

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ В ЦЕЛОМ ПО МЕТОДОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА В ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

DEVELOPMENT OF VISUALIZATION SUPPORT TOOLS FOR HOLISTIC MODEL REPRESENTATION BASED ON THE METHODOLOGY OF AUTOMATION OF INTELLECTUAL LABOR IN AN INTEGRATED DESIGN ENVIRONMENT

M. Glinkin

Summary. The article presents the implementation of a software module for supporting the visualization of holistic models of automated systems, developed in accordance with the Methodology of Automation of Intellectual Labor (MAIL), within an integrated visual design environment. The aim of the study is to increase the efficiency of system modeling by creating a comprehensive and visually clear three-dimensional representation that ensures structural readability and cognitive accessibility. Research method: systems approach. The study considers the structural components of MAIL-based models and addresses key aspects of high-quality diagram visualization, including accuracy, legibility, and consistency of scene elements. As a result, tools were developed to support the generation of three-dimensional representations of holistic models based on MAIL, which helped reduce the time required for their analysis and verification.

Keywords: Methodology of Automation of Intellectual Labor, modeling of automated systems, conceptual modeling, graphical notation, three-dimensional visualization.

Глинкин Максим Олегович

аспирант, Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
maximglin05@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена реализация программного модуля поддержки визуального представления моделей автоматизированных систем в целом, формируемых по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в составе визуальной интегрированной среды проектирования. Целью исследования является повышение эффективности моделирования за счёт создания целостного и наглядного трёхмерного образа модели, обеспечивающего её структурную читаемость и когнитивную доступность. Методы исследования: системный подход. В исследовании рассмотрены структурные компоненты моделей по МАИТ, а также аспекты обеспечения качественной визуализации диаграмм, включая точность, читаемость и согласованность элементов сцены. В результате разработаны средства поддержки формирования трёхмерного представления моделей в целом по МАИТ, что позволило сократить затраты времени на их анализ и проверку.

Ключевые слова: методология автоматизации интеллектуального труда, моделирование автоматизированных систем, концептуальное моделирование, графическая нотация, трёхмерная визуализация.

Развитие методов проектирования автоматизированных систем (АС) сопровождается возрастающей потребностью в формализованных подходах к представлению, анализу и согласованию моделей, разрабатываемых на ранних этапах жизненного цикла. Наибольшую значимость в этом контексте приобретают начальный и концептуальный этапы моделирования, где формируется обобщённое представление об объекте проектирования, определяются ключевые функции, информационные потоки и связи между элементами будущей системы.

В качестве методологической основы для описания моделей АС в данной работе используется методология

автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), зарекомендовавшая себя как универсальный подход к формализации знаний о предметной области и действиях, производимых в ней. МАИТ предполагает представление модели в виде совокупности взаимосвязанных статических и динамических структур, дополненных формализованными отношениями между ними. Такая структура обеспечивает высокую степень выразительности и позволяет проводить дальнейшую трансформацию моделей, анализ их согласованности и верификацию.

Однако практическое применение моделей, формируемых по МАИТ, требует адекватных инструментов поддержки [1] — как с точки зрения технической реализа-

ции, так и в аспекте визуального восприятия. Учитывая многокомпонентную природу моделей и их иерархическую организацию, важно обеспечить визуализацию, позволяющую охватить всю модель в целом, отразить взаимосвязи между уровнями и минимизировать когнитивную нагрузку на пользователя.

В данной статье рассматривается разработка и реализация средств поддержки визуализации моделей автоматизированных систем в составе визуальной интегрированной среды проектирования. Основное внимание уделяется архитектуре программного решения, особенностям представления моделей по МАИТ в виде трёхмерных диаграмм, а также вопросам интеграции и использования разработанного модуля в рамках уже существующей среды проектирования «ИС-2». Целью работы является повышение эффективности моделирования за счёт создания целостного, согласованного и когнитивно-доступного визуального образа модели на базе методологии МАИТ.

Модели автоматизированных систем, формируемые в соответствии с методологией автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), представляют собой совокупность иерархически организованных структур. В рамках данной методологии выделяются две ключевые составляющие:

- динамическая структура, описывающая систему предметных действий и зависимостей;
- статическая структура, представляющая предметные категории и их взаимосвязи.

