

## **Модели и методы информационной технологии робастного оптимального проектирования технических систем**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Данная работа посвящена математическим моделям и методам решения многокритериальных задач стохастической оптимизации со смешанными условиями. Предложена интерактивная компьютерная система поддержки принятия решений «Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>», предназначенная для решения проблем построения робастных метамоделей (формальных математических моделей в форме уравнений регрессии), робастного оптимального проектирования и диагностирования систем и процессов.

**Ключевые слова:** проектирование сложных технических систем, стохастическая оптимизация, метамоделей, системы поддержки принятия решений.

### **Введение**

При серийном производстве объектов новой техники требуется учитывать согласованное множество проектных параметров элементов систем, а также вопросы прочности, что в совокупности является основой для формирования технологических процессов изготовления. В настоящее время процент технологического брака составляет около 5 % для каждых 100 изделий, а при проверки по собственным частотам лопаток – до 20 %. За счет внедрения в практику методов робастного оптимального проектирования, основанных на применении методов вычислительного интеллекта возможно снижение рисков больших затрат на доводку сложных технических систем в условиях серийного производства (отказ от селективной сборки изделий). Поэтому одной из актуальных проблем при создании объектов новой техники является проблема снижения затрат на доводку и при эксплуатации систем и процессов. Решение этой технической проблемы возможно путем внедрения в практику методов робастного оптимального проектирования и интеллектуального диагностирования систем и процессов.

При разработке последних возникают математические проблемы: оценивание неопределенностей, структуризация регуляризирующих алгоритмов и высокая вычислительная сложность методов синтеза квазирешений практических задач в условиях неопределенности. В настоящее время на решение этих проблем направлены усилия участников ряда научных программ, например EU FP6: NODESIM-CFD, EU H2020: UMRIDA. Результатом исследований стали разработанные методы синтеза решений M-, V-, P-задач, задач стохастической оптимизации со смешанными условиями и реализующие их программные средства, например «Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis», «IOSO Technology, Robust design optimization», «ESTECO, modeFRONTIER», «Dassault Systems, Isight and Fiper», «DYNARDO, optiSLang», «NUMECA International, FineDesign3D», «Concepts NREC's, Agile Engineering

Design System», которые в настоящее время применяются для решения практических задач.

Данная работа посвящена разработке методологии синтеза решений многокритериальных задач стохастической оптимизации и реализующей ее интерактивной компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР) «Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>», которые имеют существенное преимущество перед существующими и состоят в следующем:

1. Впервые предложена и реализована методология синтеза решений многокритериальных задач стохастической оптимизации, которая в отличие от существующих позволяет осуществлять поиск рациональных решений многокритериальных MV-задач путем создания иерархической двухуровневой схемы синтеза решений, включающей в себя: построение робастных суррогатных моделей систем и процессов, а затем – эффективное робастное оценивание искомых величин при параметрической неопределенности данных.

2. Разработан метод оценивания информативности (значимости) переменных многомерных моделей систем и процессов, который учитывает точность измерения переменных состояния и наличие парной корреляции между ними, что позволяет использовать этот метод для анализа полноты моделей и синтеза множества информативных контролируемых переменных.

3. Разработан метод регуляризации, позволяющий находить так называемые нормальные решения MV-задач модификации.

4. Разработан меметический алгоритм решения задач стохастической оптимизации, который в несколько раз эффективнее существующих алгоритмов дифференциальной эволюции.

5. Предложена информационная технология расчетов в среде разработанной КСППР «Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>». Разработанная КСППР «Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>» ориентирована на широкий круг пользователей в областях: машиностроения, в том числе, управления с использованием данных мониторинга проектами, производством для обеспечения качества выпускаемой предприятиями продукции (Design for Six Sigma); промышленной безопасности, экологии, фармацевтики, медицины и т. п., работающих над проблемами построения робастных метамоделей (формальных математических моделей в форме уравнений регрессии), робастного оптимального проектирования и диагностирования систем и процессов.

## **1. Анализ основных информационных технологий робастного оптимального проектирования технических систем**

В мире существуют всего несколько программных комплексов, предоставляющих возможности робастного оптимального проектирования, рассмотрим их подробнее.

modeFRONTIER обеспечивает инновационную среду оптимизации с модульным доступом на основе профилей [1]. Интеграционная платформа ESTECO для многокритериальной и многодисциплинарной оптимизации обеспечивает связь с инструментами сторонних разработчиков, позволяет автоматизировать процесс моделирования дизайна и облегчает принятие аналитических решений. Разработчикам предоставлен полный набор алгоритмов оптимизации, охватывающих детерминированные, стохастические и эвристические методы как для одиночных, так и для многоцелевых задач. Помимо

традиционных методов, modeFRONTIER предоставляет тонко настроенные алгоритмы многокритериальной оптимизации, способные реализовывать возможности отдельных подходов. Инженеры могут комбинировать методы оптимизации, в целях сокращения времени и циклов проектирования:

- FAST – ускоряет процесс за счет использования поиска в районе, наиболее интересном в Design Space, обеспечивая высокоскоростное обнаружение оптимальных решений;
- HYBRID – автоматически сочетает устойчивость генетических алгоритмов с точностью градиентных методов, обеспечивая баланс между возможностями исследования и уточнения;
- SAnGeA – обеспечивает автоматическую фазу скрининга в сочетании с глобальной фазой поиска генетических алгоритмов, надежно идентифицируя наиболее значимые переменные для решения;
- Pilot – объединяет глобальный и локальный поиск, за счет чего эффективно калибрует часть оценок на основе представления функций отклика (RSM) для достижения оптимальных и надежных решений; его архитектура обеспечивает результаты даже для проблем со сложными выходными функциями.

Многие конструктивные параметры инженерных проблем могут иметь неопределенности: допуски, колебания рабочих условий и т. д. Эти неопределенности влияют на процесс проектирования как с точки зрения надежности (т. е. вероятность того, что определенный дизайн может не соответствовать заранее определенному критерию или функции производительности) и с точки зрения надежности оптимального решения (т. е. устойчивость результата оптимизации от изменений входных параметров). В этих условиях традиционные методы оптимизации имеют тенденцию «чрезмерно оптимизировать», производя решения, которые хорошо работают в точке проектирования, но имеют плохие характеристики вне точки проектирования.

