

УДК 681.3

О. Я. Матов<sup>1</sup>, В. С. Василенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет  
вул. Космонавта Комарова, 1, 03058 Київ, Україна

## Порівняльний аналіз процедур обміну інформацією у телекомунікаційних системах

*Запропоновано порівняльний аналіз процедур обміну інформацією у телекомунікаційних системах за показниками відносної та ефективної швидкості, а також за вірністю передачі інформації для протоколів обміну інформацією у телекомунікаційних системах; наведено вирази для розрахунку цих показників.*

**Ключові слова:** *вірність інформації, завада, інформаційний обмін, повідомлення, протоколи обміну, телекомунікаційна система, швидкість передачі.*

### Вступ

Спроби аналізу впливу стану каналів на характеристики процедур обміну інформацією в телекомунікаційних процедурах уже здійснено в ряді робіт, наприклад в [1–3]. У цих роботах сформульовано ряд важливих для практичного використання рекомендацій, однак вирази для оцінок відносної швидкості обміну, вірності передачі інформації та ефективної швидкості обміну отримані як залежності від такої характеристики стану каналів, якою є інтенсивність завад (у згаданих роботах —  $\lambda$ ). Ця характеристика добре описує стан каналу, але її практичне визначення має суттєві утруднення.

У даній статті здійснено спробу порівняльного аналізу процедур обміну із застосуванням завадостійких корегувальних кодів (процедури із ЗКК) з виявленням та корекцією викривлень та протоколів (процедур обміну) із застосуванням вирішувального зворотного зв'язку (процедури із ВЗЗ), виходячи з більш поширеної характеристики стану каналів для передачі цифрової інформації — ймовірності викривлення символу  $P_e$ . Як відомо з [4], ця ймовірність у точці приймання є функцією співвідношення сигнал/шум та застосованого в каналі методу модуляції сигналу (амплітудна, фазова чи частотна), завдяки чому її визначення є технічно більш простою задачею.

© О. Я. Матов, В. С. Василенко

Для переходу від характеристики стану каналу у вигляді інтенсивності завад  $\lambda$  до характеристики стану каналу у вигляді ймовірності викривлення символу  $P_e$ , скористаємось відомими [4, 5] співвідношеннями, які дають оцінки кількості викривлень  $n_e$ , що припадають на одне базове кодове слово (БКС) із загальною кількістю символів  $n$ :

$$n_e = n \cdot P_e,$$

а також кількості викривлень  $n_e$ , що припадають на часовий інтервал, тривалість якого  $t_c = n/B$  — час, необхідний для передачі одного блока БКС:

$$n_e = \lambda \cdot t_c = \lambda \cdot n/B,$$

де  $B$  — технічна швидкість передачі інформації (символів/с).

Оскільки ліві частини цих рівнянь є однією й тією ж змінною, то вірним є співвідношення

$$n \cdot P_e = \lambda \cdot n/B,$$

звідки можна отримати оцінку інтенсивності завад для каналу з визначеними технічною швидкістю передачі інформації  $B$  і співвідношенням сигнал/шум у вигляді:

$$\lambda = B \cdot P_e. \quad (1)$$

Здійснимо аналіз впливу стану каналів на характеристики процедур обміну інформацією в телекомунікаційних системах з урахуванням (1). При цьому, у більшості випадків на підставі результатів досліджень, отриманих в [1, 2], будемо оминати деталі і наводити лише кінцеві результати. Як і раніше, процедури організації обміну із застосуванням ЗКК будемо розглядати без визначення конкретних з них у зв'язку з тим, що характеристики таких кодів, які використані авторами для їхнього аналізу, є досить близькими. Врахуємо також, що серед процедур організації обміну із застосуванням ВЗЗ найбільш поширеними в сучасних протоколах організації обміну є: *стартостопний*, або *передача із зупинкою й очікуванням* — ВЗЗ з очікуванням; *з послідовною передачею* (потоківий метод передачі) ВЗЗ — ПП; *вибіркового (селективного) повтору* або з адресним перезапитом.

### Відносна швидкість у процедурах обміну інформацією

Для процедур, що використовують завадостійкий корегувальний код (ЗКК), відносна швидкість обміну визначається [1, 2] відносною швидкістю коду  $R_k$ , тобто:

$$R_{\text{ЗКК}} = R_k = m_k/n,$$

де  $n$  — загальне, а  $m_k$  — число інформаційних символів у БКС.

Очевидно, що дане співвідношення є справедливим, поки тривалість й інтенсивність завад  $\lambda = B \cdot P_e$  є такими, що виникаюча при цьому в інформації помилка не перевищує корегувальних можливостей вибраного коду. Подальші міркування є справедливими для випадків, коли корегувальний код вибрано з умови виправлення викривлення одного символу в межах одного базового кодового слова. Для цих умов неважко переконатись у справедливості виразу, що визначає критичне значення інтенсивності завад (з погляду можливості здійснювати подальший обмін інформацією) за показником швидкості передачі при використанні ЗКК:

$$\lambda_e = B \cdot P_{e2} \leq 1/t_c = B/n;$$

звідки:

$$P_{e2} \leq 1/n,$$

де  $P_{e2}$  — таке критичне значення ймовірності викривлення символу, коли чисельність викривлень ще не перевищує одного на БКС. Це значення слід уважати критичним тому, що в разі збільшення інтенсивності завад (як видно з виразу (1) є тим же самим, що і збільшення ймовірності викривлення символу  $P_e$ ) на приймальному боці буде отримуватися інформація з такими викривленнями, які не можливо виправити даним ЗКК, що в інформаційному сенсі слід уважати еквівалентним припиненню обміну ( $R_{ЗКК} = 0$ ).