Кроме того, существенную роль играют отношения между этими структурами, отражающие зависимости между действиями и используемой или изменяемой информацией. Формальная организация этих компонентов позволяет описывать поведение и состояние проектируемой системы в терминах процессов, объектов и логических связей, поддающихся последующей трансформации и анализу [2].

Для эффективного применения моделей по МАИТ на практике требуется визуальное представление, обеспечивающее:

- соответствие визуальных элементов структурам модели и их семантике;
- наглядное отображение взаимосвязей между элементами разных структур;
- возможность восприятия модели как целостного объекта анализа.

В условиях высокой сложности создаваемых моделей двумерные диаграммы оказываются ограниченными в плане отображения взаимосвязей между компонентами и уровней вложенности. Это затрудняет системный анализ и проверку согласованности модели.

В связи с этим возникает необходимость построения трёхмерного визуального представления модели, в котором каждая из структур (статическая, динамическая, связующая) отображается в отдельной координатной плоскости, а связи между ними реализуются в пространственном контексте.

Таким образом, формализация задачи сводится к построению согласованной визуальной сцены, в которой все элементы модели, сформированной по МАИТ, представлены в трёхмерном виде с сохранением структурной и семантической целостности. При этом задача включает определение правил отображения компонентов, алгоритмов их позиционирования и визуальных связей, которые были описаны в предыдущих статьях [3, 4], а также методов интеграции полученного представления в существующую проектную среду.

В соответствии с поставленной задачей была разработана программная реализация средств поддержки визуализации моделей, формируемых по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в составе интегрированной среды проектирования. Архитектура решения построена по модульному принципу, что обеспечивает независимость визуализатора от внутренних механизмов базовой среды и упрощает расширение или повторное использование компонентов (см. рис. 1).

Программная реализация включает два ключевых компонента:

- модуль среды «ИС-2», предназначенный для формирования модели на основе пользовательского ввода в терминах МАИТ;
- визуализатор, реализующий отображение модели в трёхмерном графическом виде.

Основные функции визуализатора включают:

- отображение динамической структуры модели в виде ориентированного графа действий/зависимостей;
- отображение статической структуры как отдельной иерархии предметных категорий;
- построение межструктурных связей, связывающих действия с соответствующими информационными элементами;
- реализацию пользовательского взаимодействия: масштабирование, поворот сцены, выбор элементов, отображение меток и значков взаимосвязей.

Расположение компонентов на трёхмерной сцене реализуется согласно ранее разработанным алгоритмам [3, 4]. Каждая структура отображается в собственной координатной плоскости, при этом сохраняется визуальная целостность за счёт правил привязки и автоматического позиционирования. Использование единого формата передачи модели позволяет легко синхронизировать

