

**Федеральное государственное казенное военное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации»**

*На правах рукописи*



**МОРКОВИН Сергей Владимирович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ  
ВИДЕОДАНЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СО СКРЫТЫМ  
ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение  
вычислительных систем, комплексов  
и компьютерных сетей

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Невров Алексей Алексеевич

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБРАБОТКЕ ВИДЕОДАНЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ.....	11
1.1 Объекты со скрытым идентификационным слоем как технология обеспечения безопасности информации .....	11
1.2 Анализ методов формирования ОСИС в видеоданных .....	22
1.3 Проблема обеспечения устойчивости ОСИС в видеоданных и постановка задачи исследования .....	29
1.4 Выводы по главе.....	31
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОБЪЕКТОВ СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ	32
2.1 Моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС .....	32
2.2 Анализ существующих методов обеспечения устойчивости ОСИС видеоданных .....	35
2.3 Теоретико-множественная модель процесса формирования ОСИС в видеоданных .....	53
2.4 Обоснование метрики устойчивости ОСИС .....	64
2.5 Определение граничных условий устойчивости .....	71
2.6 Выводы по главе.....	86
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ВИДЕОДАНЫХ.....	88
3.1 Анализ исходных данных алгоритмов.....	88

3.2 Разработка алгоритма формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в частотной области видеоданных .....	90
3.3 Разработка алгоритма контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в частотной области видеоданных .....	106
3.4 Выводы по главе.....	119
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАНЫХ.....	
4.1 Архитектура системы формирования и контроля целостности динамических ОСИС в видеоданных .....	121
4.2 Реализационные аспекты и оценка эффективности системы обеспечения и проверки уникальности видеоинформации.....	124
4.3 Выводы по главе.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
СПИСОК ТЕРМИНОВ, СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Прогресс в области информатизации общества способствует развитию и совершенствованию социо-киберфизических систем различного уровня и функциональной направленности. В настоящее время одним из наиболее востребованных вариантов подобных систем являются системы, обеспечивающие функции обработки видеоданных. В рамках таких систем видеоданные подвергаются различным преобразованиям, связанным с модификацией их форматов, изменением временного порядка представления отдельных структурных элементов видеоданных (СЭВ), параметров (разрешение, углы поворота и т.д.), а также наложением дополнительных слоев, содержащих как различный контент, так и метаданные. В подобных условиях одной из важных задач является идентификация источника обрабатываемых видеоданных, представляющая общий класс задач, к частным случаям которых относятся задачи идентификации прав интеллектуальной собственности по отношению к медиа-объектам, определение авторства видеоданных или их отдельных СЭВ и т.д. В общем случае указанная задача относится к предметным областям цифровой идентификации объектов и технических средств защиты авторских прав (англ. DRM – digital rights management). Она решается включением в структуру обрабатываемых данных уникальных идентификаторов – информационных объектов, сопоставляющих источник данных с этими данными. Выдача таких идентификаторов возлагается, как правило, на международные системы нумерации, такие, например, как ISAN и ISRC. Обобщенно идентификатор как объект включается в структурно-параметрические характеристики обрабатываемых данных в качестве метаданных. Применительно к обработке видеоданных объект-идентификатор может находиться в области визуального восприятия или иметь скрытый идентификационный слой, доступ к которому может быть получен только на специально организованном этапе контроля. Вне зависимости от вида идентификатора общей проблемой таких объектов при обработке видеоданных является их низкая устойчивость (устойчивость) к

преобразованиям, которым подвергаются видеоданные на различных этапах обработки, и, как следствие, нарушение их целостности как информационного объекта, позволяющего решать задачу идентификации.

Большой вклад в разработку математического обеспечения и программных средств для задач идентификации в системах обработки медиа-контента и, в частности, видеоданных внесли зарубежные и отечественные ученые: Н. Farid, R. Anderson, К. Sullivan, N. Provos, J. Fridrich, А.Н. Фионов, А.В. Балакин, В.И. Коржик, В.Г. Грибунин, И.В. Туринцев, В.В. Алексеев, В.А. Митекин. При этом большинство исследований ориентировано на обработку цифровых изображений или статических фрагментов видеоданных.

Очевидно, что указанная проблема требует разработки соответствующего математического и программного обеспечения обработки видеоданных, метаданные которых содержат объекты со скрытым идентификационным слоем (ОСИС), что и определяет актуальность темы диссертационного исследования.

Тематика диссертационной работы соответствует перспективной тематике научных исследований ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» – Алгоритмы маркирования растровых изображений на основе устойчивого водяного знака.

**Целью работы** является разработка математического и программного обеспечения обработки видеоданных с объектами, содержащими скрытый идентификационный слой, обеспечивающего повышение устойчивости этих объектов к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния проблемы использования объектов со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных, или их отдельных структурных элементов видеоданных.

2. Выполнить моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих объекты со скрытым идентификационным слоем, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области структурных элементов видеоданных и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству этих элементов.

3. Разработать алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, для выбора областей его формирования, повышающих устойчивость к комбинациям множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

4. Разработать алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству структурных элементов видеоданных.

5. Провести численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

6. Разработать программные средства обработки видеоданных, содержащих динамический объект со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки.

**Объект исследования** – система обработки видеоданных.

**Предмет исследования** – математическое и программное обеспечение обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа и моделирования, теории множеств, теории вероятностей и математической статистики; технологии программирования и имитационного моделирования.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение

вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки): п.3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем»; п.7 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социо-киберфизических системах».

**Научная новизна работы.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

– теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем, отличающаяся от известных возможностью динамического изменения параметров его формирования в энергетически значимых составляющих спектра частотной области видеоданных и обеспечивающая получение равномерного распределения множества возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем, по множеству структурных элементов видеоданных;

– алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных применением процедуры координатно-переменного выбора области формирования и обеспечивающий повышение показателя накопленной устойчивости при различных комбинациях множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки;

– алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных итерационным накоплением информации о найденном подмножестве элементов этого объекта и обеспечивающий возможность решения задачи идентификации на основе накопленной информации;

– архитектура программной системы обработки видеоданных, отличающаяся от известных наличием модулей формирования динамического

объекта со скрытым идентификационным слоем и комбинации воздействий на структурные элементы видеоданных и обеспечивающая повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки этих объектов, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем, позволяет сформировать равномерное распределение возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем, по энергетически значимым составляющим спектра частотной области каждого структурного элемента видеоданных.

2. Алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных позволяет повысить показатель накопленной устойчивости при различных комбинациях множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

3. Алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных позволяет решить задачу идентификации на основе накопленной информации о найденном подмножестве его элементов.

4. Архитектура программной системы обработки видеоданных обеспечивает повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки объектов со скрытым идентификационным слоем, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в разработке математического обеспечения обработки видеоданных с динамическими объектами со скрытым идентификационным слоем.

**Практическая значимость** исследования заключается в разработке кроссплатформенных программных средств обработки видеоданных, содержащих

динамические объекты со скрытым идентификационным слоем. На элементы этих программных средств получено свидетельство о государственной регистрации в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

**Результаты внедрения.** Основные положения и результаты диссертационной работы реализованы в виде специального программного средства обработки видеоданных, содержащих динамические ОСИС, и нашли практическое применение в работе ФГУП «НТЦ «Орион». Результаты также внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России.

**Апробация результатов диссертационного исследования.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: III Международная научная конференция MIP Engineering-III 2021: «Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации», Двадцать седьмая международная открытая научная конференция «Современные проблемы информатизации» «Modern Informatization Problems» (с изданием материалов конференции в Science Book Publishing House, USA), Всероссийская межведомственная научно-технической конференция по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «НАУКА И АСУ — 2021», «Modern Informatization problems in simulation and social technologies MIP-2022'SCT» Proceedings - XXXVII 2022.

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, свидетельство о государственной регистрации программы, а также статья в издании, индексируемом в Scopus. В работах, опубликованных в соавторстве и приведённых в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1,2] – теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем; [4] – алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным

слоем в обрабатываемых видеоданных; [3,6] – алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных; [5,7] – архитектура программной системы обработки видеоданных, позволяющая повысить устойчивость динамического объекта со скрытым идентификационным слоем к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, включая 28 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 42 наименований.

## ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБРАБОТКЕ ВИДЕОДАНЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ

### 1.1 Объекты со скрытым идентификационным слоем как технология обеспечения безопасности информации

Для защиты информации от утечки, идентификации источника утечки и обнаружения факта утечки информации, широкое применение получили технологии управления цифровыми правами (Digital Rights Management) и предотвращения утечек информации (Data Loss/Leak Prevention).

Digital Rights Management (DRM) представляет собой технологию управления доступом к контенту цифровых данных [10]. Данные системы применяются для защиты от неавторизованного использования (копирования, воспроизведения) данных и несанкционированного внесения изменений в данные [10]. Защита данных обеспечивается посредством криптографического шифрования и использования цифровой лицензии. Цифровая лицензия представляет собой набор прав (действий), предоставляемых пользователю при работе с данными. В процессе использования технологии DRM в системах защиты электронных данных вводятся ограничения на возможность внесения изменений в исходный файл и его структуру, количество операций копирования и передачи. Дополнительно может быть ограничено количество устройств, с которых осуществляется чтение, а также вводится запрет на использование программ или устройств, отличных от рекомендуемых производителем [10]. Основным недостатком данных систем является отсутствие совместимости между DRM-системами различных производителей, а также ориентированность в основном на текстовые документы и данные.

Системы Data Loss/Leak Prevention (DLP-системы) предназначены для контроля за распространением конфиденциальной информации посредством анализа данных, циркулирующих в сети. Такие системы осуществляют

идентификацию конфиденциальных данных, направляемых в другие сети, находящиеся в распределенных репозиториях и банках данных, а также хранящихся у конечного пользователя. Идентификация данных реализована посредством контентного анализа, в процессе которого используются сигнатурные методы, осуществляющие поиск по шаблону (сигнатуре) и с помощью словарей [11]. В случае обнаружения в передаваемом трафике конфиденциальной информации по соответствующей сигнатуре или признаку происходит блокировка процесса передачи.

Применение рассмотренной технологии позволяет добиться высокой точности обнаружения в исследуемом трафике конфиденциальной информации и сведений, составляющих различные виды тайн. К недостаткам данной технологии относится отсутствие стойкости сигнатуры (шаблона) и признаков к применению преобразований и внесению искажений (в том числе и преднамеренных), а также невозможность выделения (формирования) сигнатуры для некоторых типов данных. Кроме того, для обнаружения факта утечки информации необходимо наличие и поддержание актуальной базы данных сигнатур и признаков.

Недостатки рассмотренных систем защиты цифровой информации накладывают ограничение на использование указанных средств для защиты видеоданных от утечки, обусловленной преобразованием формата, перекодированием и обрезки по размеру и времени. Для устранения указанного ограничения могут быть использованы методы сокрытия информации, основанные на скрытом (для пользователя) внедрении идентификационной информации или другой метаинформации в защищаемые данные. Классификация методов сокрытия информации представлена на рисунке 1.1.

Согласно представленной классификации, методы сокрытия информации могут быть разделены на следующие группы [10]:

1. Методы, основанные на использовании скрытых каналов передачи данных.
2. Стеганографические методы.
3. Методы маркирования информации.
4. Методы анонимизации информации и данных.

К первой группе методов сокрытия информации относятся методы, основанные на использовании скрытых каналов. Под скрытым каналом (в широком смысле) понимается канал, не предназначенный для передачи данных [10]. В телекоммуникационных системах связи под скрытым каналом понимается не предусмотренный разработчиком системы информационных технологий и автоматизированных систем коммуникационный канал, который может быть применен для нарушения политики безопасности [10]. Скрытые каналы могут быть разделены следующим образом:

- скрытые каналы по памяти;
- скрытые каналы по времени;
- статистические скрытые каналы.



Рисунок 1.1 – Классификация методов сокрытия информации

Скрытый канал по памяти основан на наличии памяти, в которую осуществляется запись и считывание информации, при этом отсутствует информация о наличии (существовании) такой памяти или места записи информации.

Скрытые каналы по времени организуются посредством модуляции передаваемой информацией некоторого изменяющегося во времени процесса или сигнала. При этом для организации данного вида каналов необходимо присутствие шумовых характеристик в передаваемом сигнале или наличие допустимых границ отклонения модулируемого процесса.

Скрытый статистический канал использует для передачи информации измененные параметры распределений вероятностей любых характеристик системы, которые могут рассматриваться как случайные и описываться вероятностно-статистическими моделями.

Использование скрытых каналов, как правило, реализовано в информационной системе, осуществляющей обработку, передачу и хранение разнородной информации. В то же время наличие преобразования видеоданных накладывает дополнительное требование по стойкости скрытого канала к указанному преобразованию, что не позволяет использовать методы, основанные на использовании скрытых каналов, в процессе обнаружения факта утечки, идентификации источника и защиты видеoinформации от утечки, обусловленной преобразованием формата.

Анонимизация – процесс обеспечения анонимности пользователей или данных, циркулирующих в сети, в процессе обеспечения сетевого взаимодействия. Под анонимностью понимается состояние, при котором невозможно осуществить идентификацию субъекта. Субъект – пользователь, процесс, информация, данные и т. д. Обеспечение анонимности гарантирует субъекту возможность использования ресурса (службы) без раскрытия его идентичности. Процесс анонимизации реализуется посредством анонимизации данных и анонимизации соединений. Анонимизация данных направлена на невозможность идентификации данных посредством фильтрации любой персональной и идентификационной информации. Анонимизация соединений предназначена для маскирования (сокрытия) процесса сетевого взаимодействия, включая процесс передачи данных. Основной целью анонимизации является исключение идентификационной информации, позволяющей определить отправителя, а также установить авторство или идентифицировать информацию и данные, что, в свою очередь, не позволяет использовать методы анонимизации в процессе установления факта утечки и идентификации источника несанкционированного распространения защищаемой информации. Указанная особенность накладывает ограничение на использование

методов анонимизации в процессе защиты видеоданных от утечки, обусловленной преобразованием формата.

К третьей группе методов сокрытия информации относятся методы маркирования, осуществляющие внесение дополнительной информации (маркера) в исходные данные. В качестве маркера может выступать идентификационная информация, характеризующая владельца данных, сами данные, а также другая метаинформация. Внедрение маркера предназначено для защиты авторских прав владельцев информации, контроля целостности данных, а также для обнаружения источника или направления утечки информации. В отличие от стеганографических методов в процессе маркирования может быть осуществлено внедрение как видимого, так и невидимого маркера. Все методы маркирования информации могут быть разделены на устойчивое и хрупкое маркирование. Под хрупким маркированием понимается внедрение маркера, который может быть разрушен (уничтожен) после осуществления определенного типа преобразований или внесения искажений в исходный документ. Отсутствие устойчивости встроенного хрупкого маркера к осуществлению преобразований не позволяет использовать методы данной технологии для обнаружения факта утечки и идентификации источника ввиду отсутствия стойкости к преобразованиям видеоданных.

В случае необходимости обеспечения инвариантности встроенного маркера к преобразованиям и искажениям применяются методы устойчивого маркирования. Под устойчивым маркированием понимается внедрение маркера, обеспечивающего возможность его извлечения после внесения как преднамеренных, так и случайных искажений. Методы устойчивого маркирования могут быть разделены на три группы:

- устойчивое хэширование;
- технология цифровых отпечатков пальцев;
- технология цифровых водяных знаков.

Устойчивое хэширование представляет собой альтернативу криптографическому хэшированию и позволяет получить для близких по содержанию данных (видео, изображений, текстовых документов или файлов

мультимедиа) близкие значения хэш-кодов [12]. Одним из видов устойчивых функций хэширования является криптографическая хэш-функция с коллизиями, которая генерирует одинаковое значение хэш-кода для различных исходных данных.

В общем виде процесс устойчивого хэширования текстовых данных состоит из следующих этапов [12]:

- извлечение характеристик – извлечение неизменяемых характеристик из содержимого текста или структуры текстового документа;
- рандомизация – снижение размерности, применяемое к извлеченным характеристикам, для обеспечения сжатия и необратимости преобразования выходных данных;
- квантование – разделение полученных рандомизированных характеристик на дискретные уровни;
- кодирование – присвоение каждому дискретному уровню уникальной двоичной последовательности установленной длины;
- определение места внедрения и внедрение результата хэширования в исходные данные либо сохранение его в базе данных.

В настоящее время исследования в области применения методов устойчивого хэширования видеоданных представлены работами Грибунина В.Г., Коржика В.И., Окова И.Н., Симонса Г., Моулин П. [12], каждый из которых использует собственные методы построения устойчивой хэш-функции. В работе Мартимова Р.Ю. [12] предложен гибридный подход к аутентификации и обеспечению целостности видеоданных. В процессе создания устойчивой функции хэширования для реализации этапа внедрения полученной цифровой подписи в исходные данные используется метод сокрытия информации на основе подхода Йохонсона, в рамках которого реализовано соединение метода устойчивого хэширования и внедрения полухрупкого аутентификатора. Автором было определено, что самым гибким и популярным инструментом обеспечения целостности видеоданных являются устойчивые хэш-функции. Основой метода защиты целостности выступает специфический аутентификатор. Наиболее

устойчивыми к искажениям являются не хрупкие, а полухрупкие маркеры. В анализируемом методе формирования скрытого идентификационного слоя в видеоданные процесс рассматривается как двухклассовый классификатор фрагментов видеоряда. В качестве первого класса рассматриваются преобразования случайные совмещенные с преднамеренными для обеспечения аутентичности данных; а в качестве второго – только случайные искажения.

Недостатком такого подхода является ориентированность на пок кадровое внедрение устойчивой хеш-функции, что влечет к дополнительной уязвимости в рамках процедуры обрезки видеоряда по времени.

В работе Л. Тэна и К. Сана [13] разработана схема аутентификации данных с применением функции хэширования, основанной на скелетном изображении, формируемом из особенностей структуры данных. Формирование устойчивого хэш-кода основано на применении преобразования Хафа и скелетной схемы. На первом этапе создания устойчивой функции изображение подвергается предварительной обработке при помощи преобразования Хафа, которое позволяет компенсировать искажения, вызванные сжатием и перекодированием. На втором этапе осуществляется построение скелетной схемы, основанной на использовании низкочастотных характеристик изображения. Для создания скелетной схемы изображение преобразуется в двоичное. Далее происходит обнаружение точек соединения, на основании которых осуществляется формирование скелетного отображения объектов изображения. Все точки соединения разделяются на четыре типа: конечные точки, угловые точки, точки тройных ответвлений и точки пересечений. Полученное скелетное отображение подвергается фильтрации фильтром положения для выделения штрихов каждого объекта. На последнем этапе из полученных значений штрихов и точек соединения посредством кодирования относительным азимутом вычисляется кодовая последовательность, которая хэшируется по алгоритму SHA-1 или MD5 для получения значения хэш-кода.

Результат хэширования обеспечивает устойчивость к таким преобразованиям, как поворот на небольшие углы, сжатие изображения по

стандарту JPEG и внесение низкоуровневого шума. Недостатками данной схемы являются наличие ошибок в процессе устранения искажений и отсутствие устойчивости к медианной фильтрации. Наличие указанных недостатков рассмотренных подходов к устойчивому хэшированию видеоданных не позволяет в полной мере использовать их в процессе идентификации встроенных данных и обнаружения факта их утечки. Кроме того, наличие ошибок в процессе извлечения встроенных данных не позволяет обеспечить требуемую точность извлечения и гарантировать правильное извлечение встроенной информации.

Ко второй группе методов устойчивого маркирования относятся методы технологии цифровых отпечатков пальцев, основанные на извлечении из анализируемого объекта (текстового документа, изображения, данных мультимедиа и т. д.) уникальных свойств ("отпечатков"), характеризующих исходный документ [11]. Извлеченные характеристики составляют базу данных "отпечатков" (сигнатур), по которой осуществляется контентный анализ передаваемой информации. Для сокращения размера сигнатуры используется подход к формированию сигнатуры, основанный на выборке определенной части документа.

Применение данной технологии позволяет добиться высокой точности обнаружения. К недостаткам данной технологии относится отсутствие инвариантности уникальных характеристик к применению легитимных преобразований, а также невозможность их выделения для некоторых типов данных.

Наличие в данных мультимедиа (видео и аудио данных) и изображениях достаточного набора уникальных свойств позволяет использовать данную технологию в процессе идентификации передаваемой информации. В то же время наличие канала утечки, обусловленного преобразованием формата, разрешения и вида кодера видеоданных, делает невозможным применение данной технологии ввиду изменения не только набора уникальных свойств, но и типа данных, из которого они извлекаются.

К третьей группе методов устойчивого маркирования относится технология цифрового водяного знака, которые формируют объекты со скрытым идентификационным слоем (ОСИС). ОСИС могут быть использованы для защиты авторских прав, обнаружения подмены данных, проверки подлинности или вставки дополнительной информации. ОСИС представляет собой видимый или невидимый знак (информационную последовательность), встраиваемый в исходные данные. Классификация ОСИС осуществляется по двум направлениям (рисунок 1.2) [10].

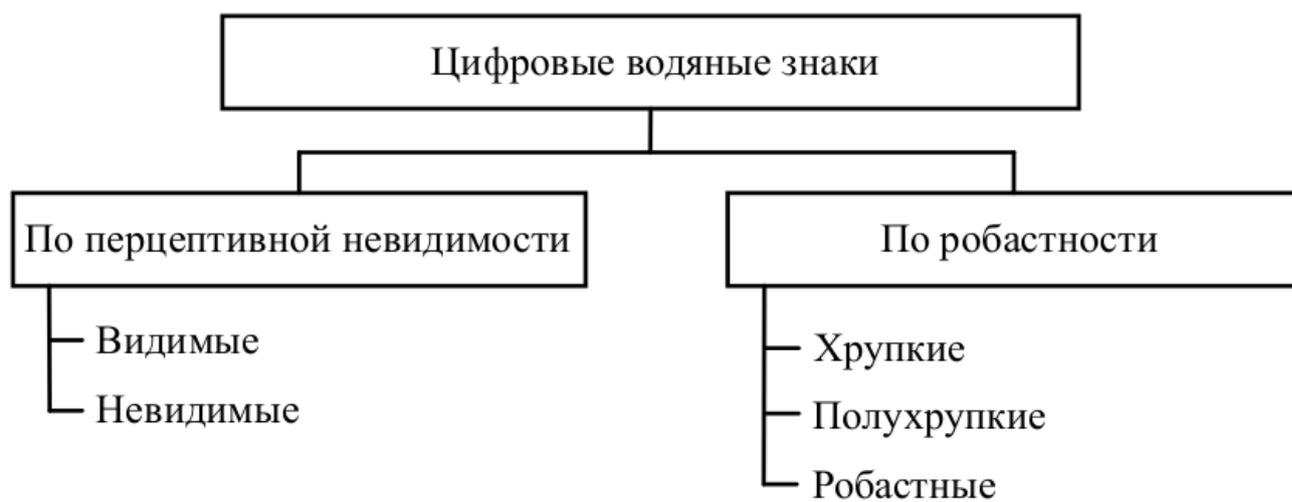


Рисунок 1.2 – Классификация цифровых водяных знаков

По критерию устойчивости (надежности) ОСИС могут быть представлены следующими группами:

- устойчивый водяной знак (РВЗ) – обеспечивает устойчивость к внесению искажений и осуществлению различных преобразований;
- хрупкий водяной знак – разрушается при внесении искажений и осуществлении различных преобразований;
- полухрупкий водяной знак – разрушается отдельным типом искажений (преобразований), однако обеспечивает устойчивость к другим типам искажений (преобразований) [10].

В случае применения преобразований и внесения искажений в хрупкие и полухрупкие водяные знаки невозможно осуществить извлечение встроенной информации ввиду разрушения водяного знака. Указанная особенность не

позволяет использовать данные ОСИС в процессе защиты видеоинформации от утечки, обусловленной преобразованием формата данных. В отличие от хрупких и полухрупких водяных знаков РВЗ способен обеспечить свойство инвариантности встроенных данных в случае применения преобразований и внесения искажений.

По перцептивной (относящейся к зрительной системе человека) прозрачности ОСИС разделяются на видимые и невидимые. Примером видимого ОСИС для изображений и видеоданных является встраивание электронной подписи. Недостаток использования видимых ОСИС заключается в возможности удаления или модификации встроенных данных, что, в свою очередь, не позволяет правильно идентифицировать владельца либо определить подмену области исходных данных. Невидимые ОСИС лишены данного недостатка, однако в процессе их извлечения необходимы дополнительные этапы, направленные на определение наличия водяного знака и восстановление данных, которые они содержат.

Невидимые устойчивые водяные знаки характеризуются следующими параметрами [10]:

- емкость встраивания (полезная нагрузка)  $C_{ap}$  – количество информации, которое может быть встроено (внедрено) в контейнер (под контейнером понимаются данные, используемые для сокрытия в них информации);

- невидимость (перцепционная прозрачность)  $I_{nv}$  – качественная характеристика, отражающая степень искажения контейнера встраиваемыми данными. Данная характеристика основана на перцептивном восприятии человека;

- обнаруживаемость (сложность обнаружения)  $U_{nd}$  – количественная характеристика, отражающая степень искажения статистических характеристик контейнера, не связанных с перцептивным восприятием человека;

- устойчивость  $R_{ob}$  – способность встроенных данных сохранять свойство инвариантности после осуществления различных преобразований над контейнером, подмены или удаления встроенных данных;

- извлекаемость  $E_{xt}$  – способность правильного извлечения встроенных данных из контейнера.

Согласно классификации, представленной в работе [13], РВЗ могут быть разделены на следующие категории (рис. 1.3):

– закрытые системы РВЗ (I и II типа). Закрытые системы I типа позволяют осуществлять извлечение встроенных данных при наличии исходного (не содержащего водяного знака) контейнера. Закрытые системы II типа, в свою очередь, способны только обнаружить факт наличия/отсутствия встроенного водяного знака. Таким системам помимо исходного контейнера требуется информация о встраиваемом водяном знаке;

– полузакрытые системы РВЗ. В отличие от закрытых систем II типа способны определять факт наличия/отсутствия встроенного водяного знака при отсутствии исходного контейнера;

– открытые (слепые) системы РВЗ. Позволяют осуществлять извлечение встроенных данных только из подписанного контейнера, не накладывая дополнительных требований.

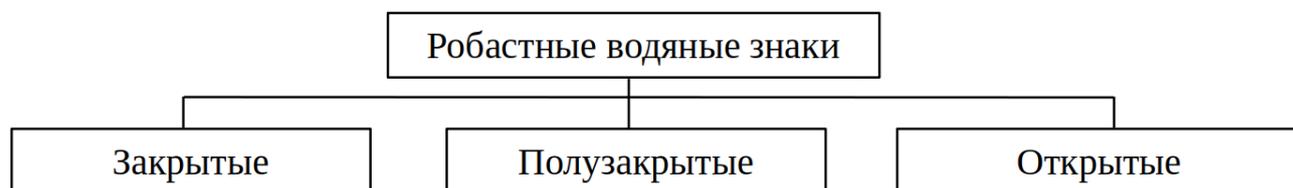


Рисунок 1.3 – Классификация устойчивых водяных знаков

Для обеспечения невидимости РВЗ в процессе встраивания в видеоданные широкое распространение получили стеганографические методы сокрытия информации, позволяющие осуществлять скрытое встраивание дополнительной информации в цифровые объекты за счет внесения некоторых изменений в элементы данных, составляющие цифровой объект [13]. В отличие от маркирования целью стеганографии является скрытая передача данных между двумя сторонами или сокрытие факта такой передачи.

Стеганографические методы могут быть разделены на две группы: лингвистические, основанные на изменении символов и характеристик алфавита

или используемого языка, и технические методы, основанные на использовании специальных средств и способов, обеспечивающих скрытое добавление информации к исходному контейнеру.

Кроме того, стеганографические методы, в зависимости от контейнера, в который осуществляется внедрение информации, могут быть разделены на следующие группы:

- текстовая стеганография;
- стеганография изображений (графическая стеганография);
- мультимедийная стеганография (стеганография аудио и видео данных).

## **1.2 Анализ методов формирования ОСИС в видеоданных**

Все методы сокрытия графических данных по принципу встраивания можно разделить на форматные и неформатные [10].

Форматные методы – системы, в которых основная работа строится в зависимости от формата хранения данных. Использование таких способов сводится к изучению особенностей формата в целях поиска полей формата, изменение которых в определенных условиях не скажется на результате работы с данными. Однако такие методы имеют недостаток – возможность построения алгоритма, который будет способен обнаружить факт сокрытия информации. Стойкость таких систем к воздействиям пассивных злоумышленников не удовлетворяет современным требованиям. Так как в данной работе рассматривается внедрение идентификационного слоя в видеоданные, то исследование форматных методов нецелесообразно.

Неформатные методы – используют не особенности формата графических данных, а непосредственно сами данные, которыми представляется видеоизображение. Применение данного метода приводит к искажениям, которые вносятся скрытым идентификационным слоем (СИС), однако увеличивается стойкость к воздействиям как пассивных, так и активных злоумышленников.

Учитывая предъявляемые требования к устойчивости при формировании ОСИС в видеоданных, не берется в расчет один из самых распространенных методов модификации наименьших значимых бит (less significant bits – LSB) областей изображения, к которым глаз человека наименее чувствителен несмотря на то, что реализация LSB имеет низкую вычислительную сложность. Однако принцип LSB, как инструмент внедрения, довольно часто используется в других методах.

ОСИС видеоданных и методы их формирования можно разделить на три класса:

- пространственные;
- частотные;
- моментные.

Пространственные методы внедряют дополнительную информацию, оперируя значением цвета и яркости изображений. Характеризуются невысокой сложностью расчетов и преобразований исходных видеоданных. К таким методам относятся LSB, метод псевдослучайной последовательности (ПСП), алгоритм Куттера-Джордона, метод блочного скрывания, алгоритмы Лангеларана и Питаса, метод замены палитры и алгоритм Бендера. Формирование и извлечение ОСИС в пространственных методах производится с помощью точных и статистических оценок, которые могут быть вычислены с определенным уровнем погрешности. Недостатком этих методов является плохая устойчивость к различным видам воздействия на стегоконтейнер, так как при внедрении ОСИС за основу принимается принцип, основанный на визуальной избыточности. Преимуществами являются простота реализации и отсутствие сложных вычислений для подготовки и внедрения ОСИС в видеоданные.

Методы, основанные на моментах изображения, распространены не так сильно, как предыдущая группа методов, по причине невысокого выигрыша в устойчивости ОСИС относительно вычислительных затрат. Алгоритмы при таком методе основаны на вероятностной модели изображений, ОСИС встраивается в моменты (описания особенностей) изображений. В таких алгоритмах чаще всего

используют моменты Чебышева и Лежандра, а также ортогональные моменты Цернике.

Частотные методы основаны на преобразованиях в частотной области изображения. Интересны они своей высокой устойчивостью, которая объясняется перераспределением энергии идентификационного слоя и контейнера таким образом, чтобы поместить знак в наиболее значимые области изображения, которые с высокой долей вероятности не будут затронуты при различных воздействиях на ОСИС. К частотным методам относятся дискретное преобразование Фурье (ДПФ), дискретно-косинусное преобразование (ДКП), дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), преобразование Адамара (ПА) и др. Наиболее часто перед маркированием используют ДКП или ДВП, именно эти два метода являются основой для множества других алгоритмов. Высокая популярность объясняется тем, что эти преобразования используются в популярных форматах сжатия изображений – JPEG и JPEG2000.

Существующие стандарты (алгоритмы) кодирования сигнала подвижного изображения используют различные частоты дискретизации видеоданных во временной области. Известно, что человеку для естественного восприятия подвижного изображения достаточно примерно 24 кадра в секунду. Формирование менее 10 кадров в секунду применяется для низкоскоростных визуальных сервисов, например, систем видеонаблюдения, не требующих высокого качества изображения. Применяя эффективные методы кодирования сигнала подвижного изображения, используют статистические характеристики, а также свойства зрительного аппарата человека. Сжатие видеоданных заключается в существенном сокращении статистической и визуальной избыточности. К основным видам избыточности относятся пространственная, энтропийная, межкадровая и визуальная.

Пространственная статистическая избыточность состоит в том, что значения координат в плоскостях RGB или YCrCb сигнала изображения соседних пикселей внутри выбранного кадра коррелируют между собой.

Энтропийная (вероятностная) статистическая избыточность заключается в неодинаковом количестве появлений различных яркостей и цветов в изображении.

Межкадровая (временная) статистическая избыточность проявляется в предсказуемости соседних кадров видео. Например, фон между близлежащими кадрами в большинстве случаев меняется слабо, особенно, если рассматривать системы видеонаблюдения. Именно по этой причине отсутствует необходимость передачи всей информации о смежных кадрах подвижного изображения.

Визуальная избыточность заключается в том, что зрение каждого отдельно взятого человека имеет различную чувствительность к яркости и цвету изображений, к его качеству в области контуров и за их пределами.

Наиболее популярными стандартами кодирования видеоданных на сегодняшний день являются MPEG-2 и MPEG-4. Стеганографические методы, применяемые для встраивания информации в видео, работают в режиме реального времени. В работе [10] встречается утверждение о том, что такие методы должны быть слепыми и обладать малой вычислительной сложностью, как следствие, единственно приемлемым вариантом является встраивание данных непосредственно в поток сжатых данных с целью исключения лишних операций. Кроме того, остается актуальным вопрос объема памяти, который занимают сжатые видеоданные.

В большинстве современных кодеков подвижного изображения применяются три типа кадров, которые имеют принципиальные различия в кодировании.

I-кадры – кадры, которые кодируются независимо от других. Процедура их формирования соответствует процедуре формирования изображения формата JPEG. При формировании кадров учитываются пространственная, визуальная и энтропийная избыточность.