З урахуванням (1) та результатів досліджень, отриманих в [1, 2], у протоколах, що використовують **ВЗЗ з очікуванням**, вираз для розрахунку відносної швидкості набуває вигляду:

$$R_{oc} = (m/n) [1 - P_e \cdot (n + B \cdot t_{oc})^2 / n], \quad (2)$$

де  $t_{oc}$  — час очікування на надходження від приймача квитанції (підтвердження) про приймання пакета з наявністю чи відсутністю викривлень (сигналів  $V$  чи  $W$ )

$$t_{oc} = 2t_p + t_k + t_q + t_{ac}, \quad (3)$$

$t_p$  — час розповсюдження сигналу від передавача до приймача ( $t_p = D/V_c$ , де  $D$  — довжина лінії зв'язку для передачі сигналу,  $V_c$  — швидкість передачі сигналу в середовищі розповсюдження);  $t_k$  — час формування й видачі квитанції — сигналів  $V$  або  $W$ ;  $t_q$  — час декодування (пошуку наявності помилки) прийнятого пакета;  $t_{ac}$  — час прийому й аналізу сигналів  $V$  або  $W$ .

У протоколах, що використовують **ВЗЗ із послідовною передачею**, відносна швидкість передачі:

$$R_{nn} = (m/n) \cdot (1 - P_e \cdot (n + B \cdot t_{oc})). \quad (4)$$

Оцінку відносної швидкості передачі в протоколах, що використовують **ВЗЗ вибіркового (селективного) повтору або ВЗЗ із адресним перезапитом** і передачею інформаційних повідомлень блоками (*вибіркова передача (вибіркове по-*

вторення)), у зв'язку з необхідністю внесення деяких уточнень, порівняно із [1, 2], розглянемо більш детально. З цією метою визначимо максимальний час, потрібний для передачі одного повідомлення з  $q$  блоків. З цією метою врахуємо, що за час  $t_n = q \cdot t_{\delta}$ , потрібний для первинної (разової) передачі повідомлення, можливим є вплив  $\lambda \cdot t_n = t_n \cdot B \cdot P_e$  завад, які в гіршому випадку викривлять таку ж кількість блоків.

Час, необхідний для їхнього перезапиту й повторної передачі, дорівнює:

$$t_{n1} = t_n \cdot t_{\delta} \cdot (B \cdot P_e) + t_{oc}$$

За час перезапиту й повторної передачі  $t_{n1}$  також можливі викривлення повторно переданих блоків. Оскільки час повторної передачі дорівнює  $t_{\delta} \cdot t_n \cdot (B \cdot P_e)$ , то викривлення, які виникають знову в кількості  $t_{\delta} \cdot t_n \cdot (B \cdot P_e) \cdot (B \cdot P_e) = t_{\delta} \cdot t_n \cdot (B \cdot P_e)^2$ , потребують перезапиту й чергової передачі викривлених блоків. Час, необхідний для цього:

$$t_{n2} = t_n \cdot t_{\delta} \cdot t_{\delta} \cdot (B \cdot P_e)^2 + t_{oc} = t_n \cdot t_{\delta}^2 \cdot (B \cdot P_e)^2 + t_{oc}$$

За аналогією одержимо:

$$\begin{aligned} t_{n3} &= t_n \cdot (t_{\delta})^3 \cdot (B \cdot P_e)^3 + t_{oc}, \\ &\dots\dots\dots \\ t_{nu} &= t_n \cdot (t_{\delta})^u \cdot (B \cdot P_e)^u, \end{aligned}$$

де  $u$  — число перезапиту до повної передачі даного повідомлення.

Тоді час, необхідний для передачі одного повідомлення:

$$\begin{aligned} T_n &= t_n + t_{n1} + t_{n2} + \dots + t_{nu} = \\ &= t_n + t_n \cdot t_{\delta} \cdot (B \cdot P_e) + t_n \cdot t_{\delta}^2 \cdot (B \cdot P_e)^2 + \dots + t_n \cdot (t_{\delta})^u \cdot (B \cdot P_e)^u + u \cdot t_{oc} = \\ &= q \cdot t_{\delta} \cdot [1 + t_{\delta} \cdot (B \cdot P_e) + (t_{\delta})^2 \cdot (B \cdot P_e)^2 + \dots + (t_{\delta})^u \cdot (B \cdot P_e)^u] + u \cdot t_{oc}. \end{aligned}$$

Оскільки вираз у дужках є сумою членів геометричної прогресії з  $u$  членів, з першим членом, який дорівнює одиниці, і знаменником  $t_{\delta} \cdot (B \cdot P_e) = (n \cdot P_e)$ , то:

$$T_n = q \cdot t_{\delta} \cdot (1 - (n \cdot P_e)^{u+1}) / (1 - n \cdot P_e) + u \cdot t_{oc}. \tag{5}$$