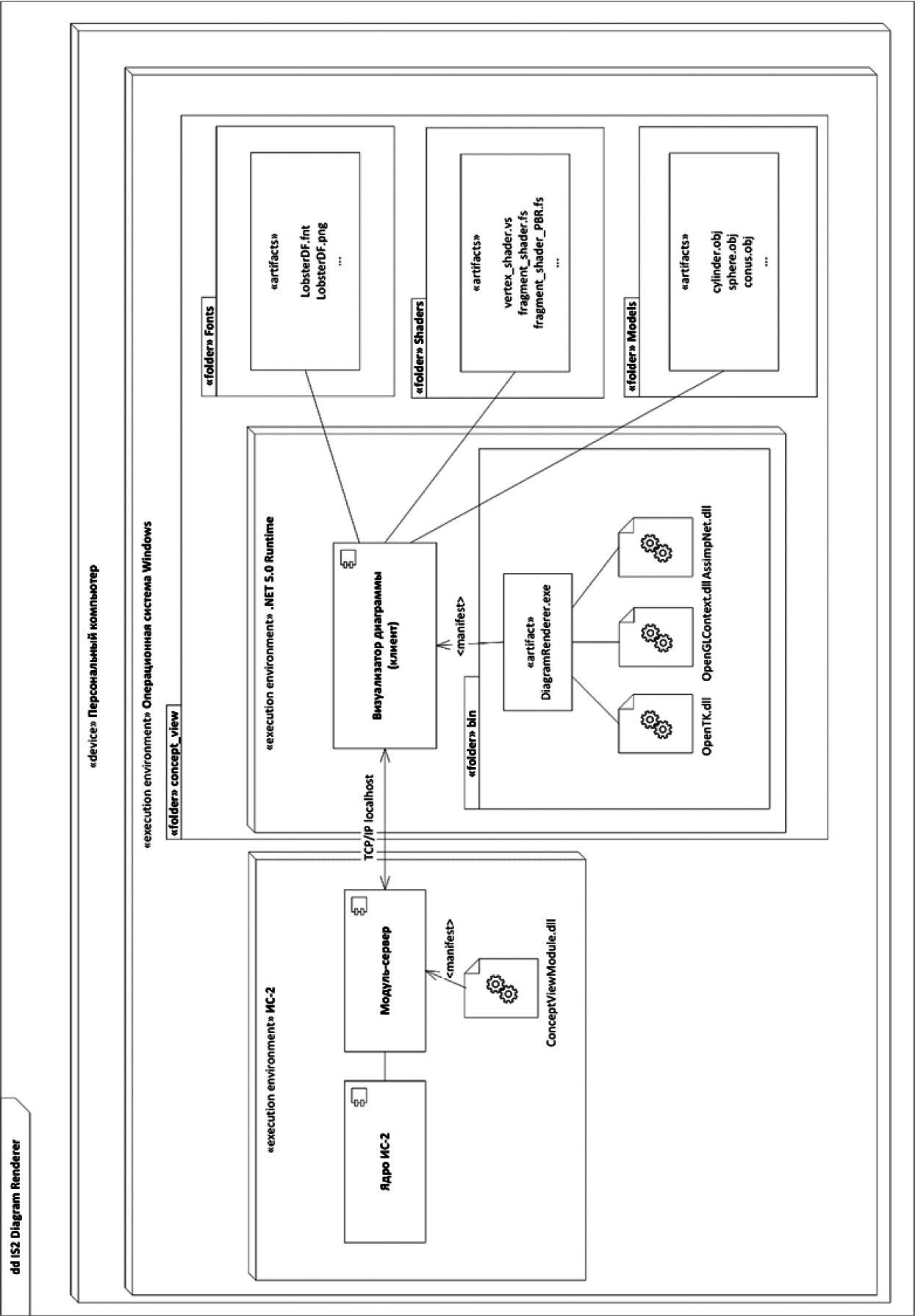


Рис. 1. Диаграмма развертывания модуля для визуализации представления

состояние модели между основным модулем и визуализатором.

Таким образом, реализованное решение позволяет использовать результаты формализованного моделирования по МАИТ в практической работе проектировщика, обеспечивая визуальное подкрепление формальных структур, повышение наглядности и поддержку анализа на этапе построения и согласования моделей.

Для обеспечения соответствия визуального представления формальной структуре моделей по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), при разработке визуализирующего компонента были реализованы ряд специализированных технических решений. Эти решения направлены не только на повышение визуального качества трёхмерной сцены, но и на обеспечение читаемости и когнитивной доступности отображаемых моделей — критически важного аспекта в процессе системного анализа проектируемых автоматизированных систем.

Первым аспектом, критически важным для читаемости визуализируемой диаграммы является визуализация шрифтов и текста. Однако, конвейер рендеринга трёхмерной графики не предназначен для обработки векторных изображений в качестве текстур. Поэтому получать информацию о шрифтах и фигурах необходимо также из растровых изображений.

Также стоит отметить, что аффинные преобразования в виду интерактивной работы камеры при использовании модуля, производятся уже после отрисовки текста на блоках диаграммы, что дополнительно усложняет их четкую и качественную отрисовку. При большом увеличении или недостаточном разрешении текстуры с растровым шрифтом, на визуализируемых символах отчетливо заметен алиасинг и размытость контура (см. рис. 2).

Алиасинг можно устранить использованием альфа-тестирования — не выводить пиксель, если он обладает прозрачностью более установленного уровня, но это также приводит к нежелательному эффекту неровности контура символов (см. рис. 2).

Подходящим для такого сценария визуализации является представление шрифтов в виде знаковых полей расстояния (signed distance fields, SDF). В таком случае значение цвета пикселя представляют не фактический цвет, а расстояние до ближайшего контура фигуры с положительным значением снаружи контура и отрицательными внутри.

