

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

На правах рукопису

Попович Павло Васильович

УДК 621.397.13

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ВІДЕОПОТОКОМ У  
СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ ЗА КРИТЕРІЄМ ЯКОСТІ  
ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
Абакумов Валентин Георгійович,  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	9
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ</b>	
<b>ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....</b>	<b>17</b>
1.1 Принципи формування та передавання цифрових телевізійних сигналів.....	17
1.2 Вплив аналого-цифрового перетворення телевізійного сигналу та формування транспортного потоку на якість відеозображення.....	19
1.2.1 Погіршення якості відеозображення внаслідок дискретизації і квантування телевізійного сигналу.....	19
1.2.2 Погіршення якості відеозображення внаслідок скорочення надлишковості цифрового відеопотоку відповідно до стандарту MPEG-2.....	22
1.2.3 Передавання інформації про параметри відеопотоку.....	30
1.3 Залежність якості відеозображення від середовища розповсюдження.....	31
1.4 Аналіз впливу приймання цифрового телевізійного сигналу на якість відеозображення.....	35
1.5 Способи керування транспортним потоком у кодері MPEG.....	44
1.6 Критерії якості відеозображення в системах цифрового телебачення.....	50
Висновки до розділу.....	53
<b>РОЗДІЛ 2. ВИБІР МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ</b>	
<b>ЯКІСТЮ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВІДЕОКОНТЕНТУ.....</b>	<b>55</b>
2.1 Спотворення, обумовлені особливостями кодування цифрового телевізійного сигналу.....	55
2.2 Оцінювання ступеня впливу спотворень зображення на його сприйняття.	58
2.3 Характеристики та межі застосування методів суб'єктивного оцінювання якості зображень в системах ЦТБ.....	63
2.3.1 Призначення суб'єктивних методів вимірювання якості.....	64

2.3.2	Метод шкали погіршення з подвійним подразненням.....	65
2.3.3	Метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням.....	66
2.3.4	Методи категорійного судження.....	67
2.3.5	Інші методи суб'єктивного оцінювання якості зображень.....	68
2.3.6	Обробка результатів суб'єктивного оцінювання якості.....	70
2.4	Особливості застосування методів об'єктивного вимірювання якості зображень в системах ЦТБ.....	71
2.4.1	Пікове відношення сигнал/шум.....	72
2.4.2	Середньоквадратична абсолютна різниця.....	72
2.4.3	Середня різниця.....	73
2.4.4	Індекс структурної схожості зображення.....	74
2.4.5	Міра якості відео на основі дискретного косинусного перетворення.....	77
2.4.6	Алгоритм визначення якості зображення на основі методу ледь помітних відмінностей Сарнова.....	79
2.4.7	Інші методи об'єктивного вимірювання якості зображень.....	81
2.4.8	Зв'язок між суб'єктивними та об'єктивними оцінками якості.....	84
2.5	Вибір об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень.....	88
	Висновки до розділу.....	91
<b>РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ВІДЕОКОНТЕНТУ НА ЕТАПАХ ФОРМУВАННЯ ТА ПЕРЕДАВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ПРОГРАМ.....</b>		
3.1	Технологічний процес виробництва цифрових телевізійних програм.....	93
3.2	Особливості застосування транскодера без зворотного зв'язку для керування відеопотоком.....	97
3.2.1	Математичний опис функції керування транскодером без зворотного зв'язку.....	100
3.2.2	Результати практичної реалізації транскодера без зворотного зв'язку....	106
3.3	Концепція транскодера зі зворотним зв'язком для керування відеопотоком за критерієм якості відеозображення.....	108

3.4 Класифікація відеозображень та їх ранжування за вмістом.....	111
3.4.1 Оцінювання якості відеозображень суб'єктивним методом.....	111
3.4.2 Оброблення та аналіз результатів експерименту.....	115
3.4.3 Застосування ранжування відеозображень для керування якістю відеоконтенту.....	118
3.5 Алгоритм роботи каскадного транскодера зі зворотним зв'язком з різними класами відеозображень.....	119
3.6 Удосконалення системи керування якістю відеоконтенту за критерієм якості сформованого для передавання зображення.....	122
Висновки до розділу.....	126
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТИВНИМИ МЕТОДАМИ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....</b>	<b>128</b>
4.1 Експериментальне дослідження якості відеозображень.....	128
4.1.1 Опис програмного забезпечення для вимірювання якості.....	128
4.1.2 Аналіз результатів експерименту.....	129
4.2 Оцінювання кореляції між результатами об'єктивних та суб'єктивних вимірювань якості.....	134
4.2.1 Узгодження діапазонів розрахункових значень об'єктивних та суб'єктивних метрик.....	134
4.2.2 Оцінювання кореляції між об'єктивними та суб'єктивними метриками із застосуванням коефіцієнта Пірсона.....	136
4.2.3 Визначення об'єктивної метрики, що найбільше відповідає суб'єктивним оцінкам якості.....	142
4.3 Апроксимація залежності показника якості для різних класів ВП від швидкості відеопотоку.....	143
4.4 Визначення граничних показників якості для кожного класу ВП.....	145
4.5 Визначення функції керування транскодера за результатами експериментальних досліджень.....	146

4.6 Швидкодія каскадного транскодера зі зворотним зв'язком.....	153
4.7 Перспективи впровадження запропонованої системи.....	157
Висновки до розділу.....	161
Висновки.....	162
Список використаних джерел.....	165
Додаток А. Результати суб'єктивного оцінювання тестових відеопослідовностей у програмі MSU Perceptual Video Quality.....	174
Додаток Б. Результати вимірювання об'єктивних метрик PSNR, VQM та MS- SSIM для тестових відеопослідовностей у програмі MSU Video Quality Measurement Tool.....	180

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСБ	– апаратно-студійний блок;
АЦП	– аналого-цифровий перетворювач;
АЧХ	– амплітудно-частотна характеристика;
ВП	– відеопослідовність;
ГЧЗ	– груповий час запізнювання;
ДКП	– дискретне косинусне перетворення;
КТЗЗ	– каскадний транскодер зі зворотним зв'язком;
ЛПВ	– ледь помітні відмінності;
МККР	– Міжнародний консультативний комітет з радіозв'язку;
ПД	– приймач-декодер;
СЦТМ	– система цифрового телевізійного мовлення;
ТВ	– телевізійний;
ТВЧ	– телебачення високої чіткості;
ФНЧ	– фільтр низьких частот;
ФПКЧ	– функція просторової контрастної чутливості;
ЦАП	– цифро-аналоговий перетворювач;
ЦТБ	– цифрове телебачення;
APSK	– Amplitude And Phase-Shift Keying, амплітудно-фазова маніпуляція;
ATSC- 8VSB	– Advanced Television Systems Committee, система наземного телемовлення з восьмипозиційною модуляцією й частково подавленою бічною смугою;
AVC	– Advanced Video Coding, покращене кодування відеозображення;
BER	– Bit Error Ratio, частота помилкових біт;
BFM	– Brightness Flicking Metric, метрика мерехтіння між кадрами;
COFDM	– Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex, кодована множина ортогонально розділених частот;

- DAB-T – Digital Audio Broadcasting – Terrestrial, цифрова система наземного цифрового радіомовлення);
- DFM – Drop Frame Metric, метрика пропущених кадрів;
- DSCQS – Double Stimulus Continuous Quality Scale, метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням;
- DSIS – Double Stimulus Impairment Scale, метод шкали погіршення з подвійним подразненням;
- DVB – Digital Video Broadcasting, цифрове телевізійне мовлення;
- DVB-C – Digital Video Broadcasting-Cable, стандарт цифрового кабельного телевізійного мовлення;
- DVB-DSNG – Digital Video Broadcasting – Digital Satellite News Gathering, цифрова супутникова відео журналістика;
- DVB-S – Digital Video Broadcasting – Satellite, цифрове телевізійне супутникове мовлення;
- DVB-T – Digital Video Broadcasting-Terrestrial, цифрове телевізійне наземне мовлення;
- EBU – European Broadcasting Union, Європейський союз телерадіомовлення;
- HDTV – High Definition Television, телебачення високої чіткості;
- ISDB-T – Integrated Service Digital Broadcasting, цифрове наземне телевізійне мовлення з інтеграцією служб;
- ISO – International Organization for Standardization, Міжнародна організація стандартизації;
- ITU – International Telecommunication Union, Міжнародний союз електрозв'язку;
- JND – Just Noticeable Differences, ледь помітні відмінності;
- MPEG – Motion Picture Experts Group, експертна група з рухомих зображень;
- MPEG-TS – Motion Picture Experts Group - Transport Stream, транспортний потік MPEG;

- MSAD – Mean Square Absolute Difference, середньоквадратична абсолютна різниця;
- MS-SSIM – Multi-Scale Structure Similarity Index Measure, багатомасштабний індекс структурної схожості зображення;
- NE – Noise Estimation Metric, метрика оцінки рівня шуму;
- OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексування з ортогональним частотним розділенням сигналів;
- PAL – Phase-Alternating Line, європейська система аналогового кольорового телебачення;
- PQR – Picture Quality Rating, оцінка якості зображення;
- PSK – Phase Shift Keying, цифрова фазова маніпуляція;
- PSNR – Peak Signal to Noise Ratio, пікове відношення сигнал/шум;
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation, квадратурно-амплітудна маніпуляція;
- QPSK – Quadrature Phase-Shift Keying, квадратурно-фазова маніпуляція;
- SCD – Scene Change Detector, метрика моментів зміни сцени;
- SDTV – Standard-Definition Television, телебачення стандартної чіткості;
- SECAM – Séquentiel Couleur Avec Mémoire, послідовний колір із пам'яттю, система аналогового кольорового телебачення, вперше використана у Франції;
- SSIM – Structure Similarity Index Measure, індекс структурної схожості зображення;
- VQM – Video Quality Measurement, вимірювання якості відео

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В сучасному світі більшу частину інформації людина отримує через органи зору. Телебачення стало тим засобом телекомунікацій, без якого зараз важко уявити сучасне суспільство. Зараз телебачення здійснює тотальний перехід на цифрові технології формування, передавання та приймання сигналу.

Технологічний процес передавання цифрових телевізійних програм до кінцевого споживача складається з таких етапів, як підготовка відеоконтенту у відповідних студіях, аналого-цифрове перетворення телевізійного сигналу, кодування цифрового сигналу відповідно до стандартів MPEG-2/H.264 (AVC), контроль якості сформованого для передавання аудіовізуального контенту, формування транспортного потоку для підготовки цифрового телевізійного сигналу до передавання через канали зв'язку та передавання цифрового телесигналу засобами систем ефірного, супутникового та кабельного телебачення (DVB-T/T2, DVB-S/S2, DVB-C).

На етапі формування цифрових телевізійних програм за якість відеозображення, призначеного для кінцевого користувача, відповідає перш за все інженерний персонал телевізійної студії, де відбувається створення відповідного контенту та підготовка його до передавання каналами зв'язку. Інженер встановлює і контролює відповідні параметри кодера, який здійснює формування відеопотоку, адаптованого до параметрів каналу зв'язку провайдера телекомунікаційних послуг, що забезпечує доставку цифрового телевізійного контенту до споживача.

Декілька років тому, коли цифрове телебачення лише починало свій шлях, розвиток елементної бази телевізійних приймачів уже дозволяв їх виробникам реалізувати ряд технологій, здатних покращувати якість відображуваного відеоконтенту. До таких технологій належать підвищення якості відтворення синього і зеленого кольорів на світлих ділянках зображення, збільшення глибини оброблених кольорів, збільшення кількості кадрів для

усунення дискретності швидкого руху об'єктів, підвищення контрастності зображення, застосування фільтрації елементів зображення для очищення від шумів, масштабування, підвищення чіткості тощо. Використання цих технологій призвело до зростання швидкості потоку відеоданих в середині телевізійного приймача щонайменше удвічі.

Узагальнюючи набутий за останні роки досвід у сфері цифрового телебачення, зокрема, автором цієї роботи, можна стверджувати, що якість відеозображення, яке сприймає глядач, залежить не лише від швидкості потоку відеоданих на виході відеокодера, але й від вмісту самого зображення. За однакових параметрів відеопотоку глядач гірше сприймає зображення, які містять рухомі сцени, широкий динамічний діапазон сигналу яскравості, зміну сцен, масштабування та панорамування (наприклад, трансляції спортивних змагань, концертів), порівняно з відеозображеннями, що не містять динаміки (наприклад, під час перегляду художнього фільму чи телепрограми з ведучим на передньому плані). Це підтверджено результатами суб'єктивного оцінювання якості, за якими тестові відеопослідовності, що мали однакові параметри відеопотоку та містили рухомі сцени, отримали від експертів переважно задовільні оцінки якості, тоді як відеопослідовності, що не містили динаміки, було оцінено експертами переважно оцінкою «добре».

В цій роботі висвітлено питання вдосконалення процесу управління якістю цифрових телевізійних програм із використанням критерію якості відеозображення, яке передають існуючими засобами систем ефірного, супутникового та кабельного телебачення до кінцевого споживача. До написання дисертації спонукало, з одного боку недостатнє висвітлення питань застосування автоматизованих методів керування якістю відеозображень в процесі передавання цифрових телевізійних програм, а з іншого боку – низка переваг застосування таких методів порівняно з керуванням якістю за допомогою інженерного персоналу телестудії.

Питання формування цифрового телевізійного сигналу (аналого-цифрове перетворення та кодування цифрового сигналу) широко розкрито у працях

В. Джаконії [1], А. Смірнова [2], Р. Бикова [3], В. Карякіна [4], Г. Мамчєва [5], Я. Річардсона [6] тощо. Досвід закордонних спеціалістів з цих питань узагальнено в Рекомендаціях Міжнародного інституту електрозв'язку (МІЕ) ІТУ-Р ВТ.601-7 [7]. Детальну класифікацію та аналіз методів контролю і оцінювання якості сформованого телевізійного зображення, яке передають засобами систем цифрового телебачення, виконано в роботах В. Джаконії [1], Г. Мамчєва [5], В. Карякіна [4], Шу Ванга (Zhou Wang) [8], А. Бовіка [8], Сяо Фєнга (Xiao Feng) [9], Е. Сімончеллі [8]. Досвід закордонних спеціалістів з цих питань узагальнено в Рекомендаціях МІЕ ІТУ-Р ВТ.500-12 [10].

Особливостям реалізації керування швидкістю потоку відеоданих, що є складовою частиною транспортного потоку, присвячені праці Я. Річардсона [6], Ш. Лі (Li Z.) [11], В. Гао (Gao W.) [11], Соу Ю.-С. (Saw Y.-S.) [12], де описано методи регулювання швидкості бітового потоку для запобігання переповнювання чи спустошення буфера кодера MPEG-2/MPEG-4/H.264. Недоліками відомих методів керування швидкістю потоку відеоданих є те, що вони не враховують якість зображення у відеопотоці, в якому здійснюють керування бітовою швидкістю.

Оскільки на етапі створення телевізійних програм важливим фактором є забезпечення однакового за якістю сприйняття відеозображень з різною динамікою, то вдосконалення методів керування цифровим відеопотоком в залежності від вмісту та якості відеозображення телевізійної програми, що формується для подальшого передавання до споживача, є актуальною науковою задачею.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Частина досліджень, висвітлених у дисертаційній роботі, проведено згідно з планами науково-дослідної роботи кафедри звукотехніки та реєстрації інформації і Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час виконання держбюджетної роботи М/82-2009 «Методи та технічні засоби об'єктивного та суб'єктивного оцінювання та вимірювання якості зображень у системах

цифрового телевізійного мовлення» (номер державної реєстрації №0109U003907), де автор брав участь як відповідальний виконавець.

### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою* дисертаційного дослідження є поліпшення якості зображення телевізійного відеоконтенту шляхом удосконалення методів керування відеопотоком за критерієм якості відеозображень на етапі підготовки та передавання телевізійних програм.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження необхідно вирішити такі *завдання*:

- дослідити фактори, які можуть викликати спотворення відеозображення під час формування, передавання та приймання цифрових телевізійних програм, з'ясувати, які спотворення, викликані особливостями кодування цифрового телевізійного сигналу, є найбільш суттєвими для суб'єктивного сприйняття та розробити рекомендації щодо методики суб'єктивного оцінювання якості відеозображень;

- на основі аналізу методів суб'єктивного та об'єктивного оцінювання якості зображень запропонувати критерій оцінювання якості відеозображень в системах цифрового телебачення, що найбільше відповідає суб'єктивним оцінкам якості;

- розробити метод керування відеопотоком шляхом застосування відеотранскодера зі зворотним зв'язком та введення в коло зворотного зв'язку алгоритму оцінювання якості відеозображень за запропонованим критерієм;

- розробити узагальнену класифікацію (ранжування) відеозображень за їх вмістом, шляхом аналізу відомих відеотранскодерів розробити алгоритм транскодування відеозображень різних класів для автоматичного керування якістю відеоконтенту;

- розробити математичну модель відетранскодера зі зворотним зв'язком шляхом синтезу функції керування транскодера, використовуючи результати експериментальних досліджень якості зображення тестових відеопослідовностей різних класів об'єктивним та суб'єктивним методами;

– розробити структурну схему відеотранскодера та рекомендації щодо технічної реалізації його основних вузлів, розробити систему керування якістю відеоконтенту за критерієм якості сформованого для передавання зображення та підтвердити її працездатність за допомогою експериментальних досліджень.

*Об'єктом дослідження* є процес підготовки та передавання телевізійних програм в системах цифрового телевізійного мовлення.

*Предметом дослідження* є методи та технології створення відеоконтенту для систем цифрового телебачення (ЦТБ) з урахуванням якості відеозображення, яке сприймає глядач.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань під час теоретичних досліджень використано основні положення і методи теорії радіотехнічних та телевізійних пристроїв і систем, теорії оброблення сигналів, кореляційного та регресійного аналізу, математичної статистики. Експериментальні дослідження проведено на основі натурного експерименту та з використанням комп'ютерного моделювання за допомогою прикладних програмних пакетів.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано критерій оцінювання якості відеозображень у системах цифрового телебачення, який на відміну від відомих ґрунтується на максимізації кореляції об'єктивних метрик та суб'єктивних оцінок якості, що дозволяє побудувати систему автоматичного керування якістю відеоконтенту на етапах підготовки та передавання телепрограм.

2. Розроблено новий метод керування відеопотоком, оснований на застосуванні у технологічному процесі виробництва телепрограм системи автоматичного керування якістю відеоконтенту, в якій, на відміну від відомих, використано відеотранскодер зі зворотним зв'язком, що дозволяє змінювати бітову швидкість відеопотоку відповідно до виміряної якості сформованого відеозображення.

3. Запропоновано математичну модель відеотранскодера зі зворотним зв'язком, яка відрізняється від відомих адаптивною зміною глобального

коефіцієнта квантування відеопотоку залежно від якості отриманого відеозображення.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблений метод керування відеопотоком дозволяє поліпшити якість підготовленого для передавання відеозображення, що містить динамічні сцени, шляхом запобігання появи артефактів, помітних на екрані за стандартних умов відтворення зображення, за рахунок узгодження швидкості бітового потоку та помітності спотворень на зображенні.

2. Розроблені структура та алгоритм роботи транскодера зі зворотним зв'язком дозволяють реалізувати його із застосуванням стандартних апаратних засобів формування первинних відеопотоків у системах цифрового телебачення з часом оброблення кадру, що не перевищує 20 мс.

3. Запропонована система автоматичного керування якістю відеоконтенту в 6 разів перевищує швидкодію системи, в якій керування якістю відеоконтенту здійснює кваліфікований інженерний персонал телестудії.

4. Запропонована класифікація відеозображень за найбільш суттєвими ознаками (наявність руху, насиченість кольорів, зміна масштабу, панорамування, штучна природа зображення, текст, зелений фон, їх комбінація) дозволяє визначати діапазон та динаміку зміни робочих параметрів системи стиснення для забезпечення заданої якості відтворюваного зображення.

5. Для забезпечення задовільної суб'єктивної якості зображення, яке сприймають глядачі під час трансляції подій, що містять динамічні сцени, зокрема, спортивних змагань, рекомендовано здійснювати передавання відеоконтенту на швидкості бітового потоку не менше 4 Мбіт/с.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Науково-дослідному інституті Прикладної електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського під час досліджень в межах НДР М/82-2009 «Методи та технічні засоби об'єктивного та суб'єктивного оцінювання та вимірювання якості зображень у системах цифрового телевізійного мовлення»; ТОВ «Голдберрі» (телеканал Еспресо) в технологічному процесі виробництва телевізійного контенту, що підтверджено

відповідними довідками та актами про впровадження. Результати роботи також можуть бути використані в КПІ ім. Ігоря Сікорського у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю «Електроніка», спеціалізація «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем».

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно виконано основну частину теоретичних та експериментальних досліджень, викладених в дисертації. Роботи [56, 67, 74, 81] виконані самостійно. У роботах [36-37, 45, 53-55, 64-66, 69, 71-73, 75, 78, 82-83] автору належить постановка та проведення експериментальних досліджень, спільний зі співавторами аналіз результатів та формулювання висновків.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи було представлено та обговорено на 14 міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO)» (Ялта-Лівадія, 2009), «Електроніка і нанотехнології» (Київ, 2010, 2011), «Photonics-ODS 2010: міжнародна конференція з оптоелектронних інформаційних технологій» (Вінниця, 2010), «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (Севастополь, 2011), «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (Вінниця, 2011), «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС)» (2011, 2012, 2014, 2015), «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)» (Lviv-Slavske, 2012), «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (Кременчук, 2013), «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2013, 2014).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано в 21 науковій праці, а саме: 7 статей, 6 з яких опубліковано у наукових фахових виданнях та 1 стаття – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus, Ulrich`s Periodical Directory, Electronic Journals Library, РІНЦ); 14 праць у матеріалах міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень та скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 194 сторінки. Робота містить 74 рисунки, 22 таблиці, а також 2 додатки на 21 сторінці та список використаних джерел із 86 найменувань. Основний текст викладено на 157 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

Метою даного розділу є узагальнення технологій цифрового телевізійного мовлення, з'ясування факторів, які можуть викликати спотворення відеозображення під час формування, передавання та приймання цифрових телевізійних програм, що, як наслідок, можуть призводити до погіршення якості відтвореного зображення на екранах абонентських телевізійних пристроїв, і визначення можливості керування транспортним потоком у відеокодері MPEG для автоматизованого керування якістю зображення, що передається.

Знання причин спотворення відеозображень, сформованих і переданих системою цифрового телевізійного мовлення, є неодмінною умовою для визначення вузлів і блоків обладнання, в яких може здійснюватися керування якістю переданого відеоконтенту.

#### **1.1 Принципи формування та передавання цифрових телевізійних сигналів**

Для оцінки факторів, що можуть погіршувати якість зображення в системах цифрового телевізійного мовлення на етапах формування та передавання, розглянемо спрощену структурну схему процесу підготовки та передавання цифрових телевізійних програм (рис. 1.1). Сформовані в апаратно-студійних блоках (АСБ) телевізійні програми надходять на входи відеокодерів, де відбувається стиснення відеозображень і формування цифрових транспортних потоків. Стиснуті відеосигнали надходять на вхід мультиплексора для формування сумарного транспортного потоку. Транспортний потік MPEG-2 з виходу мультиплексора надходить на модулятор, який здійснює завадостійке кодування на основі коду Ріда-Соломона і згорткового коду (у випадку ефірного

та супутникового цифрового телевізійного мовлення) або лише згорткового коду (у випадку кабельного цифрового телевізійного мовлення). Після цього вихідна частота модулятора подається на високочастотний передавальний пристрій. Отже, використовуване обладнання безпосередньо впливає на якість зображення, що передається.

Обладнання наскрізного тракту цифрового телевізійного мовлення, з погляду виникнення цифрових помилок, може бути розділене на два класи:

- обладнання, квазівільне від цифрових помилок;
- обладнання, що вносить помітний рівень цифрових помилок.

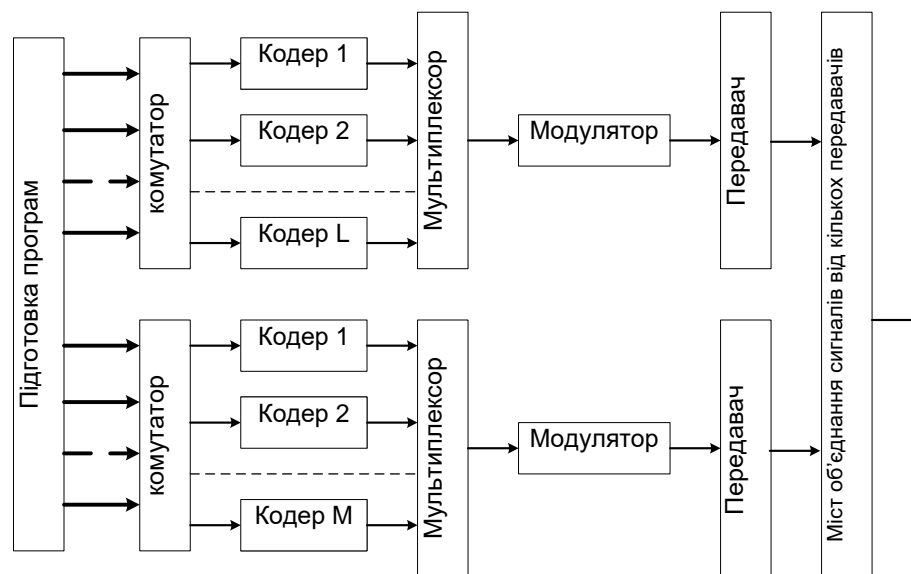


Рисунок 1.1 – Спрощена структурна схема процесу підготовки та передавання цифрових телевізійних програм

До першого класу відносять більшу частину обладнання апаратно-студійного комплексу (АСК) цифрового телецентру, а саме: відеокамери, звукозаписувальне обладнання, обладнання синхронізації, відео- та звукові мікшери тощо. До другого класу відносять обладнання, яке формує канали супутникового, ефірного чи кабельного телевізійного мовлення. Таким чином, для цифрового телевізійного мовлення необхідно мати послідовні цифрові потоки з різним ступенем захищеності від помилок. У стандарті MPEG-2 з цією метою використовують два види таких потоків:

– програмний потік (Program Stream), в якому без застосування завадостійкого кодування мультиплекують елементарні потоки відеоданих, звукових даних і даних користувача однієї телепрограми;

– транспортний потік (Transport Stream), який застосовують для подальшого завадостійкого кодування з одночасним передаванням елементарних потоків однієї або декількох телепрограм [13].

Проаналізуємо процес формування транспортного потоку з погляду факторів, які можуть спричиняти погіршення якості відеозображення.

## **1.2 Вплив аналого-цифрового перетворення телевізійного сигналу та формування транспортного потоку на якість відеозображення**

### **1.2.1 Погіршення якості відеозображення внаслідок дискретизації і квантування телевізійного сигналу**

Формування транспортного потоку починається з аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів від первинного обладнання АСБ (відеокамер, звукозаписувального обладнання, обладнання синхронізації тощо). Сигнали, отримані від відеокамер, що пройшли через камерний канал, називають повним кольоровим телевізійним сигналом. Проаналізуємо більш докладно АЦП телевізійного сигналу.

Під час перетворення кольорового телевізійного сигналу з аналогової форми в цифрову здійснюють його дискретизацію та квантування, а після аналого-цифрового перетворення отриманий сигнал зображення підлягає кодуванню (стисненню) для зменшення надлишковості [1-5].

В результаті стиснення зображення відбувається перехід від традиційного *RGB*-представлення кольору до колірної схеми  $Y_C R_C B_C$ . Частота дискретизації телевізійного сигналу повинна не менше ніж удвічі перевищувати верхню частоту спектру телевізійного сигналу, інакше виникають значні спотворення сигналу в процесі аналого-цифрового перетворення.

Відомо [2, 14], що око людини більш сприйнятливе до змін градацій яскравості, ніж до змін кольору, тому для зменшення обсягу інформації, що містить повний кольоровий телевізійний сигнал, під час дискретизації здійснюють проріджування колірних компонент  $C_R$  і  $C_B$ . Дискретизація колірних сигналів може здійснюватися в таких форматах: 4:2:2, 4:2:0, 4:1:1, 4:4:4.

У випадку формату дискретизації 4:2:2 чотирьом відлікам сигналу яскравості відповідають в кожному рядку два відліки колірних сигналів (рис. 1.2).

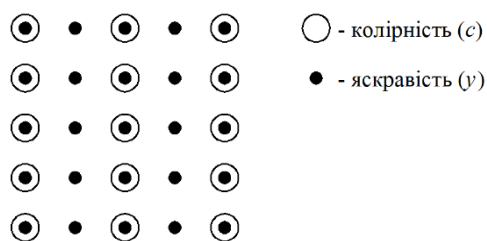


Рисунок 1.2 – Формат дискретизації 4:2:2

У випадку формату дискретизації 4:2:0 відліки колірних сигналів беруть через рядок з частотою у два рази меншою, ніж відліки сигналу яскравості (рис.1.3).

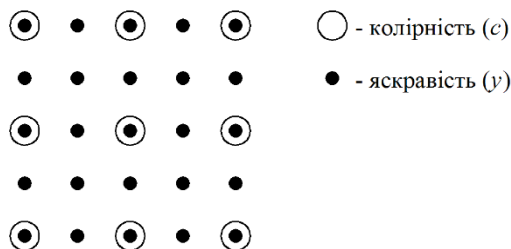


Рисунок 1.3 – Формат дискретизації 4:2:0

У випадку формату дискретизації 4:1:1 обидва колірні сигнали передають в кожному рядку, але з частотою у чотири рази меншою, ніж відліки сигналу яскравості. Неважно пересвідчитись, що схема 4:1:1 дозволяє скоротити вихідний

потік удвічі. Отже, використання форматів дискретизації 4:1:1 або 4:2:0 значно погіршує передавання кольорів. Форматування кольірних сигналів дозволяє в широких межах змінювати основні параметри цифрових потоків і якість зображення, що передається.

У рекомендації ITU-R BT.601-7 [7] для телевізійного сигналу передбачено використання 8-розрядного квантування (256 рівнів сигналу яскравості і кольірних сигналів).

Аналого-цифрове перетворення сигналу яскравості можна записати у вигляді [2]:

$$Y = 219 E'_Y + 16, \quad (1.1)$$

де  $Y$  - рівні сигналу яскравості;

$E'_Y$  - аналоговий сигнал яскравості, який змінюється в діапазоні від 0 до 1 В.

Перед початком квантування зменшують динамічний діапазон кольірних сигналів [2]:

$$E'_{CR} = 0,713 E_{R-Y}, \quad (1.2)$$

$$E'_{CB} = 0,564 E_{B-Y}. \quad (1.3)$$

При цьому значення  $E'_{CR}$  і  $E'_{CB}$  змінюються в діапазоні  $[-0,5 \text{ В}; 0,5 \text{ В}]$ . Тільки після цього здійснюють квантування кольірних сигналів згідно з виразами (1.4) та (1.5) [2]:

$$C_R = 224 E'_{CR} + 128, \quad (1.4)$$

$$C_B = 224 E'_{CB} + 128. \quad (1.5)$$

В результаті процедури квантування динамічний діапазон кольорів відеозображення значно зменшується, що може впливати на його сприйняття під час відтворення абонентським обладнанням.

В результаті АЦП кольорового телесигналу результуючий потік бітів і потрібна для його передавання смуга частот є досить великими, що призводить до необхідності скорочення надлишковості інформації, яку містить повний кольоровий телесигнал.

Техніка стиснення відеозображень ґрунтується на скороченні таких видів надлишковості:

- статистичної надлишковості (обумовлена наявністю кореляційних зв'язків між значеннями відліків сигналів сусідніх елементів зображення);
- структурної надлишковості (обумовлена наявністю імпульсів гасіння в телевізійному сигналі, під час яких інформація про зображення не передається);
- психофізіологічної надлишковості (обумовлена наявністю інформації в сигналі, яка не сприймається оком людини).

Дослідимо процеси, що відбуваються з телевізійним сигналом під час його стиснення, для визначення можливих причин виникнення шкідливих артефактів на зображенні, що передається. Всі методи стиснення зображень, які забезпечують високі коефіцієнти компресії, припускають наявність втрати інформації. Ці втрати пов'язані з відмовою від передавання тих компонентів зображення, чутливість до точності відтворення яких у людського ока невелика [15].

### **1.2.2 Погіршення якості відеозображення внаслідок скорочення надлишковості цифрового відеопотоку відповідно до стандарту MPEG-2**

У стандарті MPEG-2 використовують гібридний спосіб кодування, в якому об'єднані внутрішньокадровий і міжкадровий способи стиснення. Перший спосіб стиснення спрямований на зменшення психофізіологічної надлишковості, а другий – на зменшення надлишковості, обумовленої міжкадровою кореляцією. Стиснення приводить до появи раніше не виявлених дефектів якості. Помилки можуть виникати в процесі комплексної обробки під час мультиплексування

програм в єдиний потік даних. Помилки синхронізації і узгодження в часі можуть порушити процес декодування. Найбільш грубим типом спотворень є блокінг-ефект, який обумовлений розбиттям всього зображення на блоки розміром  $8 \times 8$  пікселів перед виконанням дискретно-косинусного перетворення (ДКП).

Структурна схема відеокодера MPEG-2 наведена на рис. 1.4.

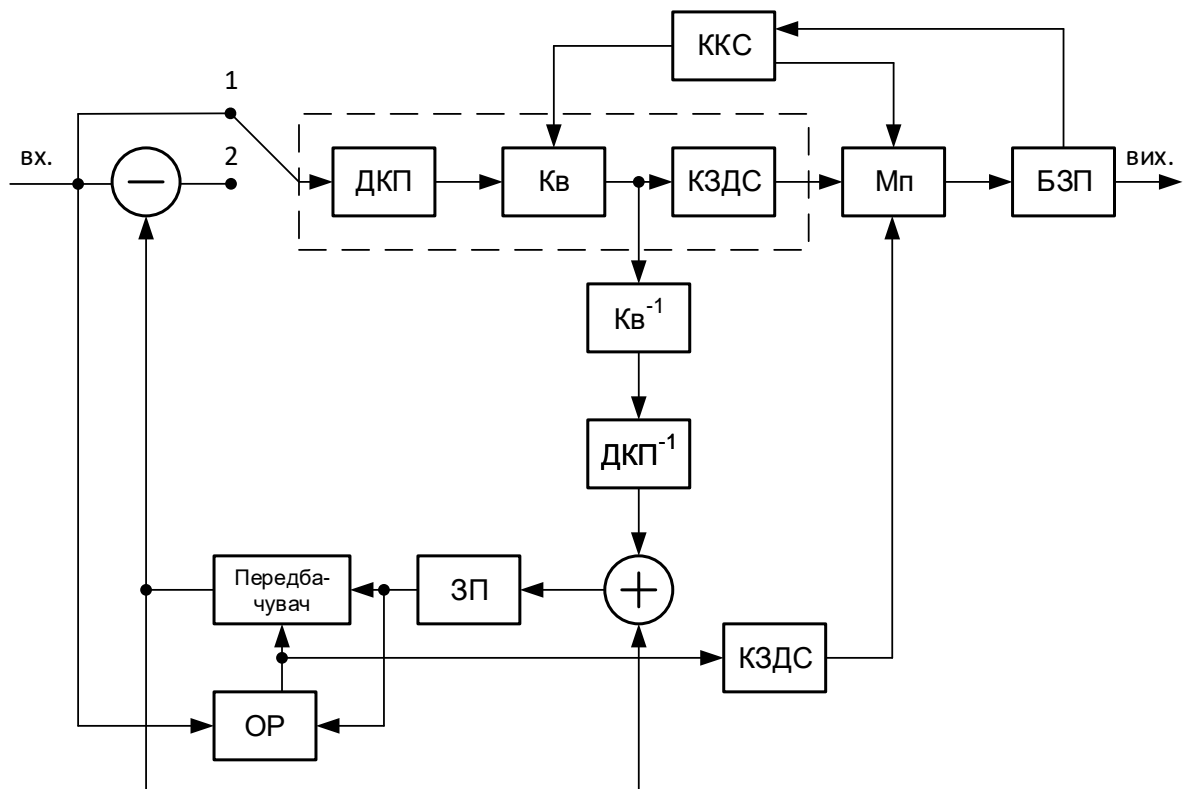


Рисунок 1.4 – Структурна схема відеокодера MPEG-2: ДКП – дискретне косинусне перетворення; Кв – квантування; ДКП<sup>-1</sup> – обернене дискретне косинусне перетворення; Кв<sup>-1</sup> – обернене квантування; ЗП – запам'ятовувальний пристрій; ОР – оцінка руху; КЗДС – кодування змінною довжиною слова; ККС – керування коефіцієнтом стиснення; Мп – мультиплексор; БЗП – буферний запам'ятовувальний пристрій

Роботу всіх блоків синхронізовано тактовою частотою 27 МГц. В положенні перемикача 1 кодер працює в режимі внутрішньокадрового стиснення, а в

положенні перемикача 2 – в режимі міжкадрового стиснення з передбаченням та компенсацією руху (рис. 1.4) [2, 4].

Зображенням в термінах стандартів MPEG може бути як цілий кадр, так і одне з полів кадру. Послідовність кадрів ділять на групи, які називають GOP (Group of Picture). В групі GOP є кадри трьох типів:

- *I-кадри* (intraframe), які передають тільки з внутрішньокадровим стисненням і є головними для декодування інших кадрів групи;
- *P-кадри* (predictive), які передають з міжкадровим стисненням шляхом передбачення з компенсацією руху за найближчим I-кадром (або P-кадром);
- *B-кадри* (bidirectional), які передають за допомогою міжкадрового стиснення шляхом передбачення з компенсацією руху за найближчим до них як спереду, так позаду I- або P-кадром. При цьому B-кадри не можуть бути використані для передбачення інших кадрів.

Приклад послідовності кадрів для GOP = 15 (стандартне значення для транспортного потоку MPEG-2) показано на рис. 1.5. Стрілками вказано кадри, за якими мають бути передбачені кадри з відповідним порядковим номером.

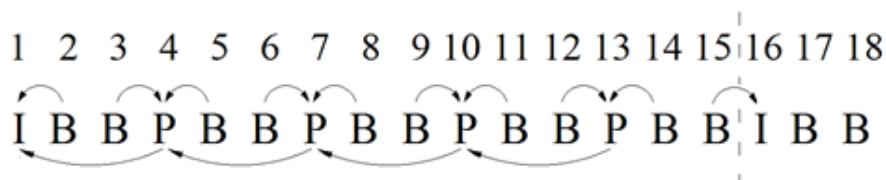


Рисунок 1.5 – Послідовність кадрів для GOP = 15

Перед кодуванням порядок кадрів змінюють, оскільки кожний B-кадр повинен іти після кадрів, за якими його передбачають (рис. 1.6) [2-5]. Наприклад, B-кадр під номером 2 має іти за 1-м I-кадром та 4-м P-кадром, тому 4-ий P-кадр змінює свій порядковий номер (на рис. 1.6 розташовується відразу за 1-им I-кадром).

1 4 2 3 7 5 6 10 8 9 13 11 12 16 14 15  
 I P V B P B B P B B P B B I B B

Рисунок 1.6 – Порядок кадрів перед кодуванням

*Макроблоком* називають квадратний елемент зображення розміром 16x16 пікселів. Він містить інформацію як про яскравість, так і про кольоровість. У випадку застосування формату дискретизації 4:2:0 кожний макроблок містить 4 блоки 8x8 елементів сигналу яскравості Y і по одному блоку 8x8 елементів кольірних сигналів C<sub>R</sub>, C<sub>B</sub>. Групи макроблоків, розташованих один за одним, утворюють *слайси*.

Всі макроблоки I-кадрів кодують в режимі внутрішньокадрового стиснення. Внутрішньокадрове стиснення здійснюють в такій послідовності:

- розбиття зображення на блоки 8x8 пікселів;
- поблочне дискретне косинусне перетворення (ДКП);
- квантування отриманих коефіцієнтів ДКП;
- зигзагоподібне зчитування квантованих коефіцієнтів ДКП;
- кодування квантованих коефіцієнтів кодом зі змінною довжиною кодових слів.

Алгоритм ДКП усуває кореляцію між значеннями відліків сигналів сусідніх елементів зображення, здійснюючи перетворення блоків зображення в частотні Фур'є-компоненти (коефіцієнти ДКП) [2, 14]:

$$AC(u, v) = \frac{1}{4} C_u C_v \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16}, \quad (1.6)$$

де  $u, v$  – координати в спектральній області;

$AC(u, v)$  – коефіцієнти ДКП;

$x, y$  – координати елементів зображення в просторовій області.



Основною особливістю матриць квантування є те, що коефіцієнти, які входять до матриць, зростають зліва направо, зверху вниз та по діагоналі. Це означає, що коефіцієнти ДКП, які відповідають більш високим просторовим частотам  $(u,v)$ , квантують більш грубо (ділитись на більші значення коефіцієнтів квантування). Тому завдяки квантуванню передавати будуть лише ті коефіцієнти ДКП, які відповідають найбільш інформативним для людини частинам зображення (фон, загальний план, повільна зміна яскравості та кольору), та незначна кількість коефіцієнтів ДКП, що характеризують дрібні деталі та різкі зміни яскравості і кольору на зображенні [2, 16].

Квантування коефіцієнтів ДКП здійснюють відповідно до виразу [16]:

$$AC_q(u,v) = \text{round} \left( \frac{16 \cdot AC(u,v)}{2 \cdot q_0 \cdot V(u,v)} \right) \text{ для } (u,v) \neq (0,0), \quad (1.7)$$

де  $V(u,v)$  – коефіцієнти матриці квантування;

$q_0$  – глобальний коефіцієнт квантування, який набуває значення від 1 до 31;

$\text{round}()$  – операція округлення.

Коефіцієнт ДКП  $AC(0,0)=DC$ , що відповідає постійній складовій кадру зображення, не квантується для забезпечення гарантованої якості зображення (тобто такої якості, за якої людина сприймає узагальнену інформацію про зображення). Матриці квантування  $V(u,v)$  використовують лише для квантування І-кадрів. Для Р- і В-кадрів всі коефіцієнти квантування, в тому числі і для постійною складової, залишаються однаковими і дорівнюють 16 [16].

Таким чином, виходячи з властивостей матриць квантування та з виразу (1.7), можна стверджувати, що операція квантування вносить значні втрати в зображення, яке передається, тому є **основним фактором погіршення якості** відтвореного відзображення.

Перед тим, як здійснити кодування квантованих коефіцієнтів  $AC_q(u,v)$ , їх потрібно зчитати із матриці  $8 \times 8$ . Зчитування відбувається зигзагоподібно, як

показано на рис. 1.7. Спочатку зчитують коефіцієнт  $AC_q(0,0)=DC_q$ , потім коефіцієнти  $AC_q(0,1)$ ,  $AC_q(1,0)$ ,  $AC_q(2,0)$ ,  $AC_q(1,1)$ ,  $AC_q(0,2)$ , ...,  $AC_q(7,7)$ .

Надалі до послідовності із 64 значень застосовують кодування Хафмана зі змінною довжиною слова (кодують пари чисел, які складаються з двох частин: (RUN, LENGTH), де RUN – кількість нулів, що передують до найближчого значення коефіцієнта  $AC_q(u,v)$  та LENGTH – значення коефіцієнта  $AC_q(u,v)$ ). Докладніше кодування Хафмана зі змінною довжиною слова описане в роботах [6, 16].

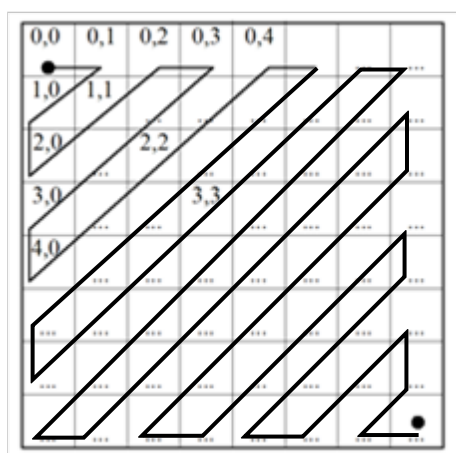


Рисунок 1.7 – Зигзагоподібне зчитування

Дослідимо тепер кодування Р-кадрів. Макроблоки Р-кадрів можуть кодуватися як внутрішньокадровим, так і міжкадровим стисненням в залежності від наявності та інтенсивності змін в цьому макроблоці у порівнянні з відповідною областю зображення, за яким здійснюється передбачення даного Р-кадру.

Передбачення та оцінку руху в кадрах здійснюють таким чином. Зображення, за яким відбувається передбачення, формують із кодованих даних попереднього І- або Р-кадру. Для цього в блоці оберненого квантування  $Kv^{-1}$  (див. рис. 1.4) дані множать на коефіцієнти квантування, потім застосовують обернене ДКП аналогічно до декодера в приймальній частині системи, після чого декодоване зображення записують в ЗП. Для реалізації всіх можливих варіантів

передбачення ЗП відеокодера MPEG-2 повинен містити як мінімум чотири попередніх кадри. Оскільки відеокодер використовує зворотній зв'язок для отримання даних для передбачення, це дає можливість уникнути накопичення похибок квантування [2, 6, 16].

Оцінка руху полягає у пошуку в ЗП для кожного макроблоку зображення, яке кодується, області A1 розміром 16x16, що відповідає даному макроблоку в попередньому (опорному) кадрі, записаному в ЗП (рис. 1.8). Положення відповідної області визначається з точністю до 0,5 пікселя по горизонталі і вертикалі.

Якщо в області пошуку не знайдено область, відмінність якої від даного макроблоку не перевищує встановлену величину, то даний макроблок кодують у внутрішньокадровому режимі аналогічно макроблокам I-кадрів.

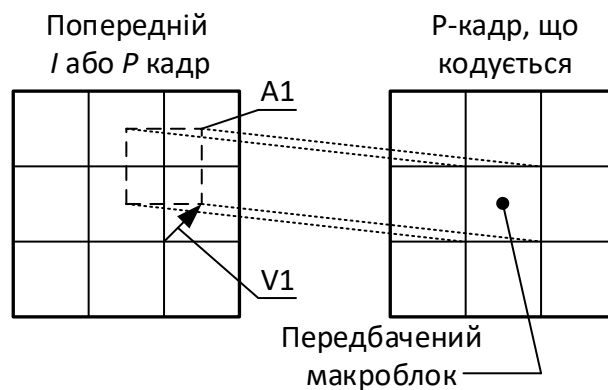


Рисунок 1.8 – Отримання передбаченого макроблоку в P-кадрі

Якщо ж така область знайдена (з максимальним ступенем кореляції між нею та кодованим макроблоком), то макроблок кодують за допомогою міжкадрового режиму, а для нього визначають вектор руху V1, який потім кодують кодом зі змінною довжиною слова і через мультиплексор включають у загальний потік даних.

Макроблоки B-кадрів можуть кодуватися за чотирма сценаріями:

- у внутрішньокадровому режимі;
- у міжкадровому режимі з формуванням передбаченого макроблоку у вигляді відповідної області A1 попереднього I- або P-кадру;

- у міжкадровому режимі з формуванням передбаченого макроблоку у вигляді відповідної області A2 наступного P-кадру;
- з формуванням передбаченого макроблоку у вигляді поелементної напівсуми відповідної області A1 попереднього I- або P-кадру та відповідної області A2 наступного P-кадру.

### 1.2.3 Передавання інформації про параметри відеопотоку

Транспортний потік (TS) MPEG-2 описує формати мультиплексованих потоків даних, що об'єднують стиснуті звукові та відеодані від одного чи кількох джерел телевізійних програм, а також дані від інших джерел інформації [2, 4, 5].

Структурна схема формування TS MPEG-2 показана на рис. 1.9.

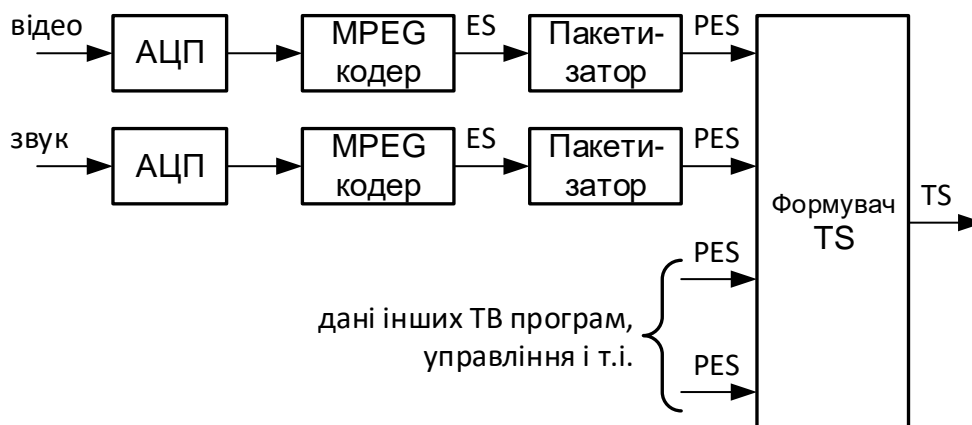


Рисунок 1.9 – Формування транспортного потоку MPEG-2

Потоки відео- та звукових даних на виходах відповідних кодерів називають елементарними потоками (Elementary Stream – ES), в пакетизаторах дані розбивають на пакети, що містять заголовки визначеної структури. Отримані потоки називають пакетизованими елементарними потоками (Packet Elementary Stream – PES). В кожному PES об'єднані дані, що відносять до певного вхідного сигналу (відповідно телевізійного кадру або кадру стиснутого звукового сигналу).

Пакетизовані елементарні потоки кількох телевізійних програм об'єднують з додатковими даними та сигналами управління в єдиний TS. Пакети TS мають фіксовану довжину (188 байт) та визначену структуру заголовку (4 байт). Кожний пакет TS починається з ідентифікатора пакета PID (Packet Identifier). Він визначає тип пакету, а також приналежність даних, що передаються, до одного з елементарних потоків.

Крім того TS містить спеціальні пакети PAT (Program Association Table) та PMT (Program Map Table), що несуть інформацію про те, які значення ідентифікаторів відповідають тому чи іншому елементарному потоку. В спеціальних пакетах передають мітки часу PCR (Program Clock Reference), за допомогою яких в декодері відновлюють тактові частоти кожного окремого елементарного потоку, що не синхронізовані між собою, хоча мають стандартне значення 27 МГц.

Інформацію про параметри відеопотоку (швидкість потоку відеоданих, розмір БЗП, а також значення глобального коефіцієнта квантування) містять заголовки відеопослідовностей та заголовки слайсів, що входять до складу транспортного пакету TS.

Сформований у такий спосіб транспортний потік готовий до передавання через канали зв'язку. Для цього застосовують технології DVB (Digital Video Broadcasting – цифрове телевізійне мовлення): DVB-T/T2 – для передавання TS через ефірні канали зв'язку, DVB-C – через кабельні канали зв'язку і DVB-S/S2 – через супутникові канали зв'язку. Дослідимо особливості кожної з цих технологій та їх вплив на передавання та приймання відеоданих як частини транспортного потоку MPEG-2.

### **1.3 Залежність якості відеозображення від середовища розповсюдження**

Різні середовища розповсюдження відеоданих характеризують різним впливом завад. Ефірні канали зв'язку (Terrestrial) зазнають найбільшого впливу

завад через багатопроменевий характер поширення радіохвиль, внаслідок чого у приймач надходить не лише прямий сигнал від передавача, але й відбиті сигнали від різних перешкод (будинків, рухомих об'єктів та елементів рельєфу). Це спричиняє інтерференцію прийнятих сигналів, що унеможлиблює їх безпомилкове приймання [2]. Крім того, для ефірних каналів є типовим високий рівень промислових завад. Тому для передавання відеоданих через ефірні канали зв'язку в умовах, коли характеристики каналів постійно змінюються, застосовують спосіб модуляції COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним розділенням кодованих сигналів) [17-19]. Такий спосіб модуляції у поєднанні з каскадним кодуванням (комбінування зовнішнього блочного коду Ріда-Соломона та внутрішнього згорткового коду) для захисту від помилок, що виникають у каналі зв'язку, та введенням захисного інтервалу використовують системи цифрового ефірного телевізійного мовлення DVB-T/T2 [20-23].

Супутникові канали зв'язку (Satellite), на відміну від ефірних, не зазнають впливу багатопроменевого поширення радіохвиль, проте через велику відстань між передавачем та приймачем, а також через вплив атмосферних явищ (дощу, снігу, туману тощо) для передавання відеоданих застосовують завадостійкі способи модуляції (наприклад, QPSK) у поєднанні з каскадним кодуванням, що ґрунтується на зовнішньому кодуванні кодом Ріда-Соломона та внутрішньому кодуванні згортковим кодом. У системах цифрового супутникового телевізійного мовлення DVB-S/S2 для досягнення компромісу між потужністю, що випромінюється, та спектральною ефективністю передбачено використання розширеної кількості швидкостей кодування ( $1/4$ ,  $1/3$ ,  $2/5$ ,  $1/2$ ,  $3/5$ ,  $2/3$ ,  $3/4$ ,  $4/5$ ,  $5/6$ ,  $8/9$ ,  $9/10$ ) для різних способів модуляції (QPSK, 8-PSK, 16-APSK та 32-APSK). Наприклад, швидкості кодування  $1/4$ ,  $1/3$  та  $2/5$  введено для роботи у поєднанні з QPSK модуляцією для найгірших умов зв'язку, коли рівень сигналу нижче рівня шуму [24-25].

Кабельні канали зв'язку (Cable) зазнають найменшого впливу завад через особливості конструкції середовища розповсюдження відеоданих – коаксіального кабелю чи оптичного волокна [26]. Тому характерною рисою системи цифрового кабельного телевізійного мовлення DVB-C є застосування менш завадостійких способів модуляції (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM), відсутність внутрішнього згорткового кодера/декодера та формування спектру в основній смузі частот. Захист від пакетних помилок здійснюють винятково за рахунок перемежування на виході кодера Ріда-Соломона. Такі особливості передавального тракту системи DVB-C дозволяють передавати на одній носійній частоті більшу кількість каналів стандартної (SD) чи високої (HD) чіткості, ніж в системах DVB-T та DVB-S [14].