Подход modeFRONTIER, предназначенный для управления неопределенностью, основан на многоцелевой надежной оптимизации дизайна (MORDO). Исследуя неопределенности, влияющие на образец дизайна, детерминированная модель заменяется итеративной стохастической моделью в области неопределенности, представленной как распределение вероятностей выходных переменных. Затем с помощью алгоритмов многоцелевой оптимизации осуществляется оптимизация средних значений при минимизации их вариаций. Используя методы полиномиального хаоса, можно выполнить анализ надежности, учитывая, например, что определенный процент конструкций удовлетворяет заданным ограничениям.

Isight (ранее известный как iSIGHT-FD) является настольным решением которое предоставляет набор визуальных и гибких инструментов для создания потоков процесса моделирования, состоящих из множества приложений, включая коммерческое программное обеспечение CAD / CAE, программ и таблиц Excel – для автоматизации исследований альтернативных вариантов проектирования и определения оптимальных параметров производительности [2-3]. Isight позволяет пользователям использовать передовые методы, такие, как проектирование экспериментов, оптимизация, аппроксимация и дизайн Six Sigma, для тщательного изучения дизайна пространства. Расширенные интерактивные инструменты постобработки позволяют инженерам исследовать пространство дизайна с нескольких точек зрения. Fiper, дополнительный продукт для Isight,

позволяет пользователям делиться процессами моделирования Isight, распределяют и распараллеливают их выполнение через доступные вычислительные ресурсы и совместное использование результатами.

Isight предоставляет полный набор численных методов и методов оптимизации, которые могут быть применены к множеству проблем. К ним относятся численные оптимизаторы, такие как как NLPQL и Hooke-Jeeves, а также автоматический указатель Optimizer, простой в использовании гибридный метод, который может настраивать и тренировать для себя. Компонент аппроксимации является мощным инструментом для использования методов оптимизации с результатами моделирования. Инструмент позволяет моделировать модели, замененные быстродействующими суррогатными моделями. Модели могут быть созданы с использованием моделей поверхности ответа (RSM) и радиальной базисной функции (RBF) нейронных сетей.

Isight предоставляет стохастические методы, учитывающие вариации в дизайнах изделий и в среде, в которой они работают. Компонент на основе метода Монте-Карло (MCS) предлагает точный метод устранения неопределенности и случайности в процессе проектирования. Это позволяет пользователям определять пространство дизайна, оценить влияние известных неопределенностей на входные переменные на системный отклик и охарактеризовать статистический характер решений (среднее значение, дисперсия, диапазон, распределение и т. д.). Также изменения входных параметров могут быть указаны, используя законы распределения: экспоненциальный, Гумбел, нормальный, логнормальный, треугольный, равномерный, и распределение Вейбулла.

Использование компонента анализа надежности в Six Sigma, продукт или процесс повторно моделируются изменяя стохастические свойства одного или нескольких случайных переменных для определения характеристик статистического характера ответов (или вероятность удовлетворения дизайну).

SIMULIA включает в себя продукты с расширенными функциями мультифизического моделирования, интеграции и оптимизации процессов: Abaqus FEA, fe-safe, Isight, Tosca, Simpack, Simpoe и SIMULIA SLM [4]. Портфель решений для моделирования 3D EXPERIENCE охватывает четыре ключевых аспекта имитационного моделирования: прикладное проектирование, мультифизическое проектирование, имитационную аналитику, биологическое моделирование.

Решение Simpoe-Mold помогает прогнозировать и предотвращать появление дефектов на ранних этапах проектирования деталей и литейных форм, исключить дорогостоящую переделку брака, повысить качество деталей, сократить сроки выхода на рынок и производственные циклы. Решение Simpoe-Mold позволяет создавать модели с использованием оболочек и сеток твердых тел, со вставками или без вставок, а также обрабатывать сложные формы. Кроме того, решение Simpoe-Mold позволяет моделировать более сложные процессы, например инъекцию, с использованием газа, двухкомпонентную инъекцию под давлением, метод bi-refringance, многокомпонентное формование, многоточечную и комбинированную инъекцию.

Пакет продуктов CATIA Analysis в сочетании с пакетом продуктов SIMULIA Extended Analysis предназначены для разработчиков и инженеров, которым требуются точное определение размеров конструкций и быстрая оценка их фактической производительности на этапе проектирования. Чтобы обратиться к

основным возможностям нелинейного и термического анализов, включенных в продукты ANL и ATH, необходимо сначала применить генеративный структурный анализ деталей (Generative Part structural Analysis (GPS)), который является базовым продуктом в пакете CATIA V5 Analysis.

Abaqus, обеспечивает мощные инструменты для быстрой и точной оценки отдельных деталей, узлов, сборок и продукции, разработанной в V6. Наши программные продукты помогают также накапливать знания в области имитационного моделирования, внедрять одобренные методы, управлять приложениями и обмениваться результатами моделирования, поддерживая сотрудничество и принятие решений.

Simpack – это универсальное программное обеспечение для моделирования, которое позволяет аналитикам и инженерам моделировать нелинейное движение любых механических или мехатронных систем. Simpack дает возможность инженерам создавать и решать виртуальные 3D-модели, чтобы прогнозировать и визуализировать движения, силы связи и напряжения.

VisualDOC – это универсальное многодисциплинарное программное обеспечение для проектирования, оптимизации и интеграции процессов [5]. Это инструмент для определения процесса проектирования, интеграции, выполнения и автоматизации. В состав модулей входят: оптимизация, проектирование экспериментов, аппроксимация поверхности реакции и вероятностный (надежный и надежный) анализ. Его можно использовать для добавления этих модулей практически в любую программу анализа.

VisualDOC позволяет пользователю графически создавать подключенный рабочий процесс компонентов и, соответственно, определять каждый компонент в блок-схеме. Его функции включают в себя комплексные средства одновременного мониторинга и визуализации, хранения и повторного использования генерируемых данных моделирования для последующей обработки, полной поддержки отладки для выполнения модели и возможности интерактивного контроля и мониторинга процесса проектирования.