Определение цвета по порогу расстояния позволяет сгенерировать четкую двухмерную форму без размытия или алиасинга на контурах. Таким образом могут быть представлены детали не меньшие, чем один тексель. При этом границу между фигурой и фоном можно сделать бесконечно резкой, а поскольку значения выбранных текселей меняются плавно и в большинстве точек могут быть аппроксимированы как линейные изменения, выборка будет вести себя хорошо как при увеличении, так и при уменьшении изображения с использованием обычной билинейной интерполяции. Также стоит отметить, что для достижения схожего качества при визуализации, разрешение текстуры, в которой хранятся расстояния, может быть в несколько раз меньше обычной текстуры с растриванным векторным изображением, что положительно сказывается на объеме используемой памяти [5].

Решить проблему искажения текста при позиционировании блоков в пространстве позволяет его обработка и хранение в виде знаковых полей расстояния до самого последнего этапа растеризации трёхмерной сцены, когда все преобразования уже были применены. Вычислить необходимый параметр *width*, который определяет положение границы фигуры при преобразовании SDF в растр, позволяет модуль градиента яркости (*distance* — значение SDF в текущей точке), что удобно в реализации, так как шейдерные программы позволяют использовать функции $dFdx$, $dFdy$, хотя и конкретные значения соседних фрагментов изображения еще неизвестны:

$$width = |\mathbf{grad}(\mathit{distance})| = \sqrt{\frac{\partial F^2}{\partial x} + \frac{\partial F^2}{\partial y}}.$$

На основании данного параметра и некоторого константного значения *threshold*, с использованием эр-



Рис. 2. Отрицательные эффекты размытости и неровности контуров

митовой интерполяции (*smoothstep*), текст может быть преобразован из представления в виде знаковых полей расстояния в растровый вид, где граница фигуры будет ровной и четкой [6]:

$$\text{color} = \text{smoothstep} \left(\begin{matrix} \text{threshold} - \text{width}, \\ \text{threshold} + \text{width}, \text{distance} \end{matrix} \right)$$

Это позволяет добиться качественной визуализации текста вне зависимости от режима просмотра диаграммы и позиции блоков на ней (см. рис. 3).



Рис. 3. Конечный результат визуализации текста, позволяющий сохранить четкость при преобразованиях в пространстве

Другой задачей, критически влияющей на качество изображения, является устранение так называемой «зубчатости» (эффекта алиасинга) на границах объектов. Для достижения высокого визуального качества и гибкости визуализатора в рамках реализованного решения были предусмотрены несколько независимых методов сглаживания.

Наиболее универсальный, но ресурсоёмкий метод — SSAA (Supersample Anti-Aliasing). В его основе лежит отрисовка сцены в буфере увеличенного разрешения с последующим масштабированием результата до стандартного размера. Это позволяет значительно уменьшить искажения на границах объектов за счёт интерполяции цветов пикселей.

Более производительный и широко применяемый метод — MSAA (Multisample Anti-Aliasing). В данной схеме каждый пиксель сцены содержит несколько точек выборки, что позволяет точно учитывать пересечение геометрии с границами пиксельной сетки. При этом отрисовка примитивов в сцене корректно суммирует вклад от всех подвыборок, что даёт хороший эффект сглаживания без увеличения разрешения.

В случаях, когда производительность системы ограничена, предлагается использовать FXAA (Fast Approximate Anti-Aliasing) — алгоритм постобработки, реализуемый в виде фрагментного шейдера, который анализирует уже готовое изображение и выполняет сглаживание на основе оценки контуров. Он не требует изменения графического конвейера или создания специальных буферов, при этом обеспечивает приемлемое

качество без существенных затрат ресурсов.

Все перечисленные методы были реализованы в составе визуализатора как взаимозаменяемые опции. Это позволяет адаптировать уровень визуального качества под конкретную конфигурацию системы, при этом обеспечивая гарантированную читаемость и чёткость диаграммы — ключевой фактор в задаче анализа и интерпретации моделей по МАИТ. На рисунке 4 представлено наглядное сравнение результатов визуализации без сглаживания и с применением MSAA 4x, демонстрирующее существенное улучшение качества визуализации.