Системи цифрового телевізійного мовлення спроектовано таким чином, щоб забезпечити приймання цифрового телевізійного сигналу з коефіцієнтом бітових помилок (BER) на виході декодера Вітербі, що здійснює декодування згорткового коду, на рівні  $2 \cdot 10^{-4}$  зі зменшенням порогового значення BER на виході декодера Ріда-Соломона до рівня  $10^{-11}$ , що відповідає практично безпомилковому прийманню переданого сигналу [14]. Проте у системах DVB для різних середовищ розповсюдження порогового значення BER досягають за різних значень відношення сигнал-шум ( $S/N$ ), яке пов'язане з пропускнуою здатністю системи та смугою частот каналу зв'язку виразом [14]:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \cdot \lg \frac{R_b}{\Delta f_k}, \quad (1.8)$$

де  $E_b/N_0$  – відношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму, що залежить від способу модуляції та пов'язане зі значенням коефіцієнта BER;

$R_b$  – швидкість передавання даних в системі із врахуванням каналного кодування;

$\Delta f_k$  – смуга частот каналу зв'язку.

В системі DVB-T швидкість передавання корисних даних змінюється в широких межах від 4,98 Мбіт/с для модуляції типу QPSK та швидкості внутрішнього коду 1/2 до 31,67 Мбіт/с для модуляції типу 64-QAM та швидкості внутрішнього коду 7/8. При цьому для практично безпомилкової роботи системи у першому випадку потрібно забезпечити відношення сигнал-шум лише 3,1 дБ, а у другому випадку – не менше 20,1 дБ [5, 14]. Таким чином, система DVB-T дозволяє передавати в межах заданої смуги частот 7-8 програм стандартної чіткості, коли на одну програму виділено 2,5-4 Мбіт/с цифрового відеопотоку, або 2-3 програми високої чіткості у випадку швидкості цифрового відеопотоку 8-10 Мбіт/с на одну програму.

Для підвищення кількості програм SD та HD чіткості необхідно знижувати якість телевізійних програм або збільшувати пропускну здатність каналу зв'язку [27-31]. Система DVB-T2 забезпечує понад 30% приріст пропускну здатності за рахунок використання удосконаленого алгоритму канального кодування із застосуванням перевірки на парність з низькою щільністю LDPC та кодування БЧХ (Боуза-Чоудхурі-Хоквінгхема), а також розширеного набору способів модуляції носійних коливань (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM), швидкостей кодування (1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6) і значень захисного інтервалу (1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128) [32]. Крім того, система DVB-T2 підтримує застосування алгоритму стиснення відеоданих H.264/AVC, який дозволяє отримати аналогічну до MPEG-2 якість відеозображення за нижчого значення швидкості передавання відеоданих на одну програму [27-29]. Тому система DVB-T2 дозволяє транслювати до 20 SDTV програм або 5-6 програм високої чіткості [33].

Система DVB-S/S2 також підтримує роботу з алгоритмом стиснення відеоданих H.264/AVC, що у поєднанні з удосконаленим алгоритмом канального кодування (LDPC та БЧХ), розширеним набором способів модуляції носійних частот QPSK, 8-PSK, 16-APSK та 32-APSK), швидкостей кодування (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10) та коефіцієнта скруглення спектру (0,35, 0,25 та

0,2) дозволяє підвищити швидкість передавання корисних даних майже до 60 Мбіт/с [25]. Тому спільне застосування стандарту DVB-S2 та алгоритму стиснення відеозображень H.264/AVC дозволяє передавати до 6-8 програм високої чіткості на транспондер, що є однією з передумов для цілковитого переходу на цифрове телевізійне мовлення у форматі високої чіткості [33].

#### **1.4 Аналіз впливу приймання цифрового телевізійного сигналу на якість відеозображення**

Для систематизації факторів, що можуть впливати на характеристики сигналу систем цифрового телевізійного мовлення на етапі приймання, розглянемо структурні вузли приймального пристрою, а також функції кожного з них. Необхідно відзначити, що за функціональним призначенням та можливостям приймальні пристрої СЦТМ можна розділити на дві великі групи – пристрої професійного призначення і абонентські приймальні пристрої. Професійні декодери і приймачі-декодери (ПД) застосовують для декодування компресованих сигналів у студійних комплексах підготовки програм, для приймання сигналів у супутникових розподільчих системах під час підготовки програм або для введення в мережі кабельного телебачення на головних станціях, а також для приймання компресованих сигналів, які передають існуючими синхронними і асинхронними мережами зв'язку [5].

Абонентський приймальний пристрій має конкретне завдання – відновити після цифрового стиснення початкове зображення і звуковий супровід та подати їх в аналоговому вигляді на телевізійний приймач. Відповідно, сигнал в приймачі-декодері проходить такі етапи обробки – виділення в селекторі потрібного каналу, демодуляцію, демультіплексування, декодування вибраних цифрових потоків, перетворення в аналогову композитну форму в одному з стандартів кольоровості [4].

Наведемо спрощену схему перетворення сигналу в приймачі-декодері, на якій представлено основні блоки, що мають найбільший вплив на якість прийнятого сигналу (рис. 1.10).

У приймачі лінійні спотворення сигналу і обмеження смуги частот можуть приводити до спотворень форми сигналу у вигляді міжсимвольних і квадратурних спотворень. Невелике зміщення носійних частот може порушувати ортогональність між підканалами і вести до погіршення характеристик, що швидко зростає пропорційно значенню зміщення і кількості уражених носійних частот.

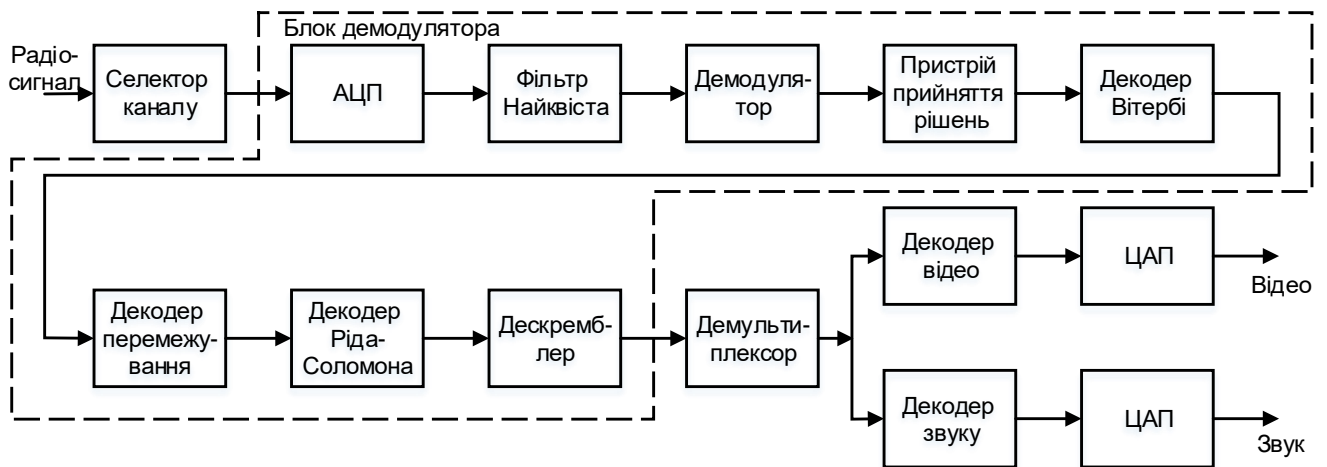


Рисунок 1.10 – Перетворення сигналу в приймачі-декодері

Далі дослідимо фактори, що можуть викликати спотворення сигналу в кожному з функціональних вузлів приймального пристрою.

Домінуючим спотворювальним фактором в селекторі каналу (тюнері) приймача є фазовий шум. Фазові шуми, що виникають в ньому, можуть бути викликані двома компонентами: звичайною компонентою обертання, яка викликає обертання фази підносійних коливань OFDM (дисперсійною компонентою), або компонентою взаємних завад між носійними частотами, яка, подібно до шуму, приводить до розмиття точок сузір'я кожної з підносійних частот. Першу компоненту можна легко прослідкувати з використанням опорних внутрішньосмугових пілот-сигналів. А другу компоненту компенсувати складно, і вона погіршуватиме шумовий поріг систем DVB-T.

У системі з єдиною модульованою носійною частотою фазовий шум в загальному випадку викликає обертання сузір'я, яке може бути відстежено за допомогою схеми фазового автопідстроювання. Для системи DVB-T може знадобитися тюнер з покращеною характеристикою відносно фазового шуму. Використання тюнера з одиночним або подвійним перетворенням частоти також веде до відмінності характеристик. Тюнери з одним перетворенням частоти мають низький рівень фазового шуму і низький коефіцієнт адитивного шуму, але забезпечують гірше придушення завад сусіднього каналу, і цей показник у них також непостійний в різних каналах. Тюнер з подвійним перетворенням частоти має високий коефіцієнт адитивного шуму і високий рівень фазового шуму. Він може забезпечити краще придушення сусіднього каналу, але його коефіцієнт шуму і ступінь придушення завад сусіднього каналу також дуже непостійні на різних частотах. За сучасних технологій виробництва коефіцієнт шуму тюнера з одним перетворенням частоти приблизно дорівнює 7 дБ, а тюнера з подвійним перетворенням частоти – близько 9 дБ. Коефіцієнт шуму тюнера впливає на характеристики системи тільки на межі зони охоплення радіосигналом, де напруженість поля сигналу дуже низька і відсутні завади суміщеного каналу.

До складу демодулятора входить декілька функціональних вузлів, робота яких має великий вплив на якість відео- і звукових сигналів, що приймаються. До них слід віднести аналого-цифровий перетворювач (АЦП), фільтр Найквіста, вирішальний пристрій, декодер Вітербі, декодер перемежування і декодер Ріда-Соломона. У схемі демодулятора, як і в модуляторі, застосовують квадратурну схему та роздільну обробку I і Q компонентів. Після декодера Вітербі, декодера перемежування і декодера Ріда-Соломона на виході модуля формується транспортний потік MPEG-2, який надходить на демультіплексор [4]. Фактори, що виникають в демодуляторі: нестабільність частоти, неточність квадратури, помилки під час відновлення носійної частоти – приводять до фазових помилок носійної частоти. Шумові спектральні складові у вихідному коливанні викликані наявністю флуктуаційної фази в опорному генераторі і пристрої формування

частоти. Ці флуктуації приводять до зміни взаємних відстаней між символами, які сприймає демодулятор приймача як зменшення відношення сигнал/шум. Величина цих шумових складових не повинна перевищувати 80-85 дБ/Гц в області частот 0,1-10 кГц і 110 дБ/Гц – в області частот 0,1-1 МГц. У складних умовах приймання (низьке відношення носійна/шум, сильні спотворення, фединг) обмежувальним фактором в системах, що використовують модуляцію COFDM, є саме надійність відновлення частот-носіїв. Ефективним методом відновлення носійних коливань є використання пілот-сигналів і опорних символів для корекції характеристик субканалів. Проте вставка внутрішньосмугового пілот-сигналу веде до втрат близько 8% швидкості передавання даних [2, 4, 14].

Нерівномірність групового часу запізнювання (ГЧЗ) викликає зміщення фаз певних груп підносійних відносно їх початкового значення, що приводить до зміни взаємних відстаней між символами, які сприймає демодулятор приймача як зменшення відношення сигнал/шум. Максимальна нерівномірність ГЧЗ в цифровій системі не повинна перевищувати 250 нс. Оскільки вплив нерівномірності ГЧЗ, обумовлений властивостями пристрою узгодження, не усувається під час заміни комплексу “збудник-модулятор” аналогової системи на відповідний комплекс цифрової системи, в цифровій системі межі корекції нерівномірності ГЧЗ повинні бути не менше  $\pm 500$  нс [4].

Практичний інтерес має значення відношення сигнал/шум на вході пристрою прийняття рішень, оскільки робота саме цього вузла викликає появу помилкових бітів. Не дивлячись на те, що в сучасних системах телевізійного мовлення застосовують складні методи амплітудно-фазової модуляції, рішення ухвалюється саме про співвідношення між рівнем оброблюваного імпульсу і порогом. Дрейф напруги опорного джерела і неточність установки зони рішення можуть призводити до серйозних спотворень сигналу через виникнення дрейфу порогових рівнів вирішального пристрою.

Важливим структурним елементом демодулятора є аналого-цифровий перетворювач (АЦП), оскільки його робота вносить певні похибки до

оброблюваного сигналу. Одна з найбільш істотних складових помилки під час використання АЦП – похибка квантування – є результатом самого процесу перетворення. Похибка квантування – це похибка, викликана значенням кроку квантування і визначається як  $1/2$  величини найменшого значення розряду. Необхідно також відзначити виникнення спотворень, викликаних диференціальною і інтегральною нелінійністю. Різниця в довжині кусково-лінійної функції, тобто нерівні проміжки між “кроками” коду є диференціальна фаза. Інтегральна нелінійність – це похибка, викликана відхиленням лінійної функції передавальної характеристики АЦП від прямої лінії.

Фільтр Найквіста забезпечує мінімізацію міжсимвольних спотворень, завдяки чому часто використовується в телекомунікаційних системах. До причин виникнення помилок на даному етапі обробки сигналу слід віднести квантування вхідних і вихідних сигналів, квантування коефіцієнтів фільтру і скінчену розрядність операційних пристроїв. Найбільш вагомими спотвореннями є помилки квантування – відсікання і округлення чисел. В результаті квантування на сигнали накладаються шуми квантування.

Імпульсний відгук фільтру описується виразом [14, 34]:

$$h(t) = \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\beta t}{T}\right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}}, \quad (1.9)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт згладжування,  $T$  – величина, обернена до символної швидкості.

Міжсимвольні спотворення усувають завдяки імпульсному відгуку, який дорівнює 0 у всіх  $nT$  (де  $n$  – ціле), окрім  $n=0$ . Таким чином, якщо переданий сигнал коректно дискретизований в приймачі, початкові значення символів можуть бути відновлені з дуже високою достовірністю.

Фільтр Найквіста повинен забезпечувати нерівномірність АЧХ в смузі пропускання не гірше 0,4 дБ і придушення позасмугових випромінювань не менше 43 дБ [34].

Під час аналізу процедур порогового оброблення необхідно враховувати, що в різних системах цифрового телебачення використовують протилежні критерії. У системі DVB-T введено дуже жорсткий критерій оцінки. Хоча значення порогу відмови в ній не визначене, введено поріг зниження якості. У випадку нормальної роботи в різних умовах система повинна забезпечувати так зване квазібезпомилкове приймання (QEF), при якому помилка в зображенні на екрані повинна з'являтися не частіше одного разу на годину. Критерію QEF відповідає значення ймовірності помилки в прийнятих бітах BER на виході каскадного декодера (вихід декодера Ріда-Соломона), рівне  $10^{-11}$ . Під час інструментальних вимірювань в системі DVB-T зазвичай фіксують значення коефіцієнта бітових помилок (BER) на виході декодера Вітербі, яке у разі порогу QEF ( $10^{-11}$ ) повинно бути не гірше  $2 \cdot 10^{-4}$  [2, 5, 14].

Якщо значення коефіцієнта помилок перевищує допустимий поріг, то декодер Вітербі неправильно декодує макроблоки зображення. Результатом є наявність певних областей, що мають іншу яскравість, або колірне забарвлення, ніж в переданому зображенні. За подальшого збільшення коефіцієнта помилок декодування стає неможливим.

Розглянемо детальніше декодування сигналу за алгоритмом Вітербі. Його ідея полягає в тому, що в декодері відтворюють всі можливі шляхи послідовних змін станів сигналу, зіставляючи отримувані при цьому кодові символи з прийнятими аналогами і на основі аналізу помилок між прийнятими і необхідними символами визначають оптимальний шлях (оптимальною вважають ту послідовність, відстань Хеммінга якої від прийнятої послідовності мінімальна). Декодер Вітербі реалізує алгоритм пошуку найбільш вигідного, максимально правдоподібного шляху на графі – гратчастій діаграмі коду.

Метод декодування, коли як метрику використовують відстань Хеммінга, називають декодуванням з жорстким рішенням. У випадку його використання кожному символу на виході демодулятора відповідає одне з двох значень: 0 або 1. Кращі результати в сенсі відновлення початкового сигналу дає декодування з

м'яким рішенням. В цьому випадку кожен символ на виході демодулятора піддають квантуванню.

Важливою перевагою декодера Вітербі є те, що коли під час декодування допущено помилку у виборі шляху на ґратчастій діаграмі коду, тобто вибрано неправильний шлях, то за декілька тактів, протягом яких можуть відбуватися помилки під час декодування, декодер знов виходить на правильний шлях. Це дозволяє почати процес декодування з будь-якого моменту часу, не піклуючись про взаємну синхронізацію кодера і декодера за початком роботи. Відсутність такої синхронізації еквівалентна знаходженню декодера на неправильному шляху на ґратчастій діаграмі коду. Через цю властивість декодер, почавши декодування в довільний момент, через декілька тактів сам вийде на правильний шлях [35].

Для захисту від пакетних помилок великої тривалості необхідним є згортове перемежування даних. Функцією декодера перемежування є відновлення первинного порядку проходження даних.

Код Ріда-Соломона стійко працює при ймовірності помилок на вході декодера не вище  $10^{-4}$ , усуваючи помилки, з якими не справився декодер згортового коду. В результаті отримуємо вихідну ймовірність помилок, що знаходиться в межах від  $10^{-10}$  -  $10^{-11}$  [36, 37].

Така висока вимога до коефіцієнта помилок пов'язана з прийнятою концепцією DVB, згідно якої цифровий канал повинен бути універсальним і придатним для передавання і приймання не лише телебачення (для нього досить мати ймовірність помилки  $2 \cdot 10^{-6}$  -  $10^{-8}$ ), але і будь-яких інших цифрових сигналів, у тому числі і з підвищеними вимогами до достовірності.

Якщо ж ймовірність помилки на вході декодера Ріда-Соломона більша, ніж  $10^{-4}$ , то зображення розвалюється на частини, що пов'язано із специфікою відновного алгоритму коду, що працює за принципом "все або нічого". В той же час уявлення про ступінь близькості сигналу до обвалу BER може бути дуже оманливим, особливо якщо потенційний обвал пов'язаний із стійким фазовим зсувом.

Для пошуку причин погіршення і збоїв сигналу одним з найбільш дієвих інструментів є застосування діаграми сигнального сузір'я. Вона дає уявлення про характер відхилення символів від розрахункової позиції і може допомогти у виявленні причин цього відхилення. Сигнальне сузір'я – це двомірне графічне зображення символів цифрової модуляції, де по осі абсцис відкладається складова I символу, а по осі ординат – складова Q. У сучасних вимірювальних приладах діаграми сигнального сузір'я знімають безпосередньо в демодуляторі. Ідеальна діаграма є набором точок, але на практиці точки розпливаються в хмару або іншу фігуру (рис. 1.11). Очевидно, що помилки приймання виникають в тих випадках, коли точки, що відносяться до символу, переходять у сусідні квадрати або виявляються на межі. У останньому випадку результат залежить від алгоритму роботи детектора символів.

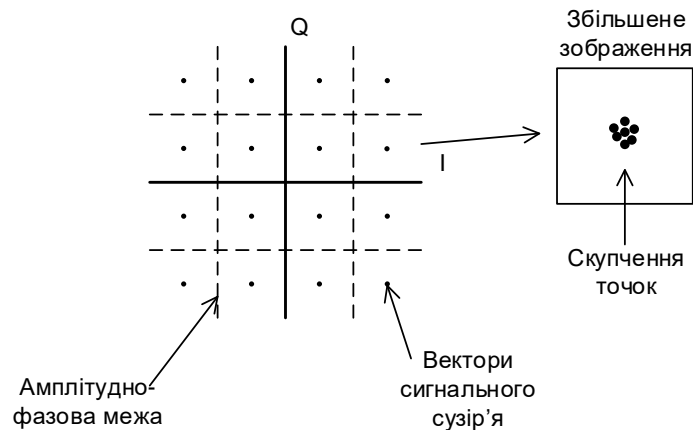


Рисунок 1.11 – Діаграма сигнального сузір'я

Приведемо деякі типи спотворень, які можна визначити за зміною зовнішнього вигляду діаграми. Нерівномірне підсилення I і Q складових в модуляторі виражається в тому, що діаграма з квадратної перетворюється на прямокутну. Якщо символи приймають форму кола або овалу, то це є ознакою сильних інтермодуляційних спотворень. Діаграма сигнального сузір'я відображає спотворення, що мають місце як в системі передавання сигналу, так і на приймальній стороні [38].

Далі коротко проаналізуємо особливості декодування звукової і відеоінформації. У декодері звуку вхідні дані надходять на блок розпаковування потоку даних, в якому за синхрословами виділяють окремі кадри, що надходять потім на блок декодування і деквантування. Дані, що містяться в кадрі, декодують відповідно до порядку їх проходження і таблиць коду, які містяться в програмі роботи декодера. Декодовані дані про розподіл бітів і про масштабні множники використовують під час деквантування звукових даних. Після декодування і деквантування відліки сигналів всіх піддіапазонів в блоці синтезу піддіапазонів об'єднують у вихідний цифровий звуковий сигнал, або декілька сигналів, якщо звук багатоканальний.

У відеодекодері виконують декодування коду змінної довжини, деквантування, зворотне ДКП, компенсацію руху і відновлюють початкову послідовність кадрів. Слід зазначити, що робота декодерів звуку і відео не вносить істотних спотворень до сигналу, оскільки помилки даного етапу обробки сигналу виникають під час підготовки контенту до передавання, тобто спотворення можуть вносити кодери звуку і відеоінформації. При правильному функціонуванні декодерів помилок виникати не повинно.

Спотворення сигналу, що виникають під час роботи ЦАП, схожі з похибками, що виникають у процесі аналого-цифрового перетворення. Слід зазначити такі типи спотворень: похибка повної шкали, похибка зсуву нуля, диференціальна і інтегральна нелінійність. Коротко розглянемо, що являє собою кожний з факторів. Під похибкою повної шкали розуміють відносну різницю між реальним та ідеальним значеннями межі шкали перетворення за відсутності зсуву нуля. Ця похибка є мультиплікативною складовою повної похибки. Похибка зсуву нуля є адитивною складовою і оцінюється рівнем вихідної напруги, коли вхідний код ЦАП дорівнює нулю. Інтегральна нелінійність або відносна точність – це максимальне відхилення реальної характеристики перетворення від оптимальної. Оптимальна характеристика знаходиться так, щоб мінімізувати значення похибки нелінійності. Диференціальну нелінійність визначає максимальна зміна

відхилення реальної характеристики перетворення від оптимальної під час переходу від одного значення вхідного коду до іншого, суміжного значення. Температурна нестабільність ЦАП характеризується температурними коефіцієнтами похибки зсуву нуля.

Багатопроменеве відбиття і неузгодженість кабельних ліній призводять до виникнення ехо-сигналів, негативною дією яких не можна нехтувати. У випадку правильного вибору тривалості захисного інтервалу, перемежування і каналного кодування система, що використовує модуляцію COFDM, може витримати достатньо сильні ехо-сигнали з рівнем до 0 дБ за умови використання ненаправлених антен для стаціонарного приймання в міських зонах і мобільного приймання за достатньо високого відношення потужності носійного коливання до потужності шуму. Застосування захисного інтервалу може усувати міжсимвольні спотворення, але спотворення через загасання в смузі каналу зберігатимуться. Потужний внутрішній код, що виправляє помилки, і хороша система оцінки каналу є обов'язковими атрибутами для системи DVB-T, яка здатна забезпечити стійкість до ехо-сигналів з рівнем до 0 дБ і затримкою до 17 мкс. При цьому еквівалентне зниження відношення сигнал/шум складає приблизно 6 дБ. Для підвищення стійкості до ехо-сигналів з рівнем 0 дБ може бути потрібна більша на 7 дБ потужність сигналу [5].

### **1.5 Способи керування транспортним потоком у кодері MPEG**

В стандартах сімейства MPEG кадри відеозображення обробляють, поділяючи їх на макроблоки. Якщо контрольовані параметри кодування підтримувати постійними (наприклад, розмір області пошуку компенсації руху, крок квантування та ін.), то кількість кодованих бітів у кожному макроблоці буде змінюватися від макроблока до макроблока в залежності від вмісту кадру, що призведе до варіювання бітової швидкості вихідного потоку (тобто кількості інформації, що міститься в 1 сек. відеоданих, виміряної в біт/с). Зазвичай кодер з

фіксованими параметрами виробляє більше біт для початкових кадрів, на яких зображено швидкий рух чи відзняті дрібні деталі. Для кадрів з повільними змінами і без деталей йому необхідно менше бітів. Такі стрибки бітової швидкості можуть спричинити серйозні проблеми під час передавання відеоконтенту через канали зв'язку. Наприклад, канал з постійною швидкістю (канал з комутацією) не здатний передавати потоки даних зі змінною швидкістю. Мережі, що використовують комутацію пакетів, можуть підтримувати змінну швидкість передавання, але середня пропускна здатність в будь-який момент часу обмежена певними факторами, які залежать від швидкості з'єднання та завантаженості ліній зв'язку. В таких випадках необхідні контроль і адаптація бітової швидкості, яку виробляє відеокодер, для її відповідності швидкостям транспортування. Носії CD, DVD і Blu-ray мають фіксовану ємність зберігання даних, тому необхідно контролювати швидкість кодованої відеопослідовності, щоб відеодані умістились на носії.

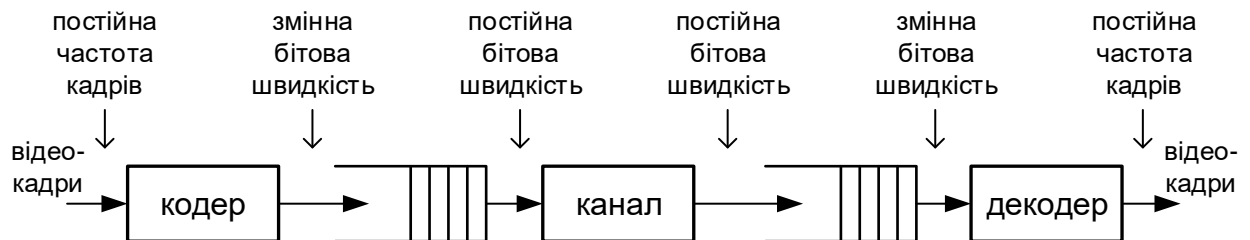


Рисунок 1.12 – Схема застосування буферів у процесі кодування сигнального потоку

Змінну швидкість даних, яку виробляє відеокодер, можна перетворити на постійну за допомогою їх буферизації до початку передавання. На рисунку 1.12 зображено типову організацію процесу, в якому вхід зі змінною швидкістю пропускають через буфер FIFO (First In/First Out, першим зайшов/першим вийшов). Такий буфер вивільняється з постійною бітовою швидкістю, яка відповідає пропускній здатності каналу зв'язку. Інший буфер FIFO розміщують на вході декодера. Він заповнюється з фіксованою швидкістю передавання через

канал зв'язку і вивільняється декодером зі змінною швидкістю, оскільки декодер використовує деяку кількість бітів для декодування кожного кадру і ця кількість змінюється від кадру до кадру.

Але за таку адаптацію бітової швидкості доводиться розплачуватись об'ємом буферної пам'яті та затримками під час декодування. Як показано в роботі [6], чим більша варіація бітової швидкості, тим більше об'єм буфера і тим довша затримка декодування. Крім того, цей підхід не дозволяє боротися з випадковими стрибками бітової швидкості. Для цього необхідно реалізувати механізм зворотного зв'язку для керування бітовою швидкістю з виходу декодера для запобігання переповнення чи недовантаження буферів. Саме комбінацію таких двох методів (наявність буферного запам'ятовувального пристрою БЗП та зворотного зв'язку) реалізовано у відеокодері MPEG-2 (рис. 1.13).

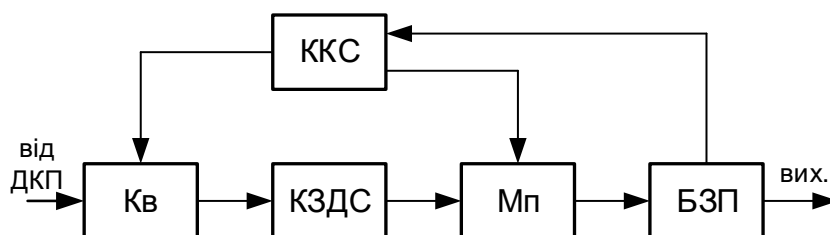


Рисунок 1.13 – Фрагмент відеокодера MPEG-2, де реалізовано керування бітовою швидкістю

*Керування транспортним потоком* передбачає динамічну зміну параметрів кодування для керування вихідною бітовою швидкістю відеопотоку як складової частини транспортного потоку. Найбільш очевидним параметром для такого керування може слугувати коефіцієнт квантування  $q_0$ , оскільки збільшення  $q_0$  приводить до зниження бітової швидкості (за рахунок чого знижується якість декодованого зображення) і навпаки. Загальний підхід до керування бітовою швидкістю полягає у зміні коефіцієнта квантування  $q_0$  під час кодування для підтримання допустимої бітової швидкості і мінімізації спотворень під час

декодування відеопослідовності. Оптимізувати компроміс між бітовою швидкістю та якістю декодування буває непросто. Існує декілька підходів і алгоритмів для досягнення цієї мети. Часто вибір алгоритму керування бітовою швидкістю залежить від призначення відеоконтенту.

1. Кодування відео із затримкою в часі для зберігання на оптичних носіях DVD чи Blu-ray. В такому випадку час кодування не є значним обмеженням, тому можна використовувати складні алгоритми керування бітовою швидкістю. Завдання кодування полягає в тому, щоб розмістити стиснуту відеопослідовність на носії, намагаючись максимізувати якість відеозображення та запобігти переповненню чи недовантаженню буфера в програвачі DVD чи Blu-ray.

2. Кодування відео для телевізійних трансляцій. Обладнання для формування телевізійних програм складається з одного кодера та великої кількості декодерів, які мають обчислювальні та буферні обмеження, тоді як кодування здійснюють на високоякісному обладнанні. Затримка на декілька секунд є допустимою, тому є можливість використовувати алгоритми керування бітовою швидкістю середньої складності.

3. Кодування двосторонніх відеоконференцій. Кожний термінал виконує і кодування, і декодування, тому обчислювальна потужність такого терміналу може бути обмеженою. Допустимі лише мінімальні затримки (не більше 0,5 с). В такому випадку потрібно використовувати нескладні алгоритми керування бітовою швидкістю. Буферизація кодера і декодера повинна бути мінімальною, щоб запобігти виникненню значного часу затримки, тому кодер має жорстко контролювати вихідну швидкість бітового потоку. Це може спричинити значні варіації якості декодованого зображення, наприклад, під час відображення швидких відеосцен і дрібних деталей.

На сьогодні стандарти сімейства MPEG не визначають і не пропонують алгоритм керування бітовою швидкістю, хоча опис такого алгоритму наведено в роботі [11]. Стандарт MPEG-4 Visual містить опис можливого алгоритму керування бітовою швидкістю в інформаційному додатку [39] (тобто

використання цього конкретного алгоритму є необов'язковим). Цей алгоритм отримав назву SRC (Scalable Rate Control, масштабований контроль швидкості) та підходить для єдиного прямокутного відеооб'єкта, що займає весь кадр. Алгоритм SRC забезпечує досягнення необхідної бітової швидкості після певної кількості кадрів та використовує таку модель, що описує бітову швидкість відеокодера:

$$R = \frac{X_1 \cdot S}{q} + \frac{X_2 \cdot S}{q^2}, \quad (1.10)$$

де  $q$  – величина коефіцієнта квантування;

$S$  – середня абсолютна різниця залишкового кадру після компенсації руху (міра складності кадру);

$X_1, X_2$  – параметри моделі.

Керування бітовою швидкістю полягає у виконанні таких кроків, які здійснюють після компенсації руху і до кодування  $i$ -ого кадру:

1. Обчислюють необхідну швидкість  $R_i$ , спираючись на кількість кадрів в сегменті, кількість біт, доступних для залишку сегмента, максимально допустимий об'єм буфера і на оцінену складність  $i$ -ого кадру.

2. Обчислюють величину коефіцієнта квантування  $q_i$ , який буде застосовано до усього  $i$ -ого кадру. Для цього обчислюють  $S$  для повного залишкового кадру і розв'язують рівняння (1.10) для знаходження  $q$ .

3. Кодують кадр та оновлюють параметри  $X_1, X_2$ , використовуючи дійсну кількість бітів, згенерованих для представлення  $i$ -ого кадру.

Алгоритм SRC намагається досягти необхідної бітової швидкості для даного сегменту кадрів, а не для відеопослідовності довільної довжини. Коефіцієнт квантування залишається незмінним для кадру, що кодують в даний момент. Це дає рівномірне візуальне представлення поточного кадру, але можуть виникнути проблеми під час роботи з буферами малого розміру та малою затримкою.

Покращений варіант алгоритму SRC підтримує зміну коефіцієнта квантування на рівні макроблоків, що підходить для застосувань з малими затримками, яким потрібне жорстке керування швидкістю. Алгоритм на рівні макроблоків ґрунтується на моделі, яка обчислює необхідну кількість бітів  $B_i$  для кодування  $i$ -го макроблока відповідно до виразу:

$$B_i = A \cdot \left( K \frac{\sigma_i^2}{q_i^2} + C \right), \quad (1.11)$$

де  $A$  – кількість пікселів в макроблоці;

$\sigma_i$  – середньоквадратичне відхилення яскравості і кольоровості в залишковому макроблоці;

$q_i$  – величина коефіцієнта квантування;

$K, C$  – постійні параметри моделі.

Для кожного макроблока виконують такі кроки:

1. Вимірюють  $\sigma_i$ .
2. Обчислюють  $q_i$  за допомогою значень  $B, K, C, \sigma_i$ , використовуючи вагу  $\alpha_i$  даного макроблока.
3. Кодують макроблок та оновлюють параметри  $K$  і  $C$ , знаючи реальну кількість закодованих бітів, що відповідають даному макроблоку.

Вага  $\alpha_i$  макроблока контролює його важливість для суб'єктивного сприйняття зображення. Низькі значення  $\alpha_i$  означають, що даний макроблок не є важливим під час візуалізації, і його буде проквантовано більш грубо у порівнянні з іншими макроблоками. Вагу  $\alpha_i$  можна обирати із умови мінімізації зміни  $q_i$  для низьких бітових швидкостей, оскільки кожна зміна цього параметра спричиняє відправлення параметра модифікації квантування, що означає додавання зайвих бітів до коду макроблока. У випадку високих бітових швидкостей додаткові біти не є суттєвими, тому параметр  $q_i$  можна змінювати частіше, не ризикуючи збільшити загальний обсяг коду.

Такий метод керування бітовою швидкістю добре підходить для підтримання хорошої візуальної якості кодованого відеозображення у випадку малих розмірів вихідного буфера і необхідності забезпечення малих величин затримок під час кодування, що є типовим низькошвидкісних застосувань.

Інформацію про деякі інші алгоритми керування транспортним потоком наведено у роботі [12].

### 1.6 Критерії якості відеозображення в системах цифрового телебачення

В процесі оцінювання якості відеозображення вводять поняття одиниці погіршення якості, вираженої в *импах* (від impairment – погіршення) [40]. Погіршення  $I$  залежить від нормалізованої оцінки якості (див. формулу (2.14)):

$$I = \frac{1}{p-1}. \quad (1.12)$$

Фізичний зміст цієї залежності полягає в тому, що оскільки кількісна міра якості знаходиться в межах від 0 до 1, то обернена до неї за визначенням кількісна міра погіршення буде знаходитись в інтервалі від  $\infty$  до 0.

Знайдемо тепер узагальнену аналітичну залежність якості від спотворень. Для таких спотворень, як сигнал/шум, які виражають в децибелах, застосовують залежність в вигляді *логістичної функції* [10, 40]:

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-Q)}, \quad (1.13)$$

де  $Q$  – деяка функція спотворень. Враховуючи вираз (1.12) та позначивши  $\bar{u} = 0,434Q$  [40], отримаємо  $I = \exp(-Q)$  або  $I = 10^{-\bar{u}}$ .

Позначивши спотворення, виражені в одиницях вимірювання завад (вольти, градуси, відсотки і т.п.) через  $d$ , а виражені в децибелах – через  $D$ , тоді логістична функція, що описує погіршення якості, набуде вигляду

$$I = \left( \frac{d}{d_M} \right)^G \quad (1.14)$$

або

$$I = \exp\left( \frac{G(D_M - D)}{8,69} \right), \quad (1.15)$$

де  $d_M$  та  $D_M$  – значення спотворень в центрі шкали оцінок, тобто для  $I = 1$  імп,  $G$  – параметр нахилу, що обчислюють відповідно до співвідношень [40]:

$$G = \frac{\bar{u}}{\lg d_M - \lg d} \quad \text{або} \quad G = \frac{20\bar{u}}{D - D_M}. \quad (1.16)$$

Характер залежності погіршення якості від значення спотворення для виразів (1.14) та (1.15) наведено на рис. 1.14.

Залежності погіршення від спотворень (1.14) та (1.15) називають *характеристиками погіршення*. Чим менше  $G$ , тим менше нахил характеристики, тим більш жорстке нормування дає характеристика погіршення в області високих оцінок (рис.1.14).

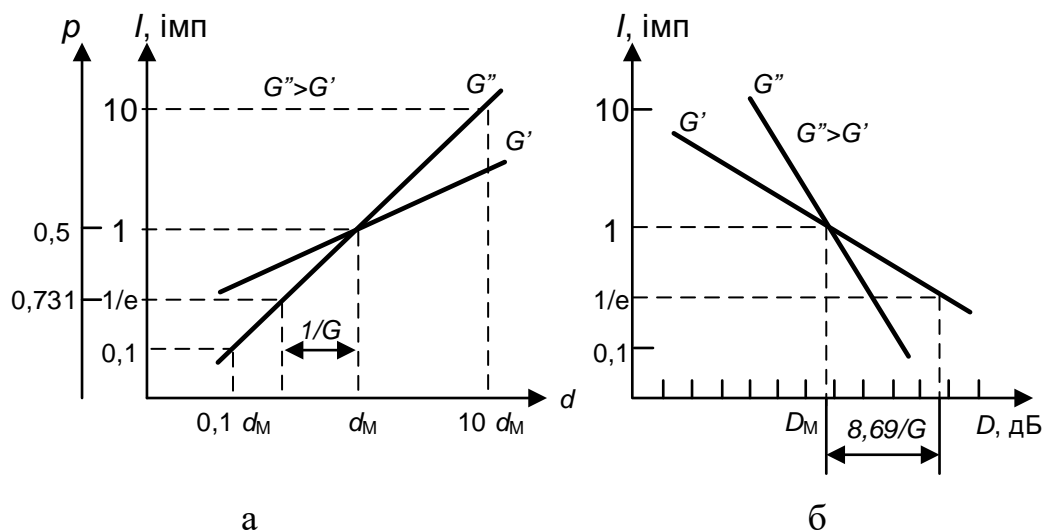


Рисунок 1.14 – Характеристики погіршення: а – для (1.14), б – для (1.15)

Отже, залежність якості зображення від окремих видів спотворення (або факторів, що їх визначають) подають у вигляді характеристик погіршення.

Перевага такої методики оцінювання погіршень полягає в тому, що погіршення, виражені в імпах, арифметично складають разом, що дозволяє побудувати простий інтегральний критерій якості.

Інтегральний критерій узагальнює якість зображення в різних системах ЦТБ та не залежить від того, якими методами – об'єктивними чи суб'єктивними – вимірювали якість в кожному конкретному випадку. Такий інтегральний критерій дозволяє порівнювати різні діючі системи ЦТБ і тракти, визначати співвідношення між різними спотвореннями, що можуть виникати під час формування, передавання та приймання сигналів зображення в цих системах.

Нехай на зображення в системі ЦТБ діють спотворення  $x_i$  загальної кількості  $n$ , причому для кожного з них визначена нормалізована оцінка (об'єктивна чи суб'єктивна)  $p_i$ . Тоді часткові погіршення знаходять відповідно до (1.12), а узагальнена оцінка якості відповідно до інтегрального критерію набуде вигляду [40]:

$$p_{\text{заг}} = \frac{1}{1 + I_{\text{заг}}} = \left[ 1 + \sum_{i=1}^n 1/(p_i - 1) \right]^{-1}. \quad (1.17)$$

Проте важливо, щоб умови експериментів були однакові для всіх досліджуваних спотворень, чого досягти зазвичай досить складно. Оскільки кожне наступне часткове спотворення відповідно до виразу (1.17) робить менший внесок в загальне погіршення, то одна низька часткова оцінка може значно зменшити інтегральну оцінку якості через те, що просте підсумовування імсів не достатньо враховує перекриття спотворень. Врахувати це можна шляхом квадратичного підсумовування часткових погіршень [40], що спричинить підвищення обчислювальної складності інтегрального критерію у випадку застосування об'єктивних методів вимірювання якості.

Тому виникає необхідність у розробленні такого критерію оцінювання якості відеозображень в системах ЦТБ, який би дозволяв контролювати якість

відеоконтенту в процесі формування та передавання телепрограм і враховував максимальне узгодження об'єктивних та суб'єктивних оцінок якості.

### **Висновки до розділу**

У цифрових телевізійних сигналах інформація про відео і звук представлена у вигляді дискретних значень величин, тому втрата або спотворення частини цієї інформації внаслідок процедур обробки сигналу під час його формування, передавання та приймання може призвести до погіршення якості відображуваного зображення.

1. Систематизовано основні причини спотворення відеозображення на етапі його формування та передавання в системах цифрового телевізійного мовлення. Домінуючим фактором, який впливає на якість відеозображення, залишається стиснення відеозображення відповідно до алгоритму MPEG, яке містить незворотні процедури, що спричиняють втрату значної частини переданої інформації.

2. Після формування транспортного потоку TS MPEG його передають каналами зв'язку одним із трьох способів: ефірними, супутниковими та кабельними каналами зв'язку. Застосування стандартів DVB-T2, DVB-S2 та DVB-C для передавання транспортного потоку через канали зв'язку є важливою передумовою для цілковитого переходу на цифрове телевізійне мовлення у форматі високої чіткості, що дає можливість значно підвищити якість послуг, які надають телевізійні компанії і провайдери цифрового ефірного, супутникового та кабельного телебачення.

3. Помилки, що виникають в системі приймання інформації та можуть істотно спотворювати прийняте повідомлення або зовсім унеможливити його використання, викликає сукупність факторів, таких як: фазовий шум у селекторі каналу приймача; нестабільність частоти, неточність квадратури, нерівномірність групового часу запізнювання, помилки під час відновлення частоти-носія в

демодуляторі; дрейф опорного джерела і неточність встановлення зони рішення у пристрої прийняття рішень; похибки квантування АЦП і фільтра Найквіста. Окремо взяті перелічені фактори не носять домінуючий характер.

4. У стандартах сімейства MPEG для керування швидкістю бітового потоку може бути застосований алгоритм SRC, який забезпечує необхідну бітову швидкість для певного сегменту кадрів. Такий алгоритм підходить для високошвидкісних застосувань, яким є цифровий телевізійний сигнал, сформований телекомпанією чи провайдером відповідної служби. Покращений варіант алгоритму SRC підтримує зміну коефіцієнта квантування на рівні макроблоків, що підходить для застосувань з малими затримками, яким потрібне жорстке керування швидкістю (наприклад, для відеоконференцій). Проте обидва алгоритми мають суттєвий недолік – вони не враховують якість зображення у відеопотоці, в якому здійснюють керування бітовою швидкістю.

5. Інтегральний критерій оцінювання якості відеозображень потребує однакових умов експериментів для всіх досліджуваних спотворень, чого досягти зазвичай досить складно, та підвищення обчислювальної складності у випадку застосування об'єктивних методів вимірювання якості. Тому виникає необхідність у розробленні такого критерію оцінювання якості в системах ЦТБ, який би дозволяв контролювати якість відеоконтенту в процесі формування та передавання телепрограм і враховував максимальне узгодження об'єктивних та суб'єктивних оцінок якості.

В цілому, досліджені фактори впливу на якість відеозображення характеризують окремі етапи передавання і приймання цифрового телевізійного сигналу, проте оцінка якості відеозображення остаточно може бути підтверджена експертною оцінкою (суб'єктивною або об'єктивною). Подальші дослідження спрямовані на виявлення ступеня впливу різних факторів погіршення якості відеозображення та визначення спотворень, викликаних особливостями кодування цифрового телевізійного сигналу, які є найбільш суттєвими для суб'єктивного сприйняття.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВІДЕОКОНТЕНТУ

Метою даного розділу є виявлення ступеня впливу різних факторів погіршення якості відеозображення, визначення спотворень, викликаних особливостями кодування цифрового телевізійного сигналу, які є найбільш суттєвими для суб'єктивного сприйняття, та обґрунтування на основі аналізу методів суб'єктивного та об'єктивного оцінювання якості зображень вибору об'єктивного методу для керування транспортним потоком, що максимально відповідає суб'єктивним оцінкам якості.

#### **2.1 Спотворення, обумовлені особливостями кодування цифрового телевізійного сигналу**

Наведемо класифікацію характерних спотворень, що виникають під час цифрового кодування відеосигналів за стандартом MPEG-2, та пояснення причин їх виникнення [41].

Спотворення зображення, обумовлені внутрішньокадровим стисненням:

– блокінг-ефект – характерне розбиття всього зображення на квадратні блоки 8x8 пікселів з помітними границями. Виникає внаслідок ділення зображення на блоки з подальшим їх незалежним кодуванням, в якому використовують ДКП і квантування коефіцієнтів. Характерною особливістю ДКП з урахуванням квантування коефіцієнтів є виникнення ненульових помилок на границях блоків, які око ідентифікує як стрибки яскравості від одного блоку до іншого;

– мозаїчний ефект також виникає у випадку грубого квантування коефіцієнтів ДКП, коли зображення всередині сусідніх блоків значно відрізняються між собою;

– розмиття зображення – у випадку великого коефіцієнта стиснення спостерігається розмиття зображення, обумовлене значним обмеженням або повним обнулінням високочастотної частини спектру ДКП. Дрібні деталі стають або розмитими, або повністю відсутні в зображенні;

– ефект Гібса (виникнення характерних окантовок на різких переходах яскравості зображення). Оскільки ступінчастий сигнал містить велику кількість спектральних компонент (амплітуда яких зменшується лише обернено пропорційно до їх номера), зміни амплітуд ДКП унаслідок квантування можуть порушити монотонність функції поблизу сходинки, що візуально проявляється як коливання яскравості на різких переходах;

– розмиття кольорів має таку ж причину, що і ефект Гібса, але проявляється на ділянках зображення з різкими стрибками в сигналі кольоровості;

– спотворення типу «сходинки» – причиною виникнення даного ефекту є використання як базису розкладання функцій ДКП, побудованих в декартових координатах. Кожна з базисних функцій має строго виражену вертикальну і горизонтальну орієнтації. Тому під час грубого квантування коефіцієнтів ДКП на похилій границі проявляється внутрішня орієнтація базисних функцій відносно осей координат;

– спотворення, що мають вид базисних функцій ДКП. Цей ефект проявляється у вигляді структур, дуже схожих формою на базисні функції ДКП.

Спотворення зображення, обумовлені міжкадровим стисненням:

– помилкові межі – у випадку великих значень коефіцієнтів квантування кількість помилкових меж збільшується від кадру до кадру, що призводить до значних спотворень зображення;

– флуктуації яскравості або кольоровості в блоці на межі між рухомим об'єктом і фоном – цей ефект обумовлений міжкадровим стисненням потоку і виникає внаслідок різного ступеня квантування помилки передбачення від кадру до кадру. Частина блоку, який підлягає компенсації руху, може передаватися правильно, але інша частина, що відповідає фону, і помилка передбачення якої не

мала, може передаватися із спотвореннями через глибоке квантування коефіцієнтів ДКП;

– зернистий шум в стаціонарній області – цей вид спотворень виникає з кількох причин: по-перше, якщо коефіцієнти перетворення різниць між поточним і опорним кадрами змінюються між сусідніми кадрами, відновлений рівень в кожній точці може відрізнятись від рівня в тій же точці сусіднього кадру; по-друге, у випадку незначної зміни сигналу між сусідніми кадрами кодер може вибрати неправильний вектор руху макроблоку. В результаті відтворення макроблоків, ідентичних просторово і за часом, може трохи відрізнятись; по-третє, дані помилки можуть бути обумовлені обмеженими циклами низькорівневого входу;

– неправильні кольори (або спотворення кольору) – даний тип спотворень обумовлений перш за все регулярною формою всього макроблоку. Найбільш вірогідною причиною неправильного кольору є той факт, що в найбільш популярному критерії для аналізу вектору руху використовується тільки сигнал яскравості. Тому передбачений блок може мати високу кореляцію за сигналом яскравості, і при цьому мати зовсім інший колір;

– ефект «привиду» – залежно від швидкості об'єктів, що беруть участь у русі, і алгоритму пошуку пропущених макроблоків, за рухомими об'єктами можливе утворення слідів, які можуть зберігатись протягом порівняно великого проміжку часу.

Щоб оцінити наявність розглянутих вище спотворень, розглянемо детально наведений на рис. 2.1 приклад відновленої випробувальної таблиці SECAM після кодування кодером MPEG-2 зі значенням величини бітового потоку 4 Мбіт/с [41]. Помітні спотворення у вигляді блокінг-ефекта на плавних хвилях в правому нижньому кутку таблиці; окантовки по периметру великого центрального кола, розмиття і спотворення кольору навколо сірого і кольорових кілець, що обертаються; окантовки на границях рухомих кульок, розмиття кольорових штрихів. Слід відзначити, що за такого кодування (величина бітового потоку 4 Мбіт/с) якість відтворення випробувальної таблиці є незадовільною.

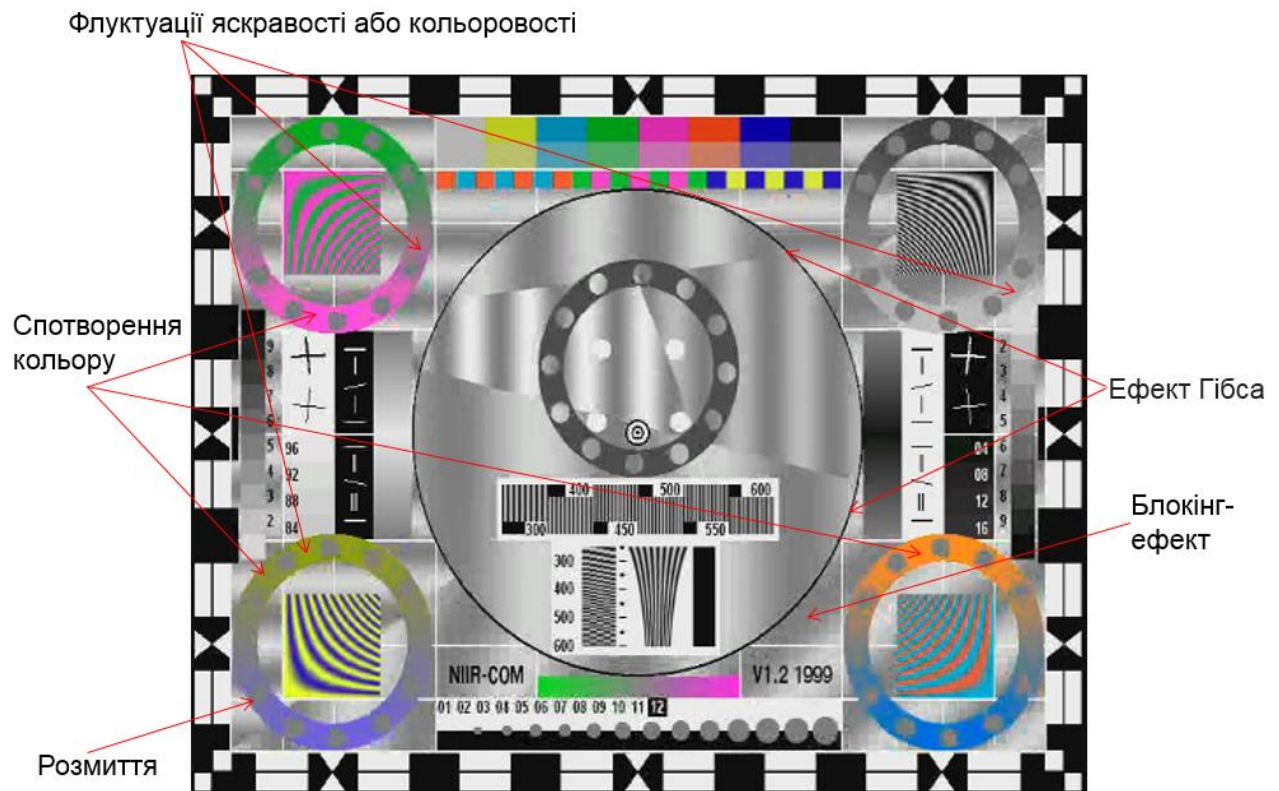


Рисунок 2.1 – Відновлене зображення таблиці SECAM після кодування кодером MPEG-2 у випадку величини бітового потоку 4 Мбіт/с [41]

## 2.2 Оцінювання ступеня впливу спотворень зображення на його сприйняття

Для проведення подальших досліджень необхідно встановити ступінь впливу різних видів спотворень відеозображення, що виникають під час цифрового кодування відеосигналів за стандартом MPEG-2, на його суб'єктивне сприйняття глядачем. Для цього використаємо відеопослідовність тривалістю 10 секунд, що містить випробувальну таблицю SECAM, закодовану відеокдером MPEG-2 зі значенням величини бітового потоку 4 Мбіт/с (див. рис. 2.1). Дослідимо помітність для глядачів деяких спотворень, які виникли в результаті кодування такої відеопослідовності. Серед наявних спотворень такі: блокінг-ефект, розмиття зображення, спотворення кольору, ефект Гібса та флуктуації яскравості або кольоровості. Для оцінювання помітності наявних спотворень застосуємо метод експертного оцінювання, зокрема, скористаємось методом

попарного порівняння [42], який полягає в обчисленні коефіцієнта вагомості кожного виду спотворень (табл. 2.1). Оцінювання вагомості (тобто помітності) спотворень здійснювала експертна комісія у складі 7 осіб. Підібрані експерти є фахівцями в галузі телебачення.

