

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод балансування бітової швидкості кодованого відеоінформаційного  
потoku відносно динаміки пропускної спроможності мережі  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ІММ-20-1  
Юрченко. В.Р.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та  
радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційно-мережна  
інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. Твердохліб В.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Безрук В.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Не містить відомостей, заборонених  
до відкритого публікування

Керівник \_\_\_\_\_ /*В.В. Твердохліб*

Студент \_\_\_\_\_ / *В.Р. Юрченко*

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)  
Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« 8 » листопада 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Юрченко Владиславові Руслановичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Метод балансування бітової швидкості кодованого відеоінформаційного потоку відносно динаміки пропускної спроможності мережі  
затверджена наказом університету від 8 листопада 2021 р. № 1674 Ст
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2021 р.
- Вихідні дані до роботи Дослідити особливості розвитку сучасних мультимедіа. Визначити роль відеоінформації у розвитку мультимедіа та проблемні аспекти такого розвитку. Виявити фактори, що впливають на трансляцію відеоінформації у мережі. Дослідити, у яких умовах можливо забезпечити передавання відеотрафіку з необхідним рівнем якості. Обґрунтувати необхідність забезпечення балансу між бітовою швидкістю відео та пропускною здатністю мережі. Дослідити метод балансування бітової швидкості відео за рахунок зміни структурного опису сегментів
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ
  - Мультимедіа, як специфічний тип інформації
  - Фактори, що впливають на процес доставки відеоінформації
  - Реалізація алгоритму балансування бітової швидкості кодованого відеоінформаційного потоку відносно динаміки пропускної спроможності мережі
  - Загальна концепція реалізації методу балансування бітової швидкості відеоінформації на базі існуючих систем передачіВисновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_  
слайди презентації в форматі Power Point (назва та мета роботи, мультимедійні  
продукти, проблематика надсилання відео контенту мережею, метод балансування  
бітної швидкості відео інформаційного потоку, інтеграція методу балансування в  
існуючі системи обробки відео)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	8.11.21 - 10.11.21	
2	Розділ 1	11.11.21 - 17.11.21	
3	Розділ 2	18.11.21 - 23.11.21	
4	Розділ 3	23.11.21 - 30.11.21	
5	Розділ 4	30.11.21 – 10.12.21	
6	Висновки	10.12.21 – 11.12.21	
7	Оформлення пояснювальної записки	12.12.21 – 14.12.21	

Дата видачі завдання 8 листопада 2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст.викл. Твердохліб В.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 22 рис., 1 табл., 20 джерела, 1 додаток

### МУЛЬТИМЕДІА, ВІДЕОКОДУВАННЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, БУФЕРНИХ ПРИСТРІЙ, СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНЕ ВІДХИЛЕННЯ, H.26\*, СТРУКТУРНИЙ ОПИС

Об'єкт дослідження – метод балансування бітової швидкості відеопотоку відносно динаміки пропускної здатності у ході його трансляції.

Мета роботи – дослідження можливостей підходу, який базується на зміні структурного опису сегментів відеокадру, щодо забезпечення оперативного корегування бітової швидкості відеоінформаційного потоку з внесенням мінімальної помилки.

Виконано аналіз ролі відеоінформації як складової мультимедійних систем та продуктів. Виявлено проблематику передавання відео з заданим рівнем якості. Обґрунтовано доцільність підходу, спрямованого на забезпечення балансу бітової швидкості відео відносно поточного рівня пропускної спроможності мережі. Досліджено метод балансування бітової швидкості за рахунок зміни структурного представлення сегментів відеокадру та інтеграцію даного методу в існуючі системи обробки відео.

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 84p., 22 fig., 1 tabl., 20 sources, 1 app.

MULTIMEDIA, VIDEO CODING, CAPACITY, BUFFER DEVICES,  
RMS DEVIATION, H.26 \*, STRUCTURAL DESCRIPTION

The object of research - a method of balancing the bit rate of the video stream relative to the dynamics of bandwidth during its transmission.

The purpose of the work is to study the possibilities of the approach, which is based on changing the structural description of the video frame segments, to provide prompt adjustment of the bit rate of the video information stream with the introduction of a minimum error.

The analysis of the role of video information as a component of multimedia systems and products is performed. Problems of video transmission with the set quality level are revealed. The expediency of the approach aimed at ensuring the balance of video bit rate relative to the current level of network bandwidth is substantiated. The method of bit rate balancing due to the change of the structural representation of the video frame segments and the integration of this method into the existing video processing systems is investigated.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	13
1 МУЛЬТИМЕДІА, ЯК СПЕЦИФІЧНИЙ ТИП ІНФОРМАЦІЇ .....	15
1.1 Сутність поняття мультимедіа .....	15
1.2 Приклади застосування мультимедіа .....	16
1.3 Класифікація мультимедіа .....	17
1.4 Особливості розвитку мультимедіа сьогодні .....	20
2 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ДОСТАВКИ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ.....	23
2.1 Загальна класифікація факторів, що тим чи іншим чином здійснюють вплив на якість відеоконтенту .....	23
2.1.1 Неможливість гарантування доставки трафіку відеоінформаційних ресурсів у реальному часі з використанням існуючих технологій доступу.....	24
2.1.2 Дисбаланс діючих рівнів пропускної спроможності та бітової швидкості відеопотоку .....	30
2.2 Умови, за яких забезпечується ефективне передавання відеоінформації .....	33
2.3 Зростання структурної складності мережевого трафіку .....	35
2.4 Висновки за розділом .....	37
3 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИМУ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ КОДОВАНОГО ВІДЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ПОТОКУ ВІДНОСНО ДИНАМІКИ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МЕРЕЖІ .....	38
3.1 Підхід до вибіру механізмів для реалізації алгоритму балансування.....	38
3.1.1 Сутність процесу балансування бітової швидкості відео потоку.	38
3.1.2 Базові вимоги до механізмів для забезпечення балансування бітової швидкості відео потоку .....	39
3.1.3 Аналіз існуючих механізмів, реалізованих у рамках стандартизованих технологій кодування, потенційно здатних для балансування бітової швидкості .....	42

3.1.4	Визначення рівня декомпозиції відеопотоку, відносно якого доцільно виконувати зміну бітової швидкості у ході її балансування.....	43
3.2	Принцип маніпулювання рівнем бітової швидкості відеоінформаційного потоку за рахунок змін структурного опису фрагментів.....	47
3.2.1	Підхід до розв'язання протиріччя, зумовленої ростом внесеної помилки у наслідок скорочення просторової структури сегменту.....	49
3.3	Синтез механізму балансування бітової інтенсивності шляхом зміни структури сегментів слайду .....	55
3.4	Висновки за розділом .....	62
4.	ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ НА БАЗІ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ.....	63
4.1	Принцип взаємозв'язку базового механізму кодування та механізму балансування бітової швидкості .....	63
4.2	Пряма оцінка рівня поточної пропускної здатності мережі у ході передавання відеоінформації .....	64
4.3	Опосередкована оцінка поточного рівня пропускної спроможності мережі .....	69
4.3.1	Взаємозв'язок рівня завантаженості буферу та поточної величини пропускної спроможності мережі .....	69
4.3.2	Використання вихідного буферу передавача для контролю динаміки рівня пропускної здатності мережі .....	72
4.3.3	Порядок дій у ході опосередкованої оцінки завантаженості буферу.....	74
4.3.4	Умови, що визначають перелік дій, які може бути виконано відносно стисненої відеоінформації, яка надходить на обробку .....	77
4.4	Висновки за розділом.....	79
	ВИСНОВКИ.....	81
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	83
	ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ .....	85
	ДОДАТОК Б ТЕЗИ КОНФЕРЕНЦІЇ .....	95

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- CBTS – (Computer-Based Trainings) – загальна назва комп’ютерних навчальних курсів;
- VR – (virtual reality) – віртуальна реальність;
- EB – електронне видання;
- IoT – (Internet of Things) – Інтернет речей;
- IoE – (Internet of Everything) – “Інтернет всього” – концепція розвитку Інтернету речей;
- UHD – (Ultra-High Definition) – формат відео надвисокої роздільної здатності;
- HD-ready – формат відеокадру, що передре роздільній здатності FullHD;
- FullHD – (full-high definition) – повноформатне відео високої роздільної здатності;
- SD – (Small Definition) – формат відео низької роздільної здатності;
- WiFi – (Wireless Fidelity) – технологія бездротової передачі даних;
- LTE-A – (long term evolution advanced) – технологія високошвидкісного бездротового зв’язку покоління 4,5G;
- UMTS – (Universal Mobile Telecommunications System) – технологія мобільного зв’язку третього покоління;
- HSPA – (High Speed Packet data Access) – технологія бездротового широкополосного радіо доступу на базі пакетної передачі;
- IMT2020 – стандарт мобільного зв’язку п’ятого покоління;
- VoD – (video on demand) – група сервісів, що надають послуги доставки потокового відео на запит користувача;
- QoS – технологія контролю якості послуг, які надає інформаційно-комунікаційна мережа;
- H.26\* – група стандартів кодування відео контенту, що базується на сімействі MPEG;
- H.264/AVC – (advanced video coding) – технологія високоефективного кодування відео H.264;
- GOP – (group of pictures) – упорядкована група кадрів різних типів, структурна одиниця відеопотоку;

MPEG – (Motion Pictures Expert Group) – сімейство стандартів кодування відеоінформації;

PSNR – (Pulse Signal to Noise Rate) – пікове відношення сигнал/шум;

MSE – (mean square error) – середньоквадратичне відхилення (СКВ);

RTT – (Round Trip Time) – час двосторонньої затримки (час проходження пакету у напрямку джерело-приймач-джерело).

## ВСТУП

Початок 2000-х років характеризується стрімким розвитком засобів мультимедіа, та, як наслідок, початком широкого їх утілення. Разом з тим, деякий час мультимедіа як галузь, була досить обмеженою. За великим рахунком, аудиторію галузі складала, головним чином, розробники програмних платформ для створення та підтримки мультимедіа-продуктів, автори мультимедійного контенту та невелике коло користувачів [1]. Дана ситуація була зумовлена:

- обмеженими можливостями інформаційно-комунікаційних мереж для розповсюдження мультимедійного контенту;
- недостатньою продуктивністю користувацьких терміналів для опрацювання значної частини мультимедійних продуктів.

У зазначених умовах мультимедійні продукти розповсюджувалися найчастіше на дискових носіях.

Характерним прикладом такого контенту можуть бути мультимедійні додатки, побудовані на базі технології Flash, які мали невеликий розмір, не залежали суттєво від розмірів екрану та більша частина з них не вимагала суттєвих ресурсів системи, що зумовило їхнє поширення.

Паралельно з цим створювалися більш масштабні мультимедійні проекти, чому, свого часу, сприяло впровадження у широке застосування платформи QuickTime [2]. Це дало можливість ефективно поєднати у єдиний програмний конструктив дані багатьох типів – аудіо, графічні збірки та відео, та звертатися до них як до окремого та незалежного елемента за необхідності. Ряд таких проектів існують та розвиваються понині. Одним з найстаріших проектів такого типу є Енциклопедії Кирила та Мефодія [3].

Сучасні мультимедійні продукти, на відміну від передуючих проектів, не містять об'єктів Flash, що раніше були чи не обов'язковим елементом, що використовувався для побудови елементів управління та анімації. Натомість, у рамках таких продуктів суттєво збільшився відсоток аудіо та відеоданих. Наприклад, якщо перші релізи Енциклопедії Кирила та Мефодія містили сукупно не більш, ніж 100-150 Мб відеоконтенту у форматі mov з роздільною здатністю не більш, ніж 320x240, сьогодні до складу таких проектів можуть входити десятки та сотні Тб відеоінформації високої, а у ряді випадків – надвисокої роздільної здатності.

У свою чергу, змін зазнав сам формат розповсюдження мультимедійного контенту. Так, на сьогодні переважна його більшість є доступною у онлайн-режимі, розміщуючись на веб-ресурсах [4].

При цьому, мультимедійний контент існує у форматі додатків, презентацій та відео файлів, що є доступними для завантаження, або онлайн-перегляду. Це, з одного боку, значно спрощує до нього доступ широкій користувачькій аудиторії, а з іншого боку – створює певні обмеження та накладає додаткові вимоги до продуктивності мереж доступу. Зумовлено це тим, що на випадок онлайн-доступу до мультимедійних ресурсів має забезпечуватися стабільна пропускна здатність, що дозволяє повноцінно транслювати різномірний контент синхронно та відповідно до діючих вимог щодо якості.

Водночас, збільшення користувачької аудиторії, розширення ступеню інтегрованості мережевих сервісів та збільшення обсягів трафіку у мережі з темпами, що значно випереджають швидкість зростання пропускної спроможності, створюють умови, у яких функціонування онлайн-сервісів не може гарантуватися з належною якістю. Першочергово це стосується утруднення трансляції т.з. «важкого» трафіку, серед якого найбільший відсоток належить відеоінформації. Дана обставина зумовлює актуальність досліджень та розробок, спрямованих на забезпечення якості надання мультимедійних мережевих сервісів, для яких відео є одним з ключових типів трафіку.

# 1 МУЛЬТИМЕДІА, ЯК СПЕЦИФІЧНИЙ ТИП ІНФОРМАЦІЇ

## 1.1 Сутність поняття мільтимедіа

У загальному випадку, зараз під терміном мультимедіа зазвичай мається на увазі інформація, яка кінцевому користувачеві надається одночасно у ряді різнорідних форм, а саме [1, 4-5]:

- аудіоряд;
- анімована комп'ютерна графіка;
- відеоряд;
- текстові дані;
- спосіб взаємодії користувача з зазначеними типами даних (рис.1.1)



Рисунок 1.1 – Загальна схема взаємодії користувача з мультимедійним контентом

Окрім зазначений вище базових компонент мультимедіа широкого застосування набули їх часткові випадки. Такі, як:

- презентації;
- мультимедійні мережеві ресурси;
- мультимедійні ігри.

## 1.2 Приклади застосування мультимедіа

За останні 10 років суттєво розширився спектр застосування мультимедіа - зокрема, абсолютний відсоток мультимедійного контенту протягом зазначеного часу збільшився, за різними оцінками, від 3 до 4,5 разів [4, 6]. Разом з тим, якщо на початку свого становлення мультимедійний контент відігравав, головним чином, презентаційну та розважальну роль, то зараз мультимедіа широко використовується у багатьох різномірних сферах:

- освітня галузь;
- маркетинг та реклама,
- сфера розваг;
- промисловість та технології;
- охорона здоров'я;
- наукові дослідження;
- галузь бізнесу;
- безпека та оборона;
- мистецтво та ін.

Так, у галузі освіти мультимедіа утілюється як базис для побудови:

- інтерактивних навчальних продуктів (CBTS);
- різномірних енциклопедій;
- тематичних збірників та довідників.

Застосовуючи дані засоби, користувач вивчає тут чи іншу тематику переглядаючи презентаційний матеріал, підкріплений тематичним текстом та ілюстраційними даними у графічному, аудіо та відео форматах представлення. Дана сфера освітньої галузі на сьогодні отримала неофіційну назву Edutainment. Це поняття означає поєднання у собі засад освіти та розваг на базі засобів мультимедіа. Впровадження мультимедійних технологій у освітні та навчальні процеси дозволило розширити можливості процесів викладення інформації, контролю викладання завдань тощо. Окрім цього, виділилися у окремі галузі, такі, як когнітивне навчання, мультимедійне навчання і т.ін.

У свою чергу, прикладами утілення мультимедіа у технологічну сферу є його застосування як базису для побудови програмних стимуляторів формату навчання та розваг. Це, приклад, може бути стимулятор керування технічними засобами, стимулятор виробничого навчання. Окрім цього,

мультимедіа може застосовуватися як елемент користувацьких інтерфейсів програмного забезпечення. Усю існуючу масу мультимедійних продуктів може бути застосовано для того, щоб суттєвим чином сприяти спрощенню сприйняття та засвоєння користувачами тієї чи іншої інформації. Так, на той випадок, що інформація, яка надається деякій аудиторії користувачів, початково існує у вигляді тексту, її можливість сприйняття може бути значно розширено додаванням відео супроводу чи аудіоряду.

### 1.3 Класифікація мультимедіа

У будь-якому випадку, незалежно від галузі застосування, мультимедіа існує у двох ключових форматах, а саме:

- лінійні (попередньо створені);
- нелінійні (інтерактивного формату).

Характерним прикладом лінійного формату реалізації мультимедійного контенту є відеоінформація. Її лінійний формат зумовлює те, що подання контенту здійснюється за єдиним сценарієм, який не може бути змінено користувачем, що його переглядає. На відміну від мультимедіа-контенту лінійного формату, інтерактивний формат мультимедіа дає змогу кінцевому користувачеві впливати на інформацію, яка йому демонструється, та певним чином визначати при цьому її зміст. Це забезпечується шляхом взаємодії користувача з засобами відображення мультимедійного контенту, що, власне і визначає інтерактивність даного процесу.

Одним з найбільш характерних прикладів інтерактивного мультимедійного контенту є комп'ютерні ігри. Ще одна неофіційна назва мультимедіа нелінійного формату – гіпермедіа [7]. Переважна більшість сьогоденних комп'ютерних ігор є саме мультимедійними, тобто, такими, де для гравця передбачається здійснення взаємодії з віртуальним простором, створеним мультимедійними засобами та реалізованим у форматі, підтримуваному комп'ютером. При цьому, така взаємодія забезпечується сукупністю різноманітних засобів передачі стану середовища, зокрема, з використанням:

- аудіо;
- відеоряду (завантаження двомірних сплайнів, або результатів рендерингу тривимірного середовища);

- тактильного каналу взаємодії (на випадок реалізації VR-каналу) [8].

При цьому, значний відсоток ігор забезпечує можливість побудови ігрового процесу таким чином, коли:

- ініціалізація серверу гри здійснюється локально;
- сервер гри створюється на віддаленому ресурсі.

Другий варіант реалізації ігрового серверу передбачає можливість одночасної участі теоретично будь-якої кількості гравців. Існуючі обмеження тут стосуються:

- обчислювальних можливостей апаратної платформи, на базі якої функціонує ігровий сервер;
- пропускної здатності каналу між гравцями та сервером гри.

Слід зазначити, що одні і ті ж самі засоби мультимедіа, залежно від умов відображення можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Розглянемо приклад демонстрації презентації.

На той випадок, коли на базі презентаційного матеріалу попередньо було створено відео контент, що демонструється певній аудиторії, маємо справу з лінійним форматом мультимедіа. Це зумовлено тим, що глядачі жодним чином не можуть здійснювати вплив на зміст інформації, яку можуть переглядати.

Разом з тим, якщо форматом подання презентації передбачено хоча б одну з зазначених далі можливостей, у цьому разі вона є інтерактивною:

- «жива» присутність доповідача з очною чи віддаленою участю, якому глядачі можуть задавати питання;
- доступні елементи управління у рамках презентаційного матеріалу, що дає змогу переглядати тематичні гіперпосилання, повністю чи частково впливати на швидкість та спосіб подання матеріалу тощо.

Стандартизована класифікація мультимедіа ілюструється рис.1.2

З точки зору природи даних, які я базою для побудови мультимедійного продукту, на сьогодні найбільш широко представлені:

- комбіновані видання;
- відео видання.

