

На правах рукописи



Казakov Вадим Вячеславович

**Программно-алгоритмический анализ защищенности
электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц**

Специальность 2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель:

Зинченко Людмила Анатольевна - доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Беляев Андрей Александрович - доктор технических наук, акционерное общество Научно-производственный центр «Электронные вычислительно-информационные системы» (АО НПЦ «ЭЛВИС»), начальник лаборатории отдела проектирования систем на кристалле.

Фомина Марина Владимировна - кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»), доцент кафедры Вычислительных технологий

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «14» марта 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская, дом 5, стр.1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.14.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г

Ученый секретарь
диссертационного совета

Игорь Валентинович Муратов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В рамках федеральной космической программы России на 2016–2025 годы планируется дальнейшая разработка перспективных космических комплексов и систем. При разработке электронной аппаратуры для применения в космическом пространстве необходима защита аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Перспективным направлением исследований является разработка новых методов проектирования и анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. Экранирование в сравнении со схемотехническим и программным методам защиты электронной аппаратуры является простым и дешевым в реализации. Многослойные экраны защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц могут быть использованы для защиты различных электронных устройств с целью повышения надежности их функционирования, а также использованы в комбинированных методах защиты электронной аппаратуры.

Значительный вклад в развитие направления проектирования электронной аппаратуры для специальных приложений внесли авторы, такие как Шахнов В.А., Першенков В.С., Жуков А.А., Петросянц К.О., Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л., Чумаков А.И. и др. Авторы исследовали подходы к проектированию радиационно-стойкой элементной базы, схемотехнического проектирования радиационно-стойкой электронной аппаратуры, а также предложили ряд методик оценки радиационной стойкости схемотехнических изделий и специализированные процессы производства.

При проектировании многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц эксперту необходимо решать сложные многокритериальные задачи синтеза.

Для повышения эффективности проектирования экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц перспективным является применение когнитивно-графической визуализации многомерных данных. При таком подходе человеко-машинное взаимодействие строится на базе образного представления больших объемов информации исследуемых объектов. Значительный вклад в развитие методов когнитивно-графической визуализации информации внесен отечественными исследователями. К ним следует отнести Д.А. Пospelova, А.А. Зенкина, В.Н. Вагина, А.П. Еремеева, А.А. Башлыкова, В.Г. Гришина, А.Ю. Зиновьева, М.Н. Бурдаева, В.Л. Горохова и др. Среди зарубежных исследований можно отметить работы R.M. Axelrod, F. Fischer, H. Janetzko, D.E. Kieras, H. Song, T. Höllt и др. Также важным направлением исследования является проектирование интерфейсов с учетом особенностей восприятия целевыми пользователями, которыми занимались J. Raskin, A. Cooper, J. Nielsen, С.В. Жарков, В.В. Головач, С.Ф. Сергеев и др.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что актуальным является проведение комплексного исследования в области применения методов когнитивно-графической визуализации параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц и создание на этой основе

алгоритмического и программного обеспечения.

Целью исследования является разработка алгоритмов проектирования многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц с представлением многомерных данных средствами когнитивно-графической визуализации и их программная реализация.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **задачи**:

1. Проведение анализа характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

2. Разработка и исследование формализованной модели представления параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения с когнитивными элементами для анализа характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для решения задачи автоматизированной оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры.

5. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для когнитивно-графической визуализации информации и автоматизированного расчета характеристик углеродных нанотрубок для повышения радиационной стойкости композитных слоев экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, содержащих углеродные нанотрубки.

6. Разработка алгоритмов и программного обеспечения с элементами дополненной реальности для оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры.

7. Разработка и исследование методики оценки систем с элементами когнитивных представлений на основе нечетких когнитивных карт для разработанного программного обеспечения.

Объектом исследования являются методы применения когнитивно-графической визуализации информации, процессов обработки, отображения и анализа характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц для повышения надежности функционирования электронной аппаратуры при их использовании.

Предметом исследования являются алгоритмы автоматизированного расчета характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, а также алгоритмы формирования когнитивно-графических образов.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 12 паспорта специальности 2.3.1 "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)": "Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации".

Методологическая база исследований. Для решения поставленных задач используются методы когнитивной графики, имитационного моделирования, аналитической геометрии и алгебры, а также численные методы моделирования.