Таблиця 2.1 – Види спотворень, обрані для дослідження

№	Спотворення	Індекс
1	Блокінг-ефект	$x_1$
2	Розмиття зображення	$x_2$
3	Спотворення кольору	$x_3$
4	Ефект Гібса	$x_4$
5	Флуктуації яскравості або кольоровості	$x_5$

Після перегляду запропонованої тестової відеопослідовності кожний експерт оцінює ступінь важливості спотворень шляхом присвоєння їм рангів відповідно до шкали: від «5» (спотворення найбільш помітне) до «1» (спотворення непомітне глядачеві). Результати ранжування спотворень і перевірки ступеня придатності експертних оцінок наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати ранжування спотворень

	Ранг показника на думку експерта							Сума рангів $R_i$	Різниця $\Delta_i$	$\Delta_i^2$
	1	2	3	4	5	6	7			
$x_1$	5	5	4	5	5	4	5	33	12	144
$x_2$	4	3	5	3	2	3	3	23	2	4
$x_3$	2	1	2	2	3	1	1	12	-9	81
$x_4$	3	4	3	4	4	5	4	27	6	36
$x_5$	1	2	1	1	1	2	2	10	-11	121
Сума:								105	0	386

Перед подальшою обробкою результатів ранжування необхідно провести перевірку достовірності експертних оцінок. Для цього спочатку здійснюємо перевірку загальної суми рангів:

$$R_i = \frac{N \cdot n(n+1)}{2}, \quad (2.1)$$

де  $N$  – кількість експертів,  $n$  – кількість показників для ранжування. Тоді,

$$R_i = \frac{7 \cdot 5(5+1)}{2} = 105.$$

Визначаємо середню суму рангів:

$$T = \frac{1}{n} R_i = \frac{1}{5} \cdot 105 = 21.$$

та відхилення суми рангів  $\Delta_i$  за кожним показником  $R_i$  від середньої суми (табл. 2.2):

$$\Delta_i = R_i - T. \quad (2.2)$$

Відхилення суми рангів за всіма показниками має дорівнювати 0, що ілюструє відповідний стовпчик табл. 2.2.

Обчислюємо загальну суму квадратів відхилень:

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2. \quad (2.3)$$

Тоді отримаємо:

$$S = 144 + 4 + 81 + 36 + 121 = 386.$$

Коефіцієнт узгодженості експертних оцінок визначаємо за формулою:

$$W = \frac{12S}{N^2(n^3 - n)}. \quad (2.4)$$

Числове значення коефіцієнта узгодженості експертних оцінок у нашому випадку становить

$$W = \frac{12 \cdot 386}{7^2(5^3 - 5)} = \frac{4632}{5880} = 0,79.$$

Згідно методики експертного оцінювання розраховане значення коефіцієнта узгодженості порівнюємо з мінімально допустимим, яке становить  $W_H = 0,77$  для

радіотехнічних виробів і систем [42]. Оскільки співвідношення  $W > W_H$ , справджується, вважаємо, що експертні оцінки заслуговують на довіру і їх можна використовувати для об'єктивного оцінювання.

Використовуючи отримані від кожного експерта результати ранжування спотворень (табл. 2.2), здійснюємо попарне порівняння всіх показників, а результати зведено у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Попарне порівняння показників

Показники	Пріоритет початкового показника, даного експертом							Сумарна оцінка	Коефіцієнт переваги
	1	2	3	4	5	6	7		
$x_1$ і $x_2$	>	>	<	>	>	>	>	>	1,5
$x_1$ і $x_3$	>	>	>	>	>	>	>	>	1,5
$x_1$ і $x_4$	>	>	>	>	>	<	>	>	1,5
$x_1$ і $x_5$	>	>	>	>	>	>	>	>	1,5
$x_2$ і $x_3$	>	>	>	>	<	>	>	>	1,5
$x_2$ і $x_4$	>	<	>	<	<	<	<	<	0,5
$x_2$ і $x_5$	>	>	>	>	>	>	>	>	1,5
$x_3$ і $x_4$	<	<	<	<	<	<	<	<	0,5
$x_3$ і $x_5$	>	<	>	>	>	<	<	>	1,5
$x_4$ і $x_5$	>	>	>	>	>	>	>	>	1,5

Коефіцієнти переваги можуть набувати таких значень:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1,5 & \text{при } x_i > x_j \\ 1,0 & \text{при } x_i = x_j, \\ 0,5 & \text{при } x_i < x_j \end{cases} \quad (2.5)$$

де  $x_i$  і  $x_j$  – показники, які порівнюють між собою.

Використовуючи дані про коефіцієнти переваги  $x_{ij}$  з табл. 2.3, складаємо квадратну матрицю (табл. 2.4):

$$A = \|x_{ij}\|. \quad (2.6)$$

Отримані дані числової оцінки попарного пріоритету показників використовують для розрахунку коефіцієнтів вагомості кожного показника.

Розрахунок вагомості  $K_{Bi}$  кожного показника здійснюють за такими співвідношеннями:

$$K_{Bi} = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}, \quad b_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (2.7)$$

де  $b_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го показника за результатами оцінок всіх експертів, який визначають як суму значень коефіцієнтів переваги  $x_{ij}$ , наданих усіма експертами за  $i$ -м показником.

Результати розрахунків коефіцієнтів вагомості занесені до табл. 2.4. Відносні оцінки вагомості  $K_{Bi}$  розраховують кілька разів, доки наступне значення буде відрізнятися від попереднього менше ніж на 5%. На другій та подальших ітераціях значення коефіцієнта вагомості  $K'_{Bi}$  розраховують так:

$$K'_{Bi} = \frac{b'_i}{\sum_{i=1}^n b'_i}, \quad (2.8)$$

де  $b'_i$  визначають за формулою

$$b'_i = x_{i1}b_{i1} + x_{i2}b_{i2} + \dots + x_{in}b_{in}. \quad (2.9)$$

Таблиця 2.4 – Результати обчислень коефіцієнтів вагомості

	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	Перший етап		Другий етап	
						Сума оцінок, $b_i$	$K_{Bi}$	Сума оцінок, $b'_i$	$K'_{Bi}$
x <sub>1</sub>	1	1,5	1,5	1,5	1,5	7	0,28	34	0,3
x <sub>2</sub>	0,5	1	1,5	0,5	1,5	5	0,2	22	0,19
x <sub>3</sub>	0,5	0,5	1	0,5	1,5	4	0,16	17,5	0,15
x <sub>4</sub>	0,5	1,5	1,5	1	1,5	6	0,24	27,5	0,24
x <sub>5</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3	0,12	14	0,12
Сума:						25	1,00	115	1,00

Отже, відповідно до даних табл. 2.4 найбільший коефіцієнт вагомості  $K'_{Bi} = 0,3$  відповідає спотворенню типу «блокінг-ефект». Тому можна зробити висновок, що саме блокова структура зображення є найбільш помітним видом спотворень, які вносить процес кодування за алгоритмом MPEG-2 у цифровий відеосигнал. Тому під час подальших досліджень погіршення якості відеозображення внаслідок кодування в форматі MPEG-2 доцільно акцентувати увагу саме на блоковій структурі зображення.

### **2.3 Характеристики та межі застосування методів суб'єктивного оцінювання якості зображень в системах ЦТБ**

Для того, щоб оцінювати і порівнювати різні відеосистеми, необхідно вміти визначати якість відеозображення, що демонструють глядачеві. Вимірювання візуальної якості є складним і часто неточним процесом, в якому на кінцевий результат впливає велика кількість факторів. Візуальна якість є суб'єктивною, тому досить складно врахувати всі особливості під час виявлення повної якісної картини цієї характеристики. Вимірювання візуальної якості за допомогою об'єктивних критеріїв дає точні і повторювані результати, але поки не існує об'єктивних систем вимірювання, які повністю відтворювали б суб'єктивний досвід спостереження відеозображення людиною.

Існує два класи суб'єктивних оцінок. По-перше, є оцінки, що встановлюють роботу систем за оптимальних умов. Їх зазвичай називають оцінками якості. По-друге, є оцінки, що встановлюють здатність систем зберігати якість за неоптимальних умов, що стосуються передавання зображення. Їх називають оцінками погіршення.

Формальний перелік технічних параметрів, що визначають якість відеозображення, містить такі характеристики як роздільна здатність, кількість градацій контрасту тощо. Окремим пунктом розглядають суб'єктивну якість зображень.

### 2.3.1 Призначення суб'єктивних методів вимірювання якості

Значну кількість суб'єктивних методів вимірювання використовують під час оцінювання якості зображення в телевізійних системах. Але на практиці конкретні методи мають бути використані для вирішення конкретних завдань вимірювання якості. Типові завдання вимірювання якості і методи, необхідні для вирішення цих задач відповідно до рекомендації ITU-R BT.500-12 [10], наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Вибір суб'єктивних методів вимірювання якості

Завдання вимірювання якості	Використовуваний метод
Вимірювання якості систем відносно еталонної	Метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale)
Вимірювання завадостійкості систем (тобто характеристик відмови)	Метод шкали погіршення з подвійним подразненням DSIS (Double Stimulus Impairment Scale)
Кількісне визначення якості систем та порівняння якості різних систем, коли відсутня еталонна система	Методи категорійного судження (Adjectival Categorical Judgement)
Вимірювання якості стереоскопічного кодування зображення	Метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale)
Вимірювання схожості між двома погіршеними телевізійними послідовностями	Метод неперервного оцінювання з одночасним подвійним подразненням SDSCE (Simultaneous Double Stimulus For Continuous Evaluation )
Порівняння різних інструментів стійкості до помилок	Метод неперервного оцінювання з одночасним подвійним подразненням SDSCE (Simultaneous Double Stimulus For Continuous Evaluation )

### 2.3.2 Метод шкали погіршення з подвійним подразненням

Суть методу шкали погіршення з подвійним подразненням DSIS (Double Stimulus Impairment Scale) полягає в тому, що тестові відеопослідовності показують послідовно парами: спочатку демонструють еталонну відеопослідовність (експерт знає про це), потім змінену [10]. Після перегляду пари відеопослідовностей у спосіб, показаний на рис. 2.2,а та 2.2,б, експерт має надати свою оцінку, використовуючи п'ятибальну шкалу. Експерти оцінюють ступінь погіршення зображення, обираючи свої оцінки від «погіршення непомітне» і «погіршення помітне, але не заважає» до «погіршення дратує» (рис. 2.3).

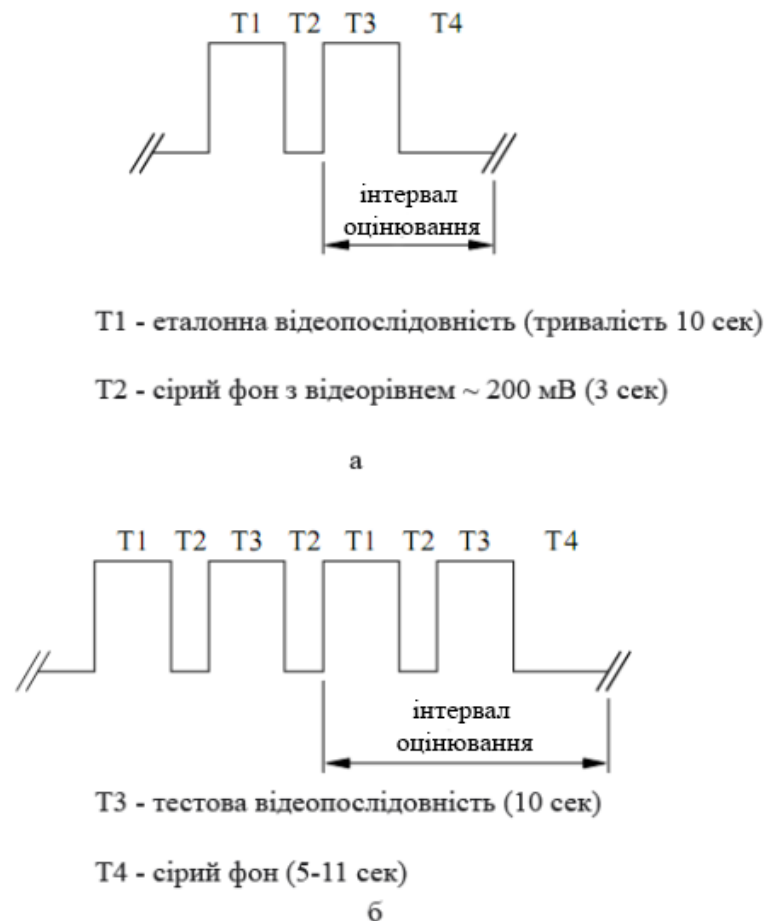


Рисунок 2.2 – Варіанти застосування методу шкали погіршення під час тестової сесії

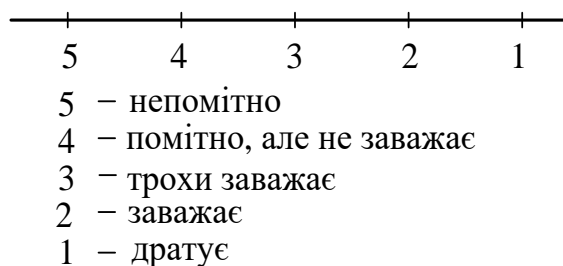


Рисунок 2.3 – Шкала методу DSIS

### 2.3.3 Метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням

Існує два варіанти реалізації методу неперервної шкали якості з подвійним подразненням DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale). В першому варіанті відеопослідовності показують парами, але тільки одну з них бачить експерт [6, 10]. Кожну пару показують задану кількість разів. Одна з відеопослідовностей – еталонна, але експерта про це не інформують. Після перегляду експерт повинен оцінити обидві відеопослідовності, використовуючи неперервну шкалу (рис. 2.4).

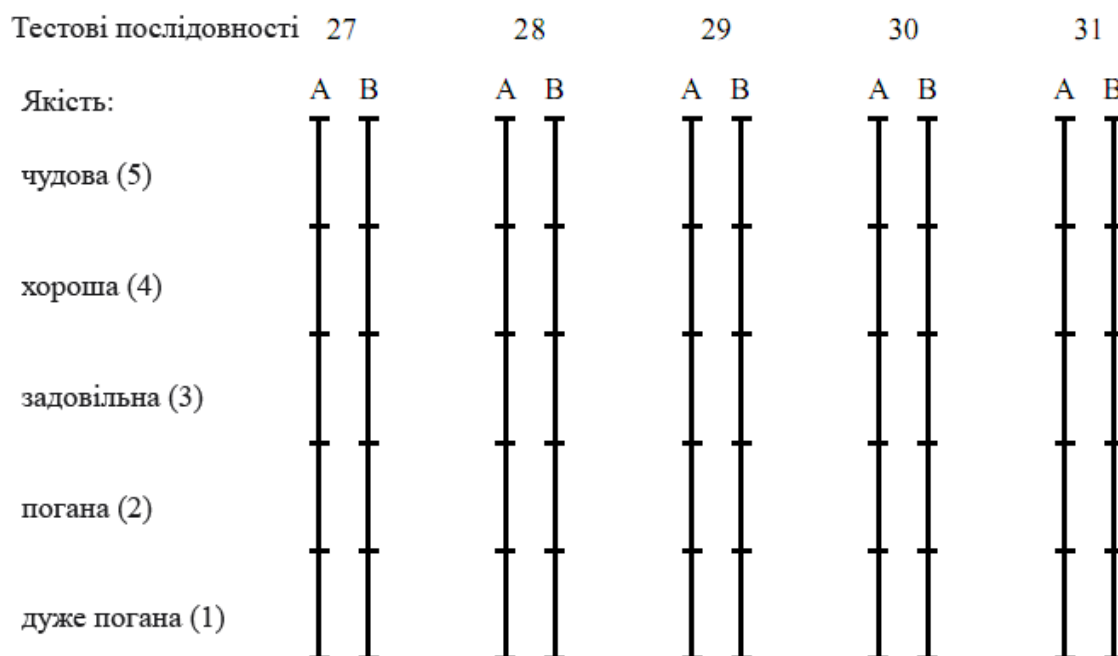
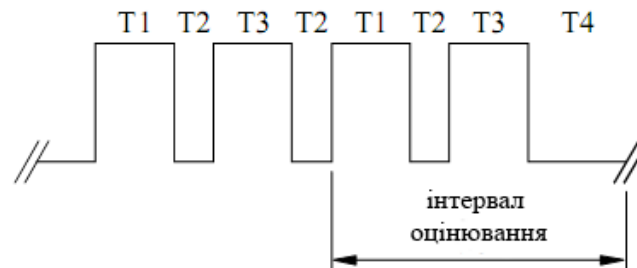


Рисунок 2.4 – Шкала методу DSCQS

У другому варіанті (який використовують частіше) відеопослідовності також показують парами, але видно одночасно обидві послідовності. Кожну пару показують задану кількість разів. Як і в першому варіанті, одна з пари відеопослідовностей – еталонна, але експерта про це не інформують. Шкала оцінки аналогічна представлений на рис. 2.4. Послідовність застосування методу під час тестової сесії показана на рис. 2.5.



T1 - відеопослідовність А (трив. 10 сек)

T2 - сірий фон з відеорівнем  $\sim 200$  мВ (3 сек)

T3 - відеопослідовність В (10 сек)

T4 - сірий фон (5-11 сек)

Рисунок 2.5 – Послідовність застосування методу DSCQS під час тестової сесії

### 2.3.4 Методи категорійного судження

Методи категорійного судження (Adjectival Categorical Judgement) можуть бути реалізовані з використанням як одного подразнення (Single Stimulus), так і двох подразнень (Stimulus Comparison), коли відсутня інформація про еталонне зображення чи відеопослідовність [10].

У випадку одного подразнення експерт може призначити відеопослідовності одну з категорій, які відображають судження про так чи інакше визначену характеристику зображення. Тоді шкала оцінки має вигляд, показаний в табл. 2.6.

У випадку двох подразнень за відсутності еталонного зображення відеопослідовності показують парами одночасно, і після перегляду експерт повинен оцінити кожен відеопослідовність (порівняти відеопослідовності в парі), використовуючи порівняльну шкалу на рис. 2.6. Оцінка зі знаком «мінус» означає, що оцінювана послідовність є гіршою від іншої послідовності в парі і навпаки.

Таблиця 2.6 – Шкала ITU-R для вимірювання якості та погіршення

5-бальна оцінка	Якість зображення	Погіршення зображення
5	Чудова	Непомітне
4	Хороша	Ледь помітне
3	Задовільна	Трохи заважає
2	Погана	Заважає
1	Дуже погана	Дратує

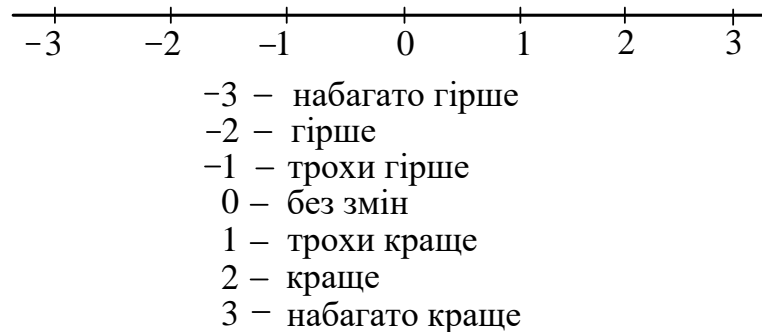


Рисунок 2.6 – Шкала методу категорійного судження з порівнянням стимулів

### 2.3.5 Інші методи суб'єктивного вимірювання якості зображень

Серед інших методів, рекомендованих та розроблених ITU і EBU, слід відзначити методи, засновані на *неперервному оцінюванні з одним або з одночасним подвійним подразненням* [10]. Під час тесту експерт може

переглядати будь-яку послідовність з тестового набору і давати їй свою оцінку, крім того він може явно переглянути еталонну відеопослідовність (також вона приховано присутня серед інших відеопослідовностей). Після перегляду експерт повинен оцінити відеопослідовності, використовуючи неперервну 100-бальну шкалу (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – 100-бальна шкала

Також існує *метод динамічних суб'єктивних експертиз*, в основу якого покладено використання рухомих полів порівняння і полів порівняння з рухомим сюжетом. Рухомі поля повинні здійснювати поступальний і обертальний рухи, а також забезпечувати повільну зміну рівня ТВ сигналу. Для перевірки системи передбачення кодера рухомий фрагмент зображення повинен переміщуватись в обидва боки від його центрального положення [43, 44].

Поле порівняння з рухомим сюжетом можна сформувати з початкового ТВ сигналу, яке також дозволяє врахувати умови досліджень. В результаті одночасно вдається на одному екрані порівняти частини зображення, що відповідають сигналам на вході і виході пристрою або системи, яку перевіряють. Порівняння полів можна довірити або спостерігачеві (експерту), або інструменту (вимірювальному приладу) для оцінювання параметрів вхідного і вихідного сигналів.

Для перевірки запропонованого методу оцінки, отримані за його допомогою, порівнюють з оцінками, отриманими під час суб'єктивних вимірювань.

### 2.3.6 Обробка результатів суб'єктивного оцінювання якості

Перший крок під час обробки результатів – це обчислення середньої оцінки [10] для кожної тестової сесії  $\bar{u}_{jkr}$ :

$$\bar{u}_{jkr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ijk}, \quad (2.10)$$

де  $u_{ijk}$  – оцінка  $i$ -го експерта для  $j$ -ої тестової сесії,  $k$ -го зображення (відеопослідовності),  $r$ -го повторення;  $N$  – кількість експертів.

Середні оцінки повинні мати відповідний довірчий інтервал, який можна отримати зі стандартного відхилення результатів тестової сесії. Запропоновано використовувати 95% довірчий інтервал

$$\left[ \bar{u}_{jkr} - \delta_{jkr}, \bar{u}_{jkr} + \delta_{jkr} \right], \quad (2.11)$$

де

$$\delta_{jkr} = 1,96 \frac{S_{jkr}}{\sqrt{N}}. \quad (2.12)$$

Стандартне відхилення результатів тестової сесії визначають за виразом:

$$S_{jkr} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{u}_{jkr} - u_{ijk})^2}{N-1}}. \quad (2.13)$$

Це означає, що з ймовірністю 95% абсолютне значення різниці між експериментальною середньою оцінкою і справжньою середньою оцінкою (за достатньо великої кількості спостерігачів) є меншим ніж довірчий інтервал за умови, що розподіл індивідуальних оцінок задовольняє зазначеним вимогам.

Подальші кроки з обробки результатів суб'єктивних тестів можуть бути спрямовані на виключення результатів певних спостерігачів, якщо отримане значення оцінки випадає з нормального розподілу оцінок під час тестової сесії. Опис цієї процедури докладно наведено в рекомендації ITU-R BT.500-12 [10].

Під час обробки результатів суб'єктивних тестів  $r$ -бальні оцінки часто переводять в нормалізовані оцінки  $p$ , що лежать в інтервалі від 0 до 1, які виражають відносну якість в долях одиниці [10, 40]:

$$p = \frac{\bar{u} - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}, \quad (2.14)$$

де  $u_{\min}$  – мінімально можлива оцінка за  $r$ -бальної шкали, що відповідає найнижчій якості;  $u_{\max}$  – максимально можлива оцінка за  $r$ -бальної шкали, що відповідає найвищій якості.

#### **2.4 Особливості застосування методів об'єктивного вимірювання якості зображень в системах ЦТБ**

Об'єктивні методи вимірювання якості представляють у вигляді математичних алгоритмів, які описують процеси суб'єктивного оцінювання якості та засновані на критеріях і метриках, які можуть бути виміряні об'єктивно. Результати об'єктивних вимірювань повинні добре узгоджуватися з результатами суб'єктивного оцінювання для однієї і тієї ж відеопослідовності.

На практиці досить часто виникають ситуації, коли початкове і оброблене зображення здаються спостерігачеві ідентичними, тоді як об'єктивні методи для одних і тих же зображень дають дуже велику похибку. Враховуючи те, що оцінка якості людиною є вирішальною, подібна похибка під час об'єктивних вимірювань може бути не допустимою. Це обумовлює головну складність розробки об'єктивних методів.

Методи об'єктивного вимірювання якості зображень можна розділити на дві великі групи – методи, що не враховують особливості сприйняття зображень людиною, та методи, які враховують ці особливості. Методи першої групи більш прості для реалізації (пікове відношення сигнал/шум, середньоквадратична абсолютна різниця, середня різниця), проте методи другої групи дають найбільш відповідні суб'єктивним оцінкам результати.

### 2.4.1 Пікове відношення сигнал/шум

Пікове відношення сигнал/шум PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) вимірюють за допомогою логарифмічної шкали і обчислюють за середньоквадратичним відхиленням початкового зображення від перетвореного відеокадру відносно квадрата найбільшого можливого значення пікселя  $(2^n-1)^2$ , де  $n$  – кількість біт на відлік (піксель) кадру [6, 45, 46]:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \frac{(2^n - 1)^2 \cdot w \cdot h}{\sum_{i=1, j=1}^{wh} (x_{ij} - y_{ij})^2}, \quad (2.15)$$

де  $w$  – ширина відеокадру,  $h$  – висота відеокадру,  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  – значення пікселів початкового та обробленого зображень відповідно.

Величину PSNR можна легко і швидко обчислити, тому ця метрика популярна під час оцінювання якості зображення. Її використовують для порівняння стиснутих і не стиснутих відеопослідовностей.

Метрика PSNR має цілий ряд недоліків. Для обчислення величини PSNR необхідно мати і початкову, і перетворену послідовності, але перша буває не завжди доступна. Крім того, не завжди легко перевірити, чи початкове відео має високу якість. Величина PSNR погано корелює з результатами суб'єктивного оцінювання якості, наприклад, з DSCQS. Для деякого зображення або послідовності зображень велике PSNR зазвичай вказує на високу, а мале PSNR – на низьку якість перетворених зображень у порівнянні з початковими. Але конкретні величини необов'язково гарантують абсолютно суб'єктивну якість.

### 2.4.2 Середньоквадратична абсолютна різниця

Значенням метрики середньоквадратичної абсолютної різниці MSAD (Mean Square Absolute Difference) є усереднена абсолютна різниця значень кольорних

компонент у відповідних точках порівнюваних зображень [46]. Цю метрику використовують, наприклад, для налаштування кодеків або фільтрів.

Розраховують MSAD за формулою:

$$MSAD(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{mn} |X_{i,j} - Y_{i,j}|}{mn}, \quad (2.16)$$

де  $m$  – кількість пікселів по горизонталі в відеокадрі,  $n$  – кількість пікселів по вертикалі у відеокадрі,  $X_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$  – значення пікселів початкового та обробленого зображень відповідно.

### 2.4.3 Середня різниця

Значенням метрики середньої різниці (Delta) є усереднена різниця значень кольорних компонент у відповідних точках порівнюваних зображень [46]. Її також використовують для налаштування кодеків або фільтрів. Формула для розрахунку даної метрики:

$$d(X, Y) = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{mn} (X_{i,j} - Y_{i,j})}{mn}. \quad (2.17)$$

Метрикам MSAD та Delta характерні ті ж недоліки, що й метриці PSNR – погана кореляція з результатами суб'єктивних тестів. Для деякого зображення або послідовності зображень мале значення MSAD чи Delta зазвичай вказує на високу, а велике значення MSAD чи Delta – на низьку якість перетворених зображень у порівнянні з початковими. Але конкретні величини необов'язково гарантують абсолютно суб'єктивну якість, до того ж значення пікселів початкового та обробленого зображень зазвичай слабо відрізняються, що приводить до незначних змін цих метрик під час оцінювання відеопослідовностей з різними характеристиками стиснення. Отже, логарифмічна шкала PSNR більше відповідає природі зору людини ніж MSAD та Delta.

## 2.4.4 Індекс структурної схожості зображення

Суть методу полягає в обчисленні індексу структурної схожості зображення (Structure Similarity Index Measure – SSIM) [47], який базується на вимірюванні трьох складових – схожості за яскравістю, схожості за контрастом і структурної схожості та об'єднанні їх в кінцевий результат. Алгоритм обчислення індексу SSIM представлений на рис. 2.8. На відміну від розглянутих вище методів цей метод враховує особливості сприйняття зображень людиною, які полягають у підвищеній увазі до зміни яскравості та контрасту зображення.

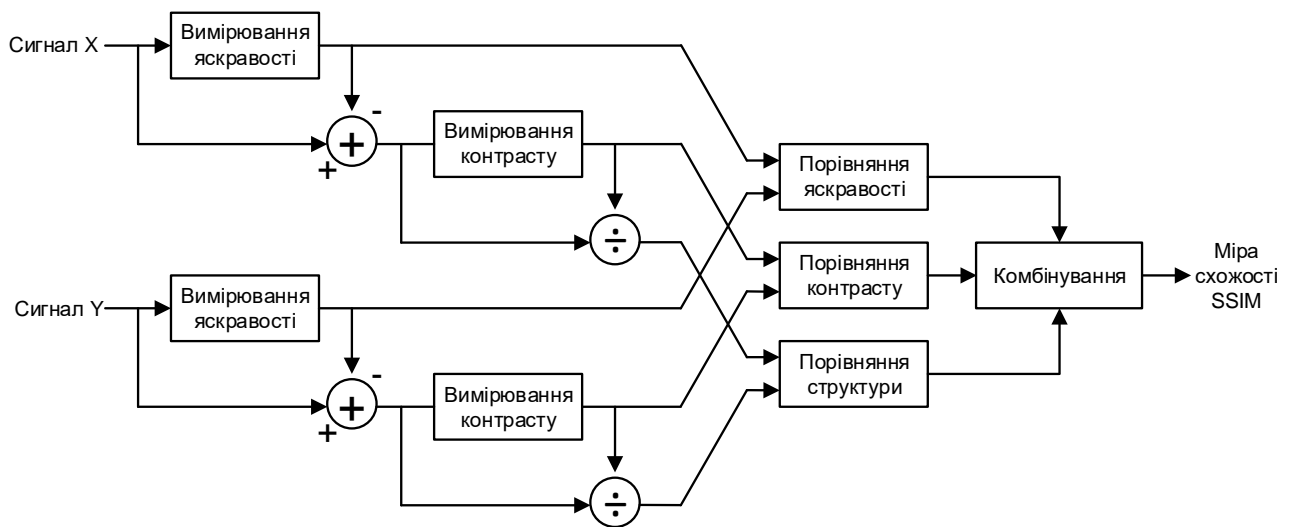


Рисунок 2.8 – Схема алгоритму обчислення індексу SSIM

Нехай  $x = \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$  і  $y = \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$  – еталонне і спотворене зображення відповідно. Тоді індекс структурної схожості зображення обчислюють згідно з виразом:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma, \quad (2.18)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  – параметри, що визначають ступінь вагомості трьох складових індексу SSIM.

У виразі (2.18) міри схожості за яскравістю  $l(x, y)$ , за контрастом  $c(x, y)$  і структурної схожості  $s(x, y)$  представлені у вигляді:

$$l(x, y) = \frac{2\bar{x}\bar{y} + C_1}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + C_1}, \quad (2.19)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (2.20)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}, \quad (2.21)$$

де  $\bar{x}$  – середнє значення пікселів еталонного зображення як міра його яскравості:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2.22)$$

$\bar{y}$  – середнє значення пікселів спотвореного зображення, як міра його яскравості:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (2.23)$$

$\sigma_x^2$  – стандартне відхилення (девіація) значень пікселів еталонного зображення, як міра його контрасту:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.24)$$

$\sigma_y^2$  – стандартне відхилення (девіація) значень пікселів спотвореного зображення, як міра його контрасту:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (2.25)$$

$\sigma_{xy}$  – кореляція значень пікселів еталонного і спотвореного зображення, як міра структурної схожості двох зображень:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (2.26)$$

$C_1, C_2, C_3$  – деякі константи.

Якщо мають місце співвідношення  $C_1 = (K_1L)^2$ ,  $C_2 = (K_2L)^2$ ,  $C_3 = C_2/2$ , де  $K_1 \ll 1$ ,  $K_2 \ll 1$ ,  $L$  – динамічний діапазон яскравості пікселів зображення (255 для 8-бітних зображень), та прийняти  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ , тоді вираз, що описує індекс структурної схожості зображення, набуде вигляду:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + C_1)(2 \cdot \sigma_{xy} + C_2)}{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (2.27)$$

Визначення індексу SSIM відповідно до виразу (2.27) задовольняє трьом умовам:

- симетричності:  $SSIM(x, y) = SSIM(y, x)$ ;
- обмеженості:  $SSIM(x, y) \leq 1$ ;
- єдиного максимуму:  $SSIM(x, y) = 1$  лише тоді, коли  $x=y$ .

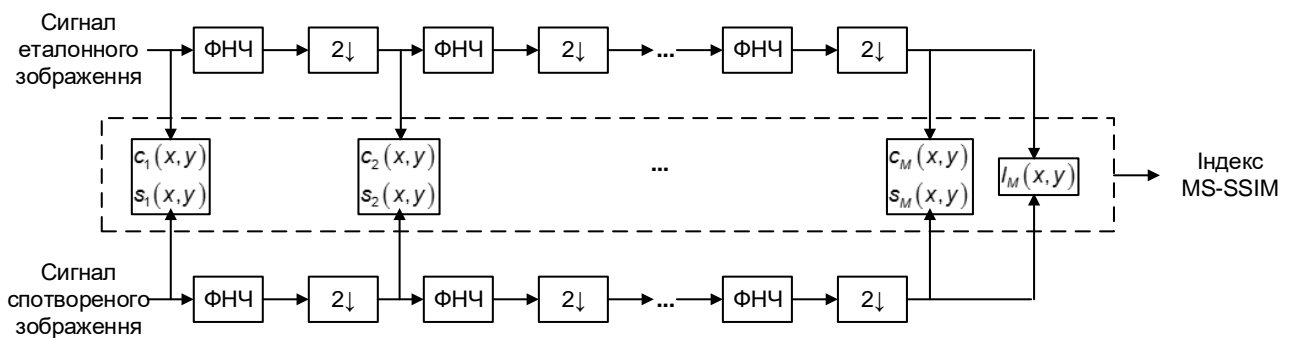


Рисунок 2.9 – Схема алгоритму обчислення індексу MS-SSIM

Сприйняття деталей зображення залежить від його роздільної здатності, відстані від площини зображення до спостерігача та сприйнятливості зору спостерігача. На практиці суб'єктивне оцінювання заданого зображення змінюється, коли змінюються ці фактори. Метод SSIM доцільно застосовувати лише за певних умов, оскільки він не враховує наведені вище фактори. Натомість метод багатомасштабного індексу структурної схожості (MS-SSIM) враховує деталі зображення за різної роздільної здатності [48].

Алгоритм роботи методу MS-SSIM наведено на рис. 2.9. Подаючи на вхід сигнали еталонного і спотвореного зображення, система ітеративно застосовує фільтр низьких частот і зменшує роздільну здатність відфільтрованого зображення вдвічі. Початковому зображенню присвоюють індекс зі значенням масштабного множника, що дорівнює 1, а зображенню після  $M-1$  рівнів фільтрації та пониження роздільної здатності, – індекс  $M$ . На  $j$ -й ітерації міру

схожості за контрастом та міру структурної схожості розраховують та позначають як  $c_j(x, y)$  і  $s_j(x, y)$  відповідно. Міру схожості за яскравістю розраховують лише для індексу  $M$  і позначають як  $l_M(x, y)$ . Узагальнений вираз для обчислення індексу MS-SSIM має такий вигляд [48]:

$$MS-SSIM(x, y) = [l_M(x, y)]^{\alpha_M} \cdot \prod_{j=1}^M [c_j(x, y)]^{\beta_j} [s_j(x, y)]^{\gamma_j}. \quad (2.28)$$

Експоненти  $\alpha_M$ ,  $\beta_j$  і  $\gamma_j$  аналогічно до виразу (2.18) використовують для коригування ступеня вагомості різних складових. Визначення індексу MS-SSIM за формулою (2.28) задовольняє трьома умовам, визначеним вище. Метод SSIM є окремим випадком методу MS-SSIM, якщо покласти  $M=1$ .

#### 2.4.5 Міра якості відео на основі дискретного косинусного перетворення

Алгоритм вимірювання якості відео (Video Quality Measurement – VQM) ґрунтується на ідеї про те, що в більшості випадків спостерігач під час оцінювання якості зображення менше звертає увагу на дрібні деталі, тоді як його основна увага концентрується на великих об'єктах [9]. Отже, можливо представити високочастотну часову і просторову інформацію з меншою точністю, а втратою якості у такому разі можна знехтувати, оскільки око малочутливе до спотворень на подібному рівні. Тому замість попиксельного порівняння яскравості двох зображень (еталонного і спотвореного) в алгоритмі здійснюють порівняння зважених частот на рівні людського сприйняття.

Крім того, відповідно до [9] найбільший пріоритет під час оцінювання якості мають ті частини зображення, яскравість яких найбільша. Це ґрунтується на припущенні про те, що якщо частина зображення більш яскрава, то і спотворення на ній повинні бути більш помітні для людини. Алгоритм обчислення міри VQM представлений на рис. 2.10.

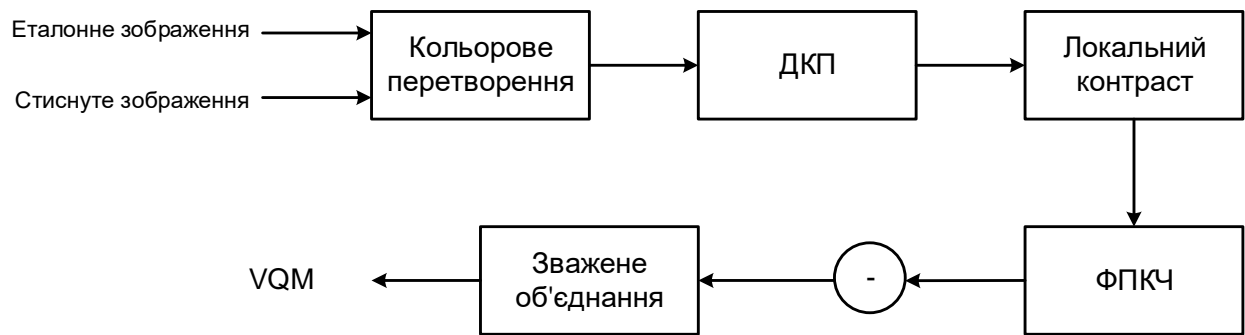


Рисунок 2.10 – Схема алгоритму обчислення міри VQM

Етапи алгоритму:

1. Зчитування блоків розміром  $8 \times 8$  з початкового і спотвореного зображень.
2. Кожен блок піддають дискретному косинусному перетворенню (ДКП), внаслідок чого отримують дві матриці частотних коефіцієнтів ДКП розміром  $8 \times 8$ .
3. Для кожного блоку здійснюють масштабування частот залежно від його загальної яскравості. Результатом цього етапу є дві матриці локального контрасту (LC – Local Contrast) для блоків з початкового і спотвореного зображень відповідно:

$$LC(i, j) = \frac{DCT(i, j) \left( \frac{DC}{1024} \right)^{0.65}}{DC}, \quad (2.29)$$

де  $DCT(i, j)$  – матриця розміром  $8 \times 8$ , що є результатом дискретного косинусного перетворення початкового блоку,  $DC$  – це середня яскравість цього блоку перед перетворенням, що має нульову просторову частоту, тобто  $DC = DCT(0,0)$ .

4. Кожен блок ділять на стандартну матрицю квантування, в результаті отримують дві матриці, що містять зважені частоти з урахуванням сприйняття людини.

5. Обчислюють функцію просторової контрастної чутливості ФПКЧ (Spatial Contrast Sensitivity Function – SCSF). Для цього беруть абсолютне відхилення відповідних елементів отриманих матриць, обчислюють їх суму, додають її до суми вже переглянутих блоків та обчислюють максимальне відхилення відповідних елементів матриць (на рис. 2.10 позначено знаком «-»).

6. На останньому етапі здійснюють обчислення якості відеосигналу:

$$VQM=10\left(\frac{1000 \cdot (\text{sum})}{(\text{width} \cdot \text{height})} + 5 \cdot \text{max}\right), \quad (2.30)$$

де  $\text{sum}$  – це сума усіх абсолютних відхилень,  $\text{max}$  – максимальне з усіх відхилень за усім кадром. Таким чином, оцінку якості зображення здійснюють з урахуванням максимального відхилення по усьому кадру, оскільки в алгоритмі зроблено припущення про те, що одне велике спотворення в одній частині зображення відверне увагу спостерігача від менших спотворень в інших частинах кадру.

#### **2.4.6 Алгоритм визначення якості зображення на основі методу ледь помітних відмінностей Сарнова**

В основі алгоритму PQR (Picture Quality Rating) лежить метод ледь помітних відмінностей (ЛПВ) Сарнова (Sarnoff's JND – Just-Noticeable Differences) [49, 50].

Алгоритм ЛПВ аналізує просторові, часові і колірні зміни, що вносить система в тестове зображення, і визначає, чи вплинуть ці зміни на сприйняття зображення глядачем. Не маючи зв'язку з відео, що аналізується, алгоритм JND може бути використаний для визначення того, чи помітить глядач ефекти компресії на відеозображенні.

Перед порівнянням початкової і обробленої послідовностей зображень алгоритм здійснює складну фільтрацію кожної послідовності для виділення тієї візуальної інформації, яка найсильніше впливає на сприйняття людини. Спочатку розділяють кожне поле послідовностей на масиви яскравості і кольоровості (рис. 2.11). Визначаючи середню яскравість кожного поля, система враховує такі чинники, як падіння чутливості зорового сприйняття людини у випадку зміни темної сцени на яскраву.

Потім виконують три окремі виміри контрасту в термінах орієнтації, мерехтіння і колірного зміщення. Контраст розраховують у вигляді індивідуальних і локальних різниць значення пікселів. Тим різницям, які, як припускає модель, будуть помічені спостерігачем з ймовірністю 75%, надають чисельне значення, рівне одній ЛПВ. Помітні пікселі передають на наступний рівень обробки.

Алгоритм маскуванню енергії контрасту (Contrast Energy Masking) в ЛПВ враховує пониження чутливості зорової системи людини до спотворень в складних областях зображення. Наприклад, спотворені елементи зображення в області, яка представляє листя дерева, враховують з меншою вагою, ніж в області, що відповідає гладкій шкірі обличчя.

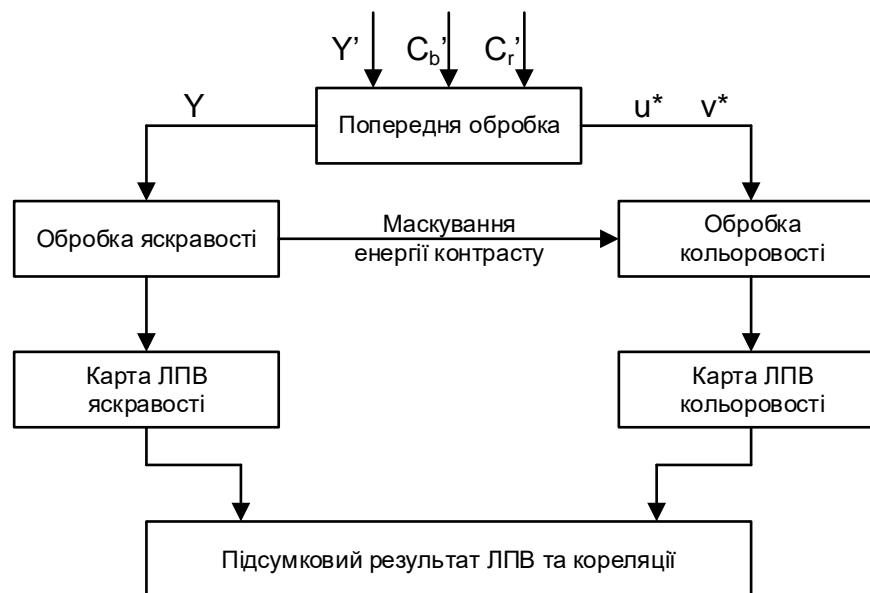


Рисунок 2.11 – Схема алгоритму обчислення PQR

Після фільтрації кожної послідовності для виділення областей, найбільш схильних до помітних змін, алгоритм порівнює різниці зображень початкової еталонної послідовності і обробленої тестової послідовності. Система будує одну карту ЛПВ для помітних відмінностей за яскравістю і іншу – для помітних відмінностей за кольором (рис. 2.11). В роботі [50] зазначено, що ці карти ЛПВ, на відміну від простих карт різниць зображень, показують ті зміни зображень, які

будуть помітні для людини. Чим помітніша зміна, тим яскравіша відповідна область на карті.

Метод ЛПВ Сарнова, апаратно реалізований компанією Tektronix в аналізаторі якості зображень, отримав назву PQR (Picture Quality Rating).

Якщо величина PQR дорівнює нулю, це означає, що система не виявила помітних відмінностей між еталонним і обробленим зображеннями. Значення між нулем і чотирма говорять про незначну відмінність. Значення понад 10 вказують на істотні (але прийнятні) відмінності.

#### 2.4.7 Інші методи об'єктивного вимірювання якості зображень

Існують інші алгоритми обчислення якості відеопослідовностей, що ґрунтуються на об'єктивних метриках, проте вони мають вузьке призначення, оскільки дають можливість описати лише певне спотворення зображення.

*Метрика мерехтіння між кадрами (BFM – Brightness Flicking Metric) [46].* Метрика BFM призначена для вимірювання рівня мерехтіння між кадрами відеопослідовності.

За результатами роботи методу будують графік покадрового значення метрики (рис. 2.12), де значення метрики – це абсолютна різниця між середньою яскравістю попереднього і поточного кадру. Підсумкове значення метрики є середнє арифметичне значення з усіх покадрових значень.

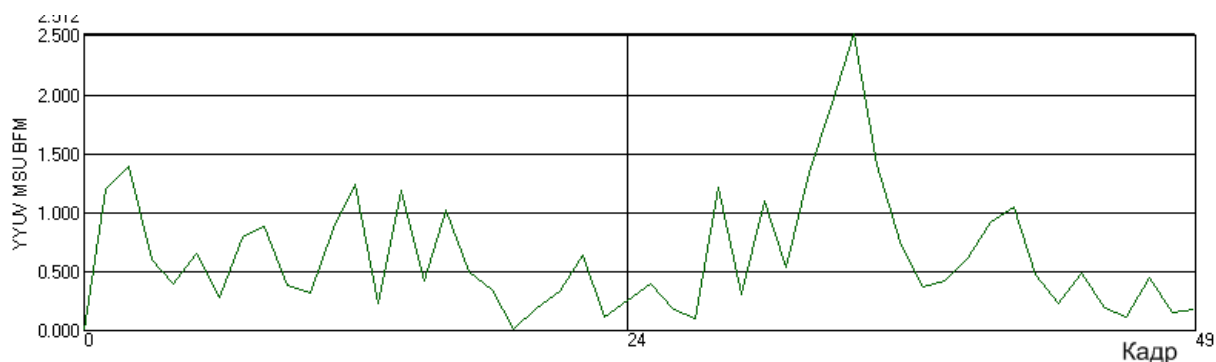


Рисунок 2.12 – Приклад графіка, що ілюструє метрику BFM

Для кожного кадру обчислюють середнє арифметичне значення яскравості в кадрі. В значення метрики в кадрі заносять модуль різниці між поточним середнім значенням і значенням, отриманим в попередньому кадрі.

*Метрика пропущених кадрів (DFM – Drop Frame Metric)* [46]. Метрика DFM призначена для підрахунку кількості пропущених кодером кадрів в послідовності.

Під час візуалізації метрики відображають міжкадрову різницю в каналі яскравості плюс 128. Отже, сірий колір (128, 128, 128) позначає повний збіг яскравості пікселя з яскравістю пікселя в попередньому кадрі. За результатами роботи методу будують графік покадрового значення метрики (рис. 2.13), де 0 означає, що кадр присутній, а 1 – що пропущений. Як підсумкове значення метрики виводиться кількість пропущених кадрів.

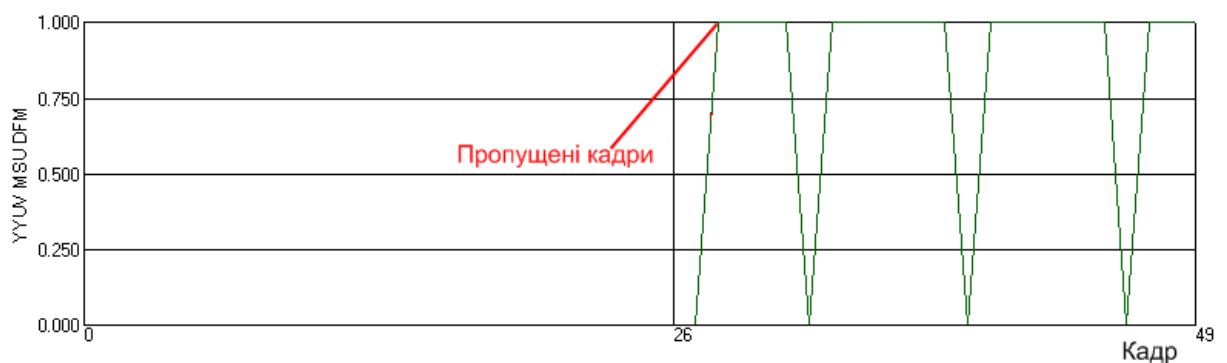


Рисунок 2.13 – Приклад графіка, що ілюструє метод DFM

*Метрика оцінки рівня шуму (NE – Noise Estimation Metric)* [46]. Метрику Noise Estimator використовують для обчислення рівня шуму кожного кадру послідовності.

Метрика реалізує три різні алгоритми визначення рівня шуму:

- медіани абсолютного відхилення;
- блочної структури зображення;
- просторово-часових гістограм.

За результатами роботи метрики будують графік покадрового значення рівня шуму. Підсумковим значенням метрики є середнє арифметичне з усіх 30% кадрових значень.

*Алгоритм медіани абсолютного відхилення (MAD – Median absolute deviation)* [46]. Для кожного кадру здійснюють вейвлетну декомпозицію Хаара. Потім обчислюють медіану з абсолютних значень НН-компонент (високочастотних коефіцієнтів). Підсумковим значенням метрики є нормована медіана.

*Алгоритм, що базується на блочній структурі зображення (Block-Based)* [46]. Кожний кадр розбивають на блоки розміром 8x8. Для кожного блоку обчислюють значення стандартного відхилення яскравості.

Потім ці значення сортують за збільшенням. Блок з якнайменшим значенням буде найбільш розмитим. Вважають, що зміна яскравості в розмитому блоці може мати місце внаслідок шуму. Нормоване середнє арифметичне 30% значень всіх блоків з якнайменшими значеннями є результатом метрики.

*Алгоритм просторово-часових гістограм (Spatio-Temporal Gradients)*. Для кожного кадру здійснюють вейвлетну декомпозицію. Будують просторову і часову гістограму. Первинна оцінка рівня шуму визначається значенням, коли часова або просторова гістограма досягає свого максимального значення. Рішення про те, яку гістограму використовувати, визначається відхиленням гістограм від розподілу Релея. Потім ця оцінка корегується, використовуючи тест Колмогорова-Смірнова. Нормована скорегована оцінка є результатом метрики [46].

*Метрика моментів зміни сцени (SCD – Scene Change Detector)* [46]. Ця метрика призначена для автоматичного визначення моментів зміни сцени в послідовності кадрів. Вона реалізує чотири різні алгоритми побудови міри схожості сусідніх кадрів:

- піксельне порівняння кадрів (Pixel-level comparison);
- порівняння глобальних гістограм розподілу яскравості (Global Histogram);
- поблочне порівняння гістограм розподілу яскравості (Block-Based Histogram);
- побудову міри схожості на основі інформації про рух (Motion-Based).

Під час візуалізації метрики відображають значення каналу яскравості. Яскравість першого кадру нової сцени штучно збільшують.

За результатами роботи методу будують графік (рис. 2.14), на якому 1 означає, що кадр є першим кадром в сцені. Інакше кадру відповідає 0. Середнє значення метрики для послідовності дорівнює кількості знайдених змін сцени.

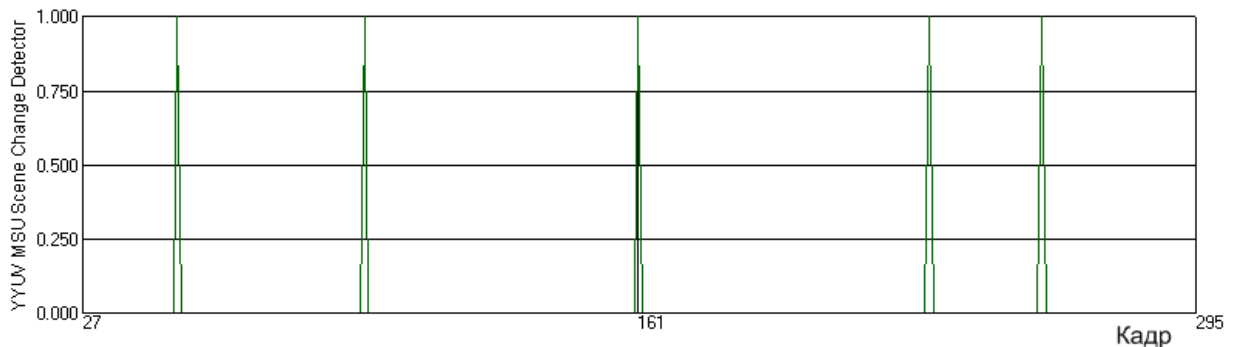


Рисунок 2.14 – Приклад графіка SCD

#### 2.4.8 Зв'язок між суб'єктивними та об'єктивними оцінками якості

Під час розроблення нових методів об'єктивного вимірювання якості чи в процесі вибору існуючих об'єктивних метрик для оцінювання погіршення якості, які вносять спотворення, обов'язково постає питання відповідності результатів, отриманих шляхом використання цих методів, суб'єктивним експертним оцінкам.

Першим кроком є знаходження функції відповідності між суб'єктивними середніми оцінками якості (DMOS) та оцінками якості, отриманими в результаті використання об'єктивних методів (VQR). Приклад характеру такої залежності наведено на рис. 2.15.

