

На правах рукописи



Кувшинова Ольга Александровна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ
РЕСУРСОВ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

Специальность 2.3.8. – Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пенза – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» на кафедре «Информационные технологии и системы».

Научный руководитель: **Роганов Владимир Робертович,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза.

Официальные оппоненты: **Колоденкова Анна Евгеньевна,** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защиты информации», директор института автоматизации и информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита диссертации состоится «27» мая 2026 года в 13:30 ч. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.113.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», на сайте <http://www.rsreu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
объединенного диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А. Н. Колесенков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время предусмотрено увеличение числа учебных ситуаций для подготовки и контроля профессиональных навыков летчиков. В то же время обучение летчика навыкам решения навигационных задач с использованием визуализации реперных объектов разрешается только в процессе посадки. Это обусловлено необходимостью разработки новых методов и алгоритмов, направленных на оптимизацию информационных потоков, связанных с визуальными реперными объектами, расположенными по всей территории модели района полетов в количестве, достаточном для решения навигационных задач.

Имитаторы авиационного тренажера (АТ) разработаны для обучения летчика профессиональным навыкам управления информационной моделью летательного аппарата (ЛА) в особых случаях полета. АТ создаются по требованию заказчика для профессиональной подготовки летчиков решению актуальных задач. Информация для летчика во время полета на АТ доступна из информационных процессов, синтезированных имитаторами АТ. Во время полета летчик должен решать и задачи навигации, но их решение при полетах на АТ проводится в минимальном объеме.

Решать навигационные задачи помогает имитатор визуальной обстановки (ИВО), синтезирующий для летчика в режиме реального времени наблюдаемую через остекление кабины 3D-модель района полетов.

Однако недостаточный уровень исследований и производительности программно-аппаратных систем, называемых программно-аппаратным генератором изображений (ПА ГИ), а также синтеза наблюдаемой части района полетов в реальном времени не позволяли с циклом менее 120 мс синтезировать для летчика необходимое число 3D-моделей реперных объектов, расположенных в районе полетов. Поэтому обучение летчика к решению навигационных задач отодвигалось на второй план. В полной мере летчик мог решать все задачи только при обучении визуальной посадке на 3D-модель взлетно-посадочной полосы (ВПП).

Анализ методов, разработанных отечественными научными школами под руководством Долговесова Б. С. и Ковалёва А. М. (ИАиЭ СО РАН), Красовского А. А. (Институт космической медицины), а также научными коллективами из Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Ростова-на-Дону и Харькова и зарубежными центрами (CAE, Канада; Thomson-CSF, Франция; Indra, Испания), обеспечивающими обучение лётчиков на АТ, показал следующее. Весь ресурс ПА ГИ использовался для синтеза модели площадью 15×15 км. При вылете за пределы этого района полет осуществлялся либо в условиях сплошной облачности, либо над безориентирной местностью, что объяснялось ограниченной производительностью ПА ГИ. В работе Дэвида Лоу рассматривается «разбросанная» сегментация, что не является подходящим решением для распределения ресурсов ПА ГИ.

На основании результатов, полученных при выполнении гранта РФФИ № 23-21-10046, было предложено сформировать структурированную базу

данных ПА ГИ, в которой каждая запись содержит информацию о соответствующем сегменте первого уровня. Центральный сегмент представляет собой 3D-модель ВПП с прилегающими 3D-моделями реперных объектов; остальные сегменты — это 3D-полигоны, окрашенные текстурой, характерной для выбранного заказчиком района полетов.

На первом этапе синтеза изображения проверяются все сегменты, чтобы определить, какие из них будут активны (3D-модели районов пересекаются с площадью пирамиды видимости). Остальные сегменты в данном цикле не рассматриваются, что позволяет перераспределять ресурсы ПА ГИ в виде примитивов, из которых формируются 3D-модели объектов.

Программное обеспечение ПА ГИ позволяет использовать управляющие примитивы «охватывающая сфера», соответствующие сегментам, на которые делится модель района полетов, для отбора сегментов с моделями, видимыми при данном положении подвижного наблюдателя. Первоначально модель района полетов делится на сегменты первого уровня. Каждый сегмент первого уровня делится на сегменты второго уровня. Каждый сегмент второго уровня делится на сегменты третьего уровня и т.д. В данной работе будем считать, что необходимо распределить ресурсы ПА ГИ в сегменте первого уровня. На данный момент эти программы практически не используются из-за отсутствия разработок новых методов, которые могли бы обеспечить равномерное распределение информационных ресурсов по всей площади информационной модели района полетов. Разработка такого метода позволит расширить количество учебных ситуаций, добавив к уже существующим обучение решению навигационных задач при полетах на АТ в любых направлениях, что делает данную работу **актуальной**.

Объект исследования. Информационные ресурсы ПА ГИ, обеспечивающие разработку информационных процессов на всей площади заданной 3D-модели района полетов.

Предмет исследования – методы и алгоритмы распределения ресурсов ПА ГИ, позволяющие синтезировать в режиме реального времени максимальное число наблюдаемых 3D-моделей реперных объектов при полете на АТ в любом направлении.

Цель исследования. Разработка новых методов и алгоритмов для синтеза 3D-модели района полетов большого размера, которая позволяет кроме обучения пилотированию решать навигационные задачи при полётах на АТ в любом направлении.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались основные положения теории моделирования, теории множеств, теории оптимизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить актуальные научные задачи, связанные с разработкой метода распределения информационных ресурсов мультипроцессорных программно-аппаратных систем:

1. Провести сравнительный анализ методов подготовки исходной информации, обеспечивающих использование ПА ГИ для синтеза 3D-моделей реперных объектов.

