

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В последнее время прослеживается тенденция к многокритериальным постановкам задач проектирования разнообразных объектов аэрокосмической техники (АКТ), что позволяет наиболее полно учесть различные факторы [1 – 3]. Необходимость решения задач многокритериальной оптимизации наряду с быстрым прогрессом вычислительной техники приводит к появлению специализированного программного обеспечения.

В ходе своей работы инженер-проектировщик использует различные аналитические и численные модели разрабатываемого объекта. Так, на сегодняшний день конечно-элементное моделирование де-факто является стандартом при проведении инженерных расчетов. Существует тенденция вытеснения дорогостоящих физических экспериментов и испытаний численным моделированием [4 – 6]. В настоящее время разработано множество универсальных программных продуктов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ), например ABAQUS, SolidWorks Simulation, ANSYS, PATRAN/NASTRAN и другие, которые представляют собой автономные пакеты с модульной структурой и наличием инструментов для решения линейных и нелинейных, статических и динамических задач механики конструкций (модальный анализ, колебания, устойчивость, усталость), анализа течения жидкостей, моделирования явлений теплопереноса и т.д.

Независимо от типа используемая модель имеет определенные входные и выходные параметры (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема математической модели объекта

Например, для случая простого линейного статического расчета конструкции в качестве входных величин могут выступать параметры ее формы и размеров, свойств материалов, а также граничных условий, а в качестве выходных – функции состояния моделируемой конструкции: ее масса, деформация, картина распределения напряжений. Вариант реализации такой модели в МКЭ-пакете приведен на рис. 2.



Рисунок 2 – Вариант реализации конечно-элементной модели конструкции для выполнения линейного статического расчета

Независимо от способа реализации математической модели объекта для решения задачи его оптимального проектирования совсем необязательно знать особенности этой реализации; достаточно с требуемой точностью передавать модели входные параметры и считывать выходные параметры. Сама модель рассматривается как «черный ящик» [7, 8]. Именно в соответствии с концепцией «черного ящика» разрабатываются современные программные продукты для проведения оптимизационных расчетов. При этом описание математической модели объекта отделено от описания постановки задачи его оптимального проектирования (рис. 3).

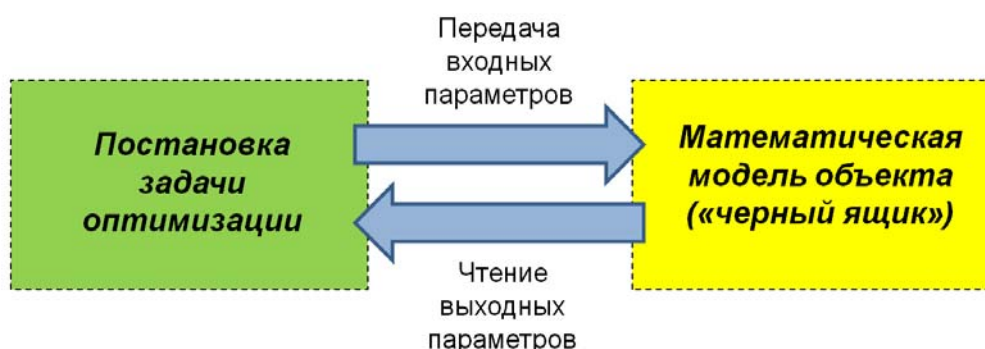


Рисунок 3 – Общая схема оптимизации модели объекта в соответствии с концепцией «черного ящика»

В табл. 1 приведены популярные универсальные программные комплексы многокритериальной оптимизации [9–22].