Кількість перезапиту  $u$  в останньому виразі можна визначити, якщо вважати, що перезапиту продовжуються доти, поки ймовірність  $P_{u(>0)}$  появи хоча б одного викривлення на інтервалі часу  $t_n \cdot (t_{\delta} \cdot B \cdot P_e)^u = t_n \cdot (n \cdot P_e)^u$ , який є необхідним для забезпечення  $u$ -го перезапиту, не стане меншим за ймовірності  $P_{u(0)}$  відсутності викривлень на цьому ж часовому інтервалі. При пуассонівському законі розподілу викривлень (з їхньою інтенсивністю  $B \cdot P_e$ ):

$$P_{u(0)} = \exp(-B \cdot P_e \cdot t_n \cdot (n \cdot P_e)^u) = \exp(-q \cdot (n \cdot P_e)^{u+1}),$$

$$P_{u(>0)} = 1 - \exp(-q \cdot (n \cdot P_e)^{u+1}).$$

Тоді ця умова запишеться у вигляді:

$$1 - \exp(-q \cdot (n \cdot P_e)^{u+1}) < \exp(-q \cdot (n \cdot P_e)^{u+1}),$$

звідки:

$$q \cdot (n \cdot P_e)^{u+1} < \ln 2, \quad (6)$$

$$(u + 1) \cdot \ln(n \cdot P_e) < (\ln(\ln 2)/q),$$

і при  $n \cdot P_e < 1$ :

$$u > (\ln(\ln 2)/q) / \ln(n \cdot P_e) - 1. \quad (7)$$

Співвідношення (7) є справедливим уже при

$$u = (\ln(\ln 2)/q) / \ln(n \cdot P_e), \quad (8)$$

тобто вирази (7), (8) можуть бути використаними для розрахунку часу  $T_n$ , необхідного для передачі одного повідомлення з  $q$  блоків.

З урахуванням (7), (8) вираз (5) набуває вигляду:

$$T_n = q \cdot t_{\sigma} \cdot (1 - (n \cdot P_e)^{u+1}) / (1 - n \cdot P_e) + u \cdot t_{oc} = q \cdot t_{\sigma} / (1 - n \cdot P_e) + t_{oc} \cdot (\ln(\ln 2)/q) / \ln(n \cdot P_e),$$

або:

$$T_n = \{q \cdot t_{\sigma} \cdot \ln(n \cdot P_e) + t_{oc} \cdot (\ln(\ln 2)/q) \cdot (1 - n \cdot P_e)\} / \{\ln(n \cdot P_e) \cdot (1 - n \cdot P_e)\}.$$

Оскільки за цей час буде передано  $B \cdot T_n$  двійкових символів

$$B \cdot T_n = \{q \cdot n \cdot \ln(n \cdot P_e) + B \cdot t_{oc} \cdot (\ln(\ln 2)/q) \cdot (1 - n \cdot P_e)\} / \{\ln(n \cdot P_e) \cdot (1 - n \cdot P_e)\},$$

а прийнято  $m \cdot q$  двійкових символів, то відносна швидкість передачі:

$$R_{\text{АПБ}} = m \cdot q / (B \cdot T_n) = m \cdot q \cdot (1 - n \cdot P_e) \cdot \ln(n \cdot P_e) / \{q \cdot n \cdot \ln(n \cdot P_e) + B \cdot t_{oc} \cdot (\ln(\ln 2)/q) \cdot (1 - n \cdot P_e)\}. \quad (9)$$

### Аналіз залежності відносної швидкості від її параметрів (змінних)

З виразів (2), (4), (9) для розрахунків відносної  $R$  швидкості витікає наявність її теоретичної межі у вигляді  $R = m/n$ , а також її залежність від низки параметрів (змінних), якими в загальному випадку є наступні.

1. Характеристики процедури (протоколу) організації обміну:

— тип процедури (протоколу) організації обміну (процедури із ЗКК, ВЗЗ з очікуванням, ВЗЗ із послідовною передачею, ВЗЗ із адресним перезапитом);

— кількість блоків у повідомленні —  $q$ ;

— загальна довжина пакета (блока, комірки, повідомлення) —  $n$  та довжина його змістовної частини —  $m$ .

2. Характеристики каналу:

— характеристика стану каналу, яка є функцією співвідношення сигнал/шум — ймовірність викривлення символу —  $P_e$ ;

— технічна швидкість передачі (швидкість передачі елементів пакета, блока та ін.) —  $B$ .

3. Час очікування на надходження від приймача квитанції (підтвердження) про приймання пакета з наявністю чи відсутністю викривлень (сигналів  $V$  чи  $W$ ) —  $t_{оч}$ . Звернемо увагу на те, що остання змінна є характеристикою як процедури (протоколу) організації обміну, так і власне каналу.

### Аналіз залежності відносної швидкості від характеристик процедури (протоколу) організації обміну

Залежність відносної швидкості від типу процедури (протоколу) організації обміну вже відображена у відповідних формульних виразах для її розрахунку (вирази (2), (4), (9)) та прокоментована при розгляді процедур із ЗКК, ВЗЗ з очікуванням, ВЗЗ із послідовною передачею, ВЗЗ із адресним перезапитом.

Залежність відносної швидкості від кількості блоків у повідомленні  $q$  (для розглянутих у статті типів протоколів обміну) є притаманною лише процедурам ВЗЗ із адресним перезапитом. Представивши вираз (9) у вигляді

$$R_{АПБ} = m \cdot q / (B \cdot T_n) = m \cdot (1 - n \cdot P_e) \cdot \ln(n \cdot P_e) / \{ n \cdot \ln(n \cdot P_e) + B \cdot t_{оч} \cdot (\ln(\ln 2) / q^2) \cdot (1 - n \cdot P_e) \},$$

можемо зробити висновок про те, що для даного типу ВЗЗ збільшення  $q$  має своїм наслідком збільшення відносної швидкості. Неважко помітити, що при зміні  $q$  від нуля до  $\infty$ , величина  $R_{АПБ}$  збільшується від нуля до  $m/n$ , тобто до своєї теоретичної межі.

