

## МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ ВТРАЧЕНИХ ВІДЕОДАНИХ ПРИ ЇХ ШИРОКОМОВНІЙ ПЕРЕДАЧІ В ОДНОРАНГОВИХ МЕРЕЖАХ

Робота присвячена проблемі підвищення ефективності резервування відеоінформації в однорангових мережах її ширококомовної передачі для забезпечення неперервності її доставки абонентам. Підвищення ефективності досягається за рахунок зменшення надлишковості резервування а також за рахунок прискорення обчислень для відновлення даних. Для досягнення цього розроблено спеціальний метод формування резервної інформації та її використання при відновленні даних, які втрачено. Доведено, що запропонований підхід забезпечує теоретичний мінімум інформаційної надлишковості і суттєве прискорення процесу відновлення даних.

Paper is dedicated to a problem of increasing of efficiency of video data reservation in the peer-to-peer network for ensuring in it continuity. The increasing of efficiency is accomplished by reducing the redundancy of data reservation and by accelerating of data reconstruction calculation. To attain these possibilities the special method for standby information forming and using for reconstruction of video data whose are losing were developed. It has been shown that proposed approach allow to decries the redundancy of information and provides acceleration in data restoring.

### 1. Вступ

Тенденцією практичного використання Інтернет в останнє десятиліття стало зростання питомої ваги мультимедійного трафіку [1]. При цьому, більшу частину цього мультимедійного трафіку займає передача потокового відео [2]. Фактично, це свідчить про наростаючий процес заміни технологічної бази соціальної функції ширококомовної масової передачі інформації: від традиційного телебачення ця функція все більше переходить до мережевих технологій. Останні забезпечують суттєво більші можливості вибору інформаційного продукту для кінцевого користувача, універсальність використання користувацьких апаратних засобів інформаційного спілкування, часову та просторову мобільність отримання інформаційних послуг.

Разом з тим, в історичному плані архітектура глобальних комп'ютерних мереж концептуально створювалася для вирішення задач, відмінних від доставки потокового відео широкому колу користувачів. Відповідно, вказана вище тенденція зростання в загальному об'єму трафіку питомої ваги ширококомовної потокової відеоінформації, вимагає вдосконалення засобів та протоколів глобальної мережі з тим, щоб забезпечити високу якість транспортування даних вказаного класу кінцевому споживачу. Важливим аспектом якості доставки ширококомовної потокової відеоінформації є забезпечення непе-

рервності, тобто відсутність часових проміжків в які дані не доставляються.

Таким чином, наукова задача забезпечення неперервної доставки ширококомовної потокової відеоінформації в глобальних комп'ютерних мережах в умовах зростання об'єму мультимедійного трафіку є актуальною.

### 2. Аналіз задачі забезпечення неперервності ширококомовної доставки відеоінформації в однорангових мережах та існуючих методів її вирішення

Зазначений вище процес зміни технологічної бази ширококомовної доставки відеоінформації на користь мережевих засобів, а також збільшення кількості Інтернет користувачів, мають наслідком збільшення навантаження на мережеві канали передачі даних.

При цьому, як показує аналіз [3], темпи збільшення об'єму передачі даних випереджають зростання пропускної здатності каналів. За цих умов, традиційна клієнт-серверна організація не забезпечує ефективну передачу ширококомовної відеоінформації. Це зумовлене тим, що передача даних з серверу кожному з клієнтів організується окремо, без огляду на зміст даних. При доставці через єдиний сервер однакової інформації багатьом клієнтам, що має місце при передачі ширококомовного відео, фактично відбувається дублювання доставки даних, що призводить до перенавантаження серверу.

Очевидним вирішенням вказаної проблеми є організація доставки ширококомовної відеоінформації через ієрархічну структуру, вузлами якої є споживачі відеоінформації. Практично ця ідея може бути втілена в рамках технології однорангових мереж (peer-to-peer або P2P) [4].