Таблица 1 – Универсальные программные комплексы многокритериальной оптимизации

Название	Разработчик	Применение в авиакосмической отрасли
IOSO	Сигма Технология	- оптимизация параметров планера самолета по весовым, прочностным, аэродинамическим и компоновочным показателям; - оптимизация высоконагруженных элементов конструкции и процессов управления ГТД, а также технологии их производства
modeFRONTIER	ESTECO	- оптимизация параметров планера самолета по весовым, прочностным, аэродинамическим и компоновочным показателям; - оптимизация изделий из композиционных материалов при динамическом нагружении; - оптимизация элементов авиационных двигателей
pSeven	DATADVANCE	- прочностная оптимизация композитных элементов планера; - оптимизация аэродинамических форм несущих поверхностей
Isight	Dassault Systèmes SIMULIA Corp	<i>нет конкретных данных</i>
Optimus	Noesis Solutions	- оптимизация элементов планера самолета, в том числе из композиционных материалов; - оптимизация технологического процесса сборки элементов планера летательного аппарата
OptiY	OptiY GmbH	<i>нет конкретных данных</i>
Nexus	iChrome	- оптимизация элементов планера самолета, в том числе из композиционных материалов
XTREME	Optimal Computing	<i>нет конкретных данных</i>
optiSLang	DYNARDO	- оптимизация элементов авиационных двигателей
HEEDS MDO	Red Cedar Technology	- оптимизация элементов планера ЛА, в том числе и композитных, по различным критериям качества
PIAnO	PIDOTECH	- конструкционная и аэродинамическая оптимизация элементов планера летательного аппарата
VisualDOC	Vanderplaats Research & Development, Inc.	- оптимизация параметров крыла летательного аппарата; - оптимизация параметров авиационных турбореактивных двигателей
Kimeme	Cyberdyne	<i>нет конкретных данных</i>
LIONoso	LIONoso	<i>нет конкретных данных</i>

Примечание. Пометка «нет конкретных данных» напротив соответствующего программного комплекса указывает на то, что автору не удалось найти публикации, в которых прямо упоминается использование этого программного комплекса для решения конкретных оптимизационных задач, возникающих в авиакосмической отрасли. Однако заявленные возможности этих программных комплексов, а также примеры их использования в других отраслях не обнаруживают препятствий для их внедрения в процесс создания авиакосмической техники.

Постановка задачи оптимального проектирования включает в себя задание:

- конструктивных переменных;
- целевых функций или критериев, подлежащих минимизации или максимизации;
- ограничений параметров состояния рассматриваемого объекта.

Программные комплексы многокритериальной оптимизации (далее – комплексы) включают в себя средства управления математическими моделями как «черными ящиками»: считывать значения целевых функций и ограничений, генерировать новые значения конструктивных переменных и передавать их в модель.

Способ обмена данными между комплексом и математическими моделями может быть различным. Для самых простых случаев с использованием аналитической модели некоторые комплексы позволяют описать ее непосредственно внутри себя благодаря встроенным редакторам и интерпретаторам популярных скриптовых языков программирования: VBScript, JavaScript, Python и др.

Другой способ заключается в использовании входных и выходных текстовых файлов. Этот способ наиболее универсален и широко распространен (рис. 4), поскольку большое количество инженерных программных продуктов поддерживает работу с текстовыми файлами.



Рисунок 4 – Взаимодействие программных комплексов многокритериальной оптимизации и математической модели с использованием входных и выходных текстовых файлов

На каждой итерации комплекс генерирует новые значения конструктивных переменных и записывает их во входной файл модели, которая после завершения своей работы записывает значения функций состояния в выходной файл. Комплекс на основании информации

выходного файла модели генерирует следующий набор величин конструктивных переменных в соответствии с реализованными в нем алгоритмами, и весь процесс повторяется снова.

Поскольку не существует единого стандарта структуры входных и выходных файлов, в составе комплексов разработчиками предусмотрены средства разбора текста в целях идентификации в нем требуемых параметров.

Третий способ взаимодействия основан на использовании высокоуровневых стандартизованных интерфейсов (API, Application Programming Interface [23] – интерфейс программирования приложений), которые предусмотрены в большинстве современных инженерных программных продуктах и обеспечивают доступ извне к своим внутренним функциям. Это позволяет избежать использования посредников, например в форме тех же текстовых файлов, и напрямую связать комплекс с математической моделью, из-за чего данный способ также называют прямой интеграцией (direct integration). В табл. 2 представлены заявленные разработчиками возможности прямой интеграции комплексов с некоторыми популярными инженерными продуктами.

