

УДК 621.39

ГОРБАТИЙ І.В., д.т.н., доцент (Національний університет “Львівська політехніка”)

## Дослідження технічної ефективності телекомунікаційних систем та мереж при використанні різних методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком

*Розглянуто методи передавання даних із керуючим зворотним зв'язком: метод із зупинками й очікуванням, метод з N-поверненням та метод із вибіркоvim повторенням. Такі методи застосовують для виправлення помилок у телекомунікаційних системах та мережах у випадках, коли обрані методи модуляції та коригуючого кодування не забезпечують необхідної якості передавання даних в умовах завод. Ці методи ґрунтуються на методах автоматичного запиту повторного передавання. Досліджено вплив методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком на ефективність телекомунікаційних систем та мереж. Виявлено переваги та недоліки таких методів, вироблено рекомендації щодо їх застосування.*

**Ключові слова:** метод передавання даних із керуючим зворотним зв'язком, метод автоматичного запиту повторного передавання, ефективність, телекомунікаційна система, телекомунікаційна мережа.

### Вступ

До важливих локальних показників ефективності телекомунікаційних систем та мереж належить технічна ефективність [1]. Технічна ефективність залежить від застосованих у таких системах та мережах методів формування й оброблення сигналів: методів модуляції/демодуляції, методів коригуючого кодування/декодування, методів ущільнення/розділення каналів, методів множинного доступу та методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком [2].

Останнім часом особливої уваги заслуговує питання розроблення та вдосконалення методів (протоколів) передавання даних. Це пов'язано з активним розвитком телекомунікаційних мереж, що забезпечують доступ великої кількості користувачів до інформаційних ресурсів всесвітньої мережі Інтернет. Для передавання даних у таких мережах використовують різноманітні технології залежно від застосованого типу лінії зв'язку (середовища передавання), до основних із яких належать симетричні, коаксіальні, волоконно-оптичні лінії та радіолінії. У кожній з перелічених ліній наявні завади певного рівня, що спричиняють появу помилок у даних, які передають. Для боротьби з появою помилок використовують цифрові методи модуляції сигналу, які є більш заводозахищеними порівняно з аналоговими методами. Однак при малому значенні відношення потужності сигналу до потужності завади на вході приймального пристрою виникає певна кількість помилок у переданих даних. Їх виправляють за допомогою коригуючих кодів. Незважаючи на це,

коригуючі коди не здатні виправити всі помилки, якщо кількість помилок перевищує певну границю, що залежить від обраного коду. У такому випадку передати дані без помилок можливо лише завдяки повторному передаванню пакетів, що зазнали помилок, для чого використовують методи передавання даних із керуючим зворотним зв'язком.

Дослідженню ефективності телекомунікаційних систем та мереж присвячено значну кількість публікацій [3-8]. Проте актуальною задачею залишається виявлення шляхів підвищення технічної ефективності таких систем та мереж. Цікавим напрямком є дослідження впливу методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком на ефективність телекомунікаційних систем та мереж.

Метою цієї роботи є дослідження методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком для виявлення серед них таких, які забезпечують найвищу ефективність телекомунікаційних систем та мереж.

### Методи передавання даних із керуючим зворотним зв'язком

Розглянемо детальніше методи передавання даних із керуючим зворотним зв'язком та їх вплив на ефективність телекомунікаційних систем і мереж. Такі методи застосовують для виправлення помилок у телекомунікаційних системах та мережах у випадках, коли обрані методи модуляції та коригуючого кодування не забезпечують необхідної якості передавання даних в умовах завод. Ці методи ґрунтуються на методах автоматичного запиту повторного передавання (ARQ – automatic repeat request). Розглянемо два типи таких методів [2, 4]:

– із зупинками й очікуванням (stop-and-wait ARQ);

– з неперервним передаванням (метод з N-поверненням (continuous ARQ with pullback) і метод із вибіркоким повторенням (continuous ARQ with selective repeat).