Однорангова мережа – це віртуальна мережа, що з'єднує на логічному рівні певну підмножину абонентів фізичної мережі. Основною відмінністю логічної організації однорангових мереж від клієнт-серверної, є те, що абоненти можуть виконувати однакові функції, тобто бути як передавачами так і приймачами даних. Тобто, в одноранговій мережі не існує жорстко фіксованих серверів та клієнтів, а її вузли одночасно функціонують як клієнти та сервери по відношенню до інших вузлів мережі. Відповідно, однорангова мережа може бути зконфігурована у вигляді ієрархічної структури розповсюдження ширококомовної відеоінформації внаслідок чого зменшується дублювання її передачі. Це дозволяє значно знизити об'єм трафіку і, відповідно, зменшити навантаження на канали передачі даних.

З іншого боку, відсутність дублювання передачі негативно впливає на надійність прийому відеоінформації. При її доставці через ланцюжок вузлів однорангової мережі існує можливість відключення одного з них. Це призводить до розриву віртуального каналу передачі відеоінформації. В цій ситуації потрібно виконувати реконфігурування мережі доставки відеоінформації. Це потребує деякого часу, на протязі якого доставка відеоінформації кінцевому споживачу переривається. Для виключення можливості такої ситуації, що суттєвим чином впливає на якість обслуговування абонентів мережі, потрібно організувати можливість отримання даних абонентом на короткий період, коли транспортування основного потоку відеоданих стає неможливим.

Формально, задача резервування доставки відеоданих може бути сформульована наступним чином. Для кожного абонента існує шлях доставки відеоданих через певні вузли ієрархічної структури їх розповсюдження. Вважається, що потік відеоінформації організовано у вигляді послідовності пакетів  $p_1, p_2, \dots$ . При відімкненні одного з вузлів, через які проходить потік розповсюдження відеоданих для вибраного абонента, надходження даних припиняється, що може бути виявлено абонентом. Через проміжок часу  $\Delta t$ , потрібного для реконфігурування мережі, доставка основного потоку відеоданих

відновлюється. Якщо позначити темп передачі пакетів (середній проміжок часу між надходженням двох суміжних пакетів) через  $\tau$ , то максимальна кількість  $l$  втрачених пакетів відеозображень за  $\Delta t$  – максимальний час, потрібний для реконфігурування мережі, становить  $l = \Delta t / \tau$ .

Фактичне значення  $\tau$  може бути визначене через параметри протоколу передачі відеоданих. В вершині однорангової мережі розташовується сервер, який отримує відеопотік від виробників контенту (телевізійних компаній). Згодом, відеопотік кодується і передається користувачам по мережі IP у вигляді послідовності пакетів даних. Швидкість кодування на сервері (бітрейт) характеризується кількістю бітів, які використовуються для збереження однієї секунди відеоконтента [5]. При підключенні абонента до мережі за допомогою протоколу SDP (протокол опису сесії передачі потоку відеоданих) він отримує повідомлення, в якому вказана швидкість  $R$  кодування відеоданих на сервері. Відповідно,  $\tau = R/L$ , де  $L$  – встановлений розмір пакету.

В якості основних критеріїв ефективності вирішення задачі забезпечення неперервності ширококомовної доставки відеоінформації в однорангових мережах виступають:

- об'єм обчислювальних ресурсів абонента, необхідних для відновлення втрачених даних.
- об'єм надлишкової інформації, що передається в одноранговій мережі.
- рівень якості демонстрації відеоінформації.

Оцінка об'єму обчислювальних ресурсів абонента, необхідних для відновлення втрачених даних, зазвичай, включає в себе обчислювальну складність, кількість процесорних операцій, а також об'єм пам'яті, потрібних для розв'язання процедури відновлення. Об'єм надлишкової інформації для задач резервування інформації в комп'ютерних мережах найчастіше оцінюється через співвідношення  $h$  швидкості передачі основного потоку доставки інформації до резервного потоку. Чим більше значення  $h$  – тим більш ефективним є резервування. Рівень якості пред'явлення відеоінформації оцінюється низкою параметрів, найбільш суттєвими з яких є відсутність перерв в демонстрації відеозображень та сталість темпу їх пред'явлення.