Разом з тим, програмний продукт у чистому вигляді як мультимедійний об'єкт зараз застосовується досить рідко, при цьому, переважна більшість таких об'єктів – це продукти, побудовані на базі Flash. Оскільки підтримку

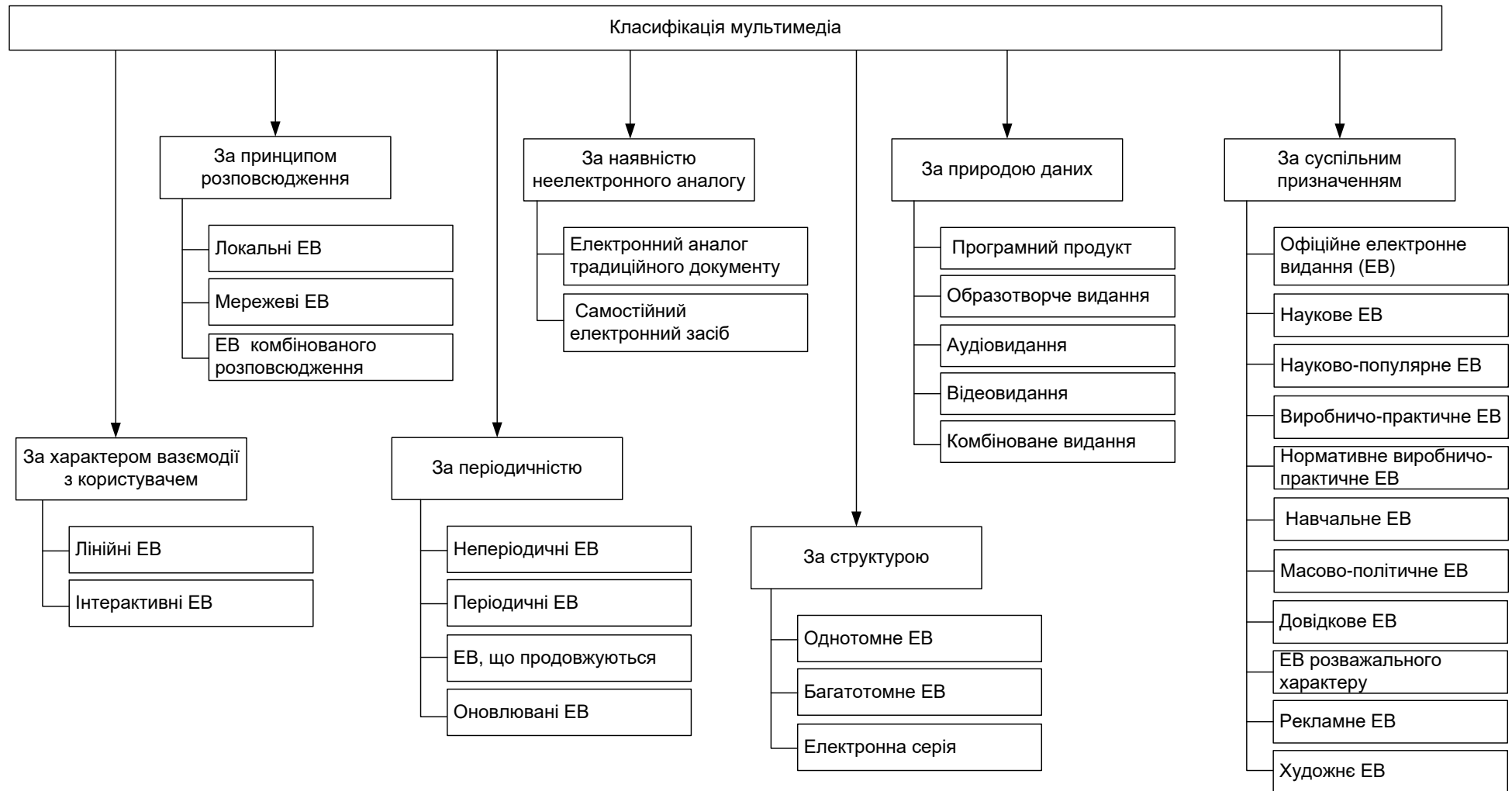


Рисунок 1.2 – Розповсюджена класифікація мультимедійного контенту

даної технології на сьогодні правовласником припинено, це створює вагомі перешкоди для подальшого розвитку даної галузі.

У той же час, комбіноване мультимедійне видання частіше за все базується на тому чи іншому програмному засобі – це може бути як унікальна розробка, спрямована на підтримку якогось конкретного проекту, так і універсальна платформа, призначена для широкого застосування. Типовим прикладом такої платформи може слугувати Power Point.

У свою чергу, відеовидання на сьогодні існують як мультимедійні продукти, що початково створювалися у форматі відео презентації, або були створені, наприклад, на базі презентації лінійного формату.

Переважає більшість мультимедійних продуктів, або електронних видань (ЕВ) на сьогодні розповсюджується мережевим середовищем та можуть бути доступними або широкому загалу користувачів, або його певній категорії (зареєстровані користувачі, слухачі курсів тощо).

Виняток становлять мультимедійні продукти, що містять відомості, які можуть являти собою об'єкт комерційної чи державної таємниці, або дані для службового користування.

Такі продукти є локальними і можуть розповсюджуватися або виключно внутрішніми мережами (intranet) відповідних відомств, або захищеними каналами мереж.

#### 1.4 Особливості розвитку мультимедіа сьогодні

Як вже зазначалося вище, однією з ключових рис розвитку мультимедіа зараз є постійне зростання відсотку відео контенту [4].

Окрім цього, зараз процесу розвитку мультимедіа є притаманним наступне:

- орієнтованість на мережевий формат розповсюдження мультимедійних продуктів (електронних видань);
- збільшення вимог до якості відеоряду, як одного з елементів мультимедіа, або самостійного мультимедійного об'єкту.

Так, розвитку мережевого формату розповсюдження мультимедіа сприяє те, що різноманітні форми представлення мультимедійних даних роблять можливою взаємодію користувачів з інформацією в інтерактивному режимі. За даних умов мережеві мультимедіа, що є доступними в онлайн-

режимі, поступово стають об'єктно-орієнтованою. Це, у свою чергу, дає змогу користувачам створювати та/або редагувати інформацію навіть за умови, що спеціалізовані знання та навички у нього відсутні.

Так, процес розміщення відео контенту у межах відеохостингу не потребує від користувача умінь щодо обробки та кодування відео, знань відносно архітектури та принципів функціонування веб-серверів. За даних умов суттєво спрощується процес розповсюдження як відеоінформації, так і мультимедіа будь-яких інших типів.

З іншого боку, на сьогодні одними з найбільших перешкод поширенню мультимедійних продуктів у мережевому форматі є наступне [4]:

- відеоконтент, як самостійний мультимедійний продукт, або елемент комбінованого EB, займає, за різними оцінками, від 65 (якщо брати до уваги комбіновані EB) до 82% усього обсягу даних що надсилаються мережею;

- темпи росту пропускної спроможності мереж відстають щодо темпів збільшення мережевого трафіку;

- за недостатньої бітової швидкості відеотрафіку погіршується якість самостійного відеоконтенту, та функціональність комбінованих мультимедіа;

- вимоги щодо якості відновленого відео з боку користувачів постійно жорсткішають. Це стосується частоти слідування кадрів відео потоку та його просторової роздільної здатності.

Фактично зараз у більшості випадків якість та повнофункціональність мережевих мультимедіа, ключовими елементами або складовими яких є відео контент, у перелічених вище умовах не гарантується.

Для дослідження шляхів подолання даної проблематики необхідно:

- у першу чергу, детально дослідити чинники, в умовах впливу яких має місце зниження якості передавання відео контенту, як домінуючої складової мультимедіа, що, у свою чергу, значною мірою визначає якість мультимедійного продукту у цілому;

- визначити, які саме підходи застосовуються зараз для вирішення означеної проблематики, та які недоліки даним підходам властиві;

- виявити умови, у яких недоліки стандартизованих підходів може бути усунуто;

- дослідити, яким саме чином може бути нівельовано вплив дестабілізуючих чинників, що знижують якість відновленого відеоконтенту;
- розглянути підходи до забезпечення ефективного надсилання відео контенту від мережевих мультимедійних ресурсів до кінцевих користувачів.

## 2 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС ДОСТАВКИ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ

2.1 Загальна класифікація факторів, що тим чи іншим чином здійснюють вплив на якість відеоконтенту

У загальному випадку, на сьогодні може бути виділено такі фактори, що формують умови передавання інформації, яку генерують дистанційні відеоінформаційні ресурси, як (рис.2.1) [9]:

- недостатня та обмежена продуктивність існуючих технологій доступу;
- відсутність балансу між діючими рівнями пропускної спроможності мережі та бітовою швидкістю відеопотоку;
- зростання структурної складності мережевого трафіку.



Рисунок 2.1 - Фактори, що впливають на процес доставки відеоінформації та їхні наслідки

Як показує аналіз рис.2.1, вплив навіть одного з означених факторів здатен біти критичним по відношенню до можливості забезпечення якості відеоінформації на прийомному боці.

Разом з тим, дані фактори здійснюють вплив на процеси трансляції відеоданих одночасно.

Відтак, необхідно дослідити умови, за яких можливе їх існування, та яким саме чином вплив зазначених факторів може бути скорочено. Для цього далі розглянемо окремо кожен з перелічених факторів.

2.1.1. Неможливість гарантування доставки трафіку відеоінформаційних ресурсів у реальному часі з використанням існуючих технологій доступу

Існуюча архітектура інформаційно-комунікаційних мереж умовно може бути розглянутою у вигляді трирівневої структури (рис.2.2), яка містить у собі [10]:

- рівень мережевих ресурсів;
- рівень магістральних мереж;
- рівень мереж доступу.

Кожен з умовних рівнів інформаційно-комунікаційної мережі має певний перелік особливостей, які визначають специфіку процесу передавання пакетів даних як у їх локальних межах, так і у межах усієї структури у цілому.

На рисунку 2.2  $R(1) - R(W+N)$  – маршрутизатори магістральної мережі. Для рівня магістральних мереж характерним є високі значення  $\xi(t)$  пропускної здатності, що нерідко сягають десятків Гб/с.

У свою чергу, переважна більшість мережевих ресурсів ( $NR(1) - NR(N)$ ) сьогодні з'єднуються з мережею також високошвидкісними каналами.

Разом з тим, пропускна спроможність  $\xi(t)$  багатьох поширених сьогодні мереж доступу, які використовуються для з'єднання з магістраллю мережі і далі – мережевими ресурсами кінцевих вузлів ( $KB(1) - KB(M+N)$  на рис.2.2) може бути на 1-2 порядки нижчою, порівняно з випадком мереж доступу та каналів підключення мережевих ресурсів.

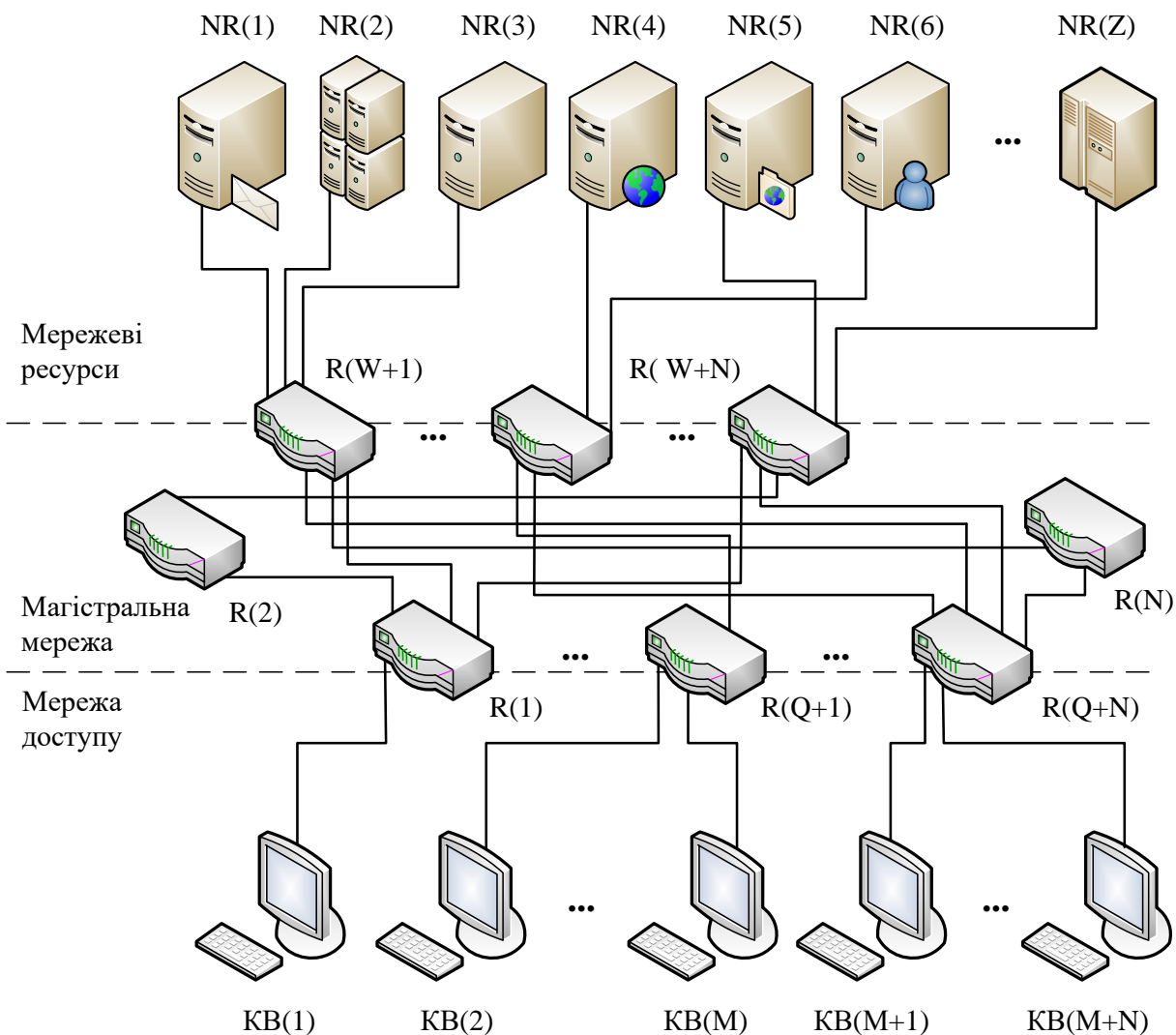


Рисунок 2.2 - Умовна узагальнена архітектура сучасних інформаційно-комунікаційних мереж

У якості таких кінцевих вузлів можуть бути клієнтські ПК, мобільні термінали, пристрої фото/відео фіксації, автономні технологічні системи та комплекси, пристрої IoT/ІоЕ тощо.

При цьому, підсумкова пропускна здатність  $\xi(t)$  мережі між двома пристроями А та В, що складається з  $\eta$  мережевих ділянок, визначається за найменшим рівнем пропускної здатності однієї з ділянок, що входить до

маршруту проходження пакетів  $A \rightarrow B$ , тобто:

$$\xi(t) = \min(\xi(t)_1; \xi(t)_2; \dots \xi(t)_n; \dots \xi(t)_\eta), \quad (2.1)$$

де  $\xi(t)_n$  - пропускна здатність  $n$ -ї мережевої ділянки.

На базі аналізу виразу (2.2) виходить, що підсумкова пропускна здатність у напрямку між кінцевими пристроями та мережевими ресурсами рівнятиметься величині пропускної здатності мережі доступу.

У зв'язку з цим, порівнюємо номінали  $\xi(t)_n$  пропускних спроможностей ряду поширених сьогодні мереж доступу, та величини бітових швидкостей відеоінформаційних потоків.

На базі цього далі може бути зроблено висновок відносно можливостей мереж доступу гарантувати надходження відеотрафіку від джерела до отримувача з забезпеченням певних кондицій якості.

На рис.2.3 найвищий рівень бітової швидкості  $\Phi(t)$  відповідає трафіку даних, що відносяться до критичного та інтерактивного типів.

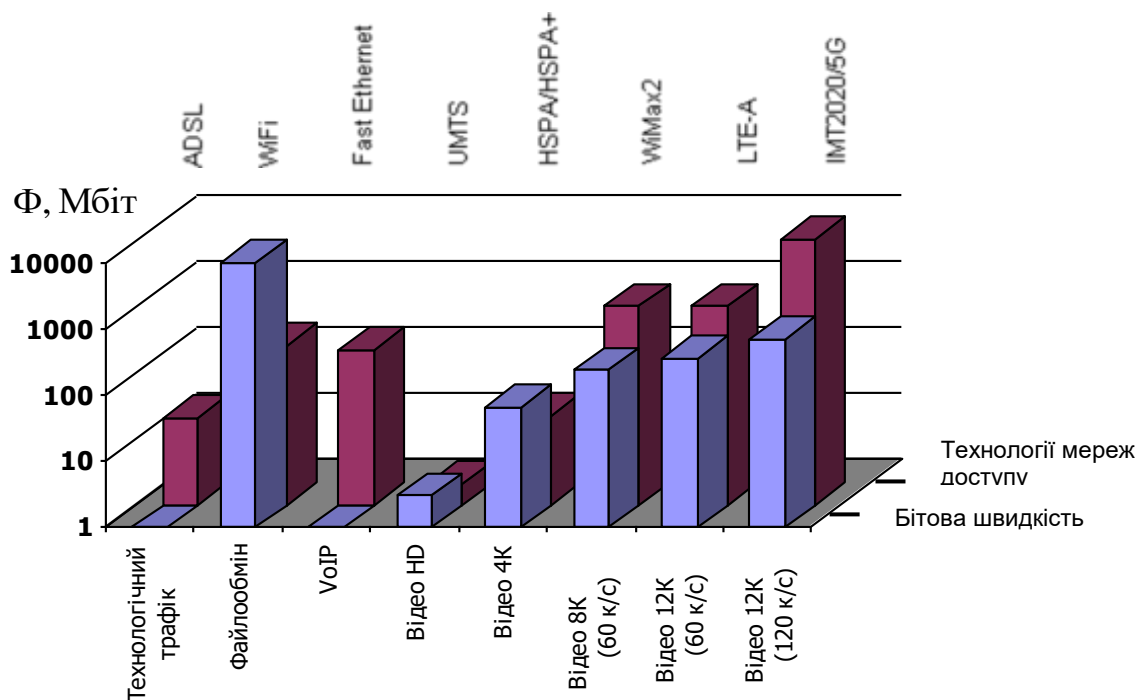


Рисунок 2.3 - Порівняння величин номіналів бітової швидкості трафіку відеоінформації та трафіку інших типів з номіналами величин пропускної спроможності поширених технологій доступу

При цьому, рівні бітової швидкості відеопотоків надвисокої роздільної здатності зі збільшеним показником fps частоти слідування кадрів, судячи з зазначеної діаграми, суттєво поступаються трафіку даних.

Насправді ж для трафіку даних критичного та інтерактивного типів у загальному випадку резервується та частина  $\xi''(t)$  пропускної здатності  $\xi(t)$  мережі, яку попередньо не зарезервовано для сервісів або додатків, що характеризуються вищим, або однаковим рівнем пріоритетності, як і додаток, що виконує резервування у поточний час.

Це еквівалентно виразу:

$$\xi''(t) = \xi(t) - \Delta\xi - \sum_{i=1}^{\Omega} \xi(t)^{(i)}, \quad (2.2)$$

де  $\xi'$  - номінальний рівень пропускної здатності, який залежить від технології передавання даних, на якій побудовано мережу;

$\Delta\xi$  - величина, на яку пропускна здатність завжди буде меншою у наслідок існуючих недосконалостей середовища передавання, кінцевих та мережевих пристроїв навіть при нульовому навантаженні;

$\xi(t)^{(i)}$  - величина пропускної здатності мережі, зарезервовано для і-го додатку чи сервісу.

З виразу (2.2) можна бачити, що величина  $\xi''(t)$  може варіюватися у діапазоні від  $\xi(t)$  до, фактично, 0.

На відміну від трафіку даних, трафік відео може також варіюватися у зазначеному діапазоні.

Проте, ефективне передавання відеоінформації вимагає наявності певних величин  $\xi''(t)$ , які є не нижчими, ніж рекомендовані (табл.2.1).

Це зумовлено існуванням жорстких вимог щодо якості передавання відеотрафіку, які специфіковані системою QoS, зокрема [11]:

- передавання інтерактивного відео необхідно здійснювати таким чином, щоб при цьому забезпечувалася затримка  $t_{\text{delay}}$  надходження пакетів на рівні, що не перевищує 150 мсек; водночас, допустимою є втрата пакетів на рівні  $K_{\text{loss}}$ , не більшому, ніж 1%. При цьому, показник джиттера повинен бути меншим 30 мсек;

- для передавання відео потокового типу допустимим є  $K_{\text{loss}} = 2,5\%$ ,  $t_{\text{delay}} = 4-5$  сек. Рівень джиттера у цьому випадку не регламентується.

Таблиця 2.1 – Рекомендовані рівні бітової швидкості відео для випадку різних роздільних здатностей

Роздільна здатність кадру	Рівень $\Phi$
UHD (8K)	до 362 Мбіт/с
UHD (4K)	до 67,9 Мбіт/с
FullHD (2K)	до 5,5 Мбіт/с
HD-ready	до 2,5 Мбіт/с
SD	від 0,6 до 0,8 Мбіт/с

Аналіз рис.2.2 та табл. 2.1 свідчить про те, що сьогодні навіть для передавання потоку з роздільною здатністю 4K продуктивності більшості мереж доступу є недостатньо.

Більш того – у межах сегментів мереж доступу, де одночасно є активними кілька джерел відеоінформації, не може гарантуватися забезпечення вимог QoS.

Зазначимо також, що таблиця 2.1 містить відомості щодо відео, яке попередньо було кодоване, у наслідок чого його бітову швидкість було скорочено у  $\gamma$  разів.