Метод із зупинками й очікуванням використовують у телекомунікаційних системах чи мережах на основі каналів електровз'язку з напівдуплексним режимом передавання даних, при якому передавання в кожному напрямку здійснюють за чергою. Канал електровз'язку складається з передавального пристрою, лінії зв'язку та приймального пристрою. У передавальному та приймальному пристроях каналу електровз'язку є буфери пам'яті, які можуть містити лише по одному пакету. Принцип роботи цього методу наведено на рис. 1.

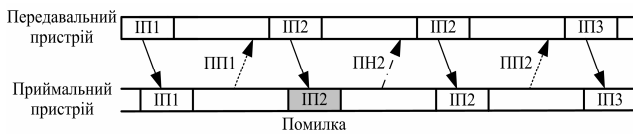


Рис. 1. Робота методу із зупинками й очікуванням

Передавальний пристрій передає у канал інформаційний пакет (ІП), що складається з певної кількості кодових слів (послідовності інформаційних та перевірочних бітів), і чекає підтвердження правильності приймання цього пакета. Пакет передають через лінію зв'язку із завадами, де в ньому можуть виникнути помилки, на вхід приймального пристрою. У декодері приймального пристрою перевіряють пакет на наявність помилок, для чого використовують коригуючі коди з виявленням помилок. Проаналізувавши пакет, приймальний пристрій надсилає до передавального пристрою пакет підтвердження правильного приймання (ПП) або пакет підтвердження неправильного приймання (ПН). Після проходження лінії зв'язку пакет підтвердження аналізується передавальним пристроєм. Якщо інформаційний пакет було передано правильно, то передавальний пристрій передає наступний інформаційний пакет, а якщо неправильно – повторює передавання цього пакета.

Тривалість пакета підтвердження набагато менша за тривалість інформаційного пакета, тому при розрахунку загального часу передавання певного обсягу інформації цією величиною знехтуємо. Припустимо, що дії помилок зазнають тільки інформаційні пакети, а пакети підтвердження передають безпомилково. Також не будемо брати до уваги час аналізу інформаційного пакета та пакета підтвердження, оскільки швидкодія декодера, як правило, є високою. Якщо ж, наприклад, у лінії зв'язку втрачено пакет підтвердження, то, не отримавши підтвердження, передавальний пристрій повторно

передає останній переданий ним пакет. Час, через який здійснюють повторне передавання, коли не отримано пакета підтвердження, називають часом тайм-ауту. Час тайм-ауту може бути більшим або дорівнювати загальному часу передавання одного пакета. З урахуванням сказаного загальний час  $T_{інф}$ , с, передавання певного обсягу інформації через телекомунікаційну систему чи мережу при використанні цього методу дорівнює

$$T_{інф} = (T_{ІП} + 2T_з)(N_{ІП} + N_{пом}), \quad (1)$$

де  $T_{ІП}$  – тривалість інформаційного пакета, с;

$T_з$  – час затримки пакета при проходженні через лінію зв'язку, с;

$N_{ІП}$  – загальна кількість інформаційних пакетів, що передають;

$N_{пом}$  – кількість інформаційних пакетів, що прийняті з помилкою та підлягають повторному передаванню.

Метод з N-поверненням використовують у телекомунікаційних системах чи мережах на основі каналів електровз'язку з дуплексним режимом передавання даних, при якому передавання в кожному напрямку здійснюють одночасно. У цьому випадку доцільно передавати пакети неперервно, якщо вони є в наявності, а не очікувати пакетів підтвердження правильного приймання від приймального пристрою. Неперервне передавання підвищує продуктивність каналу передавання даних, особливо тоді, коли часом затримки в каналі не можна знехтувати порівняно із тривалістю інформаційного пакета. За цим методом інформаційний пакет, що прийнятий із помилкою, та всі наступні, які встигли передати після першого прийнятого з помилкою, необхідно передати повторно (рис. 2).