Найпростіший спосіб досягти того, щоб відбувалось неперервне відтворення отриманої відеоінформації при припиненні прийому потоку

ку на час  $\Delta t$ , полягає в тому, що організовується затримка на час  $\Delta t$  відтворення прийнятих відеоданих на абоненті [6]. Тобто, потік відеоданих накопичується в пам'яті вузла протягом часу  $\Delta t$  і лише потім відтворюється. При припиненні надходження потоку даних, абонент відтворює відеодані, що були накопичені заздалегідь. Після реконфігурації мережі, потік відеоінформації відновлюється, що дає змогу неперервного відтворення відеоінформації. Для відновлення заповнення буферу після перерви в передачі даних, відтворення відеоінформації протягом певного проміжку часу має відбуватися в уповільненому темпі, що впливає на якість демонстрації. Основним недоліком викладеного підходу є необхідність виділення для кожного з абонентів буферної пам'яті об'ємом  $L$  для збереження відеозображень.

Інші технології пов'язані з повним або частковим дублюванням передачі даних. При цьому дублюючі відеодані передаються за іншим маршрутом. В найпростішому випадку, мова йде про просте дублювання передачі [7]. Очевидний недолік такого рішення полягає в створенні значного надлишкового навантаження на лінії передачі даних.

Більше ефективним рішення є використання часткового дублювання передачі інформації. Широко відомою технологією цього типу є використання корегуючих кодів Ріда-Соломона [8]. Ці корегуючі коди дозволяють відновити будь-яку кількість  $l$  втрачених при передачі пакетів з  $n$  переданих, за рахунок додаткової передачі вдвічі більшої кількості пакетів  $2 \cdot l$ . Недоліком кодів Ріда-Соломона є те, що процес відновлення даних при їх використанні, в математичному сенсі зводиться до розв'язання системи нелінійних рівнянь. Ця система технологічно розв'язується методом перебору, так, що обчислювальна складність процесу відновлення становить  $O(l \cdot n)$ , тобто процес відновлення вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Більш ефективними в плані витрат обчислювальних ресурсів та надлишковості передачі інформації є erasures-коди [9]. Принципова відмінність між ними та корегуючими кодами полягає в тому, що вони не виконують локалізації втрачених чи помилково переданих пакетів. Ці функції, при застосуванні erasures-кодів мають виконуватися мережевими засобами. Переважна більшість erasures-кодів в якості математичної бази використовують лінійні коди (LT-кодування). Це забезпечує швидку та ефективну

обчислювальну реалізацію процесу відновлення. Найбільш відомим типом erasures-кодів є Raptor [10], який дозволяє відновлювати довільну кількість втрачених пакетів з  $n$  переданих. Така висока здатність до відновлення даних досягається за рахунок високого рівня надлишковості – більшу ніж 100%.

Існуючі різновиди erasures-кодів не враховують специфічних особливостей викладеної вище задачі відновлення відеоданих при ширококомовній доставці відеоінформації, а саме:

- існування обмеження на кількість втрачених пакетів;
- того, що втрачені пакети відеоданих є суміжними, тобто фактично мова йде про відновлення “пачки” пакетів.

Це не дозволяє досягти високої ефективності вирішення специфічної задачі відновлення відеоінформації при її ширококомовній доставці при використанні існуючих erasures-кодів. Відповідно, постає наукова задача створення erasures-кодів, які б за рахунок урахування специфічних особливостей забезпечення неперервності доставки ширококомовної відеоінформації в однорангових мережах, забезпечували високу ефективність відновлення втрачених даних.

Ціллю досліджень є підвищення ефективності забезпечення неперервності доставки ширококомовної відеоінформації в однорангових мережах за рахунок розробки відновлюючих кодів, що враховують специфічні особливості втрати інформаційних пакетів.