2. Разработать метод распределения информационных ресурсов ПА ГИ, позволяющий за минимальное время отобрать сегменты первого уровня с описанием 3D-моделей реперных объектов, которые размещены на площади отобранных сегментов.

3. Разработать метод формирования структуры базы данных ПА ГИ, позволяющий в режиме реального времени отсекал сегменты первого уровня, не попавшие в след пирамиды видимости.

4. Разработать методику распределения ресурсов ПА ГИ по всей информационной модели района полетов, обеспечивающую синтез максимально возможного числа моделей реперных объектов в режиме реального времени.

5. Разработать обобщенный алгоритм деления информационной модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня для оптимального распределения информационных ресурсов ПА ГИ.

6. Разработать программную реализацию обобщенного алгоритма деления 3D-модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня с учетом производительности ПА ГИ, максимальной дальности видимости и размера заданной площади полета, обеспечивая при этом максимальное число видимых 3D-моделей реперных объектов при полетах на АТ в любом направлении.

Научная новизна полученных результатов:

1. Метод распределения информационных ресурсов ПА ГИ отличается тем, что модель района полетов делится на сегменты первого уровня, что позволяет на этапе формирования базы данных задать правило распределения ресурсов ПА ГИ.

2. Метод формирования структуры базы данных ПА ГИ, отличающийся тем, что задает правило задания структуры БД, позволяющее на первом этапе синтеза отсечь информацию о 3D-моделях реперных объектов, которые в данный момент не видны.

3. Методика расчёта ресурсов ПА ГИ отличается тем, что вместо ресурса «количество трёхмерных объектов» (в виде 3D-моделей реперных объектов) введено понятие ресурса как «время обработки примитивов», что позволяет, используя методы оптимизации, не менее чем в 7,5 раз увеличить количество обрабатываемых примитивов на всей 3D-модели района полетов размером не менее чем 400x400 км.

4. Обобщенный алгоритм деления информационной 3D-модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня отличается тем, что учитывает производительность ПА ГИ, размеры модели района полетов и максимальную дальность видимости, что позволяет применить алгоритм целочисленного программирования Гомори для расчета оптимального размера сегмента первого уровня и максимального числа размещаемых в нём 3D-моделей реперных объектов разной формы.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования, согласно паспорту специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»:

– Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения (п. 1).

– Обеспечение информационных систем и процессов, применение информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления (п. 6).

Практическая значимость работы

1. Метод формирования информационного процесса с видимыми в данный момент времени 3D-моделями реперных объектов отличается тем, что после первого этапа синтеза изображения на обработку выбираются модели объектов, размещённые в активных сегментах, что позволяет увеличить число реперных объектов, распределённых по всей модели района полетов.

2. Метод формирования базы данных ПА ГИ, отличающийся тем, что объекты одного сегмента принадлежат одной записи, позволяет после перебора записей ПА ГИ оставить на дальнейшую обработку только записи, соответствующие сегменту, и обеспечивает удаление невидимой части 3D-модели района полетов.

3. Методика описания ресурсов ПА ГИ, отличается тем, что размер каждого сегмента зависит от заданной дальности видимости, общего числа сегментов, на которые разделена 3D-модель района полетов, и производительности ПА ГИ, что позволяет применять методы оптимизации для нахождения оптимального размера сегмента первого уровня и определения максимально допустимого времени его обработки.

4. Обобщенный алгоритм деления информационной 3D-модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня, отличающийся реализацией алгоритма Гомори для расчета оптимальных параметров сегментов, позволяет оценить соответствие ПА ГИ предъявляемым требованиям на основе заданного числа 3D-моделей реперных объектов.

Реализация и внедрение результатов работы

Разработанные методы и алгоритмы были протестированы при выполнении гранта РФФИ № 23-21-10046 (<https://rscf.ru/project/23-21-10046/>) на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», а также учебном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» при обучении студентов по направлению 09.03.02. «Информационные системы и технологии»; АО «НПП «Рубин», г. Пенза для формирования оперативной 3D-обстановки в тренажерах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод распределения информационных ресурсов ПА ГИ, позволяющий решить задачу размещения информации по всей модели района полетов.

2. Метод формирования структуры базы данных ПА ГИ, позволяющий в режиме реального времени отсекал сегменты первого уровня, не попавшие в след пирамиды видимости, обеспечивает получение более насыщенного изображения местности с моделями реперных объектов.

3. Методика описания ресурсов ПА ГИ, включающая размещённые примитивы сегментов первого уровня, позволяет определить оптимальный размер сегмента первого уровня и допустимое время его обработки.

4. Обобщенный алгоритм деления 3D-модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертационном исследовании, опубликованы в научных изданиях, прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях: XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2019), VI Всероссийской научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2020), V Национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства» (Пенза, 2022), III Международной научно-практической конференции «Цифровизация агропромышленного комплекса» (Тамбов, 2022), Международном симпозиуме «Надежность и Качество» (Пенза, 2023, 2024, 2025).

Публикации. По итогам исследований опубликованы 22 работы, 7 статей в изданиях, входящих в рекомендуемый список ВАК РФ, перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 4 статьи, цитируемые в международных базах данных *WoS* и *Scopus*. Опубликовано 9 материалов докладов, представленных на международных конференциях. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ.

Выносимые на защиту результаты получены лично соискателем. В публикациях, которые написаны в соавторстве, личный вклад автора заключается в проведении исследований и обработке результатов, которые использовались при написании диссертации. Данные, заимствованные у других авторов, сопровождаются ссылками на соответствующие опубликованные источники.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, которые содержат 102 наименования, и 2 приложения. Полный объем диссертации составляет 136 страниц. Основной текст работы включает 56 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и определена степень ее проработки. Сформулированы цель работы и поставлены задачи, необходимые для ее достижения. Изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности результатов исследований и

апробация. Представлены положения, выносимые на защиту. Дана информация о публикациях автора и их достоверности, объеме и содержании диссертации.