VisualDOC может выполнять линейную, нелинейную, ограниченную и неограниченную, а также целую, дискретную и смешанную оптимизацию. Типы оптимизации, доступные в VisualDOC, включают в себя: методы основанные на градиентах, неградиентную оптимизацию поверхности отклика и оптимизацию дизайна на основе надежности.

Прямая оптимизация на основе градиента (DGO): VisualDOC вызывает DOT и BIGDOT для оптимизации на основе градиента. Включены следующие алгоритмы оптимизации: модифицированный метод управляемого направления (MMFD); последовательное линейное программирование (SLP); последовательное квадратичное программирование (SQP); последовательная безусловная оптимизация (BIGDOT); Бroyдон Флетчер Голдфарб Шэнно (BFGS); Флетчер-Ривз (FR).

Неградиентная оптимизация (NGO): VisualDOC включает в себя современные методы оптимизации, основанные на градиенте. Эти методы пытаются подражать естественному явлению, моделируя процесс оптимизации, так что он может быть отображен в сущности естественного процесса в абстрактном смысле. Включены следующие методы оптимизации без градиента: оптимизация рога частиц (PSO) или алгоритм сортировки генетического алгоритма II (NSGAI)

В VisualDOC предусмотрено создание Pareto-оптимального (PO) фронта с помощью NSGA-II или любого другого метода оптимизации. Чтобы создать фронт PO с однообъективными алгоритмами оптимизации, можно выполнить скаляризацию с использованием таких методов, как взвешенное,  $\varepsilon$ -ограничение или компромиссное программирование, а VisualDOC систематически изменяет вес /  $\varepsilon$ -значение / значение целевой функции для генерации всего фронта Парето.

Сегодня техника RDO (Robust Design Optimization – оптимизация в робастном проектировании) является ключевой особенностью виртуального прототипирования. Имея весь необходимый функционал для решения реальных задач робастного проектирования с огромным количеством оптимизационных параметров, в том числе с учетом неопределенности переменных, optiSlang дает возможность успешно применять RDO в виртуальном прототипировании.

При последовательном проведении серии расчетов на базе CAE-модели ANSYS – анализа чувствительности, многодисциплинарной многокритериальной оптимизации, анализа робастности и надежности. OptiSlang [6-7] уже на этапе проектирования позволяет: оценить все возможные риски, найти оптимизационный потенциал, улучшить технические характеристики, обеспечить ресурсную и технологическую безопасность, сократить производственный цикл и время выхода изделия на рынок, осуществить быструю параметризацию, задать граничные условия оптимизации и целевые функции с использованием метамоделей оптимального прогноза (MOP), автоматически определить подпространства наиболее важных параметров, снизить риск переразмеренности конструкции путем настройки доверительных интервалов.

OptiSlang позволяет осуществить:

- анализ чувствительности;
- многодисциплинарную оптимизацию;
- многокритериальную оптимизацию;
- оценку робастности;
- анализ надежности;
- расчеты RDO.

FINE™ / Design3D – это интегрированная среда для проектирования и оптимизации каналов и лопаток турбомашин [6]. Система оптимизации требует параметрического модельера для определения большого пространства проектирования, автоматического и быстрого генератора сетки, точного и надежного решателя CFD и эффективного ядра оптимизации. FINE™ / Design3D отвечает всем этим требованиям и позволяет дизайнерам достичь инновационной геометрии турбомашин в структуре «все в одном»:

AutoBlade – модельер с усовершенствованным модулем для запуска проектов с нуля или из существующей геометрии.

FINE™ / Turbo: среда NUMECA, предназначенная для анализа потока турбомашин, от генерации сетки с помощью AutoGrid5™ до последующей обработки с помощью CFView™. Включает в себя трехслойный или многослойный структурированный расходомер потока Navier-Stokes, который признан самым быстрым и точным для конфигураций турбомашин. Затем пользователи могут воспользоваться эффективностью решения потока на рабочих станциях или больших конфигурациях HPC.

Ядро оптимизации Design3D™ – искусственный интеллект, сочетающий возможности дизайна экспериментов, искусственную нейронную сеть и усовершенствованные алгоритмы оптимизации.

FINE™ / Design3D можно применять для широкого спектра конфигураций: компрессоров, турбин, насосов, вентиляторов, пропеллеров и противовращающихся винтов. Инженеры извлекут выгоду из этого, чтобы ускорить цикл разработки и создать высокопроизводительные геометрии турбомашин с учетом их целей и ограничений. Чистый результат ясен: длительный процесс проб и ошибок заменяется эффективным алгоритмом самообучения.

Программный комплекс IOSO NM предназначен для повышения эффективности сложных технических систем на основе многокритериальной и многопараметрической оптимизации проектных параметров [8-9]. Базируется на принципиально новой стратегии решения задач оптимизации – IOSO, имеющей следующие отличительные особенности:

- высокую эффективность решения для сложных многопараметрических задач, что позволяет существенно сократить сроки решения этих задач;
- простота использования процедур оптимизации; реализованные адаптивные алгоритмы не требуют предварительных настроек и задания параметров, что позволяет их использовать специалистам, не владеющими специальными знаниями в теории оптимизации.

В пакете IOSO NM используются мощные структурно-параметрические методы оптимизации, которые обладают низкой чувствительностью к топологии целевых функций и позволяют успешно решать задачи для гладких унимодальных, многоэкстремальных и недифференцируемых функций.

Алгоритмы оптимизации IOSO NM позволяют успешно решать задачи даже при наличии областей невычислимости критериев и ограничиваемых параметров (аварийное завершение работы комплекса математических моделей), что избавляет пользователя от необходимости обеспечения устойчивой работы моделей во всем диапазоне поиска и сокращает время оптимизационных исследований.