Научная новизна. Научная новизна заключается в разработке методов построения когнитивно-графических образов в составе интеллектуальных интерфейсов, а также методов их оценки с применением нечетких когнитивных карт, в том числе:

- методы и связанные с методами алгоритмы преобразования данных для когнитивно-графической визуализации многомерной информации;
- комплекс новых когнитивно-графических образов для визуализации свойств многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований методов и методы когнитивно-графической визуализации показателей элементов повышения радиационной стойкости электронной аппаратуры;
- модель классификации когнитивно-графической визуализации показателей элементов повышения радиационной стойкости электронной аппаратуры;
- алгоритмы преобразования данных для когнитивно-графической визуализации информации о методах повышения надежности электронного оборудования в условиях специальных воздействий;
- метод и модель оценки качества когнитивно-графических образов с применением нечетких когнитивных карт с целью анализа методов повышения надежности электронного оборудования в условиях специальных воздействий.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается корректным использованием методов обработки информационных процессов и структур, построения моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения, алгоритмов принятия решений на основе анализа альтернативных проектных решений, формализованных моделей представления знаний в вычислительных системах. Полученные результаты согласуются с выводами, сформулированными в научных работах других авторов по применению подходов к принятию решений по защите электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Теоретическая значимость заключается в разработке теоретических положений для проектирования когнитивно-графических образов для анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, их классификации и оценки.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные когнитивно-графические образы для анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц позволяют улучшить эргономические качества веб-интерфейсов для использования на предприятиях космической отрасли и повысить эффективность работы лица, принимающего решение. Основными достоинствами разработанных методов графической поддержки являются: наглядность интерпретации и сравнения альтернативных проектных решений; возможность автоматического определения состояний объектов по многомерным параметрам на всех уровнях проектирования многослойного экрана защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. Практическая значимость подтверждается результатами

использования разработанных программных средств при выполнении грантов РФФИ 15-29-01115, 16-06-00404, 18-29-18043 и в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана, актом об использовании от 29.03.2022 № А Т0039/014-2022 ФГУП «ВНИИА» и актом об использовании от 04.04.2022 № А1-04/22 ООО «КТЕ Лэбс».

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Апробация работы. Результаты работы прошли апробацию на следующих Всероссийских и международных конференциях: BICA 2016 the 7th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures. The 7th Annual Meeting of the BICA Society, июль 16-19, 2016, г. Нью-Йорк, США, BICA 2017 the 8th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures. The 8th Annual Meeting of the BICA Society, 1-6 августа 2017, г. Москва, Российская Федерация, XII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ-2017), 5-7 июля 2017, г. Суздаль, Российская Федерация, XIX международная конференция «Научоемкие технологии и интеллектуальные системы – 2017», 19 апреля 2017, г. Москва, Российская Федерация, XX международная конференция «Научоемкие технологии и интеллектуальные системы – 2018», 25 апреля, 2018, г. Москва, Российская Федерация, III Международная конференция «Modern problems in the physics of surfaces and nanostructures», 8-11 октября 2017, г. Ярославль, Российская Федерация, IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino 2018), 23-26 октября 2018, г. Москва, Российская Федерация, XXIII Международный симпозиум "Надежность и качество", 21-31 мая 2018, г. Пенза, Российская Федерация, III Международной научной конференции «Intelligent Information Technologies for Industry» (ИТИ'18), 17-21 мая 2017, г. Сочи, Российская Федерация, 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23-29 ноября 2020, г. Москва, Российская Федерация, а также результаты работы были представлены на ряде других Всероссийских и международных конференций.

Публикации. Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 21 печатных работах, 6 из которых опубликованы в изданиях, включенных в международные базы цитирования, и 5 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы и приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу существующих методов защиты электронной аппаратуры от специальных воздействий. Проведен обзор методов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц в космическом пространстве. Дан обзор математического аппарата, лежащего в основе расчета характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Проведен обзор методов повышения радиационной стойкости материалов с содержанием углеродных нанотрубок. Проведен обзор математического аппарата,

лежащего в основе расчета характеристик и свойств углеродных нанотрубок для повышения стойкости композитных слоев радиационной защиты.

В работе проанализировано программное обеспечение для моделирования поведения тяжелых заряженных частиц в материалах SRIM для задачи анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. Описаны достоинства и недостатки текущих программных решений и сделан вывод о том, что в текущей реализации программного обеспечения процесс расчета большого количества проектных решений невозможен и требуется разработка системы, позволяющей реализовать этот процесс в простой и понятной для исследователя форме. Для разработки программного обеспечения рассмотрено применение когнитивных подходов в задаче поиска проектных решений. Проведен анализ некоторых существенных когнитивных искажений восприятия информации и их влияния на итоговое принятие решения, в связи с чем обосновывается использование когнитивных технологий при создании визуализаций для визуального поиска новых, полезных и интерпретируемых знаний.