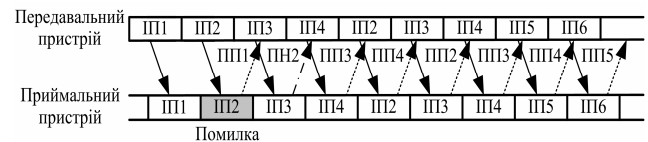


Рис. 2. Робота методу з N-поверненням

Використання цього методу в телекомунікаційних системах чи мережах вимагає наявності в передавальному пристрої буфера пам'яті для зберігання пакетів для повторного передавання. У цьому буфері пакет зберігають доти, поки передавальний пристрій не отримає пакет підтвердження правильного приймання цього пакета. Якщо надходить пакет підтвердження неправильного

приймання, передавальний пристрій повторює передавання всіх пакетів, починаючи з першого, прийнятого з помилкою. При цьому приймальний пристрій в очікуванні правильного приймання інформаційного пакета відкидає всі пакети, які надходять після неправильно прийнятого, та відсилає стосовно них пакети підтвердження неправильно приймання.

При використанні методу з N-поверненням загальний час передавання певного обсягу інформації через телекомунікаційну систему чи мережу за умови, що час аналізу інформаційного пакета в приймальному пристрої, тривалість пакета підтвердження та час аналізу пакета підтвердження в передавальному пристрої значно менші порівняно із тривалістю інформаційного пакета, дорівнює

$$T_{inf} = T_{III} (N_{III} + N_{ном} N) + 2T_s, \quad (2)$$

де  $N$  – кількість пакетів, зумовлена методом, швидкодією передавального та приймального пристроїв і затримкою в лінії зв'язку, яку повторно передають після першого пакета, прийнятого з помилкою.

Метод із вибіркоким повторенням за принципом роботи майже не відрізняється від методу з N-поверненням. Пакети також передають неперервно, але в разі передавання з помилками повторно передають лише інформаційний пакет, у якому виявлено помилку.

Принцип роботи методу з вибіркоким повторенням наведено на рис. 3.

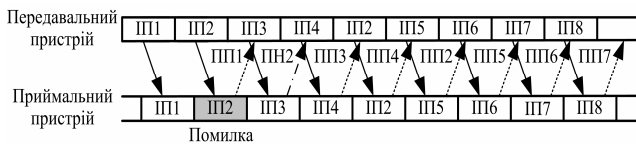


Рис. 3. Робота методу з вибіркоким повторенням

За цим методом використовують пакети підтвердження правильного приймання й пакети підтвердження неправильно приймання. Передавальний пристрій передає неправильно прийнятий пакет повторно після того, як отримає пакет підтвердження неправильно приймання стосовно цього пакета або отримає пакет підтвердження правильного приймання стосовно пакета з більшим порядковим номером.

Загальний час передавання певного обсягу інформації через телекомунікаційну систему чи мережу при використанні цього методу дорівнює

$$T_{inf} = T_{III} (N_{III} + N_{ном}) + 2T_s. \quad (3)$$

### Характеристики технічної ефективності систем та мереж передавання даних, побудованих із використанням різних методів передавання даних з керуючим зворотним зв'язком

Розглянемо вплив методів передавання даних з керуючим зворотним зв'язком на технічну ефективність телекомунікаційної системи чи мережі.

Ефективність методу передавання даних  $\eta_{МП}$  (безрозмірна величина) у системі чи мережі визначають так:

$$\eta_{МП} = T_\delta / T_{inf}, \quad (4)$$

де  $T_\delta$  – час передавання даних, с;

$T_{inf}$  – загальний час передавання певного обсягу інформації, с.

Час передавання даних залежить від часу поширення сигналів у системі чи мережі, а загальний час передавання певного обсягу інформації залежить від методу передавання та враховує час передавання даних і службової інформації (зокрема пакетів підтвердження правильного чи неправильно передавання та повторного передавання інформаційних пакетів).