P-кадры – кадры, которые предсказываются (с учетом компенсации движения) по предыдущим I-кадрам или P-кадрам. Характеризуются более высокой степенью сжатия, чем I-кадры.

В-кадры – кодируются на основе двунаправленного предсказания по соседним I- или P-кадрам. Характеризуются максимальной степенью сжатия, а также не используются, как основа для предсказания P-кадров. Кодируются наиболее сложным образом. P- и В-кадры предназначены для устранения межкадровой избыточности.

Любая видеопоследовательность начинает формироваться с I-кадра. Далее очередность кадров многовариантна и зависит от целей, преследуемых при записи видеопотока. В кодеке H.264 построение видео происходит следующим образом: фиксируется I-кадр (опорный кадр), затем на его основе производится вычитание из кадра неподвижных частей изображения. Таким образом создается P-кадр. Затем из этого второго кадра вычитается третий и также создается P-кадр с изменениями. Так формируется серия разностных кадров, которые содержат только изменения между двумя последовательными кадрами. Так как в процессе вычитания существует ненулевая вероятность ошибки, которая может привести к потере артефактов, то через определенное время или количество кадров схема снова повторяется.

ДКП является одним из ортогональных преобразований. Данное преобразование получило широкое применение в алгоритмах сжатия данных с потерями, например, такими как JPEG и MPEG. ДКП является гомоморфизмом ДПФ его векторного пространства. Существует возможность применить преобразование умножением матрицы преобразования, которая выбирается таким образом, чтобы постоянный множитель был равен 1, а преобразование было ортогональным, на вектор. ДКП может применяться как ко всему изображению, так и к отдельным блокам пикселей. На побочной диагонали располагается «граничная» полоса частот. Выше нее – низкочастотные, ниже – высокочастотные. Низкочастотная полоса содержит в себе основную энергию контейнера, изменение каких-либо бит информации в ней приведет к высокому шуму и визуальным отличиям. Высокочастотные коэффициенты отвечают за детали и хранят небольшую часть энергии, именно эта область наиболее подвержена изменениям при внесении ОСИС в видеоданные, а также при отбрасывании бит при устранении

избыточности. Если над изображением выполнить прямое преобразование Фурье, то в его частотном представлении основную информацию будут нести низкие частоты, в то время как высокие частоты будут описывать шум и неразличимые детали. Удаление 50% высокочастотной информации повлечет за собой удаление всего 5% полезной информации. Наиболее эффективным является формирование ОСИС в среднечастотной области, так как она обладает достаточной стойкостью по отношению к внешним воздействиям и одновременно менее чувствительна к изменениям, чем низкочастотная область.

Метод LSB реализуется путем замены младших битов составляющей цвета на биты дополнительной информации. Основывается данный метод на визуальной избыточности графических данных при их цифровом представлении. Первый шаг алгоритма заключается в том, что изображение переводится в набор бит по каждой из компонент цвета. В нулевой пиксель заносится информация о факте наличия ОСИС в видеоданных (встраивается 8 суммарных битов младших разрядов на биты любого спецсимвола). В следующие пиксели вносится информация о размере скрытого слоя. Далее, пока сообщение не закончится, на места младших битов встраиваются биты ОСИС. Алгоритм извлечения осуществляется в обратном порядке: информация извлекается до заблаговременно определенного размера идентификационного слоя.

Метод на основе базисных функций Хаара. При внедрении в видео ОСИС ставится задача однозначно определить владельца информации с помощью идентификационной информации, которую содержит скрытый слой. Существуют две стратегии формирования ОСИС:

- формировать ОСИС в каждом кадре;
- формировать ОСИС в определенных кадрах согласно заранее определенному правилу.

При этом ОСИС должен обладать следующими характеристиками:

- помехоустойчивость;
- защищенность от фальсификации;
- извлекаемость владельцем с высокой точностью;

- устойчивость к воздействиям (преднамеренным и непреднамеренным), применяемым к видеоданным.

При внедрении ОСИС по критерию в определенные кадры возможны следующие трудности: высокая вероятность нарушения синхронизации между процессом внедрения и извлечения дополнительной информации. В результате получаем неизменный ОСИС, однако возможность извлечь его не будет доступна. В таком случае возникает задача поиска именно тех кадров, в которые внедрялся ОСИС. Простейшие алгоритмы встраивания, например встраивания дополнительной информации в каждый  $n$  кадр, имеет очень низкую устойчивость, так как при простейшей вырезке части информации синхронизация будет потеряна, последующее извлечение невозможно осуществить. Поэтому возникает необходимость выбирать кадры, которые будут соответствовать определенному критерию, а также формировать алгоритмы поиска этих кадров.

На практике для реализации стратегии внедрения ОСИС в строго определенные кадры необходимо производить спектральный анализ каждого кадра видеоданных. В большинстве случаев спектральный анализ выполняется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Однако, в таком случае требуется большое количество времени для обработки всего видеопотока. Среди различных систем базисных функций в настоящее время наиболее часто используются системы функций Уолша и Хаара. Однако, в [11] предлагается решить эту проблему используя именно базисный вейвлет Хаара, так как спектр, полученный с помощью этого базиса, значительно превосходит спектр, полученный с помощью базиса Уолша, в информативном плане. В таком случае для получения частотного описания ограничиваются вычислением корреляции определенного кадра только с одной модифицированной функцией Хаара.

### **1.3 Проблема обеспечения устойчивости ОСИС в видеоданных и постановка задачи исследования**

Проведенный выше анализ методов формирования ОСИС в видеоданных показал, что все они имеют ряд присущих недостатков в области обеспечения свойства устойчивости. И если удастся достичь приемлемых показателей помехоустойчивости, то только в случае жестких специфических ограничений, исключающих возможность универсализации этих методов. С другой стороны, попытки достичь высокой устойчивости ОСИС в видеоданных сталкиваются с проблемой невидимости. Зачастую, получая стойкий к искажениям и преобразованиям идентификационный маркер, метод или алгоритм вносит достаточно заметные невооруженным взглядом искажения в видеоряд. В этой связи можно обозначить противоречие между требованием авторов и обладателей информации – видеоданных [14] в обеспечении высокой устойчивости ОСИС, подтверждающих их правообладание, при сохранении приемлемого качества видео или достаточной невидимости встроенного маркера. Следует отметить, что разрешение этого противоречия с помощью научного подхода будет сводиться, в первую очередь, к решению квазиоптимизационной задачи по нахождению оптимальных параметров устойчивости и невидимости ОСИС в видеоданных.

Квазиоптимальность определяется двумя факторами. Во-первых, невозможно учесть полное множество факторов, влияющих на наблюдателя ОСИС. К тому же необходимо принимать во внимание саму скрытность алгоритма чтения и идентификации невидимого маркера и факт обладания этой скрытой информацией об алгоритме лицами, проверяющими видеоданные. Во-вторых, свойство устойчивости не бесконечно. Сам факт возможного уничтожения ОСИС вместе с видеоданными определяет конечность этого свойства. В этой связи возникает необходимость введения граничных значений и ограничения видов преобразований видеоданных, в рамках которых будет решаться задача исследований.

Таким образом выявленное противоречие обусловило необходимость определения в качестве цели научного исследования разработку математического и программного обеспечения обработки видеоданных с объектами, содержащими скрытый идентификационный слой, обеспечивающего повышение устойчивости этих объектов к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки. Декомпозиция цели исследования позволила определить его частные задачи:

1. Провести анализ состояния проблемы использования ОСИС в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных или их отдельных структурных элементов видеоданных.

2. Выполнить моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области структурных элементов видеоданных и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству этих элементов.

3. Разработать алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического ОСИС для выбора областей его формирования, повышающих устойчивость к комбинациям множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

4. Разработать алгоритм контроля целостности динамического ОСИС, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству структурных элементов видеоданных.

5. Провести численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

6. Разработать программные средства обработки видеоданных, содержащих динамический ОСИС, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки.

Свойство устойчивости ОСИС имеет комплексный характер, поэтому его необходимо рассматривать, декомпозируя на отдельные составляющие воздействия на видеопоток, искажающие идентификационный слой.

Логическим завершением этапа постановки задачи научного исследования является процедура определения ограничений и допущений работы. Анализ предметной области исследований и требований по значениям устойчивости ОСИС, внедряемых в видеоданные, позволил определить следующее: ОСИС должен сохранять возможность обнаружения и распознавания при допустимом уровне невидимости в следующих случаях:

1. Допустимое геометрическое уменьшение размеров видеокadra по ширине и/или высоте – не более, чем в 2 раза от начальных размеров.
2. Площадь части видеокadra после обрезки – не менее 25% от начальных размеров.
3. Минимально возможное количество кадров в обрезанном по времени видео для детектирования ОСИС – 100 кадров (при частоте 25 кадров/с, длительность ролика – 4 с).
4. Минимальная скорость видеопотока после перекодирования – 400 Кбит/с для разрешения HD и 600 Кбит/с – для FullHD.
5. Устойчивость ОСИС должна сохраняться в случае применения следующих кодеков: H.263, H.264, MPEG-2, MPEG-4, VP8.

#### **1.4 Выводы по главе**

Таким образом, в данной главе была выполнена формальная постановка научной задачи, которая определила решение задачи выбора параметров формирования динамических ОСИС, обеспечивающих повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки для заданного множества возмущений, которым подвергаются видеоданные, по критерию пригодности.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОБЪЕКТОВ СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ**

### **2.1 Моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС**

С целью спецификации объекта исследования необходимо определить функциональное предназначение ОСИС в видеоданных. Предполагается в качестве предметной области определить математическое и программное обеспечение обработки видеоданных, содержащих ОСИС, предназначенный для обеспечения контроля за несанкционированным использованием, распространением и утечкой видеоконтента. В этой связи возникает необходимость провести моделирование возможных преобразований видеоданных, подлежащих внедрению идентификационной информации, с целью дальнейшей конкретизации комплексного параметра устойчивости ОСИС.

Итак, имеется некоторая информационная система (ИС), предоставляющая доступ авторизованных пользователей к базе видеоданных. В данном случае под авторизованным понимается пользователь, предварительно прошедший обязательную идентификацию и аутентификацию. Вопросы, рассматривающие нелегального пользователя и защиты от несанкционированного доступа подобного нарушителя, выходят за рамки данного исследования и относятся к ограничению работы. Необходимо обеспечить контролируемый доступ к видеоданным, их распространение, копирование, обработку и т.д. с целью проведения успешного расследования инцидентов в случае утечки. Схема информационной системы, обеспечивающая такой функционал, приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема информационной системы с маркированием видео

Таким образом, в описываемой системе возможен внутренний нарушитель, представляющий из себя легального пользователя ИС, прошедшего идентификацию, аутентификацию и авторизацию. Предполагается на этих этапах присваивать ему уникальный идентификатор в виде числа, представленного в десятичном либо шестнадцатеричном формате. Для обеспечения нормального функционирования системы достаточно шестиразрядного десятичного или пятиразрядного шестнадцатеричного числа (около 1 000 000 пользователей). Такое представление идентификатора и будет выступать в виде ОСИС (маркера), встраиваемого в видеоданные.

Для дальнейшего описания модели преобразований, представляющих угрозу целостности ОСИС, необходимо определиться с возможностями пользователя и априорной информацией о методах защиты, которой он обладает. Пользователь ИС, получивший доступ к видеоданным, может как преднамеренно, зная о маркировании видео, так и случайно изменить размеры видеоизображения (сжатие, изменение разрешения), осуществить обрезку-вырезку изображения, перекодировать видео, изменить частоту кадров, обрезать видео по времени, применить фильтры (Гаусса, медианный), конвертирование в монохромное видео.

Под **преобразованием, представляющим угрозу ОСИС**, будем понимать потенциально возможное действие нарушителя с видеоданными, приводящее к частичному или полному разрушению видео-маркера и исключаящее однозначную идентификацию пользователя ИС, осуществлявшего доступ к видеоресурсам. Тогда отдельно взятое преобразование будет характеризоваться

множеством приемов и способов его реализации. Пользуясь положениями теории множеств, определим  $i$ -тое преобразование, как множество  $U_i = \{u_1^i, u_2^i, \dots, u_k^i\}$ , где  $u_j^i$  –  $j$ -тый способ реализации  $i$ -той угрозы. Тогда общая модель преобразований, угрожающих целостности ОСИС, будет определяться объединением всех множеств преобразований и представлять универсальное множество относительно разрабатываемого метода внедрения ОСИС в видеоданные:

$$U = U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n. \quad (2.1)$$

Полный перечень преобразований видеоданных относительно предметной области исследований приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Преобразования, представляющие угрозу ОСИС

Обозначение преобразования	Описание
$U_1$	Изменение размеров кадра, изменение разрешения изображения, сжатие-растяжение
$U_2$	Обрезка изображения, удаление части кадра из общего изображения
$U_3$	Кодирование и перекодирование видеоданных, компрессия видео с помощью известных кодеков изображения
$U_4$	Изменение частоты кадров, «битрейта»
$U_5$	Вырезание определенного временного отрезка видео, обрезка по времени
$U_6$	Применение различных фильтров изображения
$U_7$	Конвертирование в монохромное видео

С целью решения научной задачи по разработке обеспечения обработки видеоданных с объектами, содержащими скрытый идентификационный слой, предлагается применить терминативный подход. Его суть состоит в определении техник и способов обеспечения устойчивости ОСИС – терминаторов угроз целостности, вызванных преобразованиями видеоданных. Тогда разработка метода внедрения устойчивого маркера будет предваряться анализом существующих методов и способов повышения устойчивости ОСИС на предмет выделения необходимых техник-терминаторов  $t_j$ , позволяющих нивелировать соответствующую угрозу от преобразования видеоданных  $t_j: U_i \rightarrow \emptyset$ . В случае недостатка существующих терминаторов проведение исследований потребует разработки собственных техник для полного отображения множества угрожающих преобразований в пустое множество:

$$\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle: U \rightarrow \emptyset, \quad (2.2)$$

где  $\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle$  – множество терминаторов – техник и способов обеспечения устойчивости ОСИС, используемых в разрабатываемом методе маркирования видеоданных.

Таким образом, возникает необходимость проведения критического анализа существующих методов и подходов обеспечения устойчивости (устойчивости) ОСИС, встраиваемых в видеоданные, с целью определения применимости определенных техник в разрабатываемом методе.

## **2.2 Анализ существующих методов обеспечения устойчивости ОСИС видеоданных**

В различных источниках приводится описание множества методов внедрения ОСИС как в статичные изображения, так и в видеопоследовательность.

Однако большинство методов внедрения в видео зачастую сводятся к последовательному покадровому маркированию статичных изображений. Таким образом, целесообразно будет рассматривать методы повышения устойчивости ОСИС, встраиваемых как в изображения статичные, так и динамически изменяемые во времени. Существующие методы формирования ОСИС в изображения можно классифицировать на пространственные и частотные. Ввиду низкой устойчивости ОСИС на основе внедрения в пространственную область изображений дальнейший анализ посвятим рассмотрению частотных методов встраивания, использующих различные базисы спектрального преобразования (дискретное косинусное преобразование (ДКП), вейвлет-преобразование, дискретное преобразование Фурье (ДПФ)).

В работе [17] предложен трехэтапный метод маркирования статичных изображений, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании (ДВП).

На начальном этапе производят  $L$ -уровневое ДВП исходного изображения. Количество уровней разложения  $L$  определяется опытным путем с учетом неравенства  $L \leq \min(n_x, n_y) - 1$ , где  $n_x, n_y$  – кратность размера скрытого слоя по отношению к размерам изображения по ширине и высоте соответственно. Коэффициенты вейвлет-спектра изображения задаются как  $f_{o,l}(m, n)$ , где  $o$  – коэффициент детализации спектра изображения,  $l$  – порядковый номер уровня вейвлет-разложения,  $m$  и  $n$  – координаты высоты и ширины вейвлет-коэффициента. Автором количество уровней детализации определено как 4, причем убывание номера уровня соответствует движению от грубой к точной детализации. Далее на этом же этапе осуществляется одноуровневое вейвлет-преобразование изображения скрытого объекта, при этом ОСИС преобразуется в матрицу вейвлет-коэффициентов  $w_{o,1}(m, n)$ , где  $o$  изменяется в пределах от 1 до 4.

На следующем этапе матрицы вейвлет-коэффициентов  $f_{o,l}(m, n)$  и  $f_{4,L}(m, n)$  для каждой  $o$  и  $l$  разбиваются на непересекающиеся массивы, для каждого из которых рассчитывается так называемая «мера визуальной значимости» [17]. В основу расчета этой меры легла информация о человеческом зрительном

восприятию. Величины «значимости» конкретного массива спектральных коэффициентов определяют глубину встраивания в этот массив ОСИС. Для вычисления «значимости» используется определение спектральной (частотной) чувствительности, формально определяемой как контрастный эквивалент изображения, имеющий потенциальную возможность детектирования на определенной полосе частот. В рассматриваемом методе была использована модель частотной чувствительности *Dooley* [18]:

$$C(w_1, w_2) = 5,05e^{-0,178(w_1+w_2)}(e^{0,1(w_1+w_2)} - 1), \quad (2.3)$$

где  $C(w_1, w_2)$  – матрица частотной чувствительности, а  $w_1$  и  $w_2$  – пространственные частоты, выраженные в периодах на единицу угла наблюдения. Для использования массива  $C(w_1, w_2)$  в рассматриваемом методе частоты  $w_1$  и  $w_2$  конвертируются в рад/пиксели.

Значимость блока вейвлет-коэффициентов вычисляется по формуле:

$$S(f_{o,l}^i(m, n)) = \sum_{w_1, w_2} C(w_1, w_2) |F_{o,l}^i(w_1, w_2)|^2, \quad (2.4)$$

где  $F_{o,l}^i(w_1, w_2)$  – нормированный спектр Фурье массива  $f_{o,l}^i(m, n)$ . «Значимость» блока изображения, представленного массивом спектральных коэффициентов  $f_{o,l}^i(m, n)$  прямопропорционально зависит от его спектральной плотности мощности  $|F_{o,l}^i(w_1, w_2)|^2$ .

Согласно [17], в изображении маркируются только те блоки, значимость которых превышает заранее определенное пороговое значение. Количество участков, в которые возможно встраивание, рассчитывается в процентном отношении от общего их количества. Принятие решения о маркировании того или иного участка изображения, заданного массивом вейвлет-коэффициентов, осуществляется на основе двоичного ключа стеговложения  $k(i, o, l)$ . Каждый бит ключа определяет, будет ли происходить встраивание в  $i$ -й массив на  $l$ -м уровне вейвлет-разложения и  $o$ -м уровне детализации спектра изображения. В случае, если  $k(i, o, l) = 1$ , массив

вейвлет-коэффициентов маркируется следующим образом:

$$f_{o,l}^{w,i}(m,n) = f_{o,l}^i(m,n) + s_{o,l}^i w_{o,l}(m,n). \quad (2.5)$$

В случае, если  $k(i, o, l) = 0$ , маркирование не производится:

$$f_{o,l}^{w,i}(m,n) = f_{o,l}^i(m,n). \quad (2.6)$$

В выражении (2.5) значение коэффициента  $s_{o,l}^i > 0$  выбирается согласно оптимальным значениям невидимости ОСИС и его стойкости к различного рода преобразованиям. Для определения коэффициента используют следующее выражение:

$$s_{o,l}^i = \bar{s} \sum_{m,n} |f_{o,l}^i(m,n)| \sqrt{\frac{s(f_{o,l}^i(m,n))}{\max_j \{s(f_{o,l}^i(m,n))\}}}, \quad (2.7)$$

где  $\bar{s}$  принимает значения от 0,2 до 1. Максимальное значение в знаменателе выражения (2.7) предназначено для нормирования спектра изображения, а также для выделения более значимых по спектру его участков, пригодных для формирования ОСИС. Таким образом, маркеры внедряются тем глубже, чем «значительней» спектр участка изображения. В [17] утверждается, что подобная техника позволяет добиться устойчивости в случае угроз, сохраняющих качество исходного изображения. Однако устойчивость прямо пропорционально зависит от величины коэффициентов, определяемых выражением (2.7), и в то же время наблюдается обратно пропорциональная зависимость свойства невидимости скрытого слоя. Поэтому чем большее количество массивов вейвлет-коэффициентов промаркированы, тем ниже показатель невидимости. Экспериментальные результаты в [17] демонстрируют эффективное процентное соотношение маркированных блоков изображения к общему их количеству как диапазон 0,25–0,75.

На заключительном этапе метода матрица промаркированных вейвлет-коэффициентов подвергается обратному вейвлет-преобразованию. В конечном счете результатом работы алгоритма является изображение с ОСИС на уровне коэффициентов вейвлет-преобразования.

В качестве плюсов предлагаемого метода можно отметить: техника формирования ОСИС в наиболее спектрально выраженные участки является терминативной для угроз  $U_4, U_5, U_7$  и частично  $U_3$ .

Недостатки:

- необходимость поиска оптимального соотношения между глубиной формирования ОСИС и его невидимостью;
- процедура извлечения ОСИС требует обязательного наличия исходного немаркированного изображения;
- базовая основа характеристики невидимости скрытого слоя построена на модели зрительного восприятия человека, что носит достаточно субъективный характер;
- вычислительная сложность процедуры формирования определяется количеством уровней вейвлет-разложения, а эффективность и устойчивость ОСИС напрямую зависит от вида базисного вейвлета и особенностей изображения, что исключает возможность использования одного универсального базиса.

В работе [19] представлен алгоритм формирования ОСИС, использующий множество коэффициентов в дискретизации по уровню. Автором заявлено повышение коэффициента устойчивости ОСИС от внешних преобразований при сохранении достаточного уровня невидимости [19]. Предлагается методика повышения устойчивости объекта со скрытым идентификационным слоем к внешним преобразованиям контейнера на основе выбора оптимального соотношения значений коэффициента глубины («силы») формирования, слабоискажающих фильтров дискретного вейвлет-преобразования и количества уровней вейвлет-преобразования.

Автором была обнаружена возможность замены традиционных для алгоритма *JPEG 2000* квантователей на их гибридный эквивалент. Подобный подход

обеспечивает независимость квантования коэффициентов вейвлет-преобразования от путей решетки и позволяет формировать ОСИС без дополнительных этапов в ходе перекодирования изображения. Отмечается значимость процедуры выбора коэффициентов ДВП для их использования в алгоритме маркирования. Алгоритм *JPEG 2000* предопределяет меньшие изменения вейвлет-коэффициентов на низких частотах и большие – на высоких одного уровня вейвлет-разложения. Однако известно, что вариативность высокочастотных (ВЧ) вейвлет-коэффициентов в меньшей мере воздействует на качество изображения. Таким образом, низкочастотные (НЧ) диапазоны *LL* определены в качестве самых существенно влияющих на изменение исходного изображения. Для уменьшения заметности изменений в изображении со скрытым идентификационным слоем коэффициенты ДВП *LL*-диапазона исключают из процесса маркирования. ОСИС внедряют в уровни *HL*, *LH* и *HH*, причем задействуются только два верхних уровня вейвлет-спектра. Чтобы сформировать ОСИС в изображении, в [19] предлагается изменять шаг квантования на некоторое значение  $\Delta$  по отношению к исходному квантователю *JPEG 2000*. Также обоснована применимость и большего значения шага квантования путем кратного увеличения исходного шага. Условием такого подхода выступает случайное равномерное распределение сдвига  $d$  на интервале  $[-\Delta/2, \Delta/2]$ .

Шаг квантования определяется согласно ОСИС выражением:

$$D' = \left\{ \begin{array}{l} D_j^0(d_0), \text{ если } m_i = 0 \\ D_j^1\left(d_1, |d_0 - d_1| = \frac{\Delta}{2}\right), \text{ если } m_i = 1 \end{array} \right\}, \quad (2.8)$$

где  $D'$  – шаг квантования,  $d_0, d_1$  – сдвиги,  $\Delta$  – величина шага квантователя,  $m_i$  – бит ОСИС.

Отображение, описывающее процедуру формирования ОСИС в изображении *JPEG 2000*, представлено следующей формулой:

$$F(x_i, m_i) = \left[ \frac{x_i - d_{m_i}}{\Delta} \right] \Delta + d_{m_i}, \quad (2.9)$$

где  $d_{m_i}$  – сдвиг  $\Delta$  выбранного шага квантования.

Маркирование изображения ОСИС осуществляется в два этапа. На начальном происходит модификация решетки компрессии *JPEG 2000* при квантовании по закону бинарного представления ОСИС. Модификация необходима для исключения тех решеток, которые не участвуют в кодировании маркера. На заключительном этапе производят обратное квантование в ходе декомпрессии изображения. Восстановление пикселей изображения осуществляется согласно выражению:

$$x'_i = \text{sign}(q_i)(|q_i| + \delta)\Delta + d_{m_i}, \quad (2.10)$$

где  $\delta$  – поправка декомпрессии, изменяемая в пределах от 0 до 1, по умолчанию  $\delta = 0,5$ .

Анализ экспериментальных результатов предложенного подхода показал, что многокоэффициентный алгоритм, основанный на формировании ОСИС в процессе квантования, характеризуется достаточно высокими значениями устойчивости к искажениям контейнера. Автором указывается, что показатель невидимости скрытого слоя и его объема остался на удовлетворяющем условиям исследования уровне. Однако стоит отметить недостаточно высокие значения устойчивости при использовании в качестве воздействия на отдельные статические изображения алгоритма сжатия *JPEG 2000*. В дополнение к этому автором в качестве направления дальнейших исследований было предложено изучить возможность повышения устойчивости ОСИС за счет решения оптимизационной задачи распределения ресурсов процесса формирования коэффициента глубины, количества уровней вейвлет-преобразования и выбора самого типа вейвлета для фильтрации статического изображения.

Достоинства метода [19]:

– равномерное распределение встраиваемых бит в отдельные пути решеток кодирования *JPEG* 2000 позволяет сохранить невидимость ОСИС при значительном объеме маркера;

– интеграция процедуры внедрения ОСИС в цепь компрессии повышает скорость маркирования.

Однако методу присущи значительные недостатки:

– ориентированность на единственный кодер *JPEG* 2000;

– ограничение только на применение в процессе первоначальной компрессии с потерями, в противном случае отсутствие квантования не позволит провести формирование ОСИС.

В [20] был предложен модифицированный способ внедрения ОСИС *Elham*, позволяющий добиться устойчивости к *JPEG*-компрессии, повысить устойчивость к зашумлению и изменению яркости за счет авторского метода на основе вариативного использования коэффициентов преобразования Адамара в частотной области и дифференциации параметров формирования ОСИС.

Алгоритм формирования ОСИС основан на маркировании изображения в цветовой области элементами монохромного ОСИС в виде битовой последовательности. Внедрение бит ОСИС в частотную область происходит аналогично *Elham*-алгоритму с дополнением в виде авторской процедуры выбора значений коэффициентов преобразования Адамара. Для достижения максимального эффекта на начальном этапе для маркирования используют блоки, обладающие высокой энтропией с весовым значением спектральных коэффициентов  $|w_i| > 0,2$ . Далее маркируемое изображение разбивается на участки  $8 \times 8$ , такой размер блока обеспечивает лучшую стойкость к сжатию алгоритмом *JPEG*. Энтропия определяется согласно выражению:

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i), \quad (2.11)$$

где  $p_i$  – вероятность появления точки со значением яркости  $i$ . Для внедрения ОСИС используют только те блоки изображения, значение энтропии которых превышает

некоторый порог  $E_1$ . Далее каждый отобранный блок контейнера преобразуется в массив коэффициентов дискретно-косинусного преобразования (ДКП). Затем коэффициенты ДКП  $d_i$  подвергаются проверке условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} (d_i > c_1) \text{ и } (d_i < c_2), \text{ если } d_i > 0 \\ (d_i > -c_2) \text{ и } (d_i < -c_1), \text{ если } d_i < 0 \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

где пороговые значения коэффициентов  $c_1, c_2$  задаются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1 = 50, c_2 = 80, \text{ если } |w_i| * \alpha \geq 80 \\ c_1 = 70, c_2 = 100, \text{ если } |w_i| * \alpha < 80 \end{array} \right\}$$

В случае удовлетворения условия (2.12) осуществляется ДПА с анализируемым блоком изображения. Следующим этапом является изменение спектрального аналога коэффициента  $d_i \rightarrow a_i$ , полученного с помощью ДПА:

$$a'_i = a_i + sign * \alpha_i * w_i, \quad (2.13)$$

где  $a'_i$  – модифицированный коэффициент ДПА,  $\alpha_i$  – коэффициент вариативности, знак  $sign$  определяется согласно выражению:

$$\left\{ \begin{array}{l} sign = 1, \text{ если } (d_i > c_1) \text{ и } (d_i < c_2) \\ sign = -1, \text{ если } (d_i > -c_2) \text{ и } (d_i < -c_1) \end{array} \right\}$$

Измененные данные дескриптора преобразования Адамара записывают в ячейки матрицы  $M$ , соответствующие спектральным коэффициентам согласно внедряемой последовательности ОСИС. Перевод спектра с внедренным ОСИС в исходное изображение производят с помощью обратного дискретного преобразования Адамара.

На заключительном этапе происходит встраивание менее значимых коэффициентов, значения которых лежат в пределах  $|w_i| \in [0; 0,2]$ , в блоки с энтропией  $E_2 > E_1 - 2$ . Пороговые значения коэффициентов  $c_1, c_2$  на этом этапе составляют 0 и 30 соответственно.

Автором заявляется повышение устойчивости к *JPEG*-преобразованию и Винеровской фильтрации. В дополнение устойчивость встраиваемой информации к вредоносным воздействиям может быть повышена и за счет применения способа уменьшения объема ОСИС.

В ходе анализа было выявлено, что частотное преобразование Адамара обеспечивает значительное сокращение вычислительной сложности алгоритмов формирования ОСИС, при этом сохраняя устойчивость на уровне методов на основе ДКП. Автором предложено представлять скрытый идентификатор в виде цифрового изображения. В дальнейшем последовательность бит, представляющих изображение ОСИС, предполагается внедрять в специальном образом выбранные коэффициенты дискретного преобразования Адамара (ДПА), которое по своей сути является одним из базисов спектрального представления сигнала, в частности изображения. Такой подход, по заявлению автора, обеспечивает повышение устойчивости к сильной компрессии алгоритмом *JPEG*. В заключении работы [20] предлагается комплексное использование алгоритма *Elham* и специальный выбор коэффициентов ДПА для цифрового маркирования данных, обладающего практически абсолютной устойчивостью к сжатию *JPEG* и улучшенной устойчивостью (96% от коэффициента качества *JPEG*) по сравнению с алгоритмом *Elham* в рамках определенных автором ограничений и допущений области своих исследований. Однако существенным недостатком предложенного метода является его строгая ориентированность на статичность изображения. К тому же недостаточно внимания в [20] было уделено показателю невидимости устойчивого ОСИС. В этой связи предлагаемая модификация алгоритма *Elham* совместно с частотным базисом Адамара слабо применима для обеспечения устойчивости ОСИС видеоданных, за исключением техники представления идентификационной информации в виде изображения в спектральной области, которая может

выступить в качестве терминатора угроз от преобразований  $U_3$  и частично  $U_6$ .

Известна методика выбора набора вейвлет-фильтров для ДВП, которая учитывает необходимый уровень устойчивости ОСИС в условиях сжимающих преобразований, уменьшения разрешения и размеров изображения (авторское определение – «деградирующие внешние воздействия») [21]. Автором показано, что использование для формирования ОСИС базисных вейвлетов, отличных от классических, используемых в алгоритме сжатия *JPEG 2000* (Хаара, Добеши 9/7), может привести к непредсказуемым результатам. Устойчивость маркера может как повыситься, так и значительно уменьшиться. Использование же классических базисов приводит к снижению качества «невидимости» ОСИС совместно с достаточно спорным повышением устойчивости.

Исследования в [21] привели к применению многоуровневого (3-х и более уровней вейвлет-разложения) ДВП на основе базисного вейвлета Добеши 2, внедрению маркера в НЧ диапазон *LL*. В качестве нового решения, обеспечивающего устойчивость к процедуре дискретизации уровней НЧ диапазона, автором заявлен многокоэффициентный метод на основе дискретизации и псевдошумовой маски. Квадратную матрицу со стороной 4 формируют таким образом, чтобы распределение бит в ней было равномерным. Далее матрица последовательно накладывается на неперекрывающиеся матрицы вейвлет-коэффициентов НЧ диапазона вейвлет-спектра. Значения вейвлет-коэффициентов дискретизируют по правилу, определяемым битами матрицы ОСИС, битом самого маркера и шага дискретизации. Шаг дискретизации  $q$  определяет глубину встраивания бита ОСИС. На заключительном этапе осуществляется классическая процедура обратного восстановления величин вейвлет-коэффициентов НЧ диапазона. Процедура формирования ОСИС задается следующими выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_0(i, j) = Q_{odd}(i, j) * q, \\ \Omega_1(i, j) = Q_{even}(i, j) * q, \text{ если } t_b = 1, \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_0(i, j) = Q_{even}(i, j) * q, \\ \Omega_1(i, j) = Q_{odd}(i, j) * q, \text{ если } t_b = 0 \end{array} \right\}'$$

$$\text{где } \left\{ \begin{array}{l} Q_{odd}(i, j) = \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) + 1, \text{ если } \left( \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) \right) \bmod 2 = 0, \\ Q_{odd}(i, j) = \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right), \text{ если } \left( \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) \right) \bmod 2 = 1, \end{array} \right\},$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{even}(i, j) = \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right), \text{ если } \left( \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) \right) \bmod 2 = 0, \\ Q_{even}(i, j) = \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) + 1, \text{ если } \left( \text{round} \left( \frac{\Omega(i, j)}{q} \right) \right) \bmod 2 = 1, \end{array} \right\},$$

$m_b$  – внедряемый бит маркера,  $\Omega(i, j)$ ,  $\Omega_1(i, j)$  и  $\Omega_0(i, j)$ ,  $\Omega_{even}(i, j)$  и  $\Omega_{odd}(i, j)$  – исходный НЧ вейвлет-коэффициент, НЧ вейвлет-коэффициенты, соответствующие единичному и нулевому биту маски, четный и нечетный уровни дискретизации НЧ коэффициента координаты  $(i, j)$  соответственно.