**Таблица 2 – Поддержка прямой интеграции
программных комплексов многокритериальной оптимизации
с популярными инженерными продуктами**

Название	Прямая интеграция с популярными инженерными продуктами
IOSO	ANSYS Workbench, SolidWorks, Flow3D, FlowVision, Creo, Turboopt II, MS Excel
modeFRONTIER	ABAQUS, ADAMS, ANSYS Workbench, SolidWorks, CATIA, Siemens NX, Creo, Spaceclaim, ANSA, Autodesk Moldflow Insight, AVL AST, CST STUDIO SUITE, FlowMaster, Imagine.Lab AMESim, GTSUITE, JMAG, MADYMO, PowerFLOW, SCULPTOR, SFE CONCEPT, SimulationX, TurboOPT II, Virtual.Lab, LabView, MatLab, MathCAD, SciLab, OCTAVE, MS Excel и другие
pSeven	Kompas 3D, Creo, Siemens NX, SolidWorks, CATIA
iSight	ADAMS, ANSA, ANSYS Workbench, CATIA, Femap, LS-DYNA, MADYMO, MathCAD, MatLab, MSC ADAMS, MSC NASTRAN, MSC PATRAN, NEi NASTRAN, NX NASTRAN, PAMCRASH, Pro/Engineer, SolidWorks, Unigraphics, MS Excel и другие
Optimus	ABAQUS, ADAMS, ANSA/META Post, ANSYS Workbench, AVL Workspace, CATIA, Flowmaster, JMAG, LMS Virtual.Lab, LMS Imagine.Lab AMESim, LS-DYNA, MATLAB, Maple, MS Excel, MSC Nastran, Creo, SAMCEF, STAR-CCF+, Ricardo WAVE, Siemens NX, SimulationX и другие
OptiY	Matlab, SimulationX, MS Excel, CST Studio Suite, CATIA, Autodesk Inventor, SolidWorks, JMAG, MapleSim, Ansys Workbench, Infolytica MagNet, Infolytica ElecNet, FEKO, Creo, SolidEdge, Autodesk Simulation CFD и другие

Продолжение таблицы 2

Название	Прямая интеграция с популярными инженерными продуктами
Nexus	ABAQUS, ANSYS, ANSYS Workbench, Optistruct, MSC NASTRAN, NX NASTRAN, COMSOL, AME Sim, CATIA, SolidEdge, SolidWorks, MathCAD, MatLab, SciLab, а также LS-DYNA, PAMCrash, HyperMesh, MSC PATRAN, FEMAP, Autodesk Inventor, ADAMS, OpenFAM, MoldFlow, Pro/Engineer и другие
XTREME	MS Excel
optiSLang	CATIA, Siemens NX, Creo, SolidWorks, ANSYS, ABAQUS, AMESim, MatLab, MS Excel и другие
HEEDS MDO	ABAQUS, MatLab, NASTRAN, ADAMS, Siemens NX, SolidWorks, ANSYS Workbench, MS Excel, LS-DYNA, STAR-CCM+ и другие
PIAnO	ANSYS, ABAQUS, ADAMS, MSC Nastran, LS-DYNA, Fluent и другие
VisualDOC	MS Excel, MatLab, многие CAE-продукты
Kimeme	нет данных
LIONoso	нет данных
Примечание. Пометка «нет данных» указывает на то, что автору не удалось найти информацию о поддержке прямой интеграции у соответствующего программного продукта.	

Для описания процессов интеграции и оптимизации в большинстве случаев используются концепции визуального программирования [24] и программирования потоков данных [25], в соответствии с которыми пользователь оперирует узлами, или блоками, и связями между ними. Узел представляет собой объект с определенными свойствами, например, он может описывать некоторую переменную (вещественную или целую, непрерывную или дискретную), файл, внешнее приложение (математическую модель), настройки алгоритма оптимизации и т.д. Связи между узлами описывают потоки данных и вычислений (рис. 5, 6).