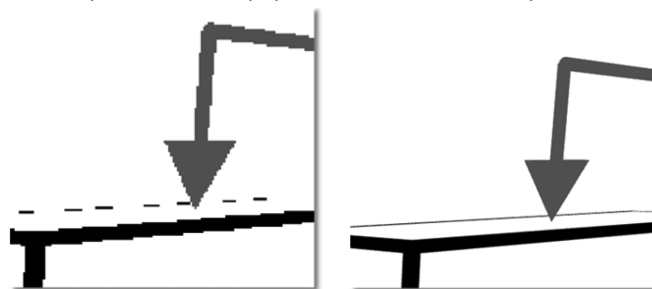


Рис. 4. Отключенное сглаживание (слева) и MSAA 4x (справа)

Для реализации интерактивного взаимодействия пользователя с элементами трёхмерной диаграммы в визуализаторе была применена методика идентификации объектов через буфер уникальных цветов (*color picking*). Каждый элемент модели при вспомогательном проходе рисуется в отдельный offscreen-буфер, где ему сопоставляется уникальный цвет-код, недоступный для визуального отображения. При клике пользователя по сцене координаты пикселя экрана преобразуются в координаты буфера, и по цвету извлекается идентификатор соответствующего объекта модели. Такой подход обеспечивает точное и производительно эффективное определение выбранного элемента, вне зависимости от масштаба, перспективных искажений и наложения объектов.

Для обеспечения устойчивой и отзывчивой работы визуализатора, особенно при обработке сложных моделей с большим числом структурных элементов, была реализована асинхронная архитектура исполнения операций. Основной принцип подхода — разделение логики построения сцены и процесса её отрисовки на независимые потоки исполнения, работающие параллельно. Это позволило исключить блокировки пользовательского интерфейса и обеспечить непрерывную интеракцию со сценой — вращение, масштабирование и выбор объектов возможны даже в процессе генерации геометрии.

Ключевые операции — чтение входных данных, разбор модели, построение графов, генерация координат и буферизация вершин — выполняются в отдельных задачах, инициируемых по мере поступления команды