Тут величина  $\gamma$  є коефіцієнтом стиснення, що у загальному випадку визначається як [12]:

$$\gamma = \frac{\Phi_{\text{source}}}{\Phi_{\text{final}}}, \quad (2.3)$$

де  $\Phi_{\text{source}}$  - вихідний об'єм відеоінформації;

$\Phi_{\text{final}}$  - обсяг відеоінформації у наслідок застосування методів стиснення.

Вираз (2.3) є справедливим також для випадку бітової швидкості  $\Phi(t)$ .

Необхідність застосування зумовлена стиснення відео зумовлена тим, що потоку, який попередньо не було кодовано, відповідають надмірно високі значення бітової швидкості.

Так, відео 1920x1080 у режимі  $\text{fps} = 30$  потребує пропускної здатності порядку 690-700 Мбіт/с.

Бітова швидкість такого потоку, кодованого на базі H.264/AVC, не перевищує 5,5 Мбіт/с, як видно з табл. 2.1.

Таким чином, необхідною умовою для ефективного передавання відеоінформаційних потоків мережею є виконання наступної загальної нерівності:

$$\Phi(t) \leq \xi(t). \quad (2.4)$$

Слід додати, що під величиною  $\Phi(t)$  мається на увазі деяке максимальне значення бітової швидкості потоку, так як у загальному випадку ця величина є змінною у часі.

На базі вищезазначеного можемо стверджувати, що:

- можливості більшості технологій доступу не дозволяють забезпечити ефективне передавання відеоінформації мережею з дотриманням вимог QoS щодо якості відеоданих;

- у загальному випадку під час трансляції трафіку даних критичного та інтерактивного типів може резервуватися величина пропускної здатності, що, з одного боку, може перевищувати рекомендоване значення бітової швидкості для трансляції відео надвисокої роздільної здатності, а з іншого – є обмеженою поточним доступним обсягом  $\xi''(t)$ , який нерідко може наближатися до 0.

При цьому, на відміну від трафіку даних, відео потребує гарантованої полоси пропускання, що є не нижчою, ніж деякий рекомендований рівень;

- необхідною умовою трансляції відеоінформаційного потоку відповідно до вимог QoS є підтримка бітової швидкості на рівні, що не перевищує рівень пропускної здатності мережі.

### 2.1.2 Дисбаланс діючих рівнів пропускної спроможності та бітової швидкості відеопотоку

Мережеві сервіси та додатки, які передбачають можливість надсилання у мережу та прийом з мережі відеоданих у якості як ключового, так і супутнього типу трафіку, у плані продуктивності обмежуються доступною величиною поточного рівня  $\xi(t)$  пропускної спроможності мережі [13, 14].

При цьому, застосування методів компресії відеоінформації певним чином вирішує проблему необхідності виділення значних рівнів  $\xi(t)$ , приводячи бітову швидкість  $\Phi$  потоку відеокадрів до величини, що дозволяє виконувати передачу відео, як було зазначено виразом (2.4).

Разом з тим, для пропускної здатності справедливою є наступна нерівність:

$$\begin{cases} \xi(t) \neq \text{const}; \\ \xi(t) = \xi' - \Delta\xi; 0, \end{cases} \quad (2.5)$$

Інакше кажучи, за практично ідеальних умов, найвищий рівень  $\xi(t)_{\max}$  пропускної здатності мережі не перевищує значення  $(\xi' - \Delta\xi)$ , тоді як можливим є падіння величини  $\xi(t)$  до нульової відмітки, коли трансляція даних взагалі є неможливою.

Отже, значення  $\xi(t)$  є змінним у часі, при цьому на формування даної величини впливає сукупність чинників, серед яких головними є:

- впливи сторонніх завад  $\beta_n$ ;
- особливості структури  $\beta_{sf}$  трафіку, що передається;
- особливості  $\beta_{topf}$  топології мережі;
- загальний рівень  $\beta_{ol}$  завантаженості мережі;
- кількість  $k$  джерел, що одночасно надсилають дані;
- часові фактори  $\beta_{tf}$ , тобто, залежність від часу доби та дня тижня.

У наслідок цього, пропускну здатність можна розглядати, як наступну функціональну залежність:

$$\xi(t) = f(\xi'; \beta_n; \beta_{sf}; \beta_{topf}; \beta_{ol}; \beta_{tf}; k). \quad (2.6)$$

Тобто, навіть за умови, що дані транслюються між вузлами локальної мережі у межах одного сегмента, рівень  $\xi(t)$  у часі може зазнавати суттєвих змін.

З іншого боку, принцип формування потоку відеокадрів зумовлює також зміну рівня  $\Phi$  у часі.

У свою чергу, це спричинено:

- домінантним застосуванням VBR-режиму кодоутворення у ході стиснення потоку відеокадрів на рівні представлення;
- суттєвими відмінностями вмісту кадрів у потоці, що є характерним навіть на рівні однієї групи (GOP);
- принципом кодування відеозмісту з використанням MPEG-орієнтованих підходів.

Так, для MPEG є характерною концепція I-B-P кадрів, згідно з якою група кадрів утворюється одним I-кадром та деякою множиною кадрів інших зазначених класів [15].

Тобто, величина бітової швидкості  $\Phi_{\text{GOP}}$  групи формується наступним чином:

$$\Phi_{\text{GOP}} = \Phi_I + \sum_{i=1}^{v_P} \Phi_P^{(i)} + \sum_{j=1}^{v_B} \Phi_B^{(j)}, \quad (2.7)$$

де  $\Phi_I$ ,  $\Phi_P^{(i)}$  та  $\Phi_B^{(j)}$  - бітові швидкості кадрів I, P та B типів відповідно;

$v_P$  та  $v_B$  - кількість P-кадрів та B-кадрів у групі відповідно.

Водночас, кожен тип кадрів здійснює нерівномірний внесок у результуючий рівень  $\Phi_{\text{GOP}}$  бітової швидкості групи. При цьому, справедливим є наступне:

- величина  $\sum_{i=1}^{v_P} \Phi_P^{(i)}$  може сягати до  $0,6\Phi_{\text{GOP}}$ ;
- $\Phi_I > \Phi_P^{(i)} > \Phi_B^{(j)}$ .

Тобто, опорному I-кадру відповідає найвищий рівень бітової швидкості, тоді як кадрам B-типу – найменший.

Разом з тим, сумарне значення бітової швидкості кадрів Р-типу може наближатися до 60% від величини  $\Phi_{\text{GOP}}$ , а  $\Phi_{\text{B}}^{(j)}$  може взагалі наближатися до 0.

Водночас, на рівні окремого кадру у потоці, бітова швидкість  $\Phi^{(i)}$  визначається функціоналом  $f_{\text{br}}$ , а саме:

$$\Phi^{(i)} = f_{\text{br}}(\chi_{\text{tp}}; \{\chi_{\text{f}}\}; \{\chi_{\text{cf}}\}; \{\chi_{\text{op}}\}), \quad (2.8)$$

де  $f_{\text{br}}$  - функціонал, який описує зв'язок бітової швидкості окремого кадру та чинниками, що можуть зумовлювати її рівень;

$\chi_{\text{tp}}$  - параметр, що визначає належність кадру до типів I, P, чи B;

$\{\chi_{\text{f}}\}$  - сукупність особливостей кадру за семантичними, психо-візуальними та синтаксичними ознаками;

$\{\chi_{\text{cf}}\}$  - сукупність технологічних рішень, реалізованих у кодеку;

$\{\chi_{\text{op}}\}$  - сукупність параметрів процесу кодування, які може бути налаштовано.

Отже, як бачимо з виразів (2.7) та (2.8), підсумкові величини  $\Phi$  та  $\xi(t)$  формуються у наслідок впливу груп сторонніх факторів, які є повністю незалежними одна від одної.

При цьому, навіть тоді, коли на момент часу  $t$  виконується умова (2.4), взаємна нестабільність у часі значень  $\Phi$  та  $\xi(t)$  створює умови, за яких неможливо гарантувати ефективну передачу відеоінформації для  $(t+1)$ ,  $(t+2)$  та інших моментів часу навіть тоді, коли  $\Phi(t) > \Phi(t+1) > \dots > \Phi(t+n)$ . Тобто, необхідна умова ефективного передавання трафіку відео одночасно з тим не є достатньою.

Дану закономірність може бути розглянутою, як формальний опис дисбалансу  $\Phi$  та  $\xi(t)$ , та подано у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \Phi(t) > \Phi(t+1) > \dots > \Phi(t+n); \\ \xi(t) < \xi(t+1) < \dots < \xi(t+n), \end{cases} \quad (2.9)$$

тобто, ефективна передача відеоінформації залежать від можливості усунення дисбалансу між бітовою швидкістю  $\Phi(t)$  відео, та поточною величиною пропускної здатності  $\xi(t)$  мережі.

Відтак, з виразу (2.9) можна зробити висновок, що застосування виключно методів стиснення не забезпечує можливості доставки відеотрафіку.

Тому додатково необхідно застосовувати механізми, орієнтовані на скорочення дисбалансу величин  $\Phi(t)$  та  $\xi(t)$ .

## 2.2 Умови, за яких забезпечується ефективне передавання відеоінформації

Будь-який відеопотік довільного змісту та походження характеризується величиною  $\Phi(t)$  бітової швидкості та рівнем якості  $\Theta$  даних, реконструйованих на боці приймача.

При цьому, дані величини є взаємно залежними, та можуть розглядатися спільно наступним чином [12]:

$$\Theta \sim \Phi(t) \sim \frac{1}{D}, \quad (2.10)$$

де  $D$  - рівень помилки, який було внесено у ході кодування та трансляції.

У свою чергу, рівень якості може розглядатися як функціонал від ряду складників, а саме:

$$\Theta = \varphi(\Phi(t); \xi(t); \{E_{en}\}; \{F_{en}\}) \quad (2.11)$$

де  $\{E_{en}\}$  - множина механізмів, які може бути використано для скорочення дисбалансу рівня  $\Phi(t)$  бітової швидкості та поточної величини  $\xi(t)$ ;

$\{F_{en}\}$  - сукупність опцій, які може бути задіяно у ході процесу скорочення дисбалансу бітової швидкості та пропускної спроможності мережі.

Разом з тим, рівень якості  $\Theta$  реконструйованої відеоінформації є показником, пов'язаним напряду з величинами  $t_{\text{delay}}$ ,  $K_{\text{loss}}$  та  $K_g$ .

При цьому, дані показники характеризують, у першу чергу, процес передавання за наявних величин  $\Phi(t)$ ,  $\xi(t)$  за участю (або за відсутністю) множин  $\{E_{\text{en}}\}$  та  $\{F_{\text{en}}\}$ .

У свою чергу, для оцінки якості реконструйованої відеоінформації застосовуються метрики, що описують ступінь її відмінності від вихідних відеоданих.

Такі показники якості дозволяють у цілому оцінити також ефективність застосованих механізмів кодування та алгоритмів усунення дисбалансу між  $\Phi(t)$  та  $\xi(t)$ , тому з позиції визначення умов ефективного передавання є першочерговими, та розцінюються як похідна від  $t_{\text{delay}}$ ,  $K_{\text{loss}}$  та  $K_g$ .

Разом з тим, судячи з виразів (2.9) та (2.10), у будь-якому випадку збільшення бітової швидкості  $\Phi(t)$  відео потоку створює умови для росту рівня  $\Theta$  якості.

Водночас, величина  $\Phi(t)$  обмежена значенням  $\xi(t)$ .

Відтак, умови ефективного передавання відеоінформації, першочергово описані виразом (2.4), може бути доповнено до наступного вигляду:

$$\begin{cases} \Phi(t) \leq \xi(t); \\ Q \leq Q_{sc}, \end{cases} \quad (2.12)$$

де  $Q_{sc}$  - рівень якості, встановлений за умовами надання сервісу.

Найбільш широко застосовуваною сьогодні стандартизованою метрикою є ПВСШ (PSNR – Pulse Signal to Noise Rate) – пікове відношення сигнал/шум [12, 13, 15-19], що обчислюється на базі наступного виразу:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{\max(\theta)^2 HW}{\sum_{x,y} (\theta(x,y) - \theta'(x,y))} , \quad (2.13)$$

де  $\theta(x,y)$  та  $\theta'(x,y)$  - вихідний та реконструйований пікселі зображення відповідно;

$H$  та  $W$  – висота та ширина зображення у пікселях;  
 $\max(\theta)$  - найбільше значення, яке може приймати піксель. За замовчуванням джерело відеоданих функціонує у режимі 24 біта/піксель. При цьому, оскільки оцінювання відновленого кадру за метрикою PSNR (ПВСШ) виконується лише у яскравісному каналі, що займає 8 біт, відповідно, для опису величини  $\max(\theta)$  застосовується така ж кількість розрядів, тобто,  $\max(\theta) = 2^8 = 255$ .

На практиці нерідко для оцінки якості реконструйованого зображення застосовується величина СКВ (середньоквадратичне відхилення), або MSE (middle square error). Даний показник є оберненим ПВСШ, та обчислюється як [12, 13, 15-19]:

$$\text{MSE} = \frac{1}{HW} \sqrt{\sum_{x=1, y=1}^{H, W} (\theta(x, y) - \theta'(x, y))^2}. \quad (2.14)$$

### 2.3 Зростання структурної складності мережевого трафіку

Сучасні інфокомунікаційні системи характеризуються:

- високим рівнем інтегрованості сервісів;
- застосуванням технологій криптозахисту та стеганографічного маскування інформації;
- використанням систем кіберзахисту на рівні мережевих вузлів;
- постійним впровадженням та подальшим широким застосуванням технологій інтелектуального аналізу даних.

У свою чергу, усе зазначене зумовлює значне ускладнення структури мережевого трафіку як у цілому, так і на рівні окремих інформаційних потоків.

Таким чином, у складі будь-якого довільного відрізка мережевого трафіку за деякий елементарний часовий інтервал  $(t, t+1)$  можуть бути присутні (рис.2.4):

- сегменти маскованої інформації;
- сегменти шифрованих даних;

- маркери, що містять метаопис тих чи інших структурних частин потоку;
- пакети даних, що суттєво різняться між собою за рівнем пріоритетності.

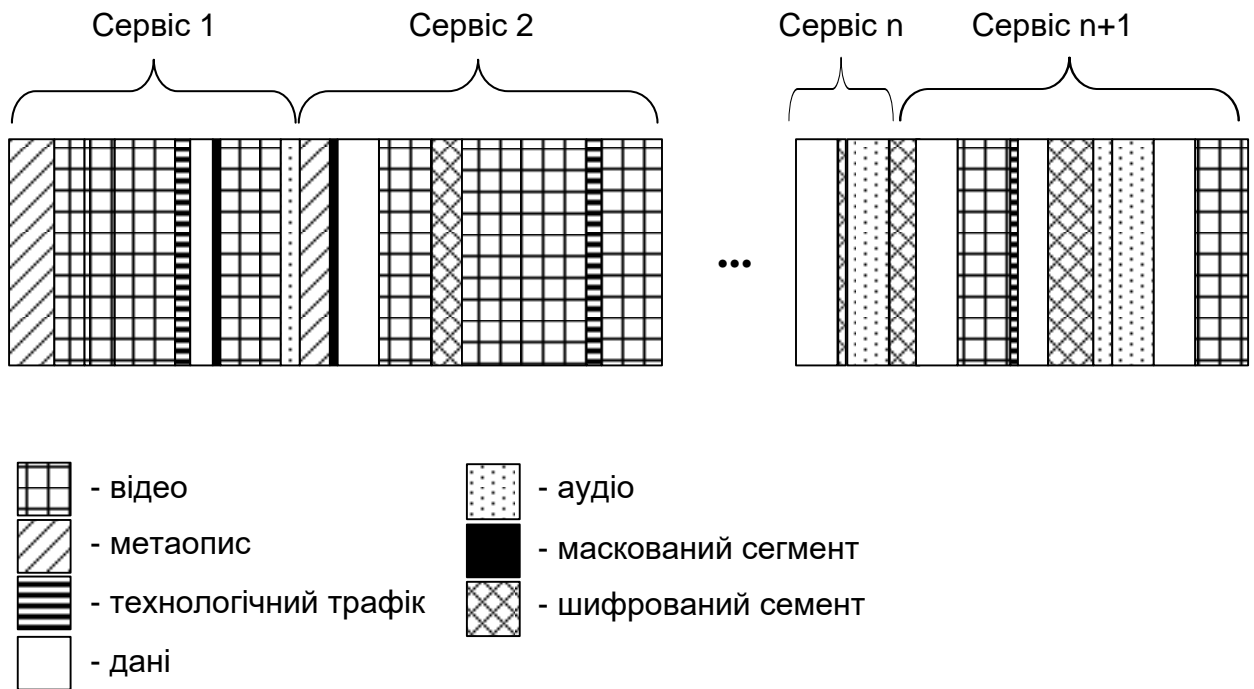


Рисунок 2.4 – Структура довільного відрізка мережевого трафіку

Відповідно, така структура інформаційного потоку є причиною зростання часу обробки на мережевих вузлах, як наслідок того, що:

- виконується аналіз пакетів для виявлення та блокування зловмисного змісту системами кіберзахисту;
- формуються смарт-черги пакетів у відповідності до рівня їх пріоритету, за якими далі виконується їх обробка.

Виходячи з того, що для відеоінформації справедливим є наступне:

- відеотрафік становить понад 8/10 усього обсягу трафіку мережі;
- відео є критичним до втрат пакетів та їх затримок,

вплив росту структурної складності мережевого трафіку може бути суттєво скорочено шляхом застосування технологій стиснення та балансування бітової швидкості відносно рівня пропускної здатності мережі.

## 2.4 Висновки за розділом

Виявлено фактори, що впливають на процес передавання відеоінформації мережею, серед яких головними є:

- збільшення рівня структурної складності мережевого трафіку у цілому;
- неможливість гарантування доставки трафіку відеоінформаційних ресурсів у реальному часі з використанням існуючих технологій доступу;
- дисбаланс діючих рівнів пропускної спроможності та бітової швидкості відео потоку.

Показано, що в умовах росту структурної складності мережевого трафіку збільшення продуктивності інфокомунікаційної мережі для підвищення ефективності як відеоінформації, так і трафіку будь-яких інших типів, доцільним є застосування технологій кодування відеоінформації як типу даних, що займає найбільший відсоток серед інших типів.

Разом з тим, виключно зменшуючи кількість пакетів відеоінформації, що надсилаються до мережі, не може бути створено достатні умови для забезпечення ефективної трансляції відеоінформаційних потоків.

У зв'язку з цим, більш доцільним є підхід, що базується на усуненні дисбалансу між рівнями бітової швидкості та величиною пропускної здатності мережі.

Це зумовлено, у по-перше, тим, що існуючі методи кодування відеоінформації не ураховують динамічного характеру змін бітової швидкості, а по-друге – тим, що закономірності змін величин як пропускної спроможності мережі, так і рівня бітової швидкості, формуються у наслідок впливу чинників, не пов'язаних між собою.

### 3 РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИМУ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ КОДОВАНОГО ВІДЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ПОТОКУ ВІДНОСНО ДИНАМІКИ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МЕРЕЖІ

#### 3.1 Підхід до вибору механізмів для реалізації алгоритму балансування

##### 3.1.1 Сутність процесу балансування бітової швидкості відеопотоку

Процес балансування бітової швидкості  $\Phi(t)$  відео відносно динаміки змін пропускної спроможності  $\xi(t)$  у загальному випадку можна розглядати як сукупність дій, спрямованих на забезпечення умов ефективної передачі, як зазначає вираз (2.12).

При цьому, первинною цільовою функцією є бітова швидкість  $\Phi(t)$  стиснених відеоданих, а другорядною – рівень похибки  $D$ , або показник якості  $\Theta$  відновленої інформації. Тобто, за цих умов першочергово необхідно забезпечити справедливість наступного співвідношення:

$$\Phi(t) \rightarrow \xi(t). \quad (3.1)$$

Отже, мова йде про зміну рівня  $\xi(t)$  відповідно до поточної величини  $\xi(t)$ . Разом з тим, як вже згадувалося, кодер за рівномірні проміжки часу генерує деякі обсяги даних, при цьому  $\Phi(t-1) \neq \Phi(t) \neq \dots \Phi(t+n)$ . Водночас, як показано виразами (2.6) та (2.8), значення  $\xi(t)$  та  $\Phi(t)$  формуються сукупностями незалежних факторів. За таких умов доцільно виконувати балансування величини бітової швидкості відносно пропускної здатності мережі за такі кроки, як [20]:

- відстежування рівня  $\xi(t)$ ;
- вплив на збільшення/зменшення поточного значення  $\Phi(t)$  залежно від наявної величини  $\xi(t)$ ;
- перевірка відповідності величини  $\Phi(t)$  та  $\xi(t)$  умовам (3.1);
- оцінка рівня  $D$ ;

- корегування величини  $\Phi(t)$  для приведення значення  $D$  до відповідності умовам (2.12).