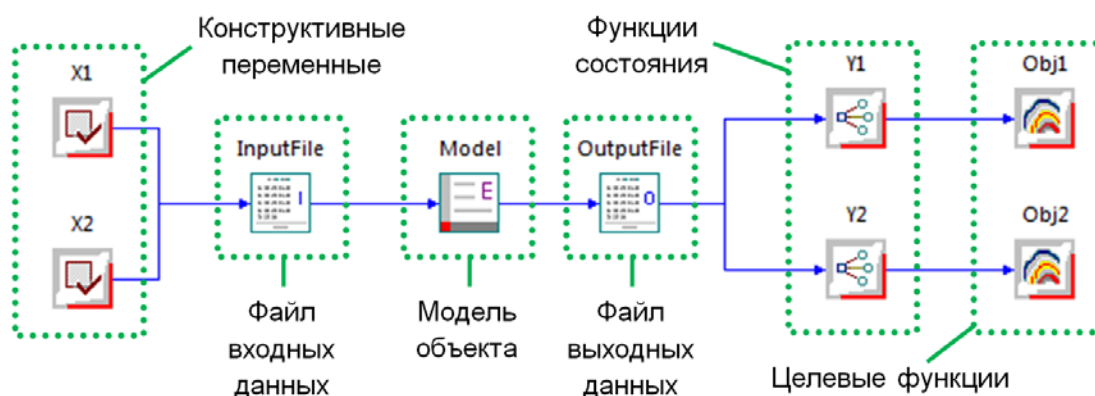


Рисунок 5 – Реализация концепции визуального программирования в комплексе OptiY

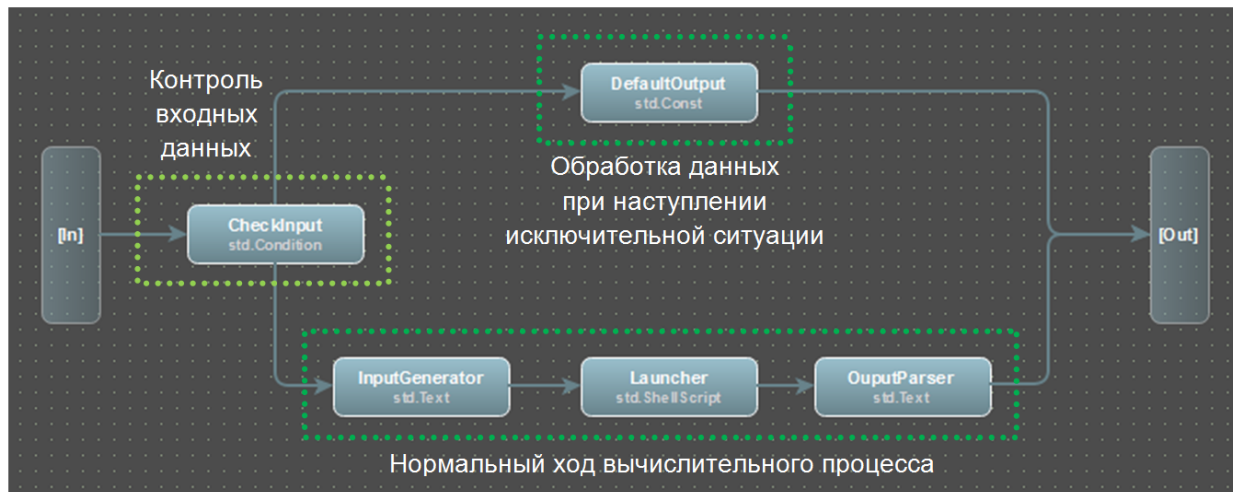


Рисунок 6 – Пример описания простого нелинейного вычислительного процесса с контролем исключительных ситуаций в комплексе pSeven

К объектам аэрокосмической техники предъявляются весьма разнообразные требования, определяемые экстремальными условиями их эксплуатации. В связи с этим расчеты, сопровождающие процесс проектирования, являются междисциплинарными. Зачастую для этого приходится использовать несколько инженерных программ (CAD, CAE и других), в которых реализуются разные модели и расчетные случаи. Рассматриваемые комплексы позволяют интегрировать все модели в единую вычислительную среду (рис. 7) и автоматически управлять ими в процессе оптимизации, из-за чего эти программные продукты относят к классу PIDO-систем (Process Integration and Design Optimization [26, 27] – интеграция процессов и проектировочная оптимизация).

