

**ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ**

УДК 681.3(0.45)

**В.П. Бабак**, чл.-кор. НАН України**В.С. Василенко**, канд. техн. наук**О.К. Юдін**, канд. техн. наук**ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ  
НА ВІДНОСНУ ШВИДКІСТЬ ОБМІНУ ДАНИМИ**

НАУ, кафедра комп'ютеризованих систем захисту інформації, e-mail: kszi@ukr.net

*Проведено аналіз залежності відносної швидкості передачі даних від стану параметрів каналів зв'язку для різних типів протоколів обміну інформацією в телекомунікаційних системах.***Вступ**

Ефективність використання сучасних телекомунікаційних мереж (ТКМ) залежить від своєчасного і достовірного обміну інформаційними ресурсами між їх елементами. Для цього згідно із семирівневою моделлю, введеною стандартом ISO 7498 "Еталонна модель взаємодії відкритих систем", розроблено і використовуються різні протоколи обміну, кожен з яких забезпечує певні швидкість та достовірність обміну [1–5]. У статті проведено аналіз оцінки впливу параметрів каналів на відносну швидкість у процедурах обміну інформацією в телекомунікаційних системах.

За способами організації обміну серед протоколів ТКМ можна розрізнити два типи: протоколи із забезпеченням високої швидкості обміну даними без використання статистичних методів аналізу каналів зв'язку та протоколи із забезпеченням певного рівня достовірності переданих даних. Протоколи першого типу (наприклад, протоколи типу frame relay, IP) або взагалі не здійснюють такого контролю, або в разі виявлення викривлень інформаційного об'єкта вилючають його із мережі. Протоколи другого типу можна розділити на протоколи, що забезпечують корекцію можливих викривлень за рахунок використання кодів, які виявляють їх з наступним перезапитом викривленої інформації – протоколи із вирішувальним зворотним зв'язком (ВЗЗ) (наприклад, протоколи транспортного рівня TCP) та протоколи, які забезпечують корекцію можливих викривлень за рахунок використання коректувальних кодів.

**Постановка завдання**

Процедури організації обміну із застосуванням перешкодостійких коректувальних кодів (ПКК) будемо розглядати без визначення конкретного ПКК, оскільки характеристики таких кодів є досить близькими.

Серед процедур організації обміну із застосуванням ВЗЗ найбільш поширеними в сучасних протоколах організації обміну є:

1) стартостопний метод передачі (СМП) або передача із зупинкою і очікуванням – ВЗЗ з очікуванням (ВЗЗ – ОЧ), SAW – Stop And Wait), який часто називають блоковим методом передачі;

2) потоковий метод передачі (ПМП) або ВЗЗ з послідовною передачею (ВЗЗ – ПП GBN – Go Back N);

3) метод вибіркового (селективного) повтору або ВЗЗ з адресним перезапитом (МВП, ВЗЗ – АП, SR – Selective Repeat).

Зауважимо, що в працях [1–2] уже здійснено спроби проаналізувати вплив технічного стану каналів зв'язку на характеристики процедур обміну інформацією в телекомунікаційних процедурах і отримано ряд важливих для практичного використання рекомендацій та вирази для оцінок відносної швидкості обміну даними, достовірності передачі інформації та ефективної швидкості обміну інформацією як залежності від технічної характеристики стану каналу зв'язку – інтенсивності завад  $\lambda$ . Ця характеристика добре описує технічний стан каналу, але її практичне визначення викликає певні труднощі.

У статті виконано порівняння процедур обміну із застосуванням перешкодостійких коректувальних кодів (процедури із ПКК) з виявленням та корекцією викривлень та протоколів (процедур обміну) із застосуванням процедури із ВЗЗ, виходячи із більш поширеної характеристики для передачі цифрової інформації – ймовірності викривлення одного біта (символа) даних  $P_b$ .

Як відомо [2], ця ймовірність у точці приймання є функцією співвідношення сигнал/шум та застосованого в каналі зв'язку методу модуляції (амплітудна, фазова чи частотна) сигналу, завдяки чому її визначення є технічно більш простим завданням.