Во второй главе вводится классификация когнитивных графических отображений, которые делятся на отображения с управляемым и неуправляемым когнитивным эффектом, сильным и слабым когнитивным эффектом. Под управляемым когнитивным эффектом понимается такой эффект, которым можно управлять по понятному алгоритму для достижения генерации нового знания. Для неуправляемого, соответственно, такого алгоритма нет. Под сильным когнитивным эффектом понимается эффект, способствующий генерации нового знания в большей степени, чем в случае слабого когнитивного эффекта.

Приведены методы когнитивно-графической визуализации показателей многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц и алгоритмы преобразования данных для когнитивно-графической визуализации информации о методах повышения надежности электронной аппаратуры в условиях специальных воздействий на основе иерархического дескриптора. Для представления параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц разработана формализованная модель. В рамках диссертации были разработаны алгоритмы для визуального анализа характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, в том числе и алгоритм генерации пространства проектных решений экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц согласно конфигурационному иерархическому дескриптору.

Для задачи автоматизированной визуализации и анализа проектных решений, предложена математическая модель преобразования иерархического дескриптора многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, включая композиты, содержащие углеродные нанотрубки.

Предложен алгоритм преобразования данных о характеристиках многослойного экрана защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц в когнитивно-графический образ в виде слоев и общий алгоритм работы системы анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Для преобразования характеристик многослойного защитного радиационно-стойкого экрана в визуальный образ введена функция преобразования (скейлирования) $Scaling_{RGB}$ (1) и вспомогательная функция преобразования (скейлирования) $Scaling$ (2).

$$\langle R, G, B \rangle = Scaling_{RGB}(val_{scale}) = Scaling_{RGB}(Scaling(val, val_{min}, val_{max})) \quad (1)$$

$$val_{scale} = Scaling(\langle val, val_{min}, val_{max} \rangle) = \frac{val - val_{min}}{val_{max} - val_{min}}. \quad (2)$$

Для решения задачи автоматизированной визуализации и анализа значений параметров многослойных углеродных нанотрубок были предложены соответствующие модели преобразования.

Схема преобразования данных представлена на Рис. 1. Приведена схема преобразования иерархического дескриптора в трехмерный образ. Иерархический дескриптор позволяет описывать различные структуры, в том числе многослойные экраны защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, включая композиты, содержащие углеродные нанотрубки любых конфигураций. Введен конфигурационный иерархический дескриптор, который описывает пространство иерархических дескрипторов, каждый из которых описывает свой уникальный объект.

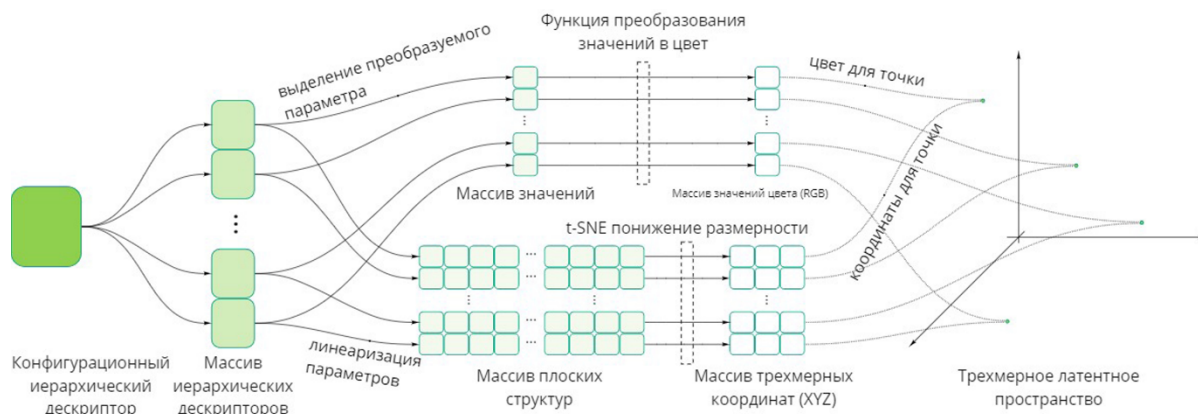


Рис. 1. Схема преобразования данных в трехмерное представление

Предлагаемый подход позволяет сжимать информацию с минимальными потерями информативности, таким образом, близкие по свойствам объекты будут близки и в полученном сжатом пространстве (в общем случае, пространстве выходной размерности r).

Предложена модель и алгоритм когнитивно-графической визуализации пространства проектных решений с применением конфигурационного иерархического дескриптора (S^{conf}) многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц для повышения эффективности процесса их поиска и сравнения пользователем.

В третьей главе представлена разработанная система с когнитивными элементами для анализа многослойных защитных экранов. Описаны принципы построения разработанной системы расчета и анализа. Интерфейс и упрощенный макет системы приведен на Рис. 2.