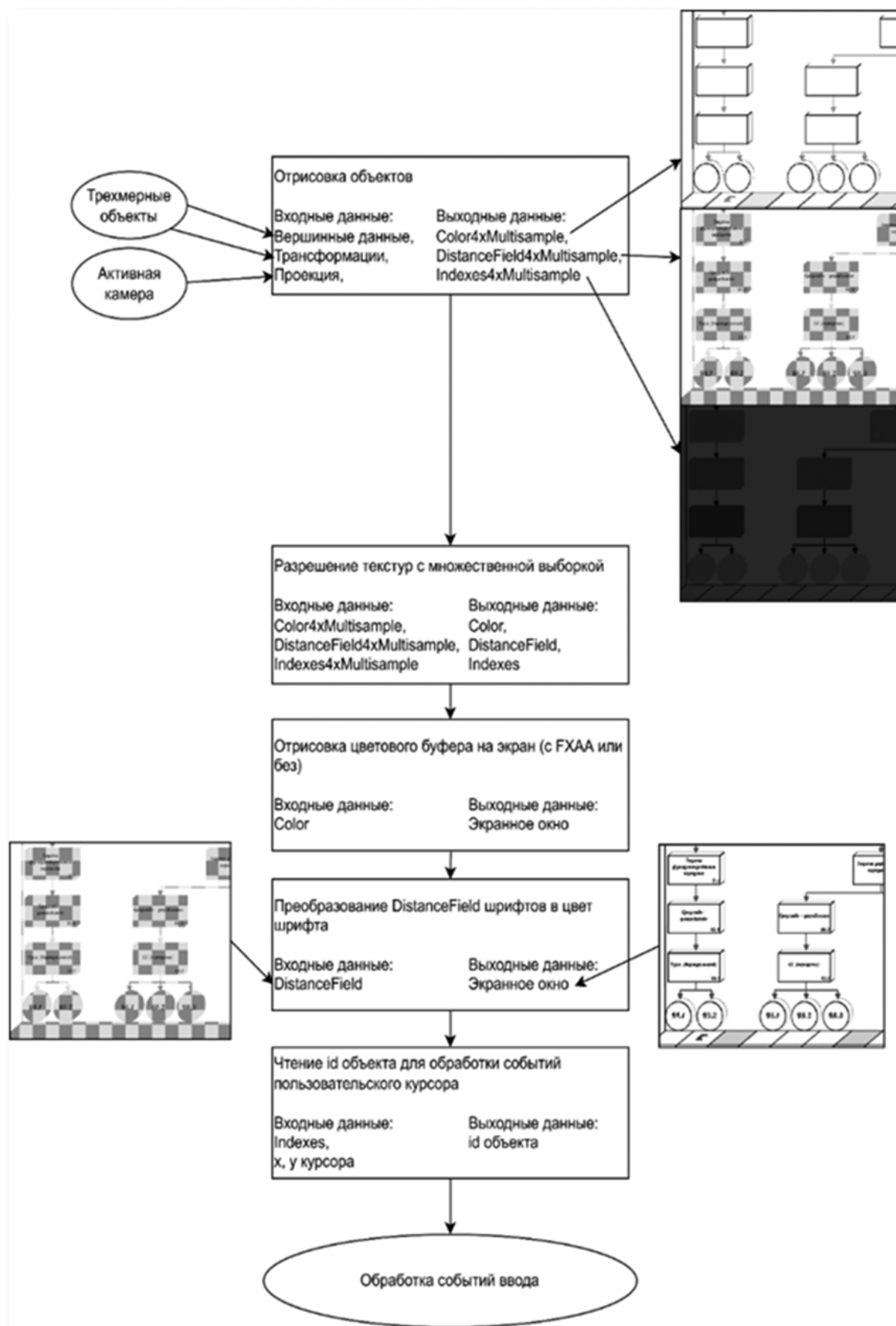


Рис. 5. Общий вид графического конвейера

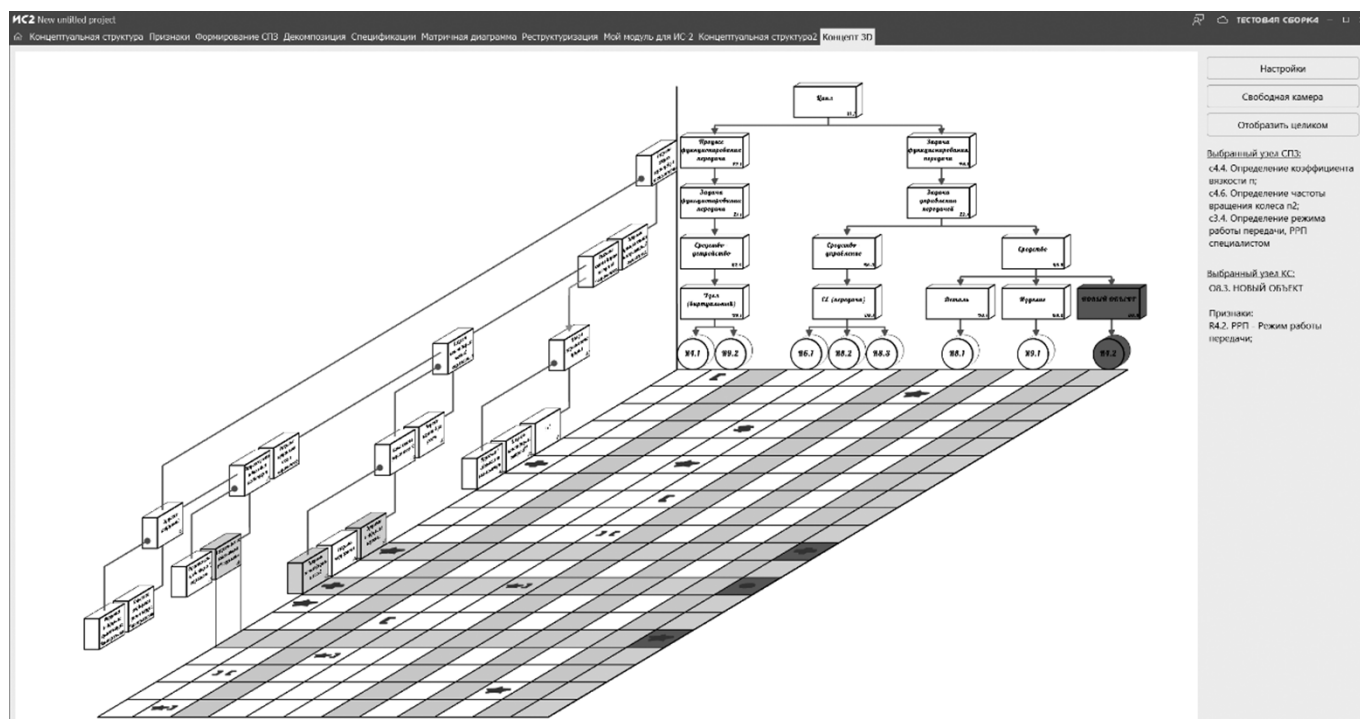


Рис. 6. Разработанный программный модуль для визуализации моделей в целом по МАИТ в рамках интегрированной среды «ИС-2»

от управляющего модуля. Основной графический поток занимается исключительно отрисовкой содержимого буфера кадра, не ожидая завершения тяжёлых вычислительных операций. Благодаря такому разделению достигается гибкость масштабирования: крупные модели визуализируются пошагово, с постепенным появлением фрагментов сцены, что повышает субъективную плавность восприятия.

В общем виде, графический конвейер, реализующий визуализацию сцены с трёхмерным представлением модели в целом, включает несколько последовательных этапов. Сначала объекты диаграммы отрисовываются во вспомогательный буфер с поддержкой множественной выборки (MSAA), содержащий несколько текстурных прикреплений: для цветовой информации, шрифтов в формате distance fields и целочисленного массива идентификаторов объектов для трёхмерного выбора. После этого содержимое буфера разрешается в текстуры стандартного разрешения (см. рис. 5).

Затем в экранный буфер выводится цветовая информация объектов диаграммы, а шрифты преобразуются из SDF-представления в обычное цветовое изображение и накладываются поверх сцены. После завершения визуализации осуществляется выборка идентификатора объекта из текстуры с индексами в соответствии с координатами курсора, что обеспечивает корректную обработку пользовательского ввода.

Таким образом был реализован полнофункциональный программный модуль, интегрированный в состав визуальной среды «ИС-2». Он обеспечивает автоматическое построение трёхмерного графического представления модели в целом по МАИТ, отображение всех структурных компонентов, поддержку пользовательского взаимодействия и визуальный анализ модели. На рисунке представлена итоговая сцена, сформированная с помощью разработанного модуля, демонстрирующая интеграцию статической, динамической составляющих и их взаимосвязей в едином пространстве визуализации (см. рис. 6).