Така залежність носить монотонно зростаючий характер на всьому інтервалі значень, а тому може бути апроксимована відповідно до рекомендацій [51] за допомогою однієї з функцій:

- кубічного полінома

$$DMOS_p = A_0 + A_1 \cdot VQR + A_2 \cdot VQR^2 + A_3 \cdot VQR^3, \quad (2.36)$$

де  $DMOS_p$  – приведені до шкали суб'єктивних оцінок  $DMOS$  значення об'єктивних метрик,  $A_0, A_1, A_2, A_3$  – параметри полінома;

– логістичної кривої

$$DMOS_p = A_0 + \frac{A_1 - A_0}{1 + \left( \frac{VQR + A_5}{A_3} \right)^{A_4}}, \quad (2.37)$$

де  $A_0, A_1, A_3, A_4, A_5$  – параметри кривої.

Для знаходження функції відповідності можна також скористатися спрощеною логістичною функцією (2.5).

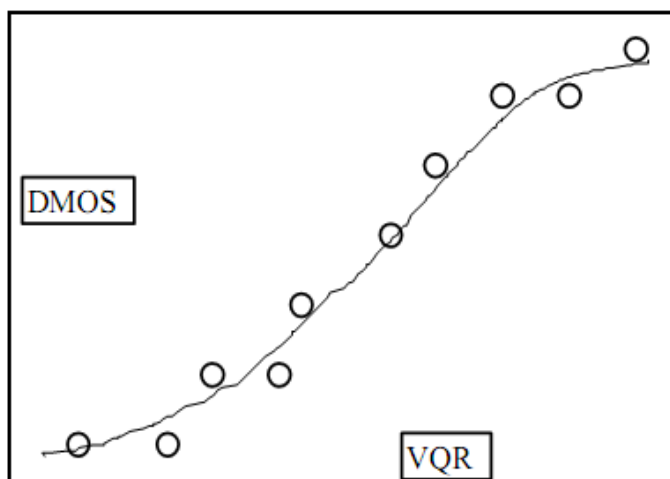


Рисунок 2.15 – Приклад характеру залежності DMOS та VQR

Після знаходження функції відповідності здійснюють перевірку ступеня узгодженості об'єктивних та суб'єктивних оцінок якості за одним із трьох критеріїв [51]:

- критерієм лінійної кореляції;
- критерієм монотонності функції відповідності;
- критерієм щільності значень апроксимованої величини.

*Лінійність кореляції* визначають коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона [52] між приведеними до шкали суб'єктивних оцінок значеннями об'єктивних метрик  $DMOS_p$  та вимірними суб'єктивними середніми оцінками DMOS.

Монотонність функції відповідності визначають коефіцієнтом рангової кореляції Спірмена [52] між приведеними до шкали суб'єктивних оцінок значеннями об'єктивних метрик  $DMOS_p$  та виміряними суб'єктивними середніми оцінками DMOS.

Щільність значень апроксимованої величини визначають коефіцієнтом відокремленості (як відношення кількості відокремлених точок до загальної кількості точок).

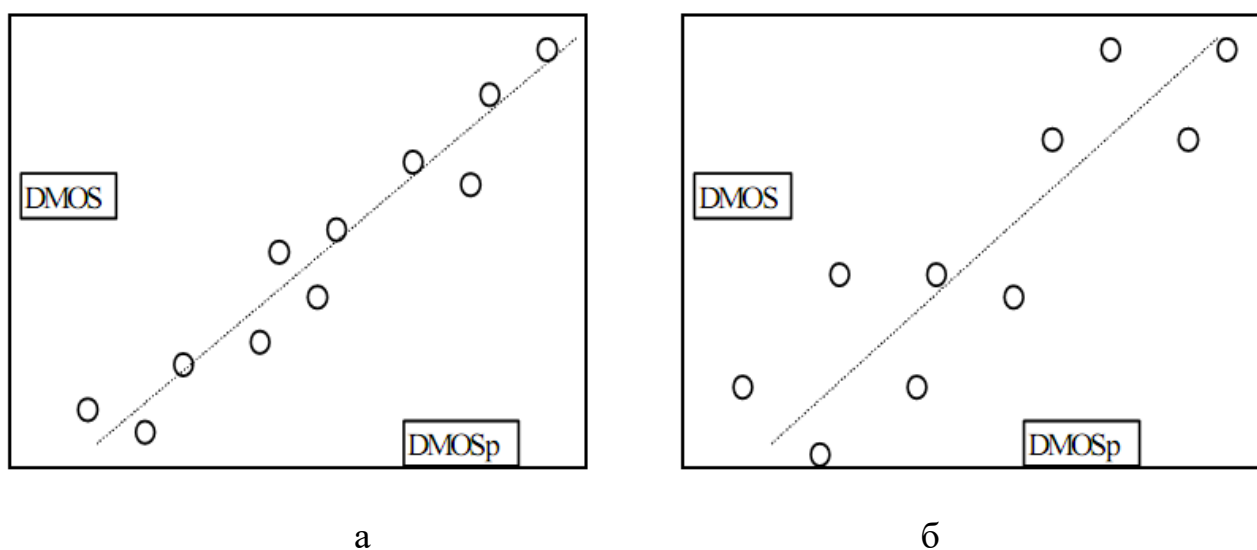


Рисунок 2.16 – Метод з більшою (а) та меншою (б) лінійністю кореляції

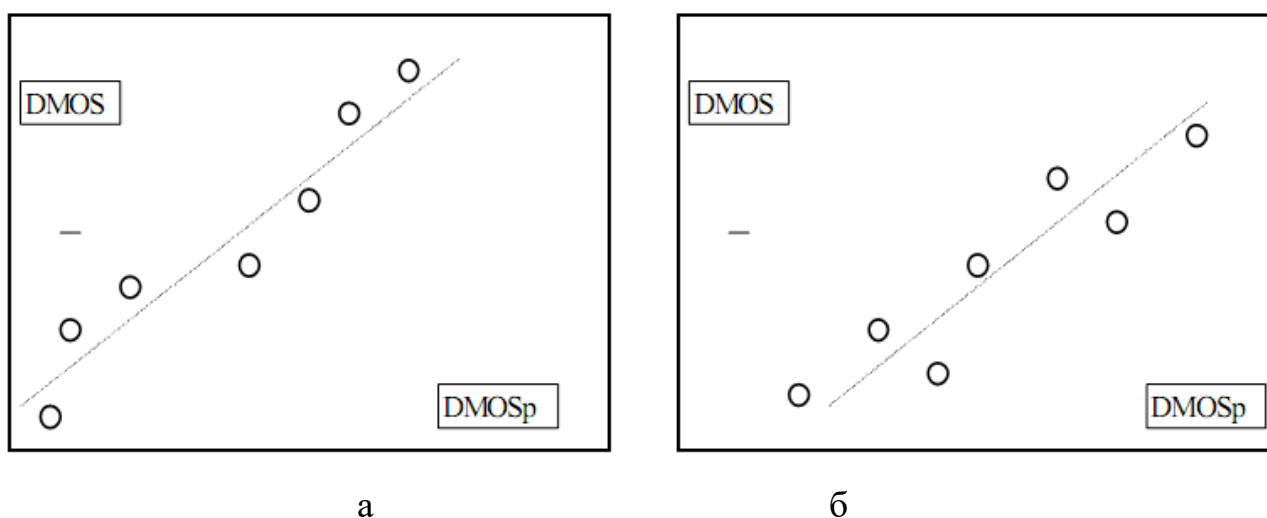


Рисунок 2.17 – Метод з більшою (а) та меншою (б) монотонністю

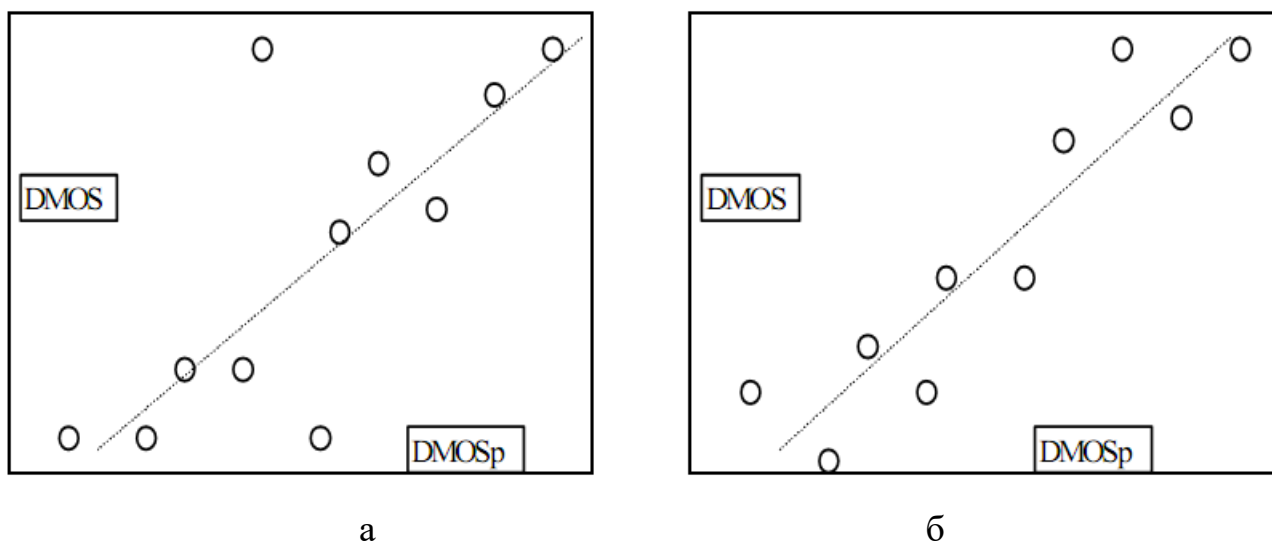


Рисунок 2.18 – Метод з більшою (а) та меншою (б) кількістю відокремлених точок

Рекомендації щодо вибору об'єктивних методів ґрунтуються на оцінках ступеня узгодженості об'єктивних та суб'єктивних методів за наведеними вище критеріями. Критерій лінійної кореляції слід використовувати як основний, інші два критерії є додатковими та можуть використовуватись у разі необхідності. Інтерпретація оцінок ступеня узгодженості об'єктивних та суб'єктивних методів наведена на рис. 2.16 – 2.18.

Коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона – це метрика, пов'язана з середньою помилкою – середнім відхиленням від лінії апроксимації, а тому менші значення середньої помилки, як на рис. 2.16,а, призводять до більших значень коефіцієнта Пірсона.

Більші значення коефіцієнта рангової кореляції Спірмена означають більшу монотонність, оскільки коефіцієнт Спірмена передбачає зміну оцінки  $DMOS_p$ , яка має той же знак, що й зміна оцінки  $DMOS$ . Так, метод на рис. 2.17,б характеризується меншою монотонністю та помилково передбачає зменшення оцінки  $DMOS_p$  для випадку, коли спостерігачі насправді бачать зростання оцінки  $DMOS$ .

Метод, представлений на рис. 2.19,а, має більшу кількість відокремлених точок, отже, він характеризується меншою щільністю значень апроксимованої величини.

## 2.5 Вибір об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень

Для того, щоб здійснити вибір об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень для подальших експериментальних досліджень, запропоновано шість класифікаційних критеріїв:

- обчислювальна складність методу;
- відповідність суб'єктивним оцінкам якості;
- необхідність еталонного зображення;
- відома апаратна реалізація;
- сфера застосування;
- доступність методу в програмному середовищі.

Розташовані у порядку зменшення значущості, ці критерії дають можливість сформувати набір об'єктивних методів, що будуть використані під час досліджень. Необхідність застосування набору критеріїв для вибору методів дослідження обумовлена наявністю широкого спектру об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень, доступних на сьогодні.

Ці методи досліджено у п. 2.4 дисертації. За результатами аналізу сформовано таблицю порівняння об'єктивних методів вимірювання якості за рядом запропонованих критеріїв (табл. 2.7).

За обчислювальною складністю об'єктивні методи можна розділити на три групи. До першої групи можна віднести методи з *низькою обчислювальною складністю* (PSNR, MSAD, Delta, BFM, DFM), які здійснюють прості математичні операції над яскравістю чи кольоровістю пікселів у кадрах.

До другої групи віднесено методи *середньої складності* (SSIM, MS-SSIM, NE, SCD), які ґрунтуються на простих математичних операціях над сигналами яскравості та кольоровості пікселів у кадрах для визначення кількох часткових показників з подальшим об'єднанням їх у єдиний показник якості.

Таблиця 2.7 – Порівняння об’єктивних методів вимірювання якості за рядом критеріїв

Критерії	Об’єктивні методи вимірювання якості відеозображень										
	PSNR	MSAD	Delta	SSIM	MS-SSIM	VQM	PQR	BFM	DFM	NE	SCD
Обчислювальна складність методу	низька	низька	низька	середня	середня	висока	висока	низька	низька	середня	середня
Відповідність суб’єктивним оцінкам якості	низька	низька	низька	середня	висока	середня	висока	низька	низька	низька	низька
Необхідність еталонного зображення	так	так	так	так	так	так	так	ні	ні	ні	ні
Відома апаратна реалізація	так	ні	ні	ні	ні	ні	так	ні	ні	ні	ні
Сфера застосування	загал.	загал.	загал.	загал.	загал.	загал.	загал.	спец.	спец.	спец.	спец.
Доступність методу в програмному середовищі	так	так	так	так	так	так	ні	так	так	так	так

До третьої групи належать методи *високої обчислювальної складності* (VQM, PQR), що потребують виконання операцій обчислення ДКП або обробки великих масивів даних для побудови карт ЛПВ яскравості або кольоровості.

За ступенем відповідності суб'єктивним оцінкам якості виділяють методи з *низькою відповідністю* (PSNR, MSAD, Delta, BFM, DFM, NE, SCD), які не враховують особливостей зору людини, та методи з *середньою та високою відповідністю* (SSIM, MS-SSIM, VQM, PQR), що навпаки враховують особливості зору людини.

За критерієм необхідності еталонного зображення можна виділити дві великі групи методів: методи, в яких використовують *еталонну відеопослідовність* для порівняння з досліджуваною відеопослідовністю (PSNR, MSAD, Delta, SSIM, MS-SSIM, VQM, PQR), та методи, яким для роботи не потрібна еталонна відеопослідовність (BFM, DFM, NE, SCD).

*Апаратна реалізація* методів об'єктивного вимірювання якості відеозображень реалізована в обладнанні фірм OmniTek (метод PSNR) та Tektronix (метод PQR).

Методи BFM, DFM, NE, SCD не потребують для роботи еталонної відеопослідовності, що є безумовною перевагою цих методів. Проте вони є *вузькоспеціалізованими*, оскільки дають можливість оцінювати лише певні види спотворень (наприклад, мерехтіння між кадрами, пропуск кадрів, зміну сцени тощо), які можуть бути несуттєвими для глядача. Це робить неможливим їх застосування для подальших досліджень, оскільки під час експерименту необхідно буде виміряти загальну якість відеопослідовностей. Натомість методи PSNR, MSAD, Delta, SSIM, MS-SSIM, VQM, PQR дають можливість оцінити *загальну якість* відеозображення, що спостерігає глядач.

Останнім важливим фактором, що може вплинути на вибір об'єктивного методу вимірювання якості, є його *доступність* у програмному середовищі. Ґрунтуючись на аналізі реалізації об'єктивних методів вимірювання якості у різних програмних пакетах, зокрема, у MSU Video Quality Measurement Tool,

можна стверджувати, що переважна більшість методів, наведених в табл. 4.1, є доступними для використання у програмному середовищі.

Тому, спираючись на викладені вище аргументи, обрано такі об'єктивні методи вимірювання якості відеозображень для подальших експериментальних досліджень: PSNR (як метод з низькою обчислювальною складністю, з низькою відповідністю суб'єктивним оцінкам якості, який є одним з найпоширеніших методів та має апаратну реалізацію), MS-SSIM (як метод із середньою обчислювальною складністю та з високою відповідністю суб'єктивним оцінкам якості) та VQM (як метод з високою обчислювальною складністю та з середньою відповідністю суб'єктивним оцінкам якості). Усі обрані методи є доступними у програмних пакетах.

### **Висновки до розділу**

У другому розділі досліджено спотворення відеозображень, спричинені особливостями кодування цифрового відеосигналу у форматі MPEG-2. Визначено дві групи таких спотворень: спотворення, спричинені внутрішньокадровим стисненням, та спотворення, спричинені міжкадровим стисненням.

1. Найбільш суттєвим для суб'єктивного сприйняття є спотворення типу «блокінг-ефект» (коефіцієнт вагомості 0,3). Інші досліджені спотворення значно менш помітні під час перегляду кодованого в форматі MPEG-2 відеоконтенту (коефіцієнти вагомості знаходяться в діапазоні 0,12...0,24). Тому під час подальших досліджень погіршення якості відеозображення внаслідок кодування в форматі MPEG-2 рекомендовано приділяти увагу саме блоковій структурі зображення.

2. Для обґрунтування вибору суб'єктивного методу оцінювання якості відеозображень застосовано класифікацію суб'єктивних методів на дві групи залежно від наявності еталонної (неспотвореної) відеопослідовності. До першої групи відносять методи, які пропонують демонструвати експертам як еталонну,

так і спотворену відеопослідовності (методи DSCQS, DSIS, SDSCE), до другої групи – методи, що дозволяють здійснювати суб'єктивне оцінювання якості, коли еталонна послідовність недоступна (методи категорійного судження). Оскільки під час дослідження доступні як еталонна, так і спотворена відеопослідовності, а завданням дослідження є виміряти якість стиснутої за відповідним алгоритмом відеопослідовності відносно еталонної, прийнято рішення застосувати для суб'єктивного оцінювання якості метод першої групи DSCQS.

3. Серед об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень виділяють дві групи методів: 1) методи, які враховують особливості сприйняття зображення людиною (MS-SSIM, VQM, метод Сарнова тощо); 2) методи, що не враховують ці особливості (PSNR, MSAD, Delta). Для виділення із множини об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень обмеженого набору метрик, які можна застосувати під час експериментальних досліджень, запропоновано шість класифікаційних критеріїв: обчислювальна складність методу, відповідність суб'єктивним оцінкам якості, необхідність еталонного зображення, відома апаратна реалізація, галузь застосування, доступність методу в програмному середовищі. Відповідно до цих критеріїв для експериментальних досліджень сформовано набір метрик, до якого увійшли методи PSNR, MS-SSIM та VQM.

4. Сформульовано вимоги до вибору об'єктивного методу вимірювання якості відеозображень, що максимально узгоджений із суб'єктивними оцінками якості. Для цього рекомендовано для кожного об'єктивного методу (PSNR, MS-SSIM та VQM) визначити функцію відповідності суб'єктивним оцінкам якості та застосувати набір критеріїв відповідності, серед яких найбільш інформативним та найчастіше вживаним є критерій лінійної кореляції, визначений із застосуванням стандартних відхилень суб'єктивних та об'єктивних оцінок якості.

### РОЗДІЛ 3

## УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ВІДЕОКОНТЕНТУ НА ЕТАПАХ ФОРМУВАННЯ ТА ПЕРЕДАВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ПРОГРАМ

У даному розділі досліджено і удосконалено методи та алгоритми створення відеоконтенту для систем цифрового телебачення з урахуванням якості відеозображення, яке сприймає глядач.

### 3.1 Технологічний процес виробництва цифрових телевізійних програм

Безстрічкова система формування та передавання цифрових телевізійних програм складається із декількох функціональних частин (рис. 3.1). Ядром системи є середовище зберігання контенту з використанням одного або кількох серверів. Транспортним середовищем є мережна інфраструктура, що базується на інтерфейсах Gigabit Ethernet та/або Fibre Channel [53, 54].

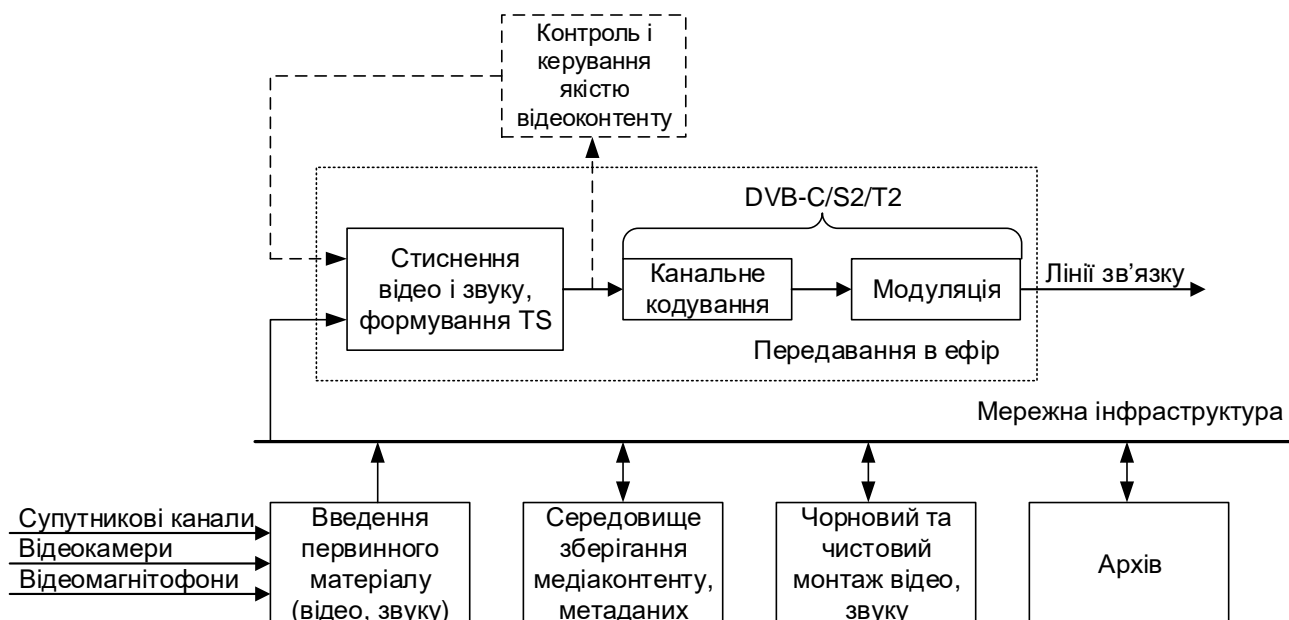


Рисунок 3.1 – Структура технологічного процесу виробництва телепрограм

На вході системи розміщено зону введення первинного матеріалу. Тут здійснюють введення відео та звуку, що надходять із супутникових каналів зв'язку або від відеокамер чи відеомагнітофонів, приведення їх у відповідність до внутрішніх форматів системи та розміщення аудіовізуальних даних у системі зберігання.

До системи зберігання підключено монтажні станції, які використовують для попереднього та остаточного монтажу. Зазначимо, що початковий матеріал залишається у первинному вигляді, тобто за результатами монтажу створюють лист монтажних рішень EDL (Edit Decision List), згідно з яким програму формують та передають на дисковий простір ефірного сервера, де відбувається стиснення відео і звуку у форматах MPEG-2 чи H.264 та формування транспортного потоку TS. Після передавання в ефір програму відправляють на архівування (або просто видаляють), а систему зберігання ефірного сервера звільняють для нового контенту.

Процес створення високоякісного медіаконтенту від моменту отримання матеріалу до передавання його в ефір може тривати всього декілька хвилин, як, наприклад, у випадку підготовки новин. Вирішити проблеми, що виникають під час реалізації цього процесу, покликані нові технології, серед яких – система керування медіаданими Media Assets Management (MAM). Необхідність використання системи MAM у процесі виробництва телепрограм пов'язана зі значною кількістю медіаконтенту, який вже перебуває на стадії зберігання, а також зі значним обсягом відеоданих, які надсилають до архіву щодня. Сучасні цифрові системи зберігання дозволяють оперувати тисячами годин відеоматеріалу з якістю, що відповідає ефірній. Як правило, такі системи складаються з декількох серверів, які об'єднують у єдиний логічний пристрій зберігання. Основною вимогою до систем зберігання є забезпечення можливості миттєвого доступу журналістів, редакторів або монтажників до відеоматеріалу на будь-якому сервері.

Крім відео та звуку, сучасний комплекс формування телепрограм повинен оперувати описовою частиною матеріалу – метаданими. Найпоширенішим

способом роботи з метаданими є зберігання їх у базі даних, яка містить усі метадані з прив'язкою до кожного фрагмента відео. Метадані повинні вноситися до бази протягом усього виробничого процесу, починаючи від вибору джерела запису до формування сюжету та складання розкладу ефіру. Вони завжди залишаються доступними, незалежно від того, де зберігається матеріал (на центральному сервері або на зовнішніх носіях).

Сучасний комплекс формування та передавання цифрових телевізійних програм може складатися з великої кількості робочих місць журналістів, відеомонтажерів та редакторів, що висуває певні вимоги до архітектури та швидкодії локальної мережі. На сьогодні локальні мережі дозволяють мати доступ великій кількості користувачів до одного й того ж відеоджерела зі своїх робочих місць.

Відкрита ІТ-архітектура дозволяє системним інтеграторам використовувати різні формати відео, наприклад, MPEG-2, DV, DVCPRO, H.264, Windows Media, а також формати обміну файлами, в тому числі AAF і MXF, працювати з різними стандартами даних, наприклад, SMEF (Standard Media Exchange Framework), протоколами автоматизації MOS (Media Object Server) та керування SNMP (Simple Network Management Protocol). Це також дозволяє використовувати стандартні ІТ-рішення, такі як високошвидкісні комп'ютерні мережі, різні бази даних та програмні сервери.

Цифровий архів комплексу формування телепрограм складається з оперативного та довгострокового пристроїв зберігання даних, які зв'язані мережною інфраструктурою із ефірним сервером, який також має свій власний пристрій зберігання.

Важливим аспектом у технологічному процесі виробництва цифрових телепрограм є контроль та керування якістю зображення у сформованому для передавання відеоконтенті. Найбільш доцільно вимірювати якість відеоконтенту після кодування у форматах MPEG-2 чи H.264, перед передаванням його у ефір.

Етап контролю та керування якістю відеоконтенту на схемі технологічного процесу вказано пунктирною лінією (рис. 3.1).

Донедавна поліпшення якості відеозображення, яке сприймає глядач, здійснювали лише виробники телевізійних приймачів, застосовуючи ряд технологій [53], серед яких підвищення якості відтворення синього і зеленого кольорів на світлих ділянках зображення, збільшення глибини оброблюваних кольорів, збільшення кількості кадрів для усунення дискретності швидкого руху об'єктів, підвищення контрастності зображення, застосування фільтрації елементів зображення для очищення від шумів, масштабування, підвищення чіткості тощо.

В той же час передавальні центри формують відеосигнал, параметри якого відповідають рекомендаціям ITU-R BT.601-7 [7], але на якість результуючого відеозображення не впливають. Крім того, якість відозображення, яке демонструють кінцевому глядачеві, може залежати від вмісту відеоконтенту.

В межах концепції поліпшення якості відеоконтенту під час підготовки та передавання телепрограм сформульовано критерій для оцінювання якості відеозображень у системах цифрового телебачення, який ґрунтується на максимізації кореляції суб'єктивних середніх оцінок якості  $MOS_i$  та оцінок якості  $VQR_i$ , отриманих відповідно до обраної  $i$ -ої об'єктивної метрики:

$$Q = \max_{i \in N} \{ \text{corr}(MOS_i, VQR_i) \} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де  $Q$  – показник якості відеозображення, виражений у відсотках;

$\text{corr}$  – операція кореляції;

$\text{max}$  – операція пошуку максимуму з набору значень, отриманих в результаті операції кореляції.

Ґрунтуючись на цьому критерії, запропоновано метод керування відеопотоком на етапах формування та передавання цифрових телепрограм, який може забезпечити телекомпанії механізмом контролю якості виробленого

відеоконтенту без особливого втручання інженерного персоналу. Він заснований на застосуванні у технологічному процесі виробництва телепрограм системи контролю та управління якістю відеоконтенту (рис.3.1), що використовує відеотранскодер для зміни бітової швидкості відеопотоку відповідно до вимірної якості сформованого відеозображення на підставі об'єктивних показників.

### **3.2 Особливості застосування транскодера без зворотного зв'язку для керування відеопотоком**

Процес перетворення між різними форматами відеостиснення або зміни швидкості бітового потоку попередньо стиснутого відеосигналу відомий як *транскодування*. Воно призначене для забезпечення гнучкості передавання закодованих відеопотоків шляхом динамічного регулювання бітової швидкості у відповідності до смуги пропускання або необхідної якості відеозображення, які були невідомі під час кодування. Транскодування відрізняється від кодування відеоданих тим, що під час цього процесу використовують набагато більше параметрів процесу кодування, які можна отримати з первинного стиснутого відеопотоку.

Існує три основні вимоги до транскодування відеопотоку:

1. Під час транскодування інформацію, що містить первинний стиснутий відеопотік, потрібно використовувати у повному обсязі (інформація про формат відеостиснення, структуру відеопотоку, значення бітової швидкості, коефіцієнта квантування тощо).

2. В результаті якість транскодованого відеопотоку повинна бути або якнайвищою, або якомога ближчою до якості первинного стиснутого відеопотоку в залежності від завдань, які вирішують у процесі транскодування.

3. У застосуваннях реального часу вимоги до часу затримки транскодування та об'єму пам'яті повинні бути зведені до мінімуму, щоб задовольняти обмеження в режимі реального часу.

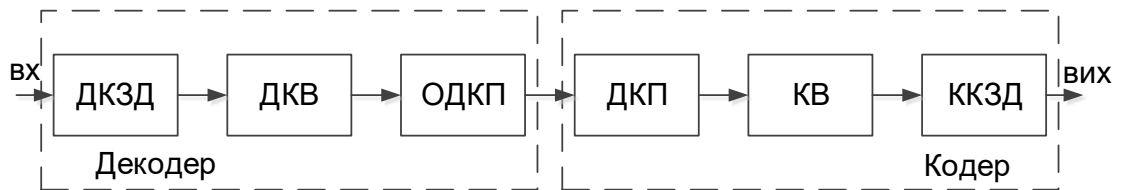


Рисунок 3.2 - Каскадне підключення декодера і кодера відеоданих у процесі транскодування: ДКЗД – декодер коду змінної довжини, ККЗД – кодер коду змінної довжини, ДКВ – обернене квантування, КВ – квантування, ОДКП – обернене ДКП

Найпростіша архітектура відеотранскодера – це каскадне підключення декодера і кодера відеоданих [55, 56]. У цій архітектурі вхідний відеопотік повністю декодують, а потім декодоване відео перекодовують у цільовий відеопотік з бажаною бітовою швидкістю або у бажаний формат (рис. 3.2). Це потребує значних обчислювальних витрат через необхідність здійснювати обчислення прямого і оберненого ДКП, але цей спосіб використовують досить часто під час перекодування відеопотоків.

Існує й інший спосіб здійснення перетворення між відеопотоками одного стандарту – це застосування транскодера без зворотного зв'язку [55]. У такому транскодері процес декодування відеопотоку завершують на етапі оберненого квантування (блок ДКВ), нове значення коефіцієнта квантування обчислюють для більш низького значення бітового потоку, тоді коефіцієнти ДКП квантують за допомогою нового значення коефіцієнта квантування (блок КВ), а решту процесу кодування відео виконують з новими значеннями коефіцієнтів ДКП (рис. 3.3). Через більше значення коефіцієнта квантування кількість інформації, що містить кожний кадр, буде меншою, що означатиме меншу бітову швидкість для всього потоку відеоданих. Транскодери без зворотного зв'язку потребують менших обчислювальних витрат, оскільки вони оперують безпосередньо коефіцієнтами ДКП. Тим не менш, такі транскодери страждають від проблеми дрейфу якості зображення [55, 57].

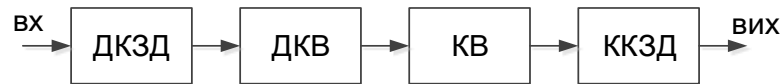


Рисунок 3.3 – Транскодер без зворотного зв’язку

Дослідимо проблему виникнення дрейфу в транскодері без зворотного зв’язку. Відеокадри передбачують за допомогою опорних кадрів, а кодують лише помилки передбачення. Для правильної роботи декодера опорні кадри, відновлені і збережені в передбачувачі декодера (див. рис. 1.4), повинні бути такими ж, як і у передбачувачі відеокодера. Транскодери без зворотного зв’язку змінюють помилки передбачення, тому опорні кадри в передбачувачі декодера відрізняються від опорних кадрів у передбачувачі відеокодера. Відмінності накопичуються і викликають погіршення якості відео з плином часу, поки не надійде наступний І-кадр. Накопичення помилки, викликані невідповідністю передбачувачів кодера/декодера, називають *дрейфом*, який може спричинити значне погіршення якості відео [58, 59].

Під час стиснення відео у форматі MPEG-2 І-кадри є опорними кадрами й передбачувач в такому випадку не застосовують, тому на транскодовані І-кадри дрейф не впливає. В-кадри не використовують для передбачення майбутніх кадрів [60]. Таким чином, транскодування В-кадрів не сприяє розповсюдженню та накопиченню дрейфу. Помилку дрейфу спричиняє лише операція транскодування Р-кадрів (рис. 3.4), оскільки вони використовуються як опорні кадри в процесі передбачення і можуть накопичуватись в межах групи кодованих кадрів (GOP). Погіршення якості поступово наростає до наступного І-кадру, який оновлює відеосцену, тому цю помилку також називають «диханням» («breathing»).

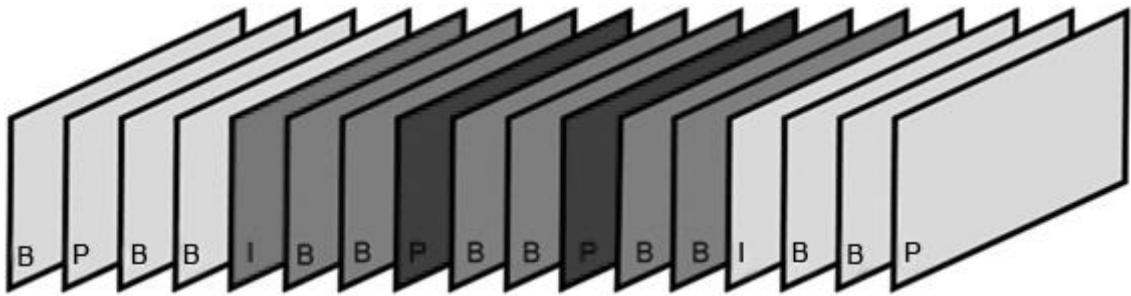


Рисунок 3.4 – Структура GOP в MPEG-2 (GOP=9)

Проте ступінь погіршення якості відео, викликаного дрейфом, залежить від структури відеопослідовності GOP, оскільки дрейф буде припинено у разі надходження I-кадру. Під час застосування структур GOP, де кількість кадрів між двома послідовними I-кадрами мала (наприклад, GOP=9), погіршення якості, викликане дрейфом, є меншим, ніж для структур з більшою кількістю кадрів (GOP=15). Такі структури GOP можуть бути корисні у зв'язку з потенційно меншими обчислювальними затратами і нижчими вимогами до кадрової пам'яті.

### 3.2.1 Математичний опис функції керування транскодером без зворотного зв'язку

Метою керування бітовою швидкістю в процесі кодування і транскодування відеоданих є досягнення цільового значення бітової швидкості відеопотоку для забезпечення хорошої і стабільної візуальної якості відеозображення. Процес керування бітовою швидкістю відповідає за підтримання стабільної якості відеозображення, задовольняючи при цьому обмеженням на смугу пропускання, величину часу затримки і обсяг пам'яті шляхом визначення параметрів квантування відеокадру. Заданої якості зображення і бітової швидкості у відеокодері MPEG-2 досягають шляхом вибору певного коефіцієнта квантування для кожного макроблоку в кадрі. Глобальний коефіцієнт квантування для усього кадру є усередненим значенням коефіцієнтів квантування для кожного макроблоку в кадрі.

У широко використовуваній тестовій моделі MPEG-2 Test Model 5 (TM5) [61, 62] зазначено, що міра складності кадру характеризує труднощі під час кодування кадру, тому цільова кількість бітів для кодування кадру є пропорційною його складності. Цю міру складності можна обчислити, виходячи з просторових властивостей кадру. Вимірювання, здійснені автором спільно зі спеціалістами Університету міста Мішкольц [55], дозволили зробити висновок, що це досить точна модель, яка підходить для широкого кола відеосцен:

$$b_i = f(q_i) = \frac{c_i}{q_i}, \quad (3.2)$$

де  $b_i$  – цільова кількість біт у  $i$ -му кадрі;

$q_i$  – глобальний коефіцієнт квантування  $i$ -го кадру;

$c_i$  – міра складності кадру.

Але декодовані зображення не доступні у транскодері без зворотного зв'язку, тому міра складності не може бути розрахована аналогічним чином до відеокодера. Під час транскодування можливо обчислити міру складності кадрів із вхідного бітового потоку, оскільки значення коефіцієнта квантування і кількість бітів інформації в кадрі є доступними, після чого можна використати знайдені значення міри складності кадрів для розподілу бітів під час транскодування. З виразу (3.2) можна припустити, що [63]:

$$\frac{b_{ti}}{b_{oi}} = f\left(\frac{q_{oi}}{q_{ti}}\right) = \alpha \left(\frac{q_{oi}}{q_{ti}}\right) + \beta, \quad (3.3)$$

де  $b_{ti}$  – цільова кількість біт для транскодованого кадру;

$b_{oi}$  – початковий обсяг поточного кадру в бітах;

$q_{oi}$  – глобальний коефіцієнт квантування початкового кадру;

$q_{ti}$  – глобальний коефіцієнт квантування транскодованого кадру;

$\alpha$  і  $\beta$  – параметри лінійного рівняння.

Тут зроблено припущення, що всі величини, наведені вище, можуть бути апроксимовані за допомогою лінійного рівняння.

Оскільки відеопослідовність складається з послідовних відеокадрів, бітова швидкість відеопослідовності залежить від обсягу інформації у послідовних кадрах, тому можна сказати, що:

$$\frac{b_{ti}}{b_{oi}} = \frac{R_a}{R_o}, \quad (3.4)$$

де  $R_a$  – середня бітова швидкість, якої необхідно досягти під час транскодування;

$R_o$  – бітова швидкість початкової відеопослідовності.

Оскільки різні типи кадрів містять різний обсяг даних, а в групі зображень GOP можуть перебувати всі типи кадрів, включаючи I, P та B-кадри, тоді бітову швидкість у структурі GOP відеокодера визначають як:

$$R_{GOP} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{GOP}} b_n}{T \cdot N_{GOP}}, \quad (3.5)$$

де  $N_{GOP}$  – кількість кадрів в структурі GOP;

$b_n$  – обсяг даних в одному кадрі;

$T$  – тривалість кадру.

Алгоритму керування бітовою швидкістю відеопотоку має бути відома структура GOP. Тим не менш, в процесі транскодування вихідна структура GOP часто визначається структурою GOP на вході транскодера, оскільки перекодування звичай не змінює типи кадрів, щоб зберегти міру складності кадрів на низькому рівні. Під час транскодування в режимі реального часу початкова структура GOP зазвичай невідома транскодеру.

Для управління бітовою швидкістю і обсягом даних окремих кадрів на виході транскодера алгоритм повинен мати інформацію про частоту появи кадрів різних типів. Цю інформацію можна отримати з відеопотоку на вході транскодера. Оскільки структура GOP може змінюватися, цей процес може тривати кілька циклів GOP.

Щоб встановити необхідну бітову швидкість відеопотоку на виході транскодера, необхідно розрахувати коефіцієнт квантування транскодованого кадру за допомогою відомого коефіцієнта квантування поточного кадру на вході транскодера:

$$q_{ti} = m \cdot q_{oi}, \quad (3.6)$$

де  $m$  – це множник, який керує зміною бітової швидкості.

Використовуючи вирази (3.3), (3.4) та (3.6), можна записати:

$$\frac{R_a}{R_o} = \alpha \left( \frac{1}{m} \right) + \beta. \quad (3.7)$$

З формули (3.7) можна виразити значення  $m$ :

$$m = \frac{\alpha}{\left( \frac{R_a}{R_o} \right) - \beta}, \quad (3.8)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – параметри з рівняння (3.3). Функції (3.6) – (3.8) утворюють систему рівнянь, що описує транскодер без зворотного зв'язку.

Слід зазначити, що вираз (3.8) не враховує реальну вихідну бітову швидкість, а лише вихідну бітову швидкість, якої необхідно досягти. Також не враховано, що значення використовуваних параметрів залежать від характеристик відеозображення. Тому необхідно дослідити ефективну (реальну) бітову швидкість на виході транскодера і відкоригувати розрахункові значення параметрів, ввівши поняття сигналу помилки, як

$$e = \frac{R_t - R_a}{R_a}, \quad (3.9)$$

де  $R_t$  – ефективна бітова швидкість на виході транскодера;

$R_a$  – середня вихідна бітова швидкість, якої необхідно досягти.

Використовуючи сигнал помилки, можна створити зворотний зв'язок, щоб впливати на алгоритм керування бітовою швидкістю відеопотоку для встановлення нового значення коефіцієнта квантування.

Таким чином, змінивши рівняння (3.8) із врахуванням виразу (3.9), отримаємо остаточне рівняння, яке дає можливість обчислити величину множника  $m$  для поточного кадру:

$$m = \frac{\alpha \cdot (1 + e)}{\left(\frac{R_a}{R_o}\right) - \beta}. \quad (3.10)$$

Залишається визначити константи  $\alpha$  і  $\beta$ . Для цього було проведено дослідження, в якому проаналізовано середнє співвідношення між кількістю бітів у відповідних відеокадрах, отриманих на вході та виході транскодера, та різними значеннями множника  $m$  у різних відеопослідовностях. Результати експерименту представлені на рис. 3.5 для однієї з використаних відеопослідовностей.

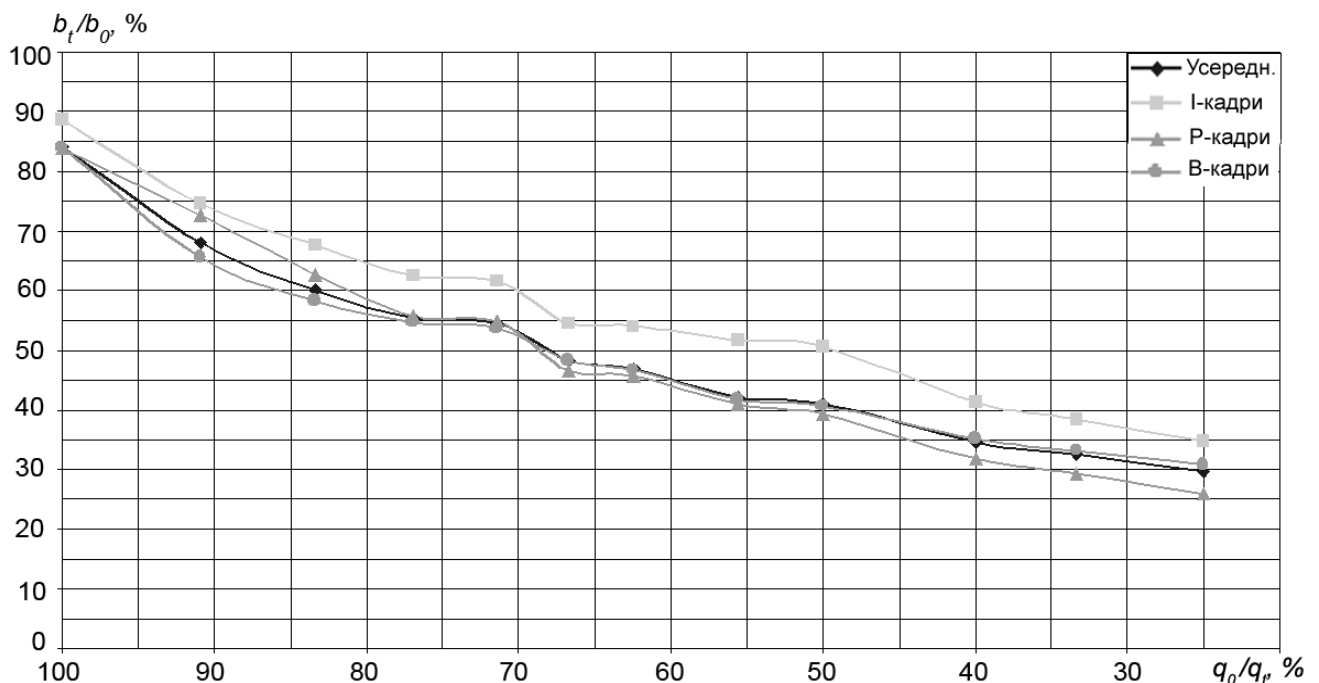


Рисунок 3.5 – Графіки залежності відносного обсягу даних у кадрі від відносного коефіцієнта квантування кадру

Як впливає з результатів експерименту, співвідношення між кількістю бітів у відеокадрах, отриманих на вході та виході транскодера, можна апроксимувати лінійною функцією (3.3), а значення параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  відрізняються для різних типів кадрів. Рис. 3.6 і табл. 3.1 ілюструють результат лінійної апроксимації з припущенням, що в цілому ступінь зниження бітової швидкості у досліджуваному транскодері без зворотного зв'язку не буде перевищувати 50% [63]. З метою отримати зручну для використання залежність і забезпечити в той же час достатньо високу точність співпадіння враховано лише точки, що знаходяться у межах 50% діапазону зміни відносного бітового потоку.

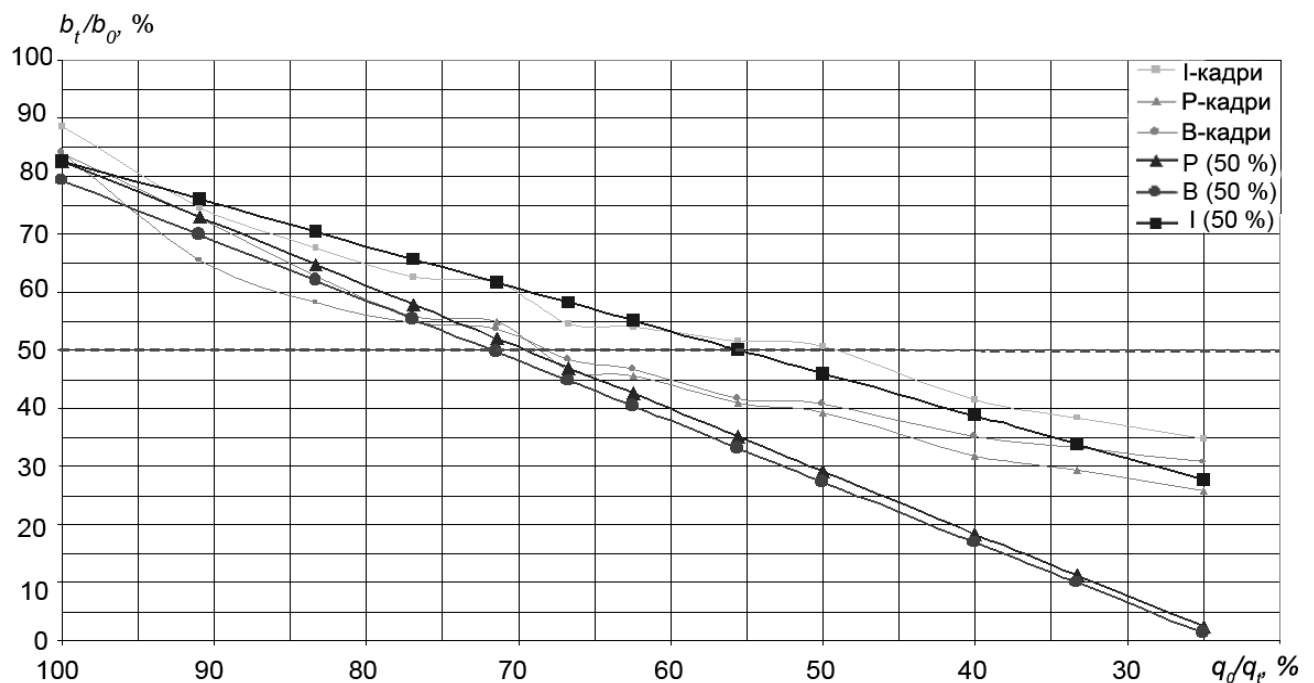


Рисунок 3.6 – Результат лінійної апроксимації функції (3.2) для різних типів кадрів

Таблиця 3.1 – Значення параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  для різних типів кадрів

Тип кадру	$\alpha$	$\beta$
I-кадри	0,132903	0,182796
P-кадри	0,707143	0,594286
B-кадри	0,66249	0,792931

### 3.2.2 Результати практичної реалізації транскодера без зворотного зв'язку

У роботах [55, 64] наведено практичну реалізацію відеотранскодера без зворотного зв'язку, що базується на концепції, описаній вище. Там же проаналізовано роботу транскодера з різними відеопотоками. Зокрема, на рис. 3.7 наведено експериментально виміряні характеристики транскодера для відеопослідовності обсягом 3000 кадрів ефірного телевізійного сигналу, переданого зі змінною бітовою швидкістю відеопотоку (VBR – Variable Bit Rate). Середня бітова швидкість відеопотоку  $R_0$  на вході транскодера складає 4,5 Мбіт/с, середня бітова швидкість  $R_a$  на виході транскодера встановлена на рівні 2 Мбіт/с.

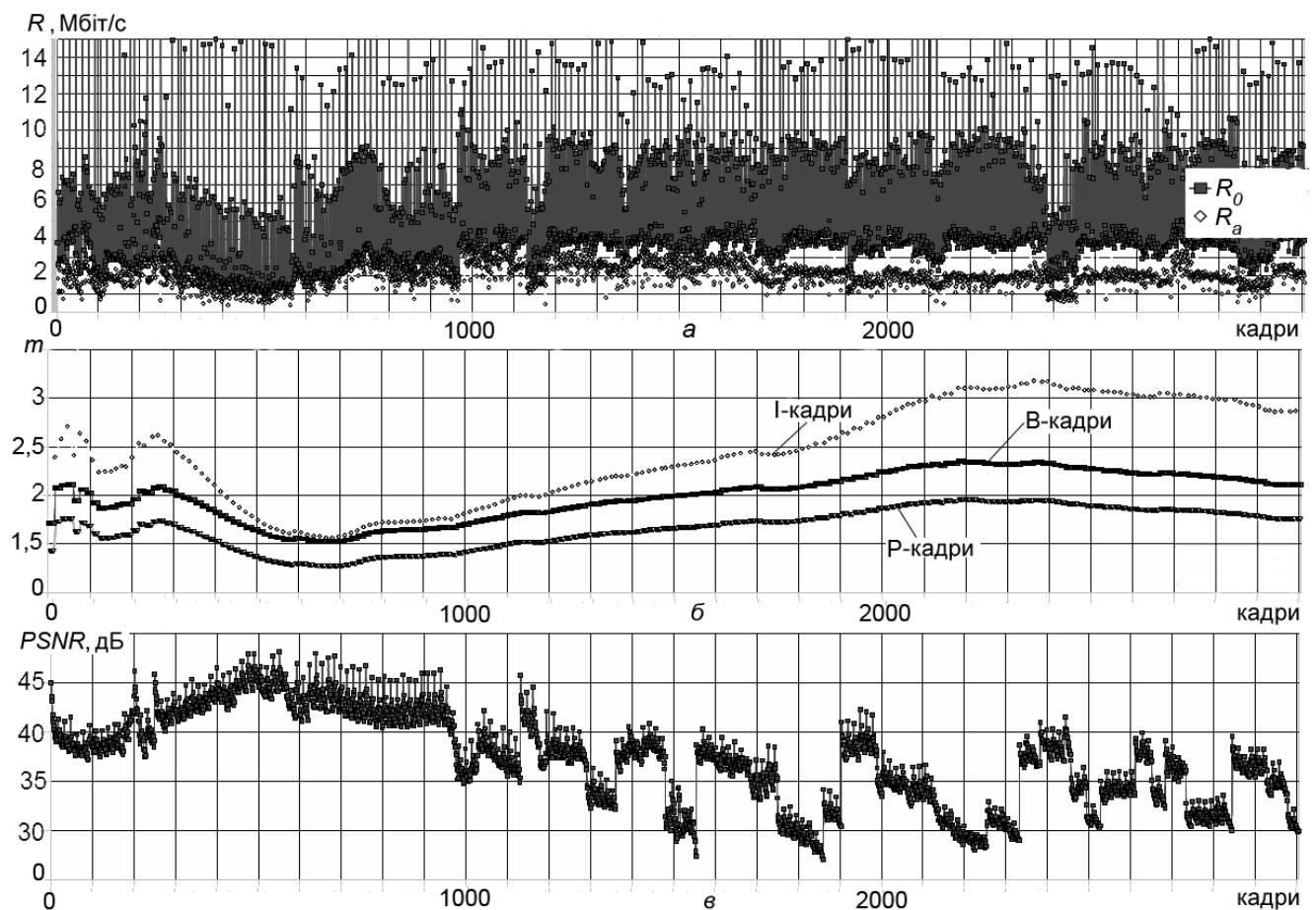


Рисунок 3.7 – Експериментально виміряні характеристики транскодера без зворотного зв'язку для 3000 кадрів: а – бітова швидкість; б – величина множника  $m$ ; в – якість зображення відповідно до метрики PSNR

Відеопотік на виході транскодера також є змінним (VBR), як видно з рис. 3.7. Множник  $m$ , який керує бітовою швидкістю, також змінюється, щоб забезпечити необхідну бітову швидкість на виході транскодера.

Рис. 3.8 ілюструє фрагмент рис. 3.7, тобто сцену, що містить 300 кадрів. На графіку якості відеозображення (рис. 3.8,в) можна спостерігати типову для транскодера без зворотного зв'язку проблему дрейфу, яка призводить до ефекту «дихання» метрики PSNR між сусідніми I-кадрами.