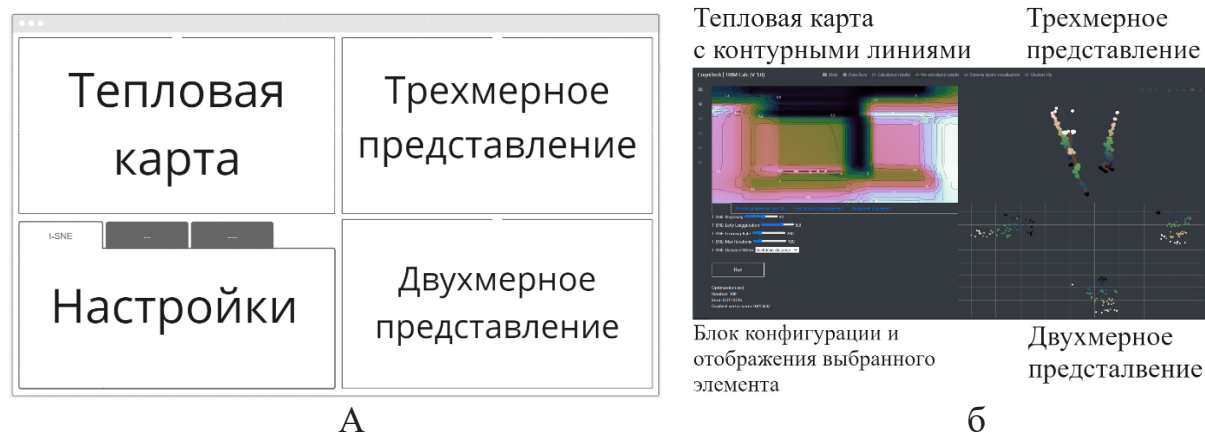


Рис. 2. Макет (а) и веб-интерфейс (б) системы с когнитивными элементами для анализа многослойных защитных экранов

Тепловая карта ($Vis^{n \rightarrow 3}$) в разработанном программном обеспечении представляет собой двухмерное отображение пространства исследуемых объектов на экране с отображением одного из исходных параметров в виде цвета. Также используются двухмерное ($Vis^{n \rightarrow 2}$) и трехмерное ($Vis^{n \rightarrow 3}$) представление с цветовой передачей одного из параметров. Для каждой визуализации n зависит от S^{conf} и будет меняться от конфигурации к конфигурации.

Были предложены и исследованы в части возможности технической реализации и применимости в системе анализа многомерных данных методики, позволяющие повысить когнитивную составляющую в разрабатываемых когнитивно-графических образах и системах. В разрабатываемую систему были интегрированы когнитивные элементы для повышения эффективности работы и удобства использования. Были предложены методы снижения негативных эффектов от когнитивных искажений. В частности, эффект фокусировки пользователя предлагается снизить путем уведомлений и подсказок при долгом использовании одного из доступных когнитивно-графических образов, а также в случае, если пользователь долгое время не меняет параметры когнитивно-графического образа или не взаимодействует с ним (не вращает, не перемещает или не изменяет масштаб). Для снижения когнитивной нагрузки на пользователя в когнитивно-графическом образе введена возможность выделения кластеров данных. Реализована возможность выбора цветовых шкал и даны рекомендации по их выбору для более корректного восприятия закодированных цветом значений. В систему введены различные виды размерности данных (до двух и трех компонент), что позволяет учесть всю доступную информацию об объектах исследования и, в отличие от ручного анализа табличных данных, позволяет избежать селективного восприятия, когда исследователь смотрит только на те данные, которые ему понятны и привычны. Координаты точек для пользователя равнозначны, а, следовательно, решение принимается на основе всей информации и влияние каждого из параметров уравновешено. В системе реализованы элементы сонификации данных ($Rep^{a \rightarrow 1}$), позволяющие интерпретировать один из параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц через звуковую модальность передачи информации. В тепловой карте это также

позволяет проще обнаружить отдельные точки на карте при наведении курсора мыши на них.

Разработаны алгоритмы и программный комплекс для автоматизированной оценки степени защищенности электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. При разработке системы использовались элементы когнитивно-графического отображения для визуализации результатов работы системы. Система разработана таким образом, что расчеты могут быть проведены удаленно на нескольких устройствах под управлением операционной системы Windows, каждое из которых будет независимо обрабатывать одну из задач расчета. Результаты после окончания расчета будут сохранены на едином сервере и доступны пользователям как с персональных компьютеров, так и с мобильных устройств с доступом в сеть Интернет вне зависимости от операционной системы.