### 3. Erasures-коди для відновлення пачок втрачених “пачок” пакетів відеоданих

Для досягнення поставленої цілі розроблено спеціалізований метод формування відновлюючих кодів (erasures-кодів) та їх використання для забезпечення неперервності доставки відео зображень.

В якості базових параметрів методу виступають:

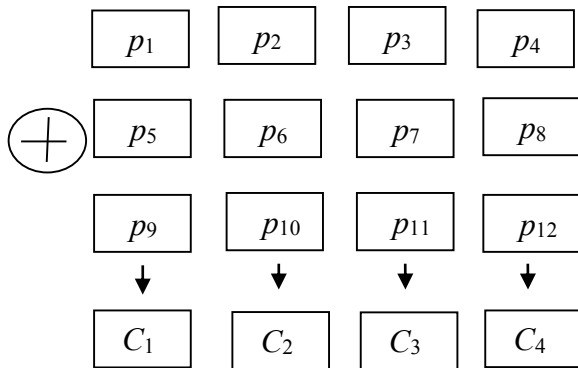
- максимальна кількість  $l$  пакетів, що можуть бути втрачені за час реконфігурування шляху доставки відеоінформації (максимальна довжина “пачки” втрачених пакетів відеоданих);
- коефіцієнт  $h$  надлишковості резервування (відношення кількості інформаційних пакетів до резервних);
- затримка  $\Delta$  демонстрації відеоінформації споживачеві, яка визначається інтервалом часу між отриманням споживачем відеоінформації та пред'явленням її.

Запропонований метод передбачає поділення потоку інформаційних пакетів на блоки по  $h \cdot l$  пакетів в кожному. Відповідно, послідовність пакетів  $i$ -го блоку може бути позначена як  $p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,h \cdot l}$ . Для кожного  $i$ -го блоку пропонується формувати  $l$  резервних кодів  $C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,l}$ . Вказані коди пропонується формувати у вигляді логічної суми (суми за модулем 2) кодів  $h$  інформаційних потоків:

$$\forall k = 1, 2, \dots, l: C_{i,k} = \bigoplus_{j=0}^{h-1} p_{i,j \cdot l + k}. \quad (1)$$

Наприклад, якщо при втраті основного потоку на час реконфігурування мережі абоненту не надходить максимум 4 суміжних пакета, то  $l=4$ , якщо при цьому припустити, що  $h=3$ , то блок містить  $h \cdot l = 12$  пакетів, які зручно представити у вигляді матриці  $M$ , показаної на рис. 1, що має  $h$  рядків та  $l$  стовпців. При такій інтерпретації кожен з  $l$  резервних кодів  $C_1, C_2, \dots, C_l$  можна розглядати як суму за модулем 2 пакетів відповідного стовпця матриці  $M$ , тобто в рамках прикладу:

$$\begin{aligned} C_1 &= p_1 \oplus p_5 \oplus p_9 \\ C_2 &= p_2 \oplus p_6 \oplus p_{10} \\ C_3 &= p_3 \oplus p_7 \oplus p_{11} \\ C_4 &= p_4 \oplus p_8 \oplus p_{12} \end{aligned}$$



**Рис. 1. Матриця пакетів та їх резервні коди**

Сформовані описаним способом резервні коди на сервері оформляються у вигляді відновлюючих пакетів, кількість яких в  $h$  раз менша за кількість інформаційних пакетів. Передача Резервний потік формується на вихідному вузлі і поширюється по резервному дереву. Відповідно, інтенсивність резервного потоку  $h$  раз менша за інтенсивність основного потоку розповсюдження відеоданих.