Скорость сходимости алгоритмов оптимизации IOSO NM сопоставима с наиболее быстрыми градиентными алгоритмами для гладких унимодальных функций и и значительно превосходит все известные методы для сложных функций. Это дает возможность решения задач оптимизации при приемлемых затратах времени даже, когда время одного расчета составляет несколько часов, а количество независимых переменных составляет порядка 100. Возможность решения серии задач оптимизации в рамках одного проекта приводит к дополнительному сокращению времени проведения оптимизационных исследований.

Табличная и графическая формы представления результатов оптимизации позволяют проводить оперативный анализ получаемых решений и определять направление дальнейших исследований. Анализ результатов возможен как в процессе решения задачи, так и после ее завершения.

## **2. Интерактивная компьютерная система поддержки принятия решений при формировании облика сложных технических систем «Concept\_Pro\_St®» в условиях стохастической природы входных данных**

Процесс принятия решений при формировании облика функционального элемента сложной технической системы представлен на рис. 1.

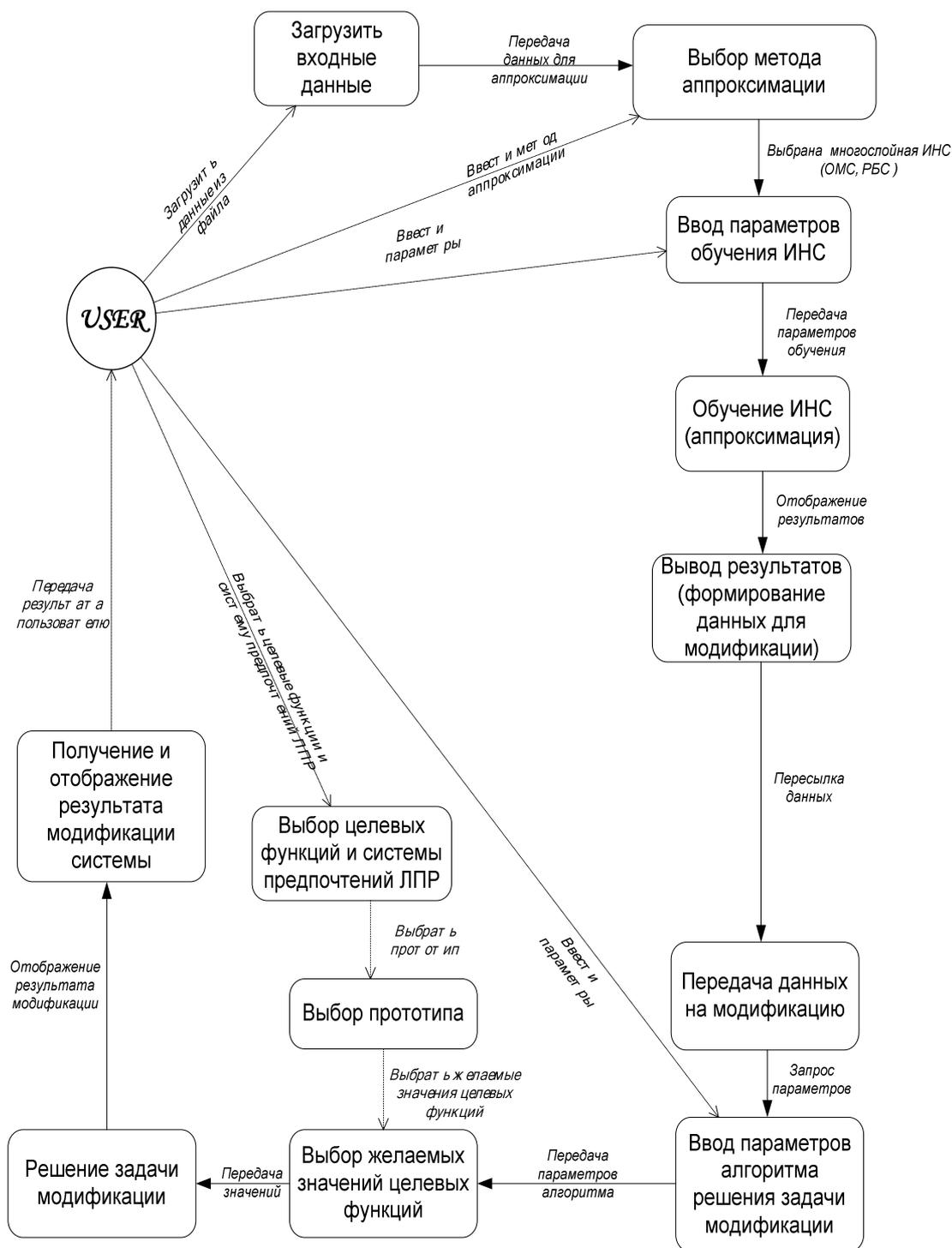


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса принятия решений при формировании облика функционального элемента сложной технической системы

Интерактивная компьютерная система поддержки принятия решений «Concept\_Pro\_St®» выполняет следующий набор функций:

1. Подготовка входных данных: методы предварительного нормирования входных данных. В качестве входных данных используются данные альтернатив (пробные выборки) – множество конструктивных и режимных параметров,

управляющих и фазовых переменных, критериев выбора решений (целевых функций). Пробные выборки формируются с использованием либо решений в детерминированной формулировке прямой задачи анализа, либо результатов экспериментальных исследований аналогов (рис. 2);

№	input1	input2	input3	input4	output1	output2
1	2.305	0.01	0.408	0.352	0.068	0.7
2	2.132	0.081	0.385	0.38	0.25	0.555
3	2.08	0.01	0.354	0.3	0.079	0.66
4	2.841	0.081	0.385	0.38	0.231	0.58
5	2.745	0.141	0.46	0.28	0.239	0.505
6	1.849	0.01	0.37	0.504	0.188	0.61
7	1.689	0.077	0.39	0.47	0.26	0.505
8	2.24	0.067	0.33	0.5	0.271	0.515
9	2.5	0.095	0.37	0.508	0.19	0.565
10	1.987	0.108	0.39	0.5	0.267	0.46
11	1.576	0.01	0.332	0.61	0.238	0.555
12	1.2	0.163	0.49	0.56	0.149	0.41
13	2.192	0.088	0.34	0.58	0.101	0.43
14	1.098	0.01	0.25	0.74	0.267	0.42
15	0.994	0.09	0.42	0.7	0.148	0.385
16	0.989	0.136	0.44	0.7	0.152	0.317

Рис. 2. Множество альтернатив (аналогов) промышленного радиального вентилятора

2. Методы построения робастных метамоделей (формальных математических моделей в форме уравнений регрессии) рассматриваемых систем и процессов: методы аппроксимации векторных функций векторных переменных на основе применения обучаемых искусственных нейронных сетей (ИНС) – однонаправленных многослойных и радиально-базисных ИНС [10].