Для переходу від параметрів стану каналу зв'язку, поданих залежно від інтенсивності завад  $\lambda$  до характеристики стану каналу у вигляді ймовірності викривлення символу  $P_v$  скористаємося відомими співвідношеннями, за якими визначають кількість викривлень  $n_v$ , що припадають на одне базове кодове слово (БКС) із загальною кількістю символів  $n$ :

$$n_v = n P_v,$$

а також кількість викривлень  $n_v$ , що припадають на часовий інтервал  $t_c$ , необхідний для передачі одного БКС [1; 3]:

$$n_v = \lambda t_c = \lambda n/B,$$

$$t_c = n/B,$$

де  $n$  – загальна кількість символів у БКС;  $B$  – технічна швидкість передачі інформації, символи/с.

Оскільки ліві частини цих рівнянь є однією і тією самою змінною, то достовірним є співвідношення

$$n P_v = \lambda n/B,$$

звідкіля можна отримати оцінку інтенсивності перешкод для каналу з визначеною технічною швидкістю передачі інформації  $B$  та співвідношенням сигнал/шум у вигляді

$$\lambda = B P_v. \quad (1)$$

Визначимо вплив параметрів каналів зв'язку на характеристики процедур обміну інформацією в телекомунікаційних системах, урахувавши вираз (1) та результати досліджень [1; 2].

### **Розрахунок відносної швидкості передачі даних у процедурах обміну інформацією з використанням перешкодостійких коректувальних кодів**

Для процедур, що використовують ПКК, відносна швидкість обміну визначається [4; 5] відносною швидкістю коду  $R_k$ , тобто

$$R_{\text{ПКК}} = R_k = m_k/n,$$

де  $m_k$  – кількість інформаційних символів в БКС. Очевидно, що це співвідношення є справедливим, поки тривалість і інтенсивність завад  $\lambda = B P_v$  є такими, що виникаюча при цьому в інформації помилка не перевищує коректувальних можливостей вибраного коду.

Подальші міркування є справедливими для випадків, коли коректувальний код вибрано з умови виправлення викривлення одного символу в межах одного БКС. Для цих умов неважко переконатися в справедливості виразу, що визначає критичне значення інтенсивності завад (з ураху-

ванням можливості здійснювати подальший обмін інформацією) за показником швидкості передачі даних щодо використання ПКК:

$$\lambda_T = B P_{\text{вг}} \leq 1/t_c = B/n,$$

звідси

$$P_{\text{вг}} \leq 1/n,$$

де  $P_{\text{вг}}$  – критичне значення ймовірності викривлення символу, коли чисельність викривлень ще не перевищує одного БКС.

Це значення слід вважати критичним тому, що в разі збільшення інтенсивності завад на боці прийому буде отримуватися інформаційне повідомлення з викривленнями, які не можливо виправити даним ПКК, що в інформаційному сенсі слід уважати еквівалентним припиненню обміну ( $R_{\text{ПКК}} = 0$ ).

### **Розрахунок відносної швидкості при використанні вирішувального зворотного зв'язку із очікуванням**

У протоколах, що використовують ВЗЗ з очікуванням, передавач передає кожен черговий пакет (кадр, керуюче повідомлення) тільки після отримання приймальною стороною сигналу правильності прийому  $V$ . Після передачі чергового пакета (кадру, керуючого повідомлення) передавальна сторона чекає підтвердження. У разі виявлення на приймальній стороні помилки, це повідомлення стирається, а на передавальну сторону видається сигнал перезапиту  $W$ , за яким повторюється передача попереднього пакета (кадру, керуючого повідомлення). Якщо надходить негативне підтвердження або відбувається перевищення тайм-ауту, пакет передається повторно.

Пакет скидається (стирається) з накопичувача передавача лише після отримання позитивного підтвердження.

При цьому передавач видає черговий або повторює перезапиту через час після передавання попереднього пакета:

$$t_{\text{оч}} = 2 t_p + t_n + t_d + t_{\text{а.с}},$$

де  $t_p$  – час розповсюдження сигналу від передавача до приймача:

$$t_p = D/V_c,$$

$D$  – довжина лінії зв'язку для передачі сигналу;  $V_c$  – швидкість передачі сигналу в середовищі розповсюдження;  $t_n$  – час формування і видачі сигналів  $V$  або  $W$ ;  $t_d$  – час декодування (пошуку наявності помилки) прийнятого пакета;  $t_{\text{а.с}}$  – час прийому і аналізу сигналів  $V$  або  $W$ .