В первой главе приводятся результаты исследования ПАГИ, синтезирующие для лётчика 3D-модель окружающего пространства во время полёта на АТ. Основными элементами, на основе которых формируется данная модель, являются элементы компьютерной графики — визуальные и управляющие примитивы. Из них набирается 3D-модель реперного объекта. Обработывая эти примитивы, ПАГИ синтезирует на экране видеоряд, состоящий из множеств 2D-проекций 3D-моделей, которые попали в след пирамиды видимости при данном положении подвижного наблюдателя. Далее через 3D-индикатор эти проекции передаются в зрительный аппарат i -го лётчика и одновременно воздействуют на заданные составляющие его зрительного аппарата формируя у него уверенность, что он видит 3D-объекты и, рассматривая их, может профессионально тренировать свой глазомер.

Авторы первых ПАГИ, разработанные в ИАиЭ СО РАН, сформировали требования к примитивам, описывающие 3D-модель района полетов S_0 , которая

делится на M сегментов первого уровня $S_m^{(1)}$.

$$S_0 = \bigcup_{m=1}^M S_m^{(1)}, \quad (1)$$

На первом этапе синтеза 2D-проекций 3D-моделей отбираются активные сегменты первого уровня «по направлению» $S_m^{(1,a)}$ или активные сегменты «по дальности» $S_m^{(2,a)}$.

Если m -й сегмент первого уровня, заключённый в управляющий примитив «охватывающая сфера $(D_m^{(S_1)})$ », пересекается со следом пирамиды видимости $S^{(v)}$, он становится активным (ему будет присвоен индекс “1”) и заключённая внутри него информация будет обработана в i -й цикл режима реального времени Δt_c

$$I(S_m^{(1,a)}) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_m^{(S_1)} \cap S^{(v)}(\Delta t_i) \neq \emptyset, \\ 0, & \text{если } D_m^{(S_1)} \cap S^{(v)}(\Delta t_i) = \emptyset. \end{cases} \quad (2)$$

где I – индикатор функции, принадлежащий сегментам первого уровня, 1 – признак активизации рассматриваемого сегмента $S_m^{(1,a)}$.

Если центр m -го сегмента $S_m^{2,a}(x, y, z)$ первого уровня, заключённого в управляющий примитив «охватывающая сфера по дальности $(D_m^{(S_2)})$ » находится на заданной дистанции $\rho(S_m^{2,a}(x, y, z), G)$ от текущего положения

наблюдателя G центру сегменту l_i он становится активным (ему будет присвоен индекс “2”):

$$I(S_m^{2,a}) = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{\min} \leq \rho(S_m^{2,a}(x,y,z), G) \leq l_{\max}, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

где 2 – признак активизации рассматриваемого сегмента $S_m^{(2,a)}$; $S_m^{2,a}(x,y,z)$ – координаты центра рассматриваемого сегмента; l_{\min} – дистанция активизации сегмента $S_m^{(2,a)}$ при попадании текущего значения расстояния от наблюдателя до центра рассматриваемого сегмента далее этой пороговой дистанции, но не далее l_{\max} , дистанции прекращения активизации $S_m^{(2,a)}$ при удалении от него.

Внешний вид модели района полетов синтезируется по алгоритмам компьютерной графики, извлекая необходимую информацию из структурированной базы данных. Из активных сегментов первого уровня извлекаются: 3D-полигоны (P_i), окрашенные монохромно или с помощью текстур, 3D-огни (F_j) и управляющие примитивы. Внешний вид 3D-моделей размещённых на S_0 зависит от количества визуальных примитивов:

$$S_0 = \{(P_i, F_j)\}, \quad i=1, I; \quad j=1, J; \quad (4)$$

где I – максимальное количество полигонов, размещённых по всей площади модели района полетов; J – максимальное количество огней, размещённых по всей площади модели района полетов, S_0 – размер модели района полетов.

3D-полигоны (P_i) могут быть:

$$P_i = \{P_i^{(3)}, P_i^{(4)}, \dots, P_i^{(n)}\}, \quad (5)$$

где $P_i^{(3)}, P_i^{(4)}, \dots, P_i^{(n)}$ – 3D-полигоны (трехвершинные, четырехвершинные, n -вершинные).

В процессе синтеза изображения участвуют также и невидимые управляющие примитивы: $D = \{D^{(S_1)}; D^{(S_2)}; D^{(r)}\}$,

где $(D^{(r)})$ – разделяющая плоскость, $(D^{(S_1)})$ – «охватывающая сфера по направлению»; $(D^{(S_2)})$ «охватывающая сфера по дальности», D - управляющие примитивы.

Бывший лидер САЕ, разработавший ПА ГИ «MaxVueTM», впервые использовал 3D-полигоны, окрашенные текстурой, которая была создана на основе фотоснимков участка местности. Производительность ПА ГИ со

временем увеличилась. С помощью первых ПА ГИ можно было синтезировать 3D-модель ВПП с рулежными дорожками. Современные ПА ГИ позволяют без распределения ресурсов ПА ГИ синтезировать центральную часть 3D-модели района полетов с узнаваемыми 3D-моделями ВПП и прилегающими 3D-моделями реперных объектов, что достаточно для обучения летчиков визуальной посадке и решения на этом этапе полёта навигационных задач, связанных с визуальной ориентацией в пространстве.

Исследования показали, что современные ПА ГИ могут при предварительном распределении информационных ресурсов по всей 3D-модели района полетов синтезировать визуально наблюдаемые 3D-модели реперных объектов при полётах на АТ в любом направлении. Это позволяет одновременно обучать лётчика и пилотированию ЛА, и решению навигационных задач не только по показаниям имитаторов приборов кабинного оборудования, но и с визуальной ориентацией по наблюдаемым 3D-моделям реперных объектов.