### 3.1.2 Базові вимоги до механізмів для забезпечення балансування бітової швидкості відео потоку

Як було попередньо зазначено у параграфі 2, відео є типом трафіку, чутливим до рівня втрат  $K_{\text{loss}}$  пакетів, показника джитеру  $K_g$  та рівня затримки  $t_{\text{delay}}$  пакетів. При цьому, найбільш жорсткі вимоги щодо перелічених параметрів відповідають інтерактивним відеоінформаційним потокам. Звідси маємо першу вимогу щодо механізму балансування, а саме – внесення мінімальної затримки  $t_{\text{delay}}^{(\text{add})}$  у ході корегування величин  $\Phi(t)$  та  $D$ , тобто [20]:

$$t_{\text{delay}}^{(\text{add})} \rightarrow \min . \quad (3.2)$$

У підсумку, величина  $t_{\text{delay}}^{(\text{add})}$  має бути такою, щоб забезпечувалося виконання умов наступної рівності:

$$t_{\text{delay}} = t'_{\text{delay}} + t_{\text{delay}}^{(\text{add})} < t_{\text{delay}}^{(\text{QoS})} , \quad (3.3)$$

де  $t'_{\text{delay}}$  - затримка на обробку та передавання пакетів у базовому варіанті (без застосування балансуєчого механізму);

$t_{\text{delay}}^{(\text{QoS})}$  - рівень затримки за вимогами QoS.

Важливість забезпечення виконання даної умови зумовлюється, по-перше, існуючими рекомендаціями QoS, а по-друге, взаємозв'язком показників  $t_{\text{delay}}$  та  $K_{\text{loss}}$ , загальний характер залежності між якими показано рис. 3.1.

Отже, зі зменшенням внесеної затримки  $t_{\text{delay}}^{(\text{add})}$  скорочується ймовірність втрат пакетів та, як наслідок, збільшується загальна якість  $\Theta$  реконструйованих даних.

Разом з тим, рівень  $D^{(add)}$  помилки, внесеної у ході балансування бітової швидкості, не повинен у підсумку критично впливати на величину  $D$  загальної помилки, а саме:

$$D = D^{(add)} + D' < D_{sc}, \quad (3.4)$$

де  $D'$  - помилка, що може вноситися у процесі кодування, без участі алгоритмів балансування.

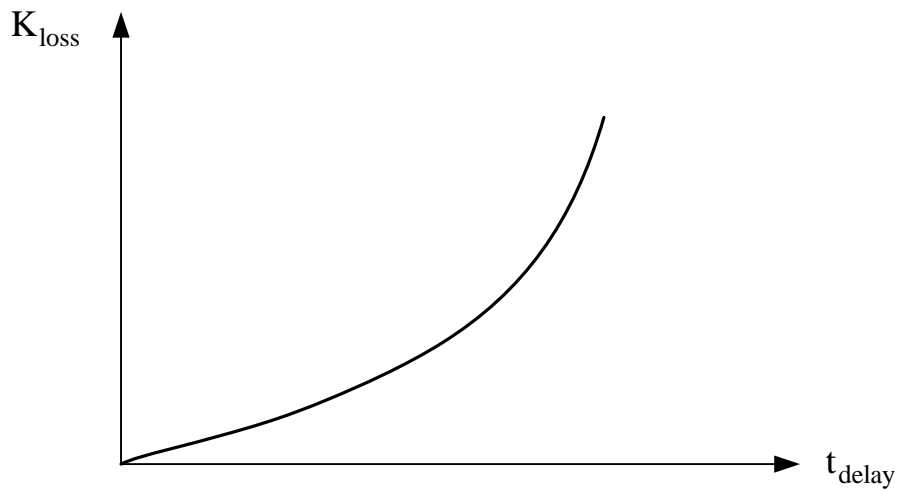


Рисунок 3.1 - Загальний характер залежності між рівнем затримки пакетів та величиною їх втрат у ході трансляції мережею

У подальшому вимоги (3.1)–(3.4) будуть визначальними при виборі тих чи інших механізмів, що здатні сприяти досягненню балансу між  $\Phi(t)$  та  $\xi(t)$ .

Як показує вираз (2.8), на величину бітової швидкості  $\Phi(t)$  потоку кодованих відеокадрів можуть впливати сукупність  $\{\chi_{cf}\}$  технологічних рішень, реалізованих у кодеку, а також - сукупність  $\{\chi_{op}\}$  параметрів процесу кодування, які підлягають налаштуванню. Це дає підставу розглядати величину  $\Phi(t)$  як наступну функціональну залежність:

$$\Phi(t) = f(\xi(t); \{\chi_{cf}\}; \{\chi_{op}\}). \quad (3.5)$$

Таким чином, впливати на поточне значення  $\Phi(t)$ , виходячи з діючого рівня  $\xi(t)$ , можливо шляхом зміни параметрів одного, декількох або усієї сукупності  $\{\chi_{op}\}$  параметрів, що пов'язані з тими чи іншими технологічними рішеннями множини  $\{\chi_{cf}\}$  разом.

У цьому випадку за рахунок зміни тих чи інших параметрів кодування відеопотоку необхідно забезпечити можливість змін рівня  $\Phi(t)$  у широкому діапазоні значень, наближено рівному  $\Phi(t) \approx \overline{0; \Phi(t)_{\max}}$  за мінімальний часовий проміжок. Ця умова гарантує, відсутність ймовірності запізнення темпу змін  $\Phi(t)$  відносно  $\xi(t)$ .

Разом з тим, крок зміни  $\Delta\Phi(t)$  повинен мати можливість гнучкого налаштування, що, у свою чергу, створює умови для мінімізації часу  $t_{\text{delay}}^{(\text{add})}$  та як наслідок – мінімізує внесену помилку  $D^{(\text{add})}$ .

Отже, до переліку базових вимог (3.2)-(3.4) може бути додано ще наступну, як показує наступний вираз:

$$\begin{cases} \Phi(t) \approx \overline{0; \Phi(t)_{\max}} \mid t_{\text{delay}}^{(\text{add})} \rightarrow \min; \\ \Delta\Phi(t) = 0; \Delta\Phi'(t); \\ \Phi'(t) < (\Phi(t)), \end{cases} \quad (3.6)$$

де  $\Phi(t)_{\max}$  - найвищий рівень бітової швидкості, який може генеруватися кодером за звичайних умов;

$\Delta\Phi'(t)$  - гранична величина кроку зміни бітової швидкості відео інформаційного потоку.

При цьому, значення  $\Delta\Phi'(t)$ , з одного боку, має бути досить значним для того, щоб забезпечити можливість зміни величини  $\Phi(t)$  у зазначеному діапазоні за мінімальну кількість кроків.

Разом з тим, величина  $\Delta\Phi'(t)$  повинна мати можливість гнучких змін, щоб створити умови для мінімізації внесеної помилки [9].

### 3.1.3 Аналіз існуючих механізмів, реалізованих у рамках стандартизованих технологій кодування, потенційно здатних для балансування бітової швидкості

Водночас, у рамках найбільш поширених сьогодні технологій відео кодування, таких, як MPEG4, та рекомендації H.26\*, параметрами кодування, які тією чи іншою мірою можливо динамічно змінювати у реальному часі для забезпечення виконання умов (3.1) є [13, 15, 17]:

- зміна довжини групи у потоці кадрів (відноситься до методів обробки у часі);
- маніпуляція кроком квантування;
- керування рівнем округлення квантованих компонент
- зміна моделі колірної субдискретизації.

Застосування одного або декількох стандартних механізмів, з одного боку, має ряд переваг, а саме:

- потенційно не веде до внесення значних рівнів  $t_{\text{delay}}^{(\text{add})}$ ;
- не потребує додаткової обчислювальної потужності для реалізації.

Водночас, динамічна зміна перелічених параметрів кодування, як основа механізму балансування бітової швидкості, має ряд недоліків, зокрема:

- відсутність можливості прогнозування щодо внесеного рівня  $D^{(\text{add})}$  помилки у наслідок змін кроку квантування;
- обмеженість ймовірного діапазону змін бітової швидкості на випадок маніпулювань розмірністю групи кадрів, або моделями колірної субдискретизації.

Отже, зазначені стандартизовані механізми зі складу базових технологій кодування відеоданих не відповідають повною мірою вимогам (3.6), при цьому не гарантуючи також можливості гнучкого контролю внесеної помилки. Тому у чистому вигляді такі механізми, як самостійні засоби для зміни бітової швидкості під час її балансування відносно рівня  $\xi(t)$  не є ефективними.

Водночас, теоретично дані механізми може бути використано у якості додаткових засобів поряд з основними.

Відтак, необхідно використати механізми зміни бітової швидкості, які не реалізовано у складі базових технологій кодування.

Разом з тим, необхідно визначити, на яких саме структурних рівнях потоку стиснених відеокадрів має виконуватися балансування бітової швидкості для того, щоб забезпечувалося виконання умов (3.2)-(3.4) та (3.6).

3.1.4 Визначення рівня декомпозиції відеопотоку, відносно якого доцільно виконувати зміну бітової швидкості у ході її балансування

Найбільшим структурним складником відеопотоку можна вважати групу кадрів (GOP), що може містити у собі ту чи іншу кількість як опорних, так і зв'язаних кадрів. При цьому зрозуміло, що одночасна зміна бітової швидкості групи кадрів за рахунок змін того чи іншого параметру за єдиним законом потенційно веде до виникнення значних рівнів внесеної помилки, відтак – виконання умови (3.4) не гарантується.

З цієї ж причини недоцільним є виконувати маніпулювання бітовою швидкістю відео на рівні окремих кадрів потоку.

Водночас, концепція H.26\* передбачає присутність ще одного рівня структурних складників потоку відеокадрів, а саме – тайлів  $T^{(u,\alpha)}$  та слайсів  $S^{(u,\beta,v)}$ . Кожна з цих структурних одиниць являє собою сукупність  $\{S_{(i,j)}^{(\sigma)}\}$  окремих сегментів відеокадру (як у просторовому  $\check{S}_{(i,j)}^{(\sigma)}$ , так і у спектральному  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  форматах) (рис.3.2). Тайл  $T^{(u,\alpha)}$  у цьому випадку відіграє роль не обов'язкового структурного складника відео потоку.

При цьому тайли  $T^{(u,\alpha)}$ , як структурні складові кадру, генерується кодером лише у тому випадку, коли коли обсяг доступних обчислювальних ресурсів системи де дозволяє обробляти кадр у єдиному технологічному циклі [13].

Натомість, слайси  $S^{(u,\beta,v)}$  у складі кадрів, які кодуються у рамках H.26\* є обов'язковими складовими. При цьому, сенс існування слайсів полягає не у зменшенні обчислювального навантаження на кодер, а у наступному:

- підвищенні візуальної якості реконструйованого відеоряду за рахунок того, що слайди обробляються та далі передаються незалежно один від одного, таким чином, втрата одного або кількох слайсів у ході трансляції може бути не поміченою, на відміну від випадків втрат кадрів;

- створенні умов для збільшення об'єктивної якості відеоряду, так як помилки у наслідок передавання каналом, або внесені у ході балансування бітової швидкості, локалізуються у межах слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$ .

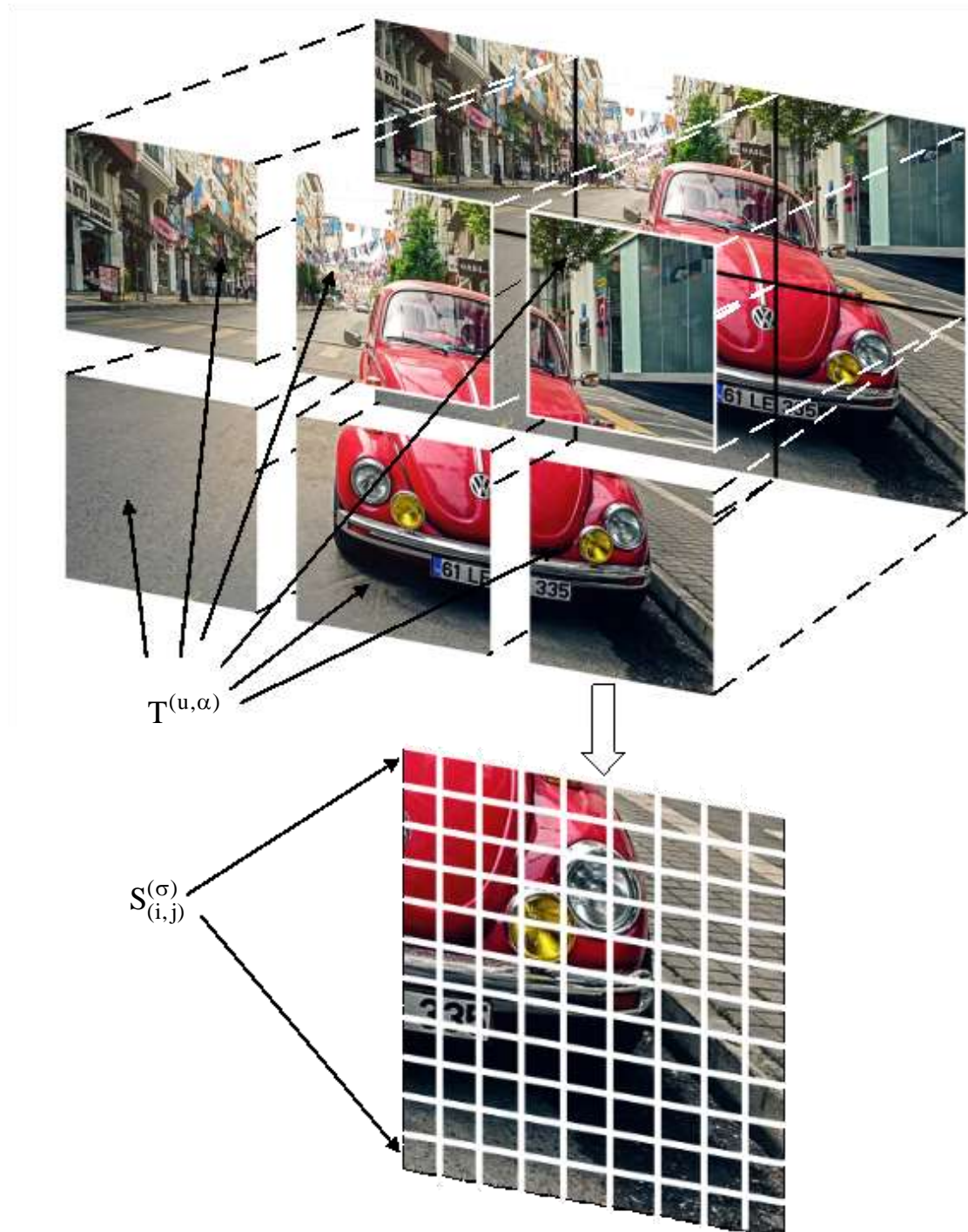


Рисунок 3.2 – Принцип поділу вихідного кадру на тайли та сегменти

У свою чергу, якщо тайли  $T^{(u,\alpha)}$  у рамках кадру є сукупностями сегментів, які мають однаковий розмір та розміщені послідовно, слайси при цьому можуть не мати сталого розміру, а також можуть складатися з декількох частин, локалізованих у довільних зонах кадру (рис.3.3).

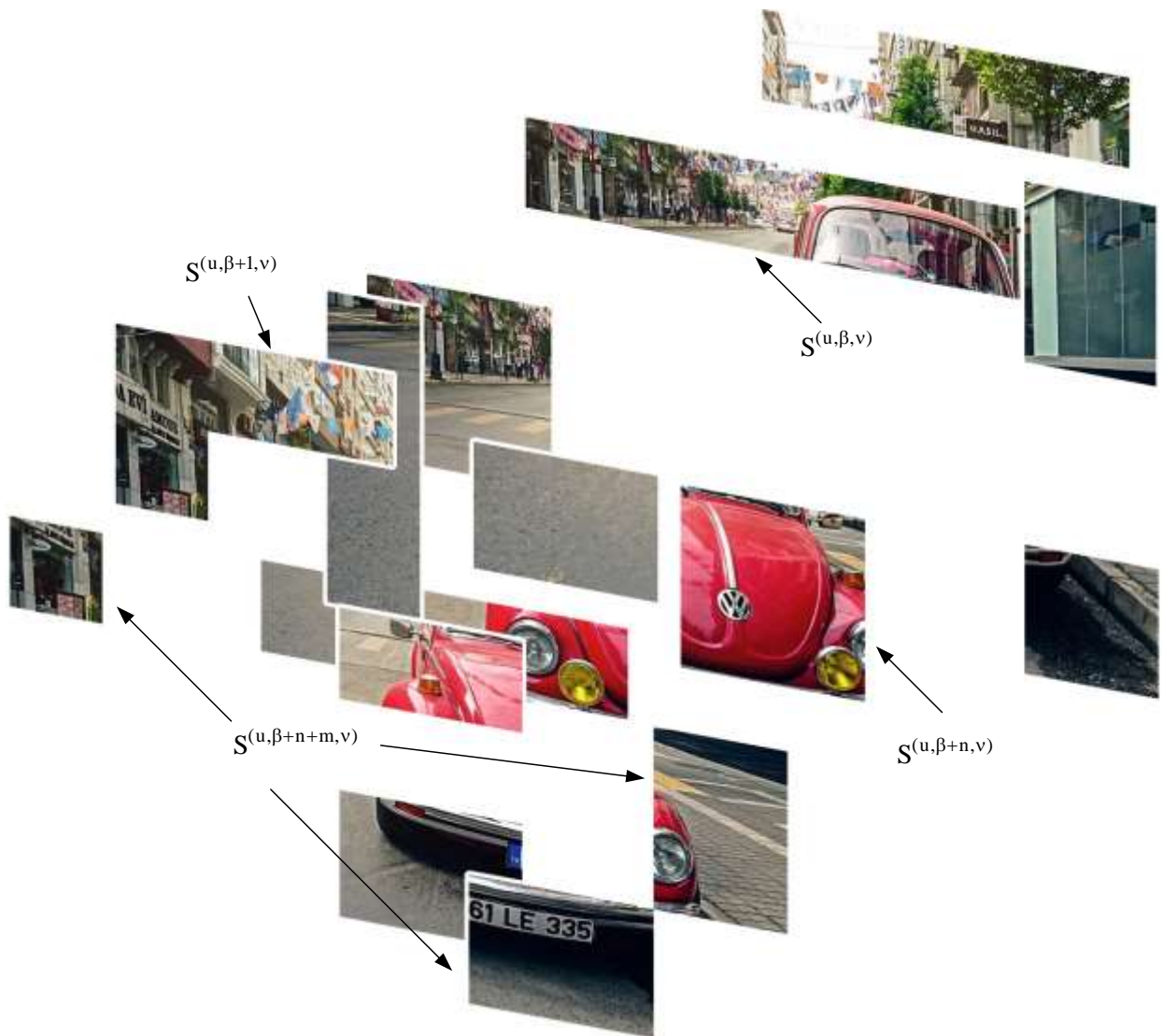


Рисунок 3.3 – Приклад формування відеокадру сукупністю слайсів

На рис. 3.3 деякі слайси складаються кількома сукупностями сегментів, наприклад -  $S^{(u,\beta,v)}$  означає слайс, що має порядковий номер  $\beta$  у межах  $u$ -го кадру відеоінформаційного потоку.

Індекс  $v$  є ідентифікатором множини сегментів, які утворюють слайс.

Так, наприклад, для монослайсу, тобто, такого, що містить у собі єдину сукупність сегментів,  $v = 1$ .

Разом з тим, як показано рис. 3.3, слайс  $S^{(u,\beta+n+m,v)}$  представлений трьома сукупностями сегментів.

Тобто, його може бути представлено трьома субслайсами -  $S^{(u,\beta+n+m,1)}$ ,  $S^{(u,\beta+n+m,2)}$  та  $S^{(u,\beta+n+m,3)}$ .

Слайси, у свою чергу, присутні у структурі кожного кадру, стисненого на базі Н.26\*.

При цьому, бітова швидкість  $\Phi(t)^{(u,\beta,v)}$  кожного з них формується сукупністю вкладів  $\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}$  бітових швидкостей окремих сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$ , що входять до його складу, тобто:

$$\Phi(t)^{(u,\beta,v)} = \sum_{x=1}^{v_{\text{row}}} \sum_{y=j}^{v_{\text{col}}} \Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}, \quad (3.7)$$

де  $v_{\text{row}}$  та  $v_{\text{col}}$  - кількість рядків та стовпців сегментів у слайсі відповідно.