При такій організації обміну максимальна кількість переданих  $N_{\text{п.мак}}$  пакетів (кадрів, керуючих повідомлень) дорівнює

$$N_{\text{п.мак}} = t/(t_c + t_{\text{оч}}),$$

де  $t_c$  – уже визначений раніше час передачі одного БКС.

На приймач інформації при цьому буде видано  $m N_{пр}$  символів, причому кількість прийнятих пакетів (кадрів, керуючих повідомлень) відрізняється від кількості переданих на величину  $N_{ст} + N_{втр}$ , де  $N_{ст}$  – кількість пакетів, які були стерті у разі прийому через наявність в них викривлень, що виникають за час  $t$ ;  $N_{втр}$  – кількість втрат – кількість пакетів, які не були передані в інтервали, пов'язані з очікуванням у процедурі під час перезапиту.

Якщо позначити інтенсивність викривлень через  $B P_B$ , то

$$N_{пр} = N_{п\max} - (N_{ст} + N_{втр}),$$

$$N_{ст} = \lambda t = B P_B t,$$

$$N_{втр} = \lambda t t_{оч} / t_c = B^2 P_B t t_{оч} / n.$$

Тому відносна швидкість передачі даних під час використання таких протоколів можна описати як

$$\begin{aligned} R_{оч} &= m N_{пр} / (n N_{п\max}) = \\ &= (m/n) (N_{п\max} - \lambda t (1 + t_{оч} / t_c) / N_{п\max} = \\ &= (m/n) [1 - (\lambda / t_c) (t_c + t_{оч}) t / N_{п\max}]. \end{aligned}$$

Звідси, з урахуванням того, що  $N_{п\max} = t / (t_c + t_{оч})$ , дістанемо:

$$R_{оч} = (m/n) [1 - P_B (B^2/n) (t_c + t_{оч})^2]$$

та

$$R_{оч} = (m/n) [1 - P_B/n (n + B t_{оч})^2]. \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що при використанні ВЗЗ з очікуванням існує критичне значення інтенсивності завад, а отже, і критичне (допустиме) значення ймовірності  $P_{в.кр.оч}$ , коли відносна швидкість передачі даних дорівнює

$R_{оч} = 0$ , тобто коли система обміну переходить в режим безперервного перезапиту:

$$P_{в.кр.об} = n / (n + t_{оч} B)^2. \quad (3)$$

### Розрахунок відносної швидкості при використанні вирішувального зворотного зв'язку з обміном блоками

Різновидом попереднього способу передачі є ВЗЗ з обміном блоками за  $q$  повідомлень. У таких протоколах, не зважаючи на те, що обмін здійснюється блоками за  $q$  повідомлень, організація перезапиту відповідає ВЗЗ з очікуванням, тобто, підставивши у вирази (2) і (3) замість  $n$  величину  $n q$ , а замість часу передачі одного БКС  $t_c$  час передачі блоку  $t_б$ , одержимо:

$$R_{нк} = (m/n) (1 - P_B / (n q)) (n q + B t_{оч})^2,$$

і критичне значення інтенсивності завад

$$(B P)_{в.кр.об} = t_б / (t_б + t_{оч})^2,$$

звідки критичне значення ймовірності викривлення:

$$P_{в.кр.об} = n q / (n q + t_{оч} B)^2.$$

### Розрахунок відносної швидкості при використанні вирішувального зворотного зв'язку з безперервною передачею

У протоколах, що використовують ВЗЗ з безперервною передачею, максимальна кількість переданих за час  $t$  повідомлень

$$N_{п\max} = t / t_c,$$

а кількість прийнятих повідомлень зменшується на кількість повідомлень, що стираються при виявленні викривлень.