Разработаны алгоритмы для когнитивной визуализации информации и автоматизированного расчета характеристик углеродных нанотрубок для повышения радиационной стойкости композитных слоев многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, содержащих углеродные нанотрубки. Предложенные алгоритмы реализованы в программном обеспечении с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок с целью повышения радиационной стойкости слоев многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. На Рис. 3 приведен интерфейс системы с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок в режиме отображения диапазона углеродных нанотрубок.

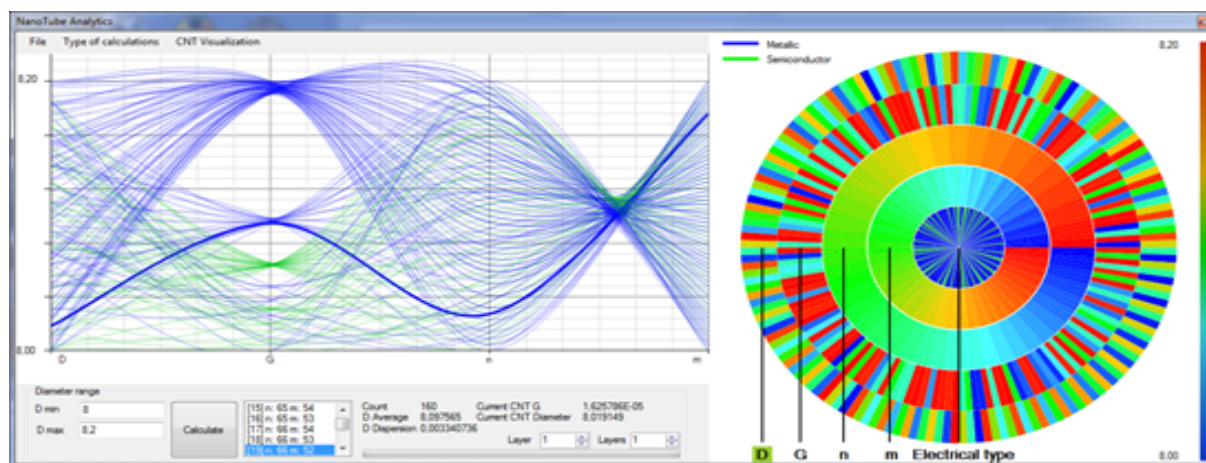


Рис. 3. Интерфейс системы с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок в режиме анализа диапазона углеродных нанотрубок

Система позволяет анализировать и сравнивать углеродные нанотрубки с различными характеристиками. В режиме анализа диапазона данных предусмотрены различные режимы ввода ограничений выборки для генерации:

- минимальное и максимальное значения для диаметра углеродных нанотрубок;
- диаметр и процент отклонения от него;
- диаметр и отклонение от него в нанометрах.

Предложен и реализован трехмерный режим анализа многослойных углеродных нанотрубок, позволяющий при помощи манипуляций с когнитивно-графическими образами, объектами или данными в трехмерном пространстве решать поставленные перед исследователем задачи. При анализе многослойных углеродных нанотрубок каждый слой подсвечивается отдельно по выбору в интерфейсе, остальные слои раскрашиваются в черный цвет для концентрации внимания на выбранном. Цвет слоя зависит от диаметра.

Разработанное программное обеспечение было объединено в BPMN-схеме (Business Process Management Notation) работы (Рис. 4) исследователя при проектировании многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, удовлетворяющих поставленным критериям.



Рис. 4. BPMN-схема работы эксперта-исследователя с разработанным программным обеспечением

Разработана формализованная модель представления параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц в дополненной реальности, выраженная в верхнеуровневом концептуальном описании системы. Разработаны алгоритмы для когнитивно-графической визуализации данных о многослойных экранах защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц с элементами дополненной реальности. Алгоритмы позволяют автоматизировать процесс преобразования данных и их визуализацию. Разработана система когнитивно-графической визуализации данных о многослойных экранах защиты электронной аппаратуры от

воздействия тяжелых заряженных частиц с элементами дополненной реальности.

Большинство этапов, приведенных на Рис. 4, являются аналитическими и зависят от задач, опыта специалиста и многих других факторов. Этапы, связанные с расчетом многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, можно оценить численно, замерив время, затраченное на их выполнение. В процессе расчета при использовании программного обеспечения SRIM и разработанного в рамках работы программного обеспечения были выделены 3 стадии: стадия ввода данных, стадия расчета и стадия сбора результатов.