При обчисленні ефективності розглянутих вище методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком час передавання даних  $T_\delta$  дорівнює добутку тривалості інформаційного пакета  $T_{III}$ , с, та загальної кількості інформаційних пакетів  $N_{III}$ , що передають

$$T_\delta = T_{III} N_{III}, \quad (5)$$

а загальний час передавання  $T_{inf}$  певного обсягу інформації при застосуванні методу із зупинками й очікуванням, методу з N-поверненням та методу із вибіркоким повторенням обчислюють за співвідношеннями (1), (2) та (3) відповідно. Тривалість інформаційного пакета  $T_{III}$ , с, залежить від швидкості передавання інформації  $v_\delta$ , біт/с, та дорівнює

$$T_{III} = l_{III} / v_\delta, \quad (6)$$

де  $l_{III}$  – довжина інформаційного пакета, біт.

Загальна кількість інформаційних пакетів  $N_{III}$  дорівнює

$$N_{III} = I_\delta / l_{III}, \quad (7)$$

де  $I_\delta$  – загальна кількість інформації, яку передають (інформаційних та перевірючих бітів), біт.

Для визначення кількості інформаційних пакетів  $N_{ном}$ , що прийняті з помилкою та підлягають повторному передаванню, доцільно скористатись співвідношенням

$$N_{ном} = N_{III} l_{III} P_6 / (1 - l_{III} P_6), \quad (8)$$

де  $P_6$  – імовірність бітової помилки в лінії зв'язку.

### Результати математичного моделювання

Роботу розглянутих методів передавання даних з керуючим зворотним зв'язком досліджено з використанням співвідношень (1)-(8) при передаванні даних зі швидкістю  $v_6 = 100000$  біт/с через радіорелейну лінію зв'язку. При довжині інформаційного пакета  $l_{III} = 70$  біт, часі затримки пакета при проходженні через лінію зв'язку  $T_3 = 0,2$  мс та ймовірності бітової помилки в лінії зв'язку  $P_6 = 10^{-5}$  ефективність методу передавання даних із зупинками й очікуванням становитиме  $\eta_{МП} = 0,636$ , методу з N-поверненням –  $\eta_{МП} = 0,997$  (при  $N = 5$ ) і методу із вибіркоким повторенням –  $\eta_{МП} = 0,999$ . При довжині інформаційного пакета  $l_{III} = 1000$  біт ефективність методу передавання даних із зупинками й очікуванням дорівнює  $\eta_{МП} = 0,952$ , методу з N-поверненням –  $\eta_{МП} = 0,952$  (при  $N = 5$ ) і методу із вибіркоким

повторенням –  $\eta_{МП} = 0,99$ . В останньому випадку при зміні одного із параметрів: довжини інформаційного пакета, часу затримки пакета або ймовірності бітової помилки в лінії зв'язку – отримано графічні залежності ефективності досліджених методів передавання даних (рис. 4–6).

На рис. 4–6 позначено залежності для методу передавання даних:

- 1 – із зупинками й очікуванням;
- 2 – з N-поверненням;
- 3 – із вибіркоким повторенням.

Як видно з рис. 4, за заданих значень розрахункових параметрів метод із зупинками й очікуванням характеризується дуже низькою ефективністю при довжині інформаційного пакета, що значно менша  $l_{III} = 1000$  біт. При довжині інформаційного пакета, що більша  $l_{III} = 1000$  біт, ефективність методу із зупинками й очікуванням підвищується, а ефективність інших двох методів – знижується.

За результатами, наведеними на рис. 5, ефективність методу із зупинками й очікуванням знижується при зростанні часу затримки пакета при проходженні через лінію зв'язку  $T_3$ , у той час як для інших двох методів вона мало залежить від часу затримки.

Згідно з рис. 6 ефективність усіх методів зменшується при збільшенні ймовірності бітової помилки в лінії зв'язку  $P_6$ , проте найстрімкіше зменшення ефективності притаманне методу з N-поверненням.