Залежність відносної швидкості від загальної довжини пакета (блока, комірки, повідомлення) —  $n$  та довжини його змістовної частини —  $m$  буде розглянута дещо пізніше.

### Аналіз залежності відносної швидкості від стану та характеристик каналу

Аналіз залежності відносної швидкості від стану каналу — ймовірності викривлення символу —  $P_e$  дозволяє встановити наступне.

З виразу (2) виходить, що при використанні ВЗЗ з очікуванням існує критичне значення інтенсивності завад, а отже, і критичне (допустиме) значення ймовірності  $P_{вкروح}$ , коли відносна швидкість  $R_{оч} = 0$ , тобто коли система обміну переходить у режим безперервного перезапиту:

$$P_{\text{вкpоч}} = n/(n + t_{\text{оч}} \cdot B)^2.$$

Для протоколів, що використовують **ВЗЗ із послідовною передачею**, відносна швидкість передачі має критичне значення ймовірності викривлення:

$$P_{\text{вкpпп}} = 1/(n + B \cdot t_{\text{оч}}).$$

У протоколах, що використовують **ВЗЗ вибіркового (селективного) повтору або ВЗЗ із адресним перезапитом** критичне значення ймовірності викривлення дорівнює:

$$P_{\text{вкpАПБ}} = 1/n.$$

На рис. 1 представлені графіки залежностей відносної швидкості системи передачі даних від стану каналу ( $P_e$ ).

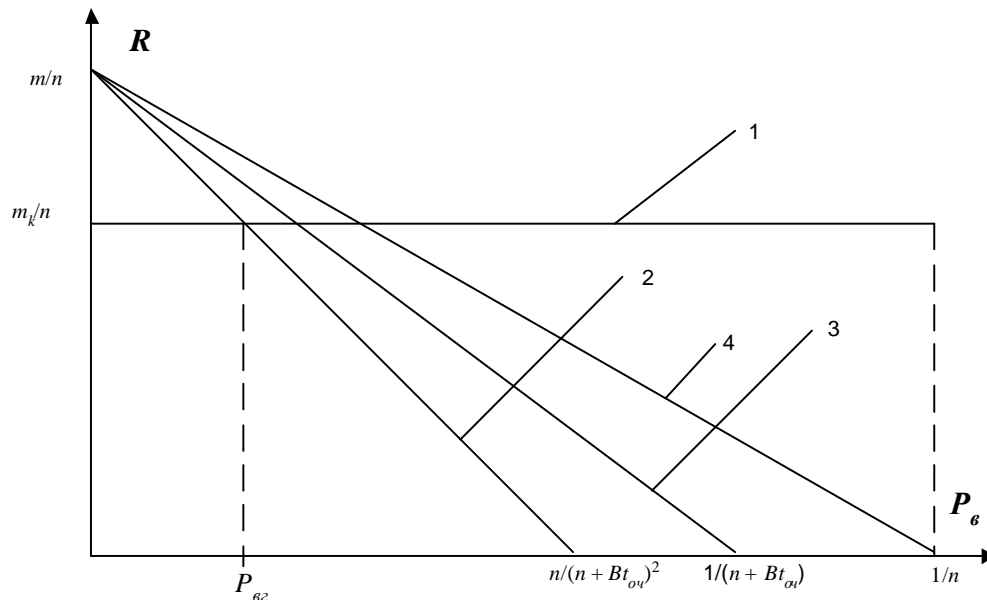


Рис. 1. залежність відносної швидкості передачі від стану каналу:

- 1 — процедури з корегувальним кодом; 2 — ВЗЗ з очікуванням;
- 3 — ВЗЗ із безперервною передачею; 4 — ВЗЗ із адресним перезапитом

Із цього рисунка, можна зробити висновки щодо відносної швидкості.

1. Усі типи процедур із ВЗЗ при гарному стані каналу ( $P_e < P_{\text{вз}}$ ) за відносною швидкості передачі є більш ефективними ніж процедури, що використовують корегувальний код. Але завжди існує граничне значення інтенсивності завад, а, відтак, і ймовірності  $P_{\text{вз}}$ , при перевищенні якої процедури з корегувальним кодом стають ефективнішими. Для визначення цього граничного значення досить вирішити нерівність:

$$m_k/n \geq R_{ВЗЗ}.$$

Наприклад, для процедур ВЗЗ із безперервною передачею:

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

звідки:

$$m_k \geq m \cdot (1 - P_e \cdot (n + B \cdot t_{оч})), \quad (10)$$

і, у свою чергу:

$$P_e \geq (1 - m_k/m) / (n + B \cdot t_{оч}). \quad (11)$$

Крім виразів (10), (11), що визначають припустиму надмірність корегувального коду й границі його ефективного застосування, можна розрахувати й вигравш у відносній швидкості від використання корегувального коду. Наприклад, для цих же процедур ВЗЗ із безперервною передачею:

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

З виразів (9), (10) випливає, що можуть існувати такі канали чи такі умови їхнього функціонування, коли використання корегувальних кодів із будь-якою надмірністю вигідніше використання протоколів із ВЗЗ, навіть без урахування необхідності забезпечення для ВЗЗ зворотного каналу.