Сравнение для стадии расчета опущено, так как в разработанном программном обеспечении для выполнения расчета используется SRIM в автоматическом режиме, в связи с чем время будет одинаковое. В случае использования разработанного программного обеспечения временем на загрузку данных конфигурации SRIM на сервер расчета и отправкой данных о результатах расчета также можно пренебречь, так как оно мало и зависит от типа интернет-соединения. Для проведения замеров были рассмотрены 10 двухслойных экранов защиты электронной аппаратуры. На Рис. 5 приведен график временных затрат.

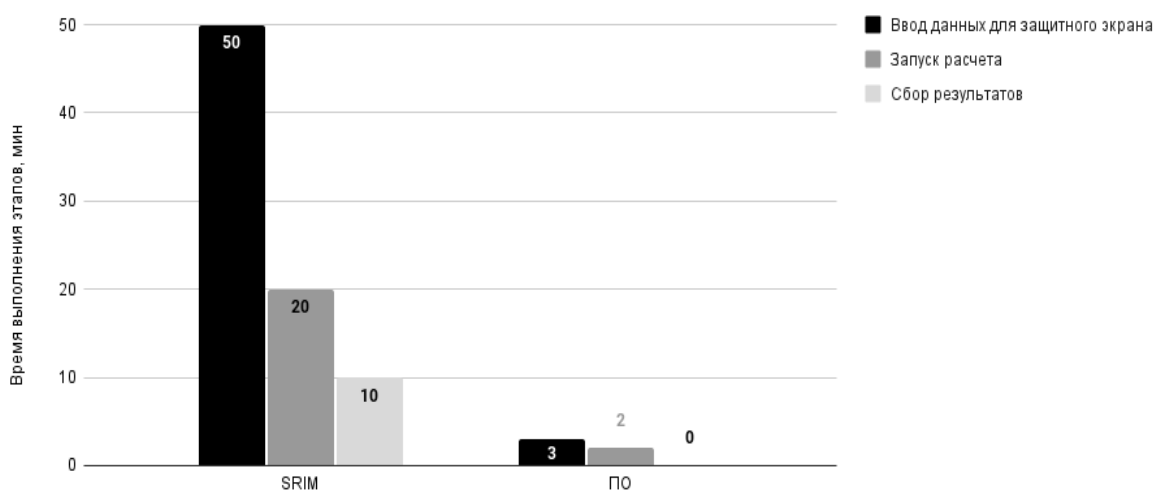


Рис. 5. Временные затраты на работу с использованием SRIM и с использованием разработанного программного обеспечения, при проектировании 10-ти двухслойных экранов защиты электронной аппаратуры

Расчёт процента времени выполнен по формуле:

$$T_{prc} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n t_i^{SRIM}} * \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – время в секундах, затраченное пользователем на i -ю операцию при использовании разработанного в рамках работы программного обеспечения, t_i^{SRIM} – время в секундах, затраченное пользователем на i -ю операцию при использовании SRIM, n – число операций (в данном случае равно трем). В результате T_{prc} составляет порядка 90% при проектировании 10-ти двухслойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

Четвертая глава посвящена методике оценки когнитивно-графических

образов и систем с применением нечетких когнитивных карт для анализа методов повышения надежности электронной аппаратуры в условиях специальных воздействий. Предлагаемый метод включает в себя набор характеристик когнитивно-графического образа, когнитивную карту, построенную на базе экспертных знаний автора, методологию проведения анализа когнитивно-графического образа и методику трактовки результатов анализа.

Для оценки когнитивно-графического образа предлагается использовать метод построения нечеткой когнитивной карты с переносом знаний экспертов, предложенный R.M. Axelrod-ом. Предложены следующие этапы:

1. Определение ключевых концептов, описывающих моделируемую систему.
2. Определение причинно-следственных связей между концептами.
3. Оценка значимости связей (в частности, методом парных сравнений, предложенным Т. Саати).

Для реализации 3-го этапа необходимо выполнить следующие шаги процедуры:

1. Определение связи как положительной или отрицательной.
2. Обозначение связей нечеткими терминами.
3. Приведение нечетких значений к числовым.

Для построения нечеткой когнитивной карты для когнитивно-графического образа автором диссертационной работы предлагается использовать следующие концепты и их трактовки: полнота данных (управляемый) (D_0^{man}), понятность (управляемый) (D_1^{man}), нагруженность (управляемый) (D_2^{man}), удобство (управляемый) (D_3^{man}), интерактивность (управляемый) (D_4^{man}), соответствие контексту (управляемый) (D_5^{man}), простота использования (управляемый) (D_6^{man}), проработка функционала (управляемый) (D_7^{man}), соответствие задачам (управляемый) (D_8^{man}), уровень адаптации (неуправляемый) (D_0^{unman}), генерация нового знания (неуправляемый) (D_1^{unman}).