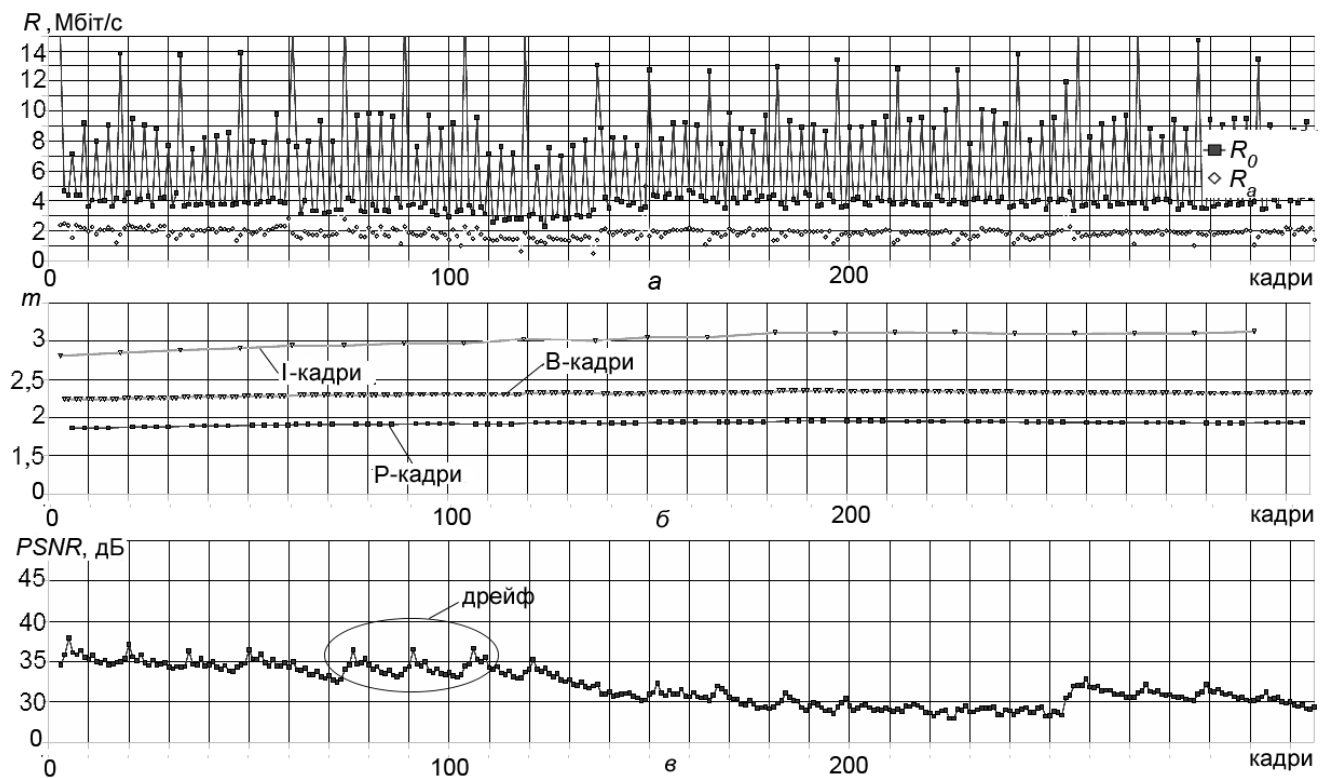


Рисунок 3.8 – Експериментально виміряні характеристики транскодера без зворотного зв'язку для 300 кадрів:

а – бітова швидкість; б – величина множника  $m$ ; в – якість зображення відповідно до метрики PSNR

Отже, результати експериментальних досліджень демонструють хорошу функціональність відеотранскодера без зворотного зв'язку, апроксимованого лінійною функцією. Такий транскодер легко реалізувати на базі сучасних інтегральних мікросхем та мікроконтролерів [64, 65].

### 3.3 Концепція транскодера зі зворотним зв'язком для керування відеопотоком за критерієм якості відеозображення

Для реалізації запропонованого підходу до покращення якості відеоконтенту на етапах формування та передавання цифрових телепрограм, що заснований на застосуванні у технологічному процесі телевиробництва системи контролю та управління якістю відеоконтенту у спосіб, показаний на рис.3.1, необхідно використати відеотранскодер для керування бітовою швидкістю відеопотоку відповідно до вимірної якості сформованого кодером відеозображення на підставі об'єктивних показників. Тому з'ясуємо тип відеотранскодера, який потрібно застосувати для виконання такого завдання.

*Транскодер без зворотного зв'язку* має більш просту структуру та потребує менших обчислювальних витрат через відсутність необхідності здійснювати обернене та пряме ДКП (див. рис. 3.3). Проте його суттєвими недоліками є:

- неможливість отримання первинних сигналів зображення (відліків сигналу яскравості та кольорових різницевих сигналів) в процесі транскодування;
- робота лише на зниження бітової швидкості відеопотоку, що призводить до пониження якості відеоконтенту та унеможливорює покращення його якості шляхом збільшення бітової швидкості у разі необхідності.

У *каскадному транскодері* відсутній перший недолік, оскільки з виходу блоку ОДКП (див. рис. 3.2) можна отримати первинні сигнали зображення, що будуть надалі використані для обчислення якості сформованого відеоконтенту за допомогою об'єктивних показників. Другий недолік можна усунути шляхом модифікації схеми транскодера (рис. 3.9). Тоді після декодування та обчислення якості відеозображення відеотранскодер буде працювати не лише на зниження бітової швидкості, але й на підвищення бітової швидкості відеопотоку для керування якістю відеоконтенту в процесі формування та передавання цифрових телепрограм [54, 66].

Відеотранскодер побудований за схемою зі зворотним зв'язком і складається із трьох частин: декодера, кодера та блоку об'єктивного аналізу якості і керування бітовою швидкістю [66, 67]. Відеотранскодер використовують у парі зі штатним відеокодером MPEG, який у свою чергу здійснює формування відеопотоку MPEG. Відеопотік потрапляє на декодер відеотранскодера, що здійснює операції, протилежні до операцій в штатному відеокодері. При цьому інформацію про параметри таблиці кодування кодом змінної довжини, про поточну бітову швидкість  $R_0$  і про поточний коефіцієнт квантування  $q_0$ , який впливає на бітову швидкість і якість переданого відеозображення, беруть безпосередньо із службових даних відеопотоку.

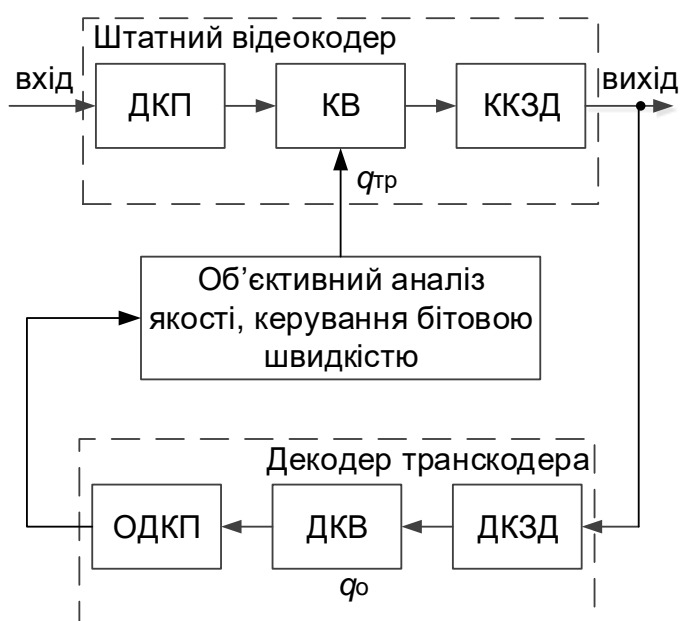


Рисунок 3.9 – Каскадний відеотранскодер зі зворотним зв'язком

Таким чином, на виході декодера відеотранскодера отримуємо дискретні значення відліків сигналу яскравості і кольорових різницевих сигналів кожного кадру відеопослідовності, готові для передавання до блоку об'єктивного аналізу якості. Як об'єктивний показник якості необхідно використати метрику, яка найбільше відповідає суб'єктивному сприйняттю людини.

Оскільки каскадний транскодер зі зворотним зв'язком (КТЗЗ) за своєю структурою та принципом функціонування мало відрізняється від транскодера без зворотного зв'язку (лише наявністю операцій прямого та оберненого ДКП), запропоновано застосувати для опису роботи КТЗЗ лінійну функцію транскодування, описану рівнянням (3.8), яка добре зарекомендувала себе у випадку відеотранскодера без зворотного зв'язку [55, 64].

Тоді зміну бітової швидкості відеопотоку здійснюють шляхом зміни значення глобального коефіцієнта квантування  $q_{\text{тр}}$ , який подають лінією зворотного зв'язку на штатний відеокодер MPEG та який у випадку пониження якості відеоконтенту пов'язаний зі значенням глобального коефіцієнта квантування початкового відеопотоку  $q_0$  виразом:

$$q_{\text{тр}} = m \cdot q_0, \quad (3.11)$$

де  $m$  - коефіцієнт, що визначає зміну бітової швидкості потоку ( $m > 1$ ).

У випадку підвищення якості відеоконтенту зв'язок між значенням глобального коефіцієнта квантування початкового відеопотоку  $q_0$  та глобальним коефіцієнтом квантування транскодованого потоку  $q_{\text{тр}}$  буде описано виразом:

$$q_0 = m \cdot q_{\text{тр}}, \quad (3.11a)$$

де коефіцієнт  $m$  також приймає значення  $m > 1$ .

З іншого боку відношення необхідної бітової швидкості  $R_{\text{тр}}$  до початкової бітової швидкості  $R_0$  відеопотоку пов'язане лінійною залежністю з відношенням між значеннями коефіцієнта квантування початкового  $q_0$  і транскодованого  $q_{\text{тр}}$  відеопотоку відповідно до формул (3.3) та (3.4) [66]:

$$\frac{R_{\text{тр}}}{R_0} = c \left( \frac{q_0}{q_{\text{тр}}} \right) + d, \quad (3.12)$$

де  $c$  і  $d$  - параметри удосконаленої моделі транскодера зі зворотним зв'язком, що відповідають параметрам  $\alpha$  і  $\beta$  з табл. 3.1.

Для подальших досліджень роботи КТЗЗ необхідно встановити взаємозв'язок між якістю сформованого відеокодером зображення та бітовою швидкістю відеопотоку на виході відеокодера.

### **3.4 Класифікація відеозображень та їх ранжування за вмістом**

Проведено експериментальні дослідження для з'ясування впливу швидкості бітового потоку на погіршення якості зображення відеопослідовностей, закодованих за допомогою стандартного відеокодера, який використовують для передавання відеоінформації в системах ЦТБ. Таким відеокодером є MPEG-2 ML@MP (головний рівень головного профілю).

Дослідження проведено для чотирьох значень швидкості бітового потоку – 2 Мбіт/с, 4 Мбіт/с, 6 Мбіт/с та 8 Мбіт/с за допомогою одного з суб'єктивних методів. З цією метою відповідно до рекомендацій ITU-R BT.500-12 [10] сформовано групу з 20 експертів, до складу якої увійшли спостерігачі обох статей та різних вікових категорій.

#### **3.4.1 Оцінювання якості відеозображень суб'єктивним методом**

**Вибір тестового відеоматеріалу.** Обрано дев'ять відеопослідовностей (ВП) з набору VQEG Test Sequences [68] у форматі 625@50Гц, що містять 720 пікселів (1440 байт) у горизонтальній лінії. Кожний кадр відеопослідовностей складається з 576 активних рядків та дискретизований у форматі 4:2:2.

Усі відеопослідовності містять:

- 10 порожніх кадрів на початку послідовності;
- 8 секунд відеоданих;
- 10 порожніх кадрів у кінці послідовності.

В таблиці 3.2 наведено опис обраних відеопослідовностей, які достатньо повно відображають можливі ситуації, що можуть мати місце під час перегляду програм ЦТБ [67, 69]. Кадри тестових послідовностей показані на рис. 3.10-3.18.

Таблиця 3.2 – Характеристика обраних відеопослідовностей

Назва послідовності	Характеристика послідовності
Барселона	Насичений колір та ефект маскування
Арфа	Насичений колір, зміна масштабу зображення, світлі ділянки, тонкі деталі
Рухома графіка	Критична для Betacam, колір, рухомий текст, тонкі літери, штучна природа зображення
Каное	Рух води, рух в протилежному напрямі, багато деталей
Болід Ф1	Швидкий рух, насичені кольори, зміна плану
В кафе	Кіноплівка, кольори шкіри, швидке панорамування
Рухомий текст	Текст з горизонтальним рухом
Регбі	Рух та кольори на зеленому фоні
Календар	Рух та кольори, дрібні деталі



Рисунок 3.10 – ВП Барселона



Рисунок 3.11 – ВП Арфа



Рисунок 3.12 – ВП Рухома графіка



Рисунок 3.13 – ВП Каное



Рисунок 3.14 – ВП Болід Ф1



Рисунок 3.15 – ВП В кафе



Рисунок 3.16 – ВП Рухомий текст



Рисунок 3.17 – ВП Регбі



Рисунок 3.18 – ВП Календар

**Тестова сесія.** Для проведення експериментального дослідження була розроблена і зібрана відеокомп'ютерна установка, що забезпечує стиснення тестових відеопослідовностей із заданими параметрами і відтворення їх на зовнішньому відтворювальному пристрої – плазмовому телевізійному приймачі-моніторі (діагональ 42 дюйми) з високоякісними HDMI-входами (рис. 3.19). Екран установки був оточений світловим полем, що визначає рівень адаптації зорового аналізатора. Умови спостереження були встановлені відповідно до вимог рекомендації ITU-R BT.500-12. Відстань спостереження була прийнята рівною  $5H$  ( $H$  – висота екрана відеомонітора) [6, 70].

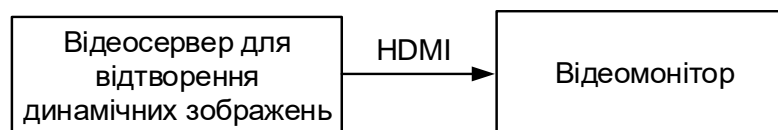


Рисунок 3.19 – Відеокомп'ютерна установка для проведення експериментів з оцінювання помітності спотворень відеокомпресії

Відповідно до табл. 2.5 для дослідження було обрано метод неперервної шкали якості з подвійним подразненням DSCQS (другого типу). Експертам потрібно було, користуючись 5-бальною шкалою градацій (див. рис. 2.4), оцінити вплив спотворень, що виникли внаслідок стиснення, на якість демонстрованих

відеопослідовностей. Оскільки за результатами досліджень ступеня помітності спотворень зображення, наведених в другому розділі цієї роботи, *блокова структура зображення* є найбільш помітним видом спотворень, які вносить процес кодування за алгоритмом MPEG-2 у цифровий відеосигнал, експертам було рекомендовано оцінювати вплив саме цього виду спотворень на якість відеозображення.

Протягом однієї серії експерименту експерту демонстрували пари відеопослідовностей, при цьому одночасно було видно обидві послідовності. Кожну пару показували 2 рази. Одна з пари відеопослідовностей була еталонною, але експерта про це не інформували. Тривалість елементарного оцінювання складала 30 секунд. Одна серія експерименту містила по 4 елементарних оцінювання (4 можливі швидкості бітового потоку) і тривала 2 хвилини. У наступній серії змінювався тестовий сюжет. Кожен експерт проходив 36 серій експериментів (9 тестових сюжетів на 4 ступені компресії). Загальна тривалість тестової сесії для одного експерта не перевищувала 20 хв. Протягом кожної серії експерт самостійно фіксував оцінки у відповідних полях автоматизованого програмного забезпечення, яке по завершенні тестової сесії зберігало дані експерименту на жорсткий диск персонального комп'ютера [6].

### **3.4.2 Оброблення та аналіз результатів експерименту**

Результати експерименту для з'ясування впливу швидкості бітового потоку на погіршення якості зображення тестових відеопослідовностей, оброблені відповідно до рекомендацій, наведених в п. 2.3.7, показано в табл. 3.3.

Обчислення середньої оцінки для кожної тестової сесії виконано відповідно до виразу (2.10). Також для кожної тестової сесії розраховано стандартне відхилення оцінок експертів від середньої оцінки та відповідний довірчий інтервал (див. Додаток А). Дані, наведені в Додатку А, засвідчують, що із

ймовірністю 95% можна стверджувати, що усі оцінки експертів лежать у межах довірчого інтервалу, тобто є достовірними.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту

Послідовність	Середня оцінка $\bar{i}_{jkr}$ для швидкості бітового потоку			
	2 Мбіт/с	4 Мбіт/с	6 Мбіт/с	8 Мбіт/с
Барселона	2,81	3,87	4,12	4,19
Арфа	2,56	4,19	4,12	4,87
Рухома графіка	3,75	4,81	4,37	5,19
Каное	1,31	3,37	3,81	4,81
Болід Ф1	2,06	3,75	4,31	4,31
В кафе	3,0	4,62	4,94	4,75
Рухомий текст	3,12	4,62	4,87	5,06
Регбі	1,5	3,44	4,19	4,63
Календар	2,0	3,0	4,12	4,31

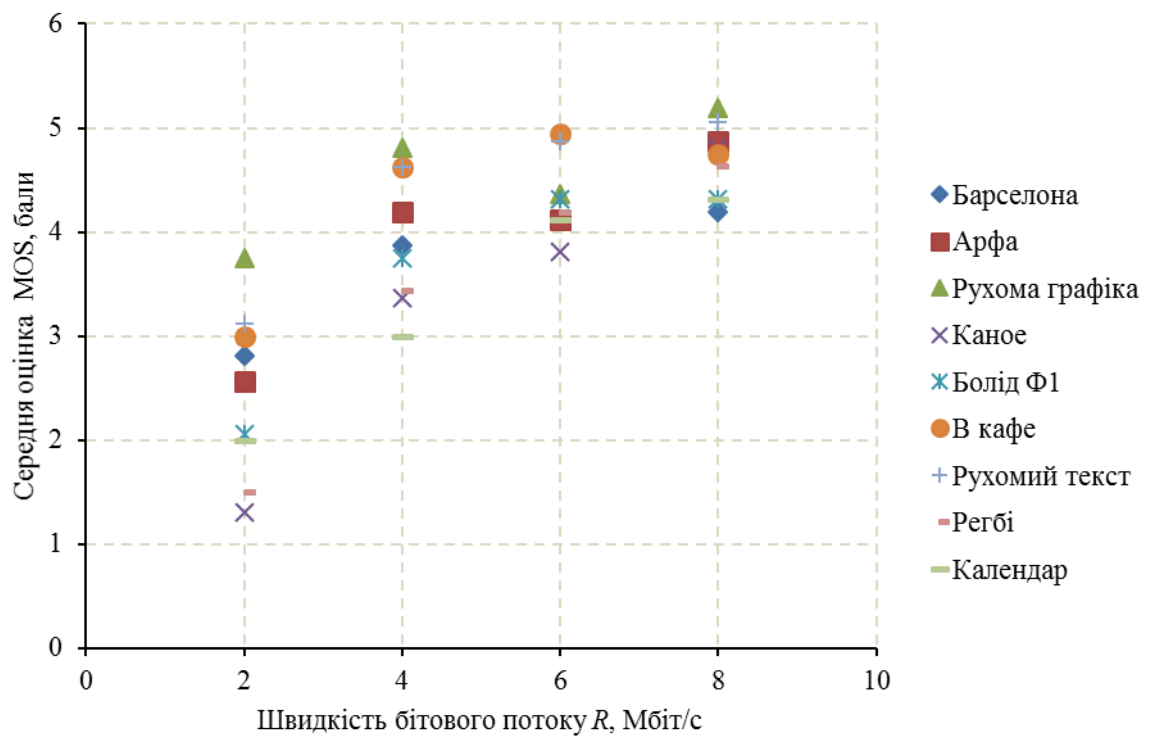


Рисунок 3.20 - Залежність середньої оцінки погіршення якості від швидкості бітового потоку

За результатами експерименту побудовано характеристику погіршення – залежність середньої оцінки погіршення якості (MOS – Mean Opinion Score) від швидкості бітового потоку (рис. 3.20) [71, 72].

Аналізуючи результати експерименту, можна зробити такі висновки [56, 71, 73]:

- середні оцінки якості знижуються із зменшенням швидкості бітового потоку (збільшенням стиснення);

- дисперсія оцінок тим вища, чим менша швидкість цифрового відео потоку;

- кодування відеопослідовностей зі швидкостями цифрового потоку менше 4 Мбіт/с в більшості випадків призводить до значного погіршення якості зображення (з оцінками від «трохи заважає» до «дратує»);

- у випадку зменшення швидкості цифрового потоку відеоданих найбільше погіршення якості спостерігають у відеопослідовностях, що містять динамічний сюжет та широкий діапазон кольорів (послідовності Каное, Болід Ф1, Регбі та Календар);

- найменше погіршення якості спостерігають на штучно створених (синтетичних) зображеннях (Рухома графіка, Рухомий текст);

- для покращення якості зображення під час трансляцій спортивних змагань чи сюжетів, що містять швидкий рух, панорамування та широкий діапазон переданих кольорів, доцільно ввести динамічне регулювання швидкості цифрового відеопотоку шляхом зміни коефіцієнта стиснення в залежності від вимірної якості відеозображення.

### 3.4.3 Застосування ранжування відеозображень для керування якістю відеоконтенту

Результати проведеного експерименту зі з'ясування впливу швидкості бітового потоку на погіршення якості зображення відеопослідовностей дають змогу сформулювати припущення, яке буде використано під час подальших досліджень КТЗЗ. Досліджувані відеопослідовності представляють широкий спектр можливих ситуацій, що можуть виникнути під час перегляду програм ЦТБ, та характеризуються певними ознаками, такими як наявність руху, насиченість кольорів, зміна масштабу, панорамування тощо. При цьому усі послідовності отримали різні середні оцінки якості за однакових значень швидкостей бітового потоку. Тому запропоновано ввести ранжування відеозображень для виділення дев'яти класів відеопослідовностей, з якими працюватиме КТЗЗ. Відповідні класи ВП, їхні типові ознаки та відповідність тестовим послідовностям, які були застосовані під час експерименту, наведено в табл. 3.4 [56, 74].

Таким чином, до першого та другого класу  $k = (1...2)$  віднесено відеозображення з найвищими експертними оцінками, що мають штучну природу походження (рухома графіка та рухомий текст). До третього класу  $k = 3$  віднесено відеокадри, що містять зображення людей, панорамування та відзняті на кіноплівці. Експертні оцінки таких відеозображень дещо нижчі. Класи  $k = (4...9)$  утворюють відеокадри підвищеної складності, які містять насичений колір, дрібні деталі, ефект маскування кольорів та різні типи руху, при чому експертні оцінки якості для таких відеозображень в цілому знижуються із зростанням класу  $k$ .

Таблиця 3.4 – Класи відеопослідовностей

Клас ВП $k$	Типові ознаки класу	Відповідна тестова ВП
1	Критична для Betacam, колір, рухомий текст, тонкі літери, штучна природа зображення	Рухома графіка
2	Текст з горизонтальним рухом	Рухомий текст
3	Кіноплівка, кольори шкіри, швидке панорамування	В кафе
4	Насичений колір, зміна масштабу зображення, світлі ділянки, тонкі деталі	Арфа
5	Насичений колір та ефект маскування	Барселона
6	Швидкий рух, насичені кольори, зміна плану	Болід Ф1
7	Рух води, рух в протилежному напрямі, багато деталей	Каное
8	Рух та кольори, дрібні деталі	Календар
9	Рух та кольори на зеленому фоні	Регбі

### 3.5 Алгоритм роботи каскадного транскодера зі зворотним зв'язком з різними класами відеозображень

Визначимо алгоритм роботи КТЗЗ із послідовностями відеокадрів різних класів під час транскодування відеопотоку за критерієм якості сформованого для передавання відеозображення [75].

1. Використовуючи інформацію про пікселі еталонного  $x_i$  та спотвореного  $y_i$  кадрів зображення з виходу декодера відеотранскодера (див. рис. 3.9), обчислюють об'єктивний показник якості  $Q_0^{cp}$  для відеопотоку на вході КТЗЗ, який було оброблено за допомогою глобального коефіцієнта квантування  $q_0$ .

2. За допомогою обчисленого значення об'єктивного показника якості  $Q_0^{cp}$  та значення швидкості бітового потоку  $R_0$  на вході КТЗЗ, використовуючи алгоритм

класифікації за мінімумом відстані [76], приймають рішення про приналежність відеокадрів до певного класу  $k$ .

3. Маючи інформацію про клас  $k$  послідовності відеокадрів, за нею закріплюють керуючу характеристику (рис. 3.21):

$$Q_k^{\text{cp}} = f(R_k). \quad (3.13)$$

4. Для кожного класу  $k$  ВП мають бути визначені граничні показники якості  $Q_{\text{min},k}^{\text{cp}}$ ,  $Q_{\text{max},k}^{\text{cp}}$  та відповідні їм значення швидкості бітового потоку  $R_{\text{min},k}$ ,  $R_{\text{max},k}$ .  
Значення  $Q_{\text{min},k}^{\text{cp}}$  відповідає ситуації, коли спотворення трохи заважають сприйняттю зображення глядачем (оцінка «задовільно» за 5-бальною шкалою).  
Значення  $Q_{\text{max},k}^{\text{cp}}$  відповідає ситуації, коли спотворення помітні, але не заважають сприйняттю зображення (оцінка «добре» за 5-бальною шкалою).

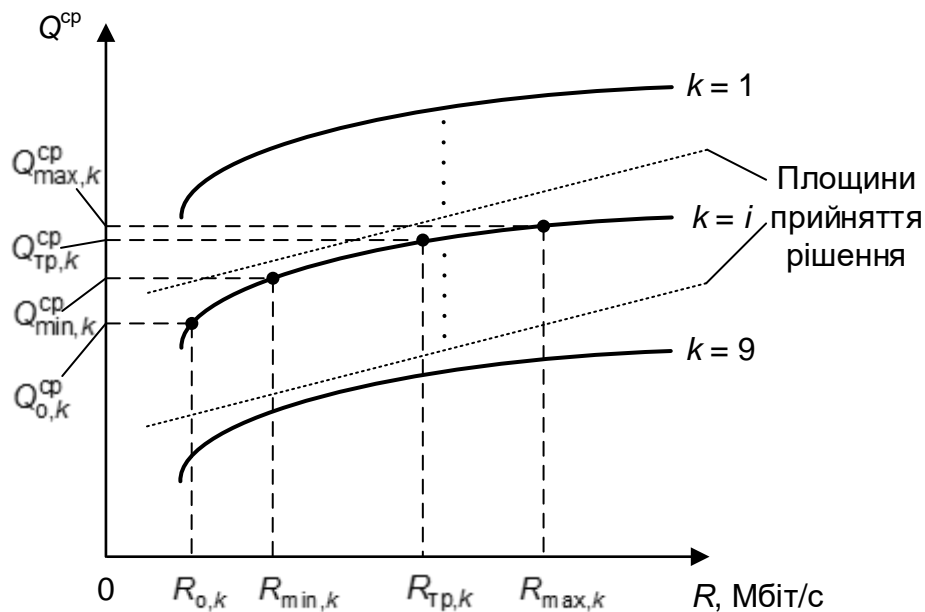


Рисунок 3.21 – Керуючі характеристики для послідовностей відеокадрів різних класів

5. Здійснюють порівняння обчисленого показника якості  $Q_{o,k}^{cp}$  послідовності відеокадрів, віднесеної до  $k$ -го класу, з граничними показниками якості  $Q_{min,k}^{cp}$  та  $Q_{max,k}^{cp}$ .

Якщо виконується умова

$$Q_{o,k}^{cp} < Q_{min,k}^{cp}, \quad (3.14)$$

то це означає, що якість відеозображення у підготовленому до передавання відеопотоці нижча від мінімальної граничної якості для даного класу відеозображень (рис. 3.21), тому необхідно підвищити якість відеоконтенту так, щоб бажане значення показника якості  $Q_{тр,k}^{cp}$  знаходилося у межах граничних показників якості на інтервалі  $[Q_{min,k}^{cp}; Q_{max,k}^{cp}]$ .

Якщо виконується умова

$$Q_{o,k}^{cp} > Q_{max,k}^{cp}, \quad (3.15)$$

то це означає, що якість відеозображення у підготовленому до передавання відеопотоці вища від максимальної граничної якості для даного класу відеозображень, тому необхідно понизити якість відеоконтенту так, щоб бажане значення показника якості  $Q_{тр,k}^{cp}$  також знаходилося у межах граничних показників якості на інтервалі  $[Q_{min,k}^{cp}; Q_{max,k}^{cp}]$ .

При цьому у обох випадках запропоновано обчислювати  $Q_{тр,k}^{cp}$  як середнє арифметичне граничних показників якості:

$$Q_{тр,k}^{cp} = \frac{Q_{min,k}^{cp} + Q_{max,k}^{cp}}{2}. \quad (3.16)$$

6. Якщо умови (3.14) – (3.15) не виконуються, це означає, що якість відеозображення у підготовленому до передавання відеопотоці знаходиться у

прийнятних межах, тому немає потреби у зміні бітової швидкості відеопотоку та обчисленні нового значення  $q_{тр}$  глобального коефіцієнта квантування.

7. У випадку виконання умов (3.14) – (3.15), маючи бажане значення показника якості  $Q_{тр,k}^{cp}$ , обчислюють та надсилають до штатного кодера MPEG-2 нові значення бітової швидкості  $R_{тр,k}$  та глобального коефіцієнта квантування  $q_{тр}$ , які буде використано для формування відеопотоку з новим показником якості.

Алгоритм роботи КТЗЗ із послідовностями відеокадрів різних класів під час транскодування відеопотоку за критерієм якості сформованого для передавання відеозображення наведено на рис. 3.22.

### **3.6 Удосконалення системи керування якістю відеоконтенту за критерієм якості сформованого для передавання зображення**

Із врахуванням узагальненої структури КТЗЗ (рис. 3.9) та алгоритму його роботи (рис. 3.22) запропоновано функціональну схему системи керування якістю відеоконтенту, що відповідає підходу, описаному в п.3.1 [53, 54].

Система працює зі змонтованим та готовим до передавання відеоконтентом. Штатний відеокодер MPEG-2 формує стиснутий цифровий відеопотік, який характеризують значеннями глобального коефіцієнта квантування  $q_0$  та бітової швидкості  $R_0$ , готовий для передавання у систему каналного кодування та модуляції. Для керування якістю сформованого для передавання відеоконтенту через лінію зворотного зв'язку стиснутий цифровий відеопотік надходить на декодер відеотранскодера, з виходу якого отримують декодовану та спотворену внаслідок стиснення кодером MPEG-2 послідовність відеокадрів  $u_i$ , що подають в блок об'єктивного аналізу якості та керування бітовою швидкістю (ОАЯ та КБШ).

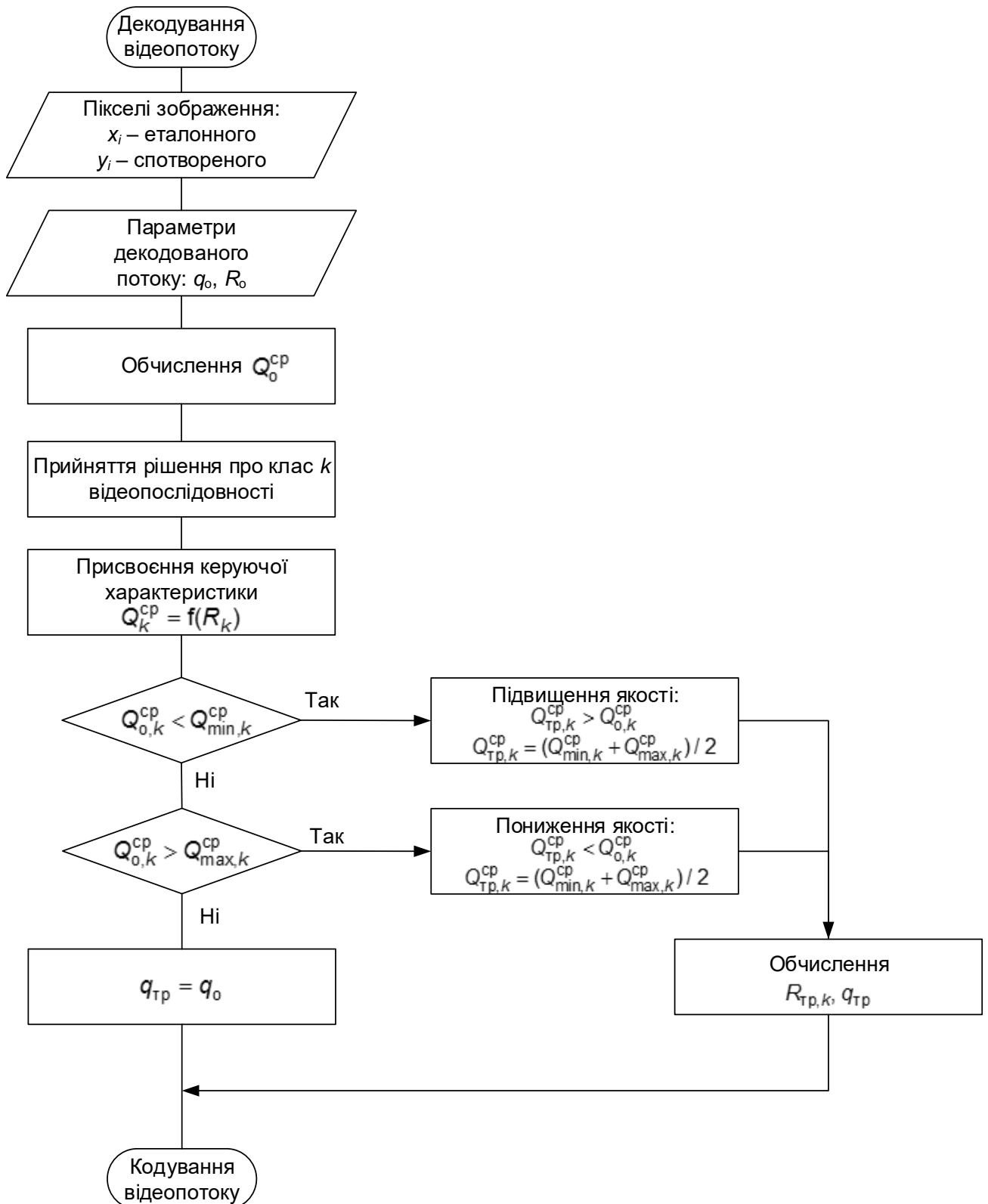


Рисунок 3.22 – Алгоритм роботи КТЗЗ за критерієм якості результуючого відеозображення

На інший його вхід через БЗП подають неспотворену початкову (еталонну) послідовність відеокадрів  $x_i$  (рис. 3.23). Необхідність застосування буферу можна пояснити двома причинами: компенсацією затримки проходження відеокадрів через кодер та декодер (затримка транскодування) і необхідністю накопичення деякої кількості еталонних та спотворених відеокадрів для усереднення отриманого об'єктивного показника якості.

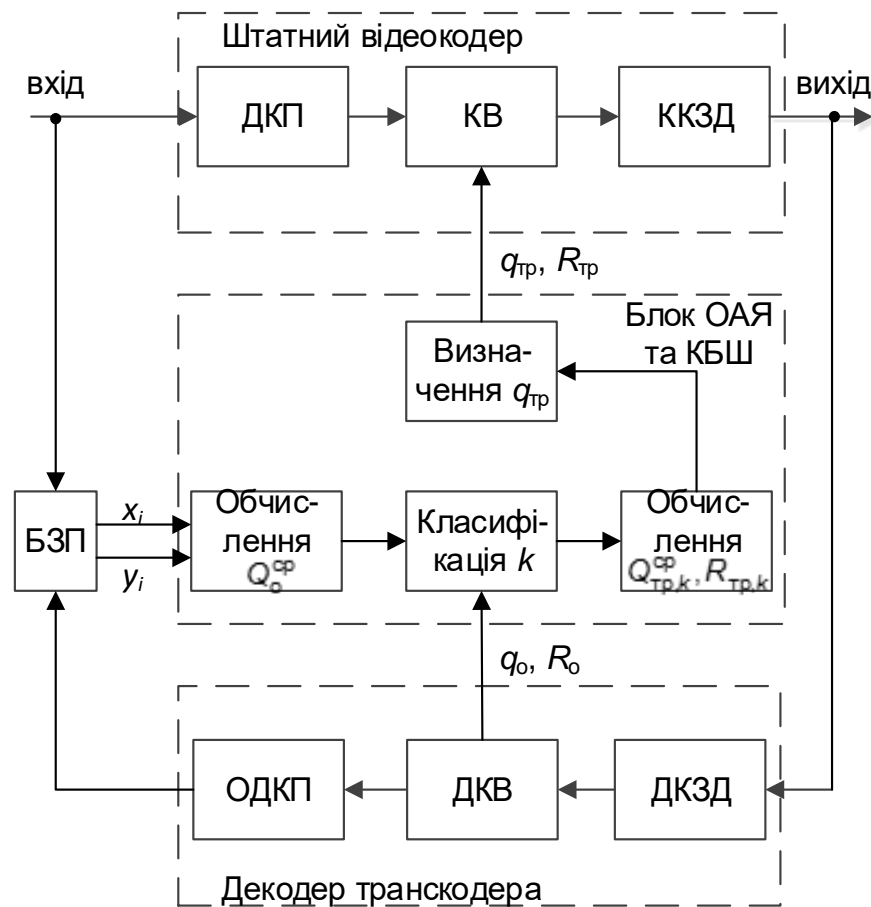


Рисунок 3.23 – Функціональна схема системи керування якістю відеоконтенту за критерієм якості зображення

Блок ОАЯ та КБШ виконує кілька функцій. Спочатку в ньому обчислюють значення об'єктивного показника якості  $Q_0^{cp}$  сформованого для передавання відеопотоку в один із способів, описаних у п.2.4. При цьому вибір об'єктивної метрики, яка б найбільше відповідала результатам проведеного у п.3.4 суб'єктивного аналізу якості, є одним із завдань для подальших досліджень у

рамках цієї роботи. Потім за допомогою обчисленого показника якості  $Q_0^{cp}$  та бітової швидкості  $R_0$  блок ОАЯ та КБШ здійснює класифікацію послідовностей відеокадрів та визначення бажаної якості послідовності відеокадрів класу  $k$   $Q_{тр,k}^{cp}$ , як показано у п.3.5.

Отже, використовуючи формулу (3.12), що описує каскадний транскодер без зворотного зв'язку, та ввівши поняття класу ВП  $k$ , вираз для обчислення бажаного глобального коефіцієнта квантування  $q_{тр,k}$  для керування якістю підготовленого для передавання відеоконтенту набуде вигляду:

$$q_{тр,k} = q_{o,k} \cdot \frac{c}{\frac{R_{тр,k}}{R_{o,k}} - d} = q_{o,k} \cdot c \cdot \left( \frac{R_{тр,k}}{R_{o,k}} - d \right)^{-1}. \quad (3.17)$$

Слід відзначити, що всі складові виразу (3.17), які розташовані справа від знаку рівності, є відомими ще на початку транскодування, і лише значення  $R_{тр,k}$  визначають під час транскодування. Це можна легко зробити, скориставшись керуючою характеристикою (3.13) для  $k$ -го класу послідовності відеокадрів та знайшовши функцію, обернену до неї:

$$Q_k^{cp} = f(R_k) \rightarrow R_k = g(Q_k^{cp}), \quad (3.18)$$

де  $g()$  – обернена функція до  $f()$  така, що

$$g(f(R_k)) = R_k.$$

Підставимо вираз (3.18) у формулу (3.17) та отримаємо вираз, що описує процес керування якістю відеоконтенту за критерієм якості сформованого для передавання відеозображення або так звану *функцію керування*:

$$q_{тр,k} = q_{o,k} \cdot \frac{c}{\frac{R_{тр,k}}{R_{o,k}} - d} = q_{o,k} \cdot c \cdot \left( \frac{g(Q_{тр,k}^{cp})}{g(Q_{o,k}^{cp})} - d \right)^{-1}. \quad (3.19)$$

Для подальших досліджень системи керування якістю відеоконтенту необхідно визначити аналітичний вигляд функції (3.18).

### **Висновки до розділу**

1. В межах концепції поліпшення якості відеоконтенту на етапах формування та передавання цифрових телепрограм сформульовано критерій оцінювання якості відеозображень у системах цифрового телебачення, який ґрунтується на максимізації кореляції суб'єктивних середніх оцінок якості та оцінок якості, отриманих відповідно до обраної об'єктивної метрики. Запропоновано новий метод керування відеопотоком, оснований на застосуванні у технологічному процесі виробництва телепрограм системи автоматичного керування якістю відеоконтенту, в якій використано відеотранскодер зі зворотним зв'язком.

2. Запропоновано систему рівнянь, що описує відеотранскодер без зворотного зв'язку. Результати експериментальних досліджень такого транскодера засвідчили його хорошу функціональність та простоту реалізації. Обґрунтовано застосування каскадного транскодера зі зворотним зв'язком для вирішення завдання із обчислення об'єктивного показника якості послідовності відеокадрів, що надає можливість отримати первинні сигнали зображення (відліків сигналу яскравості та кольорових різницевих сигналів) у процесі транскодування та дає змогу як знижувати, так і підвищувати бітову швидкість відеопотоку для керування якістю відеоконтенту.

3. За результатами експериментального дослідження суб'єктивним методом DSCQS кількісних параметрів впливу швидкості бітового потоку на погіршення якості зображення відеопослідовностей, закодованих за допомогою відеокодера MPEG-2 ML@MP, виявлено, що кодування відеопослідовностей зі швидкостями цифрового потоку менше 4 Мбіт/с у більшості випадків призводить до значного погіршення якості зображення. У випадку зменшення швидкості цифрового

потоків відеоданих найбільше погіршення якості спостерігають у відеопослідовностях, що містять динамічні сцени, дрібні деталі та велику кількість кольорів і відтінків; найменше погіршення якості спостерігають на штучно створених (синтетичних) зображеннях. Це підтверджує висновок про те, що має місце сильна залежність якості сприйнятого відеозображення від його вмісту. Запропоновано ввести ранжування відеозображень та виділено дев'ять класів типових ВП, з якими працюватиме КТЗЗ.

4. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи КТЗЗ із послідовностями відеокадрів різних класів під час транскодування відеопотоку за критерієм якості сформованого для передавання відеозображення, в якому передбачено такі етапи: обчислення об'єктивного показника якості для відеопотоку на вході КТЗЗ; прийняття рішення про приналежність послідовності відеокадрів до певного класу та закріплення за нею певної керуючої характеристики; порівняння обчисленого показника якості послідовності відеокадрів, віднесеної до певного класу, з граничними показниками якості та визначення бажаного показника якості для підвищення чи пониження якості послідовності відеокадрів; обчислення нового значення глобального коефіцієнта квантування, який буде використано для формування відеопотоку з бажаним показником якості.

5. Із врахуванням узагальненої структури КТЗЗ та алгоритму його роботи розроблено рекомендації щодо технічної реалізації його основних блоків і функціональну схему системи керування якістю відеоконтенту, що дозволяє реалізувати запропоновану концепцію покращення якості відеоконтенту на етапах формування та передавання цифрових телепрограм. Запропоновано функцію, що описує керування якістю відеоконтенту за критерієм якості сформованого для передавання відеозображення.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТИВНИМИ МЕТОДАМИ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

В даному розділі експериментально обґрунтовано ступінь відповідності об'єктивних методів вимірювання якості відеозображень суб'єктивному сприйняттю, запропоновано аналітичну функцію керування транскодером зі зворотним зв'язком в режимах підвищення та пониження якості відеоконтенту і розраховано швидкодію такого транскодера.

#### **4.1 Експериментальне дослідження якості відеозображень**

##### **4.1.1 Опис програмного забезпечення для вимірювання якості**

Експериментальні дослідження з вимірювання якості відеозображень об'єктивними методами було проведено за допомогою програми MSU Video Quality Measurement Tool [77]. Зовнішній вигляд діалогового вікна програми наведено на рис. 4.1. Її інтерфейс інтуїтивно зрозумілий та містить покрокові інструкції з налаштування програми для запуску вимірювання якості відеопослідовностей за обраною метрикою:

1. На першому кроці необхідно вказати еталонну відеопослідовність (original file) та відеопослідовність, спотворену внаслідок стиснення (processed (compressed)).

2. На другому кроці обирають метрику (metric selection), за допомогою якої буде здійснено об'єктивне вимірювання якості.

3. На третьому кроці зазначають, у якому форматі необхідно зберегти результати вимірювань (output selection), та запускають процес оброблення (process). Зазначену метрику обчислюють як для кожного кадру, так і для всієї послідовності, отримуючи середнє значення метрики за усіма кадрами.

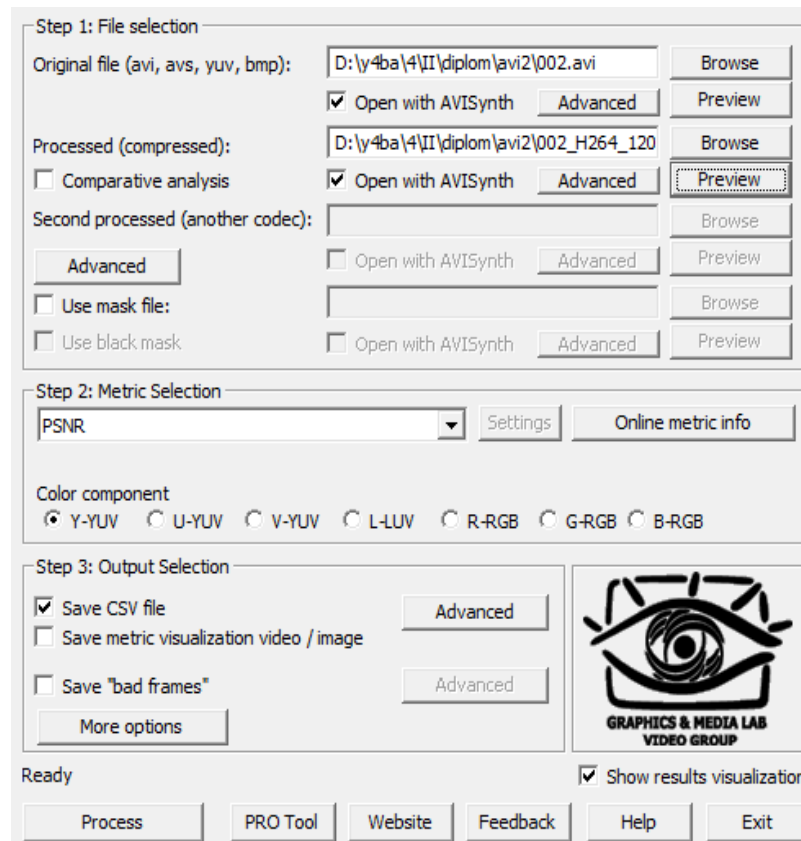


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд діалогового вікна програми MSU Video Quality Measurement Tool

#### 4.1.2 Аналіз результатів експерименту

Дослідження проведено для чотирьох значень швидкості бітового потоку – 2 Мбіт/с, 4 Мбіт/с, 6 Мбіт/с та 8 Мбіт/с за допомогою об'єктивних метрик PSNR, MS-SSIM та VQM. Середні значення метрик для кожної досліджуваної відеопослідовності, отримані в результаті експерименту, наведено у табл. 4.1. Крім того, у третьому стовпчику цієї таблиці для наочності наведено середні значення суб'єктивної оцінки MOS [56, 74, 78].

Таблиця 4.1 – Середні значення метрик PSNR, MS-SSIM та VQM для досліджуваних відеопослідовностей

Послідовність	Швидкість бітового потоку $R$ , Мбіт/с	MOS	Середнє значення об'єктивної метрики		
			PSNR, дБ	MS-SSIM	VQM
Барселона	2	2,81	23,593451	0,8859897	5,0663824
	4	3,87	23,859936	0,9066173	4,7846675
	6	4,12	23,833453	0,9119803	4,7410391
	8	4,19	23,783942	0,9145948	4,7323656
Арфа	2	2,56	21,291026	0,8136512	5,0629576
	4	4,19	20,985565	0,818205	5,0488453
	6	4,12	20,890268	0,818173	5,0678550
	8	4,87	20,842969	0,8178086	5,0888903
Рухома графіка	2	3,75	24,240339	0,8889527	3,7224607
	4	4,81	24,256892	0,8919348	3,7222029
	6	4,37	24,266216	0,893205	3,7261404
	8	5,19	24,273553	0,8932878	3,7228005
Каное	2	1,31	21,788606	0,6979408	5,0315632
	4	3,37	21,463618	0,7197051	4,9953914
	6	3,81	21,405554	0,7217105	4,9772373
	8	4,81	21,38425	0,7223833	4,9684998
Болід Ф1	2	2,06	20,392393	0,6660666	5,6931242
	4	3,75	19,895949	0,6640667	5,8383001
	6	4,31	19,744201	0,6654665	5,9035663
	8	4,31	19,696407	0,6671922	5,9203642
В кафе	2	3	27,190908	0,8991083	3,1804001
	4	4,62	27,710441	0,9140332	2,9414637
	6	4,94	27,783828	0,916796	2,8934705
	8	4,75	27,811689	0,9181314	2,8754645

Продовження табл. 4.1

Послідовність	Швидкість бітового потоку $R$ , Мбіт/с	MOS	Середнє значення об'єктивної метрики		
Рухомий текст	2	3,12	20,954276	0,8524102	3,8067438
	4	4,62	20,865228	0,8581255	3,7700703
	6	4,87	20,855148	0,8591293	3,7660066
	8	5,06	20,850737	0,859455	3,7681231
Регбі	2	1,5	19,640207	0,6632037	6,1272437
	4	3,44	19,145202	0,6795283	6,1960396
	6	4,19	19,084573	0,6832662	6,1779515
	8	4,63	19,059751	0,687303	6,1656466
Календар	2	2	20,110618	0,815929	6,7415638
	4	3	19,883241	0,8277375	6,6817609
	6	4,12	19,769302	0,8302786	6,6937131
	8	4,31	19,707603	0,8313601	6,706747

Для прикладу нижче наведено графіки, які ілюструють покадрове значення відповідних метрик для відеопослідовності «В кафе» (рис. 4.2, 4.3, 4.4). Повні результати покадрового вимірювання якості усіх тестових відеопослідовностей за допомогою метрик PSNR, MS-SSIM та VQM наведено у Додатку Б.

Проаналізувавши результати експерименту, можна стверджувати, що найгірші значення метрик, що відповідають низькій якості, отримано на відеокадрах, які містять дрібні деталі, значне наближення до об'єктів (масштабування), швидкий рух камери та панорамування (тестові послідовності Каное, Болід Ф1, Регбі, див. рис. Б.4, Б.5, Б.8, Б.13, Б.14, Б.17, Б.22, Б.23, Б.26), а найкращі значення метрик, що відповідають високій якості, спостерігають за умови мінімального руху камери та за відсутності дрібних деталей у кадрі (тестові послідовності В кафе, Барселона, Рухома графіка, див. рис. Б.1, Б.3, Б.6, Б.10, Б.12, Б.15, Б.19, Б.21, Б.24).

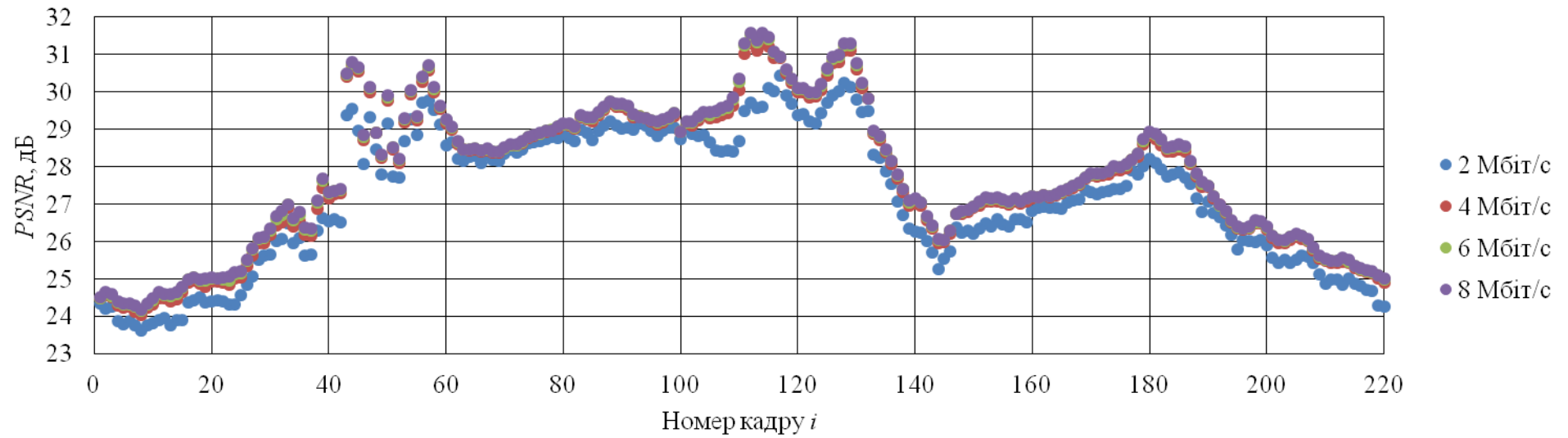


Рисунок 4.2 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності В кафе

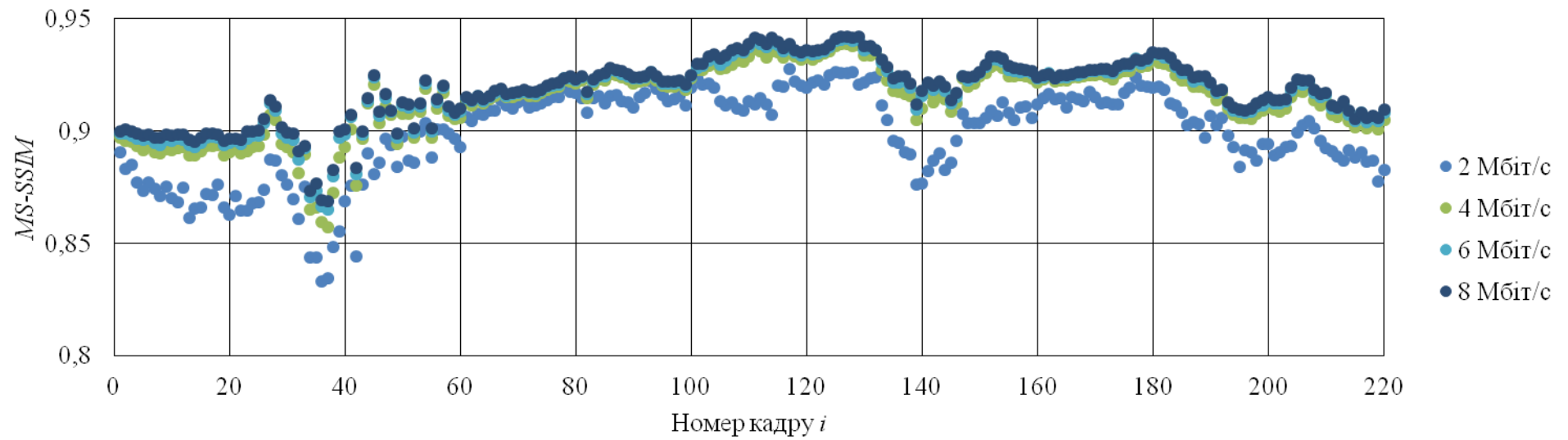


Рисунок 4.3 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності В кафе

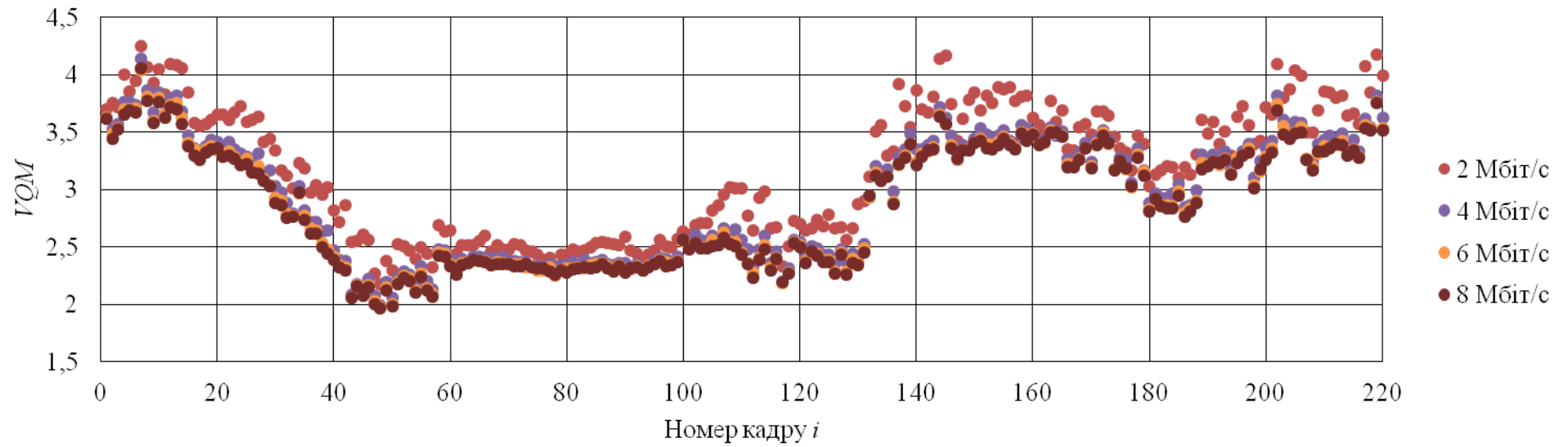


Рисунок 4.4 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності В кафе

Для оцінювання передбачуваності методів об'єктивного вимірювання якості нами запропоновано *коефіцієнт відповідності* ( $k_B$ ), який ілюструє взаємозв'язок між зростанням швидкості бітового потоку та зростанням якості відеозображення для сукупності тестових відеопослідовностей різних класів.