2. Розширення можливостей щодо передачі інформації в умовах впливу завад (збільшення критичного значення ймовірності  $P_e$ ) для всіх способів передачі з використанням ВЗЗ можна досягти (рис. 2) шляхом зменшення довжини — кількості символів  $n$  в пакеті (кадрі, комірці, блоці).

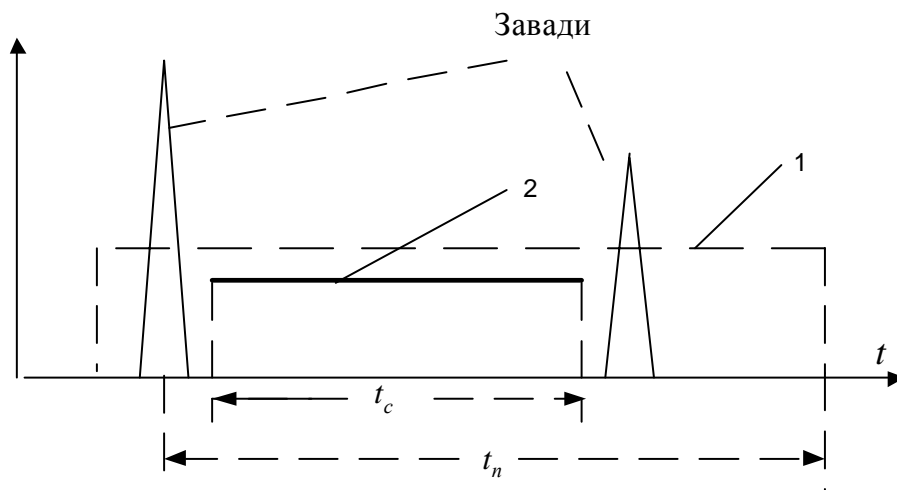


Рис. 2. Ілюстрація розширення можливостей щодо передачі інформації в умовах впливу завад: 1 — пакет великої довжини (із великим значенням  $n$ ); 2 — пакет меншої довжини (менше значення  $n$ )



Цю можливість фізично можна пояснити тим, що в цьому випадку збільшується частка пакетів (кадрів, комірок, блоків), часова тривалість яких ( $t_c = n/B$ ) стає меншою ніж середня тривалість часового інтервалу  $t_n$  між двома суміжними викривленнями (впливами завад).

Тим самим, створюються умови для відсутності в таких пакетах викривлень, що є важливим для процедур як з ВЗЗ, так і з ЗКК і, окрім того, зменшується частка пакетів, на які потрапляє більше ніж одне викривлення, що створює умови для успішного функціонування процедур із ЗКК.

**Аналіз залежності відносної швидкості від технічної швидкості передачі** (швидкості передачі елементів пакета, блока та ін.) —  $B$  дозволяє стверджувати наступне.

1. Розширення можливостей щодо передачі інформації в умовах впливу завад можна досягти також шляхом зміни технічної швидкості передачі  $B$ . Наприклад, при зменшенні технічної швидкості передачі  $B$  (при  $B \rightarrow 0$ ) критичне значення ймовірності викривлення для процедур ВЗЗ із очікуванням та з послідовною передачею збільшується до значень, які є притаманними процедурам із ЗКК та процедурам ВЗЗ із адресним перезапитом: до  $P_{вкр} = 1/n$  (рис. 3).

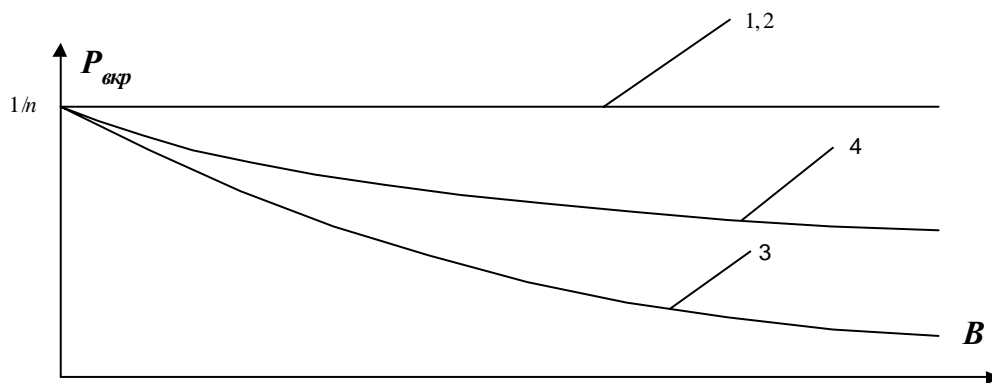


Рис. 3. Залежність критичного значення ймовірності викривлення символу від відносної швидкості передачі: 1 — процедури з корегувальним кодом; 2 — ВЗЗ із адресним перезапитом; 3 — ВЗЗ з очікуванням; 4 — ВЗЗ із безперервною передачею

2. Неважко впевнитися в тому, що при зменшенні технічної швидкості передачі  $B$  (при  $B \rightarrow 0$ ) відносна швидкість передачі для всіх процедур із ВЗЗ збільшується до  $R_{ВЗЗ} \rightarrow (m/n) \cdot (1 - n \cdot P_e)$ . Це можна фізично пояснити тим, що при зменшенні технічної швидкості передачі збільшується часова тривалість символів  $\tau$ , за рахунок чого при незмінній потужності символів  $P_c$  їхня енергетика ( $E = \tau \cdot P_c$ ) підвищується. В окремих випадках збільшення тривалості символів (а отже, звуження їх частотного спектра), за наявності можливості регулювати ширину смуги пропускання приймачів, дає також змогу зменшити згадану ширину смуги пропускання приймачів, за рахунок чого зменшується енергетика прийнятих завад. Унаслідок цього додатково збільшується й співвідношення сигнал/шум. Останнє, як уже згадувалося, призводить до зменшення ймовірності викривлення символу  $P_e$ , а отже — до бажаної мети.