Общую постановку задачи можно представить в виде: задана векторная функция набором обучающих пар  $\left( \vec{y}^{(0)}, \vec{d} \right)_p$ ,  $p = 1 \dots P$ , где  $\vec{y}^{(0)}, \vec{d}$  – вектора входа,

размерности  $H_0$ , и выхода, размерности  $H_{K+1}$ , соответственно, необходимо аппроксимировать данную выборку. Результатом решения задачи должен являться некий математический механизм, в результате работы которого можно было бы получить любое значение векторной функции, представленной данной обучающей выборкой, по заданному вектору входа, в диапазоне, ограниченном исходными данными.

Обучение рассматриваемых ИНС осуществляется методом стохастической аппроксимации на основе овражного метода сопряженных градиентов. Применение предлагаемых разработок позволяет получать стабильные (робастные) оценки параметров нейросетевых моделей в условиях неопределенности входных данных, что обеспечивает синтез робастных метамоделей (рис. 3);

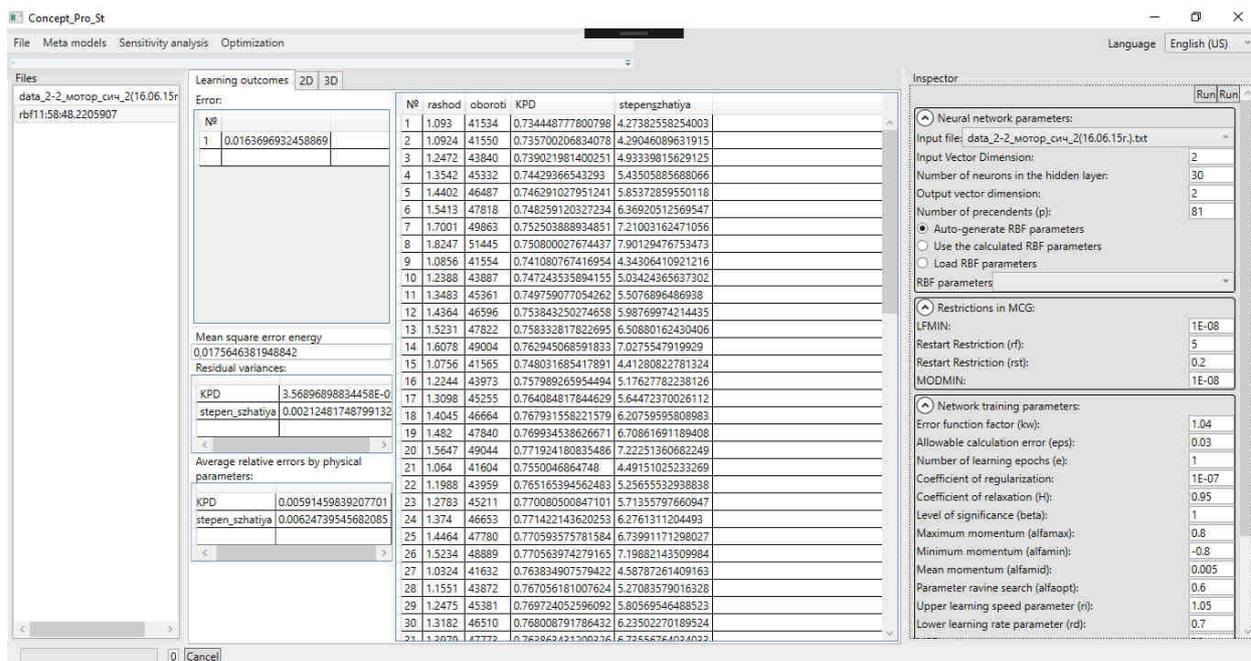


Рис. 3. Результаты робастной аппроксимации напорных характеристик многоступенчатого осевого компрессора (МОК) с помощью радиально-базисной сети

3. Графические средства трехмерного представления метамоделей (рисунок 4);