Таким чином, на користь реалізації підходу до побудови механізму балансування бітової швидкості на рівні слайсу свідчить наступне:

- слайс  $S^{(u,\beta,v)}$  може містити у собі достатню кількість біт для того, щоб забезпечити можливість суттєвої зміни бітової швидкості у ході процедури балансування;

- помилка  $D^{(\text{add})}$ , внесена у процесі балансування, локалізується у межах поточного слайсу, не впливаючи на якість інших частин кадру. Це створює можливість того, щоб за неможливості виконання умов (3.4) на рівні поточного слайсу, орієнтуватися на забезпечення значення  $D^{(\text{add})} \approx D_{\text{sc}}$ .

Отже, механізм балансування бітової швидкості відеоінформаційного потоку відносно динаміки пропускної спроможності доцільно реалізувати на рівні слайсів відеокадрів [20].

### 3.2 Принцип маніпулювання рівнем бітової швидкості відеоінформаційного потоку за рахунок змін структурного опису фрагментів

Оскільки у п.3.1.3 раніше було виявлено, що застосування стандартизованих механізмів зі складу технологій стиснення відео, які здатні динамічно змінювати рівень бітової швидкості для її балансування, має ряд недоліків, необхідно використати новий підхід. Для цього, наприклад, може бути застосовано зміну структурного представлення сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$ , як ключовий механізм. Принцип даного механізму полягає у наступному.

Кожен сегмент  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  являє собою тривимірну структуру, утворену двійковими елементами (рис.3.4). Така структура  $S(3d)_{(i,j)}^{(\sigma)}$  має розмірність  $n \times n \times \eta$ , де  $\eta$  – кількість прошарків розміром  $n \times n$ ;  $n$  - кількість рядків та стовпців у межах одного такого прошарку відповідно [17, 19].

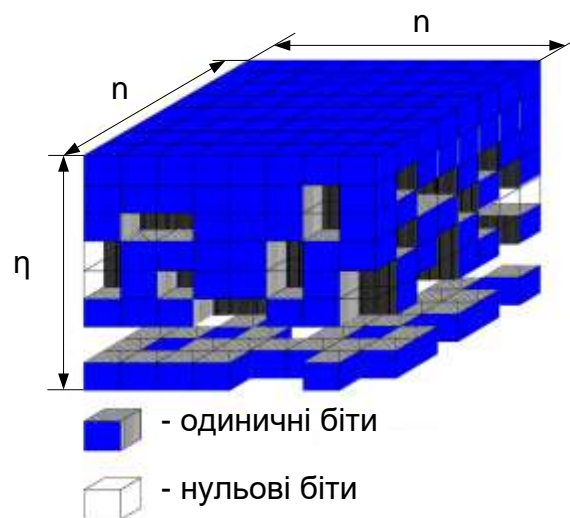


Рисунок 3.4 – Тривимірна модель сегменту, утворена двійковими елементами

У рамках моделі, наведеної рис. 3.4, кожен прошарок  $n \times n$  розглядається як **бітова площина**  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$ , тобто, множина усіх двійкових елементів  $\eta$ -го розряду, тобто:

$$C(\eta)_{i,j}^{(u)} = \bigcup_{\eta=0}^{v_{bp}-1} b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma)}, \quad (3.8)$$

де  $b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$  - двійковий елемент  $\eta$ -го розряду на позиції  $k, \ell$  у бітовій площині  $\sigma$ -го сегменту.

Відповідно до цього, бітова швидкість  $\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}$  сегменту формується сумою бітових швидкостей  $\Phi(t, \eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  окремих площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$ , що еквівалентно виразу:

$$\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)} = \sum_{\eta=0}^{v_{pb}-1} \Phi(t, \eta)_{i,j}^{(\sigma)}. \quad (3.9)$$

Аналіз виразу (3.9) показує, що шляхом зміни кількості  $\eta$  бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  для опису тривимірної структури  $S(3d)_{(i,j)}^{(\sigma)}$  забезпечується зміна рівня  $\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}$  бітової швидкості сегменту.

Оскільки теоретично величина  $\eta$  може бути змінювана у діапазоні  $\eta = \overline{0; v_{pb}-1}$ , при цьому створюються умови для забезпечення виконання вимог (3.6).

Це зумовлено тим, що при цьому, по-перше, існує можливість зміни бітової швидкості у необхідному діапазоні величин, а по-друге, забезпечується гнучка зміна кроку  $\Delta\Phi(t)$ .

Отже, механізм зміни кількості бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$ , що формують сегмент  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  слайсу, може бути використано як основу для методу балансування бітової швидкості [14, 20].

Водночас, зменшення величини  $\eta$  для сегменту, одночасно зі скороченням рівня  $\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}$ , веде також до зростання рівня  $D^{(add)}$  помилки, внесеної під час обробки, що є наслідком виразу (2.10).

Таким чином, для застосування механізм зміни кількості бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  у якості базису для забезпечення балансу бітової швидкості,

необхідно усунути протиріччя, що зумовлене зростанням рівня помилки відеоданих при скороченні величини  $\eta$ .

### 3.2.1 Підхід до розв'язання протиріччя, зумовленої ростом внесеної помилки у наслідок скорочення просторової структури сегменту

Розглянемо, якими чином описуються величини компонент сегменту на випадок використання тривимірного представлення сегменту. Компоненти  $c_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$ , що формують сегменти  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  слайсу, у рамках його тривимірної моделі може бути розглянуто як сукупність біт з 0 по  $(v_{bp} - 1)$  розрядів на  $k, \ell$  позиції, як ілюструє наступна схема на рис.3.5.

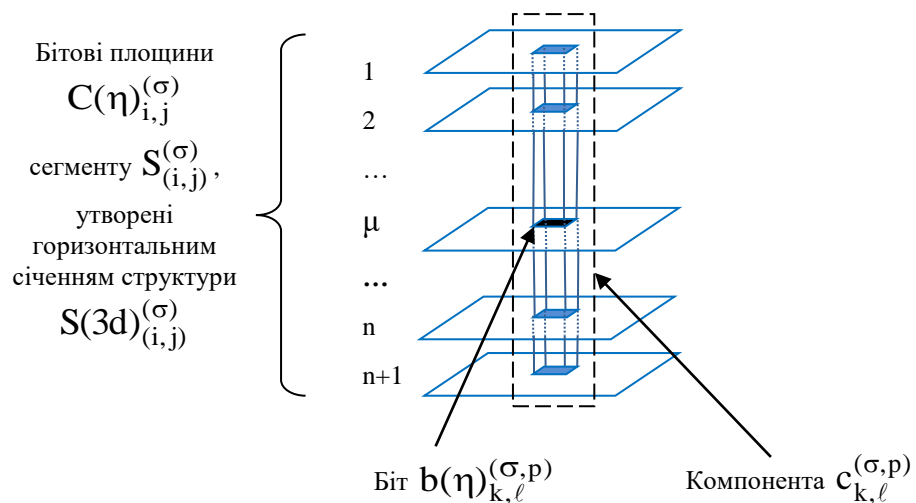


Рисунок 3.5 – Принцип опису компоненти сегменту у рамках його тривимірної структури

При цьому очевидно, що внесок, який здійснюють біти кожного з розрядів у підсумкову величину  $c_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$ , є нерівнозначним, як показує наступний вираз:

$$c_{k,\ell}^{(\sigma,p)} = b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)} 2^{(v_{bp}-1)} + b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)} 2^{(v_{bp}-2)} + \dots \quad (3.9)$$

$$\dots + b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)} 2^{(1)} + b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)} 2^{(0)},$$

тут зростання індексу розряду потенційно збільшує внесок біту у значення компоненти  $c_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$ .

Отже, зі схеми (3.5) бачимо, що у загальному випадку найбільше відхилення від десяткового значення компоненти, а відтак – найбільший рівень  $D^{(add)}$  внесеної помилки відповідає випадку виключення бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  старших індексів. Натомість – бітові площини молодших розрядів вносять мінімальну помилку. Дана залежність може бути наочно проілюстрована рис. 3.6 та рис.3.7.

На наведених рисунках демонструються приклади сегменту, для опису якого застосовано різну комбінацію бітових площин. Аналіз даних рисунків показує, що, з одного боку, найбільш значущими є бітові площини старших розрядів. Зокрема, бітова площина  $C(v_{bp-1})_{i,j}^{(\sigma)}$  є найбільш семантично вагомою, що у загальних рисах описує зміст сегменту  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  у цілому. При цьому, з іншого боку, рівень  $D^{(add)}$  внесеної помилки для цього випадку буде визначатися як:

$$D^{(add)}(v_{drop}) = \sum_{\lambda=1}^{v_{drop}} D^{(add)}(\lambda)_{i,j}^{(\sigma)}, \quad (3.10)$$

де  $v_{drop}$  - кількість виключених бітових площин.

Тобто, величина помилки може бути суттєвою, що не дозволяє задовольнити вимогу (3.4).

Таким чином, з рис. 3.6 та 3.7 та виразу (3.10) бачимо, що у загальному випадку для оперативної зміни бітової швидкості  $\Phi(t)^{(u,\beta,v)}$  слайсу можуть виконуватися маніпуляції відносно зміни кількості бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  молодших індексів, які, у свою чергу, забезпечують зміну бітової швидкості  $\Phi(t)_{x,y}^{(\sigma)}$  окремих сегментів [20].

У той же час, вираз (3.9) дозволяє зробити однозначні висновки про найбільш суттєвий внесок старших біт  $b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$  у формування компонент  $c_{k,\ell}^{(\sigma,p)}$  сегменту лише у тому випадку, коли  $b(\eta)_{k,\ell}^{(\sigma,p)} = 1$ .

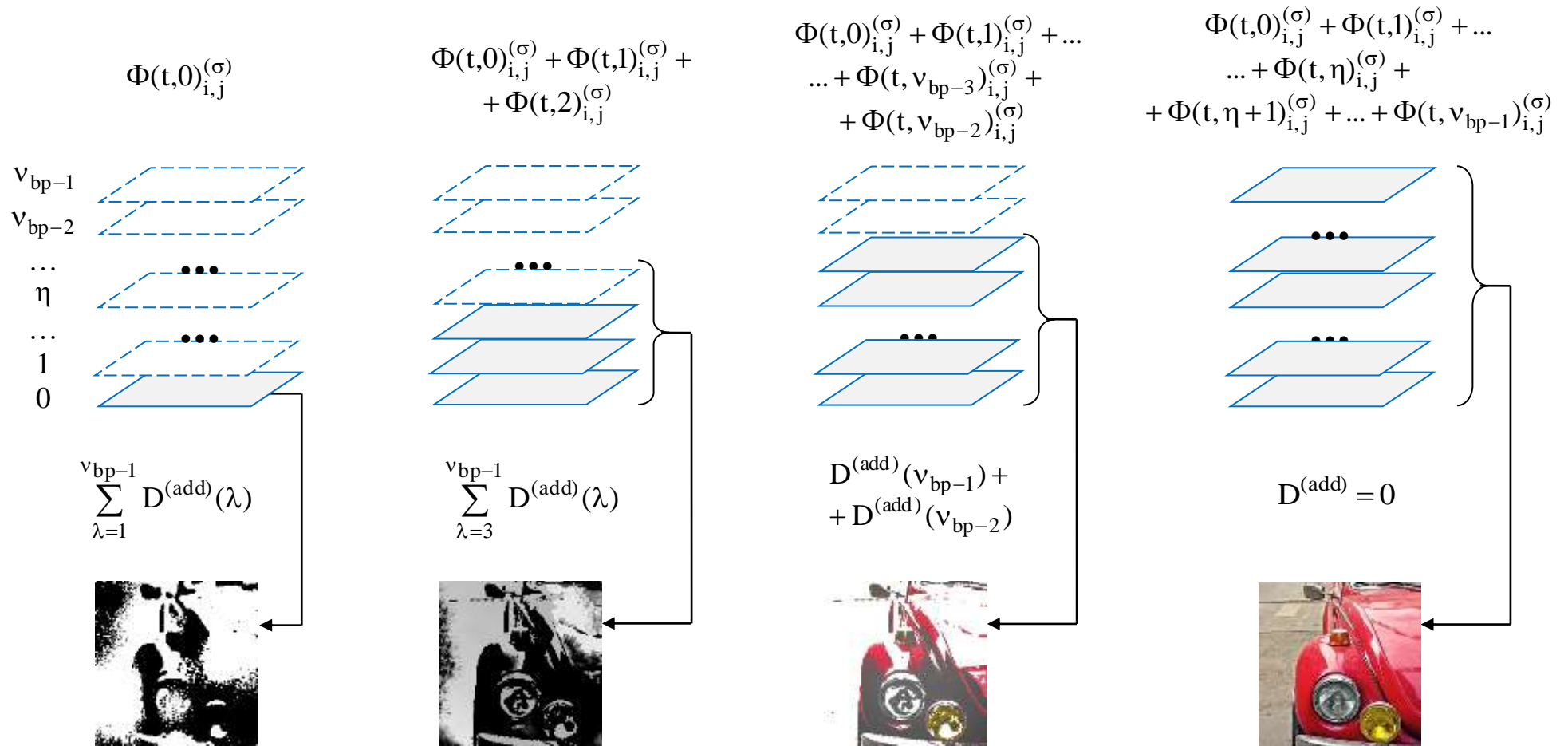


Рисунок 3.6 – Рівні бітової швидкості, внесеної помилки сегменту та візуальна якість слайсу на випадок опису сегментів різною кількістю бітових площин, починаючи з молодшої

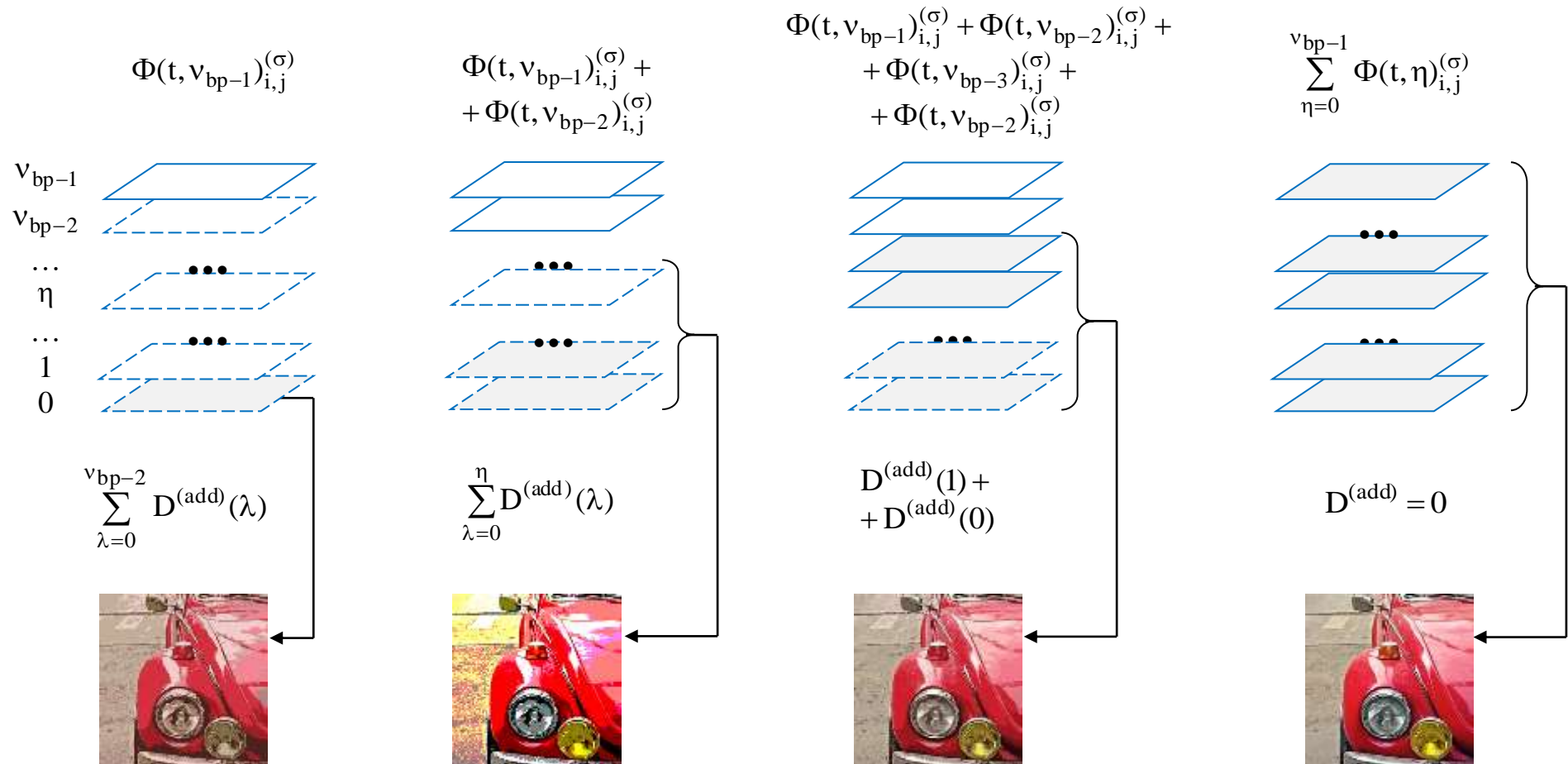


Рисунок 3.7 – Рівні бітової швидкості, внесеної помилки сегменту та візуальна якість слайсу на випадок опису сегментів різною кількістю бітових площин, починаючи зі старшої

Отже, залежно від особливостей змісту окремих сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  бітові площини  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$ , що здійснюють як найбільший, так і найменший внесок у підсумкову величину  $D^{(add)}$  внесеної помилки, можуть бути локалізовані на довільній позиції з усього діапазону – від 0, до  $(v_{bp} - 1)$ .

Тобто, виключення хоча б однієї з молодших бітових площин сегменту теоретично може спричинювати виникнення помилки  $D^{(add)}$  суттєво більшої, ніж на випадок, коли виключенню підлягають бітові площини або старших порядків, або з середини діапазону індексів.

Дана обставина, у свою чергу, не дозволяє виконувати одночасну маніпуляцію кількістю бітових площин для опису усіх сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  у межах слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$ .

Для вирішення даного протиріччя, у межах кожного окремого сегменту  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  зі складу  $S^{(u,\beta,v)}$  слайсу може бути застосовано процедуру зворотнього сортування бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  відповідно до рівня  $D^{(add)}(\lambda)$ , який вноситься у величину  $D^{(add)}$  у наслідок відповідної бітової площини.

Після виконання даної процедури вихідний порядок слідування бітових площин буде таким чином, що їх нульові індекси відповідатимуть тим площинам, виключення яких внесе мінімальну помилку.

У свою чергу, індекс 1 матимуть площини, для яких  $D^{(add)}(0) < D^{(add)}(1)$  і т.д.

Такий підхід забезпечує можливість одночасної зміни структури усіх сегментів слайсу маніпуляцією кількістю бітових площин.

При цьому, може досягатися зміна бітової швидкості  $\Phi(t)^{(u,\beta,v)}$  слайсу з внесенням мінімально можливої помилки. Тобто, створюються умови для виконання вимог (3.2), (3.4) та (3.6).

Сутність процедури зворотнього сортування бітових площин демонструє рис. 3.8.