3. Звернемо увагу на те, що для деяких процедур із ВЗЗ (з очікуванням та з послідовною передачею) існують критичні значення технічної швидкості передачі  $B$ , при досягненні яких відносна швидкість обміну дорівнює нулю, а отже, інформаційний обмін стає неможливим. Не важко впевнитись у тому (рис. 4), що для ВЗЗ з очікуванням:

$$B_{крит} = (\sqrt{n/P_e} - n)/t_{оч}, \quad (12)$$

а для ВЗЗ із послідовною передачею:

$$B_{крит} = (1 - nP_e)/t_{оч}, \quad (13)$$

у той час як для процедур із ЗКК залежність відносної швидкості від технічної відсутня, а для процедур із адресним перезапитом ця залежність є досить незначною ( $R_{АПБ} \rightarrow 0$ , коли  $B \rightarrow \infty$ ). Звернемо увагу на те, що вирази (12), (13) зберігають фізичний сенс, тобто  $B_{кр} \geq 0$ , при  $P_e \leq 1/n$ , що вже декларувалося раніше.

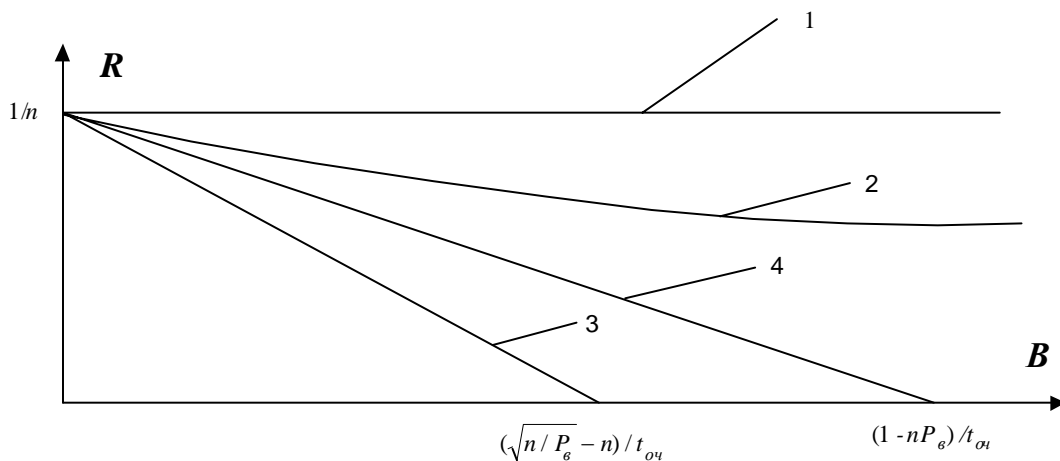


Рис. 4. Залежність відносної швидкості передачі від технічної швидкості:  
 1 — процедури з корегувальним кодом; 2 — ВЗЗ із адресним перезапитом;  
 3 — ВЗЗ з очікуванням; 4 — ВЗЗ із послідовною передачею

### Аналіз залежності відносної швидкості від часу очікування

Аналіз залежності відносної швидкості від часу очікування  $t_{оч}$  показує:

1) відносна швидкість передачі при використуванні процедур із ЗКК не залежить від часу очікування:

$$R_{ЗКК} = m_k/n \neq f(t_{оч}).$$

2) відносна швидкість передачі у протоколах, що використовують різні типи, має залежність, наведену на рис. 5.

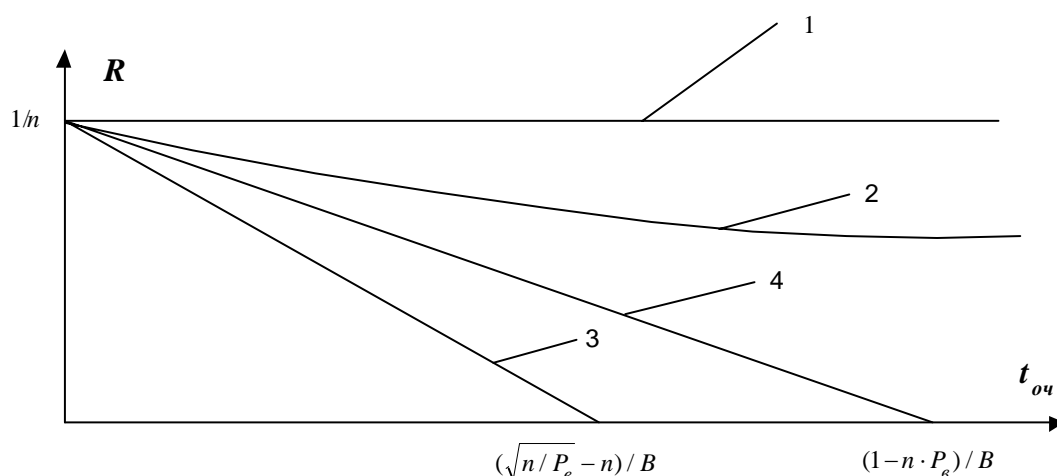


Рис. 5. Залежність відносної швидкості передачі від часу очікування:  
 1 — процедури з корегувальним кодом; 2 — ВЗЗ із адресним перезапитом;  
 3 — ВЗЗ з очікуванням; 4 — ВЗЗ із послідовною передачею

