ITU-T G.826 – Error performance parameters and objectives for international constant bit rate digital paths at or above the primary rate.
5. ITU-T G.828 – Error performance parameters and objectives for international, constant bit – rate synchronous digital paths.
6. ITU-T G.829 – Error performance events for SDH multiplex and regenerator sections.
7. Baklanov I. G. Tekhnologiya izmerenii v sovremennukh telekomunikatsiakh. – М.: Izdatelstvo “Eko - Trendz”, 1997 g., 139 s.
8. Baklanov I. G. Testirovanie i diagnostika system svyazi. М. : “Eko - Trendz”, 2001, 261 p.
9. Yvantsov Y. Yzmerenyua v tsyfrovyykh systemakh svyazy — rezhym dostupu: <http://www.osp.ru/lan/2005/10/377334/> — nazva za ekrana.
10. ITU-R Rec. S.1062-2. Allowable error performance for a hypothetical reference digital path operating at or above the primary rate (11/99).
11. ITU-R Rec. S.614-3. Allowable error performance for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service operating below 15 GHz when forming part of an international connection in an integrated services digital network (11/93).
12. Dmytryeva S. A. i Slepova N. N. Volokonno – optycheskaya tekhnika: Sovremennoe sostoyanye u perspektyvy. 2 – e yzd., pererab. Sb. statey pod red.— М. : ООО «Volokonno – optycheskaya tekhnika», 2005, 576 p.

*Бондаренко Г. І., Зінченко А. К. Методи контролю якості сигналів в цифрових радіорелейних та тропосферних станціях зв'язку. У даній статті наводиться огляд існуючих методів та засобів оцінки якості сигналів в цифрових системах зв'язку, що працюють із цифровим потоком первинного рівня синхронної цифрової ієрархії 2048 кбіт/с (потік Е1). Розглянуті питання вимірювання основних показників помилок, що виникають в цифровому каналі, таких, як BER – (Bit Error Ratio, коефіцієнт бітових помилок) та ES – (Error Seconds, секунди з помилками). Приводиться опис методів вимірювання цих показників, як при вимкненому сервісі, так і в режимі реального часу.*

**Ключові слова:** цифровий потік, методи оцінки цифрових сигналів, бітові помилки.

*Бондаренко Г. И., Зинченко А. К. Методы контроля качества сигналов в цифровых радиорелейных и тропосферных станциях связи. В данной статье приводится описание методов и средств оценки качества сигналов в цифровых системах связи, которые работают с цифровым потоком первичного уровня синхронной цифровой иерархии 2048 кбит/с (поток Е1). Рассмотрены вопросы измерения основных показателей ошибок, которые возникают в цифровом канале, таких, как BER – (Bit Error Ratio, коэффициент битовых ошибок) и ES – (Error Seconds, секунды с ошибками). Приводиться описание методов измерения этих показателей, как при выключенном сервисе, так и в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** цифровой поток, методы оценки цифровых сигналов, битовые ошибки.

*Bondarenko G. I., Zinchenko A. K. Methods of quality control signals in digital radio relay and tropospheric communication station.*

*Introduction. The modern digital communication systems such as radiorelay and tropospheric communication, their advantages before the analogue systems, requirements for digi-*

tal systems in terms of accurate data transmission and control errors in service monitoring are described.

Performance error in digital path. The overview of main error indicators in digital communication systems, approved by international telecommunication union is provided in this section. It contains a brief description of determine the readiness state and error seconds calculation method.

Methods for evaluating the quality of digital signal. The questions measuring key indicators of errors that can occur in the digital channel, such as BER - (Bit Error Ratio) and ES - (Error Seconds) are considered. The description of the methods for measuring these indicators, so as out of service and in service monitoring is given. The errors detection method used the EI stream structure and their efficiency is described. The diagnostic methods in the digital path in service monitoring and applications features for authentic definition of the bit errors coefficient based on CRC-4 procedure are compared. One of the methods offers to get probabilistic relations between the parameters based on BER and ES / SES for the evaluation digital path use, using a probabilistic model of the processes occurring in the measurements. Mask of bit errors ratio of the relative measurements time is produced.

Conclusions. The methods of control quality signals for errors in digital communication systems compared different approaches for indicating and calculation the main indicators of errors, such as BER and ES/SES are analyzed. It is recommended to use CRC-4 procedure with probabilistic model of the processes occurring in the measurements using distribution mask bit error probability for channels with different bandwidth for the quantitative evaluation the quality radio path.

**Keywords:** digital stream, methods for evaluating digital signals, bit errors.