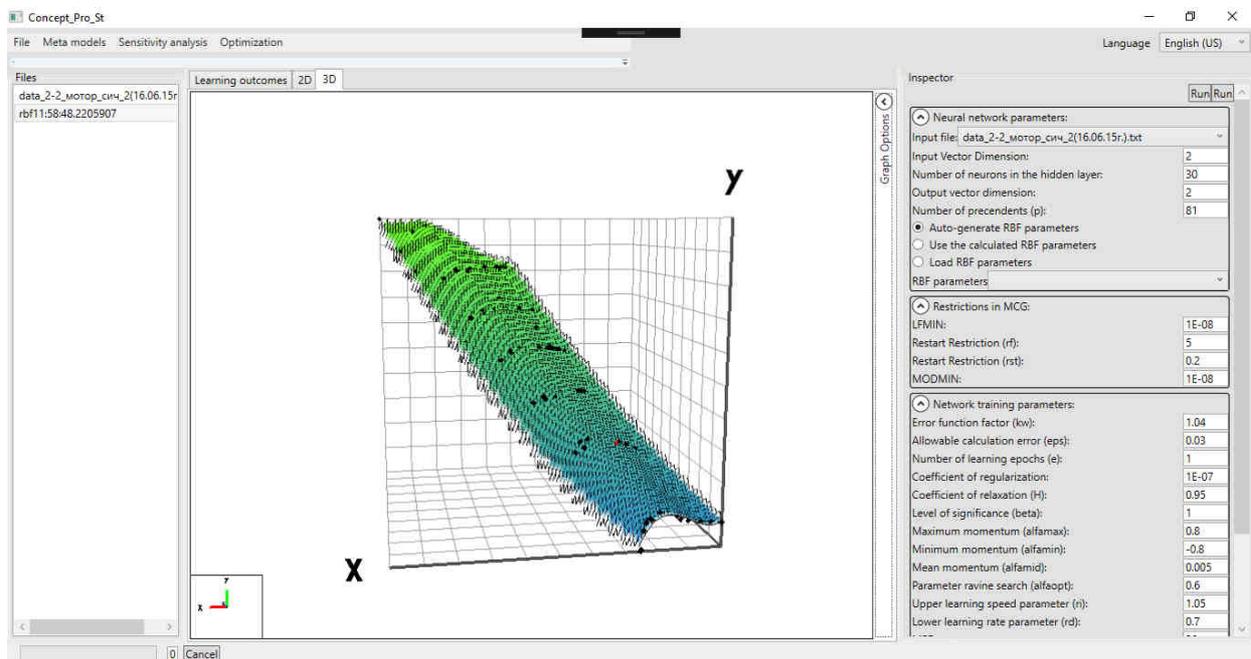


Рис. 4. Визуализация результатов робастной аппроксимации напорных характеристик МОК

4. Методы оценивания информативности (значимости) переменных метамоделей с учетом парной корреляции и точности измерения переменных. На основе полученных результатов может, в частности, быть получено решение

задачи синтеза множества контролируемых переменных для диагностирования отказов систем в условиях неопределенности входных данных (рис. 5);

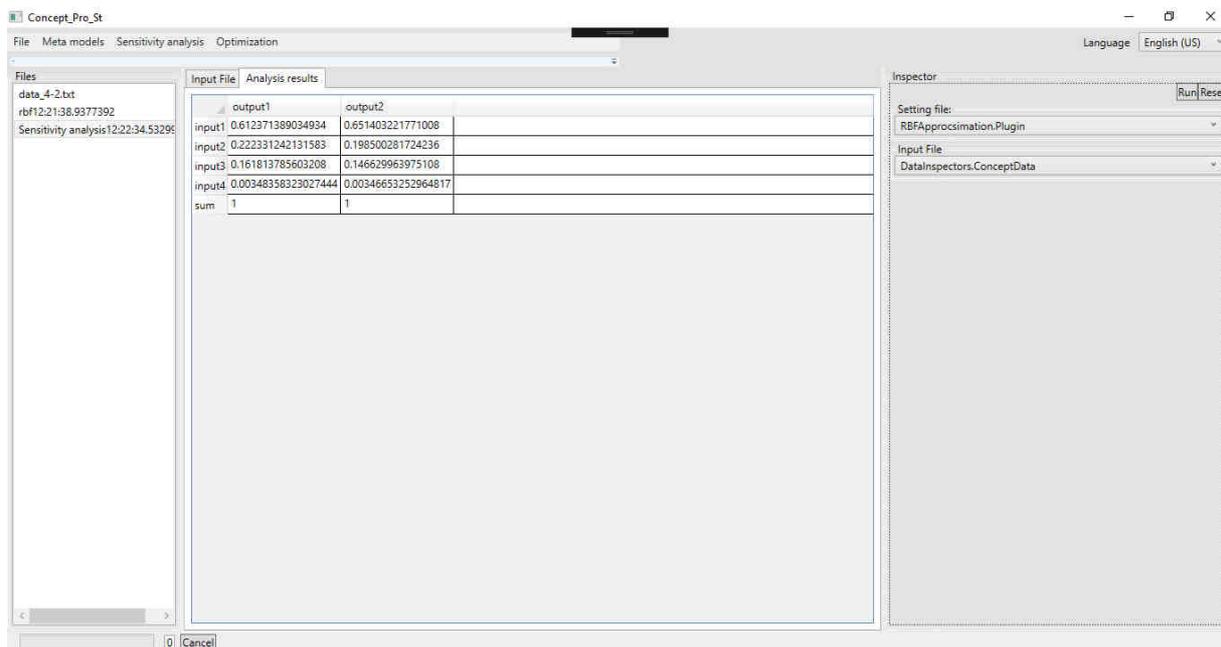


Рис. 5. Результаты оценивания информативности (значимости) переменных нейросетевых моделей, используемых для расчета аэродинамических характеристик прототипа промышленного радиального вентилятора

5. Методы решения задачи классификации состояния систем и процессов с использованием данных мониторинга контролируемых переменных на основе применения однонаправленных многослойных и радиально-базисных ИНС [11-12].

6. Метод синтеза решений (рис. 6-7) задач модификации [13-14].