Разработанное в рамках работы программное средство, а именно модуль для визуализации представления моделей в целом для визуальной интегрированной среды «ИС-2», было использовано в учебном процессе кафедры информационных технологий и вычислительных систем (ИТиВС) ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при выполнении задач в рамках подготовки бакалавров и магистров. Это позволило сократить время, затрачиваемое на анализ модели автоматизированной системы в среде визуального проектирования «ИС-2», иначе говоря, использование разработанного программного модуля предоставляет возможность повысить эффективность (сократить время, улучшить качество) проверки модели АС для когнитолога или проектировщика автоматизированных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов А.Г. Разработка метода моделирования и средств поддержки управления развитием визуальной интегрированной среды проектирования автоматизированных систем: дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Гаврилов. — Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2022. — 224 с.
2. Волкова Г.Д. Теория и практика автоматизации интеллектуального труда. / Волкова Г.Д. — М.: Янус-К, 2020. — 104 с. — ISBN 978-5-8037-0805-6
3. Глинкин М.О. Разработка графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 5(113). — С. 756–770. — EDN JRTMXG.
4. Глинкин М.О. Формальное описание графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 6–2. — С. 92–96. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.6-2.12. — EDN SQWXJC.
5. Густавсон С. Отображение двумерных форм с помощью полей расстояний / С. Густавсон // OpenGL Insights (Опыт сообщества OpenGL, OpenGL ES и WebGL). — 2012. — С. 173–182.
6. Грин К. Улучшенное масштабирование векторных текстур с альфа-тестированием для спецэффектов / К. Грин // Курс SIGGRAPH по продвинутой визуализации в реальном времени в 3D-графике и играх. — 2007. — С. 9–16. — DOI: 10.1145/1281500.1281665.

© Глинкин Максим Олегович (maximglin05@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»