За результатами експерименту отримано такі значення коефіцієнта  $k_B$ :

- для методу PSNR:  $k_B = 0,22$ ;
- для методу MS-SSIM:  $k_B = 0,88$ ;
- для методу VQM:  $k_B = 0,44$ .

Тобто метод MS-SSIM показав передбачувані результати у 8 з 9 випадків, метод VQM – у 4 з 9, а метод PSNR – лише у 2 з 9 (див. табл. 4.1). Слід також відзначити, що з тестовою ВП Арфа жоден з трьох методів не відпрацював коректно (не спостерігалось зростання якості при збільшенні швидкості бітового потоку).

## 4.2 Оцінювання кореляції між результатами суб'єктивних та об'єктивних вимірювань якості

### 4.2.1 Узгодження діапазонів розрахункових значень об'єктивних та суб'єктивних метрик

Для того, щоб порівнювати об'єктивні метрики, їх результати потрібно привести до єдиної шкали. Відповідно до процедури, описаної в [51], дані об'єктивних метрик було приведено до діапазону суб'єктивних результатів за допомогою *функції відповідності*, представлені кубічним поліномом (2.16):

$$Q_p = A_0 + A_1 \cdot VQR + A_2 \cdot VQR^2 + A_3 \cdot VQR^3, \quad (4.1)$$

де  $VQR$  – дані об'єктивних метрик (табл. 4.1);

$Q_p$  – приведені до шкали суб'єктивних оцінок значення об'єктивних метрик;

$A_0, A_1, A_2, A_3$  – параметри полінома.

Параметри  $A_0, A_1, A_2, A_3$  підібрано таким чином, щоб мінімізувати суму квадратів різниць між  $Q_p$  і суб'єктивними даними  $MOS$  [79]:

$$A_0, A_1, A_2, A_3 : \sum (Q_p - MOS)^2 \rightarrow \min.$$

Отримані дані можна вважати передбаченням суб'єктивної думки, наданої об'єктивною метрикою. Результати апроксимації значень об'єктивних метрик за суб'єктивними оцінками якості наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Приведені значення об'єктивних метрик

Послідовність	Швидкість бітового потоку $R$ , Мбіт/с	MOS	Приведені значення об'єктивних метрик		
			PSNR <sub>p</sub> , дБ	MS-SSIM <sub>p</sub>	VQM <sub>p</sub>
Барселона	2	2,81	2,743484	2,82243	2,329394
	4	3,87	4,408781	3,832163	4,113397
	6	4,12	4,429094	4,101525	4,354041
	8	4,19	4,776434	4,233876	4,750626
Арфа	2	2,56	2,288433	2,6009	2,331225
	4	4,19	3,850422	4,436895	3,982324
	6	4,12	4,261901	4,423896	4,300234
	8	4,87	4,653245	4,276374	4,696367
Рухома графіка	2	3,75	2,878804	3,820997	3,111422
	4	4,81	4,46512	4,551859	4,516246
	6	4,37	4,450822	4,863201	4,499984
	8	5,19	4,792455	4,883478	4,859007
Каное	2	1,31	2,38186	1,255985	2,348065
	4	3,37	3,571795	3,80051	3,52224
	6	3,81	4,293689	4,074817	4,315498
	8	4,81	4,679792	4,168347	4,715804
Болід Ф1	2	2,06	2,128578	2,61307	2,017876
	4	3,75	3,961884	3,579838	4,009846
	6	4,31	4,18726	3,603082	4,146734
	8	4,31	4,590353	3,63184	4,525775
В кафе	2	3	3,491413	3,025893	3,431024
	4	4,62	4,787867	4,543117	4,701622
	6	4,94	4,602673	4,807209	4,597729
	8	4,75	4,87968	4,932978	4,913494

Продовження табл. 4.2

Послідовність	Швидкість бітового потоку $R$ , Мбіт/с	MOS	Приведені значення об'єктивних метрик		
			PSNR <sub>p</sub> , дБ	MS-SSIM <sub>p</sub>	VQM <sub>p</sub>
Рухомий текст	2	3,12	2,227129	3,113733	3,060775
	4	4,62	3,821266	4,642447	4,502133
	6	4,87	4,259695	4,912957	4,494828
	8	5,06	4,65364	5,000862	4,855305
Регбі	2	1,5	2,00446	1,483375	1,832488
	4	3,44	3,363693	3,52359	3,287656
	6	4,19	4,141815	4,066677	4,091276
	8	4,63	4,551221	4,684987	4,461517
Календар	2	2	2,081007	2,022648	1,61466
	4	3	3,568367	3,431816	2,957084
	6	4,12	4,188953	3,882438	3,980293
	8	4,31	4,591013	4,09006	4,293744

#### 4.2.2 Оцінювання кореляції між об'єктивними та суб'єктивними метриками із застосуванням коефіцієнта Пірсона

Під час дослідження кореляції намагаються встановити, чи існує зв'язок між двома показниками в одній вибірці або між двома різними вибірками, і якщо цей зв'язок існує, то чи супроводжується збільшення одного показника зростанням (позитивна кореляція) або зменшенням (негативна кореляція) іншого. Іншими словами, кореляційний аналіз допомагає встановити, чи можна передбачити можливі значення одного показника, знаючи величину іншого.

Коефіцієнт кореляції – це величина, що може змінюватися в межах від +1 до -1. У випадку повної позитивної кореляції цей коефіцієнт дорівнює плюс 1, а при повній негативній – мінус 1. На рис. 4.5,а та рис. 4.5,б цій ситуації відповідає пряма лінія, що проходить через точки перетину значень кожної пари даних.

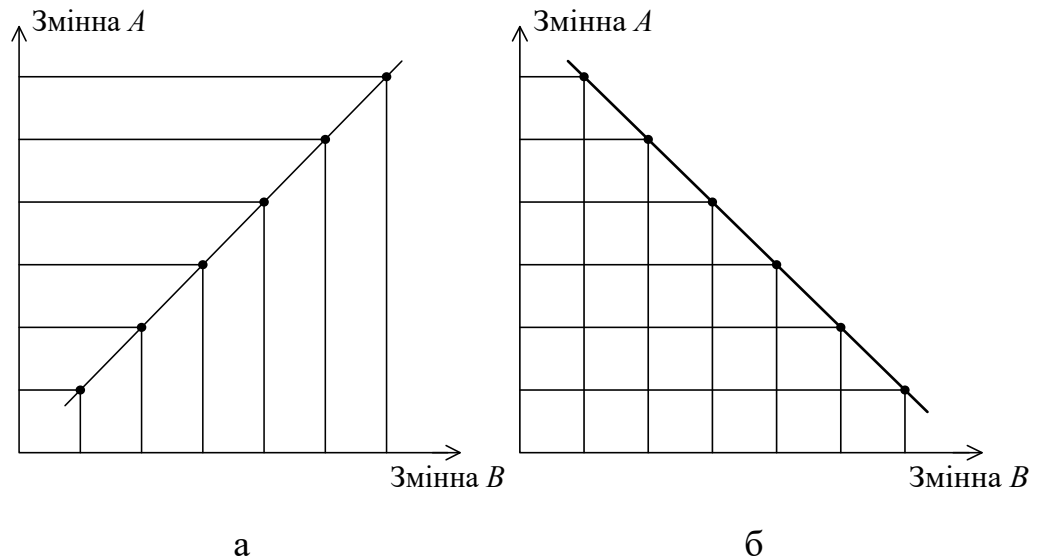


Рисунок 4.5 – Графіки відповідності для повної позитивної кореляції (а) та повної негативної кореляції (б)

У випадку, якщо ці точки утворюють не пряму лінію, а «хмару», коефіцієнт кореляції за абсолютною величиною стає меншим одиниці і в міру округлення цієї «хмари» наближається до нуля (рис. 4.6).

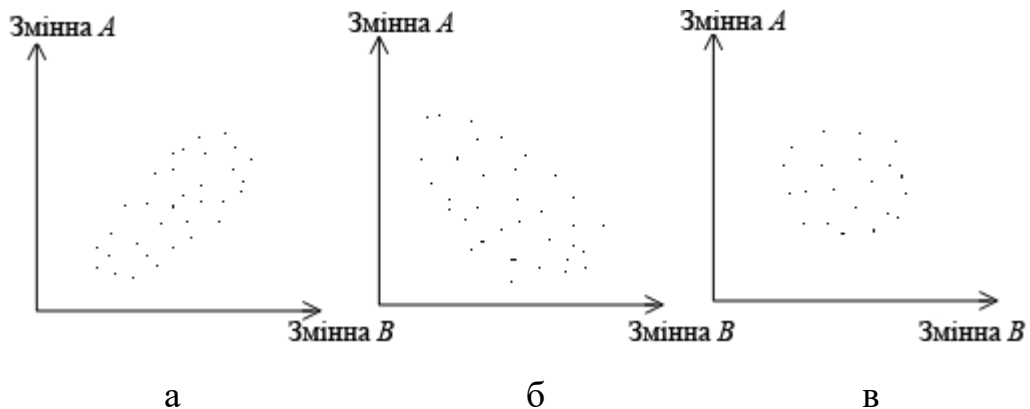


Рисунок 4.6 – Графіки відповідності між змінними  $A$  і  $B$  для різних значень коефіцієнта кореляції: а –  $R = 0,6$ ; б –  $R = -0,3$ ; в –  $R = 0$

У випадку, якщо коефіцієнт кореляції дорівнює 0, обидві змінні повністю не залежать одна від одної.

Кореляцію вважають сильною, якщо її коефіцієнт вище 0,60, якщо ж він перевищує 0,90, то кореляцію вважають дуже сильною. Але для того, щоб можна було робити висновки про зв'язки між змінними, велике значення має обсяг

вибірки: чим вибірка більше, тим достовірніше величина отриманого коефіцієнта кореляції.

Для кількісної оцінки лінійності взаємозв'язку між приведеними до єдиної шкали після застосування функції відповідності (4.1) значеннями об'єктивних метрик та суб'єктивними оцінками якості відеозображень необхідно розрахувати коефіцієнт кореляції Пірсона.

*Коефіцієнт кореляції Пірсона* ( $R_{XY}$ ) – це параметричний показник, для обчислення якого порівнюють середні і стандартні відхилення результатів двох вимірювань. Для цього використовують формулу:

$$R_{XY} = \frac{\left( \sum_{i=1}^n X \cdot Y \right) - n \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}}{(n-1) \cdot S_X \cdot S_Y}, \quad (4.2)$$

де  $\sum X \cdot Y$  – сума добутків даних з кожної пари;

$n$  – число пар;

$\bar{X}$  – середнє значення для даних змінної  $X$ ;

$\bar{Y}$  – середнє значення для даних змінної  $Y$ ;

$S_X$  – стандартне відхилення для розподілу змінної  $X$ ;

$S_Y$  – стандартне відхилення для розподілу змінної  $Y$ .

Для розрахунку значення коефіцієнта кореляції скористаємося даними табл. 4.2. Даним змінної  $X$  відповідатиме стовпчик таблиці з результатами суб'єктивних досліджень якості MOS, а даним змінної  $Y$  – стовпчики таблиці, що містять приведені до шкали суб'єктивних оцінок значення об'єктивних метрик  $PSNR_p$ ,  $MS-SSIM_p$  та  $VQM_p$ . Число пар добутків даних, що відповідає обсягу вибірки, становить  $n=36$ . Перед початком розрахунків дані таблиці потрібно упорядкувати відповідно до зростання швидкості бітового потоку  $R$ , не залежно від класу тестової відеопослідовності.

Розрахунок значення лінійного коефіцієнта кореляції Пірсона для кожної об'єктивної метрики виконаємо за допомогою функції КВПИРСОН програми Microsoft Excel, результати розрахунку занесемо до табл. 4.3. Перевірка

значимості показала, що гіпотеза про випадковий характер отриманих коефіцієнтів кореляції може бути відхилена з рівнем значимості  $p=0,001$  [80].

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнта кореляції для об'єктивних метрик

Об'єктивна метрика	PSNR	MS-SSIM	VQM
Квадрат коефіцієнта кореляції Пірсона $R_{XY}^2$	0,8157	0,9109	0,8944
Рівняння регресії	$y=0,8151x+0,7196$	$y=0,8938x+0,3812$	$y=0,893x+0,4061$

Обчислені значення коефіцієнтів кореляції демонструють існування тісного взаємозв'язку між суб'єктивними оцінками якості та результатами об'єктивних метрик.

Для оцінки кореляції між значеннями об'єктивних метрик та суб'єктивними оцінками якості відеозображень можна скористатися також графіками. Нижче наведено два типи графіків: перший з них – співвідношення величини суб'єктивної оцінки та величини об'єктивної метрики [79].

Для кожної тестової відеопослідовності такий графік потрібно розглядати окремо, оскільки величина суб'єктивної оцінки залежить від контексту цієї відеопослідовності (суб'єктивну оцінку виставляє експерт відносно інших її версій). На одній діаграмі вони об'єднані для зручності сприйняття.

На підставі рис. 4.7 можна зробити висновок, що метрика PSNR досить обмежено відображає реальну якість відео. Можна спостерігати ситуації, коли одному значенню PSNR відповідають абсолютно різні суб'єктивні думки та коли кращій суб'єктивній якості відповідає найгірше значення метрики.

На тестовому наборі відеопослідовностей метрика VQM не більш адекватна, ніж PSNR: у більшості випадків якість можна передбачити правильно, але часто кращій суб'єктивній якості відповідає найгірше значення метрики (рис. 4.8).

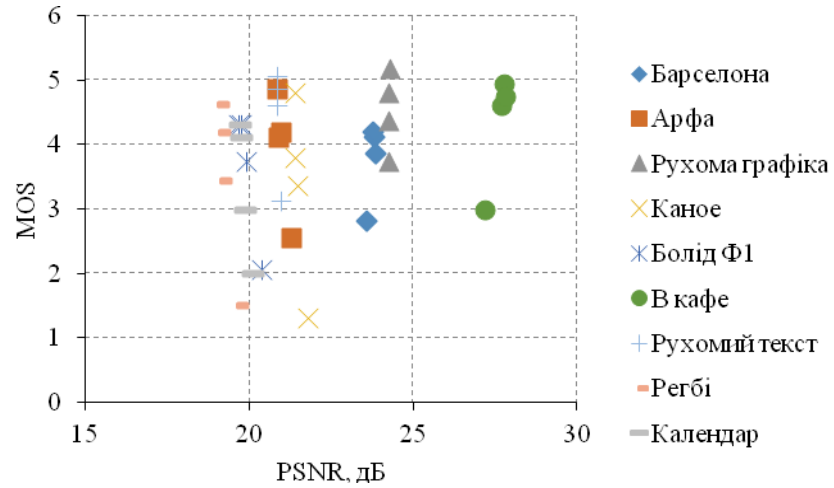


Рисунок 4.7 – Співвідношення між PSNR та MOS

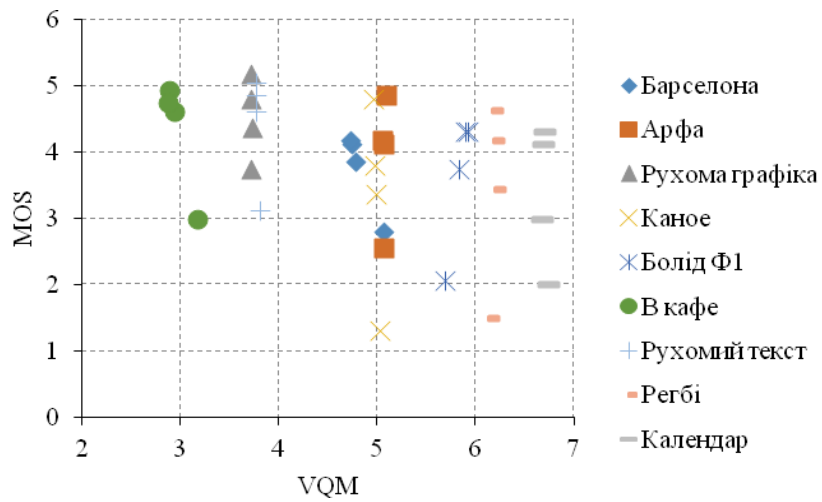


Рисунок 4.8 – Співвідношення між VQM та MOS

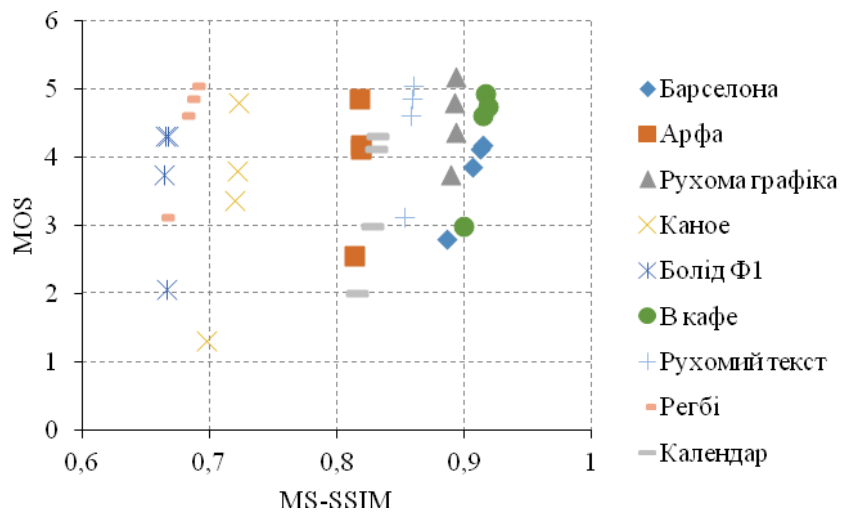
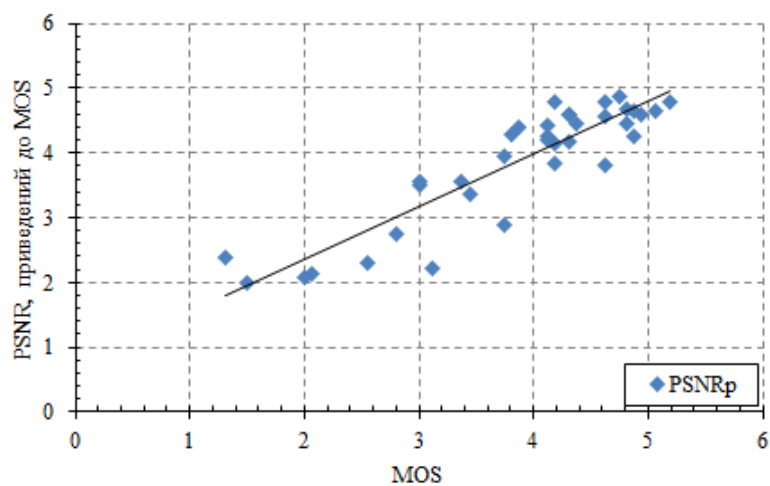
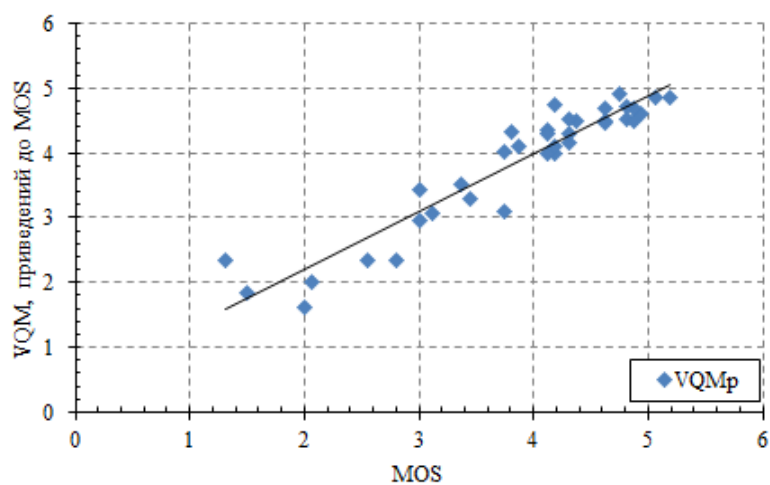


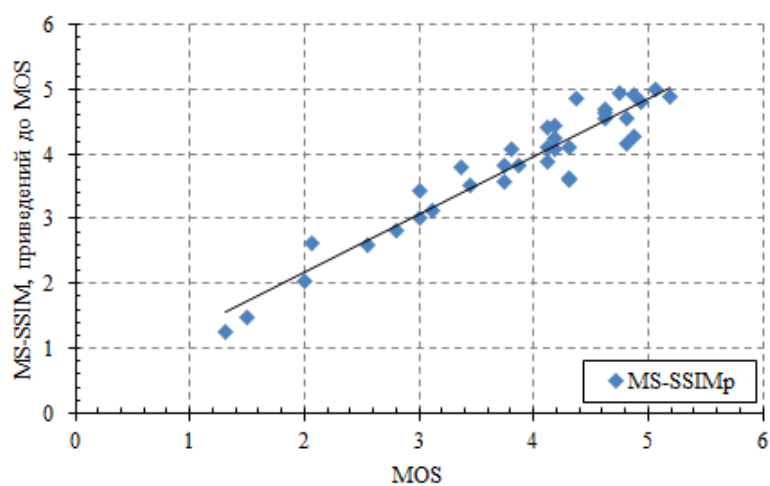
Рисунок 4.9 – Співвідношення між MS-SSIM та MOS



а



б



в

Рисунок 4.10 – Значення об'єктивних метрик, приведенних до суб'єктивних оцінок,  
для: а – PSNR, б – VQM, в – MS-SSIM

Метрика MS-SSIM дає можливість передбачити суб'єктивні оцінки з досить хорошою точністю: для кожної відеопослідовності її дані близькі до прямої, а кращій суб'єктивній якості відповідає краще значення метрики (рис. 4.9).

Другий тип графіків – співвідношення між об'єктивними оцінками, приведеними до суб'єктивної шкали, та реальними суб'єктивними оцінками [79]. Приведену оцінку отримано за допомогою застосування функції відповідності для кожної послідовності окремо. Такі графіки дозволяють візуально оцінити ступінь відповідності суб'єктивній метриці (чим ближче до прямої, рівняння регресії якої наведено в табл. 4.3, тим краще).

Як видно з рис. 4.10, на тестовому наборі відеопослідовностей метрика PSNR є найменш ефективною, а найбільшу відповідність суб'єктивним оцінкам має метрика MS-SSIM, оскільки точки на рис. 4.10, в розташовані найближче до прямої, що їх апроксимує.

### **4.2.3 Визначення об'єктивної метрики, що найбільше відповідає суб'єктивним оцінкам якості**

Для того, щоб обрати об'єктивну метрику для подальших досліджень, скористаємось двома обчисленими раніше коефіцієнтами:

- коефіцієнтом відповідності  $k_b$ ;
- коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона  $R_{XY}^2$ .

Впорядкуємо значення  $k_b$  та  $R_{XY}^2$  для кожної об'єктивної метрики, розставимо рейтинг та підсумуємо його (табл. 4.4). Відсортувавши таблицю за загальним рейтингом, отримаємо об'єктивну метрику, яка найбільше відповідатиме результатам суб'єктивних досліджень та застосування якої буде найбільш передбачуваним [79].

Таблиця 4.4 – Рейтинг об’єктивних метрик за двома критеріями

Метрика	Рейтинг за $k_b$	Рейтинг за $R_{XY}^2$	Загальний рейтинг	Місце
MS-SSIM	1	1	2	1
VQM	2	2	4	2
PSNR	3	3	6	3

Очевидна суттєва перевага метрики MS-SSIM над іншими об’єктивними методами вимірювання якості відеозображень як з погляду максимальної відповідності суб’єктивному сприйняттю, так і з погляду передбачуваності результатів вимірювання якості.

#### 4.3 Апроксимація залежності показника якості для різних класів ВП від швидкості відеопотоку

Після того, як було визначено об’єктивну метрику, яка найбільше відповідає суб’єктивним оцінкам якості, можна знайти аналітичну функцію керуючої характеристики (3.12), скориставшись даними табл. 4.1. Для цього необхідно апроксимувати експериментальні дані, що ілюструють залежність значення об’єктивного показника якості MS-SSIM для ВП  $k$ -ого класу  $Q_k^{cp}$  від швидкості бітового потоку  $R_k$ . Для апроксимації доцільно використати монотонно зростаючу логарифмічну функцію, характер якої відповідає поведінці даних, отриманих в результаті експерименту [56, 81-83]:

$$Q_k^{cp} = a \cdot \ln(R_k) + b, \quad (4.3)$$

де  $Q_k^{cp}$  – значення середнього об’єктивного показника якості відеозображення відповідно до метрики MS-SSIM для ВП певного класу  $k$ ;

$R_k$  – бітова швидкість відеопотоку;

$a$  та  $b$  – параметри апроксимації, що визначають клас ВП.

Параметри  $a$  та  $b$  підбрано таким чином, щоб мінімізувати суму квадратів різниць між апроксимованими значеннями  $Q_k^{\text{cp}}$  і експериментальними даними  $MSSSIM$  [84]:

$$a, b: \sum (Q_k^{\text{cp}} - MSSSIM)^2 \rightarrow \min.$$

Результати апроксимації наведено на рис. 4.11. Значення параметрів  $a$  та  $b$ , а також достовірності апроксимації  $r^2$  представлені в табл. 4.5.

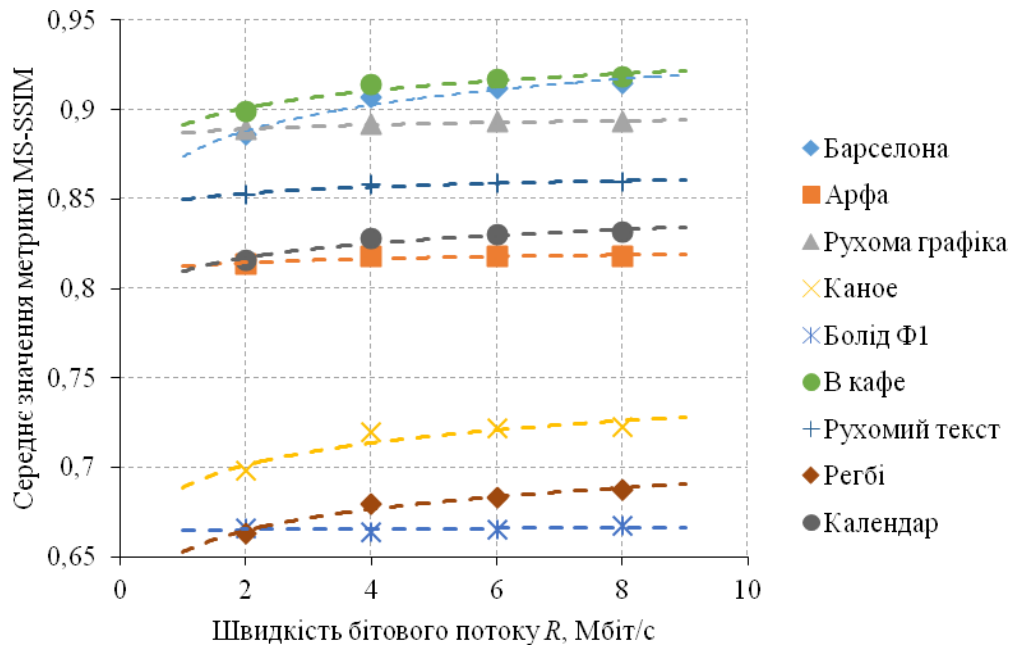


Рисунок 4.11 – Апроксимація залежності показника якості MS-SSIM для різних класів ВП від швидкості відеопотоку

Таблиця 4.5 – Параметри  $a$  та  $b$ , достовірність апроксимації  $r^2$

Клас ВП, $k$	$a$	$b$	$r^2$
1	0,0033	0,887	0,948
2	0,0052	0,8496	0,8982
3	0,0139	0,8913	0,9135
4	0,0031	0,8123	0,7147
5	0,0211	0,8736	0,9452
6	0,0006	0,6648	0,0855
7	0,018	0,6887	0,8502
8	0,0113	0,8095	0,9235
9	0,0173	0,6527	0,9632

З даних табл. 4.5 видно, що функція (4.3) з достовірністю  $r^2 > 0,7$  апроксимує експериментальні дані восьми класів ВП. Виняток становить лише ВП класу  $k=6$  (Болід Ф1), для якої  $r^2 \approx 0,1$ . Такий результат можна пояснити тим, що значення об'єктивного показника якості MS-SSIM для найменшого значення швидкості бітового потоку  $R$  за результатами експерименту перевищує наступні значення показника MS-SSIM для більш високих значень  $R$  (див. рис. 4.11, табл. 4.1).

#### 4.4 Визначення граничних показників якості для кожного класу ВП

Для кожного класу  $k$  ВП визначимо граничні показники якості  $Q_{\min,k}^{\text{cp}}$ ,  $Q_{\max,k}^{\text{cp}}$  та відповідні їм значення швидкості бітового потоку  $R_{\min,k}$ ,  $R_{\max,k}$ . Значення  $Q_{\min,k}^{\text{cp}}$  відповідає ситуації, коли спотворення трохи заважають сприйняттю зображення глядачем (оцінка «задовільно» за 5-бальною шкалою). Значення  $Q_{\max,k}^{\text{cp}}$  відповідає ситуації, коли спотворення помітні, але не заважають сприйняттю зображення (оцінка «добре» за 5-бальною шкалою).

Таблиця 4.6 – Граничні показники якості для ВП різних класів

Клас ВП, $k$	$R_{\min,k}$ , Мбіт/с	$R_{\max,k}$ , Мбіт/с	$Q_{\min,k}^{\text{cp}}$	$Q_{\max,k}^{\text{cp}}$
1	2	4	0,8893	0,8916
2	2	4	0,8532	0,8568
3	2	4	0,9009	0,9106
4	2	4	0,8144	0,8166
5	2	6	0,8882	0,9114
6	4	6	0,6656	0,6659
7	4	6	0,7136	0,721
8	4	6	0,8251	0,8297
9	4	6	0,6766	0,6837

Скориставшись результатами суб'єктивного оцінювання якості (див. рис. 3.20 та табл. 3.3), визначимо граничні значення швидкості бітового потоку

$R_{\min,k}, R_{\max,k}$  за описаними вище рекомендаціями. Результати занесемо до табл. 4.6. Підставивши знайдені граничні значення  $R_{\min,k}, R_{\max,k}$  для кожного класу ВП у формулу (4.3), отримаємо відповідні їм граничні показники якості  $Q_{\min,k}^{\text{cp}}, Q_{\max,k}^{\text{cp}}$ .

Аналіз даних табл. 4.6 дає можливість зробити такі висновки:

- мінімальне граничне значення швидкості бітового потоку для ВП класів  $k=(1\dots5)$  становитиме 2 Мбіт/с, а для ВП класів  $k=(6\dots9)$  складатиме 4 Мбіт/с. Отже, для ВП підвищеної складності, які містять дрібні деталі, ефект маскування кольорів та різні типи руху, необхідно встановлювати мінімальне граничне значення швидкості бітового потоку не нижче 4 Мбіт/с, щоб досягти задовільної якості зображення;

- максимальне граничне значення швидкості бітового потоку для ВП класів  $k=(1\dots4)$  становитиме 4 Мбіт/с, а для ВП класів  $k=(5\dots9)$  складатиме 6 Мбіт/с. Тому для ВП підвищеної складності, які містять насичений колір, дрібні деталі, ефект маскування кольорів та різні типи руху, необхідно встановлювати максимальне граничне значення швидкості бітового потоку не нижче 6 Мбіт/с, щоб досягти хорошої якості зображення.

#### **4.5 Визначення функції керування транскодером за результатами експериментальних досліджень**

Знайдемо обернену функцію до керуючої характеристики (4.3):

$$R_k = g(Q_k^{\text{cp}}).$$

Для цього виразимо швидкість бітового потоку  $R_k$  через показник якості

$Q_k^{\text{cp}}$ :

$$a \cdot \ln(R_k) = Q_k^{\text{cp}} - b \Rightarrow \ln(R_k) = \frac{Q_k^{\text{cp}} - b}{a}.$$

Отримаємо, що

$$R_k = \exp\left(\frac{Q_k^{\text{cp}} - b}{a}\right). \quad (4.4)$$

Підставимо формулу (4.4) у вираз для функції керування (3.18):

$$q_{\text{тр},k} = q_{o,k} \cdot c \cdot \left( \frac{\exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)}{\exp\left(\frac{Q_{o,k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)} - d \right)^{-1}. \quad (4.5)$$

Введемо позначення:

$$u = \frac{\exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)}{\exp\left(\frac{Q_{o,k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)} \quad (4.6)$$

та спростимо вираз (4.5). Отримаємо, що

$$\begin{aligned} u &= \frac{\exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)}{\exp\left(\frac{Q_{o,k}^{\text{сп}} - b}{a}\right)} = \exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - b}{a}\right) \cdot \exp^{-1}\left(\frac{Q_{o,k}^{\text{сп}} - b}{a}\right) = \exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - b}{a} - \frac{Q_{o,k}^{\text{сп}} - b}{a}\right) = \\ &= \exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - Q_{o,k}^{\text{сп}}}{a}\right). \end{aligned}$$

Підставимо результат у формулу (4.5) та отримаємо [54, 75]:

$$q_{\text{тр},k} = q_{o,k} \cdot c \cdot \left( \exp\left(\frac{Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - Q_{o,k}^{\text{сп}}}{a}\right) - d \right)^{-1}.$$

Каскадний транскодер зі зворотним зв'язком функціонує у двох режимах:

– підвищення якості відеоконтенту, для якого справедливе виконання умови (3.14);

– пониження якості відеоконтенту, коли виконується умова (3.15).

*Режим підвищення якості відеоконтенту.* Взявши до уваги, що у випадку підвищення якості  $q_{o,k} = q_{\text{тр},k} \cdot m_k$ , та ввівши позначення  $\Delta Q_k^{\text{сп}} = Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}} - Q_{o,k}^{\text{сп}}$ , отримаємо вираз для функції керування транскодером:

$$m_k = \frac{1}{c} \left( \exp \left( \frac{\Delta Q_k^{\text{cp}}}{a} \right) - d \right), \quad (4.7)$$

де  $m_k$  - множник, який керує зміною бітової швидкості для відеопослідовності  $k$ -го класу в залежності від зміни якості зображення  $\Delta Q_k^{\text{cp}}$  цієї відеопослідовності та приймає значення  $m > 1$ ;

$\Delta Q_k^{\text{cp}}$  - різниця між показниками якості транскодованої та початкової відеопослідовностей  $k$ -го класу, яка у випадку підвищення якості відеоконтенту буде знаходитися в межах  $\Delta Q_k^{\text{cp}} \in (0;1]$ .

*Режим пониження якості відеоконтенту.* Взнявши до уваги, що у випадку пониження якості  $q_{\text{тр},k} = q_{\text{о},k} \cdot m_k$ , та ввівши позначення  $\Delta Q_k^{\text{cp}} = Q_{\text{тр},k}^{\text{cp}} - Q_{\text{о},k}^{\text{cp}}$ , вираз для функції керування транскодером матиме такий вигляд:

$$m_k = \frac{c}{\exp \left( \frac{\Delta Q_k^{\text{cp}}}{a} \right) - d}, \quad (4.7a)$$

де множник  $m_k$  також приймає значення  $m > 1$ , а  $\Delta Q_k^{\text{cp}}$  у випадку пониження якості відеоконтенту буде знаходитися в межах  $\Delta Q_k^{\text{cp}} \in [-1;0)$ .

Проаналізуємо поведінку функцій (4.7) та (4.7a) для різних типів кадрів. На рис. 4.12 - 4.14 наведено графіки функцій керування транскодером для I-, P- та B-кадрів під час транскодування ВП різних класів у режимі підвищення якості відеоконтенту. Відповідно до характеру цих залежностей, чим більше позитивна різниця між якістю транскодованого та початкового відеоконтенту  $\Delta Q_k^{\text{cp}}$ , тим більше відношення між швидкостями бітового потоку транскодованої  $R_{\text{тр}}$  та початкової  $R_{\text{о}}$  відеопослідовностей (див. рис. 3.21), що згідно з формулами (3.11a) та (3.12) призводить до зростання множника  $m_k$ , який керує зміною бітової швидкості для ВП  $k$ -го класу.

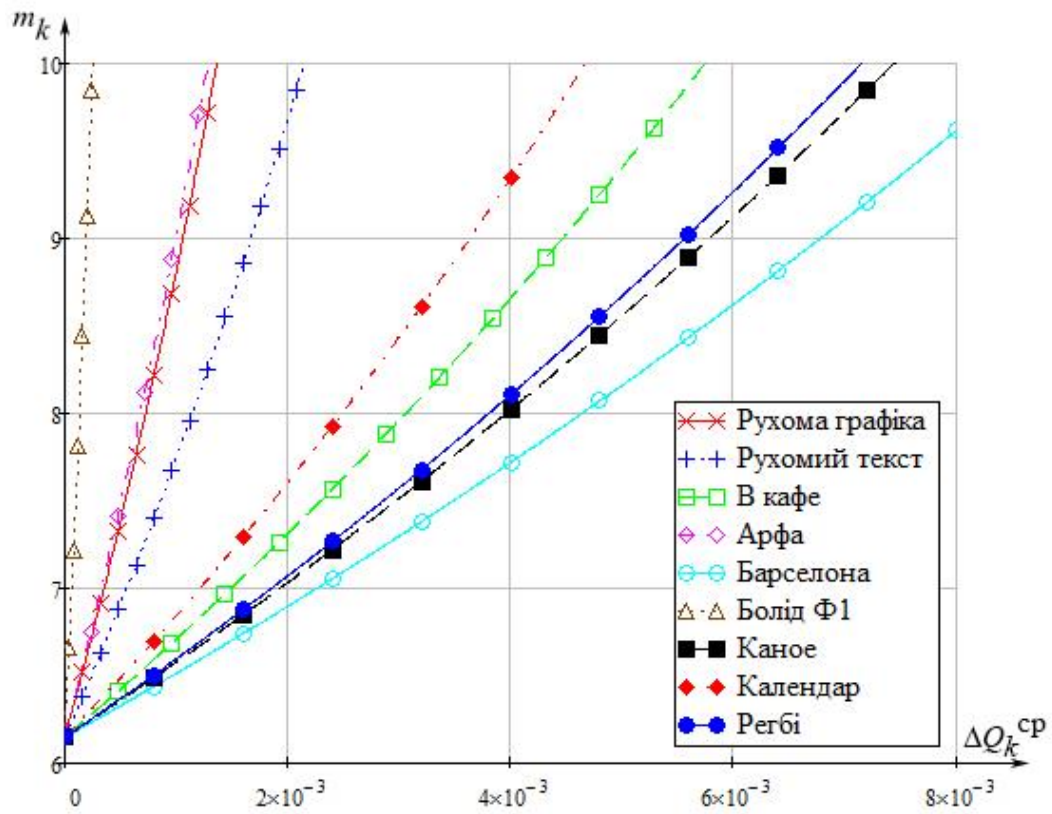


Рисунок 4.12 – Графік функції керування транскодером для I-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі підвищення якості відеоконтенту

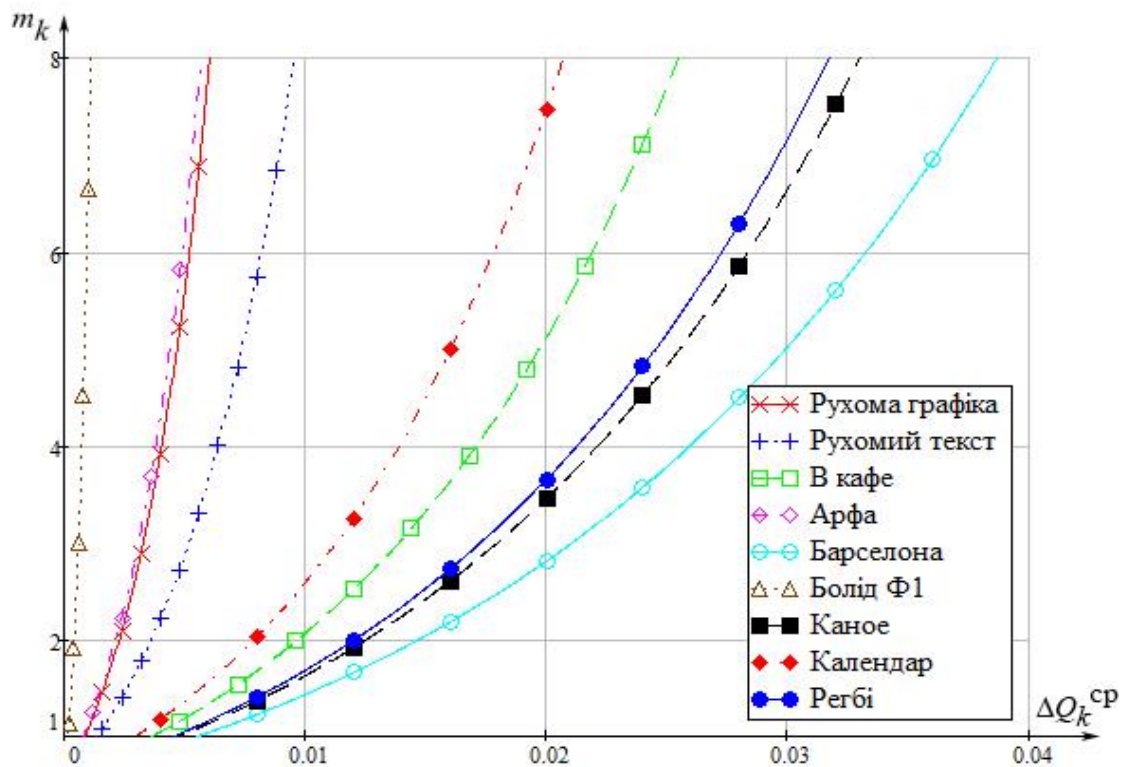


Рисунок 4.13 – Графік функції керування транскодером для P-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі підвищення якості відеоконтенту

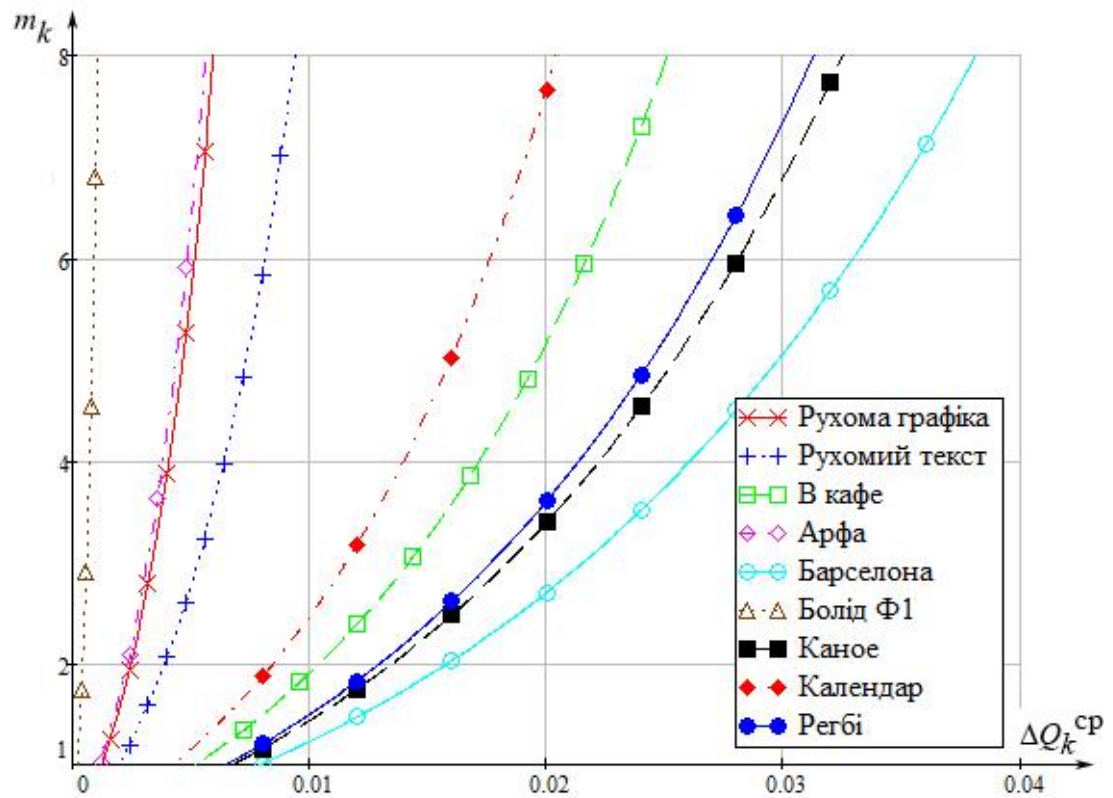


Рисунок 4.14 – Графік функції керування транскодером для V-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі підвищення якості відеоконтенту

Порівнюючи рис. 4.12 - 4.14, можна ствержувати, що зростання значення множника  $m_k$  в залежності від зміни якості  $\Delta Q_k^{cp}$  відбувається значно швидше у випадку транскодування I-кадрів ВП, тоді як у випадку P- та V-кадрів це зростання відбувається значно повільніше. Дійсно, швидкість бітового потоку I-кадрів набагато вища від середньої швидкості бітового потоку ВП, тому значення глобального коефіцієнта квантування  $q_{tr}$  I-кадрів має бути суттєво нижчим, ніж початкове значення  $q_0$ .

На рис. 4.15 - 4.17 наведено графіки функцій керування транскодером для I-, P- та V-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі пониження якості відеоконтенту. Відповідно до характеру цих залежностей, чим більше негативна різниця між якістю транскодованого та початкового відеоконтенту  $\Delta Q_k^{cp}$ , тим менше відношення між швидкостями бітового потоку транскодованої  $R_{tr}$  та початкової  $R_0$  відеопослідовностей (див. рис. 3.21), що згідно з формулами (3.11)

та (3.12) також призводить до зростання множника  $m_k$ , який керує зміною бітової швидкості для ВП  $k$ -го класу.

Аналогічно можна стверджувати, що в режимі пониження якості відеоконтенту зростання значення множника  $m_k$  відбувається також швидше для І-кадрів ВП, ніж для Р- та В-кадрів, тому значення глобального коефіцієнта квантування  $q_{тр}$  І-кадрів у такому випадку має бути суттєво вищим, ніж початкове значення  $q_0$ .

Аналізуючи графіки залежностей (4.7) та (4.7а), можна спостерігати тенденцію, за якої швидше зростання множника  $m_k$  мають ті ВП, які отримали кращі середні оцінки якості за результатами експертного оцінювання (див. табл. 3.3). Це означає, що такі ВП потребують за однакової зміни якості  $\Delta Q_k^{cp}$  суттєво нижчих значень глобального коефіцієнта квантування  $q_{тр}$  у режимі підвищення якості або суттєво вищих значень  $q_{тр}$  у режимі пониження якості у порівнянні з початковим значенням  $q_0$ .

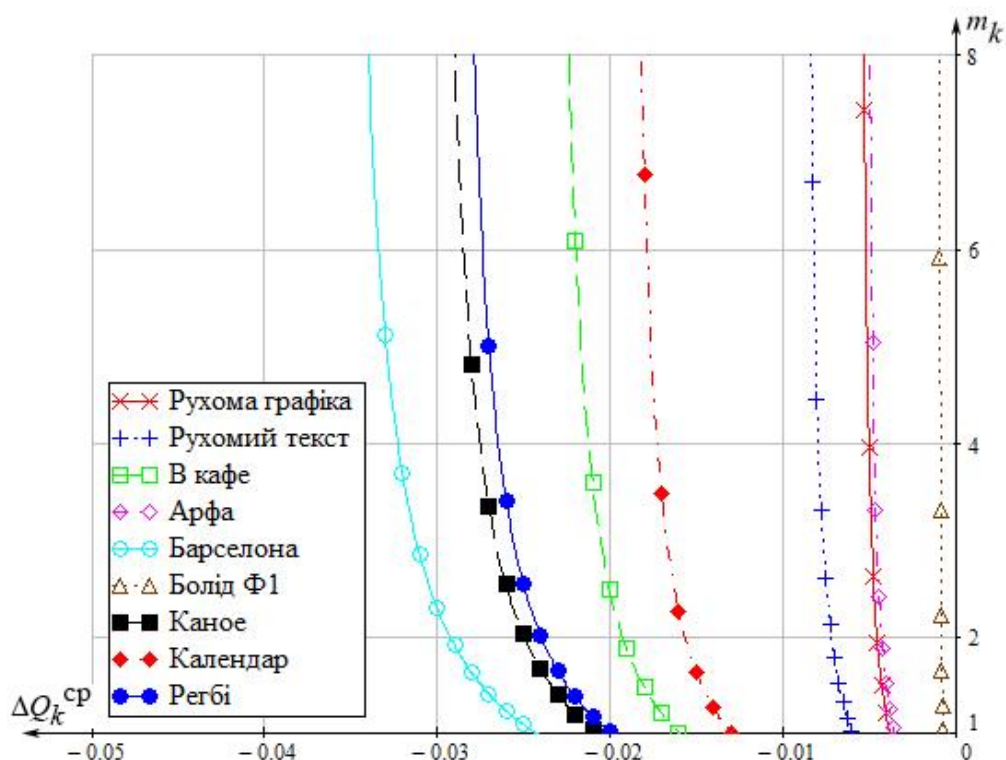


Рисунок 4.15 – Графік функції керування транскодером для І-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі пониження якості відеоконтенту

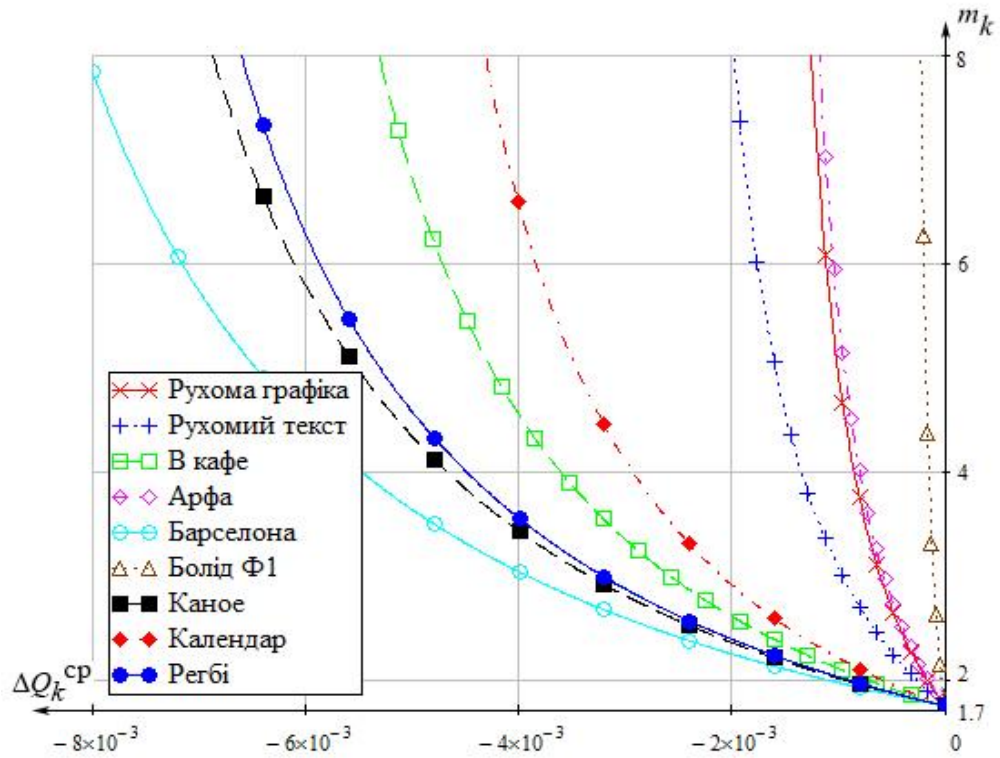


Рисунок 4.16 – Графік функції керування транскодером для P-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі пониження якості відеоконтенту

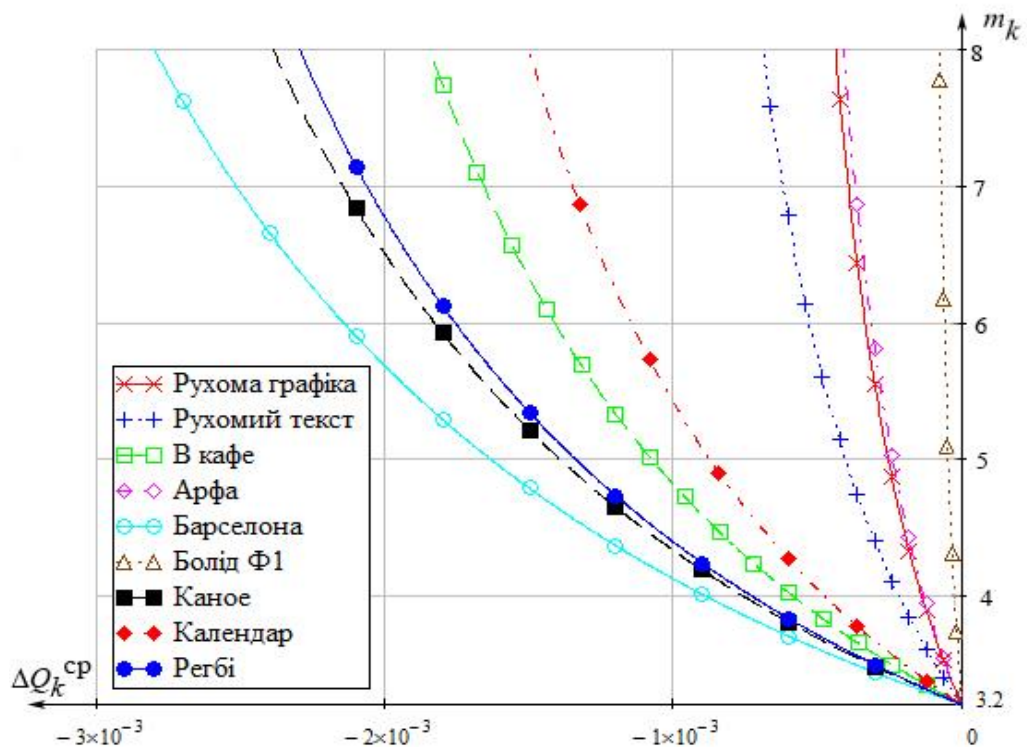


Рисунок 4.17 – Графік функції керування транскодером для B-кадрів відеопослідовностей різних класів у режимі пониження якості відеоконтенту

Об'єднавши функції (4.7) та (4.7а), отримаємо систему рівнянь, що описує математичну модель відеотранскодера зі зворотним зв'язком, яка адаптивно змінює глобальний коефіцієнт квантування відеопотоку залежно від результатів оцінювання відповідності запропонованому критерію якості зображення відеоконтенту різних класів:

$$m_k = \begin{cases} \frac{1}{c} \left( \exp\left(\frac{\Delta Q_k^{\text{cp}}}{a}\right) - d \right) & \text{для } \Delta Q_k^{\text{cp}} \in (0; 1], \\ c \left( \exp\left(\frac{\Delta Q_k^{\text{cp}}}{a}\right) - d \right)^{-1} & \text{для } \Delta Q_k^{\text{cp}} \in [-1; 0), \end{cases} \quad (4.8)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що характеризує клас  $k$  ВП (див. табл. 4.6);

$c$  і  $d$  – коефіцієнти, що описують типи кадрів, які обробляє КТЗЗ (див. табл. 3.1).