Предлагаемый алгоритм обеспечивает устойчивость ОСИС к компрессии по алгоритму *JPEG 2000* за счет специальной процедуры использования коэффициентов формирования в низкочастотной области. С целью оценки адекватности разработанного алгоритма формирования ОСИС относительно построения стеганосистем автором предложены результаты анализа устойчивости ОСИС к самым распространенным частотным преобразованиям: фильтрации и масштабированию. Были использованы: НЧ-фильтр Гаусса, медианный фильтр  $3 \times 3$  и контрастирующий фильтр. Сравнение проводилось с помощью метода *Chirag-Ganesh*, который на сегодняшний день обладает наилучшей устойчивостью [21]. Результаты анализа показали, что устойчивость ОСИС, встроенных методом выбора набора вейвлет-фильтров для ДВП, к преобразованиям в частотной области не хуже, чем устойчивость ОСИС, встроенных современными стеганографическими алгоритмами на основе ДВП.

В дополнение в работе [21] автором рассмотрен вопрос повышения стойкости ОСИС к обнаружению, т. е. свойства невидимости. Был использован подход, использующий анализ области формирования ОСИС, который в большинстве случаев позволяет определить факт наличия скрытого слоя в контейнере данных. Подобными областями являются: пространства коэффициентов дискретно-косинусного преобразования, коэффициентов

дискретного вейвлет преобразования, координатное пространство и т. п. Следует отметить, что пространство коэффициентов ДВП представляет достаточно сложную область для проведения анализа на предмет формирования невидимых ОСИС. Однако с целью обеспечения невидимости и необнаруживаемости встраиваемого идентификационного слоя в частотную область предлагается повысить априорную неопределенность относительно используемого базиса вейвлет-фильтров. Утверждается, что авторский набор вейвлет-фильтров, а также их неоднократное использование позволит значительно повысить показатель необнаруживаемости ОСИС. Параметры нестандартных вейвлетов или порядок использования стандартных предлагается использовать в качестве секрета, принадлежащего контролирующему ОСИС лицу.

Внедрение ОСИС в спектральные вейвлет-коэффициенты видеопотока, как правило, менее ресурсоемко по сравнению с другими подходами маркирования видео. В этой связи такой подход наиболее применим к системам с низкой производительностью. В [22] описан подход *Sanghavi*. Метод использует формирование ОСИС в изображении за счет изменения координат дискретного спектра вейвлет-коэффициентов. Исходное изображение переводят в спектральное представление путем 4-уровневого ДВП. Маркер классически представляет из себя бинарный вектор. Далее этот вектор внедряют в вейвлет-коэффициенты видео-кадров, меняя их координаты:

$$\begin{aligned} \text{если } W_j = 1, \text{ то } N(C_i) &= N(\max(C_i, C_{i+1}, C_{i+2}, C_{i+3}, C_{i+4})); \\ \text{если } W_j = 0, \text{ то } N(C_i) &= N(\min(C_i, C_{i+1}, C_{i+2}, C_{i+3}, C_{i+4})), \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $W_j$  – бит маркера,  $C_i$  и  $N$  – вейвлет-коэффициент и его индекс.

При этом в процедуре внедрения используются вейвлет-коэффициенты среднечастотного (СЧ) поддиапазона на всех уровнях вейвлет-спектра. Для получения изображения с внедренным слоем проводят обратное ДВП. В качестве преимущества такого подхода авторы отмечают отсутствие необходимости наличия исходного изображения для извлечения скрытого идентификатора. В

процессе извлечения бит вектора идентификатора вычисляют согласно выражения:

$$\begin{aligned} \text{если } WC_i > \text{median}(WC_i, WC_{i+1}, WC_{i+2}, WC_{i+3}, WC_{i+4}), \text{ то } EW_j &= 1; \\ \text{если } WC_i < \text{median}(WC_i, WC_{i+1}, WC_{i+2}, WC_{i+3}, WC_{i+4}), \text{ то } EW_j &= 0, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $EW_j$  – бит извлекаемого маркера,  $WC_i$  – вейвлет-коэффициент изображения с внедренным ОСИС.

В качестве достоинства предложенной в [22] схемы отмечается высокая устойчивость к шумам в ходе преобразования видео (преобразования  $U_1, U_3, U_6$ ) за счет полного охвата СЧ диапазона спектра изображения, а также к изменению битрейта видео (преобразование  $U_4$ ) за счет внедрения маркера в каждый кадр видео, воспринимая его как статическое изображение. Полученные результаты могут быть рассмотрены в качестве техник-терминаторов соответствующих угроз.

Однако рассматриваемому подходу присущ и ряд недостатков: низкая устойчивость к линейным преобразованиям изображения и медианной фильтрации; 4-уровневое дискретное вейвлет-преобразование достаточно ресурсоемко, а обратное ДВП вносит определенные искажения в изображение-контейнер, что сказывается на свойстве невидимости ОСИС.

В работе [23] предложен метод внедрения ОСИС в изображение за счет преобразования, перемешивающего значения коэффициентов ДВП изображения-контейнера НЧ диапазона со значениями маркера. На вход алгоритма кроме изображения-контейнера и ОСИС подаются некоторые коэффициенты, характеризующие удельные веса вейвлет-коэффициентов изображения  $k$  и элементов маркера  $q$ . ОСИС представляется в виде изображения с размерами, равными или меньшими размерам изображения-контейнера.

На первом этапе работы алгоритма идентификатор и изображение-контейнер преобразуют в спектральное представление с помощью трех уровней ДВП на основе базисного вейвлета Добеши. Внедрение элементов ОСИС в НЧ вейвлет-коэффициенты спектра осуществляют аддитивным методом:

$$WC_i = k * C_i + q * MC_i, \quad (2.17)$$

где  $MC_i$  – коэффициенты вейвлет-преобразования изображения идентификатора.

В [23] авторами заявлено, что при оптимальном выборе значений параметров  $k$  и  $q$  возможно достичь достаточно высоких показателей невидимости ОСИС при минимальных потерях и искажениях маркера в процессе извлечения из контейнера. Метод обладает высокой устойчивостью по отношению к шумам изменения разрешения и геометрическим преобразованиям.

В качестве недостатка выступает возможность извлечения ОСИС только при наличии начального немаркированного изображения.

Алгоритм Hong, основанный на изменении вейвлет-коэффициентов СЧ диапазона спектра второго уровня разбиения изображения-контейнера по закону идентификатора, описан в [24]. На вход алгоритма помимо изображения-контейнера и ОСИС подаются единственный параметр  $\alpha$  – весовой коэффициент (глубина) скрытого слоя. Маркер представляется битовой последовательностью. Алгоритм внедрения заключается в следующих этапах:

- ДВП исходного изображения с параметром  $L=2$ ;
- с помощью ПСП определяются вейвлет-коэффициенты, которые будут маркироваться битовой последовательностью идентификатора;
- для каждого вейвлет-коэффициента, выбранного на предыдущем этапе, определяется среднее в рамках некоторого диапазона:

$$m_{i,j} = \text{mean}(C_{i,j-1}, C_{i,j+1}, C_{i,j}, C_{i-1,j}, C_{i+1,j}); \quad (2.18)$$

- далее на основе вычисленных средних осуществляется генерация и встраивание каждого бита маркера:

$$\begin{aligned} \text{если } C_{i,j} > m_{i,j}, \text{ то } WC_{i,j} &= C_{i,j} * (1 + \alpha), W_k = 1; \\ \text{если } C_{i,j} < m_{i,j}, \text{ то } WC_{i,j} &= C_{i,j} * (1 - \alpha), W_k = 0; \end{aligned}$$

(2.19)

– на заключительном этапе изображение со встроенным ОСИС переводится из спектральной области в сигнальную обратным дискретным вейвлет-преобразованием.

В описываемом методе последовательность бит встраиваемого маркера ставится в зависимость от распределения значений вейвлет-коэффициентов исходного изображения, что аналогично процедурам цифровой подписи. Однако по сравнению с последними внедрение маркера ОСИС, согласно [24], обеспечивает незначительные изменения исходного изображения-контейнера, что, по заявлению автора, приводит к повышению устойчивости схемы. Предложенный метод модификации вейвлет-коэффициентов СЧ диапазона спектра изображения по закону ОСИС позволяет обеспечить устойчивость к *JPEG*-компрессии и некоторым шумам конвертирования, что дает возможность использования таких техник в качестве терминаторов угроз  $U_1$ ,  $U_2$  и, частично,  $U_3$ .

Кох и Жао разработали метод внедрения ОСИС путем пропорционального изменения значений коэффициентов СЧ диапазона дискретно-косинусного спектра [25]. Этот подход на сегодняшний день является самым популярным алгоритмом внедрения маркера в спектр ДКП. Алгоритм, описанный в [25], обладает достаточно высокой устойчивостью по отношению к большинству преобразований, однако его высокая временная сложность накладывает серьезные ограничения на область применения. В работе [26] представлен подход к внедрению ОСИС в дискретно-косинусные спектральные коэффициенты СЧ диапазона на основе сортировки участков ОСИС и дискретизации величин этих коэффициентов. Описанный алгоритм дает возможность внедрения достаточно объемных маркеров в изображения, однако не обладает стойкостью к компрессии алгоритма *JPEG*.

В [27] впервые предложено применение ДВП на основе базисного вейвлета Хаара. Такой вейвлет-базис имеет достаточно простое математическое описание, вследствие чего обеспечивает относительно быстрые вычисления и маленькую временную сложность процедуры преобразования изображения контейнера из

сигнальной области в спектральную и обратно. Однако обратной стороной медали выступает низкая устойчивость такого подхода к внедрению ОСИС и классифицирует подобный маркер как полухрупкий.

В ходе проведенного анализа современных методов повышения устойчивости ОСИС в видеоданных и изображениях был выявлен ряд достоинств и недостатков, способствующих впоследствии разработке модифицированного метода внедрения ОСИС. В качестве итогового результата обозначим известные техники и подходы к внедрению ОСИС в изображения (табл. 2.2) с оценкой возможности терминирования преобразований, выявленных в пп. 2.1. За основу таблицы взята классификация методов, представленная в [28].

Таблица 2.2. Техники внедрения устойчивых ОСИС в изображения

№	Техника	Терминируемая угроза преобразования $U$	Недостатки
1	Модификация 1000 самых больших коэффициентов ДКП	Устойчивость к сжатию $U_1, U_3$	Вычислительная сложность двумерного ДКП
2	Модификация всех детализирующих коэффициентов диапазонов первого уровня разложения четырехуровневого ДВП	Сильная невидимость	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
3	Модификация всех коэффициентов $LL$ -диапазона ДВП изображения	-	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
4	Модификация наибольших («значимых») детализирующих коэффициентов всех диапазонов трехуровневого ДВП	Хорошая невидимость	Необходим поиск оптимального базисного вейвлета
5	Модификация «значимых» коэффициентов трехуровневого ДВП на основе биортогонального базисного вейвлета	Устойчивость ОСИС ко многим видам преобразований $U_1 - U_3, U_6$	-
6	Модификация наибольших коэффициентов каждого диапазона трехуровневого ДВП кроме верхнего уровня разложения	$U_1, U_3$	Необходим поиск оптимального базисного вейвлета

7	Модификация 1000 наибольших коэффициентов пакетного ДВП. Встраиваются коэффициенты ДВП изображения ОСИС.	$U_6$	Необходим поиск оптимального базисного вейвлета
8	Модификация коэффициентов трехуровневого ДВП, превышающих заданный порог	Высокая устойчивость ОСИС к некоторым видам преобразований, $U_1, U_2$	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
9	Модификация коэффициентов четырехуровневого ДВП, превышающих заданный порог	Высокая устойчивость ОСИС к некоторым видам преобразований, $U_1, U_2$	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
10	Модификация наибольших коэффициентов из ВЧ и СЧ диапазонов вейвлет-спектра на основе базисного вейвлета Хаара	Высокая устойчивость к изменению масштаба $U_1$	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
11	Модификация значимых коэффициентов пятиуровневого ДВП	$U_1, U_2$	Необходим поиск оптимального базисного вейвлета
12	Модификация всех коэффициентов одноуровневого ДВП	Большой объем ОСИС	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
13	Модификация всех детализирующих коэффициентов ДВП на основе базисного вейвлета Хаара	$U_1$	-
14	Модификация ВЧ коэффициентов голубой компоненты изображения в спектре пятиуровневого ДВП	-	Необходим поиск оптимального базисного вейвлета
15	Модификация ВЧ-НЧ и НЧ-ВЧ областей двухуровневого ДВП	$U_3$	Низкая устойчивость к обработке изображения
16	Модификация $n$ -мерного вектора коэффициентов ДВП	Возможность контроля устойчивости, уровня искажений и качества изображения $U_1 - U_3, U_6$	Извлечение ОСИС требует исходное изображение
17	Модификация изображения на основе фрактальных преобразований	-	Ухудшение качества изображения

Следует отметить, что рассмотрение различных техник внедрения ОСИС в пространственную область изображений и видеоданных вынесено за рамки исследования ввиду практической невозможности обеспечения требуемой устойчивости ко множеству преобразований. Результаты моделирования угрожающих преобразований ОСИС и анализа методов их предотвращения легли в основу обоснования методологии при моделировании ОСИС.

### **2.3 Теоретико-множественная модель процесса формирования ОСИС в видеоданных**

С целью нивелирования преобразований, описанных в пп. 2.1, необходимо разработать модель процесса формирования ОСИС в видеоданных. Моделирование будет заключаться в комплексировании способов и техник терминаторов угроз, определяемых объектом исследования. В ходе анализа существующих подходов было выявлено, что внедрение маркера в частотную область и использование для этого наиболее «значимых» спектральных коэффициентов в некоторых случаях областей спектра позволяет успешно противостоять изменениям размеров кадра либо разрешения изображения, сжатию-растяжению (множество преобразований  $U_1$ ), а также процедурам обрезки, вырезания части кадра из общего изображения (множество преобразований  $U_2$ ). Лучшего результата по повышению устойчивости ОСИС достигают техники, использующие НЧ и СЧ диапазоны спектра изображения, так как они являются наиболее значимыми и менее подвержены искажениям при проведении трансформирующих процедур, описанных множествами преобразований  $U_1$  и  $U_2$ . Таким образом обозначим технику внедрения маркера в значимые области НЧ и СЧ диапазона спектра изображения как  $t_1$ , тогда в определенном диапазоне:

$$t_1: \{U_1, U_2\} \rightarrow \emptyset. \quad (2.20)$$

Выбор спектрального подхода к внедрению ОСИС повлек за собой необходимость анализа существующих методов спектрального представления изображений. На сегодняшний день практически весь объем методов перевода изображений из пространственной области в частотную, за редким исключением решения специфических задач по обработке, занимают вейвлет-преобразование (ВП) и преобразование Фурье (ПФ) со своим подвидом – косинусным (синусным) преобразованием (КП).

ВП широко применяется в алгоритмах компрессии изображений *JPEG 2000* и *ICER*. Наряду со множеством преимуществ ВП обладает рядом недостатков, определивших решение по выбору спектрального базиса в сторону ПФ. Так ВП при работе с малыми объемами сигнала, в том числе и изображений, уступает по качеству оконному ПФ. Также при прочих равных условиях вейвлет-базис требует больших вычислительных ресурсов по сравнению с ПФ, а эффективные и быстрые алгоритмы позволяют получать лишь спектральное представление с потерями. В дополнение вейвлет-преобразование изображение с последующим обратным преобразованием немного его размывает, закругляя острые контуры предметов и внося контурный шум, определяемый эффектом Гиббса [28].

Однако самым главным недостатком преобразования с помощью вейвлетов является необходимость выбора базиса из множества известных. Определение вида и типа вейвлетного базиса зависит от конкретной задачи и специфических особенностей обрабатываемого изображения. Для достижения эффекта от процедур спектрального представления определены некоторые правила выбора вейвлета, однако эти правила работают только для решения конкретной задачи и, в редком случае могут быть распространены на широкий класс задач. Анализ работ [19–23] показал, что использование вейвлет-преобразования для обработки изображения в частотной области, как правило, требует проведения дополнительных исследований по поиску оптимального базисного вейвлета.

Преобразование Фурье имеет ряд свойств, полезных для процедур внедрения ОСИС в видеоданные. Свойство независимости амплитудной части спектра от

временного сдвига сигнала в трансляции на обработку изображений можно определить, как вспомогательную технику защиты от обрезки–вырезки части изображения. От временного сдвига зависит только фазовый спектр, который в процедуре маркирования не задействуется.

Следующее свойство ПФ – спектр Фурье ограниченного по времени сигнала является бесконечным и, наоборот, ограниченный спектр при обратном ПФ дает бесконечный по времени сигнал. Это свойство транслирует влияние промаркированных коэффициентов спектра на весь сигнал по своей длительности, а в случае с двумерным ПФ изображения двукратное влияние на все его пиксели, причем в пропорциональных долях присутствия в той или иной частотной составляющей. Свойство симметрии спектра Фурье позволяет использовать только его положительную (вещественную) составляющую, что дает преимущество в вычислительной сложности алгоритмов, реализующих преобразование Фурье. В дополнение необходимо отметить возможность реализации алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). ПФ обладает свойством концентрации значимых коэффициентов спектра в одной области, обеспечивающей простоту процедуры выделения области для маркирования.

В заключение рассмотрим дискретно-косинусное преобразование. ДКП представляет собой разновидность ПФ. Оно применяется во многих стандартах компрессии как статических (*JPEG*), так и видеоизображений (*H.263*, *MPEG 1*, *MPEG 2* и *MPEG 4*). Данный факт определяет эффективность использования именно Фурье-базиса для внедрения ОСИС в спектральную область видеоданных. К тому же в случае использования в системе перечисленных выше кодеков возможно применение так называемого маркирования «на лету». Встраивание маркера может происходить в уже вычисленный видеокодеком спектр, что значительно снизит вычислительные затраты по внедрению ОСИС идентификатора пользователя ИС (см. рис. 2.1).

Далее в ходе анализа в пп.2.2 был обнаружен подход к внедрению ОСИС в виде изображения. Такая техника, обозначим ее  $t_2$ , позволяет устранить угрозы разрушения маркера за счет кодирования и перекодирования видеоданных,

компрессии видео с помощью известных кодеков изображения (множество преобразований  $U_3$ ), а также обеспечивает достаточную устойчивость в отношении применения различных фильтров (множество преобразований  $U_6$ ). В дополнение подход к представлению маркера в виде монохромного изображения обеспечивает возможность его извлечения без наличия исходного изображения. В этой связи:

$$t_2: \{U_3, U_6\} \rightarrow \emptyset \quad (2.21)$$

и 
$$t_1 \cup t_2: \{U_1, U_2, U_3, U_6\} \rightarrow \emptyset. \quad (2.22)$$

Согласно (2.22) комплексирование известных техник и методов позволит обеспечить устойчивость ОСИС в отношении четырех множеств преобразований  $U_1, U_2, U_3, U_6$ , оставив без рассмотрения оставшиеся множества модели (табл.2.1). Тогда модификация известных методов будет заключаться в дополнении известных способов техниками-терминаторами множеств угроз от преобразований собственной разработки: по изменению частоты кадров – «битрейта» ( $U_4$ ); по вырезанию определенного временного отрезка видео, обрезке по времени ( $U_5$ ); по конвертированию в монохромное видео ( $U_7$ ).

Множества преобразований  $U_4$  и  $U_5$  характерны только для ОСИС, внедряемых в видеоданные. Ввиду отсутствия в открытой печати достаточной информации о степени проработанности вопросов повышения устойчивости маркеров видео по отношению к этим преобразованиям предлагается применить подход  $t_3$  внедрения ОСИС в каждый кадр, рассматривая его как статичное изображение. В рамках защиты ОСИС от преобразования  $U_7$  предлагается видеопоток декомпозировать на цветовые составляющие и в дальнейшем маркировать каждую из них (техника  $t_4$ ). Гипотетически можно предположить, что в случае монохромной конверсии цветовой маркер однозначно мигрирует в Фурье-спектр монохромного изображения. В дополнение внедрение ОСИС во все три цветовых канала ожидаемо приведет к усилению устойчивости по отношению ко множествам угроз от таких преобразований, как компрессия и фильтрация изображений.

В заключение нельзя оставлять без внимания свойство ОСИС – «невидимость». Для повышения показателей этой характеристики предлагается применить технику  $t_5$  размытия (скремблирования) влияния шумов внедрения ОСИС в спектр по всей пространственной области изображения-контейнера за счет покadroвого изменения координат размещения центра маркера идентификатора по закону ПСП. Такое скачкообразное и псевдослучайное перемещение ОСИС по всей значимой области спектра от кадра к кадру обеспечит большую глубину формирования при сохранении свойства «невидимости» или в данном случае – незаметности искажений в пространственной области изображения-контейнера. Подход по псевдослучайному выбору коэффициентов вейвлет-спектра, в которые внедрялись биты ОСИС, уже предлагался в [24]. Однако формирование происходило на основе спектральных характеристик идентификатора в изображение, когда, как в данной работе рассматривается спектрально-пространственный подход.

В конечном счете описанная методология формирования ОСИС в видеоданные на основе выбранных выше техник будет способна обеспечить устойчивость по отношению к определенной в 2.1 модели разрушающих преобразований:

$$T = t_1 \cup t_2 \cup t_3 \cup t_4 \cup t_5: U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7\} \rightarrow \emptyset \quad (2.23)$$

Опишем процесс формирования ОСИС в виде последовательного применения техник-терминаторов.

1. Декомпозиция видеопотока на цветовые каналы, техника  $t_4$ :

$$t_4: Str \rightarrow \{Str_i\}, i = \{r, g, b\}, \quad (2.24)$$

где  $Str$  – видеопоток,  $Str_i$  – цветовая составляющая  $i$ -го цвета,  $\{r, g, b\}$  – индекс красной, зеленой и синей составляющей соответственно. В дальнейшем каждая из описанных техник будет производиться с каждой из трех цветовых составляющих.

2. На втором этапе осуществляется представление структурных элементов видеоданных (СЭВ) в виде множества кадров-изображений-контейнеров, техника  $t_3$ :

$$t_3: Str_i \rightarrow \{I_{T_k^i}\}, k = \{1, 2, \dots, K\}, \quad (2.25)$$

где  $I_{T_{i,k}}$  – изображение  $k$ -го СЭВ  $i$ -й цветовой составляющей,  $K$  – общее количество СЭВ, т. е. длительность видео в количестве СЭВ.

3. На следующем этапе применим подход  $t_1$ . Подготовительным этапом техники является перевод СЭВ  $I_{T_{i,k}}$  из пространственного представления в спектральную область. Выше была обоснована эффективность применения для этих целей базиса Фурье. Ввиду дискретного представления СЭВ (изображений-контейнеров) для ОСИС перейдем сразу к рассмотрению дискретного ПФ. Вычисление спектра СЭВ представляет собой классическое двумерное ДПФ. Так как цветовой поток уже разделен на монохромные составляющие, представим СЭВ  $I_{T_{i,k}}$  в виде двумерного массива точек, характеризующихся одним параметром – интенсивностью, или яркостью в диапазоне некоторых значений, обычно определяемым форматом представления изображения. Для удобства классического описания двумерного ДПФ представим, в свою очередь массив точек  $I_{T_{i,k}}$  двумерной функцией яркости пикселей изображения  $I_{T_{i,k}} = I_{T_{i,k}}(x, y)$ ,  $x = \{0, 1, \dots, M - 1\}$ ,  $y = \{0, 1, \dots, N - 1\}$ , где  $x$  и  $y$  – координаты точки,  $M$  и  $N$  – размеры СЭВ, ширина и высота соответственно. Тогда процедура перевода СЭВ, точнее его функции, из пространственной области в частотную с помощью ДПФ (прямого ДПФ) будет описана с помощью следующего выражения:

$$Sp_{i,k}(u, v) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_{T_{i,k}}(x, y) \cdot e^{-i \cdot 2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}, \quad (2.26)$$

где  $Sp_{i,k}$  – спектральная функция СЭВ  $I_{T_{i,k}}$ ,  $x$  и  $y$  – пространственные, а  $u$  и  $v$  – частотные координаты СЭВ  $I_{T_{i,k}}$ .

Несмотря на представление СЭВ вещественными числами, его частотная Фурье-функция представляет собой массив комплексных чисел:  $Sp_{i,k}(u, v) = R(u, v) + i \cdot I(u, v)$ , где  $R(u, v)$  и  $I(u, v)$  – вещественная и мнимая части спектральной функции. Для удобства восприятия и практической обработки спектрального представления изображения работают, как правило, с абсолютными значениями спектральной функции  $|Sp_{i,k}(u, v)|$  (2.27), называемой спектром, или энергетическим Фурье-спектром  $P_{i,k}(u, v)$  (2.28):

$$|Sp_{i,k}(u, v)| = \sqrt{R^2(u, v) + I^2(u, v)}, \quad (2.27)$$

$$P_{i,k}(u, v) = |Sp_{i,k}(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v). \quad (2.28)$$

В ходе применения ДПФ вычисляется еще и фазовый спектр СЭВ, однако в силу его невосприимчивости человеческим глазом практического применения он не нашел и в разрабатываемом методе не используется. Итак, каждый СЭВ (кадр) цветовой составляющей представляется спектром Фурье (2.27) и считается подготовленным к внедрению ОСИС. В [30] описан подход к логарифмическому шкалированию коэффициентов спектра Фурье для выравнивания энергетического вклада ВЧ составляющих. Подобная процедура аналогична кратному масштабированию вейвлет-преобразования.

Зачастую в изображениях большие значения спектральных коэффициентов присущи НЧ диапазону и постоянной составляющей. Для выравнивания и нормирования спектра необходимо отфильтровать постоянные составляющие путем логарифмического масштабирования отображения амплитуд, чтобы пара самых мощных гармоник не скрыла остальные, менее мощные, но тоже существенные гармоники [31]. Таким образом применение логарифмирования при использовании техники маркирования именно «значимых», наиболее «весомых» областей спектра Фурье облегчит извлечение и внесет равнозначное зашумление по всему спектру СЭВ.

4. После того как спектр СЭВ подготовлен к внедрению скрытого идентификационного слоя, следующим этапом метода выступает процедура определения энергетически «значимой» области спектра – области формирования ОСИС. Предполагается внедрять идентификатор в область спектра СЭВ, суммарная энергия которой превышает определенное пороговое значение в процентном соотношении к общей спектральной энергии. Как правило, такая область содержит коэффициенты НЧ в большей степени, и СЧ – в меньшей, диапазонов спектра. Определение значений порога требует проведения экспериментальных исследований, которым будут посвящены следующие главы работы.

5. На следующем этапе необходимо подготовить сам ОСИС, содержащий информацию об идентификаторе пользователя ИС в виде монохромного изображения числа в десятичном или шестнадцатеричном представлении. Размеры изображения должны совпадать с размерами СЭВ и, соответственно, его Фурье-спектра.

Далее важным этапом выступает выбор параметров изображения непосредственно идентификатора пользователя ИС: размера шрифта написания числа, его контрастности и яркости. Размер идентификатора так же, как и контрастность, будет влиять, с одной стороны, на невидимость ОСИС, а с другой – на извлекаемость и опосредованно – на устойчивость маркера. Яркость является известным параметром формирования – «глубиной». Выбор этих параметров представляется нетривиальной квазиоптимизационной задачей и является предметом исследований в последующих главах работы.

Область расположения маркера идентификатора была определена на предыдущем этапе, однако необходимо принять решение о координатах центра маркера в выбранной области. Во всех известных источниках координаты центра маркера выбираются однократно в начале процедуры внедрения и остаются постоянными от кадра к кадру видеопотока. В ходе исследования была выдвинута гипотеза о том, что статичное зашумление маркером одной и той же части спектральных составляющих негативно сказывается на качестве видеоданных в

пространственной области и делает присутствие ОСИС заметным. Проявляется это явление в виде искажений первичного динамического изображения. В этой связи предлагается постоянные значения координат центра маркера сделать переменными для каждого из СЭВ, а закон изменения координат определить как псевдослучайный. Такой подход  $t_5$  позволит равномерно распределить шумы формирования ОСИС по «значимой» области спектра Фурье, если координаты центра маркера также будут выбираться случайно согласно равномерному закону распределения.

Удобным способом реализации генератора ПСП, распределенной равномерно на своем периоде, являются линейные рекуррентные регистры (ЛРР, скремблеры, генераторы М-последовательностей, генераторы расширенного поля). Условием генерации равномерно распределенной ПСП является примитивность полинома обратных связей, описывающего схему ЛРР. Такие ЛРР в каждый такт своей работы выдают псевдослучайное число, определяемое состоянием ячеек памяти. Очевидно, что диапазон выдаваемых псевдослучайных чисел определяется степенью  $n$  полинома обратной связи:

$$h(x) = h_n \cdot x^n + h_{(n-1)} \cdot x^{n-1} + \dots + h_0, \quad (2.29)$$

где степень  $n$  определяет количество ячеек памяти ЛРР, а диапазон изменения псевдослучайных чисел –  $(1, \dots, 2^n - 1)$ , нулевая комбинация – запрещенная, период ЛРР –  $T = 2^n - 1$ , в случае, если полином  $h(x)$  примитивный.

Обозначим центр ОСИС, встраиваемый в  $i$ -й СЭВ видеопотока, точкой с координатами  $(x_i, y_i)$ . Тогда в случае применения ЛРР в качестве генератора координат центра маркера функция вычисления новых координат будет определяться выражением:

$$t_5: (x_i, y_i) = (H_x(x_{i-1}), H_y(y_{i-1})), \quad (2.30)$$

$$H_a(a) = H_a(a_{n-1} \parallel a_{n-2} \parallel \dots \parallel a_0) = h(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0) \parallel a_{n-1} \parallel a_{n-2} \parallel \dots \parallel a_1, \quad (2.31)$$

$$h(a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0) = h_{n-1} \cdot a_{n-1} + h_{n-2} \cdot a_{n-2} + \dots + h_0 \cdot a_0, \quad (2.32)$$

где  $H_a(a)$  – состояние ячеек ЛРР после одного такта работы,  $h_i$  – коэффициенты полинома обратной связи ЛРР  $i$ -й степени,  $\{a_i\}$  – биты двоичного представления значения координаты центра ОСИС. Естественно, координаты центра встраиваемого маркера должны лежать в области «значимых» коэффициентов спектра СЭВ. Начальное местоположение центра маркера  $(x_0, y_0)$  можно определить геометрическим центром «значимой» спектральной области формирования.

Таким образом, после определения новых координат центра маркера и формирования его монохромного изображения с заданными на начальном кадре параметрами шрифта числового идентификатора пользователя ИС ОСИС считается подготовленным для внедрения.

6. Заключительной процедурой техники  $t_1$  является формирование подготовленного на пятом этапе ОСИС  $DW_{i,k}(x, y)$  в преобразованный на третьем этапе СЭВ  $|Sp_{i,k}(u, v)|$ . Процесс внедрения ОСИС представляет собой вычитание из спектральных коэффициентов ДПФ СЭВ нормированных к спектральному диапазону значений яркости точек монохромного представления ОСИС числового идентификатора пользователя ИС:

$$t_1: |Sp_{i,k}(u, v)|^{DW} = |Sp_{i,k}(u, v)| - DW_{i,k}(x, y)^N, \quad (2.33)$$

$$DW_{i,k}(x, y)^N = \frac{DW_{i,k}(x, y) - DW_{i,k}(x, y)_{min}}{DW_{i,k}(x, y)_{max} - DW_{i,k}(x, y)_{min}} \cdot \Delta Sp, \quad (2.34)$$

где  $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$  – спектр Фурье СЭВ с внедренным ОСИС (СЭВ'),  $DW_{i,k}(x, y)^N$  – нормированное изображение маркера,  $DW_{i,k}(x, y)_{max}$  и  $DW_{i,k}(x, y)_{min}$  –

максимальное и минимальное значения яркости точек монохромного маркера,  $\Delta Sp$  – динамический диапазон спектра Фурье СЭВ.

На заключительных стадиях метода внедрения ОСИС предполагаются процедуры, обратные этапам 3, 2 и 1:

7. Обратное ДПФ спектрального представления СЭВ' с внедренным ОСИС  $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$ :

$$I_{T_{i,k}}(x, y)^{DW} = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |Sp_{i,k}(u, v)|^{DW} \cdot e^{i \cdot 2\pi \left( \frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}, \quad (2.35)$$

где  $I_{T_{i,k}}(x, y)^{DW}$  – пространственное представление  $k$ -го СЭВ  $i$ -й цветовой составляющей с внедренным ОСИС.

8. Объединение множества СЭВ' в потоковое видео каждого из цветковых каналов:

$$\{I_{T_{i,k}}\}^{DW} \rightarrow Str_i^{DW}, \quad (2.36)$$

где  $Str_i^{DW}$  – видеопоток  $i$ -й цветовой составляющей с внедренным ОСИС.

9. Заключительным этапом внедрения ОСИС в видеоданные выступает объединение цветковых потоковых составляющих в видеопоследовательность с внедренным ОСИС в спектральную область  $Str^{DW}$ :

$$\{Str_i\}^{DW} \rightarrow Str^{DW}, i = \{r, g, b\}. \quad (2.37)$$

Очевидно, что процедура извлечения ОСИС, внедренного в видео предлагаемым методом, будет состоять из первых трех этапов процесса маркирования. Ввиду того, что практической целью разрабатываемого математического обеспечения является повышение устойчивости ОСИС к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки, последующие этапы

распознавания наличия ОСИС числового идентификатора пользователя ИС, а также его конкретного значения будут проводиться в визуальном (ручном) или автоматизированном режиме.