Зрозуміло, що передачі  $i$ -го блоку, перший його резервний код  $C_{i,1}$  може бути сформований не раніше приходу на сервер  $(h-1) \cdot l$  інформаційних пакетів блоку. Відповідно, передача першого резервного коду може відбутися не раніше ніж будуть передані ніж будуть переда-

ні  $(h-1) \cdot l$  інформаційних пакетів блоку. Таким чином, теоретично мінімальне значення затримки  $\Delta$  демонстрації відеоінформації споживачеві визначається формулою:

$$\Delta = (h-1) \cdot l \cdot \tau \quad (2)$$

Відновлення втраченої “пачки” пакетів відеоінформації пропонується організувати наступним чином. Якщо припустити, що втрачені пакети належать одному, для визначеності,  $i$ -тому блоку, і мають порядкові номери з  $j$ -го до  $(j+l)$ -го в блоці, де  $j \in \{1, 2, \dots, h \cdot (l-1)\}$ , то цілком очевидним є той факт, що кількість втрачених пакетів в кожному з стовпців матриці  $M$  не перевищує одного. Відповідно, відновлення пакетів  $p_{ij}, p_{ij+1}, \dots, p_{i(j+l)}$  виконується шляхом обчислення суми за модулем 2 отриманих пакетів стовпців та відповідного резервного коду. Формально, процедура відновлення описується формулою:

$$p_{ij} = C_{i,j \bmod l} \oplus \bigoplus_{q=0, q \neq j \bmod l}^{h-1} p_{i,q \cdot l + j \bmod l}, \quad (3)$$

де через  $\text{div}$  позначено операцію цілочисельного ділення з відкиданням залишку.

Описана процедура відновлення втрачених даних може бути ілюстрована в рамках наведеного вище прикладу наступним чином. Нехай, в результаті відключення проміжної ланки передачі основного потоку до моменту відновлення передачі за іншим маршрутом втрачені пакети з порядковими номерами в блоці: 4, 5, 6, 7, тобто  $j=4$ . Втрачені пакети поточного блоку відновлюються, згідно (3) наступним чином:

$$\begin{aligned} p_4 &= C_4 \oplus p_8 \oplus p_{12}, \\ p_5 &= C_1 \oplus p_1 \oplus p_9, \\ p_6 &= C_2 \oplus p_2 \oplus p_{10}, \\ p_7 &= C_3 \oplus p_3 \oplus p_{11} \end{aligned}$$

Очевидно, що для забезпечення неперервності пред'явлення відеоінформації абоненту в рамках наведеного прикладу, відновлення пакету  $p_4$  може бути реалізоване лише після того, як абоненту поступить пакет  $p_{12}$ . Для цього, у відповідності з (2), затримка пред'явлення абоненту отриманих відеоданих має визначатися часом передачі не менше  $(h-1) \cdot l = 3 \cdot 3 = 9$  пакетів. Схематично процес затримки пред'явлення пакетів для наведеного прикладу показано на рис. 2.

Таким чином, запропонований метод фактично вирішує задачу відновлення втрачених за час з моменту виключення з мережі одного з вузлів трансляції ширококомовної відеоінформації до реконфігурування мережі для продов-