Оскільки при цьому з накопичувача стирають ємність повідомлень  $\gamma$ , а кількість завад за час  $t$  дорівнює  $B P_B t$ , то

$$N_{ст} = B P_B t \gamma.$$

Враховуючи, що ємність накопичувача повинна задовольняти [4; 6] вираз

$$\gamma \geq 1 + t_{оч} / t_c,$$

відносна швидкість передачі

$$\begin{aligned} R_{nn} &= m (N_{п\max} - B P_B t \gamma) / (n N_{п\max}) = \\ &= (m/n) (1 - B P_B t (1 + t_{оч} / t_c) t_c / t) = \\ &= (m/n) (1 - P_B (n + B t_{оч})), \end{aligned}$$

а критична інтенсивність завад

$$(B P_B)_{кр} = 1 / (t_c + t_{оч}),$$

звідки критичне значення ймовірності викривлення

$$P_{в.кр.об} = 1 / (n + B t_{оч}).$$

### Розрахунок відносної швидкості при використанні вирішувального зворотного зв'язку з вибірковою передачею даних

Для оцінки відносної швидкості передачі в протоколах, що використовують ВЗЗ з адресним перезапиту і передачею інформаційних об'єктів блоками (вибіркова передача чи вибіркоче повторення), визначимо максимальний час, потрібний для передачі одного повідомлення із  $q$  блоків. За час одиничної (разової) передачі одного повідомлення  $t_{п}$  можливе

$$K = \lambda t_{п} = B P_B t_б$$

завад, які в найгіршому разі викривлять таку саму кількість блоків.

Час, необхідний для їхнього перезапиту і повторної передачі

$$t_{п1} = t_{п} (B P_B t_б) + t_{оч} = t_{п} q (n P_B) + t_{оч}.$$

За час перезапиту і повторної передачі  $t_{п1}$  також можливі викривлення повторно переданих блоків. Оскільки час повторної передачі дорівнює

$$B P_B t_{п} t_б = n P_B t_{п},$$

то викривлення, які виникають знову в кількості

$$B P_B t_{п} (n P_B) = B P_B t_б (n P_B) = q (n P_B)^2,$$

потребують перезапиту і чергової передачі викривлених блоків.

Час, необхідний для цього:

$$t_{n2} = t_n q (n P_B)^2 + t_{оч}.$$

Міркуючи аналогічно, дістанемо

$$t_{n3} = t_n q (n P_B)^3 + t_{оч};$$

$$t_{nu} = t_n q (n P_B)^u + t_{оч},$$

де  $u$  – кількість перезапиту до повної передачі даного повідомлення.

Тоді час, необхідний для передачі одного повідомлення:

$$\begin{aligned} T_n &= t_n + t_{n1} + t_{n2} + \dots + t_{nu} = \\ &= q t_n + q t_n (n P_B) + q t_n (n P_B)^2 + \dots + q t_n (n P_B)^u + \\ &+ u t_{оч} = q t_n (1 + n P_B + (n P_B)^2 + \dots + (n P_B)^u) + u t_{оч}. \end{aligned}$$

Оскільки вираз в дужках є геометричною прогресією з першим членом, який дорівнює одиниці, і знаменником  $(n P_B)$ , то при  $n P_B < 1$

$$T_n = q t_n / (1 - n P_B) + u t_{оч}. \quad (4)$$

Кількість перезапиту  $u$  у виразі можна визначити, якщо вважати, що перезапиту продовжуються доти, поки ймовірність  $P_{u(>0)}$  появи хоча б одного викривлення на інтервалі часу  $t_n (n P_B)^u$ , який є необхідним для забезпечення  $u$ -го перезапиту, не стане меншим за ймовірності  $P_{u(0)}$  відсутності викривлень на цьому самому часовому інтервалі. При пуассонівському законі розподілу викривлень (з їх інтенсивністю  $B P_B$ )

$$P_{u(0)} = \exp(-B P_B t_n (n P_B)^u);$$

$$P_{u(>0)} = 1 - \exp(-B P_B t_n (n P_B)^u).$$

Тоді ця умова запишеться у вигляді

$$1 - \exp(B P_B t_n (n P_B)^u) < \exp(-B P_B t_n (n P_B)^u),$$

звідки

$$(n P_B)^{u+1} < (\ln 2) / q \quad \text{і при } n P_B < 1;$$

$$u > \ln(\ln(2/q)) / (\ln(n P_B)) - 1. \quad (5)$$

Співвідношення (5) є справедливим вже при

$$u = \ln(\ln(2/q)) / (\ln(n P_B)), \quad (6)$$

тобто вираз (6) може бути використаним для розрахунку часу  $T_n$ , необхідного для передачі одного повідомлення із  $q$  блоків.