В заключение необходимо отметить, что зависимость свойства «невидимости» от устойчивости, комплексность этого свойства ОСИС, зависимость частных показателей устойчивости от правил выбора «значимых» областей спектра Фурье СЭВ, правил выбора площади области спектра, используемой для внедрения маркера, от яркости и контрастности представления маркера в изображении обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований по определению и обоснованию метрики устойчивости ОСИС видеоданных.

## 2.4 Обоснование метрики устойчивости ОСИС

Определение устойчивости обуславливает комплексный характер этого показателя. Согласно разработанной в пп.2.1 модели возмущений на ОСИС в рамках предметной области проводимых исследований показатель устойчивости можно определить, как некую свертку  $R(x)$  устойчивости предлагаемого ОСИС ко всем возможным воздействиям:

$$Rob = R(Rob^{Uj}), i = 1, \dots, 7, \quad (2.38)$$

где  $Rob^{Uj}$  – устойчивость ОСИС по отношению к  $j$ -му множеству преобразований.

Декомпозируем задачу определения метрики общего показателя устойчивости на его составляющие, определим физический смысл каждой и выявим характер обобщающей свертки (2.38).

Ввиду того, что устойчивость по своей сути является мерой устойчивости маркера к различного рода преобразованиям, единственным верным подходом к

параметризации этого показателя выступает метод сравнения исходного ОСИС с его аналогом, подвергшимся различного рода атакам. Метрики, описывающие отличия ОСИС, выбираются исходя из вида и формы представления самого маркера. В пп.2.3 разработана методология формирования ОСИС в видеоданных, который формируется в виде монохромного изображения числа – идентификатора пользователя ИС. В этой связи целесообразно рассматривать существующие методы сравнения изображений, выступающих в качестве СЭВ. Существуют две основные группы показателей визуального искажения СЭВ, разделяющие метрики на разностные и корреляционные. Разностные основаны на вычислении степени различия между исходным и искаженным изображением. Корреляционные основаны на определении корреляции между двумя сигналами [31]. В [31] показана достаточная эффективность использования для оценки различия между изображениями показателя меры структурного подобия (индекс структурного сходства) – *SSIM*, который по своей сути является модифицированной корреляционной характеристикой:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (2.39)$$

где  $\mu_x, \mu_y$  и  $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  – средние и дисперсии изображений  $x$  и  $y$ ,  $\sigma_{xy}$  – ковариация между  $x$  и  $y$ , переменные  $c_1, c_2$  определяются как  $c_1 = (k_1L)^2, c_2 = (k_2L)^2$ ,  $L$  – динамический диапазон точек изображения,  $k_1 = 0,01, k_2 = 0,03$  – константы.

Метрика основана на человеческом восприятии изображений и предназначена для оценки только их интенсивности (яркости), что абсолютно подходит для использования в оценке устойчивости ОСИС, формируемого согласно разработанному методу. Показатель *SSIM*, подобно коэффициенту корреляции, изменяется в пределах от  $(-1, 1)$ , где 1 означает абсолютную схожесть изображений.

Таким образом, определим показатель устойчивости по отношению ко множеству возмущений  $U_j$  следующим выражением:

$$Rob^{U_j} = SSIM(DW, DW^{U_j}), \quad (2.40)$$

где  $DW, DW^{U_j}$  – монохромное изображение исходного ОСИС и изображение ОСИС (СЭВ'), подвергнутого возмущению из множества  $U_j$ . Однако представленный в пп.2.3 процесс формирования ОСИС предполагает встраивание маркера в каждый кадр каждой цветовой составляющей видеопотока. Тогда выражение, определяющее показатель устойчивости ОСИС по отношению к определенному множеству преобразований  $U_j$ , после корректировки примет следующий вид:

$$Rob^{U_j} = \frac{1}{3 \cdot K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 SSIM_{i,k} (DW, DW^{U_j}), \quad (2.41)$$

где  $i$  – порядковый номер цветовой составляющей  $\{r, g, b\}$ ,  $k$  – номер СЭВ,  $K$  – общее количество промаркированных СЭВ' в видеопотоке. И продолжая принятый подход усреднения, общий показатель устойчивости по всем семи множествам угроз будет определяться как

$$Rob_{cp} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 Rob^{U_j} = \frac{1}{7 \cdot 3 \cdot K} \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 SSIM_{i,k} (DW, DW^{U_j}). \quad (2.42)$$

Однако такой подход определения среднего показателя устойчивости приемлем для решения задач по определению общего воздействия всех возможных возмущений на внедряемый ОСИС. Обобщение согласно показателю (2.42), слабо применимо для достижения цели разработки алгоритма формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в спектральной области СЭВ, которая заключается в повышении эффективности проведения идентификации видеоданных. Другими словами, показатель устойчивости должен обеспечивать однозначное распознавание изображения идентификатора пользователя ИС, получившего доступ к анализируемой копии видеоданных. В

этой связи можно сделать вывод о дискретности показателя устойчивости: если однозначная идентификация пользователя по ОСИС после реализации всего множества преобразований возможна, то  $Rob = 1$  (в качестве шкалы примем – классическую шкалу вероятностей от 0 до 1); в противном случае –  $Rob = 0$ , идентификация и распознавание невозможны.

Очевидно, что успешность идентификации напрямую зависит от меры подобия извлеченного маркера числового идентификатора пользователя его исходному изображению, которое внедрялось в видеопоток. В качестве такой меры воспользуемся уже описанным выше показателем  $SSIM$  (2.39). Следует отметить, что использование статистических мер подобия изображений и их объединение и обобщение возможно только в случае обоснования взаимной статистической независимости маркеров различных кадров. В противном случае для обобщения корреляционного показателя необходимо было бы учитывать их покадровую взаимную зависимость, т. е. априорные условные вероятности. Известно, что максимума обобщенного статистического показателя (например, полной вероятности) возможно достичь только в случае взаимной независимости измеряемых обобщаемых событий. В этой связи техника покадрового псевдослучайного изменения координат встраиваемого идентификатора  $t_5$  (2.30–2.32) фактически обеспечивает увеличение показателя  $SSIM$  в  $K$  (количество СЭВ анализируемого видео) раз по сравнению со статичным размещением ОСИС в видеопотоке. В действительности использование изменяемых по закону ПСП координат маркера позволяет в полной мере использовать специфику маркированного видеопотока, тогда как статичный ОСИС сводит задачу его разрушения в видеопотоке к разрушению ОСИС в спектральной области одного СЭВ и распространения этого возмущения на все оставшиеся. Тогда дискретный показатель устойчивости внедренного идентификатора по всему множеству преобразований, определенных в пп.2.1, будет определен как:

$$Rob_{\text{дискр}}^{\{U_j\}} = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists SSIM_{i,k}(DW, DW^{U_j}), SSIM_{i,k}(DW, DW^{U_j}) > SSIM_{\text{пор}} \end{cases}, \quad (2.43)$$

0, иначе.

для каждого возмущения  $U_j$ , т. е.  $j$  принимает значения от 1 до 7, и хотя бы одного СЭВ  $k$  цветности  $i$  из всего видеопотока;  $SSIM_{\text{пор}}$  – пороговое значение показателя  $SSIM$ , определяющее однозначную возможность визуальной и/или автоматической идентификации маркера, в зависимости от реализуемой на практике системы идентификации видеоданных. Принимая во внимание специфику разработанного ОСИС для видеопотоков, заключающуюся в представлении внедряемого маркера идентификатора пользователя в виде изображения  $M$ -значного числа (десятичного либо шестнадцатеричного), необходимо учесть возможность успешного распознавания числа путем позначной его идентификации в ОСИС, извлеченных из разных СЭВ' разных цветовых каналов. Т. е. разные знаки идентификатора могут быть распознаны не из ОСИС, извлеченного из какого-то одного конкретного СЭВ', а в ходе анализа всего множества ОСИС, полученных из всех СЭВ' (рис. 2.2).

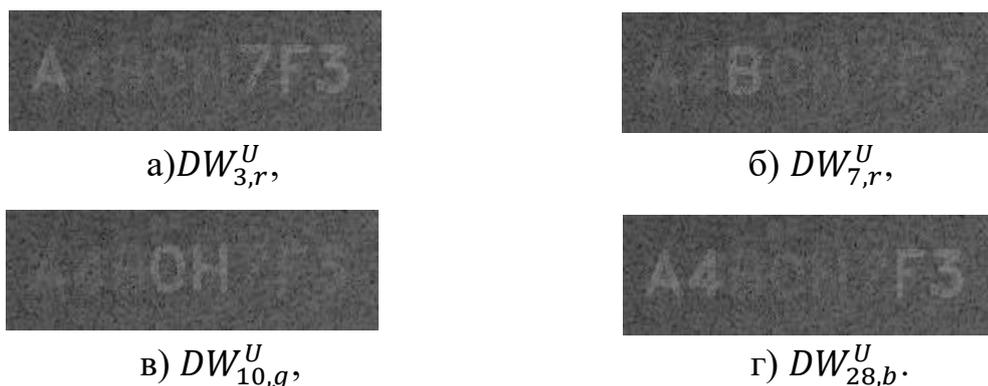


Рисунок 2.2 – Пример сохранения позначной устойчивости ОСИС:

- а) 3-й СЭВ' красной составляющей – распознаны знаки 1, 6, 7, 8;
- б) 7-й СЭВ' красной составляющей – распознан знак 3;
- в) 10-й СЭВ' зеленой составляющей – распознаны знаки 4, 5;
- г) 28-й СЭВ' синей составляющей – распознаны знаки 1, 2, 7, 8.

Тогда обозначив маркер идентификатора упорядоченным множеством его знаков  $DW = \{dw_1, \dots, dw_M\} = \{dw_m\}$ , где индекс  $m$  означает порядковый номер знака числового идентификатора, уточненный дискретный показатель устойчивости примет вид:

$$Rob_{\text{дискр}}^{\{U_j\}} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ если } \exists SSIM_{i,k} (dw_m, dw_m^{U_j}), SSIM_{i,k} (dw_m, dw_m^{U_j}) > SSIM_{\text{пор}} \\ 0, \text{ иначе.} \end{array} \right\}, \quad (2.44)$$

для каждого возмущения  $U_j (j = 1, \dots, 7)$  и каждого знака  $dw_m$  идентификатора  $DW$  хотя бы одного  $k$ -го СЭВ'  $i$ -й цветности видеопотока. Существует также возможность распознавания не полного числового идентификатора пользователя, а лишь части его знаков, тем самым сужается множество возможных идентификаторов.

В ходе разработки теоретико-множественной модели формирования ОСИС в видеоданных и исследования свойств полученного маркера был обнаружен эффект «накопления» информации о внедренном идентификаторе, связанный с использованием видеопотока в качестве контейнера. Его физический смысл заключается в том, что в ходе извлечения поврежденных ОСИС возможен случай, когда ни в одном СЭВ ни одного цветового канала значение  $SSIM_{i,k} (dw_m, dw_m^{U_j})$  не превысит порогового значения  $SSIM_{\text{пор}}$  для одного из знаков идентификатора. Тогда, согласно (2.44), устойчивость ОСИС нулевая и определение идентификатора невозможно. Однако применение техники  $t_5$  позволяет накапливать информацию о знаке внедренного ОСИС путем суммирования всех извлеченных маркеров. Естественно необходимо понимать, что суммированию должны подвергаться только области, непосредственно содержащие извлекаемый маркер, в дополнение предварительно взаимно отцентрированные. Обозначив вырезанную область слоя, содержащего идентификатор до и после искажений, как  $DW_c = \{dw_{c1}, \dots, dw_{cM}\} = \{dw_{cm}\}$  и  $DW_c^{U_j} = \{dw_{c1}^{U_j}, \dots, dw_{cM}^{U_j}\} = \{dw_{cm}^{U_j}\}$  соответственно, можно определить суммарный «накопленный» ОСИС, извлеченный из видеопотока, как сумму извлеченных идентификаторов (знаков идентификатора) по всем цветовым составляющим всех СЭВ обрабатываемого видео:

$$\begin{aligned} DW_c^{U_j} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 DW_{ck,ci}^{U_j}, \\ dw_{cm}^{U_j} &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 dw_{cmk,cmi}^{U_j}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Подобное «накопление» информации об извлеченном ОСИС позволяет учесть весь объем встроенного маркера, содержащийся в видеоданных. В дополнение обеспечивается фактическая универсальность и независимость метрики параметра устойчивости от вида преобразований, повлекших искажение ОСИС. В качестве индекса  $U_j$  в выражении 2.45 можно рассматривать любой набор типовых возмущений либо полное множество искажающих преобразований, определенное специально разработанной моделью (например, пп.2.1).

В качестве количественной оценки параметра устойчивости удобнее всего будет определить корреляционную характеристику  $SSIM$ , тем более, что ее использование обеспечивает легкий перевод от шкалы  $(-1, 1)$  к вероятностной шкале  $(0, 1)$ . Показатель  $SSIM$ , равный « $-1$ », означает полную противоположность сравниваемых изображений, т. е. их полную инверсию. Тогда после простейшей операции инверсии маркер представляет собой абсолютно однозначно распознаваемый ОСИС. Хотя в современных работах по изучению устойчивости ОСИС видеоданных и изображений не встречалось ни одного упоминания инверсии ОСИС вследствие искажающих преобразований, однако, необходимо учитывать возможность и такого рода искажения ОСИС. В этой связи, операция приведения значения  $SSIM$  к абсолютной величине  $|SSIM|$  будет обеспечивать полный переход показателя устойчивости к шкале  $(0, 1)$ .

В конечном счете выражение, определяющее параметр накопленной устойчивости ОСИС  $Rob_H^U$  по отношению к смоделированному множеству искажающих возмущений  $U$ , внедряемому в видеоданные согласно разработанной в пп.2.3 теоретико-множественной модели, примет вид:

$$Rob_H^U = |SSIM(DW_c, DW_c^U)| = |SSIM(DW_c, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 DW_{ck,ci}^U)|. \quad (2.46)$$

Согласно выражению (2.46) возникает возможность избежать недостатка дискретности параметра устойчивости ОСИС, а его оценка будет сводиться к сравнению с некоторым пороговым значением  $SSIM_{\text{пор}}$ , превышение которого гарантирует однозначное распознавание маркера идентификатора пользователя ИС, осуществлявшего доступ к видеоданным.

Необходимо отметить, что обозначенный подход использования эффекта «накопления» определяет новую задачу по поиску путей его максимизации, например, за счет процедуры контрастирования при суммировании изображения маркера. Однако рассмотрение этого вопроса выносится в ограничения работы и представляется направлением дальнейших исследований в области повышения устойчивости ОСИС, внедряемых в видеопоток.

Разработанная в пп.2.3 теоретико-множественная модель формирования ОСИС в спектральной области видеоданных на основе изменяемых координат маркера, а также введенная выше метрика устойчивости ОСИС обусловили необходимость проведения дополнительных исследований по определению рабочих диапазонов числовых параметров предлагаемой модели и граничных условий сохранения устойчивости. Многофакторность обозначенной задачи представляет определенную сложность в ее решении только с помощью теоретических подходов. Наиболее эффективным видится проведение экспериментальных исследований по поиску граничных условий устойчивости и невидимости разработанного ОСИС и рабочих диапазонов, обеспечивающих максимальную эффективность предлагаемого метода маркирования.

## **2.5 Определение граничных условий устойчивости**

Прежде чем оценивать граничные условия устойчивости, необходимо определить диапазоны квазиоптимальных значений параметров формирования, обеспечивающих самые эффективные показатели помехоустойчивости. К таким

параметрам относятся: интенсивность (мощность, «глубина») формирования, относительная площадь, занимаемая ОСИС в СЭВ, и координатная область формирования. Очевидно, что диапазоны этих параметров будут выбираться исходя из анализа свойства «невидимости» ОСИС в пространственной области СЭВ. В свою очередь «невидимость» определяется уровнем искажений, внесенных внедрением маркера в спектральную область.

На текущий момент отсутствует абсолютно объективный показатель степени искажения СЭВ. В качестве наиболее распространенной меры оценки искажений используется пиковое отношение сигнала к шуму ( $PSNR$ ), вычисляемое в децибелах (дБ). Помимо  $PSNR$  в исследованиях используются такие показатели, как среднеквадратичное отклонение ( $MSE$ ), мера структурного подобия ( $SSIM$ ) [32], отклонение подобия величины градиента ( $GMSD$ ) [33]. На рисунке 2.3 представлена схема вычисления значений метрик искажения СЭВ. Перед проведением экспериментальных исследований необходимо определить граничные значения показателей  $MSE$ ,  $SSIM$ ,  $GMSD$  и  $PSNR$ , обеспечивающих невидимость искажений, вносимых ОСИС, в пространственной области. Анализ источников [32–34] позволил определить следующие нижние границы показателей искажений СЭВ, вносимых ОСИС и обеспечивающих их незаметность,  $PSNR > 40$  дБ,  $MSE < 90$ ,  $SSIM > 0,8$ ,  $GMSD < 0,01$ .

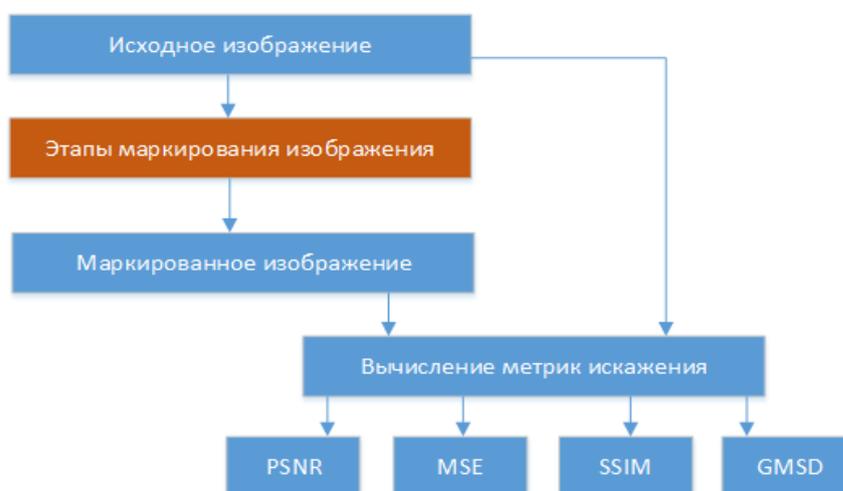


Рисунок 2.3 – Схема вычисления значений метрик искажения к СЭВ

Итак, опишем условия экспериментальных исследований по определению квазиоптимальных диапазонов параметров метода внедрения ОСИС в спектральную область. На первоначальном этапе была подготовлена выборка цветного видео различных разрешений средней длительностью  $\approx 100$  с. Выборка из 1000 различных видеофайлов с разрешениями VGA, HD, FullHD, QHD и UHD была получена из открытых источников в сети интернет. После операции раскадровки и разделения СЭВ по цветовым каналам объем выборки составил  $100 \text{ с} * 25 \text{ кадр/с} * 3 \text{ (RGB)} * 1000 \text{ шт.} = 7\,500\,000$  изображений, что, согласно следствию из закона больших чисел – теоремы Бернулли, достаточно для точности экспериментальных оценок показателя степени искажения СЭВ до тысячных долей ( $10^{-3}$ ).

Для автоматизации проведения исследований было написано специальное программное обеспечение, которое производило обработку отдельно каждого кадра видео в виде СЭВ, после обработки всего множества изображений-кадров выборки данные усреднялись.

Для удобства представления частотный спектр преобразовывался в двумерное графическое изображение с градацией серого цвета и размером, равным разрешению исходного изображения в пространственной области. Полученный спектр показывает зависимость амплитуды от частоты, амплитуды отображаются в виде яркостей. Нулевая частота – в центре спектра, низкие частоты – вокруг центра, высокие – дальше от центра. Особенностью представления частотного спектра является зеркальное дублирование относительно нулевой частоты [31].

На следующем этапе осуществлялось внедрение ОСИС путем фильтрации частотного спектра по заданному шаблону. Под фильтрацией в данном случае будем понимать вычитание из спектра СЭВ шаблона ОСИС, представленного в виде изображения маркера идентификатора пользователя, например изображение числа в шестнадцатеричном виде. В качестве примера ОСИС было взято число 0xA4B0H7F3. На рисунке 2.4 представлен пример маркирования в ВЧ диапазон спектра (вставка в верхний левый угол двумерного представления спектра): слева

изображено измененное СЭВ', справа – отфильтрованное шаблоном спектральное представление СЭВ' (СЭВ с внедренным ОСИС). В левом верхнем углу пространственной области СЭВ приведена справочная информация о параметрах внедрения: глубина-интенсивность внедрения ( $Power$ ), относительная занимаемая площадь маркера ( $Cover$ ) и его координаты ( $Pos$ ), а также полученные метрики в результате маркирования [31].



Рисунок 2.4 – Пример внедренного ОСИС в СЭВ

Для синтеза графического изображения из частотного спектра использовался алгоритм обратного преобразования Фурье. Над спектром каждого из трех каналов производилась операция обратного преобразования, после чего три канала объединялись в трехканальный цветной СЭВ'.

Процедура выбора оптимальных диапазонов параметров заключалась в поэтапном изучении поведения метрик измерения искажений, вносимых ОСИС в зависимости от изменения исследуемых параметров. Например, на рисунках 2.5 и 2.6 продемонстрированы результаты изменения координат размещения маркера в спектре СЭВ и его площади относительно общей площади спектра изображения, что физически можно определить, как изменение диапазона формирования (НЧ, СЧ и ВЧ) и размеров шрифта идентификатора соответственно.



Рисунок 2.5 – Внедрение ОСИС в СЧ диапазон спектра СЭВ

Внедрение ОСИС в СЧ диапазон СЭВ (рис. 2.5) демонстрирует субъективно слабозаметное изменение цветовых оттенков. На рисунке 2.6 представлен маркер в ВЧ области с площадью маркирования (размером шрифта идентификатора), явно превышающий пределы «невидимости». В данном случае уже явно прослеживаются структурные изменения в пространственной области представления СЭВ.



Рисунок 2.6 – Внедрение ОСИС в ВЧ диапазон с большой площадью маркирования

В процессе исследования диапазона глубины формирования были определены следующие условия: количество уровней интенсивности маркера – 256 (1 байт), минимальная интенсивность – 1, максимальная – 100 (большее увеличение приводит к визуально заметным искажениям СЭВ), шаг – 1. Результаты исследования диапазона глубины внедрения ОСИС представлены на рисунке 2.7. Исходя из граничных условий метрик искажений, оптимальным диапазоном глубины (яркости, интенсивности) шаблона маркера идентификатора был выбран 20–30.

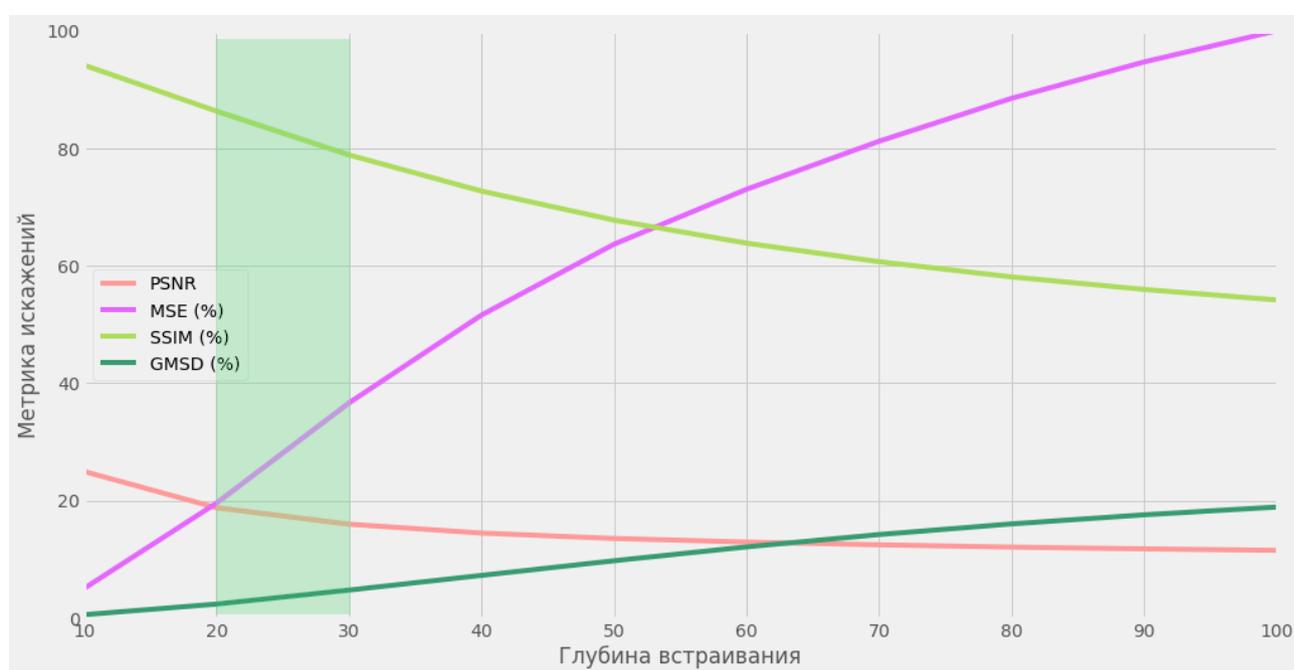


Рисунок 2.7 – Зависимость искажений СЭВ от глубины формирования ОСИС

Далее осуществлялся эксперимент по выявлению оптимального размера маркера идентификатора. По своей сути этот размер будет определяться площадью вносимых в спектр СЭВ изменений – площадью фильтрации. Площадь фильтрации вычислялась как процентное соотношение ненулевых пикселей, из которых состояло изображение идентификатора, к половине общего количества точек в двумерном представлении коэффициентов спектральной области СЭВ. При вычислении использовалась половина общего количества коэффициентов спектра в силу того, что он имеет симметричную (зеркальную) структуру. Измерение

показателей меры искажений, вносимых внедрением ОСИС, в зависимости от относительной площади маркера производилось в диапазоне от 0.001 до 0.04 с шагом 0.001 (рис. 2.8). Анализ экспериментальных данных позволил определить оптимальный диапазон размеров шрифта маркера идентификатора в 0.004 – 0.02, в качестве постоянного показателя определим среднее значение относительной площади маркера в 0.01, обозначим  $Pos_{ср} = 0,01$ .

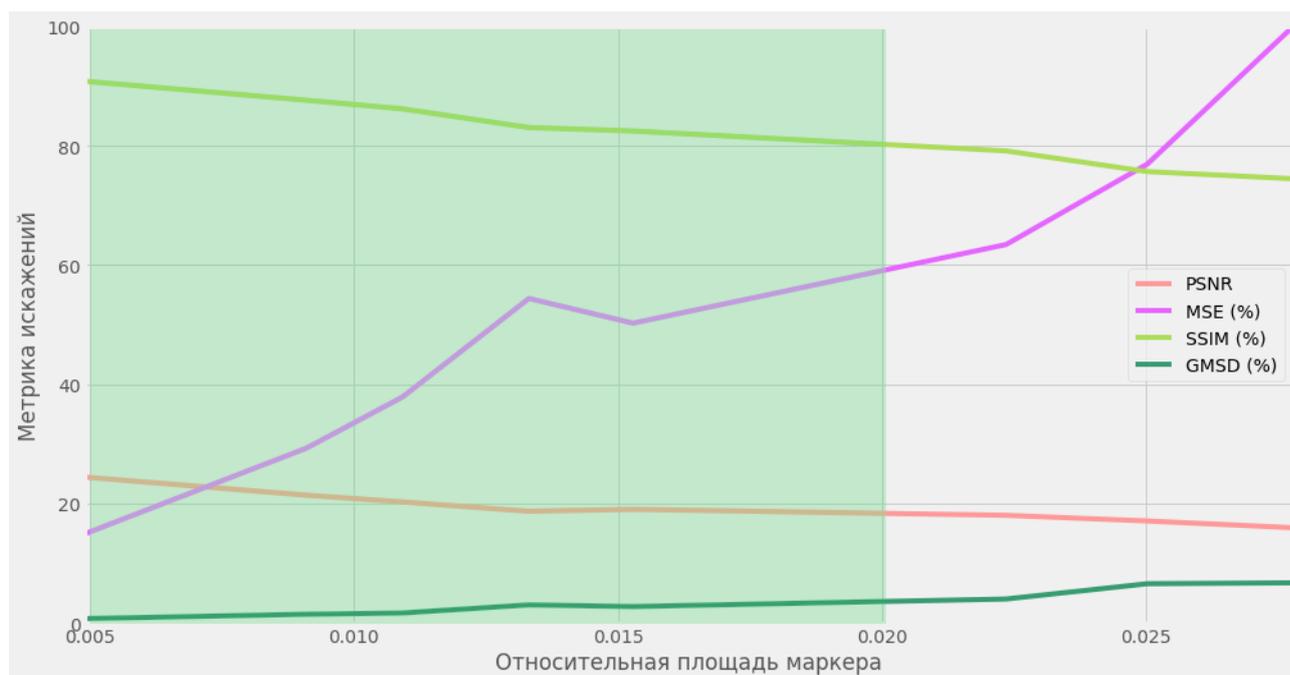


Рисунок 2.8 – Зависимость искажений СЭВ от относительной площади маркера

Заключительным этапом экспериментальных исследований по определению параметров модели формирования ОСИС в спектральную область являлось исследование зависимости степени искажений от внесения идентификатора в ту или иную область спектра СЭВ. Для упрощения эксперимента координаты центра маркера задавались статично относительно временных кадров видеоданных. Техника псевдослучайного выбора координат центра маркера  $t_5$  существенно осложнила бы выбор оптимального частотного диапазона для внедрения ОСИС. Таким образом, в ходе эксперимента координата позиции вставки изменялась по диагонали двумерного представления спектра от максимума ВЧ диапазона до

нулевой частоты (от правого верхнего угла к центру изображения спектральной области) в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,001 и определялась пространственным расположением идентификатора. В результате подтвердились положения о преимущественном подходе к внедрению ОСИС в СЧ и НЧ диапазоны спектральной области СЭВ [21, 28]. Согласно графикам рисунка 2.9. оптимальной областью для внедрения маркера идентификатора является прямоугольник с диагональю  $(0.1, 0.1) - (0.65, 0.65)$ .

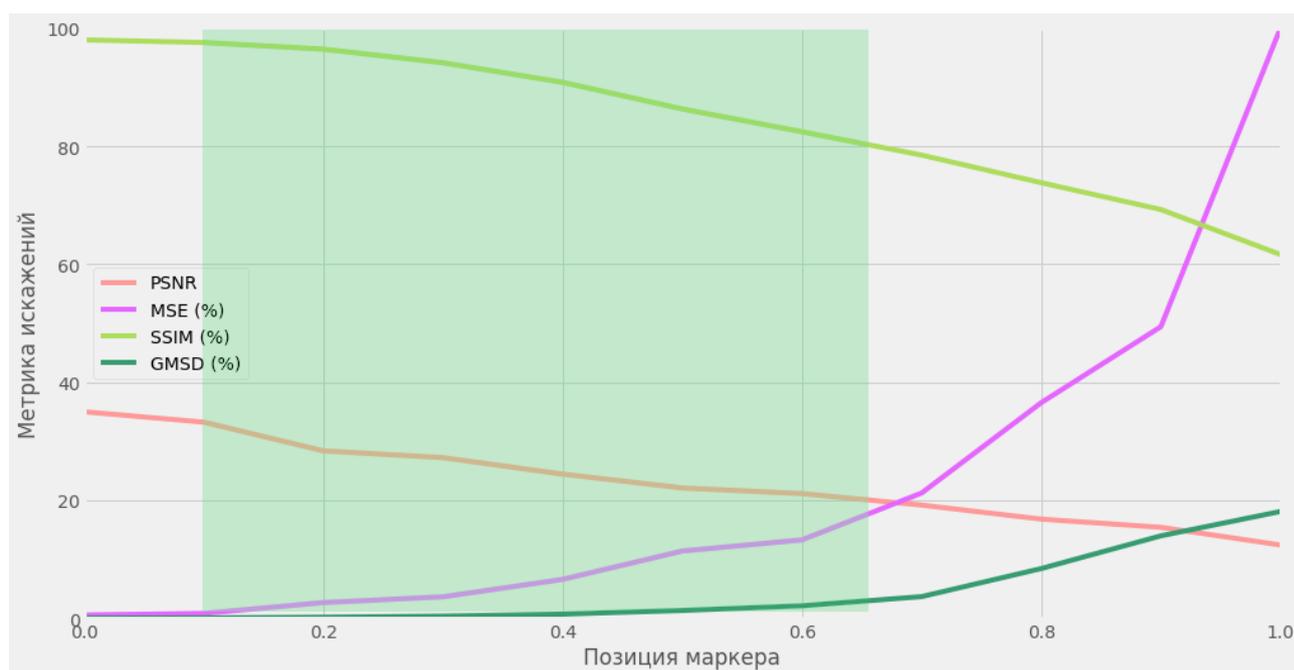


Рисунок 2.9 – Выбор оптимальной области диапазонов спектра для формирования ОСИС

Исходя из пороговых значений показателей степени искажений СЭВ и проведенных экспериментальных исследований по выявлению диапазонов квазиоптимальных значений параметров формирования ОСИС, были определены следующие значения, обеспечивающие самые эффективные показатели помехоустойчивости:

- интенсивность (мощность, «глубина») формирования от 20 до 30;
- относительная площадь, занимаемая маркером в СЭВ', от 0.004 до 0.02;

– координатная область формирования – прямоугольник с диагональю  $(0.1, 0.1) - (0.65, 0.65)$ , соответствующий диапазонам средних и нижних частот спектра.

Для дальнейших исследований по определению граничных условий устойчивости предложенной модели выберем максимальные значения глубины формирования идентификатора 30 и относительной занимаемой им площади 0.02 ввиду того, что устойчивость прямо пропорционально зависит от этих показателей. Область формирования для разработанной модели была определена выше (рис. 2.9).