Введено преобразование $f^D: Vis \rightarrow \langle D_0^{man}, \dots, D_8^{man} \rangle$. Данное преобразование выполняется пользователем и зависит от аспектов восприятия визуализации. Для описания методики оценки введена функция $f^{CM}: \langle D_0^{man}, \dots, D_8^{man}, CM \rangle \rightarrow \langle D_0^{inman}, D_1^{unman} \rangle$, где f^{CM} является функцией преобразования значений входных концептов в значения выходных для получения оценки, CM – матрица весов связей.

Для упрощения процесса работы была разработана система сбора информации от экспертов с элементами интерактивной проверки согласованности суждений. Для построения нечеткой когнитивной карты для когнитивно-графического образа была получена матрица связей концептов.

На основе полученной матрицы был построен граф нечеткой когнитивной карты.

Проведена оценка разработанной системы с когнитивными элементами для анализа многослойных защитных экранов, разработанной системы автоматизированной оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры, системы с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок, а также системы с элементами дополненной реальности для оценки

степени защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Проведен анализ применения программного обеспечения SRIM для решения задачи анализа многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, и сделан вывод о необходимости разработки системы автоматизированной системы расчета и визуализации большого набора проектных решений экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц. Рассмотрены характеристики многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц и выделены основные из них. Предложены и исследованы методики, позволяющие повысить когнитивную составляющую в разрабатываемых когнитивно-графических образах и системах для повышения эффективности работы и снижения когнитивной нагрузки на исследователя.

2. Введена классификация когнитивных графических представлений. Выделены представления с сильным и слабым, управляемым и неуправляемым когнитивным эффектом.

3. Разработана и исследована формализованная модель представления параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, а также модель представления параметров многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц в дополненной реальности.

4. Разработаны алгоритмы для визуального анализа характеристик многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, алгоритмы для когнитивно-графической визуализации информации и автоматизированного расчета характеристик углеродных нанотрубок для повышения радиационной стойкости композитных слоев многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц, содержащих углеродные нанотрубки, алгоритмы для когнитивно-графической визуализации данных о многослойных экранах защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц с элементами дополненной реальности.

5. Предложены алгоритмы, реализованные в программном обеспечении с когнитивными элементами для анализа многослойных защитных экранов, система автоматизированной оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры, система с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок, система с элементами дополненной реальности для оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры. Все разработанные системы направлены на поддержание процесса проектирования многослойных экранов защиты электронной аппаратуры от воздействия тяжелых заряженных частиц.

6. Исследованы временные затраты при использовании разработанного

программного обеспечения для задачи расчета радиационной стойкости 10-ти двухслойных экранов защиты электронной аппаратуры и определено, что при работе пользователь экономит $\approx 90\%$ времени работы с системой в сравнении с использованием программного обеспечения SRIM.

7. Представлена методика оценки систем с когнитивными элементами с применением нечетких когнитивных карт. Проведена оценка разработанной системы с когнитивными элементами для анализа многослойных защитных экранов, системы автоматизированной оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры, системы с когнитивными элементами для анализа подмножества углеродных нанотрубок, системы с элементами дополненной реальности для оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры. Сформулированы выводы о когнитивных свойствах разработанных программных систем.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1 Применение когнитивных инфокоммуникационных технологий при исследовании транспортных свойств углеродных нанотрубок /В.В. Казаков[и др.], Проектирование и технология электронных средств. – № 1, 2016. – С. 8 – 13.

2 Власов А.И., Журавлева Л.В., Казаков В.В. Применение визуальных инструментов brmn для моделирования технологической подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. - №1, 2020. С. 14-26.

3 Программный модуль автоматизированного расчета параметров экранов защиты бортовой электронной аппаратуры от радиационного воздействия /В.В.Казаков[и др.], Программные продукты и системы. №2, 2020. С. 236-242.

4 Власов А.И., Журавлева Л.В., Казаков В.В. Анализ средств разработки визуальных brmn-моделей сложных систем // Динамика сложных систем - XXI век. - №1, 2020. С. 5-22.

5 Зинченко Л.А., Казаков В.В., Миронов А.А. Иерархический дескриптор для отображения информации о многослойных радиационно-стойких экранах защиты электронной аппаратуры // Автоматизация. Современные технологии. - № 4, т. 75, 2021. – С. 171-175.