#### 4.6 Швидкодія каскадного транскодера зі зворотним зв'язком

Під швидкодією ( $E$ ) КТЗЗ будемо розуміти відношення часу  $T_{\text{інж}}$ , який потрібний для прийняття рішення та виконання послідовності дій із встановлення необхідної швидкості бітового потоку інженерним персоналом апаратно-студійного блоку (АСБ), до часу  $T_{\text{КТЗЗ}}$ , необхідного для наскрізного транскодування за допомогою КТЗЗ кадрів ВП заданого класу:

$$E = \frac{T_{\text{інж}}}{T_{\text{КТЗЗ}}}. \quad (4.9)$$

Оскільки КТЗЗ функціонально складається з транскодера без зворотного зв'язку, до якого додано операції прямого та оберненого ДКП, а також із блоку, що здійснює обчислення якості зображення кадрів відеопослідовності, то час  $T_{\text{КТЗЗ}}$  буде сумою трьох складових:

$$T_{\text{КТЗЗ}} = T_{\text{тбз}} + T_{\text{дкп}} + T_{\text{оя}},$$

де  $T_{\text{тбз}}$  – середній час роботи транскодера без зворотного зв'язку;

$T_{\text{ДКП}}$  – середній час, необхідний для виконання операцій прямого та оберненого ДКП над послідовністю відеокадрів;

$T_{\text{оя}}$  – середній час, необхідний для обчислення якості зображення послідовності відеокадрів.

Спочатку з'ясуємо необхідну кількість кадрів, яку має обробити КТЗЗ, щоб прийняти рішення про зміну швидкості бітового потоку відеопослідовності. На рис. 4.18 виділено фрагмент залежності значень об'єктивної метрики MS-SSIM для кадрів однієї з тестових ВП, що відповідає суттєвій зміні вмісту цієї відеопослідовності (загальний план боліду змінюється на швидкий рух камери вздовж узбіччя гоночної траси). Ця ситуація ілюструє момент, що може відповідати зміні класу ВП, а отже, призвести до необхідності зміни швидкості бітового потоку відеоконтенту, який передають засобами АСБ. Як видно з рис. 4.18, суттєву різницю між значеннями об'єктивної метрики MS-SSIM спостерігають після обробки приблизно 40-45 кадрів ВП.

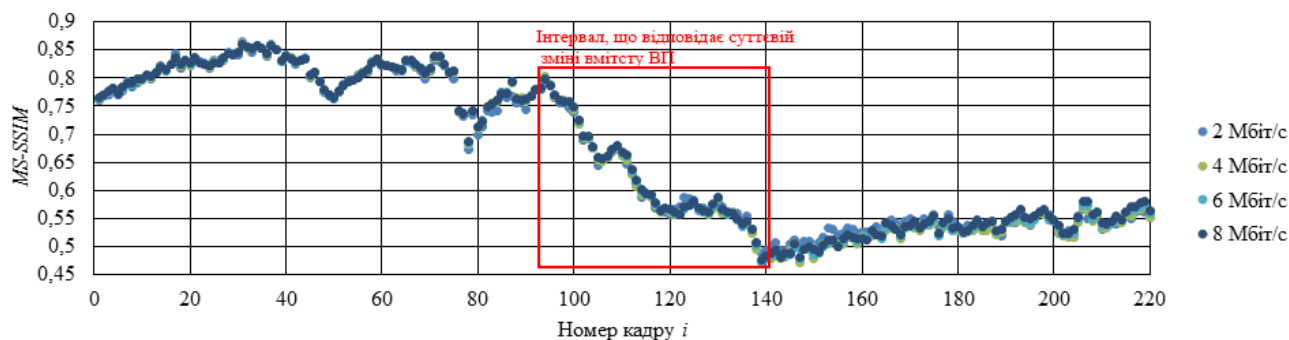


Рисунок 4.18 - Суттєва різниця між значеннями об'єктивної метрики MS-SSIM, що відповідає суттєвій зміні вмісту ВП Болід Ф1

Таблиця 4.7 – Час обробки одного відеокадру транскодером без зворотного зв'язку, реалізованим на різних процесорах

Процесор	CPU Athlon64, 2 ГГц	CPU Pentium 4 НТ, 2,8 ГГц	DSP C6437, 600 МГц	Середній час $t_{\text{к\_сер}}$ , мкс
$t_{\text{к}}$ , мкс	8269	7100,8	8986,2	8118,7

У роботі [64] наведено реалізацію відеотранскодера без зворотного зв'язку на цифровому сигнальному процесорі (DSP) та різних процесорах загального призначення (CPU). Час обробки відеокадру  $t_k$  приведено до однієї тактової частоти 2 ГГц (табл. 4.7), а в останньому стовпчику показано середній час обробки одного відеокадру за дослідженими процесорами.

Таким чином, на обробку транскодером без зворотного зв'язку 40 кадрів ВП знадобиться у середньому  $T_{\text{тбз}} = 324,75$  мс.

Відомо [85], що кількість операцій для виконання двовимірного ДКП за швидким алгоритмом буде пропорційне  $NM \log_2(NM)$ , де  $N$  та  $M$  - це кількість елементів зображення по горизонталі та вертикалі відповідно. Для телевізійного кадру стандартної якості (SDTV) з роздільною здатністю 768x576 пікселів ця величина буде приблизно рівною  $8 \cdot 10^6$  операцій. Якщо обчислення виконувати на процесорі з тактовою частотою 2 ГГц, то час обчислення ДКП для кадру зображення складе приблизно 4 мс. Враховуючи, що транскодер здійснює операції прямого та оберненого ДКП, сумарний час на виконання цих операцій складе 8 мс. Тоді для обробки 40 кадрів ВП знадобиться приблизно  $T_{\text{дкп}} = 320$  мс.

Час, необхідний для обчислення якості зображення послідовності відеокадрів  $T_{\text{оя}}$ , можна визначити експериментально. В процесі вимірювання якості зображення за допомогою об'єктивної метрики MS-SSIM у програмі MSU Video Quality Measurement Tool було встановлено, що обробка 220 кадрів тестових ВП на процесорі з тактовою частотою 1,6 ГГц займає в середньому 8 с. Тоді час, затрачений на обробку 1 кадру тестової ВП, складатиме 3,64 мс. Якщо привести час обробки до тактової частоти 2 ГГц, то тримаємо значення 2,91 мс. Тоді час, необхідний для обчислення якості зображення послідовності з 40 кадрів, становитиме 116,4 мс. Збільшимо цей час на 10% (враховуючи операції класифікації та обчислення бажаного показника якості  $Q_{\text{тр},k}^{\text{сп}}$  і необхідного для цього глобального коефіцієнта квантування  $q_{\text{тр}}$ ), тоді  $T_{\text{оя}}$  становитиме 140,84 мс, а середній час  $T_{\text{ктзз}}$ , необхідний для наскрізного транскодування 40 кадрів ВП заданого класу, відповідно складатиме 785,6 мс або приблизно 0,8 с.

Оцінимо час, потрібний для прийняття рішення та виконання послідовності дій із встановлення необхідної швидкості бітового потоку інженерним персоналом АСБ. Під час трансляції телевізійної програми її зміст може суттєво змінюватись. Це може призвести до необхідності коригування швидкості бітового потоку для підвищення (чи пониження) якості сформованого для передавання відеозображення. Для цього інженер АСБ повинен правильно оцінити ступінь погіршення (чи покращення) якості зображення в залежності від його вмісту на екрані контрольного відеомонітора та обрати, яке значення швидкості бітового потоку треба ввести в налаштування відеокодера MPEG-2 для досягнення поставленої мети. Така оцінка і вибір відповідної бітової швидкості утворюють складну реакцію.

Час складної реакції інженера - з моменту появи на екрані відеомонітора відеокадрів з пониженою (чи підвищеною) якістю зображення до відповіді на неї послідовністю дій, які дадуть можливість змінити налаштування відеокодера, - складає 0,8 с, а у випадку нездоров'я, втомі після багатогодинної роботи - 1 с і більше [86].

Послідовність дій інженера АСБ зі зміни налаштувань відеокодера складається з відкриття робочого вікна відповідного програмного забезпечення, пошуку потрібного параметра у робочому вікні, вибору (чи введення) необхідного цифрового значення швидкості бітового потоку та підтвердження зміни шляхом натискання відповідної кнопки (рис. 4.19). Припускаючи, що досвідченому працівнику на виконання кожної операції потрібно в середньому 1 с, всього для прийняття рішення та виконання послідовності дій із встановлення необхідної швидкості бітового потоку інженерним персоналом АСБ знадобиться приблизно  $T_{\text{інж}} = 4,8$  с.

Таким чином, швидкодія КТЗЗ відповідно до формули (4.9) становитиме:

$$E = \frac{4,8}{0,8} = 6.$$

Тобто час, необхідний для наскрізного транскодування кадрів ВП за допомогою КТЗЗ, в 6 разів менше часу, потрібного для прийняття рішення та виконання послідовності дій із встановлення необхідної швидкості бітового потоку інженерним персоналом АСБ уручну.

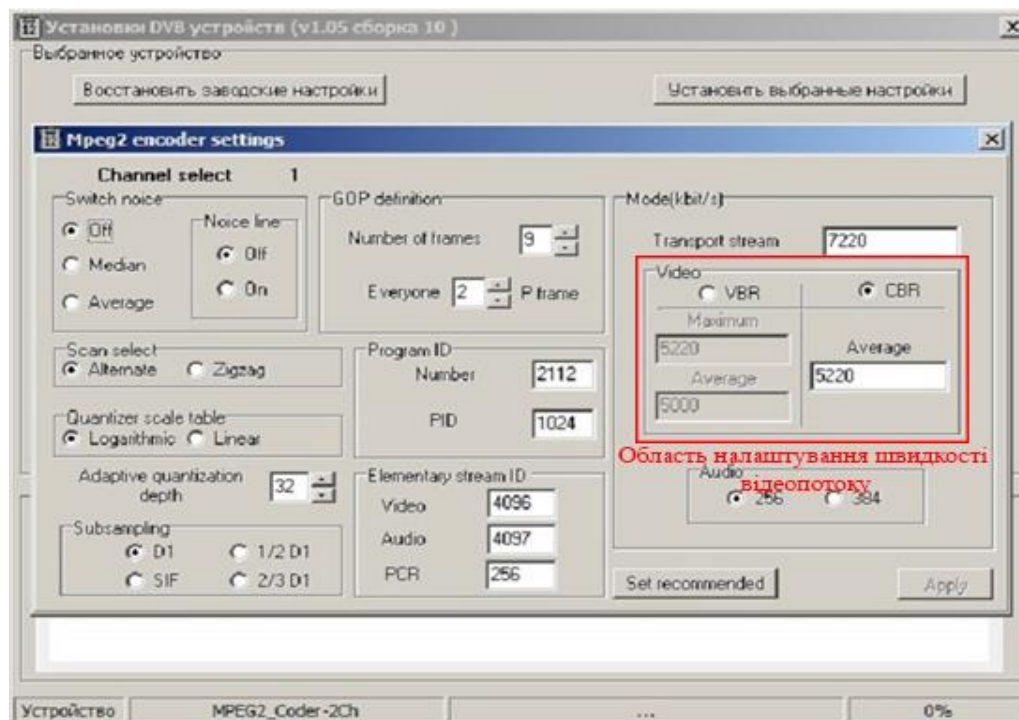


Рисунок 4.19 – Приклад робочого вікна налаштування параметрів відеокодера MPEG-2

#### 4.7 Перспективи впровадження запропонованої системи

Для з'ясування перспектив впровадження системи керування якістю відеоконтенту, що функціонує за критерієм якості підготовленого до передавання відеозображення, проаналізовано значення швидкості бітового відеопотоку, з якою здійснюють мовлення більшість популярних телеканалів. Для дослідження обрано систему супутникового цифрового телевізійного мовлення (DVB-S), оскільки вона дозволяє отримати доступ до параметрів транспортного потоку за допомогою комп'ютерної DVB-S/S2 карти SkyStar USB HD та спеціального програмного забезпечення. Здійснено запис відкритих телевізійних програм з супутників Astra 4A & SES 5 (4,9° E) та Amos 2/3 (4° W), через які ведуть

мовлення більшість українських телеканалів (переважно за системою стиснення MPEG-2, в окремих випадках – за системою H.264/AVC). Параметри транспондерів та назви провайдерів супутникової служби, які здійснюють передавання цифрових мультиплексованих відеопотоків, наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Параметри транспондерів, через які ведуть мовлення деякі українські телеканали

№ п/п	Провайдер супутникової служби	Частота транспондера, МГц	Поляризація	Символьна швидкість, ксимв/с	FEC	Модуляція сигналу
1.	SES Ukraine (Astra 4A & SES 5)	11766	Н	27500	3/4	QPSK
2.	Spacocom (Amos 2/3)	10722	Н	27500	3/4	QPSK
3.	Spacocom (Amos 2/3)	10759	Н	30000	3/4	QPSK

Таблиця 4.9 – Швидкості бітового потоку, з якою здійснюють супутникове мовлення деякі телеканали

№ п/п	Провайдер супутникової служби	Телевізійний канал	Швидкість бітового потоку, Мбіт/с
1.	SES Ukraine (Astra 4A & SES 5), 11766 Н	ТЕТ	3,62
		2+2	4,4
		1+1 міжнародний	зашифрований
		Глас	3,44
		Еспресо ТВ	2,94
		Рада	2,87
		Ера	2,12

Продовження табл. 4.9

№ п/п	Провайдер супутникової служби	Телевізійний канал	Швидкість бітового потоку, Мбіт/с
2.	Spacocom (Amos 2/3), 10722 Н	Уніан	3,47
		ОТВ	3,75
		1+1	5,3
		Київ	3,29
		Плюс Плюс	3,47
		Тоніс	3,75
		UBR	3,66
		3S	3,75
		Соціальна країна	2,22
3.	Spacocom (Amos 2/3), 10759 Н	СТБ	2,36
		М1	3,37
		My Lady TV	1,9
		Новий канал	2,68
		ICTV	2,88
		М2 Естрада	2,1
		Телеканал 24	3,5
		Перший діловий	2,6
		QTV	2,28
		Культура	2,69
		UA Перший	зашифрований
		Перший Ukraine	1,65

В табл. 4.9 наведено перелік телевізійних каналів, трансляцію яких здійснює відповідний провайдер супутникової служби, та значення швидкості бітового потоку, з якою здійснює мовлення відповідний телеканал.

Аналіз табл. 4.9 дозволяє зробити такі висновки:

- провайдер супутникової служби Spacenet (Amos 2/3), який здійснює передавання на транспондері 10722 Н, забезпечує мовлення телеканалів з бітовою швидкістю в межах 3,5 - 4 Мбіт/с (за виключенням каналу «Соціальна країна»), що в цілому дозволить уникнути погіршення якості відеозображення навіть у випадку трансляції спортивних змагань чи сюжетів, які містять швидкий рух, панорамування та широкий діапазон переданих кольорів;

- провайдер супутникової служби SES Ukraine (Astra 4A & SES 5) забезпечує мовлення частини телеканалів з бітовою швидкістю в межах 3,5 - 4 Мбіт/с (ТЕТ, 2+2, Глас), що дозволить уникнути погіршення якості відеозображення навіть у випадку трансляції спортивних змагань чи сюжетів, які містять швидкий рух, панорамування та широкий діапазон переданих кольорів, проте іншу частину телеканалів (Еспресо ТВ, Рада, Ера) передають з такою швидкістю бітового потоку (2 - 3 Мбіт/с), що може призвести до значного погіршення якості зображення у випадку трансляції динамічних відеосюжетів чи сюжетів, які містять широкий діапазон кольорів;

- провайдер супутникової служби Spacenet (Amos 2/3), який здійснює передавання на транспондері 10759 Н, забезпечує мовлення телеканалів з бітовою швидкістю лише в межах 1,65 - 3,5 Мбіт/с. Такої бітової швидкості, як показали дослідження, не достатньо, щоб уникнути погіршення якості відеозображення під час трансляції спортивних змагань, динамічних сюжетів чи сюжетів, які містять широкий діапазон кольорів.

Таким чином, застосування системи керування якістю відеоконтенту, в якій реалізовано динамічне регулювання швидкості цифрового відеопотоку, може призвести до покращення якості зображення під час трансляцій спортивних змагань чи сюжетів, що містять швидкий рух, панорамування та широкий діапазон переданих кольорів.

## Висновки до розділу

1. Експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано, що об'єктивною метрикою, яка найбільше відповідає суб'єктивним оцінкам якості, є метрика MS-SSIM з коефіцієнтом відповідності  $k_b = 0,88$  та коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона  $R_{xy}^2 = 0,91087$ .

2. Отримано логарифмічну функцію, яка з достовірністю  $r^2 > 0,7$  апроксимує експериментальні дані залежності об'єктивного показника якості MS-SSIM від величини швидкості бітового потоку для різних класів ВП.

3. Запропоновано математичну модель відеотранскодера зі зворотним зв'язком, яка відрізняється адаптивною зміною глобального коефіцієнта квантування відеопотоку залежно від результатів оцінювання відповідності запропонованому критерію якості. В основу моделі покладено отримані нові співвідношення для розрахунку параметрів відеопотоку на вході та виході системи керування якістю відеоконтенту.

4. Розроблені структура та алгоритм роботи транскодера зі зворотним зв'язком дозволяють реалізувати його із застосуванням стандартних апаратних засобів формування первинних відеопотоків у системах цифрового телебачення з часом оброблення кадру, що не перевищує 20 мс.

5. Швидкодія запропонованої системи керування якістю відеоконтенту в 6 разів вище порівняно із системою, в якій керування якістю відеоконтенту здійснює кваліфікований інженерний персонал АСБ.

6. Експериментально встановлено, що швидкість бітового потоку 2 Мбіт/с, яку використовують провайдери для передавання вітчизняних телеканалів через супутники (переважно за системою стиснення MPEG-2, в окремих випадках – за системою H.264/AVC), є недостатньою для якісного передавання відеоконтенту, який містить динамічні сцени, зокрема, спортивних змагань. Рекомендовано для забезпечення високої суб'єктивної якості зображення здійснювати передавання відеоконтенту зі значеннями бітового потоку не менше 4 Мбіт/с.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу, яка полягає в удосконаленні методів автоматичного керування відеопотоком у системах цифрового телебачення в залежності від вмісту та якості відеозображення телевізійної програми, що формується для подальшого передавання до споживача.

Отримано такі наукові та практичні результати:

1. Розроблені рекомендації для методики оцінювання експертами якості відеозображень суб'єктивними методами ґрунтуються на тому, що найбільш суттєвим спотворенням, обумовленим особливостями стиснення цифрового телевізійного сигналу за відповідним алгоритмом, яке впливає на якість відеозображення, є спотворення типу «блокінг-ефект» з коефіцієнтом вагомості  $K'_{B_i} = 0,3$ .

2. Запропонований критерій оцінювання якості відеозображень у системах цифрового телебачення ґрунтується на максимізації кореляції об'єктивних метрик та суб'єктивних оцінок якості, що дозволяє побудувати систему автоматичного керування якістю відеоконтенту на етапах підготовки та передавання телепрограм. Експериментально встановлено, що об'єктивною метрикою, яка має максимальну кореляцію із суб'єктивними оцінками якості, є метрика MS-SSIM з коефіцієнтом відповідності  $k_b = 0,88$  та коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона  $R^2_{XY} = 0,9109$ .

3. Розроблений метод керування відеопотоком оснований на застосуванні у технологічному процесі виробництва телепрограм системи автоматичного керування якістю відеоконтенту, в якій використано відеотранскодер зі зворотним зв'язком, що дозволяє змінювати бітову швидкість відеопотоку відповідно до вимірної якості сформованого відеозображення.

4. Розроблений метод керування відеопотоком дозволяє поліпшити якість підготовленого для передавання відеозображення, що містить динамічні сцени, шляхом запобігання появи артефактів, помітних на екрані за стандартних умов

відтворення зображення, за рахунок узгодження швидкості бітового потоку та помітності спотворень на зображенні.

5. Запропонована математична модель відеотранскодера зі зворотним зв'язком відрізняється від відомих моделей транскодерів адаптивною зміною глобального коефіцієнта квантування відеопотоку залежно від результатів оцінювання відповідності запропонованому критерію якості. В основу моделі покладено отримані нові співвідношення для розрахунку параметрів відеопотоку на вході та виході системи керування якістю відеоконтенту.

6. Розроблені структура та алгоритм роботи транскодера зі зворотним зв'язком дозволяють реалізувати його із застосуванням стандартних апаратних засобів формування первинних відеопотоків у системах цифрового телебачення з часом оброблення кадру, що не перевищує 20 мс.

7. Запропонована система автоматичного керування якістю відеоконтенту в 6 разів перевищує швидкодію системи, в якій керування якістю відеоконтенту здійснює кваліфікований інженерний персонал телестудії.

8. У запропонованій класифікації відеозображень за найбільш суттєвими ознаками (наявність руху, насиченість кольорів, зміна масштабу, панорамування, штучна природа зображення, текст, зелений фон, їх комбінація) виділено 9 класів відеозображень ( $k = 9$ ), які має обробляти відеотранскодер зі зворотним зв'язком, що дозволяє визначати діапазон та динаміку зміни робочих параметрів системи стиснення для забезпечення заданої якості відтворюваного зображення.

9. Для забезпечення задовільної суб'єктивної якості зображення, яке сприймають глядачі під час трансляції подій, що містять динамічні сцени, зокрема, спортивних змагань, рекомендовано здійснювати передавання відеоконтенту на швидкості бітового потоку не менше 4 Мбіт/с.

Таким чином, розроблені метод автоматичного керування відеопотоком та система керування якістю відеоконтенту на етапах підготовки і передавання телепрограм можуть бути використані у технологічному процесі виробництва

телевізійного контенту телеканалів та студій для поліпшення якості відеозображення, сформованого для передавання глядачеві.

Подальші дослідження даної наукової проблеми доцільно здійснювати за такими напрямками: аналіз впливу різних методів кодування відеоданих на роботу транскодера зі зворотним зв'язком; розроблення методів та алгоритмів керування відеопотоком за критерієм якості відеозображення для систем високої чіткості; аналіз впливу якості відеоконтенту та пов'язаної з нею швидкості бітового потоку для динамічного перерозподілу пропускної здатності каналу зв'язку між окремими програмними потоками мультиплексу цифрового телебачення.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в Науково-дослідному інституті Прикладної електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, у технологічному процесі виробництва телевізійного контенту телеканалу Еспресо (ТОВ «Голдберрі») та передано для використання у навчальному процесі згідно договору № М/82-2009 від 10 березня 2009 р. Результати роботи також можуть бути використані у КПІ ім. Ігоря Сікорського під час підготовки фахівців за спеціальністю «Електроніка», спеціалізація «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Джакония В.Е. Телевидение: [учебник для вузов] / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин и др.; Под ред. В.Е. Джаконии. 4-с изд., стереотип. – М.: Горячая линия - Телеком. 2007. – 616 с.
2. Смирнов А.В. Основы цифрового телевидения / А.В. Смирнов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 224с.
3. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники: [учебник для вузов] / Р.Е. Быков. – М. : Горячая Линия-Телеком, 2006. – 399 с.
4. Карякин В.Л. Цифровое телевидение / В.Л. Карякин. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 272 с.
5. Мамчев Г.В. Основы радиосвязи и телевидения. Учебное пособие для вузов / Г.В. Мамчев. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 416 с.
6. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 - стандарты нового поколения / Я. Ричардсон. – М.: Техносфера, 2005. – 368 с.
7. ITU-R Recommendation BT.601-7. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios (03/2011) [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.601-7-201103-I!!PDF-E.pdf)
8. Al Bovik. Handbook of image and video processing, Second Edition, Elsevier Academic Press, 2005. – 1384 с.
9. Feng Xiao. DCT-based Video Quality Evaluation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації:  
[http://compression.ru/video/quality\\_measure/vqm.pdf](http://compression.ru/video/quality_measure/vqm.pdf)
10. ITU-R Recommendation BT.500-13. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures (09/09) [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-12-200909-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-12-200909-S!!PDF-E.pdf)
11. Li Z., Gao W., et al. Adaptive Rate Control with HRD Consideration, ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q.6 Document JVT-H014, May 2003.

12. Saw Y.-S. Rate-Quality Optimized Video Coding. Kluwer Academic Publishers, November 1998.

13. Пескин А.Е. Мировое вещательное телевидение. Стандарты и системы. Справочник / А.Е. Пескин, В.Ф. Труфанов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2004. – 308 с.

14. Зубарев Ю.Б. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы / Ю.Б. Зубарев, М.И. Кривошеев, И.Н. Красносельский. – М.: НИИР, 2001. – 568 с.

15. Севальнев Л.А. Передача цифровых телевизионных программ с информационным сжатием данных по спутниковым каналам связи / Л.А. Севальнев // Теле-Спутник. – 1997. – №7(21).

16. Быков Р.Е. Цифровое преобразование изображений: [учеб. пособие для вузов] / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцветов; под. ред. Р.Е. Быкова. – М.: Горячая линия - Телеом, 2003. – 228 с.

17. Локшин Б.А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю / Б.А. Локшин. – М.: Компания Сайрус Системс, 2001. – 448 с.

18. Олифент А. Совместные научные исследования и разработки по ускорению внедрения систем наземного цифрового телевидения / А. Олифент, П. Крист // Труды Международной конференции по вещанию ИВС. – 1998. – С. 35-39.

19. Севальнев Л. А. Эфирное вещание цифровых ТВ-программ со сжатием данных // ТелеСпутник. – 1998. – № 10. – С. 241.

20. Гласман К. Цифровое наземное телевизионное вещание. ATSC – DVB – ISDB / К. Гласман // «625». – 1999. – № 4.

21. Гласман К. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 1 / К. Гласман // «625». – 1999. – № 5.

22. Гласман К. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 2. Стандарт цифрового телевидения ATSC / К. Гласман // «625». – 1999. – № 7.

23. Гласман К. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Часть 3. Стандарт цифрового наземного телевидения DVB-T / К. Гласман // «625». – 1999. – № 9.

24. ITU-R. Italy. DVB-S2: the 2nd generation standard for satellite broadband services // Doc. 6S / 75, 24 February 2005.

25. Ануфриев А. Стандарт DVB-S2 как средство развития новых сервисов на спутниковых сетях связи / А. Ануфриев // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. – 2007. – №4. – С. 24-29.

26. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.

27. ITU-R. Vice-Chairman of SG 6 and Vice-Chairman of WP 6P. Proposed modification of standard MPEG-2 «video»: updating of assignment of source colour primaries in video sequence extension // Doc. 6P / 84, Period 2000-2003.

28. ITU-R. Vice-Chairman of SG 6 and Vice-Chairman of WP 6P. Proposed modification of standard MPEG-2 «video»: Updating of the Table 6-7 «Colour primaries» in the subclause 6.3.6. «Sequence display extension» // Doc. 6A / 39, 6P / 139, Period 2000-2003.

29. ITU-R. Vice-Chairman of SG 6 and Vice-Chairman of WP 6P. Proposed modification of standard MPEG-2 «video»: updating of assignment of opto-electronics transfer characteristic of signal source in video sequence extension // Doc. 6P / 85, Period 2000-2003.

30. Кривошеев М.И. Интерактивное телевидение / М.И. Кривошеев, В.Г. Федунин. – М.: Радио и связь, 2000. – 344 с.

31. MPEG Handbook. Focal Press; 1st edition, 2001. – 395 с.

32. ITU-R. Working Party 6A. Draft new Recommendation – Use of the ITU-T Recommendation H.264 (MPEG-4 / AVC) video source-coding method to transport HDTV programme material // Doc. 6 / 225, 18 October 2005.

33. Krivosheev M. I. Summary of Current International Standards Activities in HDTV // NAB Convention, Las Vegas, April 1991.

34. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е издание, испр. / Скляр Б.; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 305 с.

35. Никитин Г.И. Сверточные коды: [учебное пособие] / Г.И. Никитин. – СПб.: ГУАП, 2001. – 80 с.

36. Основні фактори погіршення якості зображення в системах цифрового телевізійного мовлення / Абакумов В.Г., Трапезон К.О., Попович П.В. [та ін.] // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2009): міжнар. наук.-техн. конф., 5-9 жовтня 2009 р.: тези доп. – Ялта-Лівадія: 2009. – С.134-136.

37. Основні фактори погіршення якості зображення в системах цифрового телевізійного мовлення / Абакумов В.Г., Трапезон К.О., Попович П.В. [та ін.] // Вісник ДУІКТ. – 2010. – Т. 8, №2. – С.142-147.

38. Бителева А.Г. Цифровое кабельное ТВ. Часть 4. Сигнал DVB в распределительной сети. Использование альтернативных стандартов / А.Г. Бителева // Теле-Спутник. – 2008. – №1(147).

39. ISO/IEC 14496-2. Coding of audio-visual objects. Part 2: Visual, 2001. Annex L.

40. Певзнер Б.М. Качество цветных телевизионных изображений / Б.М. Певзнер. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.

41. Испытательные таблицы для измерения качества цифрового и аналогового телевизионного вещания / А.В. Дворкович, В.П. Дворкович, Д.Г. Макаров [и др.] // «625». – 1999. – № 8. – С. 36-42.

42. Методичні вказівки до виконання економіко-організаційного розділу випускних робіт бакалаврів і дипломних проєктів спеціалістів студентами інституту прикладного системного аналізу / Уклад.: В.П. Пашін, В.В. Романов, Н.В. Єгорова. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 112 с.

43. Гулин А.И. Обзор алгоритмов контроля качества подвижных изображений, используемых для цифрового телевидения / Гулин А.И., Насретдинов Р.М. // Телевидение и радиовещание. – 2009. – № 4. – С. 34-41.

44. Попович П.В. Объективные и субъективные методы оценки качества изображений в цифровом телевидении / Попович П.В., Тюпа Ю.О. // Электроника-2010: міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених: збірник статей. – К.: – 2010.

45. Факторы, влияющие на качество телевизионного изображения в системах цифрового телевизионного вещания / В.Г. Абакумов, С.Г. Антощук, П.В. Попович [и др.] // Электроника и связь. – 2010. – №3. – С. 171-177.

46. MSU Graphics & Media Lab (Video Group), MSU Quality Measurement Tool: Информация о метриках [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: [http://www.compression.ru/video/quality\\_measure/info.html](http://www.compression.ru/video/quality_measure/info.html)

47. Z. Wang. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang, A. Bovik, H.R. Sheikh, P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 13, No. 4, April 2004.

48. Z. Wang. Multi-Scale Structural Similarity for Image Quality Assessment / Z. Wang, P. Simoncelli, A. Bovik // Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 9-12, 2003.

49. Дж. Фили. Как измеряют качество видеосигнала. Новые методы оценки цифрового видео [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: [http://www.elecard.com/pdf/degree\\_project/DIVAS\\_brightness\\_analysis.pdf](http://www.elecard.com/pdf/degree_project/DIVAS_brightness_analysis.pdf)

50. Sarnoff JND Vision Model Description. White paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: <http://www.videoclarity.com/PDF/Sarnoff%20jnd-1.pdf>

51. VQEG Objective Video Quality Model Test Plan [Электронный ресурс]. – Режим доступа до інформації: [ftp://ftp.crc.ca/crc/vqeg/phase1-docs/phase1\\_obj\\_test\\_plan.pdf](ftp://ftp.crc.ca/crc/vqeg/phase1-docs/phase1_obj_test_plan.pdf)

52. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Диалект, 2004. – 992 с.

53. Абакумов В.Г. Про підходи до покращення якості відеоконтенту в системах цифрового телебачення / Абакумов В.Г., Попович П.В. // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано-

та мікроелектроніки: міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 жовтня 2014 р.: тези доп. – Чернівці: 2014. – С.48-49.

54. Абакумов В.Г. Способ улучшения качества видеоконтента по критерию качества результирующего изображения / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – №17(93). – С.74-79.

55. Rate Control in Open-Loop Video Transcoder / V.G. Abakumov, A. Kane, P.V. Porovuch [и др.] // Электроника и связь. – 2010. – Т. 2, №6. – С. 172-177.

56. Попович П.В. О подходе к управлению скоростью транспортного потока по критерию качества видеоизображений / П.В. Попович // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №4. – С. 185-189.

57. Lastein L. Transrating of MPEG-2 streams - various applications and different techniques / Lastein L., Reul B. [Електронний ресурс] // Broadcast Asia 2002, June 2002. – Режим доступу до інформації:

<http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/IBCBarconetTransratingEfficiency.pdf>

58. Xin J. Digital Video Transcoding / Xin J., Lin C.-W., Sun M.-T. // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, № 1. – pp. 84-97.

59. Assuncao P.A. A frequency-domain video transcoder for dynamic bit-rate reduction of MPEG-2 bit streams / Assuncao P.A., Ghanbari M. // Circuits and Systems for Video Technology: IEEE Transactions. – 1998. – Vol. 8, № 8. – pp. 953-967.

60. Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video (MPEG-2 video) [Електронний ресурс] // Int. Standards Org./Int. Electrotech. Comm. (ISO/IEC), ISO/IEC 13818-2, 2nd ed., 2000. – Режим доступу до інформації: [http://webstore.iec.ch/preview/info\\_isoiec13818-2%7Bed2.0%7Den.pdf](http://webstore.iec.ch/preview/info_isoiec13818-2%7Bed2.0%7Den.pdf)

61. ISO/IEC-JTC1/SC29/WG11. Test model 5, MPEG93/457, Apr. 1993 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до інформації: <http://www.mpeg.org/MPEG/MSSG/tm5/Overview.html>

62. Westerink P.H. Two-pass MPEG-2 variable-bitrate encoding / Westerink P.H., Rajagopalan R., Gonzales C.A. // IBM J. Res. Develop. – 1999. – Vol. 43, № 4. – pp. 471-488.

63. Formanek B. Rate control in MPEG-2 video bitrate transcoder / Formanek B., Ádám T. // Proc. of the 10th International Carpathian Control Conference. – 2009. – pp. 297-300.

64. DSP Implementation of a Video Bitrate Transcoder / V.G. Abakumov, A. Kane, P.V. Popovych [и др.] // Электроника и связь. – 2011. – №3. – С. 89-91.

65. DSP Implementation of a Video Bitrate Transcoder / V.G. Abakumov, A. Kane, P.V. Popovych [и др.] // Електроніка і нанотехнології: міжнар. наук.-техн. конф., 12-14 квітня 2011 р.: тези доп. – К.: 2011. – С. 181.

66. Абакумов В.Г. Применение объективных показателей качества видеоизображений для управления скоростью видеопотока / Абакумов В.Г., Попович П.В. // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: междунар. науч.-техн. конф., 5-9 сентября 2011 г.: тезисы докл. – Севастополь: 2011. – С.198-200.

67. Попович П.В. Измерение качества видеоизображений как способ управления скоростью видеопотока / П.В. Попович // Искусственный интеллект. – 2011. – №3. – С. 219-224.

68. VQEG Subjective Test Plan, Version 2 [Электронный ресурс]. –

Режим доступа до документу:

[http://www.its.bldrdoc.gov/media/8218/frtv\\_phase1\\_subjective\\_test\\_plan.doc](http://www.its.bldrdoc.gov/media/8218/frtv_phase1_subjective_test_plan.doc)

69. Абакумов В.Г. Управління швидкістю відеопотоку за критерієм його якості / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011): міжнар. наук.-техн. конф., 19-21 травня 2011 р.: тези доп. – Вінниця: 2011. – С. 26-27.

70. ITU-R. Chairman of Study Group 11. The new approaches to quality assessment and measurement in digital broadcasting. Doc. 10-11Q/9, 6 October 2008.

71. Абакумов В.Г. О новом подходе к управлению скоростью видеопотока / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Природные и интеллектуальные

ресурси Сибіри (СИБРЕСУРС-17-2011): междунар. науч.-практ. конф., 28-30 вересня 2011 г.: тези докл. – Томск: 2011. – С. 122-125.

72. Abakumov V. Subjective Video Quality Assessment for Digital Television Systems / V. Abakumov, P. Popovych // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012): міжнар. наук.-техн. конф., 21-24 лютого 2012 р.: тези доп. – Львів-Славське: 2012. – С. 126.

73. Абакумов В.Г. Вимірювання якості відеокодеків MPEG-4 для систем цифрового телебачення / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Photonics-ODS 2010: міжнар. конф. з оптоелектронних інформаційних технологій, 28-30 вересня 2010 р.: тези доп. – Вінниця: 2010. – С. 57.

74. Popovych P. Video Bitrate Control by Criteria of Picture Quality / P. Popovych // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012): міжнар. наук.-техн. конф., 21-24 лютого 2012 р.: тези доп. – Львів- Славське: 2012. – С. 138.

75. Абакумов В.Г. Алгоритм работы видеотранскодера с обратной связью по критерию качества видеоизображения / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибіри (СИБРЕСУРС-21-2015): междунар. науч.-практ. конф., 11-13 ноября 2015 г.: тези докл. – Томск: 2015. – С. 54-58.

76. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1073 с.

77. MSU Graphics & Media Lab (Video Group), MSU Quality Measurement Tool: Общая информация о VQMT [Електронний ресурс]. – Режим доступу до інформації:

[http://www.compression.ru/video/quality\\_measure/video\\_measurement\\_tool.html](http://www.compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool.html)

78. Абакумов В.Г. Управление процессом подготовки видеоконтента на основании критериев качества результирующего изображения / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства: міжнар. науч.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 25-26 квітня 2013 р.: тези доп. – Кременчук: 2013. – С. 70-71.

79. Субъективное сравнение современных видеокодеков [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: [http://compression.ru/video/codec\\_comparison/pdf/msu\\_subjective\\_codecs\\_comparison\\_ru.pdf](http://compression.ru/video/codec_comparison/pdf/msu_subjective_codecs_comparison_ru.pdf)

80. Критические значения коэффициента линейной корреляции Пирсона [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: [http://psystat.at.ua/Articles/Table\\_Pearson.PDF](http://psystat.at.ua/Articles/Table_Pearson.PDF)

81. Попович П.В. Средство динамического управления процессом подготовки видеоконтента с использованием критериев качества результирующего изображения / П.В. Попович // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-18-2012): междунар. науч.-практ. конф., 1-2 ноября 2012 г.: тезисы докл. – Кемерово: 2012. – С. 220-222.

82. Абакумов В.Г. Удосконалений спосіб керування якістю підготовки телевізійних програм / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: міжнар. наук.-практ. конф., 24-26 жовтня 2013 р.: тези доп. – Чернівці: 2013. – С. 29-30.

83. Абакумов В.Г. О новом способе управления качеством подготовки телевизионных программ / В.Г. Абакумов, П.В. Попович // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС–20–2014): междунар. науч.-практ. конф., 8-10 октября 2014 г.: тезисы докл. – Томск: 2014. – С. 85-88.

84. Капустин Е.И. Решение некоторых классов математических задач в программе Excel / Е.И. Капустин [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: <http://exponenta.ru/educat/systemat/kapustin/014.asp>

85. Глушков В.А. Основы телевидения: [учебное пособие] / В.А. Глушков, А.В. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 88 с.

86. Нагиева И.Д. Организация и оплата труда на автомобильном транспорте / Нагиева И.Д., Улицкая И.М. – М.: Горячая линия -Телеком, 2007. – 412 с.

## **ДОДАТОК А**

Результати суб'єктивного оцінювання тестових відеопослідовностей у програмі MSU Perceptual Video Quality

## arfa

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr3_8M.avi	4,87	4,38	5,37	1,14	4,87	4,38	5,37	1,14
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr3_6M.avi	4,12	3,65	4,6	1,08	4,12	3,65	4,6	1,08
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr3_4M.avi	4,19	3,59	4,78	1,36	4,19	3,59	4,78	1,36
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr3_2M.avi	2,56	2,02	3,11	1,25	2,56	2,02	3,11	1,25

## barcelona

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr2_2M.avi	2,81	2,31	3,31	1,14	2,81	2,31	3,31	1,14
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr2_4M.avi	3,87	3,26	4,49	1,4	3,87	3,26	4,49	1,4
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr2_6M.avi	4,12	3,81	4,44	0,71	4,12	3,81	4,44	0,71
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr2_8M.avi	4,19	3,78	4,6	0,93	4,19	3,78	4,6	0,93

## calender

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr10_8M.avi	4,31	3,98	4,64	0,76	4,31	3,98	4,64	0,76
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr10_6M.avi	4,12	3,69	4,56	1	4,12	3,69	4,56	1
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr10_4M.avi	3	2,59	3,41	0,94	3	2,59	3,41	0,94
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr10_2M.avi	2	1,59	2,41	0,94	2	1,59	2,41	0,94

## canoe

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr5_2M.avi	1,31	0,9	1,73	0,95	1,31	0,9	1,73	0,95
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr5_4M.avi	3,37	2,97	3,78	0,92	3,37	2,97	3,78	0,92
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr5_6M.avi	3,81	3,53	4,09	0,64	3,81	3,53	4,09	0,64
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr5_8M.avi	4,81	4,37	5,26	1,02	4,81	4,37	5,26	1,02

## formula\_one

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr6_8M.avi	4,31	3,83	4,8	1,11	4,31	3,83	4,8	1,11
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr6_6M.avi	4,31	3,83	4,8	1,11	4,31	3,83	4,8	1,11
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr6_4M.avi	3,75	3,25	4,25	1,15	3,75	3,25	4,25	1,15
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr6_2M.avi	2,06	1,49	2,63	1,3	2,06	1,49	2,63	1,3

## fries

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr7_2M.avi	3	2,48	3,52	1,18	3	2,48	3,52	1,18
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr7_4M.avi	4,62	4,15	5,1	1,08	4,62	4,15	5,1	1,08
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr7_6M.avi	4,94	4,52	5,35	0,95	4,94	4,52	5,35	0,95
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr7_8M.avi	4,75	4,17	5,33	1,32	4,75	4,17	5,33	1,32

## graphics

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr4_2M.avi	3,75	3,25	4,25	1,15	3,75	3,25	4,25	1,15
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr4_4M.avi	4,81	4,3	5,32	1,17	4,81	4,3	5,32	1,17
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr4_6M.avi	4,37	3,77	4,98	1,38	4,37	3,77	4,98	1,38
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr4_8M.avi	5,19	4,62	5,76	1,3	5,19	4,62	5,76	1,3

## rugby

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr9_2M.avi	1,5	1,12	1,88	0,87	1,51	1,11	1,91	0,89
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr9_4M.avi	3,44	2,97	3,9	1,06	3,49	3,01	3,97	1,07
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr9_6M.avi	4,19	3,74	4,63	1,02	4,08	3,67	4,49	0,92
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr9_8M.avi	4,63	4,19	5,06	1	4,74	4,34	5,14	0,89

**text**

video	simple averaged mark	left confidence border	right confidence border	std dev	ITU-R averaged mark	ITU-R left confidence border	ITU-R right confidence border	ITU-R std dev
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_8M\scr8_8M.avi	5,06	4,58	5,55	1,11	5,06	4,58	5,55	1,11
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_6M\scr8_6M.avi	4,87	4,44	5,31	0,99	4,87	4,44	5,31	0,99
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_4M\scr8_4M.avi	4,62	4,03	5,22	1,35	4,62	4,03	5,22	1,35
D:\Ref yuv video\avi impaired\mp@ml_2M\scr8_2M.avi	3,12	2,84	3,41	0,64	3,12	2,84	3,41	0,64

## **ДОДАТОК Б**

Результати вимірювання об'єктивних метрик PSNR, VQM та MS-SSIM для  
тестових відеопослідовностей у програмі  
MSU Video Quality Measurement Tool