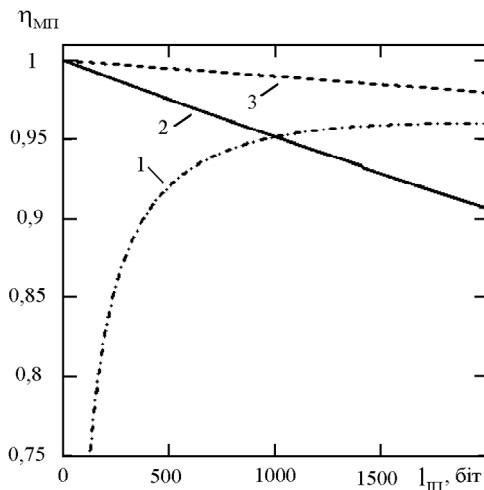


Рис. 4. Залежність ефективності методів передавання даних  $\eta_{МП}$  від довжини інформаційного пакета  $l_{III}$

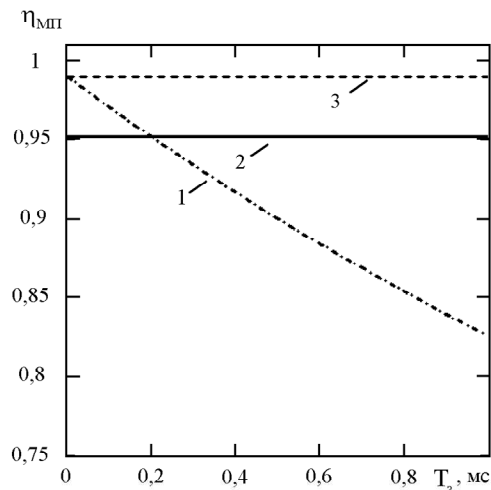


Рис. 5. Залежність ефективності методів передавання даних  $\eta_{МП}$  від часу затримки пакета  $T_3$

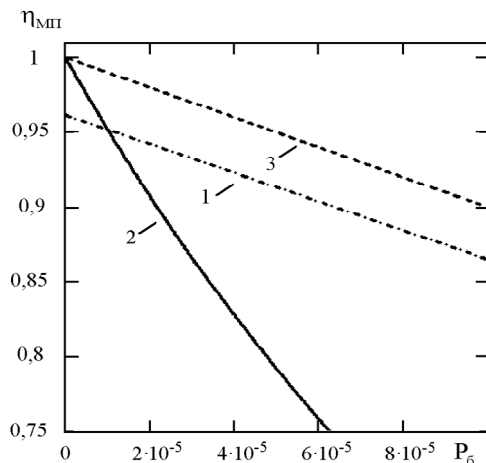


Рис. 6. Залежність ефективності методів передавання даних  $\eta_{МП}$  від імовірності бітової помилки  $P_b$

На підставі здійснених досліджень можна зазначити, що перевагою методу передавання даних із зупинками й очікуванням є те, що для забезпечення процесу передавання пакетів у передавальному та приймальному пристроях не потрібно мати великих об'ємів буферної пам'яті. Такий метод ефективний у випадках, коли час затримки в каналі є низьким порівняно із тривалістю інформаційного пакета. У високошвидкісних каналах цей метод працює неефективно, тому що дуже багато часу витрачають на очікування пакета підтвердження.

Оскільки в методі передавання даних з N-поверненням пакети можливо передавати неперервно один за одним без очікування пакета підтвердження правильного приймання, мінімальний час між моментами передавання пакетів дорівнює тривалості інформаційного пакета  $T_{III}$ , а не часу тайм-ауту, як у випадку методу із зупинками й очікуванням. Отже, перевагою цього методу є те, що передавання інформаційних пакетів здійснюють неперервно, тому ефективність використання такого методу є порівняно високою у каналах як із малою, так і з великою затримкою пакета. Недоліком можна вважати те, що в передавальному пристрої потрібно мати буфер для зберігання певної кількості пакетів для повторного передавання.

Перевагою методу передавання даних із вибіркоvim повторенням є те, що повторно передають лише ті інформаційні пакети, у яких виявлено помилку. Технічне здійснення цього методу вимагає наявності буферів пам'яті як у передавальному пристрої для інформаційних пакетів для повторного передавання, так і в приймальному пристрої для відтворення правильної послідовності інформаційних пакетів, що є недоліком цього методу.