Анализ данных выявил, что необходимо синтезировать 3D-модель видимого участка местности при полётах над 3D-моделью района полетов размером до 1500×1500 км, используя структурированную базу данных. Структура базы данных позволяет за минимальное время выделить 3D-модели реперных объектов, которые при данном положении подвижного наблюдателя будут видны. Ранее максимально возможное количество 3D-реперных объектов вычислялось на основе анализа данных 3D-модели района полетов. Однако количество примитивов в каждом реперном объекте отличается, что усложняет задачу равномерного распределения их по всей площади 3D-модели района полетов.

Исследования показали, что оптимальным является распределение ресурсов в сегментах первого уровня с учётом максимального дополнительного времени, связанного с примитивами, входящими в эти сегменты. Эту особенность компьютерной графики реального времени целесообразно использовать для решения задачи распределения ресурсов ПА ГИ по всей площади 3D-модели района полетов, обеспечивая синтез наблюдаемых 3D-моделей реперных объектов при полетах на АТ в любом направлении.

Для решения этой задачи было предложено заменить информационный ресурс ПА ГИ, заданный как число обрабатываемых примитивов, на информационный ресурс – максимально возможное время обработки сегмента первого уровня, на которые поделена 3D-модель района полетов. Время t_{ob} , затраченное на синтез изображения в сегменте первого уровня:

$$t_{ob} = t_1^{(c)} + t_{a'_{ij}} + t_3^{(v)}, \quad (6)$$

где $t_1^{(c)}$ – время работы сценарного процессора, мс; $t_{a'_{ij}}$ – время работы геометрического и клипширующего процессора для активных сегментов a'_{ij} , мс;

$t_3^{(v)}$ – время видеопроцессора, которое постоянно, мс.

Время геометрического и клиппирующего процессора $t_{a'_{ij}}$ определяется как время параллельной обработки примитивов в активных сегментах:

$$t_{a'_{ij}} = \sum_{z=1}^{Z(a_{ij})} t_z^{(y)} + \sum_{o=1}^{O(a_{ij})} t_o^{(v)} \quad (7)$$

где $t_z^{(y)}$ – время обработки управляющих примитивов в сегменте первого уровня, мс, $t_o^{(v)}$ – время обработки визуальных примитивов в сегменте первого уровня, мс, $Z(a_{ij}), O(a_{ij})$ – число примитивов в активных сегментах a_{ij}

Время обработки визуальных $t^{(v)}$ и управляющих $t^{(y)}$ примитивов, из которых набираются 3D-модели реперных объектов, одинаковое, (t_4 – время обработки сегмента, мс; t_5 – время обработки огня, мс; t_6 – время обработки разделяющей плоскости, мс: $t_4 = t_5 = t_6$).

Время сценарного процессора $t_1^{(c)}$ определяется:

$$t_1^{(c)} = t_{ocp} \cdot (K_i + K_j) \quad (8)$$

где t_{ocp} – время охватывающей сферы, мс; K_i, K_j – число активных примитивов в a'_{ij} .

Время охватывающей сферы зависит от 3D-полигонов (трехвершинные, четырехвершинные, пятивершинные). Время, необходимое для обработки трехвершинного полигона в экспериментальных условиях, определяется следующим образом: сначала выбирается один трехвершинный полигон, на который последовательно накладываются другие трехвершинные полигоны. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не исчезнет видимый трехвершинный полигон, что указывает на превышение цикла режима реального времени. В этот момент удаляется последний добавленный полигон. Время обработки одного трёхвершинного полигона определяется путём деления общего времени цикла режима реального времени на количество наложенных трёхвершинных полигонов. Для оценки видимости трехвершинных 3D-полигонов и с большим числом вершин время t_{vn} определяется как:

$$t_{vn}^{(3)} = \text{const}_{(3v)}; \quad (9)$$

$$t_{vn}^{(4)} = \text{const}_{(3v)} + \Delta t; \quad (10)$$

$$t_{vn}^{(5)} = \text{const}_{(3v)} + 2\Delta t, \quad (11)$$

где $\text{const}_{(3v)}$ – время обработки трехвершинного полигона, мс; Δt – время обработки каждой дополнительной вершины полигона, мс.

Анализ методов распределения вычислительных ресурсов ПА ГИ в режиме реального времени в видимой части 3D-модели района полетов показал, что эта задача решается методами оптимизации. Для её реализации была поставлена задача разработать математическую модель, позволяющую применить методы оптимизации для расчета размеров сегментов первого уровня и максимально допустимого времени на обработку размещенных в нем примитивов.

Во второй главе предложен метод распределение информационных ресурсов ПА ГИ, обеспечивающих по всей 3D-модели района полета любого размера.

В настоящее время Заказчик ставит задачу перед разработчиками авиационных тренажеров моделировать 3D-модель района полета размером от 400×400 до 1500×1500 км. В то же время наиболее распространенные ПА ГИ имеют производительность от 1000 до 300000 примитивов.