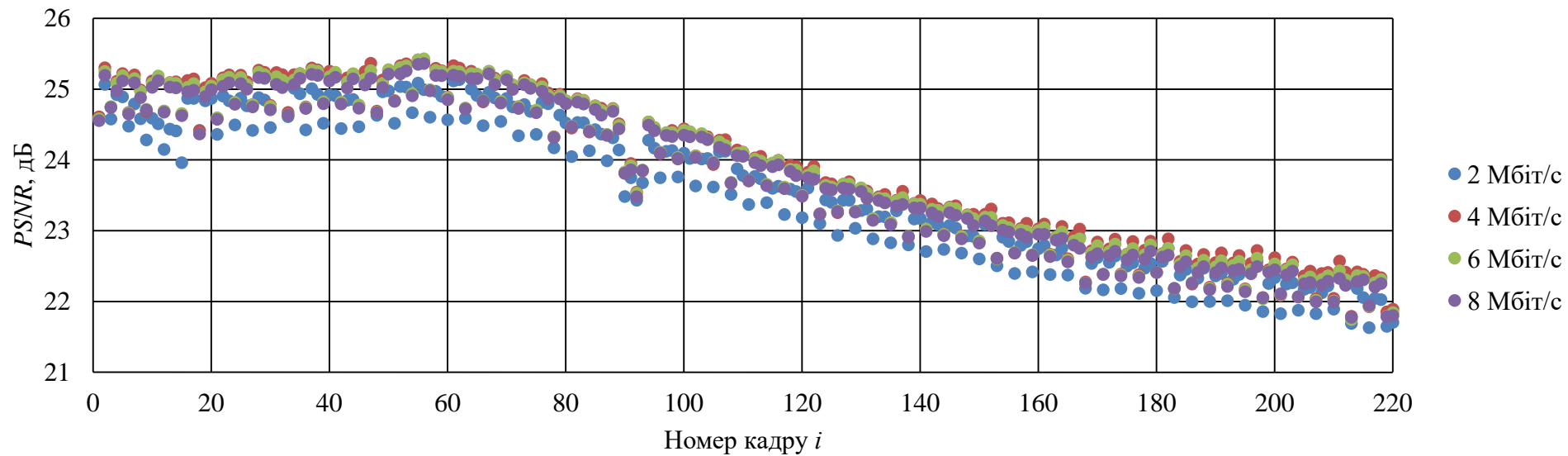


Рисунок Б.1 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Барселона

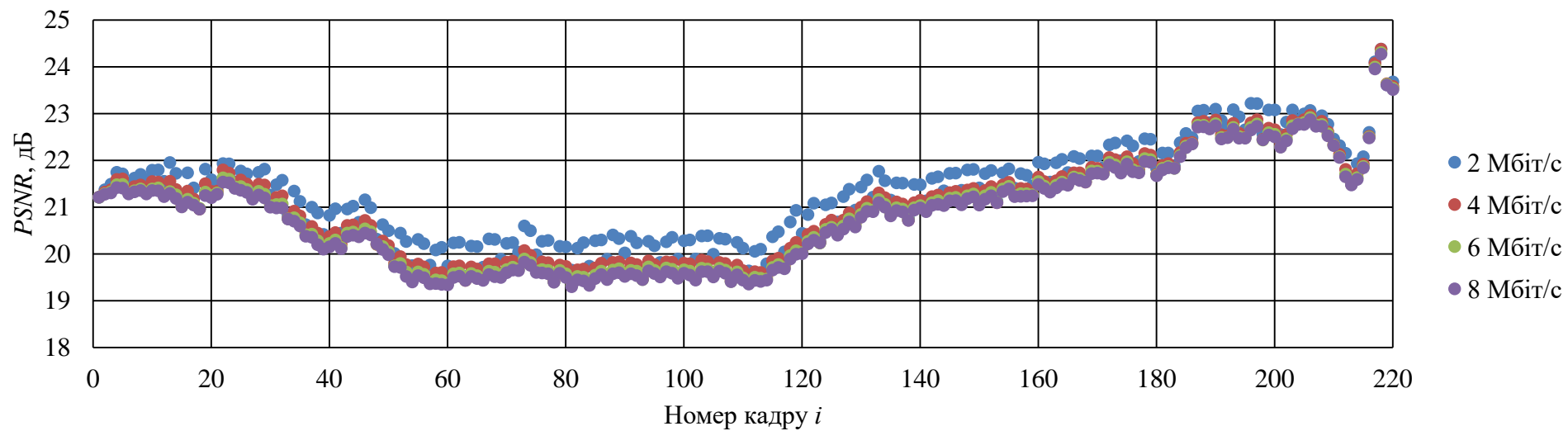


Рисунок Б.2 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Арфа

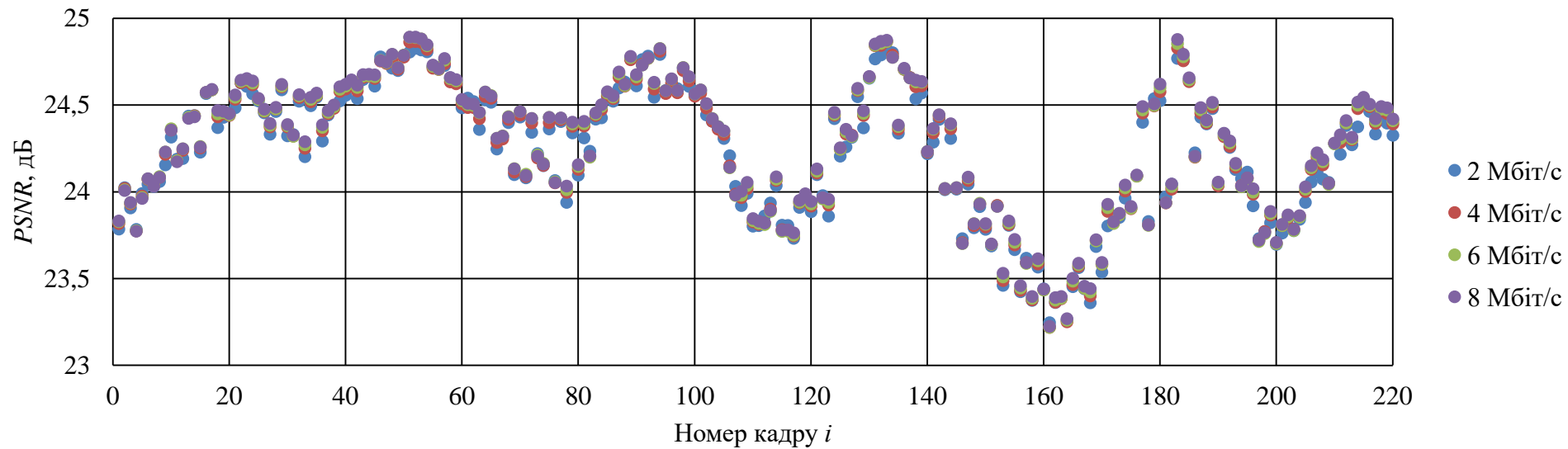


Рисунок Б.3 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Рухом графіка

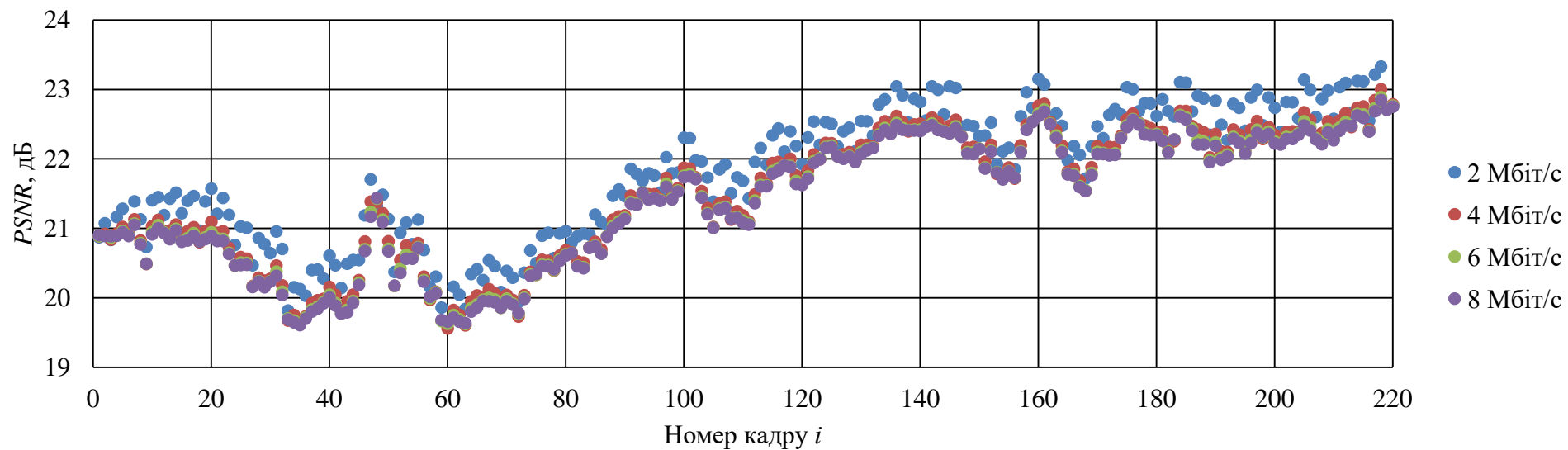


Рисунок Б.4 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Каное

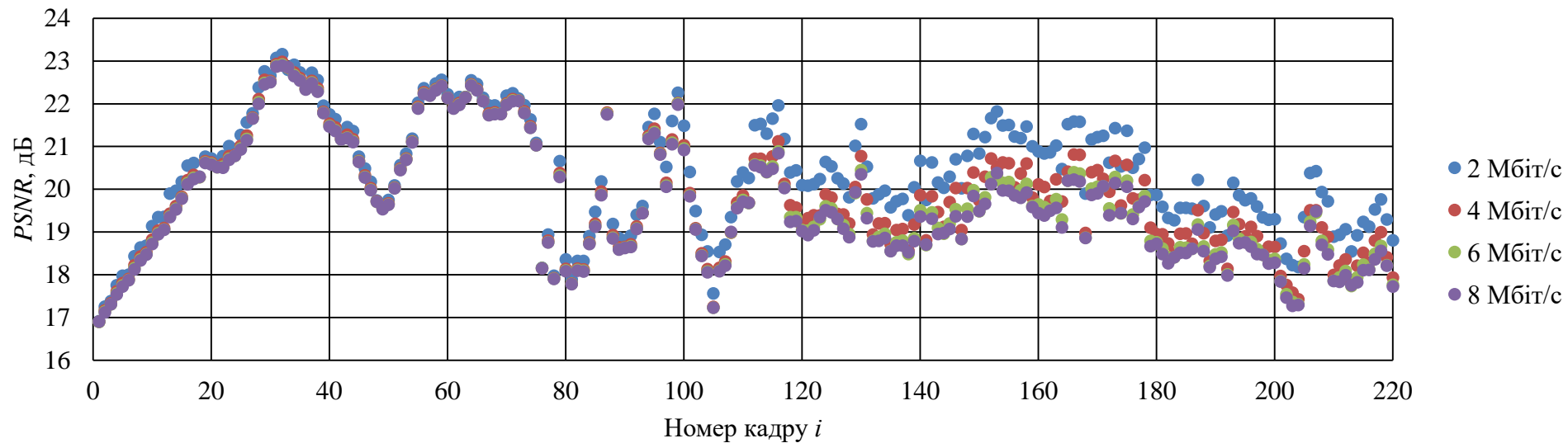


Рисунок Б.5 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Болід Ф1

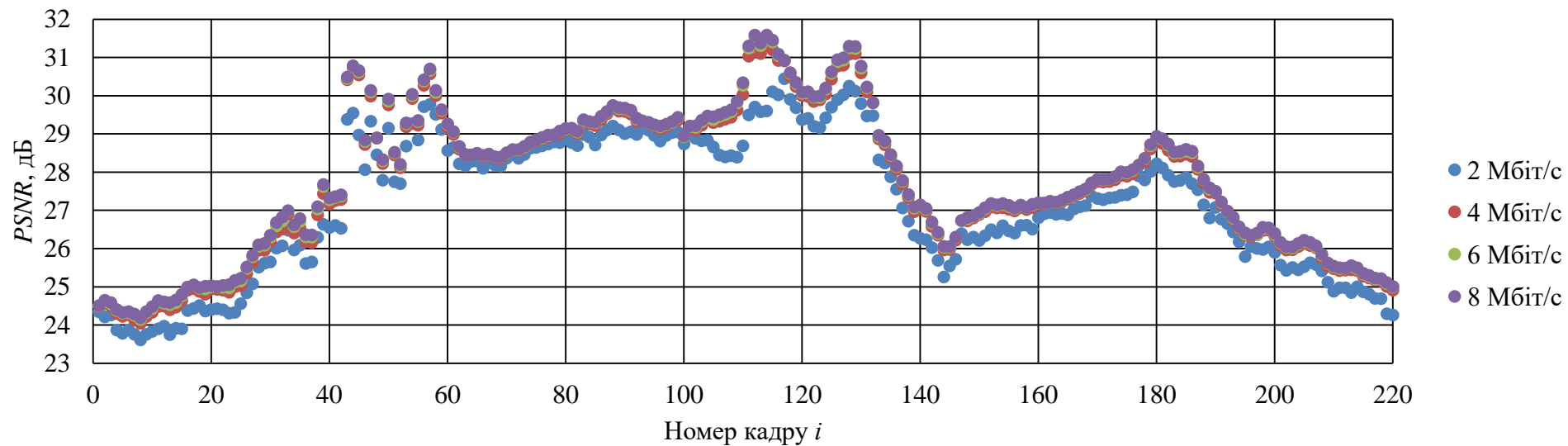


Рисунок Б.6 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності В кафе

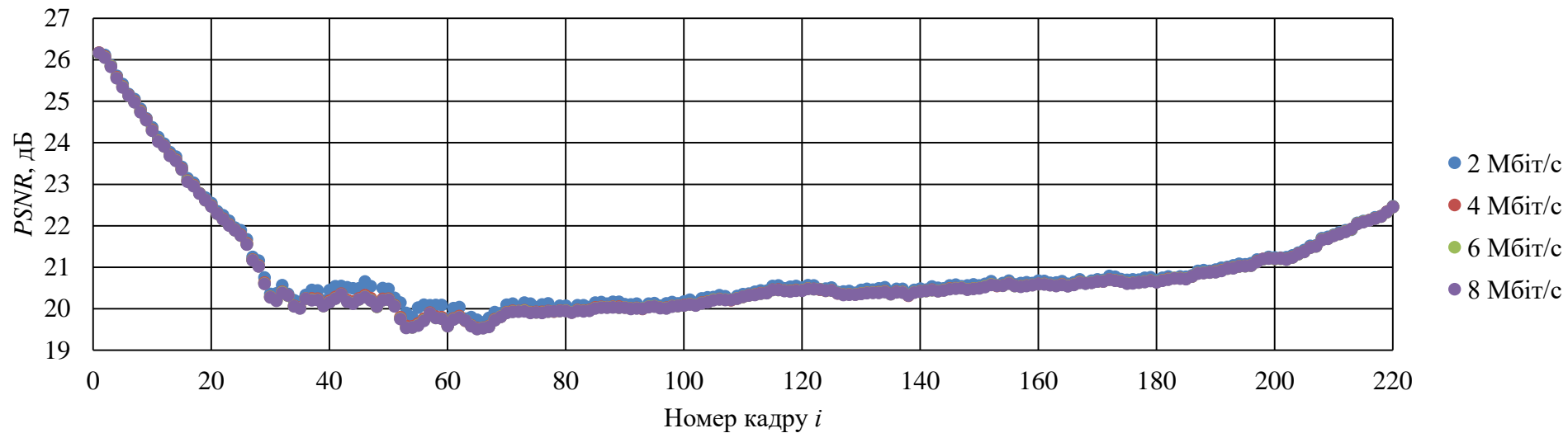


Рисунок Б.7 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Рухомий текст

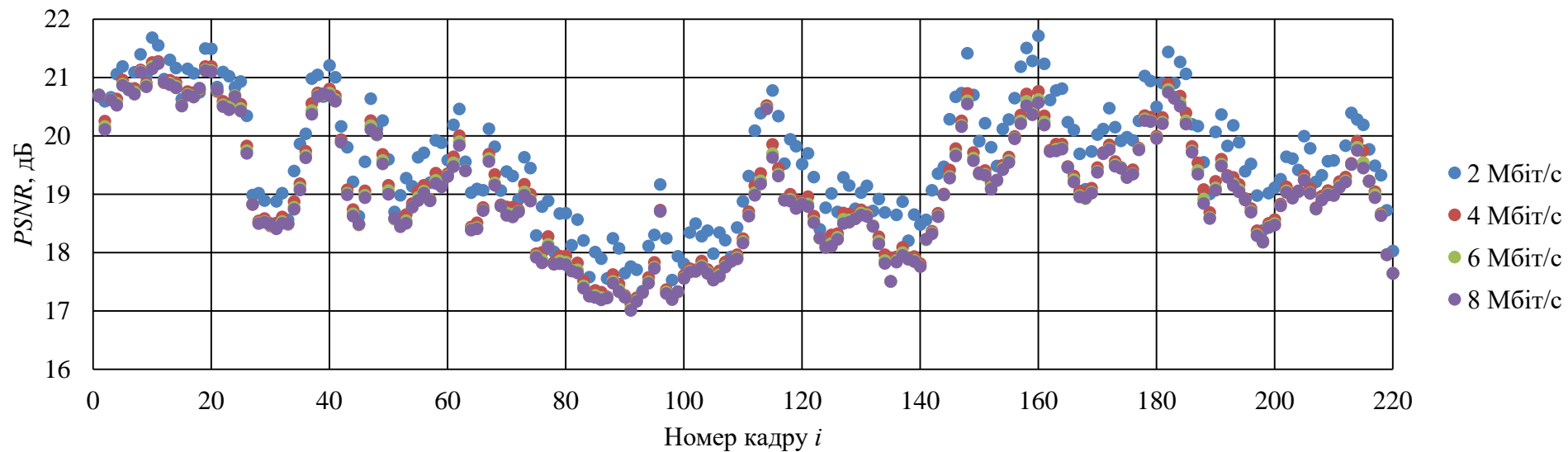


Рисунок Б.8 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Регбі

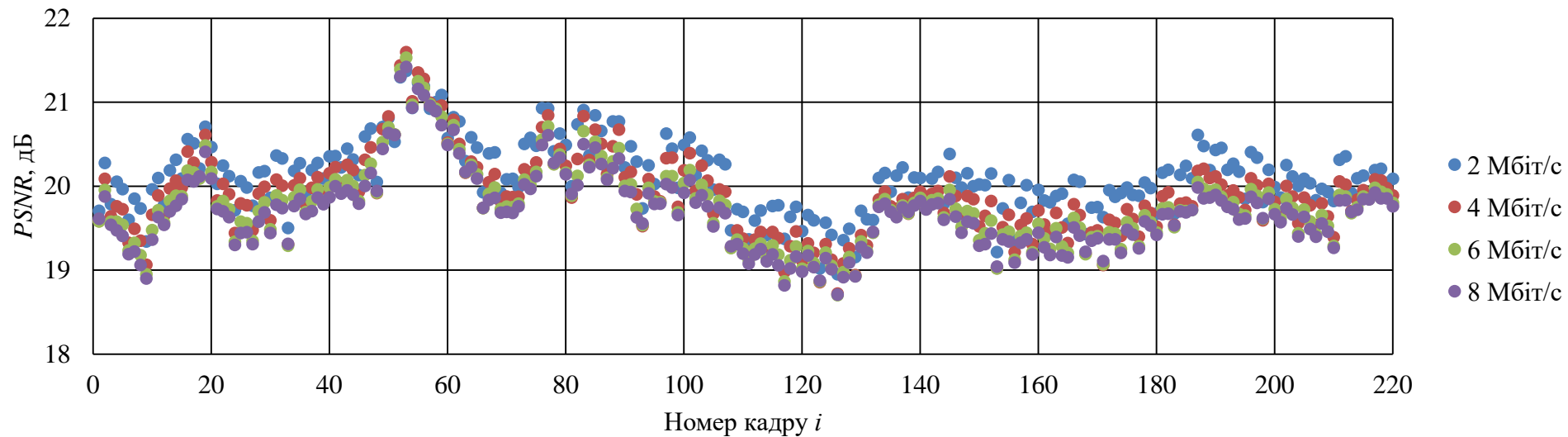


Рисунок Б.9 – Значення метрики PSNR для кадрів послідовності Календар

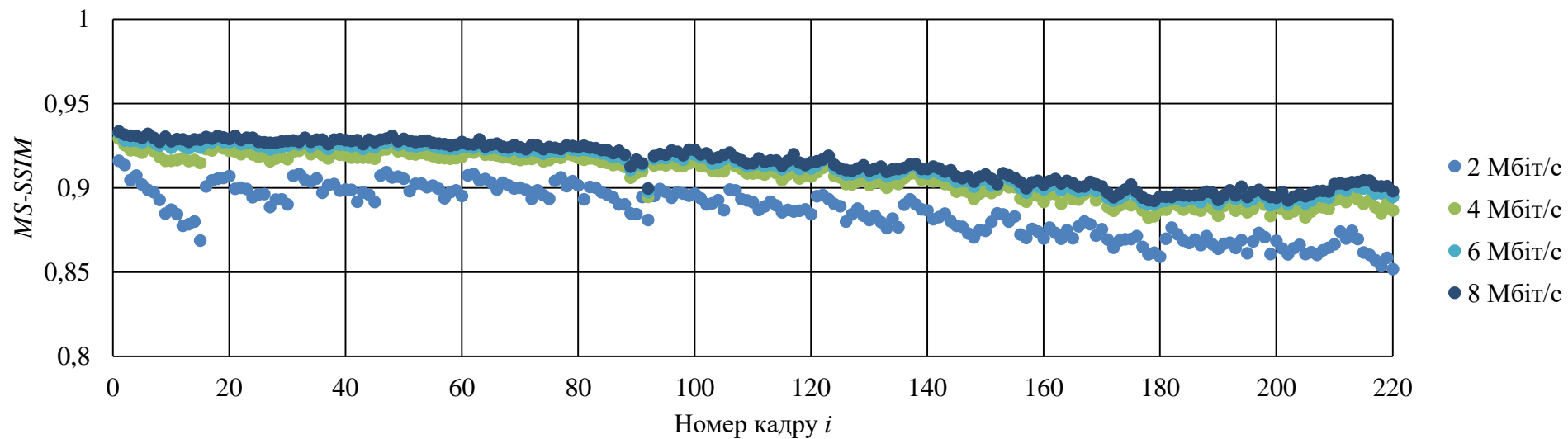


Рисунок Б.10 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Барселона

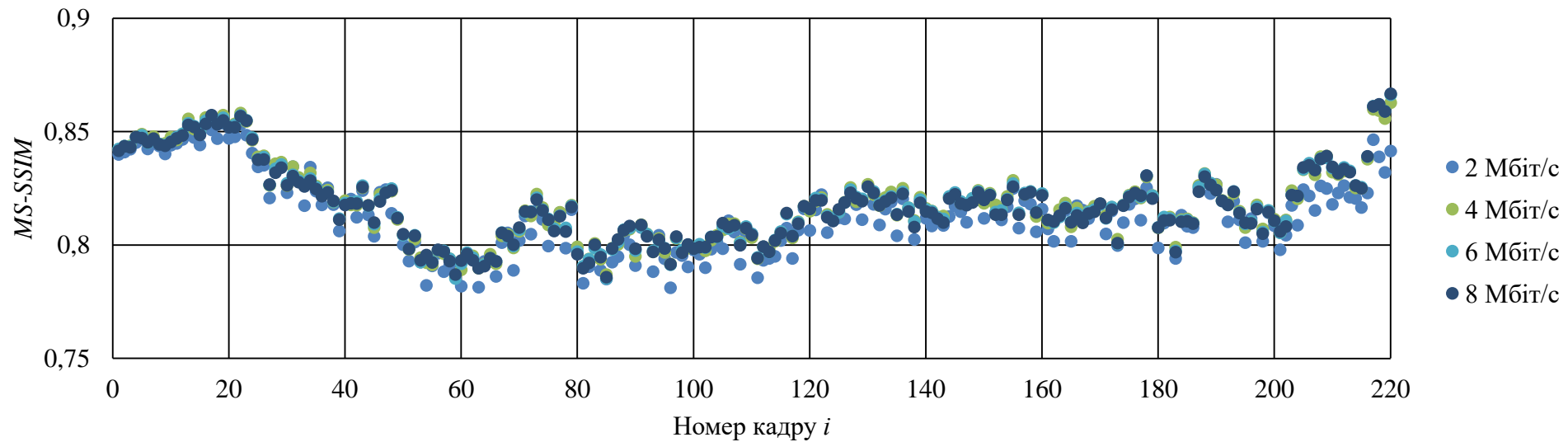


Рисунок Б.11 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Арфа

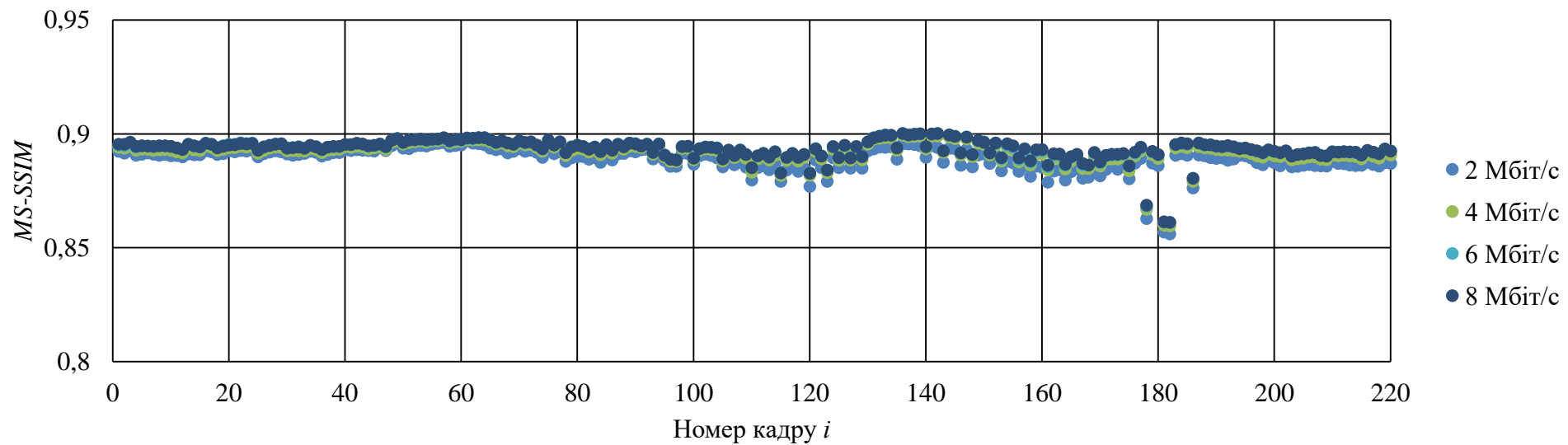


Рисунок Б.12 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Рухома графіка

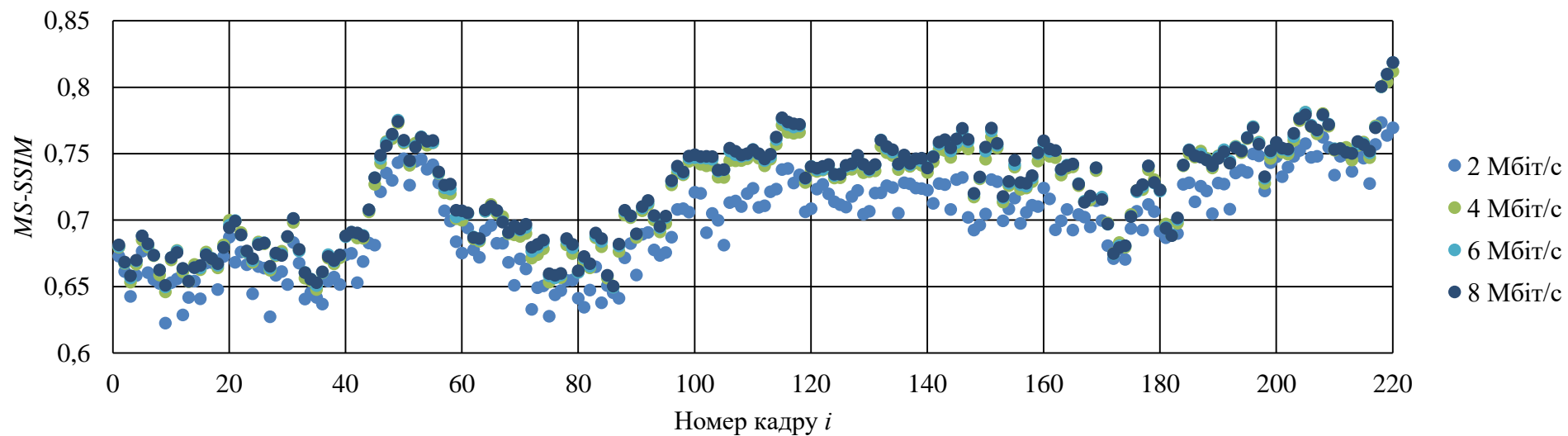


Рисунок Б.13 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Каное

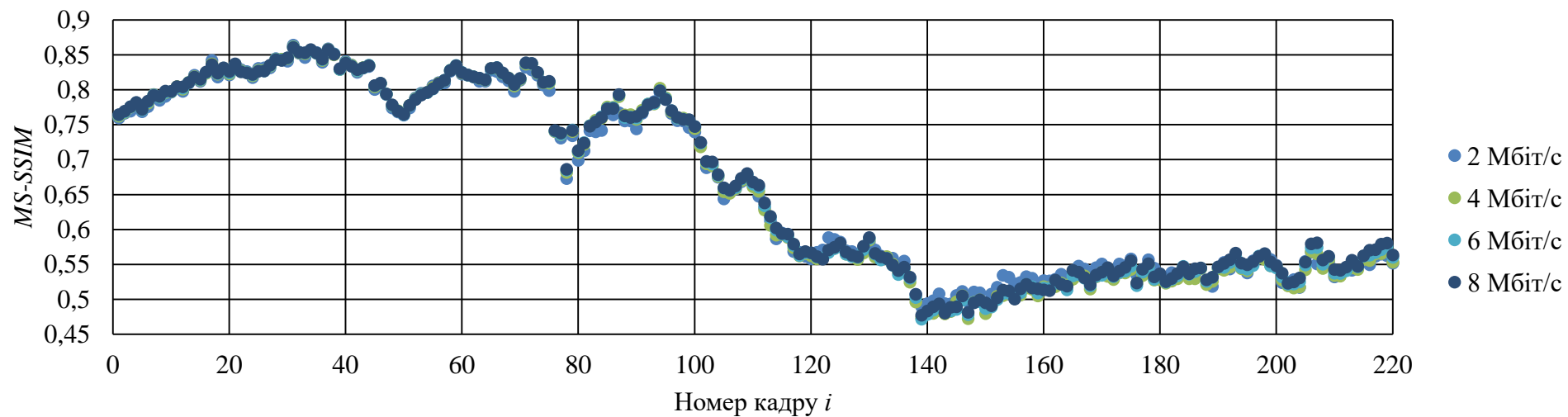


Рисунок Б.14– Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Болід Ф1

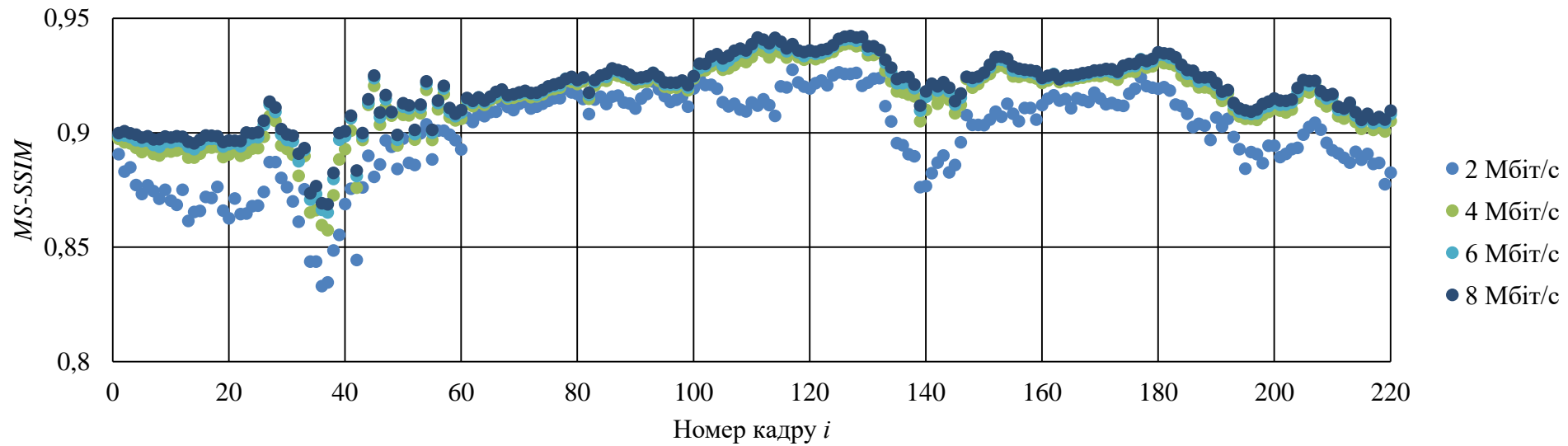


Рисунок Б.15 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності В кафе

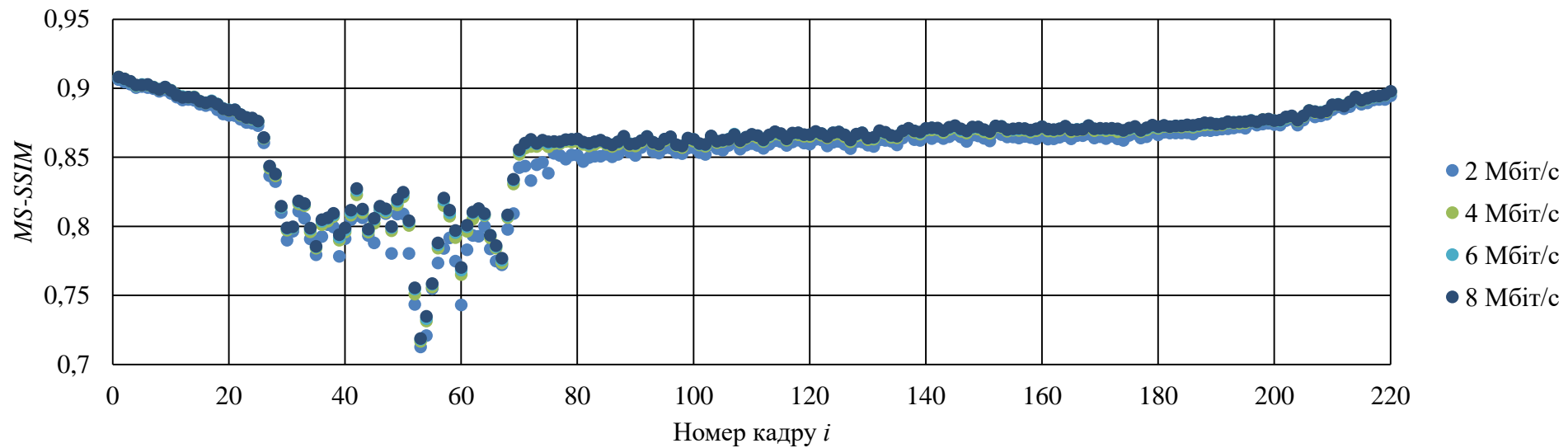


Рисунок Б.16 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Рухомий текст

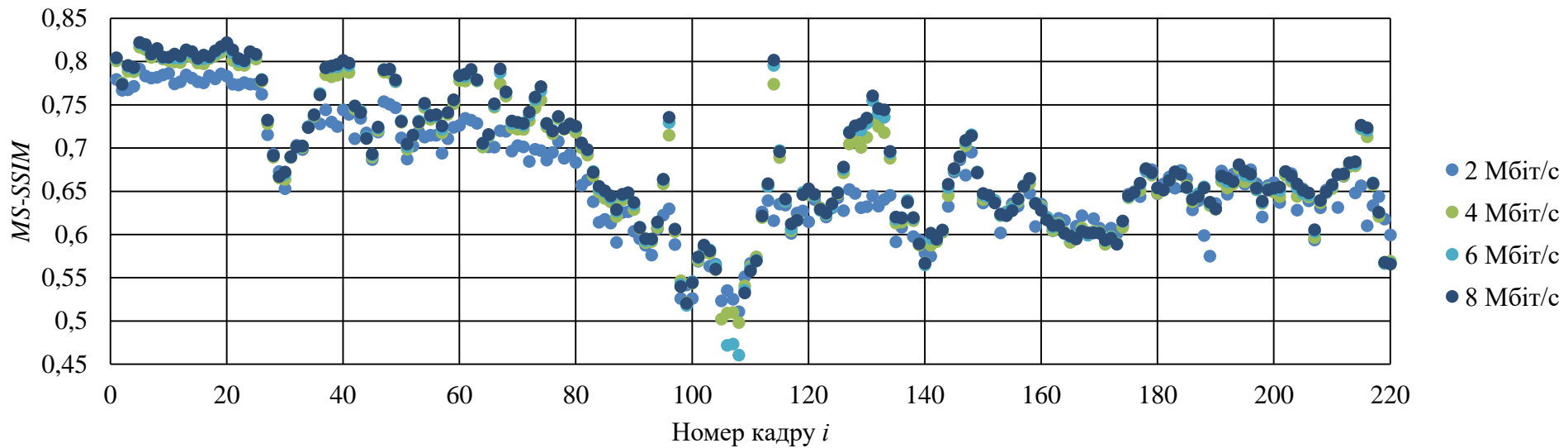


Рисунок Б.17 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Регбі

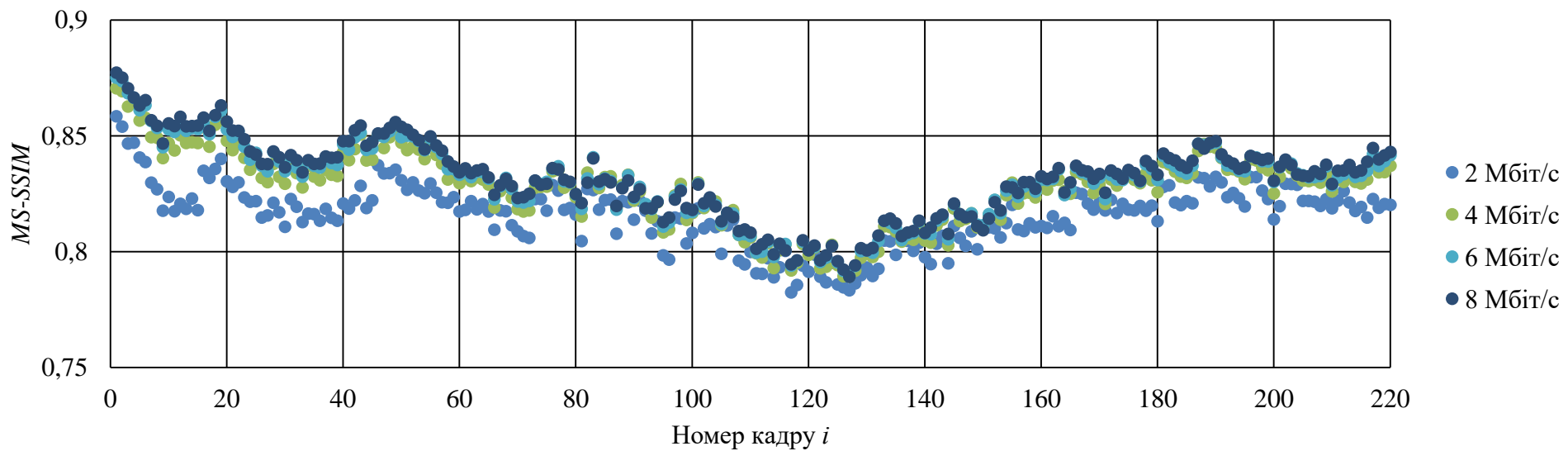


Рисунок Б.18 – Значення метрики MS-SSIM для кадрів послідовності Календар

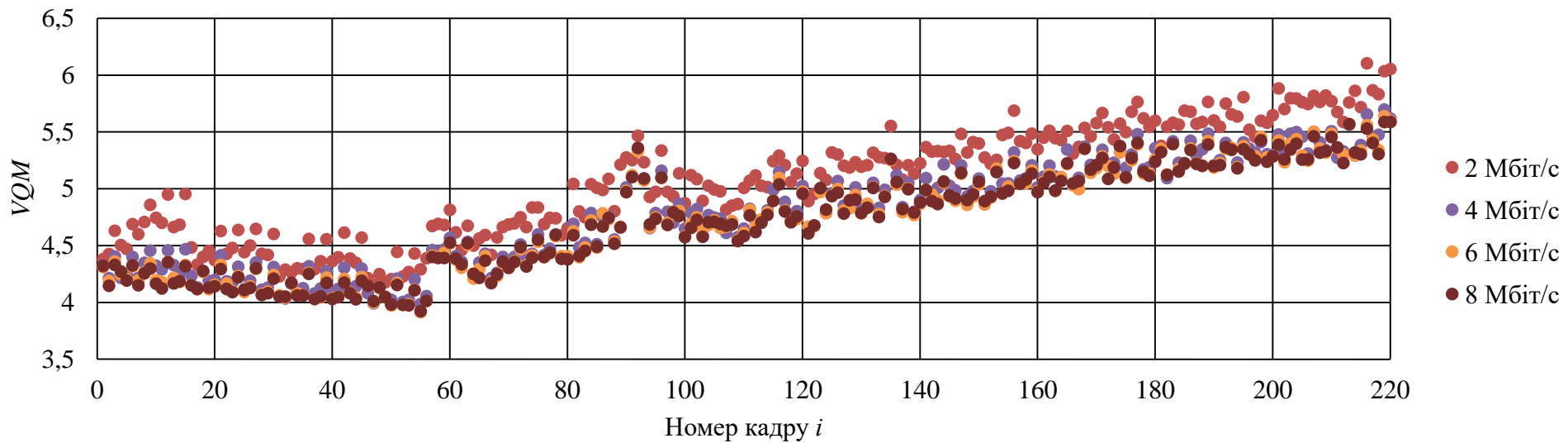


Рисунок Б.19 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Барселона

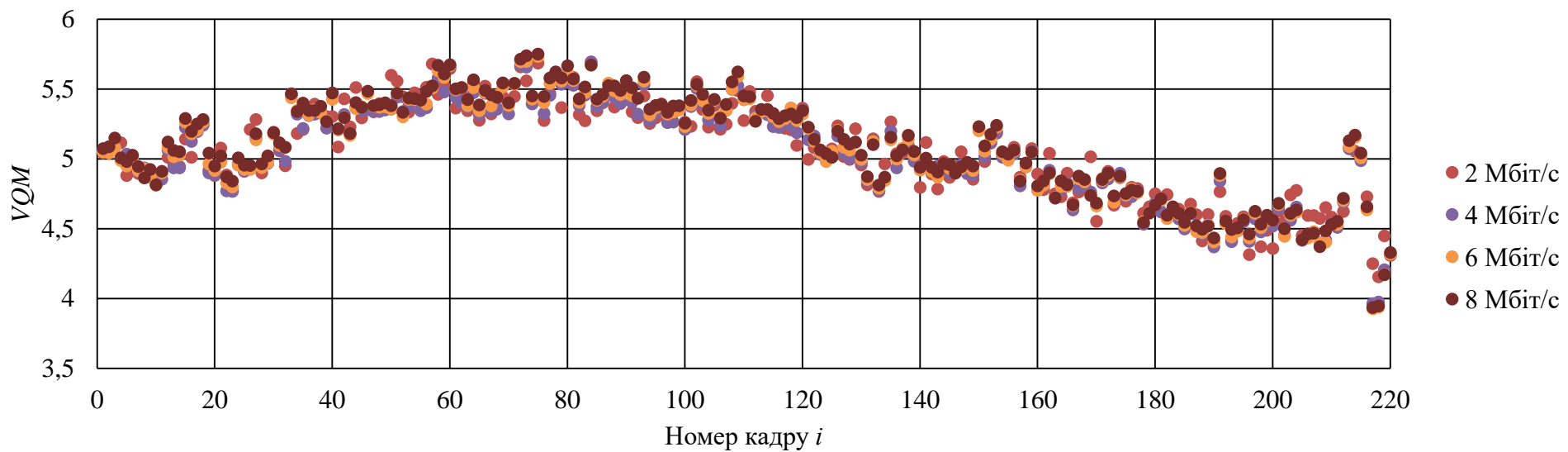


Рисунок Б.20 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Арфа

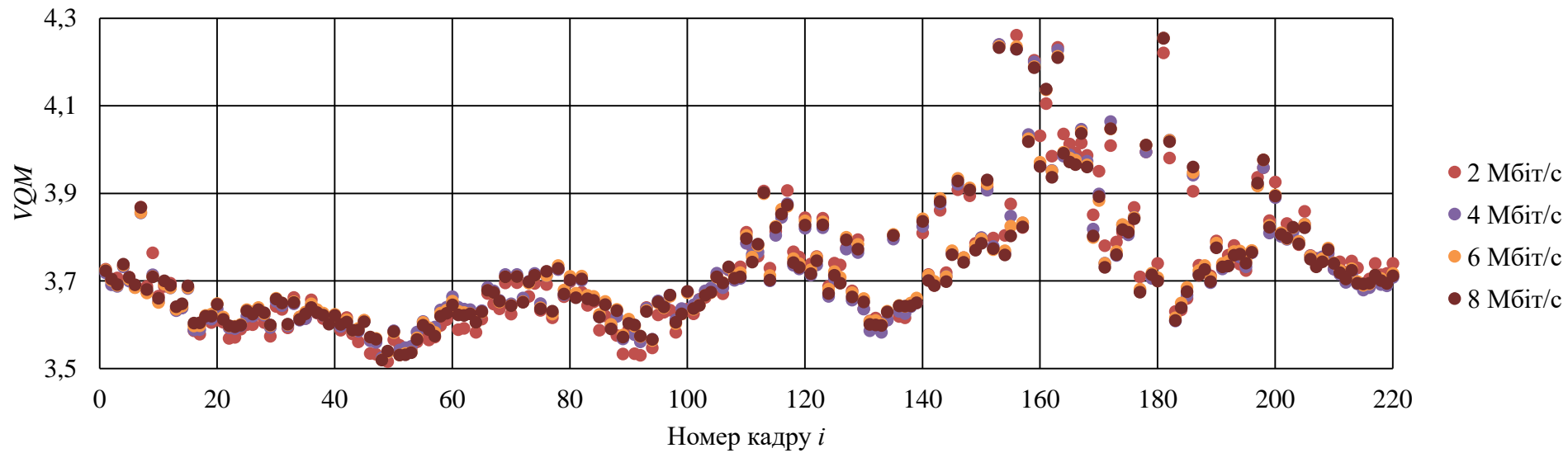


Рисунок Б.21 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Рухом графіка

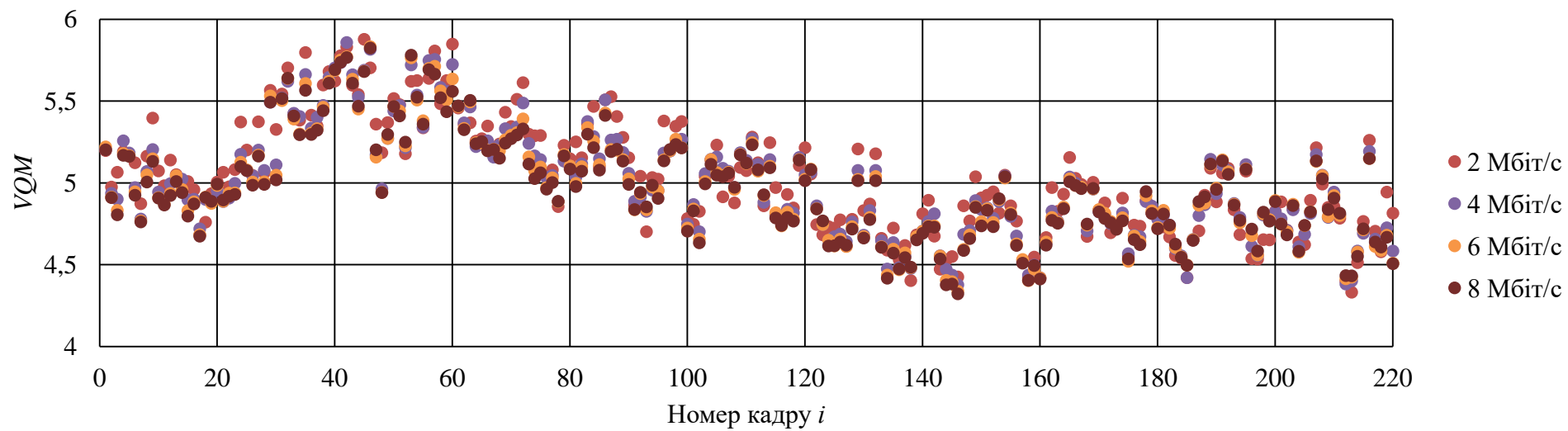


Рисунок Б.22 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Каное

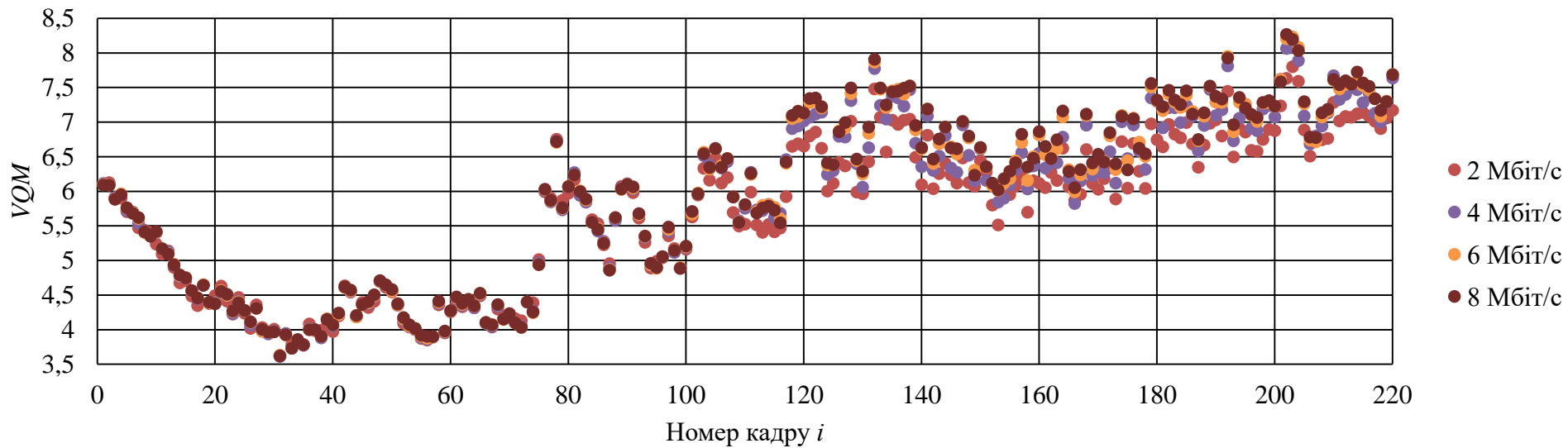


Рисунок Б.23 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Болід Ф1

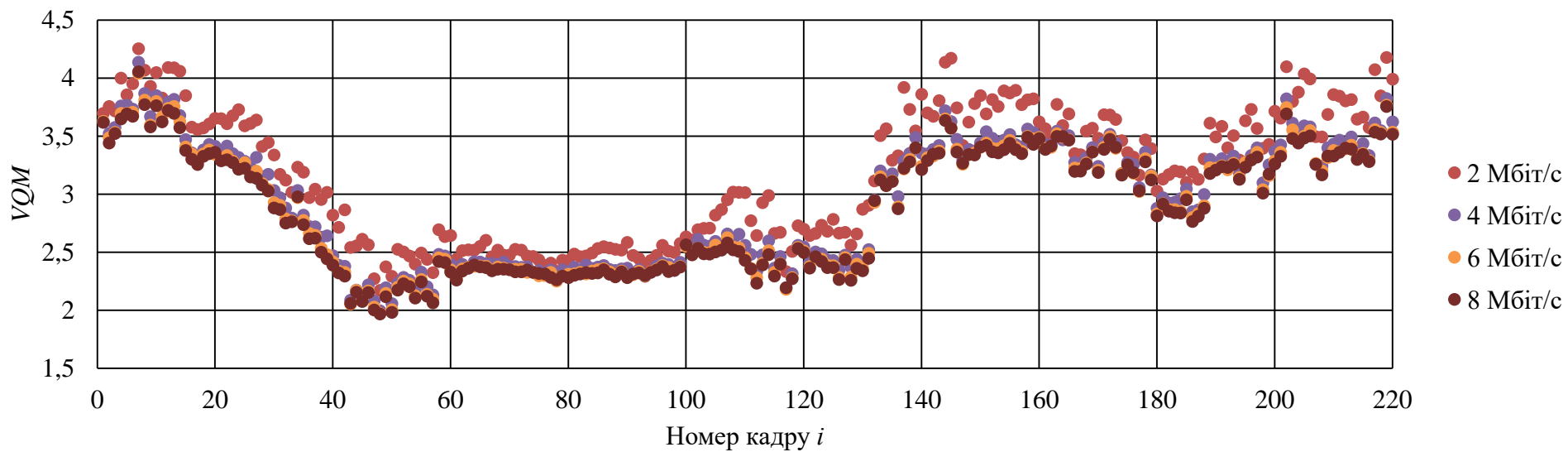


Рисунок Б.24 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності В кафе

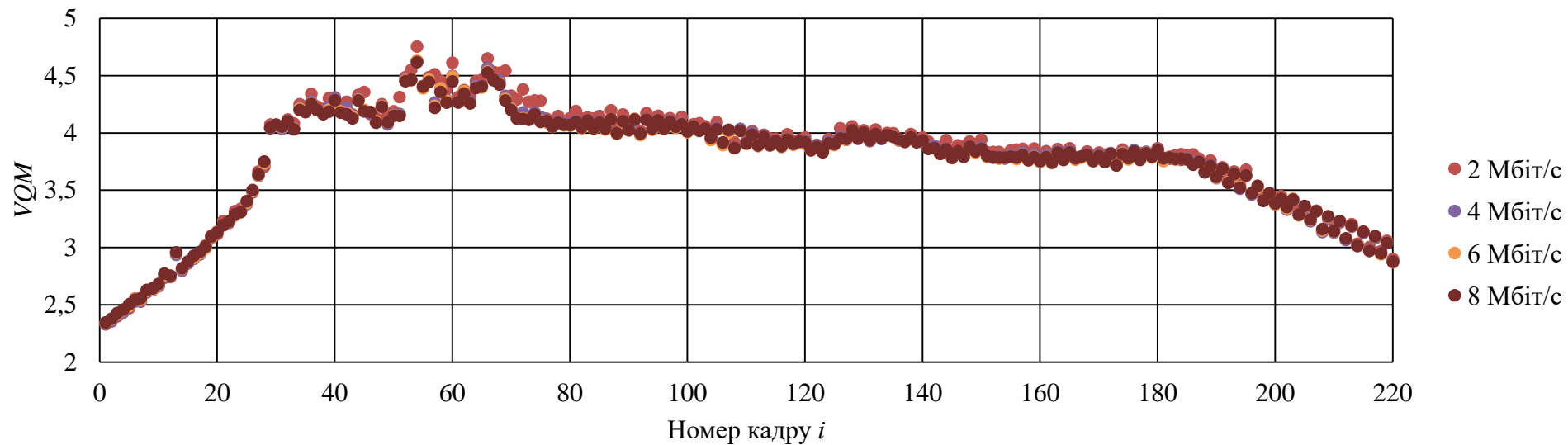


Рисунок Б.25 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Рухомий текст

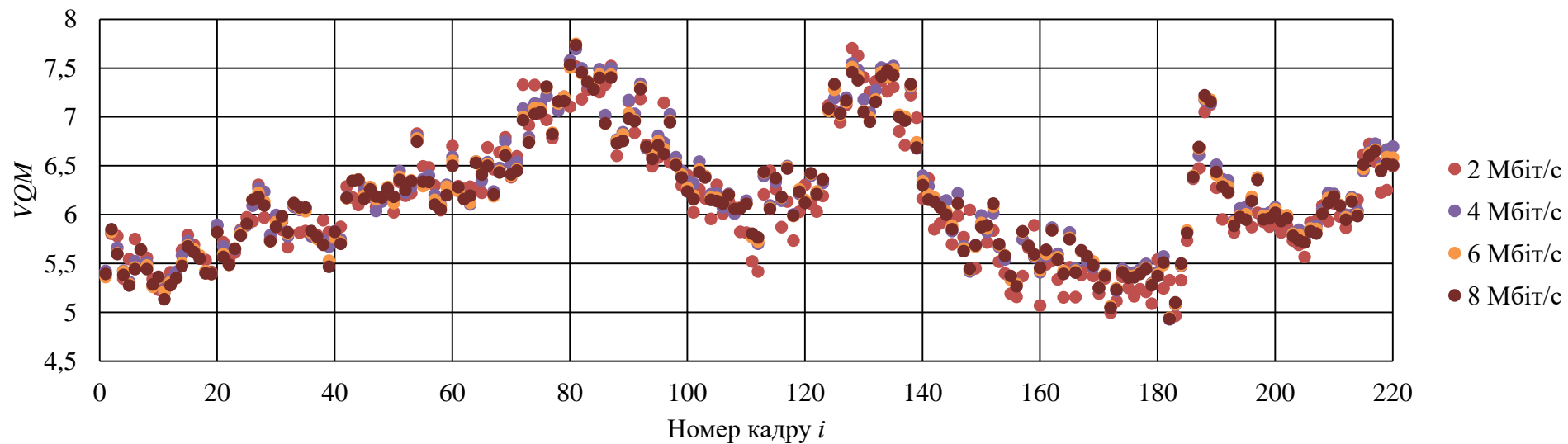


Рисунок Б.26 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Регбі

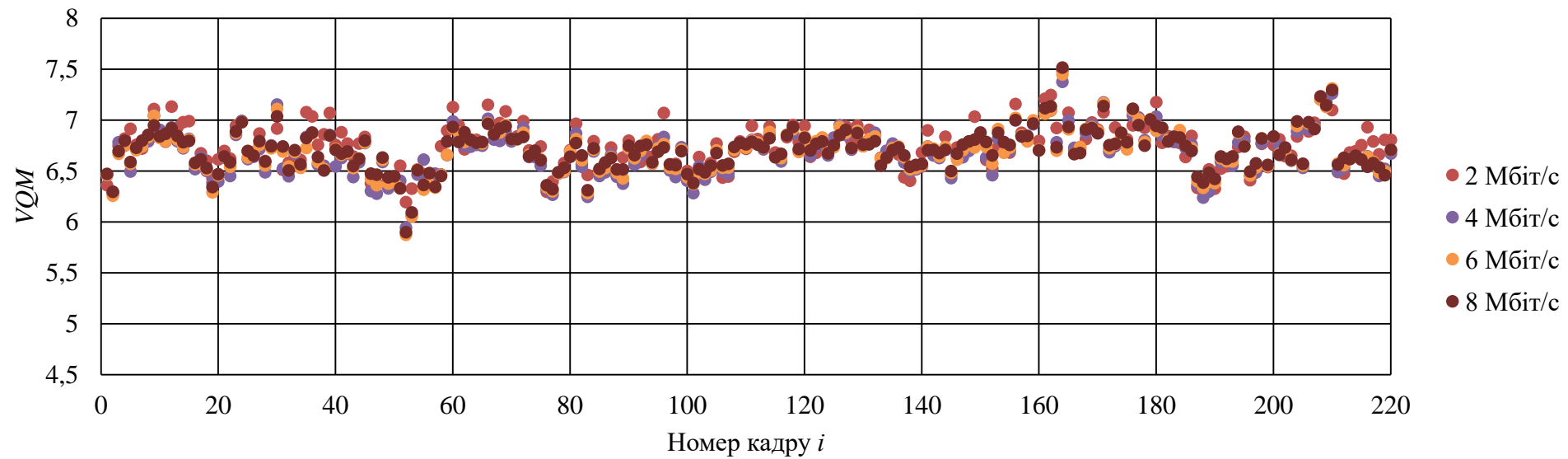


Рисунок Б.27 – Значення метрики VQM для кадрів послідовності Календар