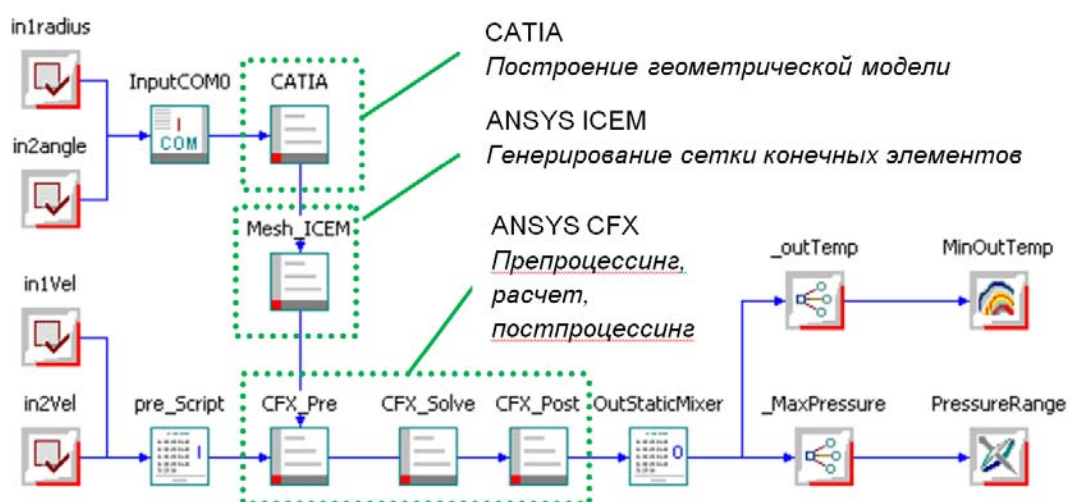
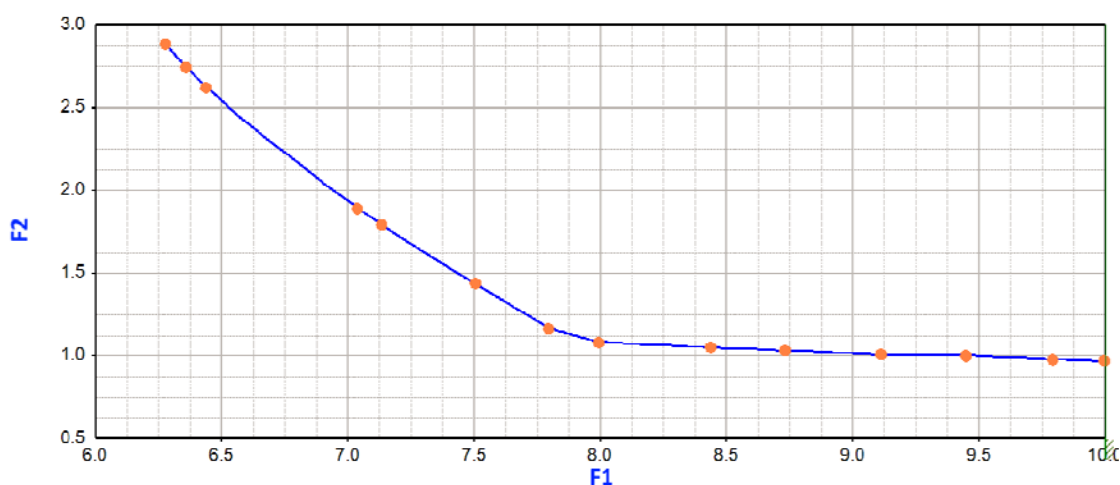


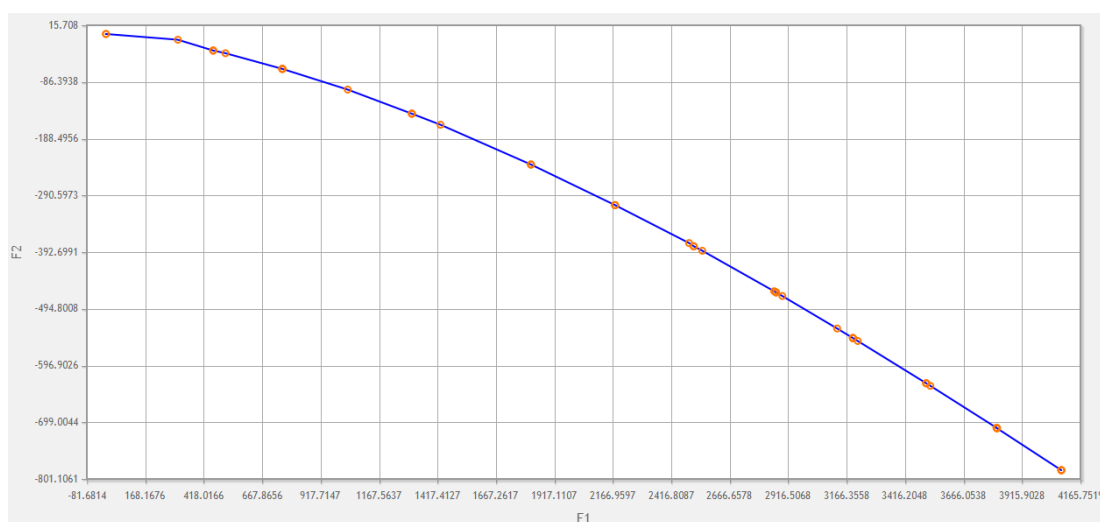
Рисунок 7 – Пример интеграции в вычислительный процесс нескольких инженерных продуктов (CATIA, ANSYS ICEM и ANSYS CFX) в комплексе OptiY [11]