Технология распределения ресурсов ПА ГИ проходит через следующие этапы: на первом этапе определяется время обработки примитива каждого типа для конкретного ПА ГИ. На втором этапе площадь всей 3D-модели района полета делится на однотипные сегменты первого уровня с учётом максимально допустимого времени на обработку каждого сегмента первого уровня. На третьем этапе разрабатывают 3D-модели реперных объектов, располагая их в каждом сегменте, при этом время обработки суммарного набора примитивов каждого сегмента не может превышать максимально разрешённое время на их обработку. На четвёртом этапе все примитивы каждого сегмента заносятся в соответствующую запись структурированной базы данных (каждому сегменту соответствует одна запись). На пятом этапе – непосредственно во время компьютерного синтеза изображения отсекаются записи, если их сегменты не попадали в след пирамиды видимости. Из записей активных сегментов, попавших в след пирамиды, извлекается информация, при обработке которой на экране синтезируется очередной кадр из 2D-проекций 3D-моделей реперных объектов. Активные сегменты N_a проверяются так: есть ли пересечение со следом пирамиды видимости при очередном положении подвижного наблюдателя:

$$N_a = \sum_{i=1}^I \delta_i, \quad (12)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i \cap S^{(v)} \neq \emptyset \\ 0, & \text{если } S_i \cap S^{(v)} = \emptyset \end{cases} \quad (13)$$

где $S^{(v)}$ – след пирамиды видимости, S_i – площадь сегмента первого уровня, I – максимальное количество сегментов первого уровня, попавшие в пирамиду видимости.

Размещение во всех сегментах примитивов 3D-моделей реперных объектов позволяет увеличить их общее число на всей 3D-модели района

полетов. Эксперименты показали, что есть два предела. Если размер сегмента первого уровня мал – их общее число может быть таким, что за время цикла режима реального времени не будет обработан ни один визуальный примитив – экран будет пустым, так как всё время цикла уйдёт на проверку «какой сегмент активен». Если размер сегмента первого уровня совпадает с площадью 3D-модели района полетов или близок к нему, число визуальных примитивов равно рекламной производительности ПА ГИ, тогда нет смысла заниматься распределением ресурса ПА ГИ (таблица 1).

Таблица 1 – Паспортные характеристики ПА ГИ

Наименование ПА ГИ	Производительность	Количество огней	Текстура поверхности в 3D-модели района полетов
«Аксай»	3D-полигон – 1000	4000	Нет
«Альбатрос»	3D-полигон – 16000	64000	Монохромно
«MaxVue TM »	3D-полигон – 16000	12000	Цветная
«Poligon TM »	3D-полигон – 300000	1200000	Цветная

На графике (рисунок 1) видно превышение числа размещённых примитивов в модели района полетов при определённом размере сегмента первого уровня. Поиск оптимального размера сегмента является задачей теории оптимизации.

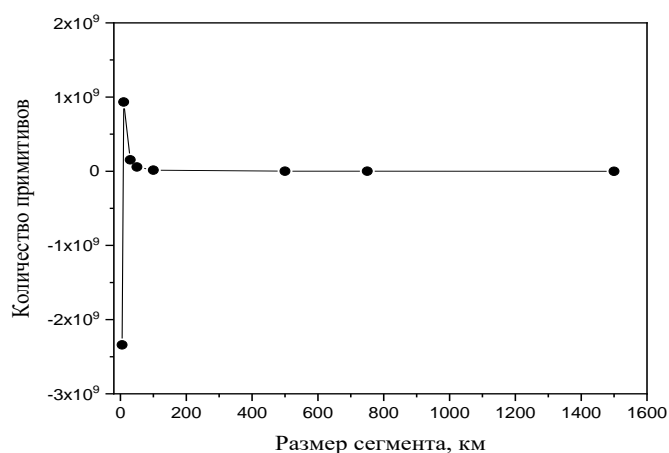


Рисунок 1– Зависимость числа примитивов от размера в сегменте первого уровня при исследовании ПА ГИ «MaxVueTM» при общем размере 3D-модели района полетов 1500×1500 км

Исходя из вышеизложенного, предложена методика описания ресурсов ПА ГИ деления 3D-модели района полетов на однотипные сегменты первого уровня оптимального размера.

В третьей главе на основании результатов исследований методики описания ресурсов ПА ГИ, позволяющей делить информационную 3D-модель района полетов на однотипные сегменты первого уровня, выбран метод оптимизации. При этом вместо числа размещаемых 3D-моделей реперных объектов в качестве одной из переменных выбрано время обработки такого сегмента. На основе оптимального размера сегмента и допустимого времени обработки рассчитывается максимальное число 3D-моделей реперных объектов. Разработанная методика распределяет ресурсы ПА ГИ и отвечает на вопрос – какой ПА ГИ может использоваться для решения задач, поставленных Заказчиком (рисунок 2).



Рисунок 2 – Методика описания ресурсов ПА ГИ, позволяющая решать задачу деления районов полетов на оптимальное число сегментов первого уровня

Сегмент нулевого уровня $S_i^{(0)}$ делится на сегменты первого уровня $S_i^{(1)}$, каждый сегмент первого уровня $S_i^{(1)}$ может делиться на сегменты второго уровня $S_i^{(2)}$, каждый из которых состоит из множества сегментов $R_{ij}^{(n)}$ и т.д.

Поскольку число сегментов первого уровня является целым, получаем задачу целочисленного программирования. Для решения этой задачи необходимо задать целевую функцию и систему ограничений (14,15). Целевая функция:

$$W = (\mathbf{c}, \mathbf{x}) \rightarrow \max_{\mathbf{x}} \quad (14)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, при этом x_1 – число активных примитивов за один такт реального времени; x_2 – время обработки примитивов в одном сегменте первого уровня, мс; x_3 – время, затраченное на выбор активных сегментов первого уровня

при полном переборе всех сегментов, мс; x_4 – размер сегмента первого уровня, км; x_5 – размер нулевого сегмента, км; $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_5)$ – вектор весовых коэффициентов.

Система ограничений $ax - b \leq 0$ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 780x_2 - x_4 \leq 0, \\ x_5 - 5.5x_4 \leq 0, \\ x_1x_3 - 11x_4 \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

На основе алгоритма Гомори была разработана программа, с помощью которой получена оценка времени на обработку примитивов в сегменте первого уровня в базе данных ПА ГИ «*MaxVueTM*» 64000. Рассчитанное время составило 65 мс.