З урахуванням співвідношення (6) вираз (4) набуває вигляду:

$$T_n = q t_n / (1 - n P_B) + t_{оч} \ln(\ln(2/q)) / (\ln(n P_B)).$$

Оскільки за цей час буде передано

$$B T_n = B \{q t_n / (1 - n P_B) + u t_{оч}\};$$

$$B T_n = \{n q^2 / (1 - n P_B) +$$

$$+ B t_{оч} \ln(\ln(2/q)) / (\ln(n P_B))\},$$

а взято  $mq$  двійкових символів, то відносна швидкість передачі

$$R_{а.п.д} mq / (B T_n) = mq (1 - n P_B) \ln(n P_B) / \{n q^2 \ln(n P_B) +$$

$$+ B t_{оч} \ln(\ln(2/q)) / (\ln(n P_B))\}.$$

Зауважимо, що критичне значення ймовірності викривлення при даному способі передачі є ефек-

тивним найкращим серед усіх розглянутих способів із ВЗЗ і дорівнює

$$P_{в.кр.а.п.д} = 1/n.$$

На рисунку показані графіки залежностей відносної швидкості передачі даних СПД від визначених технічних параметрів каналу зв'язку.

### Оцінка ефективності використання процедур

Визначені співвідношення та їх графічне зображення на рисунку дають можливість зробити висновки щодо ефективності використання різних процедур передачі даних.

1. Усі типи процедур із ВЗЗ при низькому рівні завад у каналі з відносною швидкістю передачі є більш ефективними ніж процедури, що використовують коректувальний код.

Але завжди існує граничне значення інтенсивності завад, а, отже, і ймовірності  $P_{вг}$ , при перевищенні якої процедури із коректувальним кодом стають ефективніше. Для визначення цього граничного значення досить розв'язати нерівність

$$m_k/n \geq R_{ВЗЗ},$$

наприклад, для процедур ВЗЗ із безперервною передачею

$$m_k/n \geq (m/n) (1 - P_B (n + B t_{оч})),$$

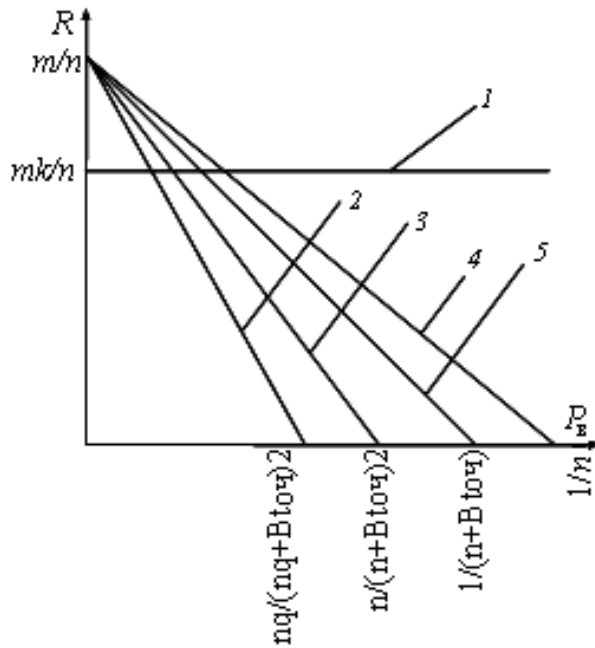
звідки

$$m_k \geq m (1 - P_B (n + B t_{оч})), \quad (7)$$

і

$$P_{вг} \geq (1 - m_k/m) / (n + B t_{оч}). \quad (8)$$

Крім виразів (7), (8), що визначають ефективність коригувального коду і границі його оптимального застосування, можна розрахувати і виграш у відносній швидкості передачі даних від використання коректувального коду.