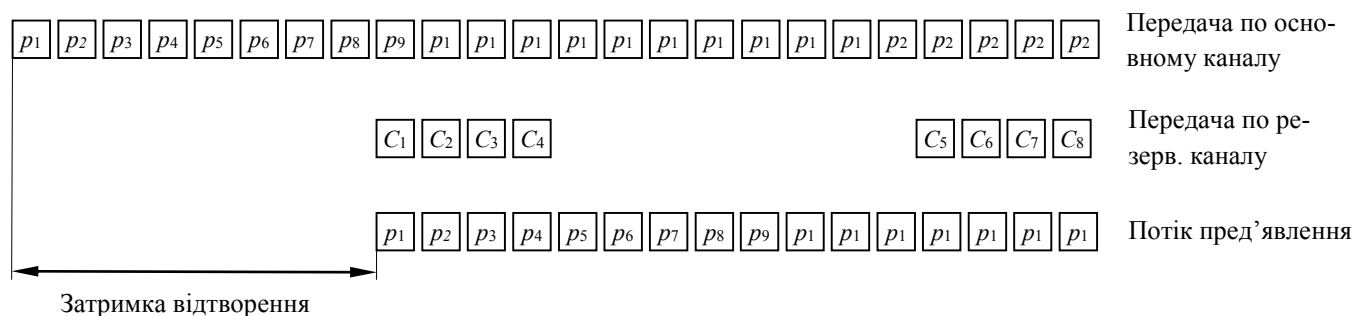


Рис. 2. Процес затримки пред'явлення пакетів

#### 4. Оцінка ефективності

Запропонований метод фактично є спеціалізованим для домінуючого типу втрат інформаційних пакетів при ширококомовній передачі відеоінформації передачі в однорангових мережах. Проведений аналіз показав, що основною причиною таких втрат є виключення вузла мережі, через який передається основний потік відеоінформації. Відповідно, домінуючим типом порушення неперервності доставки абонентам відеоінформації є втрата групи послідовних пакетів, що утворюють “пачку”.

Відомі методи відновлення втрачених даних в мережах по своїй суті є універсальними, і передбачають, що локалізація у часі втрачених пакетів є випадковою. Крім того, відомі методи відновлення даних більшою мірою не розраховані на роботу з мультимедійною інформацією і, відповідно, їх використання пов'язане зі значними затримками у часі пред'явлення даних абоненту.

Головною перевагою запропонованого методу формування і використання erasures кодів для відновлення відеоінформації “пачки” пакетів основного потоку є зменшення рівня інформаційної надлишковості. Як слідує з формули (2), залежно від обмежень на наявні ресурси існує можливість варіювання, з одного боку, об'єму трафіку передачі резервних пакетів по альтернативному маршруту (визначається параметром  $h$ ), з іншого боку, об'єму пам'яті абонента, який визначає можливу затримку  $\Delta$  пред'явлення відеоінформації. Це означає, що при наявності достатнього об'єму буферної пам'яті, постійна затримка  $\Delta$  пред'явлення абоненту потоку відеоданих може бути збільшена і, за рахунок цього пропорційно підвищено значення  $h$  – коефіцієнту відношення об'єму основного потоку до об'єму резервного, тобто зни-

жено рівень інформаційної надлишковості резервування.

Теоретичний аналіз та результати проведених експериментальних досліджень показують, що при наявності цілком реального об'єму буферної пам'яті чисельне значення  $h$  становить від 4-х до 10. Тобто об'єм трафіку резервної інформації значно менший за об'єм основного потоку відеоінформації. Теоретично, при відсутності обмежень на затримку  $\Delta$  пред'явлення відеоінформації, для передачі об'єму даних, що використовуються для відновлення інформації з  $l$  втрачених пакетів, також потрібно  $l$  резервних пакетів. Це означає, що запропонований метод за таких умов забезпечує досягнення теоретичного мінімуму надлишковості резервування. Коди Ріда-Соломона, за таких же умов, потребують додаткової передачі  $2 \cdot l$  резервних пакетів, тобто вдвічі більше ніж передбачає розроблений метод.

Для іншого метода відновлення втрачених при передачі у мережах даних, що широко застосовується на практиці – Raptor значення коефіцієнту  $h$  становить 0.95-1. Це означає, що за рівнем надлишковості резервування, запропонований метод переважає Raptor в декілька раз, тобто дозволяє вирішувати задачу забезпечення неперервності пред'явлення абонентам ширококомовної інформації в однорангових мережах з використанням резервного потоку, об'єм трафіку якого в 4-10 раз менший ніж при використанні Raptor.

Запропонований метод формування і використання erasures кодів для відновлення втрачених в результаті відключення одного з вузлів передачі відеоінформації в одноранговій мережі “пачки” пакетів, як слідує з формул (1) та (3) використовує найпростіші лінійні операції, що забезпечує низький рівень обчислювальної складності операцій по відновленню втрачених даних. Це вигідно відрізняє запропонований

метод від відомих підходів, що мають за основу використання нелінійних циклічних кодів, зокрема кодів Ріда-Соломона, процес відновлення даних в яких в математичному сенсі зводиться до розв'язання систем рівнянь на полях Галуа.