Предлагаемая методика позволяет разработать обобщенный алгоритм деления 3D-модели района полетов на одинаковые сегменты первого уровня и найти решение задачи расчёта максимально возможного времени на обработку сегмента первого уровня. Зная время на обработку конкретного примитива, можно конструировать размещённые в нём 3D-модели реперных объектов, которые могут содержать разное число примитивов, но их суммарное время обработки не может превысить рассчитанного значения.

В четвертой главе на основании методики описания распределения ресурсов ПА ГИ приведена реализация алгоритма, предназначенного для деления 3D-модели района полетов на сегменты первого уровня (рисунок 3).

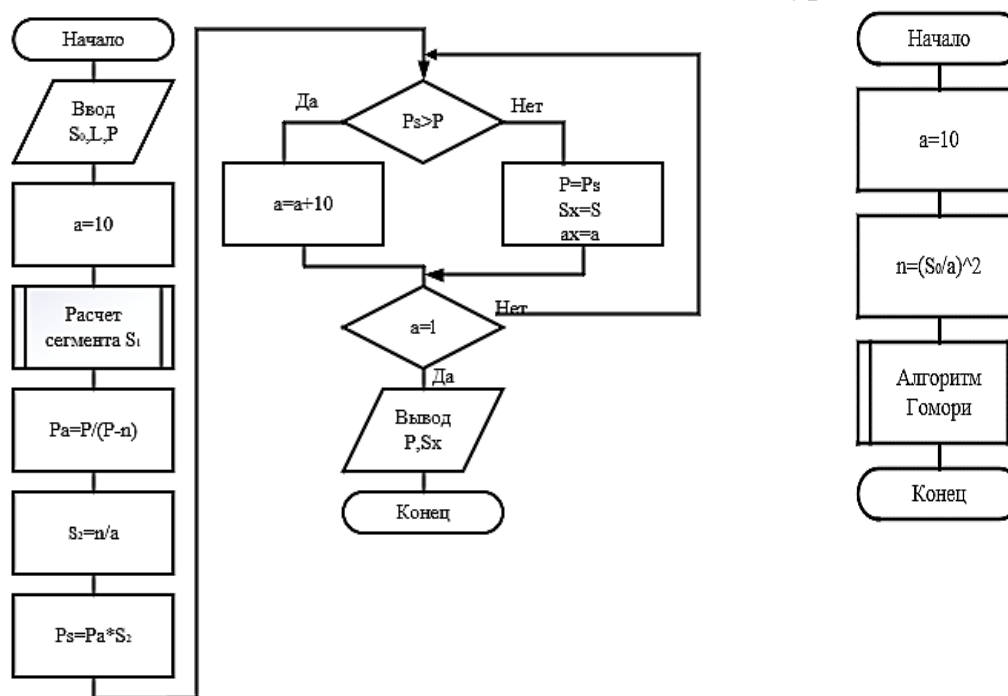


Рисунок 3 – Определение количества сегментов на первом уровне

Приведено сравнение результатов, полученных с помощью предложенной методики, с результатами, полученными с использованием известной методики,

когда конструируется район полетов 15×15 км, при вылете за который модель аппарата попадает в сплошную облачность или полет осуществляется над безориентирной местностью (рисунок 4, а, б, 5).

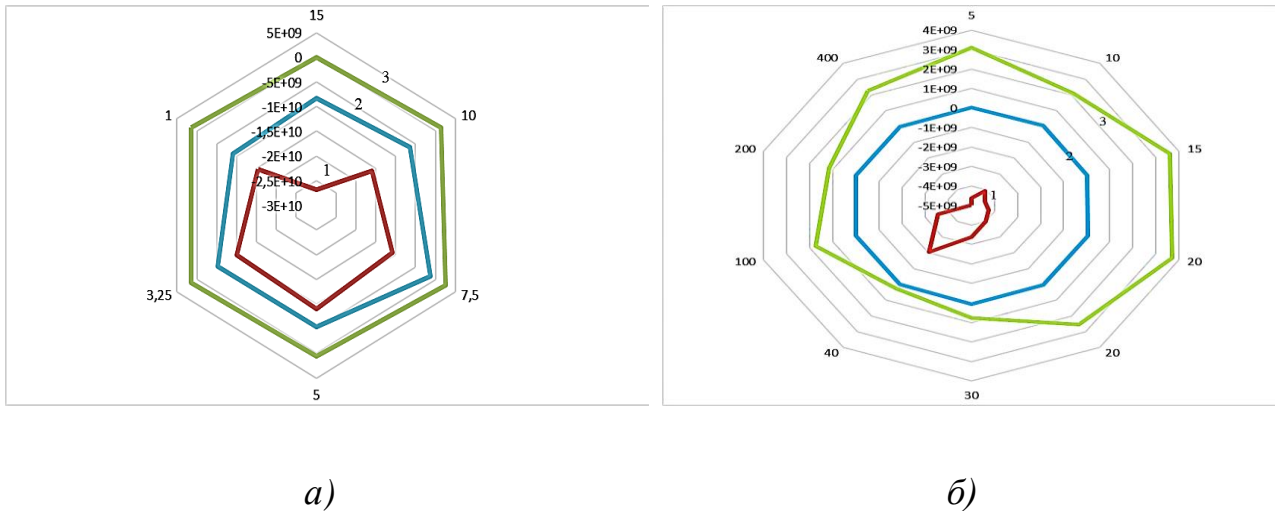


Рисунок 4 – Результаты исследования ресурсов ПА ГИ «Аксай1000» (а) и ПА ГИ «Альбатрос16000» (б) по распределению визуальных примитивов в 3D-модели района полетов: 1 – 15×15 км; 2 – 400×400 км; 3 – 1500×1500 км