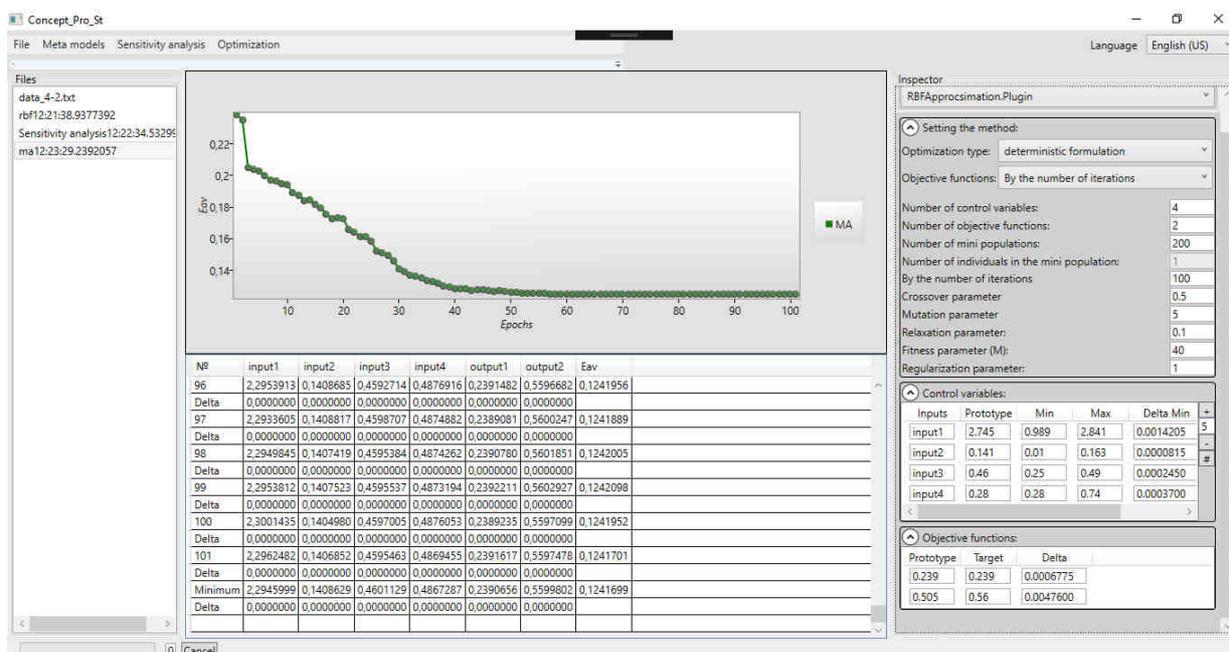


Рис. 6. Пример решения задачи формирования облика промышленного радиального вентилятора в детерминированной формулировке

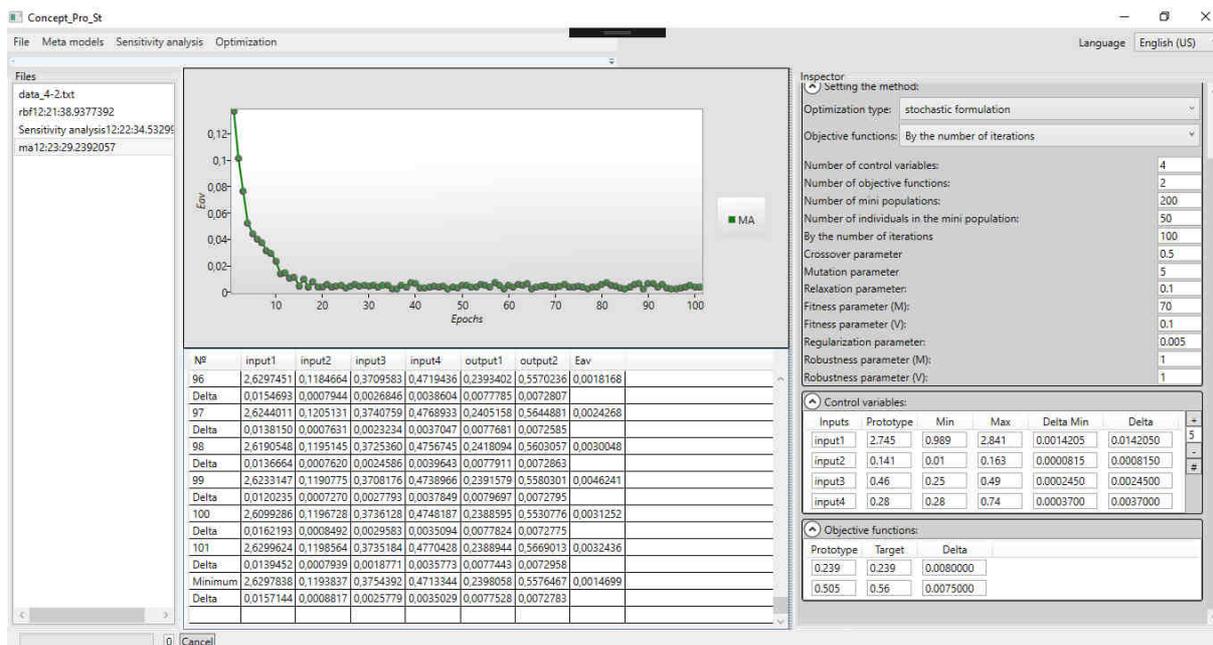


Рис. 7 – Пример решения задачи формирования облика промышленного радиального вентилятора в стохастической формулировке

На первом этапе могут быть получены для прототипа оценки доверительных интервалов величин критериев выбора решений (целевых функций) при заданных доверительных интервалах величин управляющих переменных подсистем (функциональных элементов). Таким образом, может быть проведен сравнительный анализ различных технологий изготовления систем.

На втором этапе осуществляется синтез квазирешений методом регуляризации. Применение предлагаемых разработок позволяет получать стабильные (робастные) оценки искомых величин в условиях параметрической неопределенности входных данных. В качестве вычислительного метода применялся эффективный меметический алгоритм, основанный на совместном использовании эволюционного метода с изменяющимися от эпохи к эпохе параметрами: операторов вещественного кодирования, функции приспособленности и релаксации, числом особей (числом мини-популяций) и рандомизированного метода прокладки путей – в детерминированной и стохастической (MV-задача) формулировках.

Таким образом, вероятностным методом находится решение прямой задачи расчета конструкторских размерных цепей: по заданным значениям математических ожиданий и доверительных интервалов величин критериев выбора решений (целевых функций) или фазовым переменным рассматриваемых систем (подсистем) или процессов находятся математические ожидания и доверительные интервалы величин управляющих переменных подсистем (функциональных элементов).

### 3. Выводы

Рассмотрен обзор программных комплексов, предоставляющих возможности робастного оптимального проектирования. К их недостаткам следует отнести высокую стоимость, а также отсутствие возможности получения решений

многокритериальных задач стохастической оптимизации в MV-постановке (прямой задачи расчета конструкторских размерных сетей: по заданным значениям математических ожиданий и доверительных интервалов величин критериев выбора решений (целевых функций) или фазовым переменным рассматриваемых систем (подсистем) или процессов находятся математические ожидания и доверительные интервалы величин управляющих переменных подсистем (функциональных элементов)).

Предложены модель и метод синтеза решений многокритериальных задач стохастической оптимизации со смешанными условиями (MV-задач). Разработан вычислительный метод синтеза решений задач этого класса, основанный на меметическом алгоритме, в котором реализовано совместное использование эволюционного метода с изменяющимися от эпохи к эпохе параметрами: операторов вещественного кодирования, функции приспособленности и релаксации, а также метода сужающихся окрестностей и рандомизированного метода прокладки путей.