## Висновки

На підставі дослідження розглянутих методів передавання даних із керуючим зворотним зв'язком можна зробити такі висновки:

– найпростіше здійснити метод із зупинками й очікуванням, але ефективність його використання є найнижчою;

– метод з N-поверненням є проміжним між розглянутими методами з погляду як складності здійснення, так і ефективності використання;

– метод із вибіркоvim повторенням характеризується найвищою ефективністю використання, але технічно його найважче здійснити.

За результатами досліджень рекомендується застосовувати метод із зупинками й очікуванням у каналах зв'язку з низькошвидкісним передаванням даних, а метод із вибіркоvim повторенням – з високошвидкісним передаванням даних.

## Список літератури

1. Бройдо, В. Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации [Текст]: учеб. для вузов / В.Л. Бройдо. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 703 с.: ил.
2. Горбатий, І. В. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи [Текст]: навч. посібник / І.В. Горбатий, А.П. Бондарев. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 336 с.
3. Simon, M. K. Bandwidth-efficient digital modulation with application to deep-space communications [Текст]: monograph / M.K. Simon; editor-in-chief Joseph H. Yuen. – California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2001. – 228 p.
4. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст]: [пер. с англ.] / Б. Скляр. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 1104 с.: ил.
5. Прокис, Дж. Цифровая связь [Текст]: [пер. с англ.] / Дж. Прокис; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.: ил.
6. Галкин, В. А. Цифровая мобильная связь [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.: ил.
7. Горбатий, І. В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу [Текст]: монографія / І.В. Горбатий. – Львів: СПОЛОМ, 2011. – 612 с.
8. Gorbaty, I.V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power [Текст]/ I.V. Gorbaty // Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 2014. – Vol. 48, No. 1, P. 47–55.

**Горбатый И. В.** Исследование технической эффективности телекоммуникационных систем и сетей при использовании различных методов передачи данных с управляющей обратной связью. Рассмотрены методы передачи данных с управляющей обратной связью: метод с остановками и ожиданием, метод с N-возвратом и метод с выборочным повторением. Такие методы применяют для исправления ошибок в телекоммуникационных системах и сетях в случаях, когда избранные методы модуляции и корректирующего кодирования не обеспечивают необходимого качества передачи данных в условиях помех. Эти методы базируются на методах автоматического запроса повторной передачи. Исследовано влияние методов передачи данных с управляющей обратной связью на эффективность телекоммуникационных систем и сетей. Выявлены преимущества и недостатки таких методов, сделаны рекомендации относительно их применения.

**Ключевые слова:** метод передачи данных с управляющей обратной связью, метод автоматического запроса повторной передачи, эффективность, телекоммуникационная система, телекоммуникационная сеть.

*Горбатий Іван Володимирович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. Електронна пошта: giv@polynet.lviv.ua*

*Horbatyi Ivan Volodymyrovych, Doctor of Engineering Science, Associated Professor, Professor of Department of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurement of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: giv@polynet.lviv.ua*

**Horbatyi I.V.** Research of technical efficiency of the telecommunication systems and networks in case of use of different methods of data transmission with the managed reverse communication. The methods of data transmission with the managed reverse communication were considered: method with the stop-and-wait automatic repeat request, method with continuous automatic repeat request with pullback and method with continuous automatic repeat request with selective repeat. Such methods are applied for the errors correction in the telecommunication systems and networks in the cases when the used methods of modulation and correcting coding do not ensure the necessary quality of data transmission in the conditions of noise. These methods based on methods with automatic repeat request. The influencing of methods of data transmission with the managed reverse communication on efficiency of the telecommunication systems and networks was explored. The advantages and defects of such methods was exposed, the recommendations in relation to their application was produced.

**Keywords:** method of data transmission with the managed reverse communication, method with automatic repeat request, efficiency, telecommunication system, telecommunication network.

*Надійшла 09.01.2017 р.*