При планировании экспериментальных исследований в основу легла модель возмущений ОСИС, разработанная в пп. 2.1, а также показатель устойчивости, определенный выражением (2.46). В ходе определения условий устойчивости, необходимо определить граничное значение показателя этого свойства, которое выступает критерием сохранения ОСИС своих идентификационных свойств после преобразований (комбинации возмущений) видеоданных. Используемая для подсчета показателя (2.46) мера *SSIM* фактически определяет искомую границу. В этой связи, исходя из физического смысла меры *SSIM*, ОСИС будет разрушен в случае невозможности его распознавания после извлечения из СЭВ'. Очевидно, что как раз значение корреляционного параметра *SSIM* способно определить граничные искажения идентификатора, после которых его распознавание уже невозможно. Анализ открытых источников показал, что современные методы автоматического распознавания изображений текста позволяют определять искаженный текст с эффективностью не меньшей, чем ручной визуальный способ. По крайней мере способности человека и машинные методы обеспечивают один порядок вероятности распознавания и ее приемлемые значения достигаются в случаях, когда показатель искажений *SSIM* превышает значение 0,5. Следует отметить, что вопрос анализа существующих методов распознавания изображений текстовых идентификаторов на предмет выбора наиболее применимого в предметной области исследования или разработки нового подхода в работе не рассматривался. Автором данное направление вынесено в ограничения исследований и определено как перспективное.

В ходе проведения экспериментальных исследований в дополнение к изучению поведения граничных значений устойчивости с целью определения выигрыша от моделирования процесса формирования ОСИС был проанализирован авторский подход  $t_5$  к динамическому изменению координат размещения идентификатора в спектральной области СЭВ. Исследования заключались в сравнительном анализе показателя накопленной устойчивости (2.46), полученном с помощью модели статического размещения ОСИС в спектральной области изображения и модели, модифицированной с использованием техники  $t_5$ . Заметим, что в отличие от статического подхода модифицированный метод для получения «накопленного» изображения ОСИС (2.45) требует проведения дополнительной процедуры поиска маркеров во всех обрабатываемых СЭВ и их центрирования относительно друг друга. Разработка и реализация этой процедуры будет описана в следующих главах диссертационного исследования, посвященных алгоритмизации предлагаемой процедуры формирования и контроля целостности динамического ОСИС.

На начальном этапе проведения эксперимента преобразования из множества возмущений  $U$  были разбиты на группы по критерию объединения шкал измерения динамического диапазона воздействия, если такое изменение возможно. Остальные преобразования были рассмотрены отдельно. В результате в первую группу вошли преобразования подмножества  $U_1$ , обозначим их как  $a_x$ , где  $x$  – номер, присваиваемый в порядке описания возмущений: изменение размеров кадра –  $a_1$ , изменение разрешения изображения –  $a_2$ , сжатие изображения –  $a_3$ ; подмножество  $U_2$  – обрезка изображения по краям –  $a_4$ , вырезание части изображения –  $a_5$ ; подмножество  $U_4$  – изменение частоты кадров видеопоследовательности –  $a_6$ ; подмножество  $U_5$  – обрезка видео по времени –  $a_7$ . Эти преобразования СЭВ' были объединены на основании того, что для всех этих действий может быть использована относительная шкала динамического диапазона их воздействия. Мера воздействия преобразований первой группы будет изменяться в диапазоне от 100 % до 20 % и определять долю оставшегося изображения идентификатора после преобразования. Для возмущений  $a_1, a_3 - a_5$

99 % означает минимальное изменение площади СЭВ' на 1 %, а 1 % – максимальное. Аналогично для обрезки видеоданных по времени процент показывает отношение длительности оставшегося видео к исходной. Отдельное внимание стоит уделить возмущению  $a_6$ . Современные системы визуализации качественного видео достигают показателя частоты кадров в 100 кадр/с. Общепринятой нижней границей является частота в 24 кадр/с, первые форматы кинематографа в 16 и 18 кадр/с не рассматриваются ввиду их устаревания и практического исчезновения. Тогда физический диапазон возможного изменения частоты кадров будет от 24 до 100 кадр/с, а относительная мера преобразования  $a_6$  – от 100 % до 24 % (максимально возможное изменение возможно при уменьшении частоты кадров со 100 до 24 кадр/с, т. е.  $24/100 = 24$  %).

В ходе экспериментальных исследований шагом изменения диапазона преобразований первой группы был выбран 10 %, нижней границей, за исключением  $a_6$ , определено значение в 20 % от исходного ввиду того, что в результате искажений теряется не только ОСИС, но и качество самого СЭВ' становится неудовлетворительным.

Результаты экспериментальных исследований по определению границ устойчивости и сравнительного анализа модифицированного метода приведены в таблице 2.3. В ячейках таблицы через знак « / » приведены усредненные по всей выборке видеоданных значения показателя устойчивости (2.46), для модели статического размещения идентификатора / и модифицированной модели на основе изменяемых координат ОСИС по закону ПСП. Как видно из таблицы, показатель устойчивости для модифицированного подхода лучше показателя, обеспечиваемого статическим размещением маркера, в среднем на 15 % и в целом позволяет судить о повышении эффективности разработанной модели. В дополнение можно заметить линейную зависимость устойчивости от сокращения времени видео и уменьшения частоты кадров (табл. 2.3). Этот факт легко объясняется тем, что данные преобразования ни в коей мере не влияют на частотную область СЭВ, а лишь сокращают объем так называемого «накопления» идентификатора.

Таблица 2.3 Устойчивость ОСИС при воздействии преобразований  $a_1 - a_7$ 

Возмущение / %	90	80	70	60	50	40	30	20
$a_1$	0,86 / 0,93	0,72 / 0,84	0,64 / 0,78	0,52 / 0,66	0,41 / 0,51	0,34 / 0,47	0,15 / 0,23	0,09 / 0,16
$a_2$	0,85 / 0,91	0,73 / 0,89	0,61 / 0,76	0,54 / 0,71	0,48 / 0,58	0,38 / 0,52	0,16 / 0,18	0,08 / 0,12
$a_3$	0,91 / 0,97	0,86 / 0,93	0,73 / 0,81	0,53 / 0,69	0,41 / 0,53	0,32 / 0,46	0,24 / 0,31	0,18 / 0,27
$a_4$	0,86 / 0,89	0,71 / 0,78	0,61 / 0,67	0,46 / 0,51	0,37 / 0,42	0,34 / 0,38	0,26 / 0,31	0,18 / 0,24
$a_5$	0,91 / 0,94	0,86 / 0,91	0,75 / 0,86	0,68 / 0,71	0,54 / 0,62	0,46 / 0,52	0,26 / 0,32	0,12 / 0,14
$a_6$	0,95 / 0,98	0,79 / 0,86	0,69 / 0,78	0,58 / 0,69	0,52 / 0,60	0,46 / 0,51	0,39 / 0,42	0,27 / 0,33
$a_7$	0,89 / 0,96	0,78 / 0,92	0,71 / 0,86	0,67 / 0,82	0,64 / 0,76	0,59 / 0,72	0,51 / 0,66	0,44 / 0,62

Исходя из порогового показателя устойчивости  $Rob_{\text{пор}}^U = 0,5$  и результатов эксперимента, удалось определить граничные для устойчивости значения степени воздействия  $Gr(a_x)$  следующих преобразований:

- изменение размеров кадра  $Gr(a_1) = 50$  %;
- изменение разрешения СЭВ'  $Gr(a_2) = 40$  %;
- сжатие СЭВ'  $Gr(a_3) = 50$  %;
- обрезка СЭВ' по краям  $Gr(a_4) = 60$  %;
- вырезание части СЭВ'  $Gr(a_5) = 40$  %;
- изменение частоты кадров  $Gr(a_6) = 40$  %;
- обрезка видеоданных по времени  $Gr(a_7) < 20$  %.

Необходимо отметить, что для преобразований типа  $a_7$  устойчивость сохраняется при наличии хотя бы одного СЭВ', обеспечивающего превышение порогового значения показателя  $SSIM$ . В этой связи показатель  $Gr(a_7)$  может достигать значений, меньших 1 %. Практика показала, что для превышения

$Rob_{пор}^U = 0,5$  достаточно видеоданных длительностью в 100 кадров (при стандартной частоте 25 кадр/с – длительность в 4 с).

В ходе группирования угрожающих целостности идентификатора преобразований во вторую группу вошли следующие: множество  $U_3$  – компрессия видео с помощью известных кодеков изображения  $H.263 - a_8$ ,  $H.264 - a_9$ ,  $MPEG-2 - a_{10}$ ,  $MPEG-4 - a_{11}$ ,  $VP8 - a_{12}$ ; множество  $U_6$  – фильтрация изображений – Гаусса –  $a_{13}$ , контрастирование –  $a_{14}$ , медианная фильтрация –  $a_{15}$ . Набор кодеков и фильтров, рассматриваемых в диссертационном исследовании, обусловлен условиями функционирования ИС, для которой разрабатывается модель процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС, и является допущениями работы, определенными в пп.1.3.

Основным параметром кодеков изображения является степень компрессии (сжатия), которая определяется отношением объема исходного видеофайла к объему сжатого видео. Максимально возможная степень сжатия, рассматриваемая в работе, определена как 4 ввиду достижения минимально допустимого качества видеопотока, способного предоставлять требуемую информативность. Тогда диапазоном изменения степени сжатия при проведении экспериментальных исследований по выявлению границы устойчивости выступит степень сжатия от 1 (без сжатия, только перекодирование) до 4 с шагом 0,5. Для алгоритмов фильтрации существует показатель степени, или глубины фильтрации. С целью удобства восприятия результатов эксперимента данные показатели для каждого из рассматриваемых фильтров были приведены к шкале 1–4, предварительно пройдя анализ на верхнюю границу глубины фильтрации, определяющую приемлемость качества фильтруемого изображения. По аналогии с кодеками глубина фильтрации 1 означает ее отсутствие, 4 – максимально допустимая по качеству глубина. Результаты исследования степени влияния преобразований  $a_8 - a_{15}$  на устойчивость ОСИС приведены в сводной таблице 2.4. По аналогии с таблицей 2.3 в ячейках через дробь приведены значения «накопленной» устойчивости для метода со статическим ОСИС и модифицированного метода внедрения маркера с изменяемыми координатами.

Таблица 2.4 Устойчивость ОСИС при воздействии преобразований  $a_8 - a_{15}$ 

Возмущение / степень сжатия	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$a_8$	0,94 / 0,97	0,81 / 0,86	0,74 / 0,79	0,51 / 0,63	0,49 / 0,56	0,47 / 0,52	0,43 / 0,46
$a_9$	0,92 / 0,97	0,79 / 0,95	0,72 / 0,84	0,67 / 0,78	0,56 / 0,68	0,49 / 0,55	0,37 / 0,41
$a_{10}$	0,93 / 0,97	0,91 / 0,94	0,82 / 0,86	0,71 / 0,79	0,66 / 0,75	0,61 / 0,68	0,58 / 0,64
$a_{11}$	0,91 / 0,97	0,87 / 0,92	0,81 / 0,87	0,72 / 0,81	0,63 / 0,72	0,57 / 0,62	0,37 / 0,48
$a_{12}$	0,93 / 0,97	0,91 / 0,95	0,78 / 0,84	0,59 / 0,76	0,47 / 0,62	0,39 / 0,48	0,31 / 0,42
$a_{13}$	1 / 1	0,78 / 0,89	0,54 / 0,74	0,38 / 0,68	0,32 / 0,51	0,24 / 0,47	0,14 / 0,39
$a_{14}$	1 / 1	0,79 / 0,88	0,43 / 0,69	0,31 / 0,58	0,22 / 0,46	0,19 / 0,42	0,07 / 0,38
$a_{15}$	1 / 1	0,81 / 0,91	0,62 / 0,64	0,37 / 0,52	0,31 / 0,48	0,29 / 0,41	0,17 / 0,36

Анализ данных экспериментальных исследований (табл. 2.4) показывает значительное превышение разрушающего воздействия множества преобразований – фильтрации изображения  $U_6$ . Это объясняется тем, что фильтрация СЭВ' воздействует и преобразует частотную область и вносит искажения в идентификатор напрямую. Однако именно анализ возмущений фильтрации позволяет судить о значительном выигрыше в устойчивости ОСИС от применения подхода псевдослучайного изменения координат внедрения маркера, который достигает 30 %. В среднем результаты анализа демонстрируют выигрыш от модификации метода в 18 %.

Значение порога устойчивости  $Rob_{пор}^U = 0,5$  обусловило следующий выбор граничных для устойчивости ОСИС значений степени сжатия/глубины фильтрации  $Gr(a_x)$  следующих преобразований:

- кодек *H.263*  $Gr(a_8) = 3,5$ ;
- кодек *H.264*  $Gr(a_9) = 3,6$ ;
- кодек *MPEG-2*  $Gr(a_{10}) = 4$ ;
- кодек *MPEG-4*  $Gr(a_{11}) = 3,9$ ;

- кодек  $VP8Gr(a_{12}) = 3,3$ ;
- фильтр Гаусса  $Gr(a_{13}) = 3,1$ ;
- контрастирование  $Gr(a_{14}) = 2,8$ ;
- медианный фильтр  $Gr(a_{15}) = 2,6$ .

В заключение следует отметить, что эффект «накопления» информации об идентификаторе в ходе извлечения и анализа ОСИС обеспечивает абсолютную его устойчивость к преобразованию  $U_7$  – переводу цветного видео в монохромное. Данный факт логично вытекает из условий метода по разделению изображения на цветовые каналы и внедрению информации об идентификаторе в каждый, следовательно, при преобразовании  $U_7$  произойдет лишь усреднение ОСИС по цветовым составляющим.

В конечном счете проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения параметров глубины, размера идентификатора и спектральной области формирования ОСИС в частотной области видеоданных. В дальнейшем были выделены 15 разрушающих ОСИС воздействий и эмпирически определены граничные значения устойчивости идентификатора, сформированного согласно предлагаемой модели, по отношению к каждому из разрушающих преобразований. Сравнительный анализ показал повышение эффективности модели по показателю устойчивости в отношении множества преобразований  $U$  в среднем на 18 %.

Экспериментальные исследования проводились с помощью авторского программного обеспечения. Разработанное ПО было написано на языке C++. Для повышения производительности посредством распараллеливания вычислений между всеми ядрами процессора при написании кода использовались соответствующие механизмы из стандарта языка C++23. Код компилировался компилятором GCC 12. Для работы с изображениями, в частности для преобразования в частотную область и обратно, использовались модули из свободно распространяемой библиотеки с открытым исходным кодом OpenCV 4.6. Вычисления проводились на персональном компьютере с процессором Intel Core i9 и оперативной памятью объемом 32 ГБ под управлением операционной системы

Ubuntu 22.10 [31]. Визуализация графиков и анализ данных производился на языке программирования Python 3.9 в среде Jupyter Notebook с использованием библиотек Pandas, Matplotlib и Sklearn.

## 2.6 Выводы по главе

В главе 2 была разработана модель угрожающих целостности ОСИС преобразований, позволившая определить предметную область исследований и наметить пути решения научной задачи. Для решения научной задачи разработанная модель позволила применить терминативный подход, заключающийся в определении техник и способов обеспечения устойчивости ОСИС – терминаторов последствий от преобразований СЭВ'. В этом случае разработка математического обеспечения для обработки ОСИС предваряется анализом существующих методов и способов повышения их устойчивости на предмет выделения необходимых техник-терминаторов, позволяющих нивелировать соответствующее возмущение из множества смоделированных.

В ходе проведенного анализа современных методов повышения устойчивости ОСИС в видеоданных и изображениях был выявлен ряд достоинств и недостатков, способствующих впоследствии разработке теоретико-множественной модели процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС. В разрабатываемой модели принято решение использовать подход внедрения ОСИС в спектральную область видеоданных, рассматривая их как последовательность статических кадров-изображений (СЭВ). Результаты анализа позволили выделить СЧ и НЧ диапазоны спектра СЭВ как наиболее перспективные, что было впоследствии подтверждено результатами экспериментальных исследований. В качестве типа спектрального преобразования обоснован выбор базиса Фурье. Внедряемый маркер принимает вид числа-идентификатора пользователя ИС, получающего доступ к видеоданным ограниченного распространения. Внедрение

осуществляется в каждый кадр каждого цветового канала видео. Предлагаемый метод был модифицирован авторским подходом к выбору позиции в спектральной области СЭВ внедряемого идентификатора. Его координаты предлагается изменять в каждом СЭВ по закону ПСП. В дальнейшем была осуществлена разработка метрики устойчивости ОСИС, формируемого в видеоданных. Обнаруженный эффект «накопления» информации о внедренном идентификаторе позволил формализовать показатель «накопленной» устойчивости (2.46), обеспечивающий полноту оценки свойства устойчивости ОСИС.

В заключение главы описаны условия и результаты дополнительных исследований по определению рабочих диапазонов числовых параметров предлагаемой модели формирования ОСИС и граничных условий сохранения устойчивости. Наиболее эффективным подходом таких исследований выступило проведение эксперимента по поиску граничных условий устойчивости и невидимости ОСИС, формируемого по авторской процедуре, и рабочих диапазонов, обеспечивающих максимальную эффективность предлагаемой модели. Экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения параметров глубины, размера идентификатора и спектральной области встраивания для модифицированного подхода к формированию ОСИС в частотной области видеоданных. В дальнейшем были выделены 15 разрушающих ОСИС воздействий и эмпирически определены граничные значения устойчивости идентификатора, сформированного предлагаемым методом по отношению к каждому из разрушающих возмущений. Сравнительный анализ показал повышение эффективности метода по показателю устойчивости в отношении модели преобразований  $U$  в среднем на 18 %. Таким образом, разработанная модель обеспечивает получение зависимости между параметрами формируемого ОСИС и энергетически значимыми составляющими спектра частотной области видеоданных, а также получение равномерного распределения множества возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству СЭВ'.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ВИДЕОДАНЫХ**

Теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих динамический ОСИС, разработанная в Главе 2, а также экспериментально определенные граничные условия устойчивости определили предпосылки к практической реализации алгоритмических решений процедур формирования динамического ОСИС в видеоданных и контроля его целостности.

В силу особенностей решаемой задачи разрабатываемая система обеспечения контроля доступа и распространения видеоданных должна предусматривать две основные процедуры. Во-первых, процедуру, реализующую этап маркирования видео (формирования ОСИС), доступ к которому осуществляет авторизованный пользователь ИС (рис. 2.1). Рассмотрение внешнего нарушителя, получившего несанкционированный доступ к базе видеоданных ИС, выходит за рамки настоящего научного исследования. Во-вторых, процедуру контроля целостности (т.е. обнаружения и распознавания маркера) динамического ОСИС, позволяющего однозначно идентифицировать пользователя. Таким образом, перечисленные факторы определяют комплексность предстоящего решения задачи по алгоритмизации процедур обработки ОСИС в видеоданных на основе координатно-переменного подхода.

#### **3.1 Анализ исходных данных алгоритмов**

С целью спецификации разрабатываемых алгоритмов формирования и контроля целостности ОСИС в видеоданных в спектральной области проведем анализ входных данных. Учитывая особенности функционирования

информационной системы с процедурой маркирования видеоданных (рис. 2.1), предположим, что на вход алгоритма формирования ОСИС в запрашиваемое пользователем видео будет поступать непосредственно видеопоток и идентификатор пользователя.

Большое многообразие разработанных на сегодняшний день форматов представления видео, кодеков и алгоритмов сжатия (H.263, H.264, MPEG-2, MPEG-4, VP8) будет непосредственно определять множество форматов хранимого видео в базе видеоматериалов, а также в случае использования информационной системой возможности предоставления потокового видео, поступающего непосредственно с камер видеонаблюдения. В этой ситуации формат предоставляемого видеопотока пользователю определяет производитель камер наблюдения. Однако широкая распространенность реализаций разнообразных декодеров видео, средств декомпрессии [35, 36], в том числе и свободно распространяемых, способных конвертировать видео в покадровый трехцветный (в случае цветного изображения) массив данных со скоростью большей, чем режим реального времени, относит задачу декодирования к разряду практических, а не научных. В этой связи введем допущение алгоритма формирования ОСИС в видеопоток в спектральную область: на вход алгоритма поступают декодированные декомпрессированные видеоданные, представляющие из себя покадровый массив трехцветных изображений в формате *RGB*.

В дополнение к видеоданным, к которым осуществляет доступ пользователь ИС, на вход алгоритма формирования ОСИС должен поступить уникальный идентификатор этого пользователя. Задача выбора оптимального представления идентификатора пользователя в виде изображения маркера представляет из себя отдельную проблему, решаемую в практической плоскости при реализации конкретных систем внедрения ОСИС в изображения и видеоданные. В таких случаях определяющими факторами выступают такие реализационные особенности системы, как количество пользователей, размеры изображения, возможности и требования к автоматическому распознаванию идентификаторов и т.п. В этой связи без потери общности в качестве допущения примем в качестве

идентификатора пользователя изображение четырехбайтного числа в шестнадцатеричном формате представления, например A40BFC75. Такой идентификатор позволит обеспечить количество пользователей ИС, равное  $2^{32}$ , и в дополнение шестнадцать символов алфавита, которым задается идентификатор, позволяют значительно упростить и ускорить процедуру автоматического распознавания изображения идентификатора при работе алгоритма контроля целостности динамического ОСИС.

В качестве входных данных алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в частотной области видеопотока будет выступать уже описанный выше декодированный видеоряд (множество СЭВ'). Учитывая специфику координатно-переменного формирования ОСИС, на обнаружение которого направлен алгоритм, на его вход необходимо будет также подать закон изменения координат идентификатора, который был использован при внедрении скрытого слоя. Однако с целью унификации работы алгоритмов целесообразней будет стандартизировать закон выбора и динамики изменения координат внедренного идентификатора и сделать его единым для всей разрабатываемой системы.

### **3.2 Разработка алгоритма формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в частотной области видеоданных**

Предложенный в разделе 2.3 модифицированный метод формирования устойчивого ОСИС позволил разработать алгоритм маркирования видео, основной особенностью которого являются динамически изменяемые координаты внедрения ОСИС. Опишем работу предлагаемого алгоритма.

Шаг 1. Инициализация алгоритма. Начало.

Шаг 2. Ввод исходных данных.

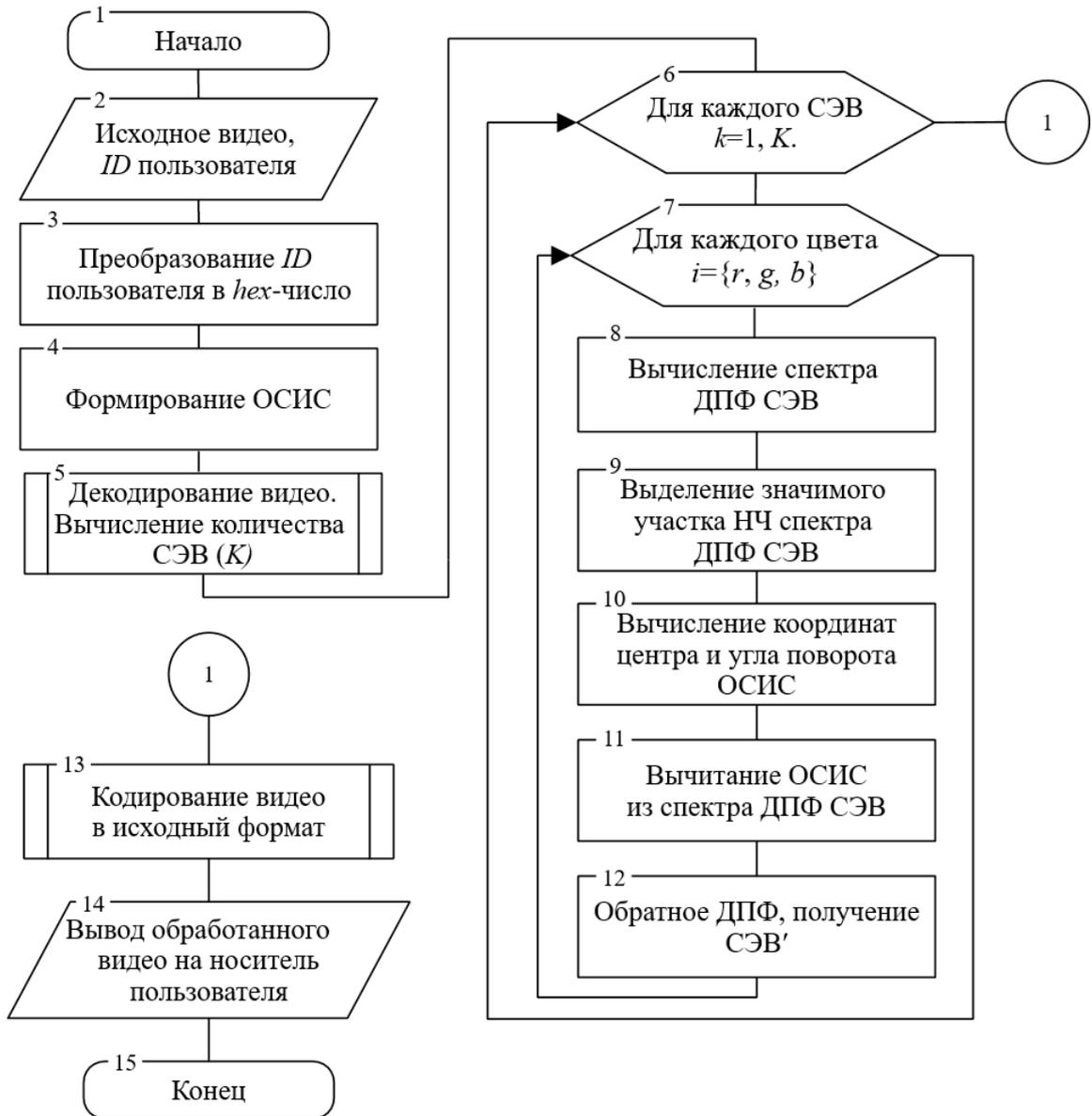


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма формирования динамического ОСИС в частотной области видеоданных

По запросу пользователя на вывод видеоизображения из базы данных видеоматериалов или сохранения текущего видеопотока с камеры наблюдения на носитель информации информационной системой анализируется аутентичность предъявленного пользователем идентификатора и его прав доступа и в случае положительного исхода проверки предоставляются видеоданные и идентификатор пользователя.

Шаг 3. Далее осуществляется анализ идентификатора пользователя *ID*, поиск его в соответствующей базе и присвоение ему соответствующего шестнадцатеричного четырехбайтного числа. В дальнейшем пользователь информационной системы будет однозначно идентифицироваться с этим числом. Обозначим его как *IDhex*.

Шаг 4. На этом этапе осуществляется формирование монохромного изображения идентификатора – *IDhex*. Интенсивность формирования и относительная площадь, занимаемая идентификатором в изображении (фактически его размеры) выбираются исходя из полученных в разделе 2.5 граничных и оптимальных условий устойчивости ОСИС. На основании граничных условий метрик искажений оптимальным диапазоном яркости шаблона идентификатора выберем значение 25 (максимальное – 256). Оптимальный диапазон размеров шрифта идентификатора определен в 0.004 – 0.02 от размеров изображения, в качестве постоянного показателя определим среднее значение относительной площади идентификатора в 0.01. Итогом работы шага 4 выступает монохромное изображение четырехбайтного числа в шестнадцатеричном формате с интенсивностью 25 (приблизительно 10 % от максимума) размером в 1 % от общего размера СЭВ (кадра) на черном фоне. Общие размеры изображения с идентификатором совпадают с размерами СЭВ. Следует уделить немного внимания начальному положению идентификатора. Ввиду того, что в дальнейшей работе алгоритма координаты центра идентификатора *IDhex* будут меняться от кадра к кадру, то в исходном виде можно расположить идентификатор в геометрическом центре монохромного шаблона. В более строгой интерпретации было бы оптимальней в результате шага 4 получить два шаблона: черное изображение с длиной и шириной, совпадающими с исходным, и изображение *IDhex*, указанных размеров. Такое представление будет более удобным для последующей работы координатно-переменного формирования ОСИС.

Шаг 5. В ходе выполнения этого шага осуществляется декодирование одного из форматов представления видео: H.263, H.264, MPEG-2, MPEG-4, VP8 – согласно введенным ограничениям работы. Отметим, что вопросы проверки корректности

видеокодеков, ошибок преобразования видеоданных и т. п. считаются решенными и лежат в реализационной плоскости алгоритмов в виде программных продуктов. В работе они выносятся за рамки исследований. В дальнейшем происходит определение длительности видео, разбиение его на кадры и декомпозиция на цветовые составляющие. Результатом шага 5 является (в случае цветного видео) массив СЭВ – статических изображений в формате *RGB* размером  $N \times M$  (ширина и высота кадра, соответственно), количеством  $K$ , равным количеству кадров обрабатываемого видео.

Шаг 6 и Шаг 7 представляют собой два вложенных цикла. Согласно шагу 6 процедура формирования осуществляется для каждого из  $K$  кадров видеопотока и далее шаг 7 определяет обработку каждой цветовой составляющей, последовательно для красного  $r$ , синего  $g$  и зеленого  $b$  цветов.

Опишем тело двойного цикла.

Шаг 8. Осуществляется вычисление спектра ДПФ, точнее абсолютных значений спектральной функции  $|Sp_{i,k}(u, v)|$  согласно выражениям 2.26 и 2.27. В результате ДПФ формируется двумерный массив значений абсолютной интенсивности частотных составляющих СЭВ, размерами совпадающий с высотой и шириной изображения. Однако частотные составляющие НЧ спектра более ярко проявляются в спектре. В этом случае с целью последующего равномерного зашумления по всему спектру СЭВ путем добавления ОСИС необходимо провести логарифмическое масштабирование амплитуд гармоник. Таким образом, в результате выполнения шага будет получен логарифмически нормированный массив амплитуд спектральных составляющих изображения кадра, полученных с помощью базиса ДПФ.

Шаг 9. Логичным продолжением этапа спектральной подготовки цветowego кадра видеопотока к маркированию является процедура выделения энергетически «значимой» области спектра – области формирования ОСИС. Согласно модели, разработанной в разделе 2.3, предлагается формировать ОСИС в частотной области, суммарная энергия которой превышает определенное пороговое значение. Согласно приведенным в разделе 2.5 результатам экспериментальных

исследований наиболее предпочтительной с позиции устойчивости ОСИС выступает координатная область формирования – прямоугольник с диагональю  $(0.1, 0.1) - (0.65, 0.65)$ , соответствующий СЧ и НЧ диапазонам спектра. Таким образом, параметры области формирования будут определены следующими выражениями:

$$C(x_c, y_c): x_c = \frac{N}{4}, y_c = \frac{M}{4}, \quad (3.1)$$

$$N_{DW} = \frac{N}{2} \cdot (0.65 - 0.1), M_{DW} = \frac{M}{2} \cdot (0.65 - 0.1), \quad (3.2)$$

где  $C(x_c, y_c)$  – геометрический центр спектральной области формирования ОСИС с координатами  $x_c$  и  $y_c$ ,  $N_{DW}$  и  $M_{DW}$  – ширина и высота прямоугольной области маркирования спектра размерами  $N \times M$ .

Шаг 10. Отличительной особенностью алгоритма формирования ОСИС в частотную область видеоданных, характеризующей его новизну, является применение этапа динамического изменения координат формирования идентификатора. Следует отметить, что в рамках предлагаемого подхода необходимо выбирать новые координаты идентификатора исключительно из диапазона значимой области спектра СЭВ, определенной на шаге 9 выражения 3.1 и 3.2. Автором выдвигается **гипотеза**, что использование координатно-переменного подхода по случайному/псевдослучайному закону выбора новых координат идентификатора для каждого цветового кадра видеопотока позволит достичь большей размытости влияния ОСИС на спектр СЭВ и тем самым большей его незаметности в пространственной области. Более того, предлагается изменять по случайному закону не только координаты ОСИС, но и угол его наклона. Ввиду того, что в качестве маркера – идентификатора пользователя *IDhex* выступает строка шестнадцатеричных символов, ее постоянное горизонтальное расположение в значимой области спектра СЭВ закономерно приведет к появлению определенно устойчивых и постоянных изменений в пространственной области изображения, что, в свою очередь, повлечет к снижению свойства незаметности ОСИС.

Выдвинутая гипотеза вызвала необходимость анализа современных методов и подходов к генерации случайных и псевдослучайных чисел (СЧ и ПСЧ). На сегодняшний день разработано и реализовано большое количество способов получения СЧ и алгоритмов выработки ПСЧ [37]. Однако специфика использования подобного алгоритма в процедуре формирования ОСИС в видеоданных, а именно требования по простоте реализации, малой временной и вычислительной сложности, отсутствие жестких требований к «случайности» генерируемых чисел, позволила выбрать в качестве требуемого генератора линейный рекуррентный регистр (ЛРР, регистр сдвига с линейной обратной связью, *linear shift register* и т. п.). ЛРР, обратные связи которого описывает примитивный полином, является генератором M-последовательности [38]. Свойства M-последовательности на своем периоде таковы, что ничем не отличаются от биномиально распределенной случайной величины. Более того, эти же свойства позволяют рассматривать любую детерминированную часть состояния ячеек памяти такого регистра, как генератор ПСП. Таким образом, реализовав один ЛРР с достаточным количеством ячеек памяти, возможно за один такт его работы получить и случайные значения координат геометрического центра встраиваемого идентификатора, и случайное число, задающее угол поворота строки *IDhex*.