Таким чином, запропонований метод для певної області застосування – ширококомовного розповсюдження відеоінформації в однорангових мережах забезпечує більшу ефективність відновлення втрачених даних при виключенні одного з вузлів трансляції осново потоку відеоданих в порівнянні з відомими методами. Це, в свою чергу, має результатом високу ефективність вирішення задачі неперервності доставки ширококомовної відеоінформації в однорангових мережах.

Основним витоком підвищеної ефективності розробленого методу є його спеціалізація, основана на урахуванні специфічних особливостей втрат відеоданих при їх ширококомовній трансляції в однорангових мережах.

## 5. Висновки

В результаті проведених досліджень, направлених на ефективне вирішення задачі неперервності доставки ширококомовної відеоінформації в однорангових мережах, був запропонований, теоретично та експериментально досліджений метод відновлення втрачених даних з викорис-

танням окрім основного, резервного маршруту передачі відновлюючи кодів.

Для забезпечення неперервності доставки ширококомовної відеоінформації в однорангових мережах вперше запропоновано метод відновлення інформаційних кодів групи суміжних у потоці пакетів – пачки, відмінністю якого є те, що відновлюючи коди (erasure-коди), які передаються по резервному потоці, формуються як суми за модулем 2 кодів основних пакетів, що відстають в основному потоці на величину максимальної довжини пачки, за рахунок чого досягається можливість варіювання трафіку резервного потоку залежно від об'єму буферної пам'яті абонента і, тим самим, досягається підвищення ефективності втрачених пакетів пачки в порівнянні з існуючими erasure-кодами.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження повною мірою довели високу ефективність запропонованого методу оперативного відновлення відеоінформації в специфічних умовах ширококомовної її в однорангових мережах.

Розроблений метод може бути використано для організації високоякісної і надійної доставки ширококомовної відеоінформації великій кількості абонентів з використанням однорангових мереж.

## Список посилань

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and methodology 2014-2019 [Електронний ресурс] // – Режим доступу [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white\\_paper\\_c11-481360.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf)
2. The statistics portal [Електронний ресурс] // – Режим доступа: <http://www.statista.com/statistics/272835/share-of-internet-users-who-watch-online-videos>
3. IEEE 802.3 Industry Connections Ethernet Bandwidth Assessment [Электронный ресурс]// – Режим доступу: [http://www.ieee802.org/3/ad\\_hoc/bwa/BWA\\_Report.pdf](http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/bwa/BWA_Report.pdf)
4. H. Deshpande, M. Bawa, and H. Garcia-Molina, Streaming live media over a peer-to-peer network // In Work at CS-Stanford, 2002
5. Prakash C. Data Communications and Computer Networks // PHI Learning, 2006, P. 7-8.
6. Hei X., Liu Y. and Ross K. Inferring Network-Wide Quality in P2P Live Streaming Systems.// Selected Areas in Communications, 2007.
7. Begen A., Perkins C. RFC 7198 – Duplicating RTP Streams // IETF. – April 2014.
8. Brinkmeier M., Fischer M., Grau S., Schaefer G., Strufe T. Methods for Improving Resilience in Communication Networks and P2P Overlays. PIK // Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation 32, 2009.
9. Czap L. Secure Network Coding with Erasures and Feedback./ L. Czap, C. Fragouli, V. Phabhakaran, S. Diggavi // IEEE Transaction on Information Theory.– 2015.– Vol. 61.– No. 4.– P. 1667-1686.
10. Mladenov T. ; Krieger U. Raptor Codes for P2P Streaming // Parallel, Distributed and Network-Based Processing . - Feb. 2012, P. 327 – 332.