6 Kazakov V.V., Verstov V.A., Zinchenko L.A., Makarchuk V.V. Visual Analytics Support for Carbon Nanotube Design Automation. In: Samsonovich A., Klimov V., Rybina G. (eds) Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 449 (2016), pp 71-78, DOI: 10.1007/978-3-319-32554-5_10 (SCOPUS 2-s2.0-84964061330, WOS:000386313100010)

7 Shakhnov V.A., Zinchenko L. A., Makarchuk V.V., Rezchikova E. V., Kazakov V.V. Visual analytics in investigation of chirality-dependent thermal properties of carbon nanotubes. Journal of Physics: Conference Series, 1(829), 2017, pp. 1-6, DOI: 10.1088/1742-6596/829/1/012008 (SCOPUS 2-s2.0-85018428288, WOS:000411623500008)

8 Shakhnov V.A, Chernyshov V.N., Zinchenko L.A., Tyutin A.K., Kazakov V.V. Sonification of single-walled carbon nanotubes properties for engineering applications // Int. J. Nanotechnol., 2019, Vol. 16, Nos. 6-10, pp.576–584. (SCOPUS 2-s2.0-85083881257,

WOS:000528664000023)

9 Shakhnov V.A., Zinchenko L.A., Kazakov V.V., Glushko A.A., Makarchuk V.V., Rezchikova E.V. Cognitive visualization of carbon nanotubes structures // *Advances in intelligent systems and computing*, 2019, pp. 273–279. (SCOPUS 2-s2.0-85058542338, **WOS:000472945300027)**

10 Shakhnov V.A., Kazakov V.V., Glushko A.A., Verstov V.A., Zinchenko L.A. Application of VR/AR technology for visualisation of radiation tolerance of VLSI // *Int. J. Nanotechnol.*, 2019, Vol. 16, Nos. 6-10, pp. 569–575. (SCOPUS 2-s2.0-85083897383, **WOS:000528664000022)**

11 Shakhnov V.A., Kazakov V.V., Zinchenko L.A., Makarchuk V.V. Cognitive Data Visualization of Chirality-Dependent Carbon Nanotubes Thermal and Electrical Properties // *Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA) for Young Scientists. Volume 636*, 2017, pp. 302–307. DOI: 10.1007/978-3-319-63940-6_43 (SCOPUS 2-s2.0-85058501173, **WOS:000454681600043)**

12 Казаков В.В., Верстов В.А., Зинченко Л.А., Аверьянихин А.Е. Особенности использования подсистемы WPF в задачах визуализации транспортных свойств углеродных нанотрубок. // *Технологии инженерных и информационных систем* – № 2, 2016. – С. 34 – 41. (РИНЦ)

13 Тютин А.К., Казаков В.В., Верстов В.А. Использование методов сонификации в задачах классификации нанотрубок // *Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана*, #1(6)/2017, с. 1-9. DOI: 10.18698/2541-8009-2017-1-53. (РИНЦ)

14 Шахнов В.А., Казаков В.В., Зинченко Л.А., Макачук В.В., Власов А.И. Методы обработки и представления многомерных данных при анализе теплопроводности углеродных нанотрубок // *Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017*, 5-7 июля 2017, с. 82-85. (РИНЦ)

15 Shakhnov V.A., Glushko A.A., Kazakov V.V., Makarchuk V.V., Rezchikova E.V., Zinchenko L.A. Multidimensional data visualization in chirality-dependent carbon nanotubes thermal and electrical properties // *Modern problems in physics of surfaces and nanostructures*, 2017, p. 11. (РИНЦ)

16 Казаков В.В., Зинченко Л.А., Цивинская Т.А., Методы визуализации многомерных данных при анализе однослойных углеродных нанотрубок // *Будущее машиностроения России*, 2017, с. 564-567. (РИНЦ)

17 Казаков В.В., Зинченко Л.А., Нажмутдинова К.А. Когнитивные методы визуализации влияния технологического разброса транспортных свойств УНТ на параметры УНТ-транзисторов // *Радиолокация и связь – перспективные технологии*, 2017, с. 77-79. (РИНЦ)

18 О возможности применения алгоритмов эволюционных вычислений при проектировании экранов радиационной защиты / В.В.Казаков[и др.], XVII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии», 2019, с. 87-90. (РИНЦ)

19 Когнитивные методы визуализации характеристик материалов для экрана защиты электронной аппаратуры от воздействия протонов / В.В.Казаков[и др.], XVI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь - перспективные технологии», 2018, с. 98-100. (РИНЦ)

20 Методика проектирования когнитивных инфокоммуникационных приложений дополненной реальности для поддержки проектирования линий производства аэрокосмического оборудования / В.В.Казаков[и др.], 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 2020, с. 79-80. **(РИНЦ)**

21 Казаков В.В. Генерация когнитивного представления информации о многослойных радиационно-стойких защитных экранах. // Международный научно-технический конгресс «Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2022», 1-9 сентября 2022, с. 187-194. **(РИНЦ)**