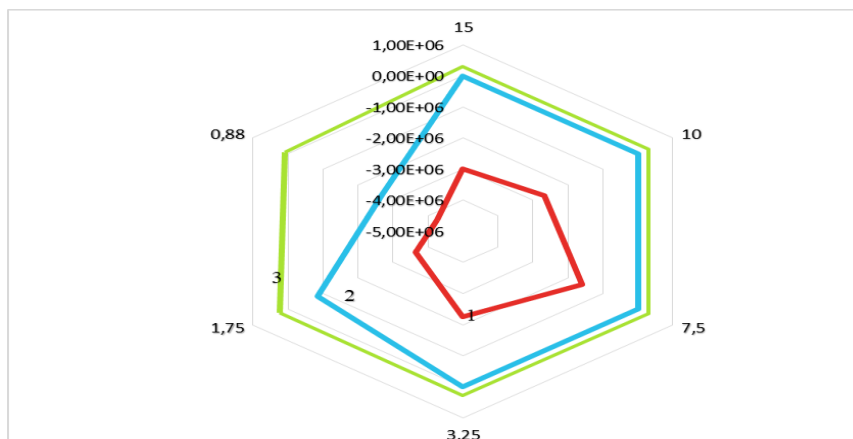


Рисунок 5 – Результаты исследования ресурсов ПА ГИ «PoligonTM» по распределению визуальных примитивов в 3D-модели района полетов: 1– 15×15 км, 2 – 400×400 км, 3 – 1500×1500 км

Исследование показало, что при использовании ПА ГИ «Аксай» для модели района полетов размером 15×15 км нет необходимости делить район на сегменты. Производительности ПА ГИ достаточно, чтобы охватить всю модель, при этом количество видимых примитивов составляет 780. При использовании ПА ГИ «Альбатрос» общее число примитивов, размещённых в модели района полетов 400×400 км, увеличивается в 7,5 раза. Использование ПА ГИ «PoligonTM» при моделировании района полетов размером 400×400 км обладает значительным преимуществом, превосходя ПА ГИ «Альбатрос» по плотности

отображаемых примитивов в 11 раз, а при моделировании района полетов размером 1500×1500 км — в 50 раз.

Таким образом, разработанная программная реализация позволяет рассчитать максимально возможное число *3D*-моделей реперных объектов, размещаемых в каждом сегменте первого уровня и на всей *3D*-модели района полетов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

При выполнении диссертационной работы проведены исследования и разработаны методы, методика и алгоритмы деления *3D*-района полетов общим размером до 1500×1500 км на сегменты первого уровня, в которых размещаются *3D*-модели реперных объектов.

Разработано актуальное научное решение для методов и алгоритмов распределения информационных ресурсов в мультипроцессорных программно-аппаратных системах. На основании этого сделаны следующие **выводы**:

1. Разработанный метод распределения информационных ресурсов ПА ГИ позволил рассчитать время обработки каждого сегмента первого уровня, на который делится *3D*-модель района полетов, и определить максимальное количество разных *3D*-моделей реперных объектов, размещаемых в рассматриваемом сегменте первого уровня.

2. Анализ возможных методов распределения ресурсов программно-аппаратных генераторов изображения, учитывающего деление *3D*-модели района полетов на сегменты первого уровня заданного размера, показал, что данные методы относятся к задачам теории оптимизации. Для решения поставленной задачи целесообразно использовать алгоритм Гомори, так как его применение позволяет оптимально распределять информационные ресурсы ПА ГИ и получать результат за минимальное время.

3. Разработанный метод формирования структуры базы данных ПА ГИ в режиме реального времени позволяет исключить сегменты первого уровня, не попадающие в область видимости пирамиды.

4. На основе метода формирования структуры базы данных ПА ГИ разработана методика расчёта ресурсов ПА ГИ, позволяющая применять методы теории оптимизации и увеличивать количество обрабатываемых примитивов в 7,5 раза для всей *3D*-модели района полетов размером не менее 400×400 км.

5. На основе методики описания распределения ресурсов ПА ГИ разработан обобщённый алгоритм, который делит *3D*-модель района полетов на сегменты первого уровня, позволяет определять их оптимальные размеры и сокращает время обработки этих сегментов на 12% по сравнению с известным аналогом.

6. Апробация программы, реализующей алгоритм Гомори, с учётом заданной производительности, размера *3D*-модели района полетов и дальности видимости позволила установить оптимальный размер сегментов модели – 10 км, а также определить, что время обработки размещённых в них примитивов составило 65 мс.

7. Результаты данной работы использованы в ходе исследований, проведенных при выполнении гранта РФФИ № 23-21-10046 (<https://rscf.ru/project/23-21-10046/>) для расчёта размеров сегментов 3D-модели района полетов. В АО «НПП «Рубин», г. Пенза для формирования оперативной 3D-обстановки в тренажерах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России

1. Кувшинова, О.А. Разработка метода распределения ресурсов по всей 3D-модели участка местности для авиационного тренажёра / О.А. Кувшинова, В.Р. Роганов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2025. № 2. – С. 125-133.

2. Кувшинова, О.А. Обобщенный алгоритм распределения ресурсов компьютерного генератора изображения по 3D-модели территории местности / О.А. Кувшинова // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2024. № 2. – С. 170-177.

3. Кувшинова, О.А. Разработка методики структуры базы данных компьютерного генератора изображения в сегменте первого уровня в 3D-модели зоны полета авиационного тренажёра / О.А. Кувшинова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 2. – С. 49-54.