При цьому для **ВЗЗ з очікуванням** (див. вираз (2)) та з **послідовною передачею** (4) існують граничні значення часу очікування. Для **ВЗЗ з очікуванням** —  $t_{кpоч1}$  у вигляді:

$$t_{кpоч1} = (\sqrt{n/P_e} - n) / B, \quad (14)$$

для **ВЗЗ із послідовною передачею** —  $t_{кpnn2}$  у вигляді:

$$t_{кpnn2} = (1 - n \cdot P_e) / B, \quad (15)$$

а для процедур із адресним перезапитом (див. вираз (9)) ця залежність є досить незначною ( $R_{АПБ} \rightarrow 0$ , коли  $t_{оч} \rightarrow \infty$ ). Як і вище, звернемо увагу на те, що вирази (14), (15) зберігають фізичний сенс, тобто  $t_{кр} \geq 0$ , при  $P_e \leq 1/n$ , що вже декларувалося раніше.

І, нарешті, звернемо увагу також на взаємну залежність критичної технічної швидкості (вирази (12), (13)) та часу очікування (вирази (14), (15)). Тобто, при застосуванні таких процедур обміну (ВЗЗ з очікуванням та з послідовною передачею) зростання деяких із складових часу очікування у виразі (3), наприклад,  $t_p = D/V_c$ , може привести до зупинення процесу обміну (коли  $B = 0$  чи коли  $t_{оч} = t_{очкр}$ ), що потребує врахування при побудові відповідної мережі зв'язку (для останнього прикладу, як варіант, — до використання проміжних ретрансляційних вузлів, які здатні здійснювати приймання інформації не окремими пакетами, а усього повідомлення з  $q$  пакетів (блоків).

## Порівняння процедур обміну за вірністю передачі даних та за ефективною швидкістю

Залежності вірності (цілісності) передачі інформації від стану та характеристик каналу зберігають отриманий у [2] характер.

Нагадаємо, ймовірність забезпечення цілісності для протоколів із ВЗЗ оцінюється як:

$$P_{зц} = 1 - 2^{-(n-m)}, \quad (16)$$

а для протоколів із корегувальним кодом з урахуванням (1) її можна записати у вигляді:

$$P_{зцк} = (1 - 2^{-(n-mk)}) \cdot (1 + n \cdot P_{\theta}) \cdot \exp(-n \cdot P_{\theta}). \quad (17)$$

Залежності ймовірності забезпечення цілісності від стану каналу представлені на рис. 6.

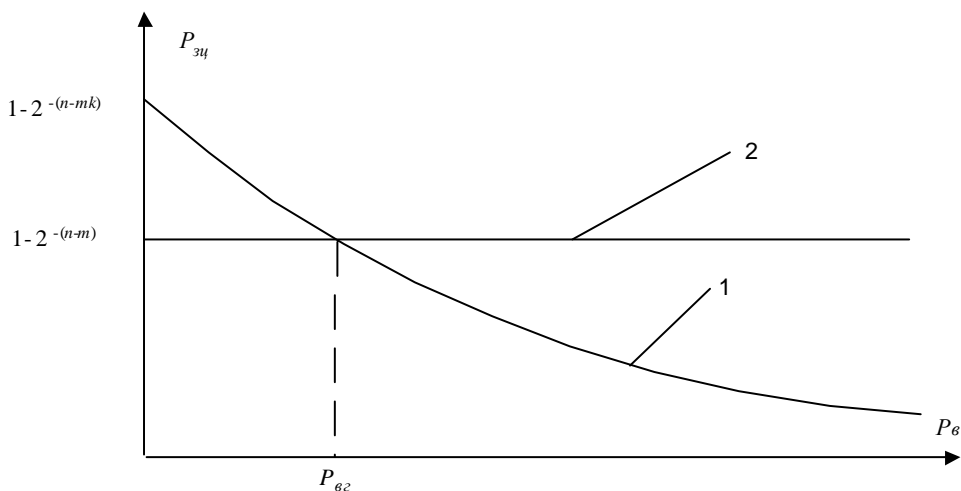


Рис. 6. Залежність вірності інформації від стану каналу:  
1 — протоколи з корегувальним кодом; 2 — протоколи з ВЗЗ

Як видно з рисунка, з погляду забезпечення вірності інформації процедури із ВЗЗ перевершують процедури з корегувальним кодом, якщо інтенсивність завад перевищує деякий поріг  $P_{\theta г}$ , чисельне значення якого принципово можна обчислити, дорівнявши (16) і (17).