Представлены примеры реализации предложенного метода при решении тестовых задач в детерминированной и стохастической формулировках.

Разработанная интерактивная компьютерная система поддержки принятия решений «Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>» ориентирована на широкий круг пользователей в областях: машиностроения, в том числе, управления с использованием данных мониторинга проектами, производством для обеспечения качества выпускаемой предприятиями продукции (Design for Six Sigma); промышленной безопасности, экологии, фармацевтики, медицины и т.п., работающих над проблемами построения робастных метамоделей (формальных математических моделей в форме уравнений регрессии), робастного оптимального проектирования и диагностирования систем и процессов.

Применение предлагаемых разработок обеспечивает эффективное робастное оценивание искомых величин при параметрической неопределенности входных данных и снижение информационной сложности метода синтеза квазирешений, что иллюстрирует актуальность применения представленного метода в инженерной практике.

### Список литературы

1. Robust design & reliability (2018). ESTECO's integration platform for multi-objective and multi-disciplinary optimization [Online]. Available: <http://www.esteco.com/modelfrontier/robust-design-reliability>
2. Isight & the simulia execution engine (2018). Process automation and design exploration [Online]. Available: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/isight-simulia-execution-engine/>
3. Alex Van der Velden, Pat Koch. Isight Design Optimization Methodologies, ASM Handbook Volume 22B Application of Metal Processing Simulations, Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France, 2010. – 24 p.
4. Vanderplaats R&D (2018). VisualDOC: Software for Process Integration and Multidiscipline Design Optimization [Online]. Available: <http://www.vrand.com/products/visualdoc/>
5. Dynamic Software & Engineering (2018). OptiSLang: Software for sensitivity analysis, multiobjective and multidisciplinary optimization, robustness evaluation,

- reliability analysis and Robust Design Optimization [Online]. Available: [www.dynardo.de/en/software/optislang.html](http://www.dynardo.de/en/software/optislang.html)
6. NUMECA (2017). FINE™/Design3D: an integrated environment for the design and optimization of turbomachinery channels and blades [Online]. Available: <http://www.numeca.com/product/finedesign3d>
  7. NUMECA Int. Ориентированность NUMECA на инновации в CFD, многофакторном анализе и оптимизации. [Текст] / NUMECA International. – Бельгия, Лювен: Перспективы использования в робототехнике, 2014. – Выпуск 3 (№ 62), с. 71–72.
  8. Sigma technology (2018). Robust design optimization and robust optimal control [Online]. Available: <http://www.iosotech.com/robust.htm>
  9. Brian H. Dennis, George S. Dulikravic, Igor N. Egorov, Shinobu Yoshimura, Djordje Herceg. Three-dimensional parametric shape optimization using parallel computers, Computational Fluid Dynamics journal vol.17 no.4:32 2009 (P.256–266)
  10. Угрюмова, Е. М. Обучаемые искусственные нейронные сети в построении формальных математических моделей систем при априорной неопределенности данных / Е. М. Угрюмова // Вісн. Харків. нац. ун-ту: зб. наук. пр.. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2010. – Вип. 13 (№ 890). – С. 237–253.
  11. Усовершенствованный метод и информационная технология решения задачи классификации состояния элементов сложных систем / И. М. Антонян, В. А. Горячая, А. И. Зеленский, Е. М. Угрюмова // Вісн. Харків. нац. ун-ту: зб. наук. пр. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2013. – Вип. 22 (№ 1063). – С. 5–16.
  12. Горячая, В. А. Усовершенствованный метод классификации состояний медико-биологических систем / В. А. Горячая, Е. М. Угрюмова // Системный анализ и информационные технологии (SAIT 2013). Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Киев: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2013. – С. 75–76.
  13. Chernysh S.V. A method synthesis of selection function scalar convolutions for the multi-objective decision-making problems / S.V. Chernysh, Ie.S.Meniailov, K.M. Ugryumova, M.L. Ugryumov // Bulletin of V. Karazin Kharkiv National University. – 2015. – Series «Mathematical Modelling. Information Technology. Automated Control Systems», Issue 27. – P. 172–180.
  14. Трончук А.А. Математические модели и эволюционный метод решения задач стохастической оптимизации / А.А. Трончук, Е.М. Угрюмова // Вісн. Харків. нац. ун-ту: зб. наук. пр.. Сер. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2012. – Вип. 19 (№ 1015). – С. 292–305.

Поступила в редакцию 15.03.2018

## **Моделі і методи інформаційної технології робастного оптимального проектування технічних систем**

Робота присвячена математичним моделям і методам розв'язання багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації зі змішаними умовами. Запропоновано інтерактивну комп'ютерну систему підтримки прийняття рішень "Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>", яка призначена для вирішення проблем побудови робастних метамodelей (формальних математичних modelей у формі рівнянь регресії), робастного оптимального проектування і діагностування систем і процесів.

**Ключові слова:** проектування складних технічних систем, стохастична оптимізація, метамodelей, системи підтримки прийняття рішень.

## **Models and methods information technology of robust optimal design of technical systems**

This paper is devoted to mathematical models and methods for solving multi-criteria problems of stochastic optimization with mixed conditions. The interactive computer decision support system "Concept\_Pro\_St<sup>®</sup>" is designed to solve the problems of constructing robust metamodels (formal mathematical models in the form of regression equations), robust optimal design and diagnostics of systems and processes.

**Keywords:** design of complex technical systems, stochastic optimization, metamodels, decision support systems.

### **Сведения об авторах:**

**Евгений Сергеевич Меньяйлов** – ассистент кафедры № 304 «Информатики», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Артем Вячеславович Безлюбченко** – аспирант кафедры № 304 «Информатики», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Михаил Леонидович Угрюмов** – д.т.н., проф. кафедры № 304 «Информатики», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Сергей Викторович Черныш** – аспирант кафедры № 304 «Информатики», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».