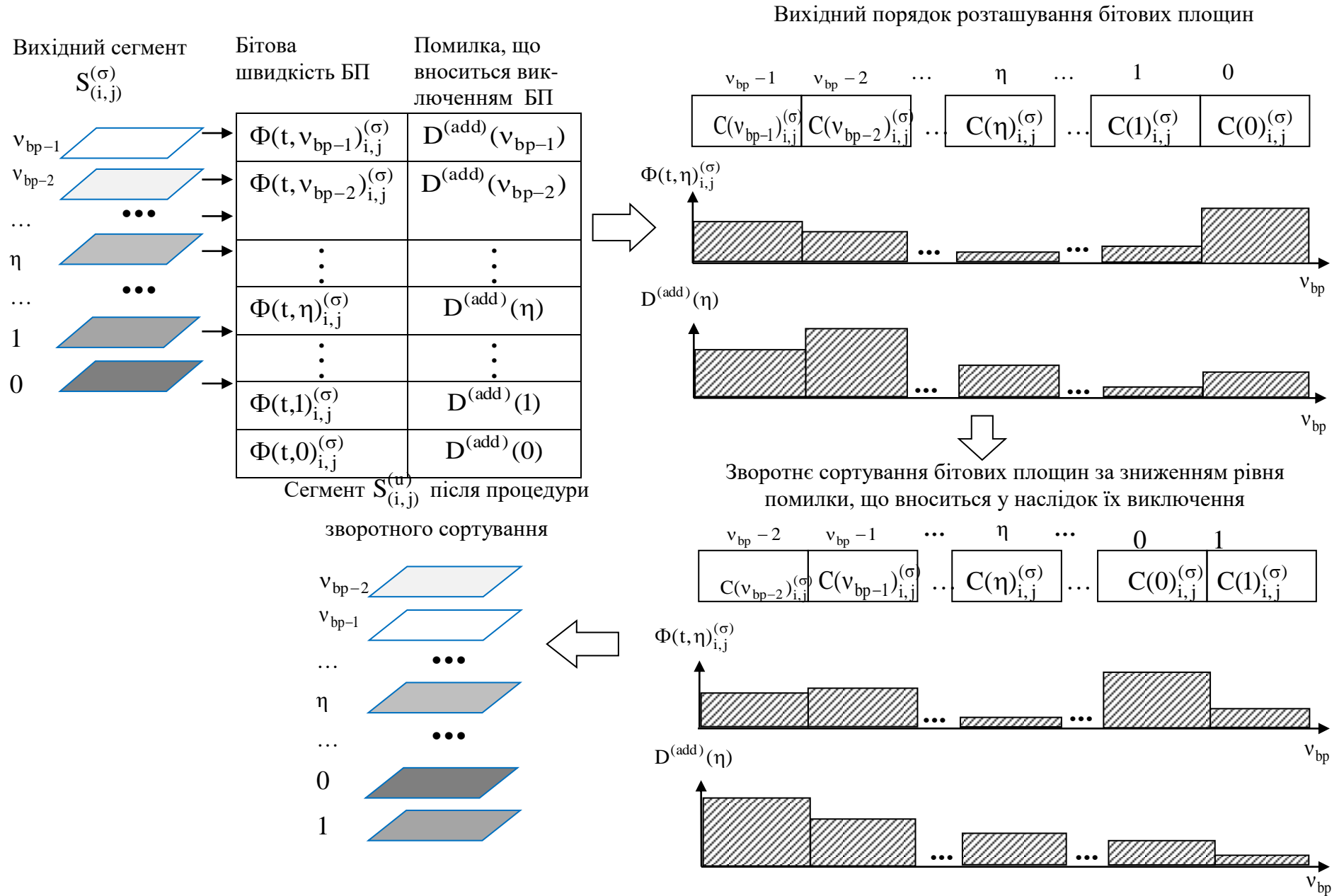


Рисунок 3.8 – Загальна схема процесу зворотного сортування бітових площин

### 3.3 Синтез механізму балансування бітової інтенсивності шляхом зміни структури сегментів слайду

Беручи до уваги залежність, подану рівністю (3.9), вираз для оцінки бітової швидкості  $\Phi(t)^{(u,\beta,v)}$  слайсу може бути наступним [20]:

$$\Phi(t)^{(u,\beta,v)} = \sum_{\sigma=1}^{\Xi} \sum_{\eta=0}^{v(t)_{bp}-1} \Phi(t, \eta)_{i,j}^{(\sigma)}, \quad (3.11)$$

де  $v(t)_{pb-1}$  - кількість бітових площин, що у момент часу  $t$  застосовуються для представлення сегменту.

Передбачається, що шляхом варіювання значення  $v(t)_{pb-1}$  буде змінюватися рівень  $\Phi(t)^{(u,\beta,v)}$ , що створює умови для забезпечення балансу бітової швидкості відносно рівня пропускної здатності мережі.

Припустимо, що у ході передавання відеопотоку спостерігається виконання умови  $\Phi(t) > \xi(t)$ .

На першому кроці балансування бітової швидкості виконується процедура зворотнього сортування бітових площин, як показано рис.3.8

Далі виконується безпосередньо зміна рівня бітової швидкості слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$  шляхом маніпулювання загальною кількістю  $v(t)_{bp}$  бітових площин  $C(\eta)_{i,j}^{(\sigma)}$  у межах кожного з сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$ .

У ході цього поточна бітова швидкість  $\Phi(t, v_{bp})^{(u,\beta,v)}$  слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$ , що відповідає часовому відліку  $t$ , визначається на базі значення  $\Phi(t-1, v(t-1)_{bp})^{(u,\beta,v)}$  бітової швидкості слайсу протягом передуючого часового відліку, тобто  $(t-1)$ , з огляду на наступні умови:

1. Рівень бітової швидкості  $\Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)}$  слайсу перевищує допустимий рівень, тобто:

$$\Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)} > \Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u,\beta,v)}, \quad (3.12)$$

разом з тим, поточне значення помилки не перевищує величини  $D_{sc}$  :

$$D(v(t)_{bp}) \leq D_{sc}, \quad (3.13)$$

також опис кожного з сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  у момент  $(t-1)$  використовує вихідний обсяг бітових площин, а саме

$$\eta = v_{bp}. \quad (3.14)$$

Зазначені умови характерні для випадку обробки слайду, відносно якого попередньо не було виконувано процедури балансування бітової швидкості.

У даних умовах виконується скорочення бітової швидкості  $\Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)}$  слайса на величину  $\Delta\Phi(t-1)^{(u,i)}$ .

У свою чергу, величина  $\Delta\Phi(t-1)^{(u,i)}$  визначається обсягом  $v(t)_{drop}$  бітових площин, які буде виключено зі структури сегменту, тобто:

$$\Delta\Phi(t-1)^{(u,i)} = \sum_{\sigma=1}^{\Xi} \sum_{\eta=1}^{v(t)_{drop}} \Phi(t-1, \eta)_{i,j}^{(\sigma)}, \quad (3.15)$$

де  $v(t)_{drop}$  - кількість бітових площин, які буде виключено зі структури сегменту.

Отже, за наступних умов:

$$\begin{aligned} \Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)} > \Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u,\beta,v)} \quad \& \\ \& \quad \& D(v(t)_{bp}) \leq D_{sc} \quad \& \quad \eta = v_{bp} \end{aligned} \quad (3.16)$$

величина поточного рівня бітової швидкості відео потоку для часового відліку  $t$  розраховуватиметься за виразом:

$$\Phi(t, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)} = \Phi(t-1, v(t-1)_{bp})^{(u,\beta,v)} - \Delta\Phi(t-1)^{(u,i)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{\sigma=1}^{\Xi} \sum_{\mu=1}^{v(t)_{bp} - v(t)_{drop}} \Phi(t-1, \eta)_{i,j}^{(\sigma)} = \\
&= \sum_{\sigma=1}^{\Xi} \sum_{\mu=1}^{v(t)_{bp}} \Phi(t-1, \eta)_{i,j}^{(\sigma)} - \sum_{\sigma=1}^{\Xi} \sum_{\mu=1}^{v(t)_{drop}} \Phi(t-1, \eta)_{i,j}^{(\sigma)} \quad , \quad (3.17) \\
&v(t)_{drop} = \overline{1, v(t)_{bp} - 1}.
\end{aligned}$$

У ході процесу балансування бітової швидкості  $\Phi(t, v_{bp})^{(u, \beta, v)}$  слайсу  $S^{(u, \beta, v)}$ , на першому його кроці за замовчуванням значення  $v(t)_{drop} = 1$ .

Далі, якщо за даної величини  $v(t)_{drop}$  зміна значення бітової швидкості до рівня, який буде не більшим, ніж  $\Phi(t, v_{bp})_{req}^{(u, \beta, v)}$ , величину  $v(t)_{drop}$  поступово збільшується на 1.

За умови, що подібним чином скорочення бітової швидкості слайсу до значення, що не перевищує  $\Phi(t, v_{bp})_{req}^{(u, \beta, v)}$ , не було забезпечено, при цьому досягнуто значення  $v(t)_{drop} = v(t)_{bp} - 1$ , (тобто, сегмент описується однією бітовою площиною), здійснюється розширення розмірності  $g_{fr}$  групи кадрів на 2, тобто:

$$g_{fr} := g_{fr} + 2 \mid \Phi(t, v_{bp})_{req}^{(u, \beta, v)} < \Phi(t, v_{bp})^{(u, \beta, v)} \ \& \ v(t)_{drop} = v(t)_{bp} - 1. \quad (3.18)$$

2. Рівень бітової швидкості  $\Phi(t, v_{bp})^{(u, \beta, v)}$  є нижчим, ніж прийнятне значення, а саме:

$$\Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u, \beta, v)} < \Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u, \beta, v)}, \quad (3.19)$$

водночас, поточне значення помилки є більшим, ніж припустимо за умовами надання сервісу, зокрема:

$$D(v(t-1)_{bp}) > D_{sc}, \quad (3.20)$$

разом з тим, кожен сегмент  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$  описується зменшеною кількістю бітових площин, тобто:

$$v(t-1)_{bp} = v(t-1)_{bp}^{\max} - v(t-1)_{drop}. \quad (3.21)$$

Дані умови відповідають випадку, коли обробляється слайс  $S^{(u,\beta,v)}$ , бітову швидкість якого попередньо було зменшено на попередньому кроці обробки.

При цьому, резерв бітової швидкості, рівний  $\Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u,\beta,v)} - \Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)}$ , дозволяє збільшити її величину, шляхом внесення до синтаксичного опису деякої частини сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  бітових площин, індекс яких рівний:

$$\eta = v(t)_{bp} - v(t)_{drop} - 1. \quad (3.22)$$

При цьому, якщо усі сегменти слайсу початково утворюють вихідну множину  $\{Q\}$ , то далі на першому кроці доповнюється синтаксичний опис  $\frac{1}{2}$  з усіх  $\Xi$  вихідних сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$  слайсу  $S^{(u,\beta,v)}$ , що утворюють множину  $\{Q^{(add)}\}$ .

Далі, якщо справедливість виразу (3.20) порушується, виконується перевірка умови (3.19).

Якщо у цьому випадку перевищення бітовою швидкістю допустимого рівня не спостерігається, надалі слайс  $S^{(u,\beta,v)}$  формується з 50% сегментів  $S_{(i,j)}^{(\sigma)}$ , які описані  $(v(t)_{bp} - v(t)_{drop})$  бітовими площинами (множина  $\{Q^{(sourc)}\}$ ), та з 50% - які представлені  $(v(t)_{bp} - v(t)_{drop} + 1)$  бітовими площинами (множина  $\{Q^{(add)}\}$ ). У сутності, це являє собою збільшення рівня  $Q$  деталізації  $S^{(u,\beta,v)}$  слайсу, що у загальному випадку може бути подано виразом:

$$\{Q\} := \{Q\} + 1 \quad (3.23)$$

В іншому випадку, коли вираз (3.20) залишається справедливим, на другому кроці множина  $\{Q^{(add)}\}$  доповнюється внесенням додаткової бітової площини, індекс якої визначається виразом (3.22) для  $\frac{1}{2}$  сегментів з множини  $\{Q^{(sourc)}\}$ . Такі сегменти утворюють множину  $\{Q_2^{(add)}\}$

При цьому, якщо поточний рівень бітової швидкості задовольняє умові (3.19), а рівень помилки перевищує допустиму величину (вираз (3.20) є справедливим), далі може бути послідовно збільшено загальну кількість сегментів, для яких задіяно  $(v(t)_{bp} - v(t)_{drop} + 1)$  бітових площин.

У загальному випадку процедура розширення структурного опису сегментів може містити  $n$  кроків, на кожному з яких виконується умова:

$$\{Q_k\} = \{Q_k^{(add)}\} \cup \{Q_k^{(sourc)}\} \quad (3.24)$$

Сутність такого процесу ілюструє схема на рис.3.9.

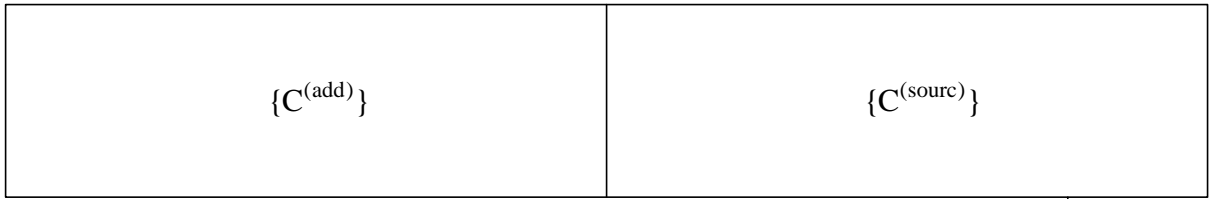
У підсумку цього можливе виникнення граничних умов, а саме, коли розмірність множини  $\{Q_2^{(sourc)}\} = 1$  (досягнуто граничну величину  $\{Q_{th}\}$ ), при цьому  $\Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)} < \Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u,\beta,v)}$ , а  $D(v(t)_{bp}) \leq D_{sc}$ . У свою чергу справедливим є співвідношення [20]:

$$\Phi(t-1, v(t)_{bp})_{req}^{(u,\beta,v)} - \Phi(t-1, v(t)_{bp})^{(u,\beta,v)} = \Phi(t-1, \eta)_{i,j}^{(\sigma)}, \quad (3.25)$$

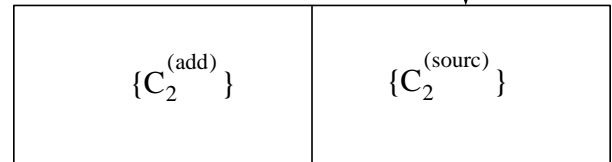
тобто, різниця між діючою і гранично необхідною величиною бітової швидкості слайду дорівнює кількості біт, що витрачаються на опис однієї бітової площини.

3. Значення  $\Phi(t, v_{bp})^{(u,\beta,v)}$  перевищує допустимий рівень, як показує вираз (3.19), при цьому рівень помилки є більшим, ніж дозволяють умови надання сервісу, тобто, умова (3.20) є справедливою. Разом з тим, для опису сегментів слайсу задіяно вихідну кількість бітових площин.

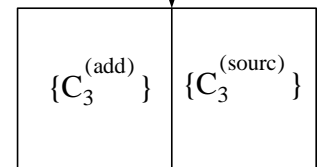
Крок 1



Крок 2



Крок 3



...

Крок n

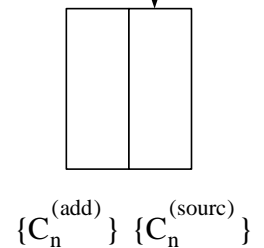


Рисунок 3.9 – Схема процесу розширення структурного опису частини сегментів слайсу

Частковим випадком даної умови є справедливість виразів (3.12) та (3.20) при тому, що сегменти описуються вихідною кількістю бітових площин. Дана ситуація є типовою для випадків, коли у ході обробки відеопотоку у базовій схемі кодування вноситься надмірний рівень помилки. Відтак, необхідно змінити параметри кодеру.

Загальна схема механізму зміни бітової швидкості у процесі її балансування наводиться на рис. 3.10.

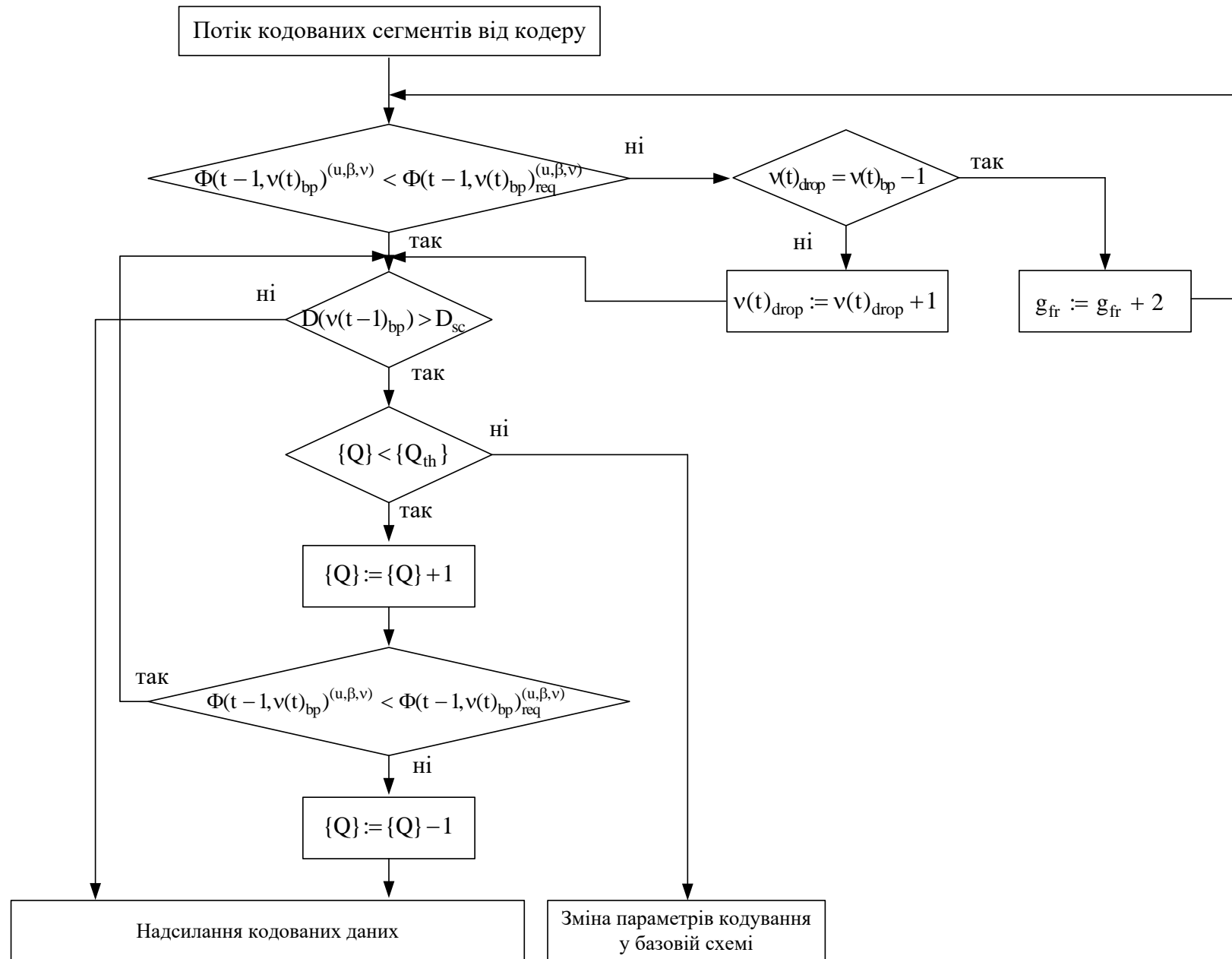


Рисунок 3.10 – Загальна схема процесу зміни бітової швидкості слайсу у ході її балансування відносно динаміки пропускної здатності мережі

### 3.4 Висновки за розділом

Обґрунтовано доцільність застосування механізму балансування бітової швидкості відеоінформаційного потоку відносно динаміки пропускної спроможності мережі на рівні окремих слайсів відеокадру.

Доведено ефективність підходу, у рамках якого забезпечуються зміни структурного опису сегментів шляхом маніпулювання кількістю бітових площин, задіяних для їх семантичного представлення. Це, у свою чергу, спричинює зміну бітової швидкості слайсів у процесі балансування бітової швидкості відео потоку.

Показано, що одним з проблемних аспектів реалізації зазначеного підходу є нерівномірність розподілу бітової швидкості між бітовими площинами сегментів а відтак – ймовірної помилки, яку може бути внесено у разі їх виключення зі структурного опису.

На цей випадок попередньо застосовується зворотнє сортування бітових площин за мірою зниження ймовірної помилки для того, щоб мати змогу у рамках єдиної технологічної операції виключати з розгляду бітові площини сегментів, яким відповідає мінімальна похибка.

Розглянуто ключові режими функціонування балануючого механізму, у ході якого може застосовуватися:

- виключення зі структурного опису сегментів слайсу бітових площин одного або кількох індексів для зменшення бітової швидкості;
- внесення додаткових бітових площин відносно ряду сегментів слайсу для корегування рівня помилки;
- розширення розмірності групи кадрів на випадок, коли шляхом виключно субдискретизації сегментів зменшення рівня бітової швидкості до необхідного рівня неможливо забезпечити;
- корегування параметрів кодування у базовій схемі обробки на той випадок, коли на обробку надходить відеопотік, сегменти у складі якого мають вихідний обсяг бітових площин, проте рівень помилки з самого початку перевищує допустиме значення.

## 4 ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ БАЛАНСУВАННЯ БІТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ НА БАЗІ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

### 4.1 Принцип взаємозв'язку базового механізму кодування та механізму балансування біткової швидкості

Метод балансування біткової швидкості потоку кодованих кадрів може розглядатися як модуль, що є зовнішнім відносно базової технології кодування.