Аналіз залежностей відносної швидкості передачі й вірності приводить до висновку про те, що кожна з них окремо не дає повної інформації, необхідної для вибору типу протоколу (процедури) обміну. Більш правильне рішення можна прийняти за комплексною характеристикою, в якості якої можна вибрати ефективну швидкість  $E$  протоколу, яка дорівнює добутку відносної швидкості на вірність інформації:

$$E = R \cdot P_{зц}.$$

Тоді для найкращої процедури з ВЗЗ, нехтуючи значенням  $P_{оц} \approx 1$ , отримаємо:

$$E_{ВЗЗ} = m \cdot q \cdot (1 - n \cdot P_{\theta}) \cdot \ln(n \cdot P_{\theta}) / \{q \cdot n \cdot \ln(n \cdot P_{\theta}) + B \cdot t_{оч} \cdot (\ln(\ln 2) / q) \cdot (1 - n \cdot P_{\theta})\}, \quad (18)$$

а для протоколів із корегувальним кодом:

$$\begin{aligned} E_{ЗКК} &= (m_k/n) \cdot (1 - 2^{-(n-mk)}) \cdot (1 + n \cdot P_{\theta}) \cdot \exp(-n \cdot P_{\theta}) \approx \\ &\approx (m_k/n) \cdot (1 + n \cdot P_{\theta}) \cdot \exp(-n \cdot P_{\theta}). \end{aligned} \quad (19)$$

Залежності комплексної ефективності процедури обміну від стану каналу, наведені на рис. 7, з якого видно існування, як і раніше, граничного значення інтенсивності завад. При перевищенні цього граничного значення протоколи з використанням корегувальних кодів виявляються ефективнішими за протоколи з ВЗЗ.

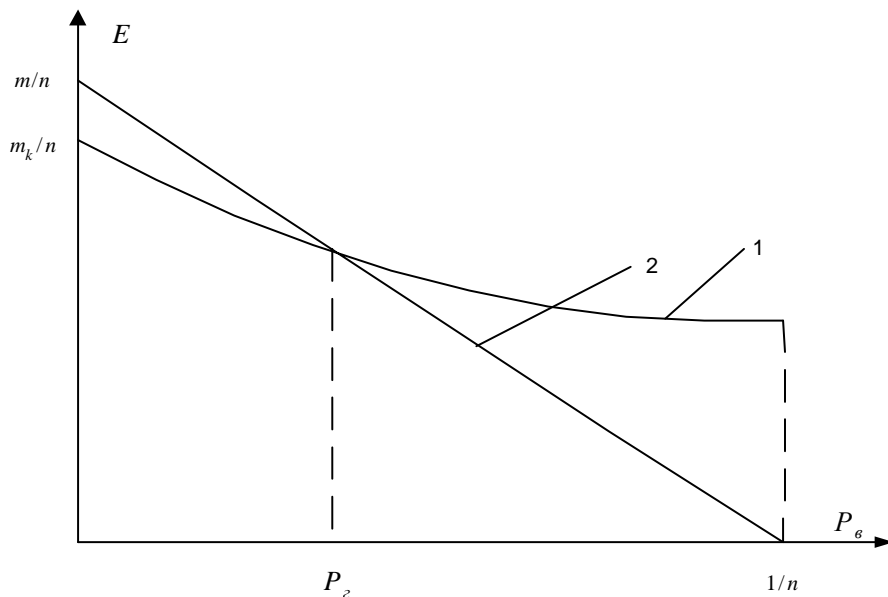


Рис. 7. Залежність вірності інформації від стану каналу:  
1 — протоколи з корегувальним кодом; 2 — протоколи з ВЗЗ

З виразів (18), (19) можна визначити й ту надмірність, за якої використання корегувальних кодів дає досить велику ефективність у порівнянні з ВЗЗ для будь-яких значень інтенсивностей викривлень. Очевидно, це можливо при

$$E_k > E_{ВЗЗ},$$

тобто при

$$(m_k/n) \cdot (1 + n \cdot P_e) \cdot \exp(-n \cdot P_e) > m \cdot q \cdot (1 - n \cdot P_e) \cdot \ln(n \cdot P_e) / \{q \cdot n \cdot \ln(n \cdot P_e) + \\ + B \cdot t_{оч} \cdot (\ln(\ln 2)/q) \cdot (1 - n \cdot P_e)\},$$

звідки можна знайти потрібне значення  $m_k$ .

Таким чином, отримані в статті вирази для розрахунку відносної швидкості, вірності чи ефективної швидкості передачі інформації дають змогу порівняння протоколів (процедур обміну) з різними механізмами захисту інформації — із застосуванням завадостійких корегувальних кодів (з виявленням та корекцією викривлень (процедури із ЗКК)) та протоколів (процедур обміну) із застосуванням вирішувального зворотного зв'язку й, у залежності від фактичного чи очікуваного рівня завад у каналі обміну телекомунікаційної процедури, — обирати найбільш ефективні протоколи.

1. Бунин С.Г., Василенко В.С. Сравнительная оценка ПРОЦЕДУРИ с решающей обратной связью и с использованием корректирующих кодов // УСiМ. — 1992. — № 9/10. — С. 30–35.
2. Матов О.Я., Василенко В.С. Будько М.М. Аналіз протоколів обміну інформацією у телекомунікаційних процедурах // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 6, № 4. — С. 82–93.
3. Матов О.Я., Василенко В.С. Будько М.М. Оцінка часу доставки повідомлень у протоколах організації обміну в телекомунікаційних процедурах // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2005. — Т. 7, № 2. С. 66–76.
4. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные системы с пакетной радиосвязью. — К.: Техніка, 1989. — 223 с.
5. Матов А.Я. Основы передачи дискретной информации. — К.: КВИРТУ ПВО, 1977. — 242 с.

Надійшла до редакції 01.11.2005