Для реализации подхода предполагается выбрать 7-ми или 8-битный ЛРР, обратные связи которого описываются примитивным многочленом. Минимизируя количество операций сложения по модулю два за один такт работы, выберем из математических справочников [39] полиномы:  $h(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1$  и  $h(x) = x^7 + x + 1$  (0x187 и 0x83 – в шестнадцатеричном формате). Такой подход позволит выделить по три бита на определение координат высоты и ширины центра идентификатора, а также двумя или одним битом закодировать угол поворота строки *IDhex*. Для наглядности и упрощения демонстрационных материалов в качестве примера возьмем ЛРР, заданный полиномом  $h(x) = x^7 + x + 1$  (рис. 3.2).

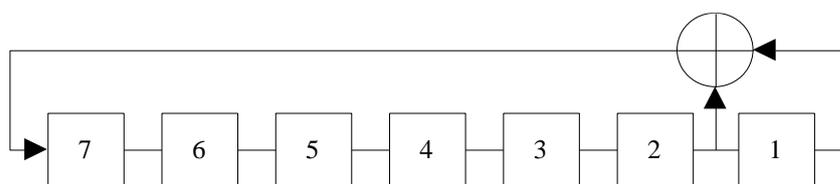


Рисунок 3.2 – Линейный рекуррентный регистр,  
заданный полиномом  $h(x) = x^7 + x + 1$

Для задания различных вариантов расположения центров идентификатора в значимой области спектра контейнера, в который производится встраивание ОСИС, достаточно и целесообразно разбить эту область на 64 равных «квадрата». Увеличение количества вариантов размещения не приведет к какому-либо усилению эффекта от динамики координат формирования ОСИС, но приведет к увеличению разрядности генератора ПСЧ и, следовательно, к увеличению вычислительной сложности процедуры. Для определения координат «квадрата» – центра встраивания достаточно 6 бит – по три бита на номер ячейки по горизонтали и вертикали. Таким образом, вся значимая область спектра для маркирования будет разбита на 64 ячейки с трехбитными координатами по горизонтали и вертикали. Допустим, номер по горизонтали будут определять состояния ячеек №№ 7, 6, 5; по вертикали – №№ 4, 3, 2. Состояние ячейки № 1 будет определять угол поворота строки идентификатора. В данном случае один бит позволяет обеспечить вариативность в два угла поворота:  $0^\circ$  и  $90^\circ$  (рис. 3.3). Очевидно, что резервируя под угол поворота большее количество бит, возможно обеспечить большее разнообразие углов поворота идентификатора. Например, полином степени 8 обеспечивает четыре угла поворота:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$ . Однако исследование зависимости свойства невидимости ОСИС от количества углов поворота идентификатора требует проведения дополнительных экспериментов, которые будут описаны в последующем.

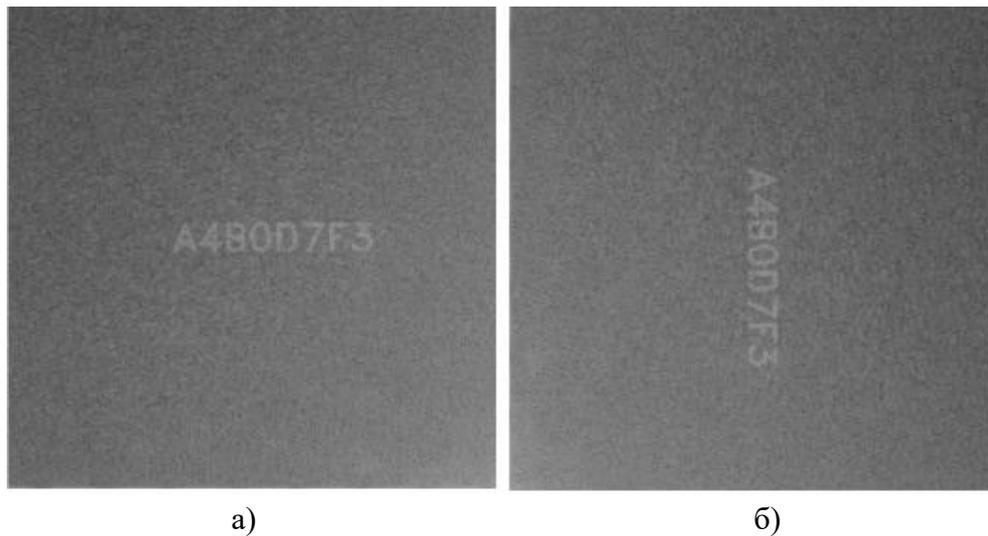


Рисунок 3.3 – Варианты углов поворота строки идентификатора *IDhex*:

а) 0°; б) 90°.

В таблице 3.1 приведены состояния первых десяти тактов работы генератора М-последовательности (начальное состояние заполнено случайно), а на рисунке 3.4 продемонстрирована последовательность выбора ячеек для определения координат встраивания в каждую цветовую составляющую каждого СЭВ.

Таблица 3.1 Состояние ячеек памяти ЛРР:  $h(x) = x^7 + x + 1$

№ такта	№ столбца			№ строки			Угол поворота
	7	6	5	4	3	2	
Нач.сост.	1	0	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1	0	0
2	0	1	1	0	0	1	0
3	1	0	1	1	0	0	1
4	1	1	0	1	1	0	0
5	0	1	1	0	1	1	0
6	1	0	1	1	0	1	1
7	1	1	0	1	1	0	1
8	1	1	1	0	1	1	0
9	1	1	1	1	0	1	1
10	0	1	1	1	1	0	1

Согласно таблице 3.1 в первый такт работы процедуры определения координат внедрения идентификатор будет размещен по центру ячейки 6-го столбца ( $110_2 \rightarrow 6_{10}$ ) и 2-й строки ( $010_2 \rightarrow 2_{10}$ ) с углом поворота  $0^\circ$  в значимую область спектра ДПФ красной составляющей первого кадра видеопотока –  $DW_{r,1}(6,2)$ . Далее результатом работы Шага 10 будут изображения  $IDhex$  (рис. 3.4):  $DW_{g,1}(3,1)$ ,  $DW_{b,1}(5,4)$ ,  $DW_{r,2}(6,6)$ ,  $DW_{g,2}(3,3)$ ,  $DW_{b,2}(5,5)$ ,  $DW_{r,3}(6,6)$ ,  $DW_{g,3}(7,3)$ ,  $DW_{b,3}(7,5)$ ,  $DW_{r,4}(3,6)$ . Углы поворота изменяются согласно значениям ячейки № 1: 0 –  $0^\circ$ , 1 –  $90^\circ$ . Период последовательности, генерируемой рассматриваемым ЛРР, равен  $2^7 - 1 = 127$ , что обеспечивает достаточную вариативность координат размещения идентификатора и угла его поворота. За свой период ЛРР «обойдет» каждую ячейку значимой области встраивания по два раза с различным углом поворота, а ввиду взаимной простоты периода ЛРР и количества цветовых составляющих  $(127, 3) = 1$  общий период попадания идентификатора в одну и ту же ячейку одного и того же цвета составляет –  $127 * 3 = 381$  кадр.

Таким образом, при каждом вызове процедуры, реализующей Шаг 10 алгоритма, будет осуществляться один такт работы ЛРР, состояние ячеек которого и определит угол поворота и координаты геометрического центра встраиваемого идентификатора на спектральной плоскости СЭВ.

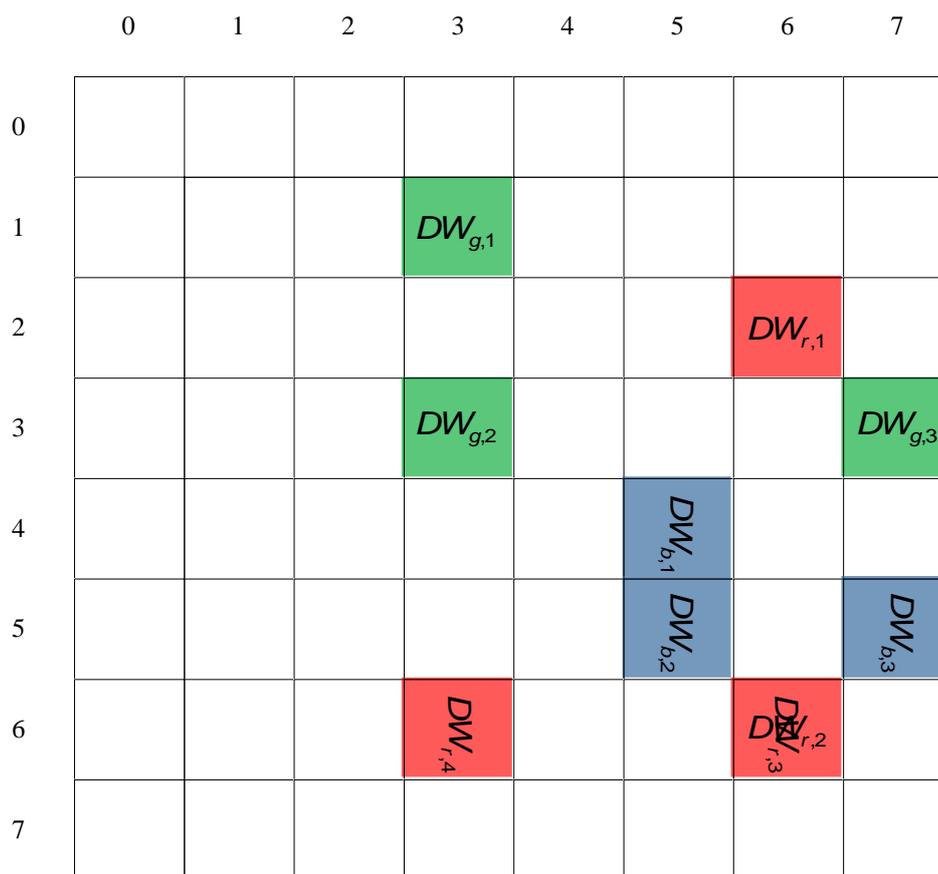


Рисунок 3.4 – Пример работы процедуры выбора координат размещения и угла поворота идентификатора ОСИС

Шаг 11. На этом этапе алгоритма осуществляется вычитание из логарифмически нормированного спектра СЭВ изображения подготовленного идентификатора  $IDhex$  согласно выражениям 2.33 и 2.34. В результате производится внедрение ОСИС в цветовую составляющую кадра видеоданных в спектральной области. Результатом работы шага является  $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$  – спектр Фурье изображения со сформированным ОСИС (СЭВ').

Шаг 12. Последним этапом работы тела двух вложенных циклов Шаг 6 и Шаг 7 выступает обратное преобразование Фурье. Полученный спектр  $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$  СЭВ' с помощью вычисления, описанного выражением 2.35,

переводят в  $I_{T_{i,k}}(x, y)^{DW}$  – пространственное представление изображения  $k$ -го кадра  $i$ -й цветовой составляющей со сформированным ОСИС.

Шаг 13. По завершении двойного цикла формирования ОСИС во всех кадрах всех цветowych составляющих видеоданных необходимо преобразовать множество СЭВ' в потоковое видео каждого из цветowych каналов с последующим их объединением. Затем, исходя из формата запрашиваемого пользователем видео, выполняется кодирование видеоданных в исходное представление.

Шаг 14. В дальнейшем осуществляется вывод промаркированного видеопотока в ИС и потом по запросу пользователя запись на носитель информации.

На Шаге 15 осуществляется деинициализация алгоритма и завершение его работы.

В результате работы алгоритма динамического формирования ОСИС в частотной области видеоданных пользователю ИС по его запросу предоставляется промаркированное его уникальным идентификатором  $IDhex$  видео.

Проанализируем вычислительную сложность и основные свойства разработанного алгоритма. Одним из определяющих эффективность алгоритма свойств является вычислительная сложность, позволяющая оценить быстродействие и ресурсоемкость его практических реализаций.

Учитывая, что объектом формирования ОСИС в конечном счете выступает СЭВ, примем за элементарную единицу обработки видео точку (пиксель). Тогда в качестве количества входных переменных  $n$  алгоритма будет выступать значение количества точек, задающих СЭВ:

$$n = N \times M. \quad (3.3)$$

Согласно блок-схеме (рис. 3.1) алгоритм не является ветвящимся, не имеет параллельных веток. В этой связи для подсчета его вычислительной сложности применим стандартный подход сложения количества операций, затрачиваемых на каждый элементарный шаг, и, в случае цикла, умножения на количество итераций.

На шаге 3 осуществляется преобразование  $ID$  в шестнадцатеричное число  $ID_{hex}$ , что фактически для процессора является сменой точки зрения на двоичную последовательность. По сравнению с остальными процедурами вычислительными затратами на шаг 3 можно пренебречь. На шаге 4 осуществляется отрисовка изображения идентификатора с заданными параметрами, сложность которой составляет прямую зависимость от количества точек  $n$  (3.3) исходного СЭВ –  $O(n)$ .

Декодирование видеоданных на шаге 5 вынесено в допущения работы. Вычислительная сложность декодера зависит от вида самого алгоритма уплотнения и его конкретной реализации. Однако анализ источников [35, 36] показывает существование хороших реализаций кодеков видео, обладающих сложностью, близкой к полиномиальной. В этой связи можно сделать вывод, что шаг 5 к существенному увеличению вычислительной сложности не приведет.

В дальнейшем шаги 6 и 7, являясь циклами, обуславливают умножение общей сложности тела циклов. В случае обработки цветного видео множитель будет равен 3. Однако к увеличению вычислительной сложности будет приводить такой параметр как количество кадров. Так, при битрейте 25 кадров/с видео длительностью 5 мин. будет состоять из 7500 кадров, что соизмеримо с величиной  $n$ . Таким образом, примем параметр  $K$  – количество кадров видео в качестве коэффициента, умножающего на  $n$  вычислительную сложность алгоритма.

Рассмотрим сложность каждого из этапов тела двойного цикла. Классическое преобразование Фурье имеет сложность  $O(n^2)$ , однако существуют быстрые алгоритмы вычисления дискретного спектра изображения, сложность которых определяется как  $O(n \cdot \log(n))$  [40]. В случае обработки изображения происходит двумерное ДПФ, поэтому конечная временная сложность шага 8 будет равна  $O(2n^2 \cdot \log(n))$ .

В ходе шага 9 определяется и выделяется значимая часть спектра СЭВ. Ввиду симметричности полученного спектра ДПФ, обусловленного его двумерностью, реальная обработка затронет лишь четверть спектральной области. Следовательно,  $O(0,25n)$  – вычислительная сложность этапа 9. На шаге 10, как уже упоминалось выше, осуществляется один такт работы ЛРР, с помощью состояний ячеек которого

и определяются координаты расположения идентификатора и угол его поворота. Тогда сложность этого этапа будет равна  $O(c)$ , где константа  $c$  определяется фиксированным набором действий по осуществлению вычислений одного такта ЛПП, считыванию состояний ячеек памяти, переводу их в формат номеров столбцов и строк и т. п. Следует отметить, что ввиду своей специфики  $c$  много меньше параметра  $n$ ,  $c \ll n$ .

Процедура вычитания из спектра СЭВ сформированного идентификатора (Шаг 11) заключается в поточечном вычитании интенсивностей двух изображений. Отсюда сложность этого этапа определяется как  $O(n)$ . На Шаге 11 завершается тело цикла, его суммарную сложность определим выражением:

$$O(2n^2 \cdot \log(n)) + O(0,25n) + O(c) + O(n) + O(2n^2 \cdot \log(n)) = O(4n^2 \cdot \log(n) + 1,25n + c).$$

Исходя из того, что Шаг 13 вынесен в допущения работы, можно рассчитать окончательную вычислительную сложность разработанного алгоритма формирования ОСИС. Учитывая двойной цикл и Шаги 3 и 4, он примет следующий полиномиальный вид:

$$\begin{aligned} & 3 \cdot n \cdot (O(4n^2 \cdot \log(n) + 1,25n + c)) + O(1) + O(n) = \\ & = O(12n^3 \cdot \log(n) + 3,75n^2 + (3c + 1)n + 1) \approx O(n^3 \cdot \log(n)). \end{aligned}$$

Обобщенные данные анализа вычислительной сложности алгоритма приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Вычислительная сложность этапов алгоритма формирования ОСИС

Этап алгоритма	Вычислительная сложность этапа
Шаг 3	$O(1)$
Шаг 4	$O(n)$

Шаг 6	$O(K \cdot n) \approx O(n^2)$
Шаг 7	$O(3n)$
Шаг 8	$O(2n^2 \cdot \log(n))$
Шаг 9	$O(0,25n)$
Шаг 10	$O(c)$
Шаг 11	$O(n)$
Шаг 12	$O(2n^2 \cdot \log(n))$
Суммарная сложность	$O(12n^3 \cdot \log(n) + 3,75n^2 + (3c+1)n + 1) \approx O(n^3 \cdot \log(n))$

В заключение оценки сложности необходимо отметить, что хотя этапы декодирования/кодирования потокового видео и будут замедлять работу алгоритма формирования ОСИС в целом, увеличивая его сложность, их полиномиальность в реализующих процедурах [35] не позволит перевести итоговую сложность в разряд «трудных, сложновычислимых» субэкспоненциальных или экспоненциальных алгоритмов.

Далее проведем анализ основных свойств разработанного алгоритма динамического формирования ОСИС в частотной области видеоданных. Алгоритм составлен таким образом, чтобы исполнитель (ЭВМ) мог однозначно и точно следовать командам алгоритма и эффективно получать определенный результат, поэтому данный алгоритм обладает следующими свойствами:

1) дискретностью, так как вычислительный процесс формирования ОСИС в потоковом видео разделен разработанным алгоритмом на отдельные этапы, возможность выполнения которых исполнителем (компьютером) не вызывает сомнений и строго определена;

2) детерминированностью (определенностью), так как алгоритм предполагает получение однозначного результата – видеоданные со скрытым идентификационным слоем при заданных исходном видеопотоке и идентификаторе пользователя. Благодаря этому свойству процесс выполнения алгоритма носит механический характер;

3) результативностью, так как алгоритм указывает на наличие таких исходных данных, для которых реализуемый вычислительный процесс через конечное число шагов сможет остановиться и выдать искомый результат;

4) массовостью, так как алгоритм пригоден для маркирования всего множества видеоданных, заданного ограничениями и условиями раздела 1.3 (постановкой научной задачи).

Ввиду того, что в алгоритме отсутствуют условные операторы, скорость его сходимости в основном определяется скоростью сходимости процедуры прямого и обратного ДПФ. Алгоритм переходит к окончанию, когда завершается обработка последнего кадра видеопотока и осуществляется обратное ДПФ с последующим кодированием видео в исходный формат.

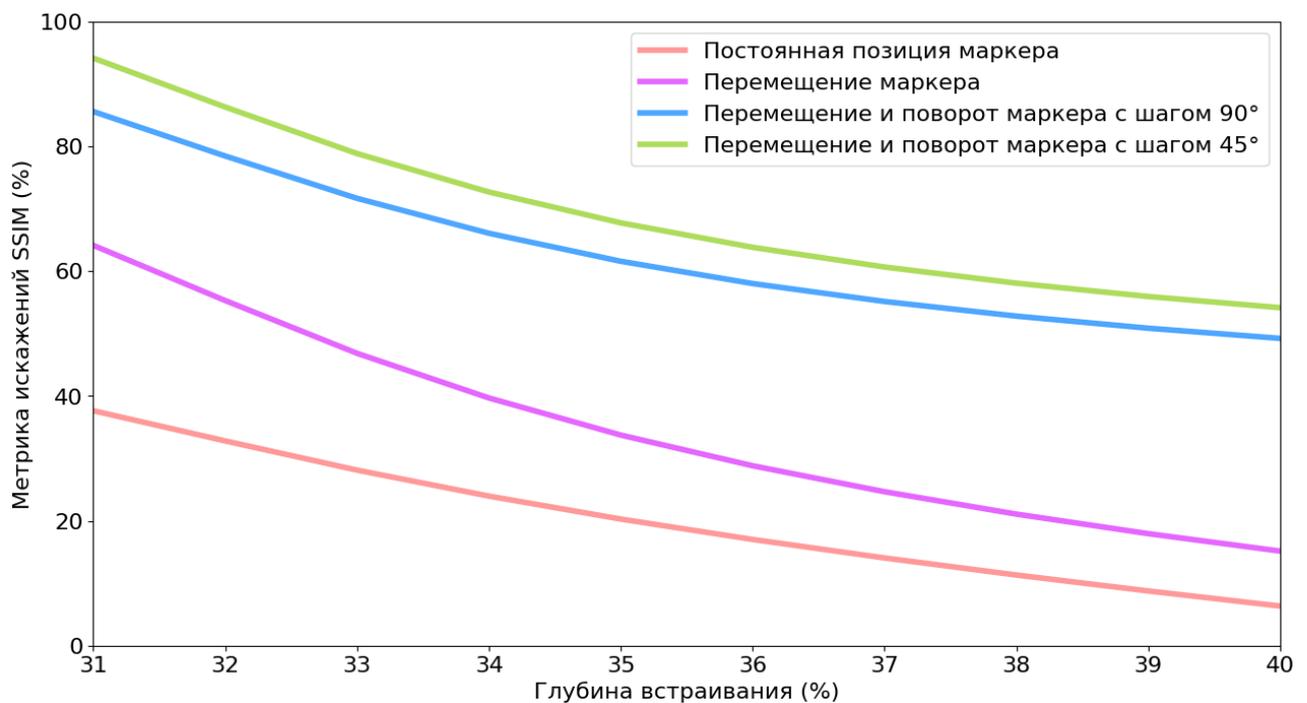


Рисунок 3.5 – Результаты исследования эффективности координатно-переменного подхода по глубине формирования ОСИС

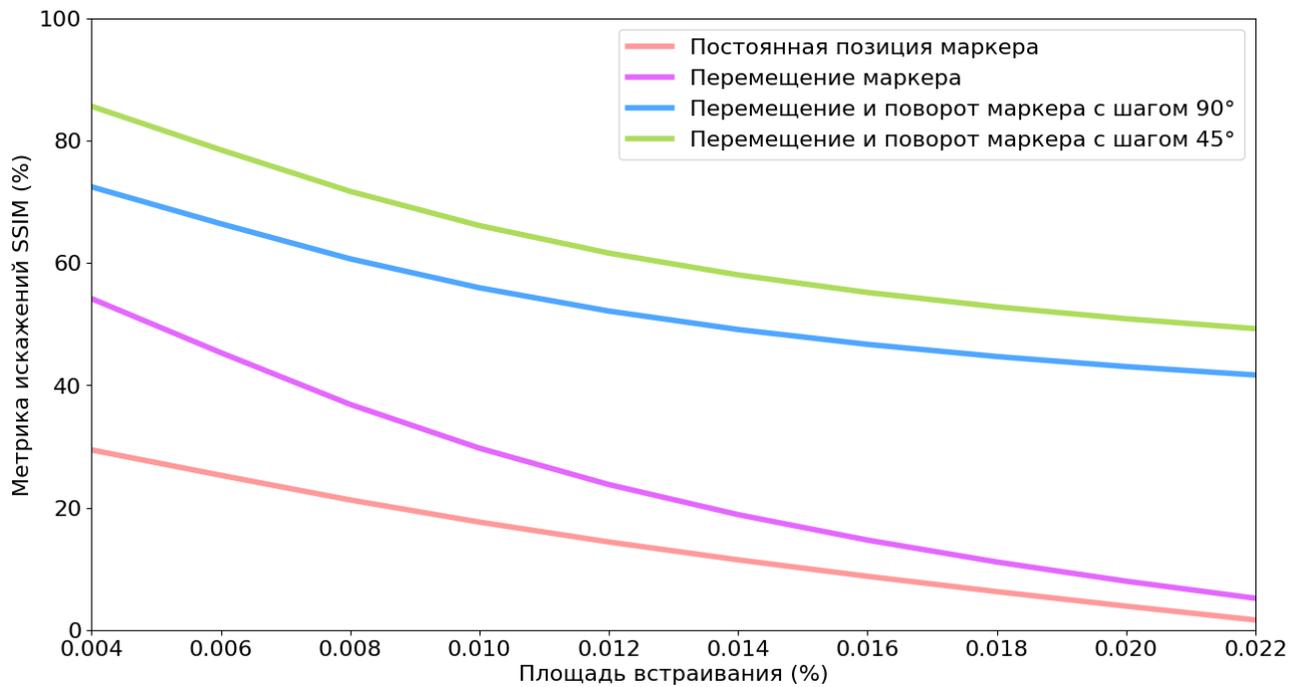


Рисунок 3.6 – Результаты исследования эффективности координатно-переменного подхода по относительной площади идентификатора

Для полного анализа эффекта от внедрения координатно-переменного подхода к определению места формирования ОСИС в видеоданных необходимо было провести экспериментальные исследования. В качестве исследуемого основного показателя эффективности была выбрана мера структурного подобия (индекс структурного сходства) – *SSIM*, отражающая суть устойчивости идентификатора (2.39, 2.46). Результаты эксперимента приведены на графиках рисунков 3.5 и 3.6. Следует отметить, что исследуемый диапазон глубины формирования ОСИС и относительной площади идентификатора лежал в пределах оптимальных значений, определенных в разделе 2.5. В итоге стал очевиден факт увеличения устойчивости ОСИС в видеопотоке от использования координатно-переменного подхода по сравнению со статическим положением идентификатора. В дополнение в ходе эксперимента наблюдалось повышение устойчивости от использования различных углов написания строки идентификатора. Варианты с горизонтальным и вертикальным размещением строки *IDhex*, а также добавление и диагонального написания дают некоторый прирост устойчивости, однако

увеличение вариантов угла написания идентификатора, равно как и его написание по диагоналям, значительно усложняет процедуру формирования изображения ОСИС (Шаг 10), тем самым делая подобное расширение вариантов углов написания неоправданным и нецелесообразным.

В результате был разработан алгоритм динамического формирования ОСИС в частотной области видеоданных, обладающий новизной и показавший повышение устойчивости идентификатора от примененного подхода.

### **3.3 Разработка алгоритма контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в частотной области видеоданных**

Система обработки видеоданных подразумевает как процедуру формирования ОСИС, так и немаловажный процесс контроля его целостности и обнаружения идентификатора пользователя. В этой связи неотъемлемой частью разрабатываемого комплекса алгоритмов является алгоритм контроля целостности динамического ОСИС в частотной области видеоданных, который представлен на рисунке 3.7.

Алгоритм работает в несколько этапов. Рассмотрим составляющие его шаги.

Шаг 1. Инициализация алгоритма. Начало.

Шаг 2. Ввод исходных данных. В качестве входной информации алгоритма выступает видеопоток, который подлежит анализу на предмет обнаружения и распознавания встроенного ОСИС. В дополнение, учитывая специфику координатно-переменного метода формирования, предустановленными параметрами алгоритма будем считать: относительные координаты значимой области формирования, где будет осуществляться поиск идентификатора; полином задающего ЛРР; порядок определения координат и угла поворота ОСИС; количество «квадратов» разбиения значимой области спектра СЭВ'; количество знаков и алфавит идентификатора *IDhex* пользователя.

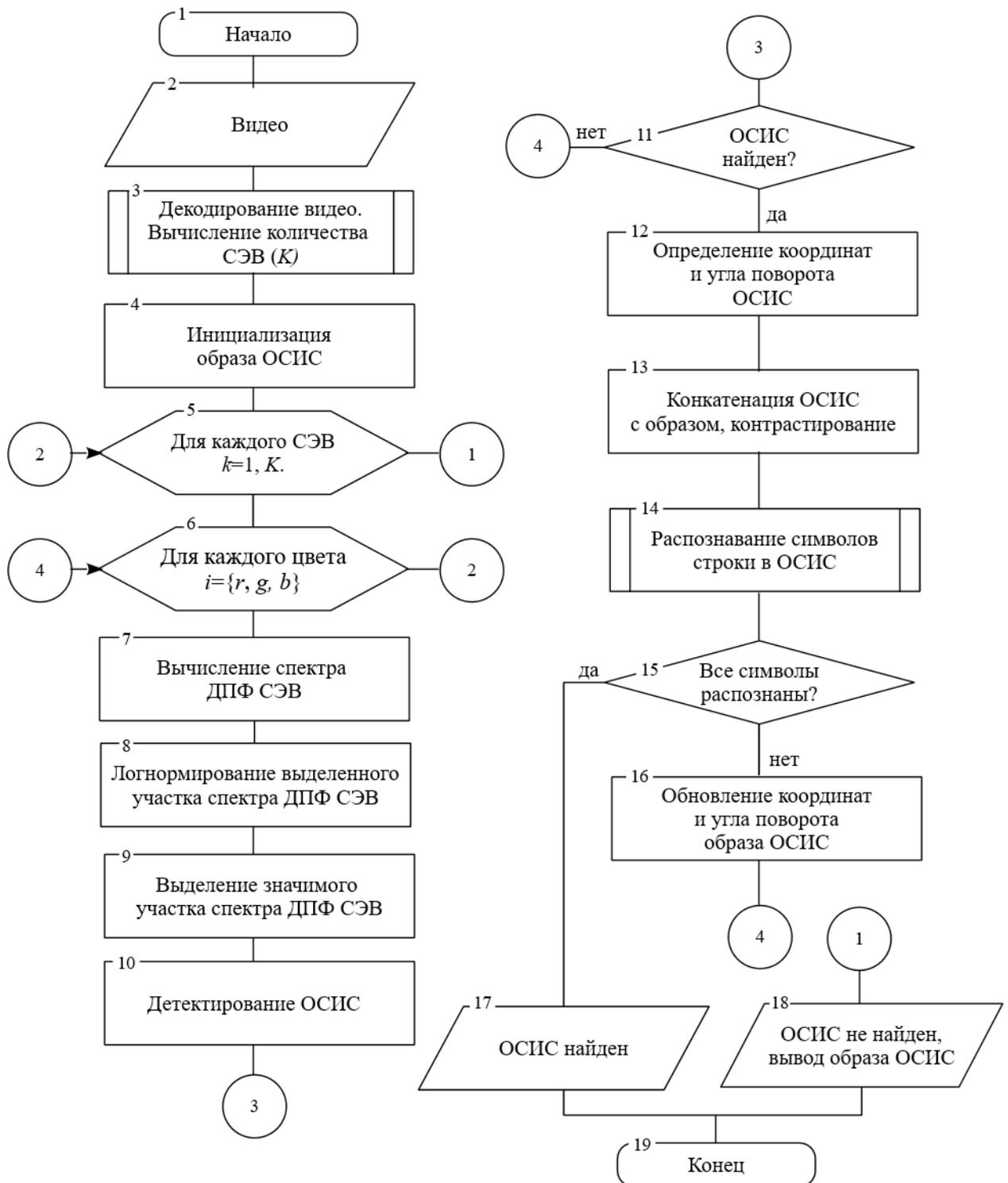


Рисунок 3.7 – Алгоритм контроля целостности динамического ОСИС  
в частотной области видеоданных

Шаг 3. В начале функционирования алгоритм осуществляет декодирование видеоданных. В качестве необходимых параметров для работы дальнейших

процедур на этапе определяются размеры СЭВ', их количество, цветовые составляющие.

Шаг 4. С целью реализации эффекта «накопления», описанного в разделе 2.4 настоящей работы (2.45), происходит начальная инициализация образа идентификатора.

В дальнейшем этот образ будет накапливать в себе информацию о найденных и выделенных участках идентификатора путем суммирования с предыдущим значением образа и последующим контрастированием, например согласно выражению 2.34. В начальном состоянии образ принимает нулевые значения, размерами, принятыми в системе, относительно размеров анализируемого СЭВ.

Шаги 5 и 6 представляют собой двойной цикл. Согласно шагу 5 процедура поиска и распознавания осуществляется для каждого из  $K$  кадров видеопотока, и далее шаг 6 определяет обработку каждой цветовой составляющей последовательно для красного  $r$ , синего  $g$  и зеленого  $b$  цветов. В цикле предусмотрен преждевременный выход в случае успешного распознавания идентификатора пользователя.

Опишем тело двойного цикла.

Шаг 7. Согласно алгоритму формирования (рис. 3.1) ОСИС внедряется в спектральную область СЭВ, полученную с помощью ДПФ. Тогда на данном шаге с каждым кадром каждой из цветовых составляющих будет осуществляться ДПФ (2.26, 2.27), в результате которого будет получен массив интенсивностей спектральных составляющих для дальнейшего обнаружения в нем изображения встроенного идентификатора.

Шаг 8. Далее согласно этапу 3 процедуры, приведенной в разделе 2.3, с целью стабилизации влияния частотных составляющих большой интенсивности осуществляется процедура логарифмического нормирования полученного спектра.

Шаг 9. Получив нормированный спектр СЭВ', необходимо выделить значимую область формирования ОСИС, тем самым упрощая задачу поиска изображения идентификатора. Тогда выделение значимой области будет заключаться в выделении (вырезании) области спектра, координаты которой

описываются выражениями 3.1 и 3.2. Необходимо обратить внимание, что область поиска выбирается исходя из относительных значений размеров анализируемого СЭВ', тем самым обеспечивая устойчивость к такому возмущению, как изменение размеров изображения, обрезание кадра по высоте и/или ширине, вырезание части изображения (преобразования  $U_1, U_2$ ).

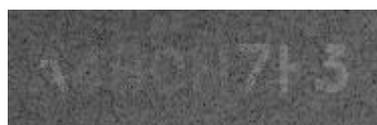
Шаг 10. Согласно следующему этапу, на выделенном участке спектра осуществляется поиск изображения идентификатора. Для обеспечения видимости идентификатора ОСИС при формировании изменяется интенсивность спектральных составляющих в диапазоне приблизительно 10 % от максимума (интенсивность 25, см. раздел 2.5), а сам спектр после логарифмического нормирования распределен близко к равномерному. Этот факт сводит процедуру поиска изображения идентификатора в выделенном участке спектра к обнаружению аномальных отклонений интенсивности спектральных составляющих, причем такое отклонение должно наблюдаться в диапазоне 1% от общей площади анализируемого СЭВ, исходя из граничных условий (раздел 2.5) и параметров алгоритма формирования. Тогда процедура поиска будет оперировать указанными относительными значениями интенсивности (глубины формирования) искомого изображения идентификатора и занимаемой им площади. А для ее эффективной работы необходимо ввести некоторые пороговые значения отклонений искомым параметров. На практике в результате экспериментальных исследований были определены локально оптимальные значения отклонения от интенсивности и площади формирования в пределах 30–40%. Такие отклонения обуславливаются реализацией возмущений, описанных в разделе 2.1.