Схематично це може бути показано на рис.4.1.

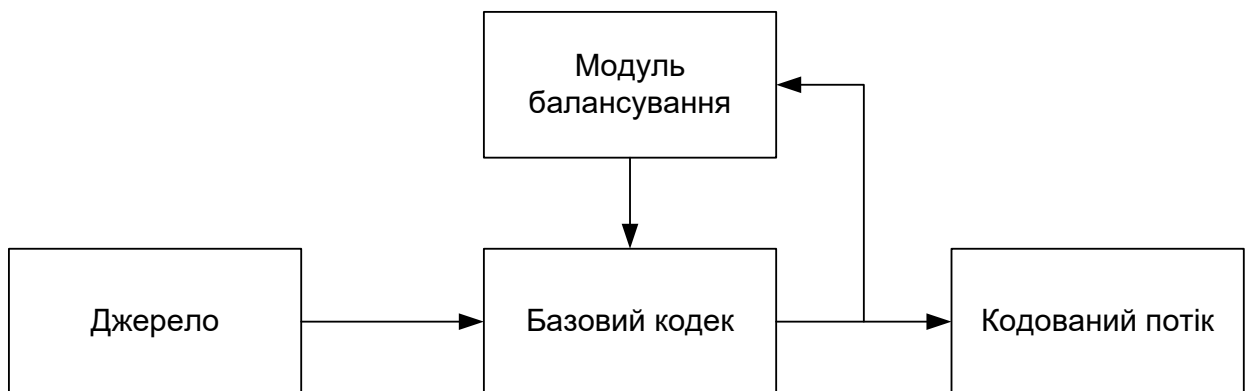


Рисунок 4.1 – Місце метода балансування біткової швидкості відео по відношенню до базового алгоритму кодування

У цьому випадку модуль балансування протягом кожного часового відліку  $t$  повинен отримувати інформацію відносно значень  $\xi(t)$  та  $\Phi$ .

Далі, керуючись цією інформацією, модуль балансування змінює відповідним чином опції кодеку з тим, щоб досягти виконання умов ефективної трансляції відеоданих, як було зазначено виразом (2.12).

При цьому для того, щоб забезпечити інтеграцію метода балансування біткової швидкості з кодувальним алгоритмом та системою передачі, необхідно попередньо виконати задачу вимірювання поточної пропускну здатності  $\xi(t)$  мережі. Тобто, у канал зворотного зв'язку схеми 4.1. необхідно вбудувати модуль

оцінки дисбалансу, головним завданням якого є визначення поточного рівня  $\xi(t)$ .

Для цього може бути використано ряд підходів, а саме [10, 19, 20]:

- пряма оцінка величини  $\xi(t)$  за значенням RTT;
- опосередкована оцінка змін рівня пропускної здатності.

Розглянемо дані підходи детально.

#### 4.2 Пряма оцінка рівня поточної пропускної здатності мережі у ході передавання відеоінформації

Перший підхід дозволяє отримати наближене значення  $\xi(t)$ , для чого джерело попередньо генерує пакет відомого розміру  $\Phi_p$ , який надсилається приймачеві мережею.

У свою чергу, отримавши пакет-запит, приймач генерує у відповідь пакет-підтвердження такого ж розміру.

При цьому, загальний час, який займає процес відправки пакету-запиту та отримання підтвердження, розглядається як RTT (round trip time), тобто, час двосторонньої затримки [10].

Зазвичай наближено приймається  $RTT \approx 2\tau_{tm}$ , де  $\tau_{tm}$  - час надходження пакету-запиту приймачеві.

Беручи до уваги те, що раніше вказувалося відносно апріорі відомого розміру  $\Phi_p$  пакету, це дає змогу обчислювати поточний рівень  $\xi(t)$  пропускної здатності як:

$$\xi(t) = \frac{\Phi_p}{RTT} = \frac{\Phi_p}{2\tau_{tm}} \quad (4.1)$$

Розглянутий підхід, з одного боку, характеризується тривіальністю реалізації.

Водночас, йому характерний ряд недоліків:

1. Розрахунок величини  $\xi(t)$  можливий лише з деякої погрішністю. Існування даного недоліку зумовлюється тим, що, у загальному випадку, справедливим є співвідношення:

$$\tau_{tm} \neq \tau_{rec}, \quad (4.2)$$

де  $\tau_{rec}$  - час надходження пакету-підтвердження.

Тобто, час надходження пакету-підтвердження до джерела та час надходження пакету-запиту можуть бути різними, що зумовлено щонайменше двома чинниками, а саме:

- шлях проходження пакету-запиту та пакету-підтвердження можуть бути різними (рис. 4.2) та апріорі невідомими;
- навіть за умови, що  $\tau_{tm} = \tau_{rec}$ , тобто, якщо у окремих випадках співвідношення (4.2) є не вірним, виконується наступна рівність:

$$\tau_{tm} + \tau_{rec} = RTT - \tau_{hnd}, \quad (4.3)$$

де  $\tau_{hnd}$  - час реакції віддаленого вузла, який, у свою чергу визначається наступним чином:

$$\tau_{hnd} = \tau_{ar} + \tau_g + \tau_{bt}, \quad (4.4)$$

де  $\tau_{ar}$  - час прийому та аналізу пакету;

$\tau_g$  - час генерування пакету-підтвердження;

$\tau_{bt}$  - час, необхідний для розміщення згенерованого пакету у вихідний буфер з наступною відправкою.

Зрозуміло, що жодна з величин у виразі (4.4) не може бути константою, оскільки залежить від:

- рівня поточного заповнення буферу прийомопередавача у часовий відрізок  $t$ ;
- навантаження, діючого на вузол, включаючи фактори впливу як внутрішні, так і зовнішні;
- обсягу доступних обчислювальних ресурсів.

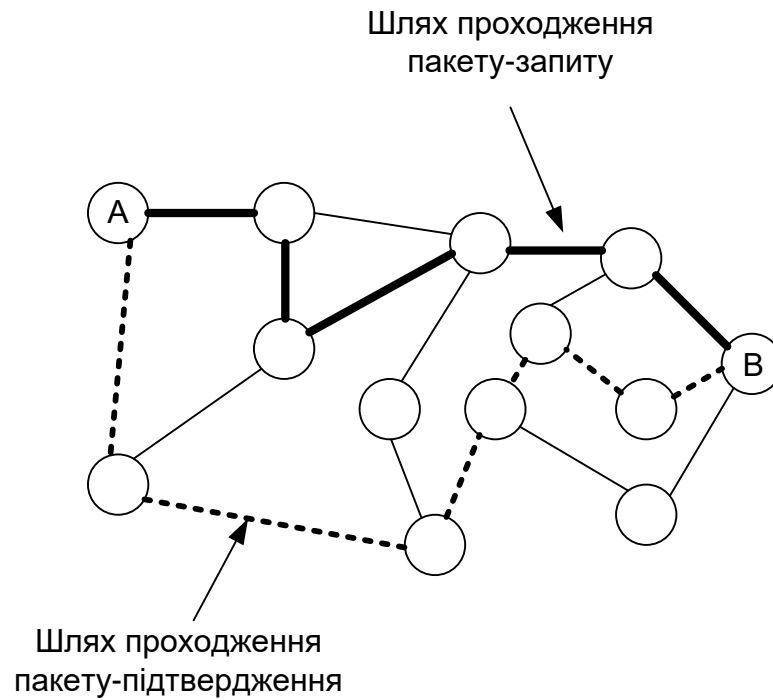


Рисунок 4.2 – Умови, за яких виникає погрішність оцінювання пропускну́ї здатності у наслідок різних шляхів проходження пакетів між вузлами А та В

Час  $\tau_{tm}$  та  $\tau_{rec}$  надходження пакетів від джерела до приймача, та у зворотньому боці, складається з часу  $\tau_{line}$  їх розповсюдження у середовищі передачі, та часу  $\tau_{net}$  обробки на мережевих пристроях, що знаходяться на проміжних вузлах мережі, тобто:

$$\tau_{tm}, \tau_{rec} = \tau_{line} + \tau_{net}. \quad (4.5)$$

При цьому, якщо говорити про сучасні магістральні мережі, або високошвидкісні мережі доступу, величина  $\tau_{line}$  у загальному випадку буде незначною порівняно з часом  $\tau_{net}$ . Відповідно, величиною  $\tau_{line}$  можна знехтувати. Тоді більш детально вираз (4.5) можна подати у наступному вигляді:

$$\tau_{net} = \sum_{i=1}^n \varphi_{hn}(\alpha_q^{(i)}; \alpha_r^{(i)}; \alpha_{osi}^{(i)}) \times \gamma_{nold}, \quad (4.6)$$

де  $\varphi_{\text{net}}^{(i)}$  - функціонал, що визначає принцип обробки пакетів на мережевому пристрої, беручи до уваги наявні опції обробки;

$\alpha_q^{(i)}$  - сукупність алгоритмів, які у межах  $i$ -го мережевого вузла задіяні для обробки черг надходячих пакетів;

$\alpha_r^{(i)}$  - сукупність алгоритмів (а також множина їх опцій), на базі яких на  $i$ -му вузлі виконується маршрутизація пакетів;

$\alpha_{\text{osi}}^{(i)}$  - сукупність перетворень, що виконуються відносно пакетів  $i$ -му вузлі у межах OSI;

$\gamma_{\text{noId}}$  - рівень завантаженості  $i$ -го мережевого вузла, що, у свою чергу, визначається як функціонал від обсягу надходячих на вузол пакетів  $\rho_j$ , та рівня  $\Theta$  складності мережевого трафіку, тобто:

$$\gamma_{\text{noId}} = f\left(\sum_{j=1}^J \rho_j; \Theta\right). \quad (4.7)$$

Важливим тут є те, що заздалегідь не може бути спрогнозовано, які саме алгоритми  $\alpha_r^{(i)}$  маршрутизації та керування чергами  $\alpha_q^{(i)}$  буде використано на мережевому вузлі у ході обробки того чи іншого пакету. Так само це справедливо також для сукупності  $\alpha_{\text{osi}}^{(i)}$  перетворень пакетів на мережевих вузлах, а також особливостей кожного з таких перетворень в умовах, коли на мережевий вузол діє навантаження  $\gamma_{\text{noId}}$ .

Таким чином, час  $\tau_{\text{net}}$ , протягом якого буде виконуватися обробка пакету на мережевих пристроях, є невідомою величиною, характер змін якої буде не прогнозованим та випадковим. Відповідно, за таких умов має місце наступна залежність:

$$(\tau - 1)_{\text{net}} \neq \tau_{\text{net}} \neq (\tau + 1)_{\text{net}}. \quad (4.8)$$

2. Оскільки пропускна здатність є величиною, що може змінюватися у часі, тобто, у загальному випадку  $(t - 1) \neq t \neq (t + 1) \dots \neq (t + m)$ , відповідно, величина  $\xi(t)$  повинна відстежуватися кожну одиницю часу, коли теоретично можливе передавання відеоінформаційних пакетів.

Відтак, на кожному проміжку часу  $(t + n; t + n + 1)$  необхідно надсилати тестові пакети.

У підсумку, часова діаграма на боці передавача буде мати вигляд, як показано рис. 4.3.

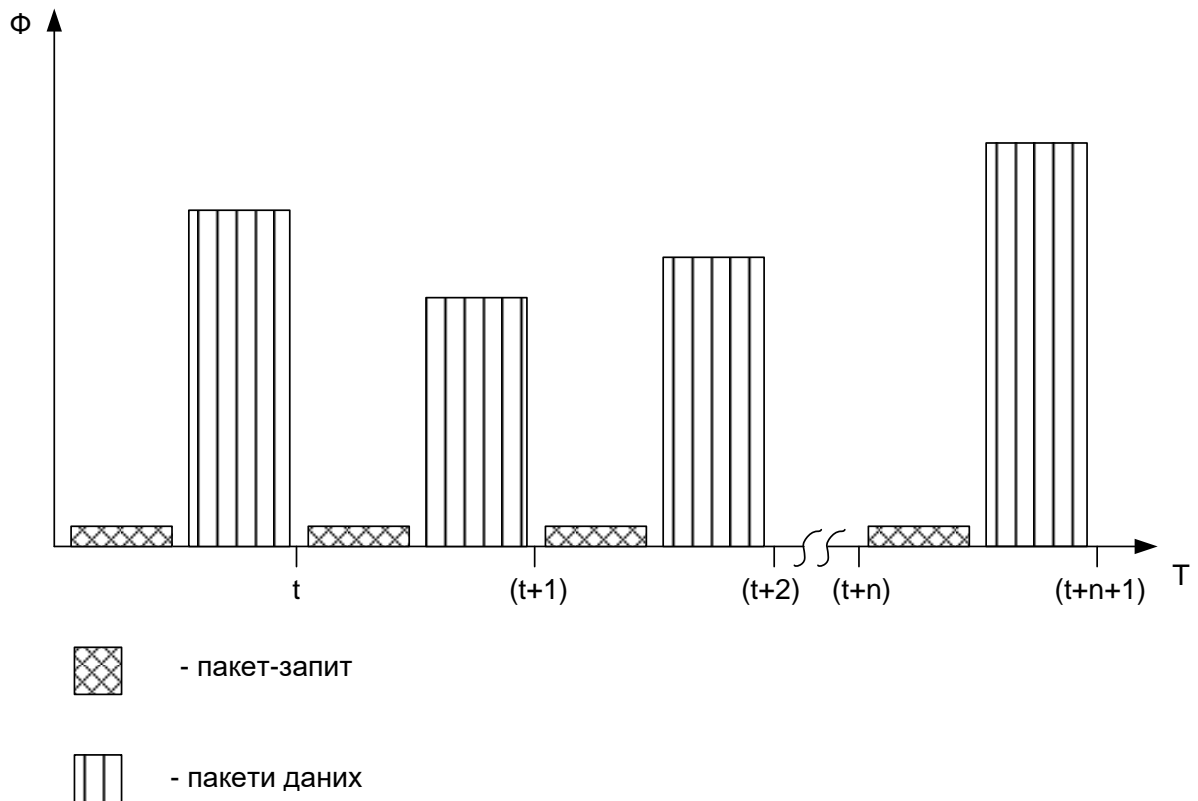


Рисунок 2.3 – Діаграма передавання пакетів на боці передавача у випадку вимірювання пропускної здатності за RTT

У свою чергу, це веде до невиправданого ускладнення структури потоку та накладає додаткові вимоги на швидкодію системи у цілому. Водночас, збільшення інтервалу  $\tau_{\text{test}}$  до значення  $\tau_{\text{test}} > |t - (t+1)|$  хоча і веде до зменшення загального навантаження як на передавач, так і на приймач, разом з тим це спричинює падіння достовірності вимірювання рівня  $\xi(t)$  пропускної здатності.

Тобто, у загальному випадку величина  $\tau_{\text{test}}$  має дорівнювати  $|t + 1 - t|$ , інакше кажучи, частота  $\omega$  надходження пакетів запиту повинна бути не більше і одночасно – не менше, ніж 1 за інтервал  $(t; t + 1)$ .

3. Необхідно гарантувати виконання умови, за якою сумарний час, що витрачається на відправку пакету-запиту, отримання пакету-підтвердження та час обробки деякого обсягу відеоінформації, що має бути переданий до мережі за одиницю часу, не перевищував значення  $|(t-1) - t|$ , тобто:

$$|(t-1) - t| \leq t_{tm} + t_{rec} + t_{hnd}. \quad (4.9)$$

Таким чином, пряма оцінка пропускної здатності означеним способом, беручи до уваги виявлені недоліки та обмеження, може вважатися нераціональною.

Окрім цього, неможливо забезпечити урахування величина та характеру помилки, що може виникнути у підсумку оцінювання рівня  $\xi(t)$ . Тобто, розглянутий підхід до вимірювання пропускної здатності не гарантує достовірної її оцінки.

У зв'язку з цим, розглянемо далі механізм опосередкованої оцінки поточного рівня  $\xi(t)$  пропускної здатності мережі.

#### 4.3 Опосередкована оцінка поточного рівня пропускної спроможності мережі

##### 4.3.1 Взаємозв'язок рівня завантаженості буферу та поточної величини пропускної спроможності мережі

Загальний процес перетворення відеоінформації на боці джерела містить у собі такі кроки, як:

- генерування даних;
- кодування згенерованої інформації;
- пакетування;
- розміщення тієї чи іншої кількості пакетів даних до вихідного буферу передавача;
- переміщення пакетів з вихідного буферу до мережевого каналу.

Вихідний буфер передавача при цьому характеризується деяким об'ємом  $V_{buf}$ . Отже, у ході кожного часового проміжку  $(t; t+1)$  до буферу

може надійти обсяг кодованих відеоданих  $\Phi \leq V_{\text{buf}}$ , тобто, такий, який не перевищує величину  $V_{\text{buf}}$ .

Далі, на протязі цього ж відрізка часу, пакети, що разом утворюють об'єм кодованого відео, рівний  $\Phi$ , надсилаються у мережу.

У свою чергу, беручи до уваги особливості кодування відеоінформації з використанням технологій MPEG, стає зрозумілим, що джерело формує нерівномірний у часі характер заповнення буфера, тобто:

$$\Phi(t) \neq \Phi(t+1) \neq \dots \Phi(t+n) \neq \Phi(t+n+1), \quad (4.10)$$

що є наслідком впливу таких чинників, як:

- різний об'єм кадрів у відео потоці, що замовлено різними особливостями їх змісту.
- різна кількість біт, що застосовується для представлення кадрів I, P та B.

Очевидно, що буфер не зможе надсилати у мережу більше, ніж  $\Phi = V_{\text{buf}}$  біт за одиницю часу.

Разом з тим, коли на протязі будь-якого часового відрізка рівень пропускної спроможності  $\xi(t)$  буде нижчим, ніж  $V_{\text{buf}}$ , до мережі може бути надіслано лише  $\xi(t)$  біт.

При цьому, деякий обсяг біт  $\Delta\Phi$ , що являє собою різницю  $\Delta\Phi = V_{\text{buf}} - \xi(t)$ , не буде передано. Розглянемо даний механізм більш детально.

Отже, загальна кількість біт  $\Phi'(t+n)$ , що у деякий довільний відлік часу  $(t+n)$  заповнюють буфер, визначаються переліком чинників, зокрема:

- поточним рівнем пропускної спроможності  $\xi(t+n)$ ;
- швидкістю заповнення  $\Phi_{\text{load}}$  буфера.

Інакше кажучи, кількість біт  $\Phi'(t+n)$  що знаходяться у буфері у часовий відлік  $(t+n)$ , визначатиметься наступним чином [20]:

$$\Phi'(t+n) = \Phi_{\text{load}}(t+n) - \xi(t+n), \quad (4.11)$$

де  $\Phi_{\text{load}}(t+n)$  - швидкість заповнення буфера, що відповідає часовому відліку  $(t+n)$ .

При цьому, величину  $\Phi_{\text{load}}(t+n)$  може бути розраховано відповідно до наступного виразу:

$$\Phi_{\text{load}}(t+n) = \Phi'(t+n-1) + \Phi(t+n), \quad (4.12)$$

де  $\Phi'(t+n-1)$  - загальний обсяг біт, що знаходилися у вихідному буфері на момент передуючого часового відліку, тобто,  $(t+n-1)$ ;

$\Phi(t+n)$  - кількість біт, які надсилаються до буферу у момент часу  $(t+n)$ .

Відповідно до цього, вираз (4.11), що описує загальну кількість біт у буфері, можемо переписати наступним чином:

$$\Phi'(t+n) = \Phi'(t+n-1) + \Phi(t+n) - \xi(t+n), \quad (4.13)$$

тобто, з виразу (4.13) рівень пропускної здатності мережі на момент часового відліку  $(t+n)$  визначатиметься як:

$$\xi(t+n) = \Phi'(t+n-1) + \Phi(t+n) - \Phi'(t+n). \quad (4.14)$$

При цьому, як згадувалося раніше, умовами накопичування пакетів даних у буфері є:

$$\Phi'(t+n-1) > \xi(t+n). \quad (4.15)$$

Окрім цього, якщо протягом деякого часового відрізка за кожну окрему одиницю часу до буферу буде надходити обсяг біт  $\Phi(t+n)$ , величина якого буде більшою, ніж різниця між значеннями  $\Phi_{\text{load}}(t+n)$  та  $\xi(t+n)$ , виникають умови для переповнення буфера, тобто:

$$\Phi(t+n) \geq \Phi_{\text{load}}(t+n) - \xi(t+n). \quad (4.16)$$

Відповідно, при виконанні умов (4.16) передавання відеоданих у мережу унеможлиблюється, оскільки у випадку переповнення буферу його зміст виключається з розгляду, тобто, виконується обнулення буфера. У свою

чергу за таких умов для того, щоб підтримувати безперервне передавання відеоінформації у мережу, необхідно задіяти схему балансування бітової швидкості.