Залежність відносної швидкості передачі даних від параметрів каналу зв'язку:

1 – процедури з коректувальним кодом; 2 – ВЗЗ з очікуванням; 3 – ВЗЗ з послідовною передачею даних; 4 – ВЗЗ з накопиченням комбінацій; 5 – ВЗЗ з адресним перезапитом

Наприклад, для цих самих процедур ВЗЗ з безперервною передачею:

$$D = R_{\text{КК}}/R_{\text{ВЗЗ}} = m_k/[m(1 - P_v(n + B t_{\text{оч}}))].$$

З виразів (7), (8) випливає, що можуть існувати такі канали чи такі умови їхнього функціонування, коли використання коректувальних кодів із зазначеними умовами вигідніше використання протоколів із ВЗЗ, навіть без урахування необхідності забезпечення для ВЗЗ зворотного зв'язку.

2. Розширення можливостей передачі інформації в умовах впливу перешкод (збільшення критичного значення ймовірності  $P_v$ ) для всіх способів передачі даних із використанням ВЗЗ можна досягти, принаймні, двома способами.

Перший – зменшення довжини повідомлення, тобто кількості символів  $n$  у пакеті (кадрі, комерці, блоці), завдяки чому збільшується частка пакетів, часова тривалість яких ( $t_c = n/B$ ) стає меншою, ніж середня тривалість часового інтервалу  $t_n$  між двома суміжними викривленнями (впливами завод), і тим самим створюються умови для відсутності в таких пакетах викривлень, що є важливим для процедур як із ВЗЗ, так із ПКК і, крім того, зменшується частка пакетів, на які потрапляє більше ніж одне викривлення, що сприяє успішному функціонуванню процедур із ПКК.

Другий – зменшення технічної швидкості передачі  $B$  (при  $B \rightarrow 0$  відносна швидкість передачі даних для більшості процедур із ВЗЗ  $R_{\text{ВЗЗ}} \rightarrow 1/n$ ), при цьому збільшується часова тривалість символів  $\tau$ , за рахунок чого при незмінній потужності символів  $P_c$  їх енергетика  $E = \tau P_c$  підвищується.

В окремих випадках за наявності можливості регулювати ширину смуги пропускання приймачів, збільшення тривалості символів дає змогу зменшити також згадану ширину смуги пропускання приймачів, завдяки чому зменшується енергетика прийнятих завад.

Унаслідок цього збільшується і співвідношення сигнал/шум. Останнє, як уже зазначалося, призводить до зменшення ймовірності викривлення символу  $P_b$ , а отже, до бажаної мети.

#### Висновок

Таким чином, отримані результати для розрахунку відносної швидкості передачі інформації дають можливість визначити кількісну оцінку порівняння ефективності використання протоколів із різними процедурними механізмами залежно від фактичного чи очікуваного рівня завад в каналах обміну даними.

#### Література

1. *Матов О.Я., Василенко В.С., Будько М.М.* Оцінка часу доставки повідомлень у протоколах організації обміну в телекомунікаційних процедурах // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2005. – Т. 7, № 2. – С. 66 – 76.
2. *Бунин С.Г., Войтер А.П.* Вычислительные системы с пакетной радиосвязью. – К.: Техніка, 1989. – 223 с.
3. *Зюкин А.Г., Коробов Ю.Ф.* Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1972. – 398 с.
4. *Зубарев Ю.В., Дворкович В.П.* Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений. – М.: Междунар. центр науч.-техн. информ., 1977. – 212 с.
5. *Bernard Sklar.* Digital communications. – Prentice Hall PTR, 2001. – 1099 p.

Стаття надійшла до редакції 16.12.05.

В.П. Бабак, В.С. Василенко, А.К. Юдин

Оценка влияния параметров канала связи на относительную скорость обмена данными

Предложен анализ зависимости относительной скорости передачи данных от состояния параметров каналов связи для разных типов протоколов обмена информацией в телекоммуникационных системах.

V.P. Babak, V.S. Vasilenko, A.K. Yudin

Estimation of influence channels' condition for relative speed of information interchange

The analysis of dependence of relative speed from a condition of channels for the protocols of information interchange in telecommunication systems was offered, given expressions for his accounts is.