Для сложных моделей, требующих больших временных и вычислительных ресурсов, в ряде комплексов реализована возможность распараллеливания расчетов в многопроцессорных системах или между рабочими станциями по стандартным сетевым протоколам в автоматическом режиме.

Одним из основных понятий многокритериальной оптимизации является множество Парето – совокупность компромиссных решений, каждое из которых не может быть улучшено по всем критериям одновременно [29]. В рассматриваемых комплексах реализованы алгоритмы поиска множества Парето в многомерном пространстве критериев (рис. 8).



а



б

Рисунок 8 – Множества Парето-оптимальных решений, найденных при решении разных тестовых задач:

- а – комплекс IOSO, минимизация двух критериев F1 и F2;
- б – комплекс pSeven, максимизация двух критериев F1 и F2

Также в большинстве комплексов реализованы возможности анализа чувствительности, статистического анализа, вероятностного моделирования, робастной оптимизации, а также средств поддержки принятия решений при наличии конкурентных проектов.

В части построения комплексов имеют развитые и гибкие инструменты для табличного и графического отображения данных, позволяющие визуализировать функциональные зависимости между различными параметрами исследуемого объекта (рис. 9).

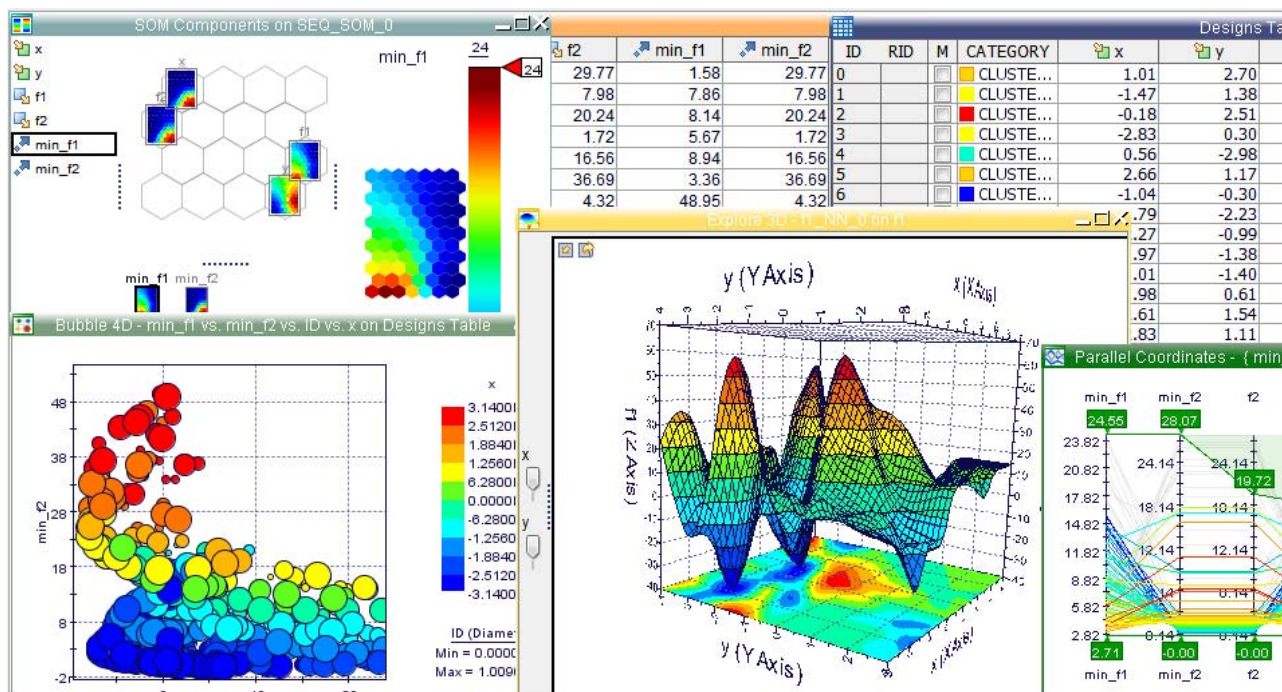


Рисунок 9 – Варианты табличного и графического представления данных в комплексе modeFRONTIER [30]