Проверку, найден ли ОСИС в выделенном участке спектра осуществляет условный оператор Шага 11. В случае неудачного поиска аномального отклонения значений интенсивности спектральных составляющих алгоритм переходит к обработке следующей цветовой составляющей или к следующему СЭВ.

При успешном обнаружении изображения идентификатора алгоритм приступает к выполнению Шага 12. Согласно этому этапу осуществляется определение условных координат ячейки формирования и угла поворота строки

*IDhex*. Полученные данные сохраняются в памяти алгоритма для последующего использования. В случае когда видеопоток не подвергался воздействию по изменению частоты кадров, эта информация позволит определить положение и угол поворота идентификатора в следующем анализируемом кадре согласно используемой координатно-переменной процедуре формирования ОСИС на основе ЛРР. Такой подход позволит сократить время на поиск координат идентификатора и его последующую обработку.

Шаг 13. За процедурой определения координат идентификатора следует этап его сложения с накопленным образом и последующего контрастирования. Однако перед применением подхода «накопления» информации об обрабатываемом идентификаторе необходимо провести поворот строки до  $0^\circ$  и ее центрирование. В дальнейшем осуществляется прямое сложение уже повернутой и отцентрированной строки с образом ОСИС, найденным и сформированным на предыдущих этапах. На начальном этапе такой образ просто формируется из выделенного изображения идентификатора. После сложения изображений идентификаторов необходимо провести контрастирование результата с целью усиления аномальных отклонений интенсивностей спектральных составляющих от остального «фона». Известно множество вариантов контрастирования [41]: от простейшего нормирования (2.34) до сложных методов на основе нейронных сетей. Учитывая простую обработку монохромного изображения и нетребовательность к четким границам, разделяющим фон от строки *IDhex*, целесообразней применить преобразование согласно выражению (2.34). На рисунке 3.8 представлен пример «накопления» информации о распознаваемом изображении ОСИС.



а) обработан 1 СЭВ,



б) накоплено 5 СЭВ,



в) накоплено 10 СЭВ,



г) накоплено 15 СЭВ.

Рисунок 3.8 – Пример накопления информации об ОСИС

Шаг 14. Следующим этапом алгоритма выступает непосредственно распознавание выделенной строки. Процедура оптического распознавания символов (*Optical Character Recognition, OCR*) сама по себе представляет сложный алгоритм. На сегодняшний день известно множество как проприетарных, так и свободно распространяемых решений в области *OCR* [42, 43]. Наиболее популярны такие программные средства как *Tesseract, Cuneiform, OCRAD, YAGF, GimageReader, VietOCR, OCRfeeder, ScanTailor, unpaper*; библиотеки *OCR – OpenCV, ImageMagick, Leptonica, TextFairy, OpenNoteScanner* и средства предобработки изображений (подготовки к распознаванию) – *LanguageTool, Hunspell*. Большинство из перечисленных средств наряду с функцией распознавания предоставляют возможность предварительной обработки и подготовки изображения к распознаванию (например, контрастирование и т. п.). Тогда допускается совместное комплексное использование выбранной процедуры распознавания на Шагах 13 и 14.

Анализируя формат представления распознаваемого идентификатора пользователя, а именно строку из 8-ми символов алфавита, мощность которого – 16, можно предположить, что для реализации функции *OCR* требуется относительно несложный алгоритм распознавания, реализованный, например, в библиотеке *OpenCV*, к тому же скорость его работы по сравнению с общими вычислительными затратами будет незначительной. Вопрос поиска оптимального алгоритма распознавания строки идентификатора пользователя *IDhex* выходит за рамки настоящего исследования и может быть отнесен к перспективному направлению.

Отличительной особенностью использования этапа Шага 14 в разработанном алгоритме является рассмотрение возможности неполного распознавания изображения ОСИС, т. е. допускается случай распознавания не всех восьми символов строки, а лишь ее части.

Тогда на Шаге 15 условным оператором осуществляется проверка факта распознавания всех символов идентификатора. В случае когда идентификатор

пользователя ИС распознан полностью, алгоритм прерывает двойной цикл и переходит к выполнению Шага 17, который заключается в выводе информации о распознанном идентификаторе *IDhex* и предоставлении в дальнейшем информации о соответствующем данному идентификатору пользователе.

В противном случае алгоритм переходит к Шагу 16. Этап предусматривает процедуру обновления данных о координатах и угле поворота строки идентификатора в памяти алгоритма, а также процесс сохранения обновленного образа ОСИС.

Шаг 16 является заключительным этапом тела двойного цикла, определенного Шагами 5 и 6.

Шаги 17 и 18 представляют собой этапы вывода данных о результате работы алгоритма. Пользователю предоставляется либо распознанный идентификатор (Шаг 17), либо сообщение об отсутствии ОСИС, встроенного в обрабатываемое видео, и вывод изображения образа идентификатора, накопленного в результате обработки (Шаг 18). В дальнейшем, после Шага 18, процедура обнаружения и распознавания идентификатора ОСИС в видеопотоке переходит из разряда автоматических в автоматизированную. Не в полной мере распознанный идентификатор может быть распознан оператором.

На Шаге 19 происходит деинициализация алгоритма, освобождение задействованной памяти и завершение его работы.

В результате работы алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в частотной области видеопотока пользователю ИС предоставляется либо обнаруженный ОСИС – значение идентификатора *IDhex*, либо результат накопления обнаруженных претендентов на изображение идентификатора – образа ОСИС для его последующего анализа и обработки оператором в автоматизированном режиме.

Проанализируем вычислительную сложность и основные свойства разработанного алгоритма. Учитывая, что объектом обнаружения и распознавания ОСИС в конечном счете выступает изображение-контейнер СЭВ', по аналогии с разделом 3.2 примем за элементарную единицу обработки видео точку (пиксель).

Тогда в качестве количества входных переменных  $n$  алгоритма будет выступать значение количества точек, задающих этот структурный элемент видеоданных (3.3).

Согласно блок-схеме (рис. 3.7) алгоритм имеет две простейшие ветви, одна из которых содержит только блок вывода результата работы алгоритма, а вторая помимо блока вывода еще один элементарный этап обновления данных в памяти алгоритма. В этой связи для подсчета его вычислительной сложности применим стандартный подход сложения количества операций, затрачиваемых на каждый элементарный шаг, и, в случае цикла, умножения на количество итераций.

Декодирование видеоданных на шаге 3 вынесено в допущения работы ввиду того, что к существенному увеличению вычислительной сложности всего алгоритма он не приведет. Инициализация образа ОСИС на Шаге 4 оперирует изображением идентификатора, площадь которого определяется выделенной значимой областью формирования и не превышает 25 % от размеров СЭВ'. Тогда Шаг 4 будет иметь сложность  $O(0,25n)$ .

В дальнейшем Шаги 5 и 6, являясь циклами, обуславливают умножение общей сложности тела циклов. В случае обработки цветного видео множитель будет равен 3. Однако к увеличению вычислительной сложности будет приводить такой параметр как количество кадров. По аналогии с предыдущим разделом примем параметр  $K$  – количество кадров видео в качестве коэффициента, умножающего на  $n$  вычислительную сложность алгоритма. Этапы в теле цикла имеют возможность досрочного его завершения. Такой случай уменьшит вычислительную сложность алгоритма в целом. С целью оценки верхней границы сложности проведем анализ полного прохождения двойного цикла до выполнения условий Шагов 5 и 6.

Рассмотрим сложность каждого из этапов тела двойного цикла. Классическое преобразование Фурье имеет сложность  $O(n^2)$ , однако существуют быстрые алгоритмы вычисления дискретного спектра изображения, сложность которых определяется как  $O(n \cdot \log(n))$  [40]. Временная сложность шага 7 будет равна  $O(2n^2 \cdot \log(n))$ . На Шаге 8 осуществляется нормирование составляющих спектра по закону логарифмической шкалы. Определение максимума и минимума

интенсивностей спектра, а также пересчет в другую шкалу займет не более  $O(3n)$  временных ресурсов, выделяемых на работу алгоритма.

В ходе шага 9 определяется и выделяется значимая часть спектра СЭВ'. Ввиду симметричности полученного спектра ДПФ, обусловленного его двумерностью, реальная обработка затронет лишь четверть спектральной области. Следовательно,  $O(0,25n)$  – вычислительная сложность этапа. На шаге 10 осуществляется поиск изображения идентификатора путем сканирования значимой области СЭВ'. Тогда сложность этого этапа будет равна не более, чем  $O(n)$ .

Условный оператор Шага 11 определяет ветвление тела двойного цикла. В случае отрицательного результата происходит переход к следующей его итерации, поэтому рассмотрим вычислительную сложность другой ветви. На Шаге 12 обработка строки идентификатора, заключающаяся в определении центра ОСИС и угла его поворота относительно введенных координат ячеек значимой области, займет не более  $O(4n)$  операций [41]. Последующая процедура «накопления» информации об ОСИС путем сложения образа, хранящегося в памяти алгоритма, с выделенным идентификатором на текущем кадре ( $O(n)$ ) и контрастирование результата ( $O(3n)$ ) на Шаге 13 для монохромного изображения в худшем случае [41] будут иметь временную сложность не более  $O(4n)$ .

Самой сложной и ресурсоемкой процедурой тела цикла является процесс распознавания строки ОСИС (Шаг 14). Анализ открытых источников [42, 43] показал, что при специфических условиях работы разработанного алгоритма (монохромное изображение, ограниченный алфавит в 16 символов, строка ОСИС имеет строго 8 символов) временная сложность этапа *OCR* составит не более  $O(n^3)$ .

Условный оператор на Шаге 15 обуславливает очередное ветвление тела цикла. В случае успешного распознавания идентификатора алгоритм предусматривает досрочное прекращение работы двойного цикла, вывод результата и завершение. В таком случае рассмотрим наихудший вариант – распознаны не все символы ОСИС или не распознан ни один. Тогда алгоритмом предусмотрено обновление образа идентификатора ОСИС на Шаге 16 со сложностью процедуры

$O(n)$ . На этом завершается тело цикла, его суммарную сложность определим выражением:

$$\begin{aligned} O(2n^2 \cdot \log(n)) + O(0,25n) + O(3n) + O(n) + O(4n) + O(4n) + O(n^3) + O(n) = \\ = O(n^3 + 2n^2 \cdot \log(n) + 13,25n). \end{aligned}$$

Рассчитаем окончательную вычислительную сложность разработанного алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в частотной области. Учитывая двойной цикл, Шаг 4 и что процедура вывода результатов работы алгоритма (Шаги 17 и 18) имеет строго формализованный характер и не зависит от размеров обрабатываемого видео ( $O(1)$ ), он примет следующий полиномиальный вид:

$$\begin{aligned} 3 \cdot n \cdot (O(n^3 + 2n^2 \cdot \log(n) + 13,25n)) + O(0,25n) + O(1) = \\ = O(3n^4 + 6n^3 \cdot \log(n) + 39,75n^2 + 0,25n + 1) \approx O(n^4). \end{aligned}$$

Обобщенные данные анализа вычислительной сложности алгоритма приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Вычислительная сложность этапов алгоритма обнаружения ОСИС

Этап алгоритма	Вычислительная сложность этапа
Шаг 4	$O(0,25n)$
Шаг 5	$O(K \cdot n) \approx O(n^2)$
Шаг 6	$O(3n)$
Шаг 7	$O(2n^2 \cdot \log(n))$
Шаг 8	$O(3n)$
Шаг 9	$O(0,25n)$
Шаг 10	$O(n)$
Шаг 12	$O(4n)$
Шаг 13	$O(4n)$

Шаг 14	$O(n^3)$
Шаг 16	$O(n)$
Шаг 17 (Шаг 18)	$O(1)$
Суммарная сложность	$O(3n^4+6n^3 \cdot \log(n)+39,75n^2+0,25n+1) \approx O(n^4)$

В заключение оценки сложности необходимо отметить, что несмотря на то, что этап декодирования видеопотока и будет замедлять работу разработанного алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в целом, увеличивая его сложность, но полиномиальность декомпрессии не позволит перевести итоговую сложность в разряд субэкспоненциальных или экспоненциальных.

Далее проведем анализ основных свойств разработанного алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в частотной области видеопотока. Алгоритм составлен таким образом, чтобы исполнитель (ЭВМ) мог однозначно и точно следовать командам алгоритма и эффективно получать определенный результат, поэтому данный алгоритм обладает следующими свойствами:

1) дискретностью, так как вычислительный процесс контроля целостности ОСИС в потоковом видео разделен разработанным алгоритмом на отдельные этапы, возможность выполнения которых исполнителем (компьютером) не вызывает сомнений и строго определена;

2) детерминированностью (определенностью), так как алгоритм предполагает получение однозначного результата: извлеченного из видеопотока идентификатора ОСИС, представляющего идентификатор пользователя, либо предоставления оператору информации для дальнейшей обработки видео в ручном режиме. Благодаря этому свойству процесс выполнения алгоритма носит механический характер;

3) результативностью, так как алгоритм указывает на наличие таких исходных данных, для которых реализуемый вычислительный процесс через конечное число шагов сможет остановиться и выдать искомый результат;

4) массовостью, так как алгоритм пригоден для контроля целостности ОСИС во всем множестве видеоданных, заданного ограничениями и условиями раздела 1.3 (постановкой научной задачи).

Ввиду того, что присутствующие в алгоритме условные операторы не влияют на скорость его сходимости, она будет определяться скоростью сходимости процедур прямого ДПФ и распознавания строки идентификатора (*OCR*). В худшем случае алгоритм переходит к окончанию, когда завершается поиск и распознавание ОСИС в последнем кадре видеопотока.

Для полного анализа эффективности алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в частотной области видеоданных необходимо было провести экспериментальные исследования. В качестве исследуемого основного показателя эффективности была выбрана вероятность обнаружения и распознавания ОСИС, сформированного с помощью координатно-переменного метода. Условия эксперимента заключались в следующем: база видеоданных, состоящая из более 10000 роликов, подвергалась на начальном этапе маркированию с помощью алгоритма на основе координатно-переменного метода (раздел 3.2). Далее производилась имитация возмущающих преобразований в диапазонах, указанных в таблицах 3.4 и 3.5. На заключительном этапе каждое видео обрабатывалось алгоритмом контроля целостности ОСИС в частотной области и производился расчет вероятности автоматического обнаружения  $P_{обн}$  и распознавания  $P_{расп}$ , исходя из классического частотного подхода к ее определению:

$$P_{обн} = \frac{V_{обн}}{V} \text{ и } P_{расп} = \frac{V_{расп}}{V}, \quad (3.4)$$

где  $V_{обн}$ ,  $V_{расп}$ ,  $V$  – количество обнаруженных, распознанных и всего обрабатываемых видеофайлов.

Таблица 3.4 Вероятность обнаружения ОСИС при воздействии преобразований  $a_1 - a_7$

Возмущение / %	90	80	70	60	50	40	30	20
$a_1$	0,82 / 0,91	0,73 / 0,85	0,65 / 0,76	0,54 / 0,67	0,43 / 0,54	0,32 / 0,41	0,17 / 0,29	0,08 / 0,12
$a_2$	0,83 / 0,92	0,71 / 0,87	0,62 / 0,73	0,52 / 0,72	0,44 / 0,56	0,36 / 0,51	0,14 / 0,15	0,07 / 0,11
$a_3$	0,92 / 0,97	0,81 / 0,92	0,73 / 0,81	0,53 / 0,69	0,41 / 0,53	0,32 / 0,46	0,24 / 0,31	0,17 / 0,25
$a_4$	0,81 / 0,87	0,72 / 0,76	0,61 / 0,69	0,46 / 0,51	0,37 / 0,42	0,34 / 0,38	0,27 / 0,32	0,19 / 0,27
$a_5$	0,91 / 0,95	0,87 / 0,91	0,76 / 0,86	0,68 / 0,71	0,54 / 0,62	0,46 / 0,52	0,26 / 0,32	0,13 / 0,15
$a_6$	0,96 / 0,98	0,78 / 0,87	0,69 / 0,78	0,58 / 0,69	0,52 / 0,60	0,46 / 0,51	0,39 / 0,42	0,28 / 0,34
$a_7$	0,89 / 0,97	0,78 / 0,93	0,71 / 0,86	0,67 / 0,82	0,64 / 0,76	0,59 / 0,72	0,51 / 0,66	0,45 / 0,63

Таблица 3.5 Вероятность обнаружения ОСИС при воздействии преобразований  $a_8 - a_{15}$

Возмущение / степень сжатия	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$a_8$	0,94 / 0,97	0,81 / 0,86	0,74 / 0,79	0,51 / 0,63	0,49 / 0,56	0,47 / 0,52	0,43 / 0,46
$a_9$	0,92 / 0,97	0,79 / 0,95	0,72 / 0,84	0,67 / 0,78	0,56 / 0,68	0,49 / 0,55	0,37 / 0,41
$a_{10}$	0,93 / 0,97	0,91 / 0,94	0,82 / 0,86	0,71 / 0,79	0,66 / 0,75	0,61 / 0,68	0,58 / 0,64
$a_{11}$	0,91 / 0,97	0,87 / 0,92	0,81 / 0,87	0,72 / 0,81	0,63 / 0,72	0,57 / 0,62	0,37 / 0,48
$a_{12}$	0,93 / 0,97	0,91 / 0,95	0,78 / 0,84	0,59 / 0,76	0,47 / 0,62	0,39 / 0,48	0,31 / 0,42
$a_{13}$	1 / 1	0,78 / 0,89	0,54 / 0,74	0,38 / 0,68	0,32 / 0,51	0,24 / 0,47	0,14 / 0,39
$a_{14}$	1 / 1	0,79 / 0,88	0,43 / 0,69	0,31 / 0,58	0,22 / 0,46	0,19 / 0,42	0,07 / 0,38
$a_{15}$	1 / 1	0,81 / 0,91	0,62 / 0,64	0,37 / 0,52	0,31 / 0,48	0,29 / 0,41	0,17 / 0,36

Анализ данных экспериментальных исследований (табл. 3.4, 3.5) показывает приемлемые показатели эффективности обнаружения и распознавания ОСИС,

встроенных в частотную область видеопотока с помощью координатно-переменного метода. Следует отметить, что исследуемые вероятности имеют значения выше порогового ( $P_{обн} = 0,99$ ,  $P_{расп} = 0,95$ ) в диапазонах граничных значений устойчивости, определенных в разделе 2.5, что подтверждает гипотезу исследования. В результате очевиден факт увеличения эффективности обнаружения ОСИС в видеопотоке от использования координатно-переменного подхода по сравнению с существующими методами, рассмотренными в ходе критического анализа (см. раздел 2.2). В дополнение необходимо отметить возможность алгоритма предоставлять пользователю информацию по обработке видеопотока даже в случае отрицательного результата процедуры обнаружения/распознавания идентификатора ОСИС. Это дает возможность оператору приступить к визуальному анализу значимого участка спектра на предмет нахождения в нем ОСИС. Вследствие этого оператор может либо самостоятельно принять решение об обнаружении/распознавании идентификатора ОСИС, либо на основе нескольких распознанных символов строки *Idhex* значительно сократить список идентифицируемых лиц. Таким образом, в разделе был разработан алгоритм автоматического контроля целостности динамического ОСИС, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству СЭВ'.

### 3.4 Выводы по главе

В результате разработки алгоритмов обработки динамического ОСИС в частотной области видеоданных были получены следующие результаты:

– проведен анализ исходных данных алгоритмов с учетом введенных ограничений и допущений исследовательской работы. Процедуры декодирования и кодирования видео в указанных в постановке научной задачи форматах, а также этап распознавания текста, изображающего идентификатор строку *IDhex*,

вынесены в ограничения и определены в качестве перспективных направлений исследования;

– разработан алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных применением процедуры координатно-переменного выбора области формирования и обеспечивающий повышение показателя накопленной устойчивости при различных комбинациях множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки. Результат обладает новизной и в ходе экспериментальных исследований показал повышение устойчивости от примененного подхода;

– разработан алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных итерационным накоплением информации о найденном подмножестве элементов этого объекта и обеспечивающий возможность решения задачи идентификации на основе накопленной информации. Результат обладает новизной и показывает повышение вероятности процессов обнаружения и распознавания от примененного координатно-переменного подхода.

Таким образом, разработанные алгоритмы, обеспечивающие повышение показателей эффективности процессов обработки динамических ОСИС в видеоданных, позволяют приступить к практической их реализации в виде программного или программно-аппаратного решения.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАНЫХ

### 4.1 Архитектура системы формирования и контроля целостности динамических ОСИС в видеоданных

С целью адекватного отображения свойств разрабатываемой системы формирования и контроля целостности динамических ОСИС в видеоданных для ее дальнейшей практической реализации возникла необходимость разработки ее обобщенной архитектуры. Она должна учесть структурные и функциональные зависимости входящих в систему модулей, блоков и элементов. Ввиду того, что разрабатываемая архитектура отражает свойства DRM-систем, необходимо в первую очередь рассмотреть этапы преобразования и обработки информации и ее типы (рис. 4.1).

Рассматриваемая система обработки видеоданных функционально позволяет производить формирование и контроль целостности динамических ОСИС в видеоданных. Система состоит из модуля формирования ОСИС, на вход которого принимаются исходные видеоданные, в которые необходимо произвести внедрение динамического ОСИС в виде *IDhex* идентификатора пользователя системы. В процессе формирования используются три вспомогательных компонента: видео-декодер, блок ДПФ и видео-кодер. На выходе модуля формирования ОСИС образуются СЭВ'. Далее СЭВ' подвергаются фиксированному множеству комбинаций возмущений. Для каждой комбинации возмущений выполняется контроль целостности ОСИС.

Для выполнения процедуры контроля целостности динамического ОСИС необходимо выполнить детектирование этого объекта в СЭВ'. Модуль детектирования ОСИС на вход получает анализируемые видеоданные, которые потенциально содержат искомым ОСИС. В большинстве случаев анализируемые видеоданные будут являться фрагментами СЭВ', подвергшихся различным возмущениям. В процессе детектирования используются два вспомогательных

компонента: видео-декодер и блок ДПФ. Модуль детектирования ОСИС реализован по двухуровневой схеме с уровнями автоматического и автоматизированного поиска и распознавания ОСИС. В случае если на уровне автоматического детектирования поиск ОСИС не дал положительного результата, реализуется процедура поиска и распознавания ОСИС в видеоданных, выполняемая оператором DRM-системы на автоматизированном уровне, который вручную анализирует частотную область видеоданных с целью поиска ОСИС. Результатом работы модуля контроля целостности ОСИС является значение строки *IDhex* или уведомление об отсутствии ОСИС в анализируемых видеоданных.

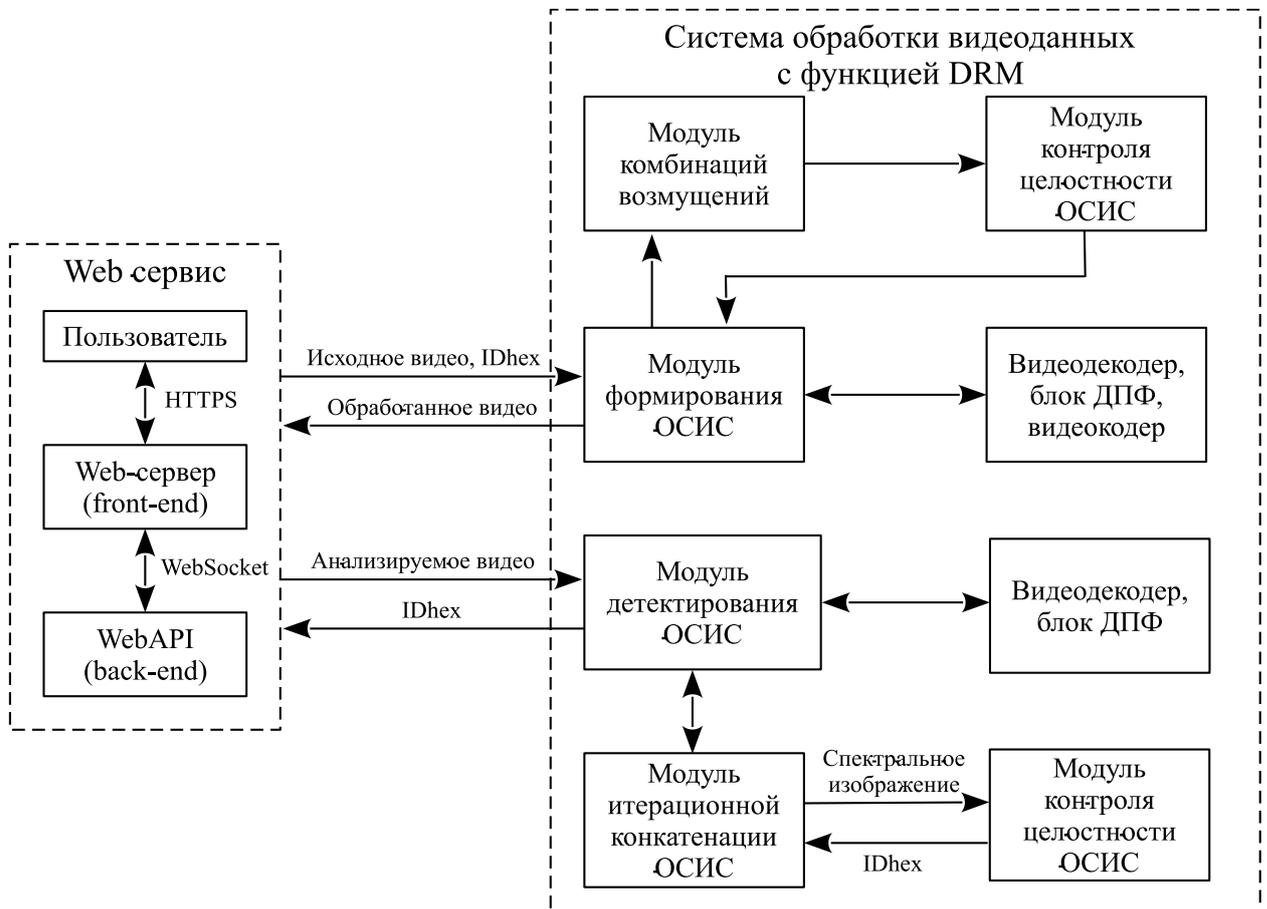


Рисунок 4.1 – Обобщенная архитектура программной системы обработки видеоданных

Таким образом, рассмотренные процедуры и этапы преобразования информации в разработанной системе позволяют сформировать состав ее обобщенной архитектуры в виде функциональных модулей (рис. 4.1):

На рисунке 4.2 представлен полный тракт циркуляции распространяемых видеоданных в рамках DRM-системы. Исходные видеоданные вместе с уникальными метаданными, идентифицирующими их источник, поступают на вход системы обработки видеоданных в модуль формирования динамического ОСИС. После формирования динамического ОСИС видеоданные передаются пользователям через доверенных провайдеров видеоданных. В случае утечки распространяемых видеоданных в открытый доступ они подаются на вход модуля детектирования и контроля целостности ОСИС, и в случае его положительного распознавания в дальнейшем решается задача определения источника их утечки.

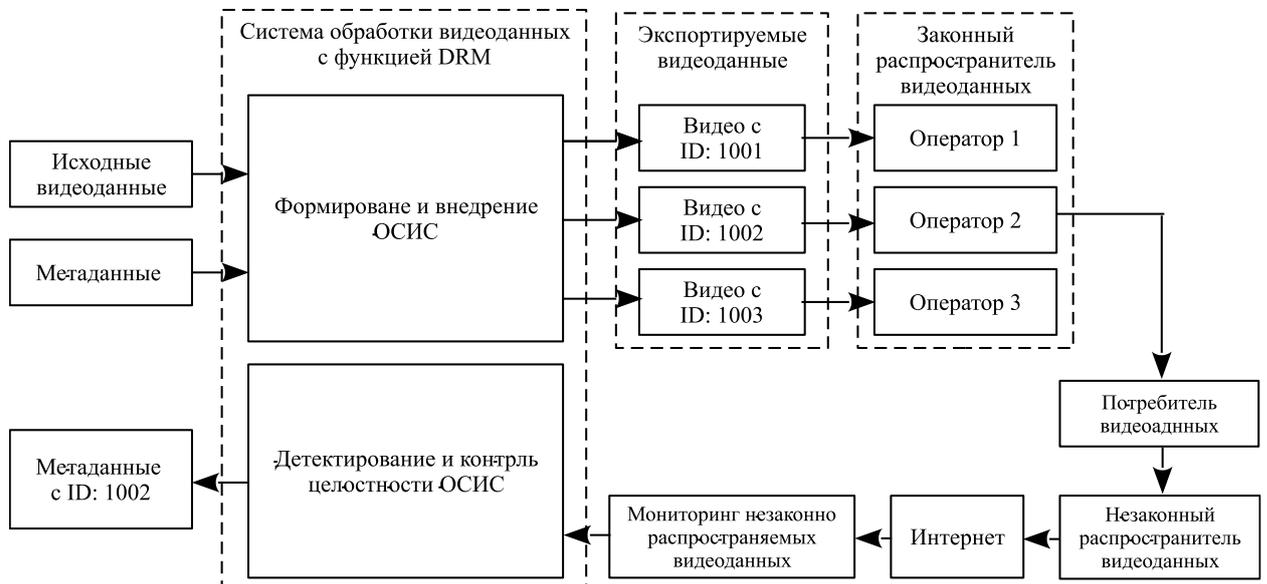


Рисунок 4.2 – Место программной системы обработки видеоданных в структуре DRM-системы

Таким образом была разработана архитектура программной системы обработки видеоданных, обеспечивающая повышение вероятности идентификации динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающая повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки этих объектов, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

## 4.2 Реализационные аспекты и оценка эффективности системы обеспечения и проверки уникальности видеoinформации

Наряду со структурным, объектным и функциональным аспектами построения системы обработки видеоданных с ОСИС необходимо предусмотреть еще и техническую структуру в виде программной реализации с учетом организации управления и взаимодействия между входящими в систему модулями, элементами и данными. В этой связи на заключительном этапе диссертационных исследований были разработаны две программные реализации информационной системы хранения и обработки видеоданных и DRM-системы в виде комплекса специального программного обеспечения (СПО) внедрения устойчивой идентификационной информации пользователя в обрабатываемые им видеопоследовательности и обнаружения/распознавания устойчивых ОСИС, внедренных в спектральную область видеопотока с помощью координатно-переменного метода [6].

Далее приведем требования к аппаратной составляющей и опишем структуру программного обеспечения.

Разработанное специальное программное обеспечение предназначено для формирования ОСИС в видеоданных с целью внедрения идентификационной информации о владельце контента. Для формирования ОСИС используется частотная область СЭВ. ОСИС встраивается в каждый цветовой канал. Особенностью программного обеспечения является изменение параметров формирования ОСИС на каждом кадре по закону псевдослучайного распределения.

Программное обеспечение функционирует под управлением ОС Linux. Исходный код написан на языке C++ в интегрированной среде разработки JetBrains CLion 2021. Проект скомпилирован компилятором GCC-11. Используются библиотеки Boost-1.77 и Opencv-4.5.4.

*Описание внутренней реализации программного обеспечения*

Структура проекта:

- `.git` – каталог с рабочими файлами системы контроля версий исходного кода Git.

- `src` – директория с файлами исходного кода на языке C++, в которой расположены файлы с расширениями `hpp` и `cpp`.

- `build` – директория с временными объектными файлами, формирующимися в процессе компиляции проекта.

- `bin` – директория с итоговым скомпилированным исполняемым бинарным файлом.

- `notes.txt` – файл с комментариями к проекту.

Файлы исходного кода:

- `main.hpp` – заголовочный файл с переменными и объявлениями функций для главного модуля.

- `main.cpp` – главный модуль программы с точкой входа в программу.

- `ft.hpp` – заголовочный файл модуля, предназначенного для обработки СЭВ в частотном спектре с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

- `ft.cpp` – модуль, предназначенный для обработки СЭВ в частотном спектре с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

- `print.hpp` – модуль форматированного вывода служебных и отладочных структур данных в процессе работы приложения.

- `quality_mertics.hpp` – заголовочный файл модуля расчета метрик для оценки качества формирования ОСИС.

- `quality_mertics.cpp` – модуль расчета метрик для оценки качества формирования ОСИС.

- `text.hpp` – модуль формирования шаблона графической матрицы фильтра по ОСИС.

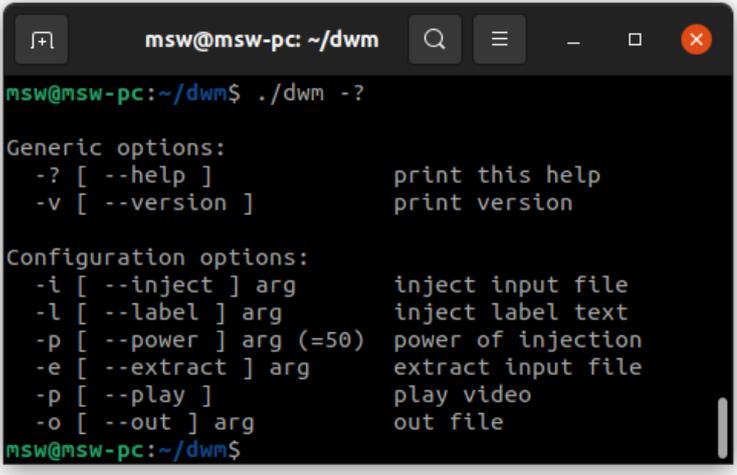
- `inject.cpp` – модуль формирования ОСИС.