4. Кувшинова, О.А. Структура баз данных компьютерных генераторов изображения, синтезирующих 3D-модель района полетов авиационного тренажёра / О.А. Кувшинова, В.Р. Роганов, М.В. Четвергова, Х.А.Х. Шамсулдин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 2. – С. 41–47.

5. Кувшинова, О.А. Особенности окрашивания 3D-моделей, синтезируемых в режиме реального времени методами машинной графики / О.А. Кувшинова, В.Р. Роганов, Н.С. Есимова, М.А.Д. Аль-Амиди // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 2. – С. 68-72.

6. Кувшинова, О.А. Структура базы данных компьютерного генератора изображения имитатора визуальной обстановки авиационного тренажёра / А.Ю. Козлов, М.А. Чиркина, О.А. Кувшинова, Н.С. Есимова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11, № 1. – С. 10-14.

7. Кувшинова, О.А. Особенности моделирования имитатора тепловизионного изображения авиационного тренажёра. / О.А. Кувшинова, В.Р. Роганов, Н.С. Есимова, И.С. Пышкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 4. – С. 54-59.

Публикации в изданиях, индексируемых WOS и Scopus

8. *The task of increasing the number of training situations as one of the areas for improving the ergatic software and hardware systems Aviation simulator / V.R. Roganov, E.A. Asmolova, N.S. Esimova, O.A. Kuvshinova, G.K. Aiderbek // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. №1061 (1). – 012014.*

9. Kuvshinova, O.A. *To Issue of Semiotic Component Visible for Pilot of Space Model Beyond Cabin of Aircraft Simulator* / O.A. Kuvshinova, V.R. Roganov, D.M. Grintsov // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2021. № (2). – P. 420–428.

10. Kuvshinova, O.A. *3D Systems That Imitate Visually Observable Objects to Train a Person's Ability to Visually Determine Distance to a Selected Object* / O.A. Kuvshinova, V.R. Roganov, N. Esimova, J. Lavendels // *Proceedings - 2019 21st International Conference; Complex Systems: Control and Modeling Problems, CSCMP*. - 2019. – P. 600–603.

11. *Flight simulator information support* / V.R. Roganov, E.V. Roganova, M.J. Mischeev, O.A. Kuvshinova, S.M. Gushchin // *Defence S and T Technical Bulletin*. – 2018. № 11(1). – P. 90–98.

Публикации в прочих изданиях

12. Кувшинова, О.А. Особенности имитаторов авиационного тренажёра, синтезирующих для летчика 3D-модели окружающего пространства в разном диапазоне световых волн / В.Р. Роганов, О.А. Кувшинова, А.Л. Ахмед, Х. Абдуалвахаб // Труды международного симпозиума "Надежность и Качество". – 2023. – Т. 2. – С. 75-78.

13. Программно-аппаратные системы машинного синтеза изображений для авиационных тренажёров / О.А. Кувшинова, М.Ю. Михеев, В.Р. Роганов, Е.А. Асмолова, Н.С. Есимова, Б.С. Долговесов // *Радиоэлектроника*. – 2023.–№11

14. Кувшинова, О.А. Обобщенные характеристики имитатора визуальной обстановки для информационной модели авиационных тренажёров на показатели работы транспортной системы в целом / О.А. Кувшинова, Е.В. Кувшинова // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. – 2023. – №4. – С. 179-185.

15. Кувшинова, О.А. К задаче разработки текстур для окрашивания 3D-полигонов 3D-моделей виртуального пространства для авиационного тренажёра или тренажёра подготовки оператора беспилотного летательного аппарата / О.А. Кувшинова, Е.А. Асмолова, Н.С. Есимова, М.С. Хитрых // III Международная научно-практическая конференция «Цифровизация агропромышленного комплекса» (Тамбов, 25–27 октября 2022 г.) – Тамбов. – 2022. Т.1. – С. 522-524.

16. Кувшинова, О.А. Особенности моделирования района полетов для имитаторов визуальной обстановки тренажеров операторов беспилотных аппаратов / О.А. Кувшинова, В.Р. Роганов // III Международная научно-практическая конференция «Цифровизация агропромышленного комплекса» – Тамбов. – 2022.Т.1. – С. 528-530.

17. Кувшинова, О.А. Применение имитатора визуальной обстановки в автотренажёрах / О.А. Кувшинова, Н.С. Есимова // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. – 2022. – № 1. – С. 140-148.

18. Кувшинова, О.А. Применение размытия для сцен визуализаций в графике / Кувшинова О.А. // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник статей XXIV Международной научно-технической конференции. – Пенза. – 2020. – С. 57-60.

19. Кувшинова, О.А. К вопросу о семиотической составляющей видимой для летчика модели пространства за кабиной авиационного тренажёра / В.Р. Роганов, О.А. Кувшинова, Д.М. Гринцов // ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ: труды VI Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск. – 2020. – С. 63-67.

20. Кувшинова, О.А. Некоторые оценки эффективности машинного синтеза изображений местности, влияющие на процесс обучения при использовании тренажёров водителей транспортных средств / О.А. Кувшинова, Л.А. Найниш, Э.В. Роганова, Е.Н. Мещерякова // Современные информационные технологии. – 2017. № 26. – С. 129-138.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

21. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс для расчета сегментов модели района полета / Кувшинова О.А., Роганов В.Р., Гвоздева И.Г.; Пензенский государственный технологический университет. – № 2023685349; зарег. 27.11.2023.

22. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Программный модуль для вычисления размера сегмента первого уровня модели района полета / Кувшинова О.А., Роганов В.Р., Четвергова М.В., Асмолова Е.А., Есимова Н.С.; Пензенский государственный технологический университет. – №2024618538; зарег.12.04.2024.

Кувшинова Ольга Александровна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ
РЕСУРСОВ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 2026 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,2

Тираж 100.

Пензенский государственный технологический университет
440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д.1а/11