#### 4.3.2 Використання вихідного буферу передавача для контролю динаміки рівня пропускної здатності мережі

Для використання схеми балансування бітової швидкості, коли виконується умова (4.16), робочий обсяг буферу  $V_{\text{wrk}}$ , який з самого початку дорівнював  $V_{\text{buf}}$ , має бути попередньо обмежено до значення у діапазоні від  $0,6V_{\text{buf}}$  до  $0,7V_{\text{buf}}$ , як це показано рис. Це зумовлюється необхідністю резервування деякого часу  $\Delta t$  для того, щоб забезпечити можливість реакції.

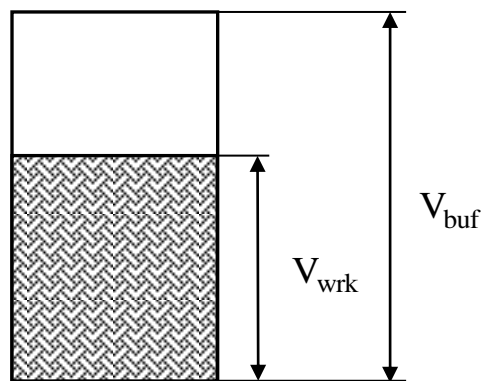


Рисунок 4.4 – Обмеження робочого об'єму вихідного буферу для резервування часу реакції

У свою чергу, протягом часу  $\Delta t$  система балансування бітової швидкості має забезпечити величину бітової швидкості  $\Phi(t)$  відеопотоку на рівні, що не перевищує поточну величину пропускної здатності  $\xi(t)$  мережі.

При цьому, очевидно, що у будь-який довільний відлік часу  $(t+n)$  переповнення вихідного буферу буде мати місце тоді, коли у ході передавання пакетів відеоінформації інтенсивність  $\Phi$  її надходження буде більшою, ніж поточна величина  $\xi(t+n)$ , (тобто справедливою буде умова (4.16)).

Відповідно, можливість передавання пакетів до мережі також буде обмеженою, адже у будь-який часовий відлік  $(t + n)$  до каналу може бути надіслано обсяг даних  $\Phi(t + n)$ , що є меншим, ніж значення  $\xi(t + n)$ :

$$\Phi(t + n) \leq \xi(t + n). \quad (4.17)$$

Вираз (4.17), таким чином, може інтерпретуватися як одна з ознак раціональності процесу передавання потоку відеокадрів.

При цьому, у рамках опосередкованого підходу до оцінки поточного рівня пропускної спроможності мережі, за кожен елементарний момент часу трансляції  $(t + n)$ , протягом деякий обсяг відеоданих підлягає кодуванню, пакетуванню передаванню у буфер з наступним надходженням до мережі, виконується опит контролеру вихідного буферу.

Якщо при цьому виявлено, що рівень заповнення буферу перевищив максимальне встановлене робоче значення  $V_{\text{wrk}}$ , тобто:

$$\Phi_{\text{load}} > V_{\text{wrk}}, \quad (4.18)$$

вираз (4.18) являтиме собою умову існування дисбалансу між бітовою швидкістю  $\Phi$  потоку стиснених відеокадрів та поточним рівнем пропускної спроможності. Іншими словами, справедливість нерівності (4.18) може сприйматися як ознака необхідності активації системи балансування.

Тобто, шляхом вимірювання величини завантаженості  $\Phi_{\text{load}}$  вихідного буферу, та перевірки умови (4.18), здійснюється опосередкований контроль динаміки рівня пропускної здатності у довільний часовий відлік  $(t + n)$ .

Таким чином, для забезпечення інтеграції механізмів контролю рівня бітової швидкості  $\Phi$  потоку кодованих відеокадрів доцільною для використання є опосередкована оцінка динаміки змін пропускної спроможності мережі шляхом контролю характеру та рівня  $\Phi_{\text{load}}$  завантаження вихідного буферу передавача.

Перевагами такого підходу є:

- можливість оперативної оцінки характеру зміни величини пропускної спроможності мережі;
- відсутність необхідності використання додаткових механізмів або ускладнення трафіку.

### 4.3.3 Порядок дій у ході опосередкованої оцінки завантаженості буферу

Нехай кодер джерела відеоданих генерує потік кадрів, що характеризується бітовою швидкістю  $\Phi(t+n)$ , яка є змінною за визначенням. Разом з тим, змінною у часі є також величина  $\xi(t+n)$ . За цих умов процес безпосередньо передавання відео потоку міститиме у собі такі кроки, як:

1. Початок процесу трансляції відеоінформації. При цьому, починаючи з відліку часу  $t$ , до буферу передавача з періодом  $(t+1) - t$ , надсилається деяка кількість  $\Phi(t)$  стисненої відеоінформації, як ілюструє рисунок 4.5. Синхронно з перенаправленням кодованих даних до буферу, здійснюється опитування його контроллера з наступним зчитуванням поточної величини  $\Phi_{load}(t)$ .

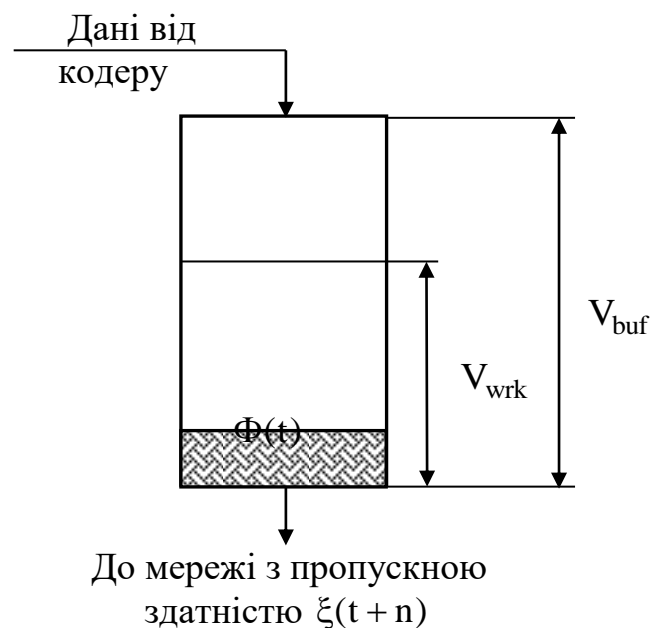


Рисунок 4.5 – Приклад заповнення буферу на початку процесу трансляції (часовий відлік  $t$ ) кодованої відеоінформації

Зрозуміло, що у зазначених умовах попередньо не виконувалося передавання даних у буфер. Відтак,  $\Phi(t-1) = 0$ . Звідси за виразом (4.12) маємо  $\Phi_{load}(t) = \Phi(t)$ . Таким чином, у момент початку трансляції величина

завантаження  $\Phi'(t)$  вихідного буферу передавача залежатиме виключно від кількості біт, які надходять до нього з кодеру.

## 2. Відстежування ступеню завантаження буферного пристрою.

Кодована відеоінформація обсягом  $\Phi(t)$ , яку попередньо було надіслано до вихідного буферу, має бути далі надіслана до каналу мережі за проміжок часу, що не перевищує величину  $(t + 1) - t$ .

Також при цьому виконується процедура оцінювання поточного ступеню завантаженості буферу.

У ході цього фіксується поточний рівень завантаженості та порівнюються значення величин  $\Phi_{\text{load}}(t)$  та  $\Phi_{\text{load}}(t-1)$ .

У підсумку цього, якщо рівень завантаженості буферу не відповідає умові (4.18), пакетовані дані, що знаходяться у ньому на поточний момент часу, надсилаються у мережу без необхідності виконання будь-яких додаткових операцій відносно кодеру та самого буферу.

У свою чергу, на наступному кроці, що відповідає моменту часу  $(t + 1)$ , до буферу надходить деякий наступний обсяг  $\Phi(t)$  кодованої відеоінформації.

Відтак, якщо далі під час надсилання потоку стиснених відеокадрів на часовий відлік  $(t + n)$  до буферного пристрою буде переміщено кількість біт  $\Phi(t + n)$  кодованої відеоінформації, що є більшою, ніж поточна величина  $\xi(t + n)$ , відповідно, до каналу можливим є передати не більш, ніж  $\xi(t + n)$  біт.

При цьому, у буфері буде знаходитися обсяг біт, рівний  $\xi(t + n) - \Phi(t + n)$ . Звідси виходить, що на момент часового відліку  $(t + n + 1)$  рівень завантаженості вихідного буферного пристрою  $\Phi_{\text{load}}(t + n + 1)$  складатиметься як з біт  $\Phi(t + n + 1)$ , що надходять з виходу кодеру, так і з величини  $\xi(t + n) - \Phi(t + n)$ .

Даний процес ілюструє рисунок 4.6.



Рисунок 4.6 – Схематичне зображення процесу заповнення буферного пристрою, спричинене перевищенням бітової швидкості кодованого відео поточного рівня пропускнуої здатності мережі

3. Ініціалізація та застосування механізмів балансування бітової швидкості.

Якщо попередньо у наслідок трансляції кодової відеоінформації до мережі у деякий момент  $(t+n)$  спостерігається справедливість умов (4.18), тобто, має місце завантаження буферу до максимального робочого рівня  $V_{wrk}$ , або його перевищення, до мережі, відповідно надсилається обсяг даних, рівний  $\xi(t+n)$ .

Таким чином, на момент наступного часового відліку, тобто,  $(t+n+1)$ , рівень бітової швидкості  $\Phi(t+n+1)$  надходячих з виходу кодеру стиснених відеоданих має бути зменшено. Відтак, буде задіяно механізм балансування бітової швидкості на базі субдискретизації просторового опису спектральних фрагментів  $S_{(i,j)}^{(u)}$  кадру. У підсумку цього, на час  $(t+n+1)$  буферний пристрій міститиме у собі обсяг даних, рівний  $\Phi(t+n+1)_{subd} + \xi(t+n) - \Phi(t+n)$ .

У свою чергу, після цього здійснюється оцінювання ступеню завантаженості  $\Phi_{\text{load}}(t+n+1)$  буферного пристрою з наступним порівнянням значень  $\Phi_{\text{load}}(t+n+1)$  та  $\Phi_{\text{load}}(t+n)$ .

Далі, якщо у наслідок застосування механізму субдискретизації просторового опису спектральних фрагментів  $S_{(i,j)}^{(u)}$  кадру не було досягнуто зменшення рівня завантаженості буферу, протягом наступних часових відліків, починаючи з  $(t+n+2)$ , для створення умов досягнення балансу між бітовою швидкістю відео потоку та динамікою пропускної спроможності мережі виконується послідовна зміна параметрів балансуючого механізму.

При цьому, такий процес зміни параметрів має циклічний ітераційний характер, та містить у собі такі загальні технологічні кроки, як:

- збільшення обсягу бітових площин  $S(w)_{(i,j)}^{(u)}$  спектральних фрагментів  $S_{(i,j)}^{(u)}$  кадру, які підлягають субдискретизації;
- обчислення та корегування поточного рівня  $D$  помилки, що вноситься під час балансування.

Загальний перелік дій щодо кодованої відеоінформації, яка надходить на обробку, може бути визначено виходячи з зазначених далі умов.

4.3.4 Умови, що визначають перелік дій, які може бути виконано відносно стисненої відеоінформації, яка надходить на обробку

Однією з типових умов обробки відеоінформації є перевищення робочого обсягу  $V_{\text{wrk}}$  буферу у момент  $(t+n+1)$ , хоча ступінь завантаженості  $\Phi_{\text{load}}(t+n+1)$  порівняно з даною величиною для часового відліку  $(t+n)$  є меншою. Це еквівалентно наступній системі виразів [20]:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{load}}(t+n+1) > V_{\text{wrk}}; \\ \Phi_{\text{load}}(t+n+1) < \Phi_{\text{load}}(t+n). \end{cases} \quad (4.19)$$

У зазначених умовах обрані опції механізму балансування бітової швидкості у момент  $(t+n+1)$  буде збережено до наступного часового відліку  $(t+n+2)$ .

Наступними умовами, що можуть виникати у ході обробки відео потоку, є перевищення робочого обсягу  $V_{\text{wrk}}$  буферу у момент  $(t + n + 1)$ , як наслідок застосованих опцій балансування, з одночасним збільшенням ступеню завантаженості буферного пристрою відносно передуючого часового відліку  $(t + n)$ .

Дані умови може бути описано наступним чином [20]:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{load}}(t + n + 1) > V_{\text{wrk}}; \\ \Phi_{\text{load}}(t + n + 1) > \Phi_{\text{load}}(t + n). \end{cases} \quad (4.20)$$

У цьому випадку необхідно скоротити бітову швидкість стиснених відеоданих, що надходять до буферу. Для цього опції кодування відеоінформації корегуються таким чином, щоб забезпечувалося зменшення величини  $\Phi(t + n + 2)$  для відліку часу  $(t + n + 2)$ .

Виходячи з того, на якому саме етапові балансування бітової швидкості склалися умови, зазначені виразом (4.20), тут може бути застосовано:

- розширення кроку субдискретизації;
- зміна параметрів кодування на рівні базової технології.

Ще одними умовами обробки відео інформаційного потоку є наступні:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{load}}(t + n + 1) \leq V_{\text{wrk}}; \\ D > D_{\text{sc}}, \end{cases} \quad (4.21)$$

тобто, на момент часу  $(t + n + 1)$  досягнуто скорочення рівня завантаженості  $\Phi(t + n + 1)$  вихідного буферу передавача до значення, що не перевищує робочий обсяг  $V_{\text{wrk}}$  буферу. Водночас, величина  $D$  внесеної похибки у наслідок застосування механізму балансування бітової швидкості перевищує значення  $D_{\text{sc}}$ , яке є гранично допустимим за умовами надання сервісу та, у свою чергу, напряду визначається величиною  $Q_{\text{sc}}$ .

У свою чергу, коли справедливими є умови (4.21), буде використовуватися механізм корекції загальної помилки.

#### 4.4 Висновки за розділом

Показано, що у загальному випадку для інтеграції механізму балансування бітової швидкості відео інформаційного потоку відносно рівня поточної пропускної здатності мережі може бути використано:

- пряму оцінку величини пропускної спроможності з використанням тестових пакетів відомого розміру;
- опосередковану оцінку зміни рівня пропускної здатності за рівнем завантаженості буферу передавача.

Разом з тим, підходу з використанням прямої оцінки пропускної здатності мережі властива похибка вимірювання, що може спричинити некоректне функціонування балансуючого механізму.

Тому більш доцільним для застосування є підхід, що орієнтований на контроль динаміки рівня завантаженості вихідного буферного пристрою.

Для реалізації даного підходу необхідно обмежити робочий рівень буферу для того, щоб:

- розглядати верхню межу попередньо обмеженого робочого об'єму буферу як умовний показник, досягнення або перевищення якого фактичним рівнем завантаженості можна було розцінювати як умовою для ініціалізації алгоритму балансування бітової швидкості;
- забезпечити резервний проміжок часу, протягом якого може бути збалансовано бітову швидкість кодованого відеоінформаційного потоку відносно динаміки пропускної спроможності.

Необхідність резервування часу зумовлюється тим, що процедура балансування являє собою ітераційний процес.

Даний процес може містити у собі різну кількість кроків балансування. Це залежить від особливостей змісту відеоінформації, що надходить до буферу, рівня її поточної та попередньої бітової швидкості, а також рівня бітової швидкості у наступні часові відліки, динаміки змін рівня пропускної здатності.

При цьому, у загальному випадку передбачається ряд основних режимів роботи алгоритму балансування, зокрема:

- в умовах зменшення рівня завантаженості буферу на фоні перевантаження робочого обсягу;
- зростання завантаженості буферу одночасно з перевищенням його робочого рівня;

- в умовах перевищення допустимого рівня внесеної помилки при забезпеченому балансу бітової швидкості та рівня пропускної здатності.

## ВИСНОВКИ

Відповідно умов технічного завдання, у ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено особливості передавання відеоінформації, як специфічного типу трафіку, та одного зі складників мультимедіа. Досліджено пов'язану з цим проблематику, що зумовлена, з одного боку, природою відеоданих та існуючими вимогами до якості реконструйованої відеоінформації а з іншого боку - обмеженнями, що спричинені неможливістю гарантування необхідного рівня пропускну́ї спроможності та динамікою її змін.

Доведено, що у зазначених умовах застосування технологій стиснення відеоінформації, як ключового механізму забезпечення можливості передавання трафіку відеоданих мережевими каналами, не достатньо для того, щоб досягти необхідного рівня якості реконструйованого відео, а у ряді випадків – взагалі для того, щоб мати змогу трансляції відео контенту мережею. Натомість обґрунтовано доцільність застосування методів балансування бітової швидкості відео відносно динаміки змін пропускну́ї спроможності мережі.

У свою чергу, механізми балансування бітової швидкості у даному випадку можуть розглядатися як своєрідна надбудова над базовим кодеком, що залежно від поточного рівня пропускну́ї спроможності змінюють ті чи інші параметри кодування.

Показано, що для випадку відеотрафіку одним з найбільш ефективних підходів до балансування бітової швидкості є використання механізму субдискретизації сегментів слайдів відеокадру.

Сутність даного механізму полягає у виключенні зі структурного опису сегментів тих бітових площин, яким відповідає мінімальний рівень похибки. Перевагами даного підходу є:

- можливість оперативної (у реальному масштабі часу) зміни бітової швидкості відеопотоку;
- можливість гнучко регулювати дискретний крок зміни бітової швидкості, тим самим створюючи умови для мінімізації внесеної помилки;
- наявність засобів корегування рівня помилки, внесеної у ході балансування бітової швидкості;

- виконання процедури балансування на рівні окремих слайсів, таким чином, навіть тоді, коли суттєво знизити рівень внесеної помилки не вдається, її вплив локалізується виключно частиною кадру, за рахунок цього зберігається візуальна якість відеоряду.

Для відстежування змін пропускної здатності мережі використано опосередкований алгоритм оцінювання, у рамках якого фіксується рівень наповненості буферу передавача.

При цьому, стандартизовані механізми зміни бітової швидкості, що входять до складу базової технології кодування, можуть розглядатися як додаткові засоби при реалізації балансуючого механізму.

Отже, усі пункти технічного завдання виконано повністю.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Чемпен Н., Чемпен Д. Цифровые технологии мультимедиа. – М.: Вильямс, 2006. – 624 с.
2. QuickTime. Apple Support [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://support.apple.com/kb/dl837?locale=ru\\_RU](https://support.apple.com/kb/dl837?locale=ru_RU)
3. Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.Megabook.ru>
4. Digital Around The World – Data Reportal – Global Digital Insights [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://datareportal.com/global-digital-overview>
5. Культура мультимедиа : учебное пособие / О.В. Шлыкова. - М. : ФАИР-пресс, 2004
6. Sanders W. Learning Flash media server 3 / W. Sanders. – М. : O'Reilly Media, 2012. – 486 с.
7. The Q-live game network [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.stre.am/>
8. New Open Industry Standard Introduced for Connecting Next-Generation VR Headsets to PCs, Other Devices [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/07/17/1538342/0/en/New-Open-Industry-Standard-Introduced-for-Connecting-Next-Generation-VR-Headsets-to-PCs-Other-Devices.html>
9. Баранник В.В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков – Х.: ХУПС, 2010. – 234 с.
10. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 3-е изд. – СПб. : Питер, 2006. – 958 с.
11. Качество обслуживания в операторских сетях [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.opennet.ru/docs/RUS/qos\\_oper/](https://www.opennet.ru/docs/RUS/qos_oper/)
12. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М. : ДИАЛОГ – МИФИ, 2003. – 384 с.
13. Ричардсон Ян. H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-Generation Multimedia / Ян Ричардсон. – Город. : Издательство, 2005. – 368 с.

14. Беляев Е.А, Тюрликов А.М. Управление скоростью и ошибкой кодирования в системе сжатия и передачи видеоинформации с ограничениями на память передающего и принимающего устройств // Компьютерная оптика. 2007. - Т.31. №2. С.69-76.
15. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1073 с.
16. Айфичер Эммануил С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 992 с.
17. Shi, Yun Q. Image and video compression for multimedia engineering: fundamentals, algorithms, and standards / Yun Q Shi, Huifang Sun.
18. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
19. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. – М.: Вузовская книга, 2011. – 320 с.
20. Barannik, V., Kharchenko, N., Tverdokhlebov, V., Kulitsa, O.: The issue of timely delivery of video traffic with controlled loss of quality. In 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), pp. 902-904 (2016). DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452220