- `extract.cpp` – модуль обнаружения и извлечения ОСИС.

- `gui.cpp` – модуль графического интерфейса пользователя.

Программное обеспечение является приложением ОС Linux и состоит из одного исполняемого файла с названием `dwm`. Для запуска приложения из командной строки Linux необходимо выполнить команду: `./dwm`. Управление режимами работы приложения осуществляется путем указания соответствующих ключей в командной строке.

Для вывода краткой справки необходимо выполнить команду: `./dwm -?`. Результат вывода приложения изображен на рисунке ниже.



```
msh@msh-pc: ~/dwm
msh@msh-pc:~/dwm$ ./dwm -?

Generic options:
-? [ --help ]          print this help
-v [ --version ]      print version

Configuration options:
-i [ --inject ] arg    inject input file
-l [ --label ] arg     inject label text
-p [ --power ] arg (=50) power of injection
-e [ --extract ] arg   extract input file
-p [ --play ]          play video
-o [ --out ] arg       out file

msh@msh-pc:~/dwm$
```

Рисунок 4.3 – Отображение справочной информации разработанного ПО

Приложение имеет два режима работы: режим формирования ОСИС и режим извлечения ОСИС. Для режима вставки используется ключ `--inject`, через который указывается имя входного файла, предназначенного для формирования ОСИС. Через ключ `--label` задается значение идентификатора для формирования. Ключ `--power` является необязательным, используется для указания глубины формирования скрытого слоя, принимает значение в процентах.

Для режима извлечения используется ключ `--extract`, через который указывается имя входного файла, предназначенного для извлечения ОСИС.

Дополнительно применяются ключи общего назначения `--play` и `--out`. Ключ `--play` позволяет отображать обрабатываемые видеоданные в графическом окне приложения. Ключ `--out` предназначен для указания выходного файла, в котором сохраняется результат обработки.

Приложение способно принимать на вход множество входных форматов видеоданных: AVI, MP4, MKV, MPG, TS. Реализована поддержка нескольких видео кодеков: H.263, H.264, H.265, MJPEG, MPEG-4, VP8. Выходной файл всегда кодируется кодеком H.264.

В режиме графического отображения СЭВ управление обработкой происходит путем нажатия фиксированного набора клавиш:

«Escape» – завершение обработки;

«Space» – команда пауза/возобновление обработки;

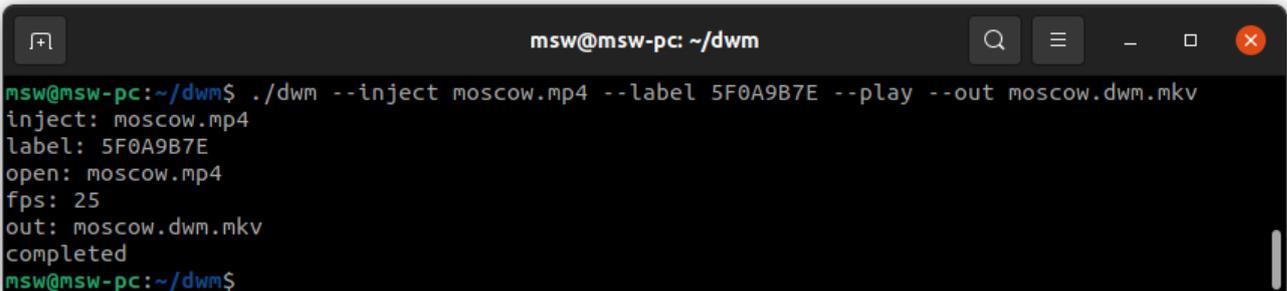
«Enter» – покадровая обработка в режиме паузы.

#### *Демонстрационный пример функционирования программного обеспечения*

Пусть имеется некий видеофайл `moscow.mp4`, в котором необходимо сформировать ОСИС с идентификатором `5F0A9B7E`. Внедряемый маркер является идентификатором пользователя информационной системы в шестнадцатеричном виде.

Для выполнения операции формирования идентификационного слоя необходимо выполнить следующую команду в терминале операционной системы (рис. 4.4):

```
./dwm --inject moscow.mp4 --label 5F0A9B7E --play --out moscow.dwm.mkv
```



```
msw@msw-pc: ~/dwm
msw@msw-pc:~/dwm$ ./dwm --inject moscow.mp4 --label 5F0A9B7E --play --out moscow.dwm.mkv
inject: moscow.mp4
label: 5F0A9B7E
open: moscow.mp4
fps: 25
out: moscow.dwm.mkv
completed
msw@msw-pc:~/dwm$
```

Рисунок 4.4 – Процесс формирования ОСИС в видеоданных

В силу того что указан ключ `--play`, обрабатываемые видеоданные будут отображаться в графическом окне приложения (рис. 4.5).

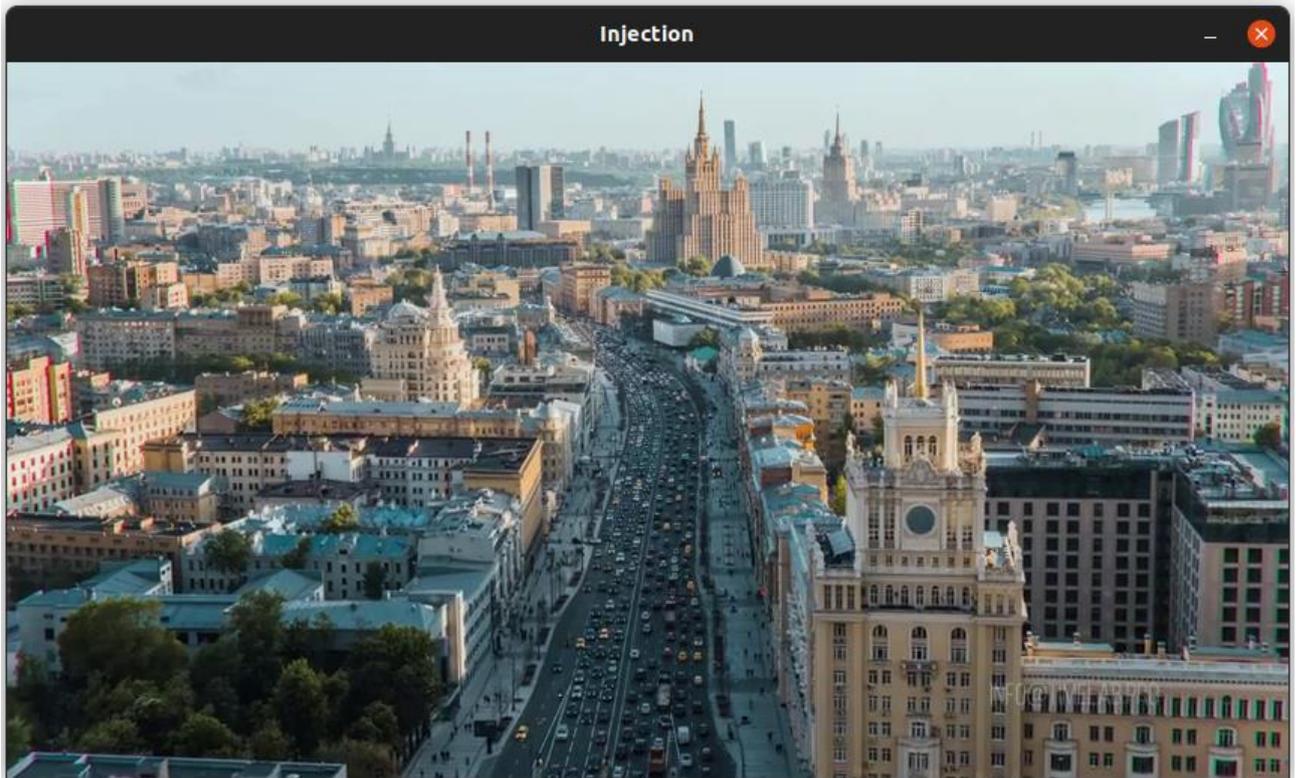
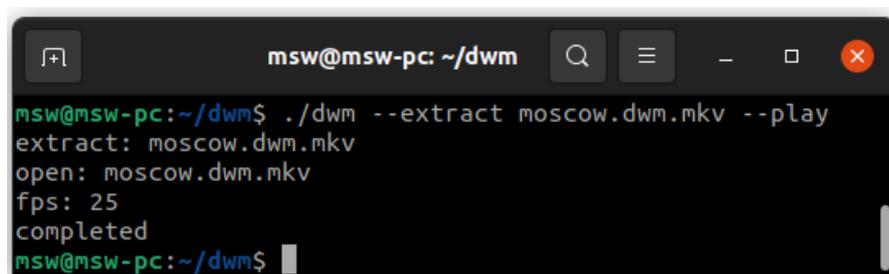


Рисунок 4.5 – Отображение видео в процессе формирования идентификатора

После завершения работы приложения сформируется выходной файл `moscow.dwm.mkv` со сформированным ОСИС.

Для извлечения идентификатора из файла `moscow.dwm.mkv` необходимо выполнить следующую команду в терминале операционной системы:

```
./dwm --extract moscow.dwm.mkv --play
```



```
msw@msw-pc: ~/dwm
msw@msw-pc:~/dwm$ ./dwm --extract moscow.dwm.mkv --play
extract: moscow.dwm.mkv
open: moscow.dwm.mkv
fps: 25
completed
msw@msw-pc:~/dwm$
```

Рисунок 4.6 – Процесс извлечения ОСИС из видео

Процесс извлечения ОСИС является автоматизированной процедурой воспроизведения видеоданных в частотном спектре (рис. 4.6). В процессе

воспроизведения пользователь производит визуальный поиск числового идентификатора в шестнадцатеричном виде. Для удобства используются команды управления воспроизведением видеофайла, с помощью которых можно приостановить обработку, обработать один последующий кадр, продолжить обработку (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Поиск идентификатора в частотной области

Как видно на рисунке 4.7, в процессе просмотра заданного файла в частотном спектре отчетливо читается встроенный идентификатор.

Экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанного СПО проводились на базе видеофайлов – записей с камер наблюдения. Объем базы равен 10 000 видео с различным разрешением: VGA, HD, FullHD, QHD и UHD; различной длительностью в диапазоне от 4 до 100 с; сжатое кодеками согласно стандартам H.263, H.264, MPEG-2, MPEG-4 и VP8.

Для подсистемы формирования ОСИС в частотной области видеоданных основным показателем эффективности выступает время маркирования или так называемая производительность алгоритма. Предъявляемые требования к

реализации алгоритма таковы, чтобы ПО обеспечивало возможность маркирования видеопотока в режиме реального времени с минимальной задержкой, незаметной для пользователя, осуществляющего доступ и обработку информации. Таким образом, была обусловлена необходимость экспериментального исследования зависимости скорости формирования ОСИС с помощью координатно-переменного метода от типа видеокодека, разрешения видео и его длительности. Результаты эксперимента представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 Зависимость скорости формирования ОСИС от разрешения видео

Разрешение /кодек	H.263	H.264	MPEG-2	MPEG-4	VP8
VGA	22 к/с	17 к/с	36 к/с	29 к/с	18 к/с
HD	16 к/с	12 к/с	24 к/с	20 к/с	13 к/с
FullHD	10 к/с	9 к/с	18 к/с	14 к/с	10 к/с
QHD	6 к/с	6 к/с	12 к/с	8 к/с	7 к/с
UHD	4 к/с	3 к/с	7 к/с	6 к/с	4 к/с

Таблица 4.2 Зависимость скорости формирования ОСИС от длительности видео

Длительность/ кодек	H.263	H.264	MPEG-2	MPEG-4	VP8
4 с	5 с	6 с	3 с	4 с	6 с
25 с	28 с	36 с	18 с	22 с	35 с
50 с	57 с	73 с	35 с	44 с	70 с
75 с	85 с	110 с	52 с	65 с	105 с
100 с	113 с	147 с	70 с	86 с	138 с

Для получения результатов в таблице 4.1, ОСИС формировался в видеороликах фиксированной длительности в 30 с. Анализ полученных результатов показал значительное влияние величины разрешения видеопотока на производительность ПО формирования идентификатора в спектральной области видеоданных. Так уже при обработке видеопотока с разрешением QHD (2560x1440 пикселей) наблюдается увеличение времени формирования ОСИС. В данном

случае будет наблюдаться прямая зависимость частоты процессора и величины оперативной памяти системы видеозаписи от качества обрабатываемого видео, которая, в свою очередь, позволит рассматривать показатель времени формирования ОСИС как величину, близкую к константе.

Значения времени формирования ОСИС в видеоданных во взаимосвязи с их длительностью показывают практически линейную зависимость (табл. 4.2). Это означает отсутствие влияния длительности видеоролика на производительность реализации алгоритма формирования ОСИС. Необходимо только учесть ограничение по минимальной длительности видео в 4 с, определенной при постановке задачи (см. пп. 1.3). Влияние на время обработки оказывает лишь используемый для компрессии видеокодек, показывая очевидность факта, что чем сложнее алгоритм сжатия, тем больше времени затрачивается на формирование ОСИС в спектральной области изображения.

С целью определения эффективности функционирования подсистемы контроля целостности (детектирования) идентификатора в видеофайлах были экспериментально получены значения времени детектирования ОСИС в видеопотоке, который подвергался воздействию некоторых возмущений. Стоит отметить, что рассмотрение такого показателя, как время обнаружения ОСИС, нецелесообразно ввиду специфики работы самой системы. Программная реализация алгоритма детектирования ОСИС функционирует таким образом, что досрочное завершение обработки наступает только в случае полностью распознанной строки идентификатора *IDhex*, в остальных случаях ПО обрабатывает видео от начала и до его завершения. Таким образом, значимым показателем эффективности ПО детектирования ОСИС будет выступать именно время, затрачиваемое на распознавание идентификатора пользователя.

На начальном этапе проведения эксперимента по исследованию эффективности программной реализации подсистемы детектирования ОСИС, встроенного в видеопоток с помощью координатно-переменного метода и использующего эффект «накопления», по аналогии с пп. 2.5 реализации множества преобразований  $U$  в виде возмущений были разбиты на группы по критерию

объединения шкал измерения динамического диапазона воздействия. В первую группу вошли возмущения: изменение размеров кадра –  $a_1$ , изменение разрешения изображения –  $a_2$ , сжатие изображения –  $a_3$ , обрезка изображения по краям –  $a_4$ , вырезание части изображения –  $a_5$ , изменение частоты кадров видеопоследовательности –  $a_6$ , обрезка видео по времени –  $a_7$ . Мера воздействия возмущений первой группы, согласно граничным условиям устойчивости ОСИС, изменялась в диапазоне от 100 % до 60 %. В ходе экспериментальных исследований шагом изменения диапазона возмущений первой группы был выбран 5 %.

Результаты экспериментальных исследований по определению времени детектирования ОСИС в спектральной области видео, сжатого по стандарту H.264, приведены в таблице 4.3. В ячейках таблицы приведены усредненные по всей выборке видеофайлов значения показателя времени детектирования ОСИС. Как видно из таблицы, программная реализация алгоритма контроля целостности ОСИС обеспечивает достаточные значения показателей эффективности для его использования в DRM-системах. В дополнение можно заметить линейную зависимость времени детектирования от сокращения времени видео и уменьшения частоты кадров. Этот факт объясняется тем, что данные преобразования ни в коей мере не влияют на частотную область изображений, а лишь сокращают объем так называемого «накопления» идентификатора.

Таблица 4.3 Время детектирования ОСИС при воздействии возмущений  $a_1 - a_7$

Возмущение / %	95	90	85	80	75	70	65	60
$a_1$	0,1 с	0,3 с	0,8 с	1,4 с	1,9 с	2,3 с	2,7 с	3,1 с
$a_2$	0,2 с	0,4 с	1,2 с	1,6 с	2,2 с	2,8 с	3,5 с	3,8 с
$a_3$	0,1 с	0,3 с	0,9 с	1,3 с	2,1 с	2,9 с	3,4 с	3,8 с
$a_4$	0,3 с	0,5 с	1,2 с	1,8 с	2,4 с	2,8 с	3,1 с	3,5 с
$a_5$	0,2 с	0,4 с	1,3 с	1,5 с	2,1 с	2,7 с	2,9 с	3,3 с
$a_6$	0,1 с	0,6 с	0,9 с	1,3 с	1,9 с	2,5 с	2,9 с	3,4 с
$a_7$	0,2 с	0,5 с	1,1 с	1,7 с	2,3 с	2,6 с	2,8 с	3,6 с

Во вторую группу искажающих ОСИС воздействий вошли следующие возмущения: компрессия видео с помощью известных кодеков изображения *H.263* –  $a_8$ , *H.264* –  $a_9$ , *MPEG-2* –  $a_{10}$ , *MPEG-4* –  $a_{11}$ , *VP8* –  $a_{12}$ , фильтрация изображений фильтром Гаусса –  $a_{13}$ , контрастирование –  $a_{14}$ , медианная фильтрация –  $a_{15}$ . По аналогии с экспериментом, описанным в пп 2.5, таблица 2.4, для описания результатов эксперимента применим относительную шкалу. Согласно граничным условиям устойчивости диапазоном изменения степени сжатия при проведении экспериментальных исследований по определению времени детектирования ОСИС выступит степень сжатия от 1 (без сжатия, только перекодирование) до 3, с шагом 0,5. Для алгоритмов фильтрации существует показатель степени или глубины фильтрации. С целью удобства восприятия результатов эксперимента данные показатели для каждого из рассматриваемых фильтров были приведены к шкале 1–3, предварительно пройдя анализ на верхнюю границу глубины фильтрации, определяющую приемлемость качества фильтруемого изображения. По аналогии с кодеками, глубина фильтрации 1 означает ее отсутствие, 3 – максимально допустимая по качеству глубина. Результаты исследования степени влияния возмущений  $a_8$  –  $a_{15}$  на время детектирования ОСИС в видеофайле формата H.264 приведены в сводной таблице 4.4.

Таблица 4.4 Время детектирования ОСИС при воздействии возмущений  $a_8$  –  $a_{15}$

Возмущение/степень сжатия	1	1,5	2	2,5	3
$a_8$	0,1 с	0,5 с	1,5 с	2,9 с	3,5 с
$a_9$	0,2 с	0,7 с	1,7 с	3,1 с	3,8 с
$a_{10}$	0,1 с	0,8 с	1,8 с	2,9 с	3,8 с
$a_{11}$	0,2 с	1,3 с	2,1 с	3,2 с	3,9 с
$a_{12}$	0,1 с	1,2 с	1,9 с	3,1 с	3,9 с
$a_{13}$	0,1 с	1,1 с	2,2 с	2,9 с	3,8 с
$a_{14}$	0,2 с	0,9 с	1,9 с	2,4 с	3,1 с
$a_{15}$	0,1 с	1,7 с	2,1 с	2,7 с	3,6 с

Анализ данных экспериментальных исследований (табл. 4.4) показывает значительное влияние разрушающего воздействия множества преобразований

фильтрации изображения на время детектирования идентификатора ОСИС, что согласуется с экспериментальными данными таблицы 2.4. Однако в пределах граничных значений устойчивости ОСИС, встроенного разработанным в работе методом, время детектирования идентификатора лежит в рамках требуемых значений для обеспечения оперативности обработки видеоданных.

В заключительной части исследования следует отметить, что данные таблиц 4.3 и 4.4 были получены путем обработки промаркированных видеоданных одинаковой длительности (60 с). Эффект «накопления» информации об идентификаторе в ходе извлечения и детектирования ОСИС обеспечивает стремление показателя вероятности детектирования к единице по мере увеличения длительности анализируемого видео (количества кадров). В этой связи возникла необходимость определения граничного значения длительности промаркированного видеопотока, после которого наступает состояние насыщения накопленности информации об ОСИС. Дальнейшее увеличение длительности видео становится нецелесообразным. На рисунке 4.8 приведены графики зависимости времени детектирования ОСИС от длительности обрабатываемого видеоролика различной степени сжатия при осуществлении возмущений  $a_8 - a_{12}$ . Анализ полученных экспериментальных данных, отраженных на графиках рисунка 4.2, показывает предельное значение длительности видеофайла в 4 с, достаточное для обеспечения требуемой вероятности извлечения и детектирования в нем ОСИС при реализации рассмотренных в работе возмущений в пределах граничных значений устойчивости.

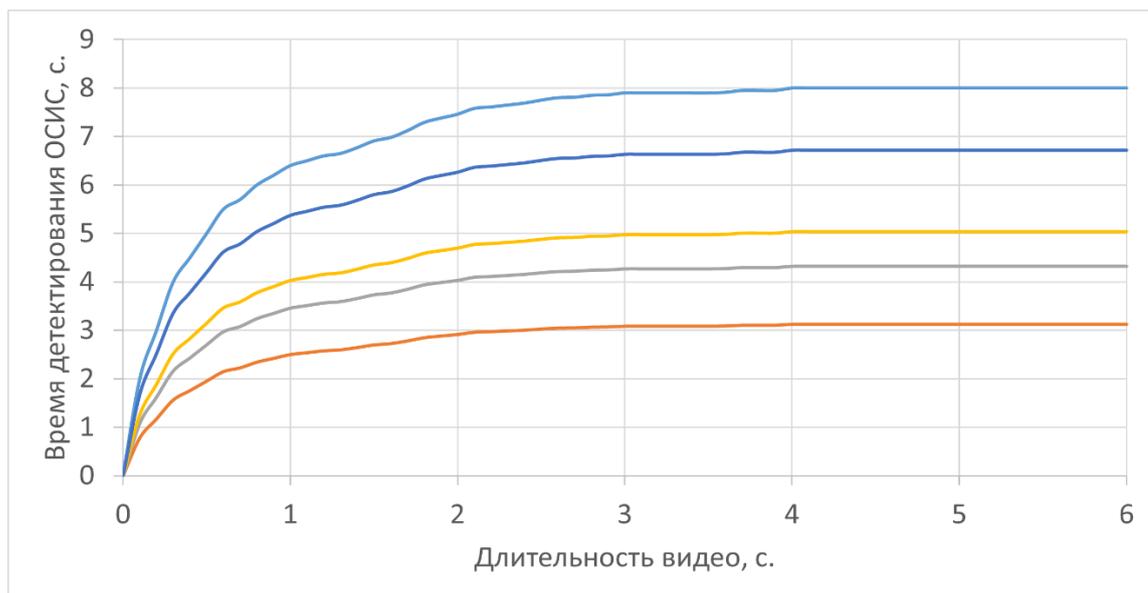


Рисунок 4.8 – Графики зависимости времени детектирования ОСИС

В конечном счете проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод об удовлетворении предъявляемых требований к программной реализации системы обработки видеоданных, содержащих динамические ОСИС.

### 4.3 Выводы по главе

В результате разработки программной системы обработки видеоданных с реализованными алгоритмами формирования и контроля целостности ОСИС были получены следующие результаты:

- разработана обобщенная архитектура программной системы обработки видеоданных, обеспечивающая повышение вероятности идентификации динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающая повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки этих объектов, частично распознанных на уровне автоматической обработки;
- разработано специальное программное обеспечение, реализующее алгоритм формирования динамических ОСИС в частотной области видеоданных и алгоритм контроля целостности динамических ОСИС в частотной области

видеоданных с применением процедуры «накопления» информации об искомом ОСИС;

- определены тактико-технические требования к аппаратной составляющей разрабатываемой системы, описаны взаимосвязи процедур, функций и классов ПО;

- проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности программной реализации системы по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

Полученные в результате данные по своей полноте и репрезентативности позволяют судить о достижении целей архитектурного моделирования и практической реализации системы обработки видеоданных, содержащих динамические ОСИС.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ состояния проблемы использования объектов со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных или их отдельных структурных элементов видеоданных.

2. Выполнено моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих объекты со скрытым идентификационным слоем, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области структурных элементов видеоданных и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству этих элементов.

3. Разработан алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического объекта со скрытым идентификационным слоем для выбора областей его формирования, повышающих устойчивость к комбинациям множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

4. Разработан алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству структурных элементов видеоданных.

5. Разработаны программные средства обработки видеоданных, содержащих динамический объект со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки.

6. Проведены численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

**СПИСОК ТЕРМИНОВ, СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В настоящей работе применяются следующие сокращения:

БПФ	– быстрое преобразование Фурье
ВП	– вейвлет-преобразование
ВЧ	– высокие частоты
ДВП	– дискретное вейвлет-преобразование
ДКП	– дискретно-косинусное преобразование
ДПА	– дискретное преобразование Адамара
ДПФ	– дискретное преобразование Фурье
ИС	– информационная система
КП	– косинусное преобразование
ЛЛР	– линейный рекуррентный регистр
НЧ	– низкие частоты
ОСИС	– объект со скрытым идентификационным слоем
ПСП	– псевдослучайная последовательность
СЧ	– средние частоты
СЭВ	– структурный элемент видеоданных
AVI	– Audio Video Interleave, чередование аудио и видео
DRM	– Digital Rights Management, технические средства защиты авторских прав
DPL	– Data Loss/Leak Prevention, предотвращение утечек информации
HD	– High Definition, высокая четкость
ISAN	– International Standard Audiovisual Number, уникальный идентификатор аудиовизуальных произведений и связанных с ними версий
ISRC	– International Standard Recording Code, международный стандартный номер аудио- или видеозаписи

- JPEG – Joint Photographic Experts Group, формат графического изображения
- LSB – Least Significant Bit, наименее значимый бит
- MD5 – Message Digest 5, 128-битный алгоритм хеширования
- MPEG – Moving Picture Experts Group, экспертная группа по движущимся изображениям
- MSE – Mean Square Deviation, среднеквадратичное отклонение
- OCR – Optical Character Recognition, оптическое распознавание символов
- PSNR – Peak Signal-to-Noise Ratio, пиковое отношение сигнала к шуму
- SHA-1 – Secure Hash Algorithm 1, алгоритм криптографического хеширования
- SSIM – Structure Similarity, индекс структурного сходства
- UHD – Ultra High Definition, разрешение 4K
- VGA – Video Graphics Array, компонентный видеointерфейс

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Морковин, С.В. Метод динамического внедрения робастного цифрового водяного знака в видеоданные // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 4 (86). – С. 66-68.
2. Морковин, С.В. Алгоритмы и программные средства человеко-машинной обработки цифровых водяных знаков в видеопоследовательности. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – №10 (3). – С. 30-31.
3. Морковин, С.В., Миняев, А.А., Мишин, А.Б., Овсянников, А.Н. Алгоритм динамического координатно-переменного внедрения и автоматического обнаружения невидимых робастных цифровых водяных знаков в частотной области видеопотока // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – №2 (88). – С. 13-18.
4. Морковин, С.В., Невров А.А. Метод внедрения невидимых робастных цифровых водяных знаков в видеопоследовательность на основе изменяемых координат маркирования спектральной области кадра // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – №3 (89). – С. 85-88.
5. Morkovin, S. Comparative analysis of metrics for estimating the introduced distortions in images when injection digital watermarks in the frequency spectrum / A. Filimonov, M. Rykshin, O. Tsvetkova // MIP Engineering-III 2021: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering. – 2021. № MIP\_III\_4016.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021618016. Модуль внедрения цифровых водяных знаков в изображения на основе преобразований в спектральной области / С.В. Морковин, Э.А. Яндашевская; заявители и правообладатели: С.В. Морковин, Э.А. Яндашевская; заявл. 17.05.2021; опубл. 21.05.2021.

7. Морковин, С.В., Миняев, А.А., Мишин, А.Б. Проблема робастности невидимых цифровых водяных знаков, внедряемых в видеоданные // Сборник трудов Всероссийской межведомственной научно-технической конференции по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «НАУКА И АСУ – 2021». – 2021. – С. 25–26.
8. Мишин, А.Б., Морковин, С.В. Модифицированный метод внедрения робастного невидимого цифрового водяного знака в видеоданные // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 42-49. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-42-49.
9. Morkovin S.V. A method for embedding a changeable invisible digital watermark in video data // Modern Informatization problems in simulation and social technologies MIP-2022'SCT Proceedings - XXXVII 2022. – 2022. p. 126-131.
10. Грибунин В. Г. Оков И. Н., Туринцев В. И. Цифровая стеганография. М. : СОЛОН-Пресс, 2002. 272 с.
11. Конахович, Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / А.Ю. Пузыренко, Г.Ф. Конахович. – М: МК-Пресс, 2006. – 288 с.
12. Мартимов, Р.Ю. Модель и метод защиты видеоинформации от угроз нарушения целостности с использованием стеганографии : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.19 / Р. Ю. Мартимов. – Санкт-Петербург: СпбНИУ ИТМО, 2016. – 127 с.
13. Патрик Бас, Тедди Фурон, Франсуа Кайр, Гвенаэль Дорр, Бенджамин Матон, «Безопасность водяных знаков, основы, безопасные конструкции и атаки», Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering, 2016, ISBN 978-9811005053.
14. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ (ред. от 09.03.2021) «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» // Собрание законодательства РФ, 27.07.2006, № 30, ст. 2.

15. Афанасьев, А. А. Основы радиотехники и электроники. Ч. 24. Кодирование изображений в цифровых системах : пособие / А. А. Афанасьев, И. В. Ульянов. – Орёл: Академия ФСО России, 2009. – 100 с.
16. M. D. Levine. Vision in Man and Machine. New York: McGraw Hill, 1985.
17. Трегулов Т.С. Методы и алгоритмы встраивания цифровых водяных знаков повышенной устойчивости к внешним воздействиям на изображение-контейнер : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.19 / Т.С. Треуглов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2014. – 92 с.
18. Батура В.А. Методы и алгоритмы повышения устойчивости цифровых водяных знаков, внедряемых в статические изображения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.19 / В.А. Батура. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2015. – 115 с.
19. Прохожев Н.Н. Методы и алгоритмы повышения устойчивости информации, встроенной в графические стеганоконтейнеры, к сжатию с потерями : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.19 / Н.Н. Прохожев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 103 с.
20. Mahesh R Sanghavi, Dr. Archana M., Dr. Rajeev Mathur and Kainjan S. Kotecha. A robust scheme for Digital Video Watermarking based on Scrambling of Watermark // International Journal of Computer Applications. 2011, № 35(2), pp.31-38.
21. Sanjana Sinha, Prajnat Bardhan, Swarnali Pramanick, Ankul Jagatramka, Dipak K. Kole, Aruna Chakraborty. Digital Video Watermarking using Discrete Wavelet Transform and Principal Component Analysis // International Journal of Wisdom Based Computing, Vol. 1 (2), August 2011, pp 7-12.
22. Ikpyo Hong, Intaek Kim, Seung-Soo Han. A blind watermarking technique using wavelet transform // Industrial Electronics Proceedings, Pusan, Korea, vol.3, pp. 1946-1950.-2001.

23. Ikyo Hong, Intaek Kim, Seung-Soo Han. A blind watermarking technique using wavelet transform // *Industrial Electronics Proceedings*, Pusan, Korea, vol.3, pp. 1946-1950.-2001.
24. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling // *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. 1995. P. 123-132.
25. Hsu C.-T., Wu J.-L. Hidden digital watermarks in images // *IEEE Transactions on Image Processing*. 1999. Vol. 8. № 1. P. 58-68.
26. Григорьян А.К. Разработка и исследование метода преобразования видеоданных для определения их подлинности и подтверждения целостности: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 21.02.12/ А.К. Григорьян. – Санкт-Петербург. – 16 с.
27. Григорьян А.К. Методы внедрения цифровых водяных знаков в потоковое видео. Обзор / А.К. Григорьян, Н.Г. Аветисова // *Информационно-управляющие системы*. 2010. № 2. С. 38–45.
28. Старченко А.П. Метод сжатия динамического диапазона цифровых голограмм Фурье в задаче встраивания скрытых водяных знаков / А.П. Старченко, Ю.А. Гатчин // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, 2011. № 2 (72). С. 141–146.
29. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., and Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. 2004, p. 600-612.
30. Damera-Venkata N., Kite T.D., Geisler W.S., Evans B.L., and Bovik A.C., Image quality assessment based on a degradation model, *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 4, pp. 636-650, Apr. 2000.
31. Мониц Ю.И., Старовойтов В.В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // *Искусственный интеллект – 2008 : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф.* 2008. № 4. 376–386 с.
32. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука; Техносфера – Москва, 2006. - 368 с.

33. Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А. Методы генерации и тестирования случайных последовательностей – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 70 с.
34. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / Пер. с англ. под ред. РЛ. Добрушина и С.И. Самойленко. – М.: Мир, 1976. – 596с.
35. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. – М.: Радио и связь, 1985.
36. Rafael Gonzalez. Digital Image Processing, 3<sup>rd</sup>. – Pearson Hall, 2008. – ISBN 9780131687288.
37. Шумская О.О., Будков В.Ю. Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений. *Научный вестник НГТУ*. 2018;3(72):121–134. DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-121-134.
38. Moosazadeh M., Ekbatanifard G. A New DCT-Based Robust Image Watermarking Method Using Teaching-Learning-Based Optimization. *Journal of Information Security and Applications*. 2019;47:28–38.
39. Xiang L., Wang X., Yang C., Liu P. A novel linguistic steganography based on synonym run-length encoding. *IEICE transactions on Information and Systems*. 2017;100(2):313–322.
40. Hai N. M., Ogawa M., Tho Q. T. Packer identification based on metadata signature. In: *Proceedings of the 7-th Software Security, Protection, and Reverse Engineering. Software Security and Protection Workshop*. 2017;4:1–11. DOI: 10.1145/3151137.3160687.
41. Wang Y., Gong D., Lu B., Xiang F., Liu F. Exception handling-based dynamic software watermarking. *IEEE Access*. 2018;6:8882–8889.
42. 8. Zhong X., Huang P.C., Mastorakis S., Shih F.Y. An Automated and Robust Image Watermarking Scheme Based on Deep Neural Networks. *IEEE Access*. 2021;23:1951–1961.