Выводы

В проведенном обзоре рассмотрена основная функциональность наиболее популярных программных комплексов, которые могут применяться при решении задач многопараметрической нелинейной мультидисциплинарной оптимизации различных объектов аэрокосмической техники в многокритериальной постановке, что подтверждается приведенными в статье случаями их применения в этой отрасли.

Отмечается отделение программного описания математической модели задачи оптимизации от реализации математической модели исследуемого объекта, что позволяет использовать один комплекс оптимизации для взаимодействия с различными моделями объектов («черными ящиками»), а также общего управления оптимизационным процессом.

Автор выражает благодарность:

- компании DATADVANCE и лично директору по маркетингу Марии Комаровой за предоставление пробной версии программного комплекса pSeven;
- компании «Сигма Технологии» и лично директору Юрию Бабию за предоставление программного комплекса IOSO в рамках академической программы;
- компании Optimal Computing за предоставление пробной версии программного комплекса XTREME;
- компании OptiY за предоставление бесплатной версии программного комплекса OptiY;
- лаборатории LIONlab Трентского университета и лично директору Роберто Баттити (Roberto Battiti) за предоставление программного комплекса LIONoso в рамках академической программы.

Список использованных источников

1. Почтман, Ю.М. Методы и модели многокритериальной оптимизации конструкций: учеб. пособие / Ю.М. Почтман. – Дп.: ДГУ, 1984. – 132 с.
2. Смердов, А.А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02, 05.02.01 / А.А. Смердов; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. — М., 2007. — 32 с.
3. Многокритериальный анализ сотовых заполнителей в системе поддержки принятия решений NooTron / В.И. Сливинский, А.И. Михалев, В.И. Кузнецов, Г.Л. Теплякова // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. матер. V междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2013. – С. 141–150.
4. Кондратьев, А.В. Методология информационной поддержки прогнозирования уровня физико-механических характеристик композитных заполнителей / А.В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (80). – Х., 2014. – С. 83 – 96.
5. Дерюгин, Ю.Н. Суперкомпьютерные технологии в промышленности. Опыт применения и актуальные задачи [Электронный ресурс] / Ю.Н. Дерюгин // тр. 4-го Московского суперкомпьютерного форума 23 октября 2013 г. – Режим доступа: <http://www.ospcon.ru/files/media/Deryugin.pdf>.
6. Fatemi J. Simulating Spacecraft Launch and Re-entry / J. Fatemi // SIMULIA. Realistic Simulation News. – Май/Июнь, 2011. – С. 12–14.

7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

8. Кривошеев, И.А. «Черный ящик» как основа решателя задач оптимизации ГТД / И.А. Кривошеев, Ю.А. Хохлова, Р.А. Завьялов // Молодой ученый. В 2 т. Т. 1. – 2011. – №10 (33). – С. 76–81.

9. IOSO – новейшая стратегия оптимизации [Электронный ресурс] / Сигма Технология. – Режим доступа: <http://www.iosotech.com/ru/products.htm>. – Назв. с экрана.

10. modeFRONTIER [Электронный ресурс] / ESTECO. – Режим доступа: <http://www.esteco.com/modelfrontier>. – Назв. с экрана.

11. pSeven [Электронный ресурс] / DATADVANCE. – Режим доступа: <https://www.datadvance.net/ru/product/pseven/>. – Назв. с экрана.

12. Isight & the SIMULIA Execution Engine. Process Automation and Design Exploration [Электронный ресурс] / Dassault Systèmes. – Режим доступа: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/isight-simulia-execution-engine/>. – Назв. с экрана.

13. Design for Real. Optimus [Электронный ресурс] / Noesis Solutions. – Режим доступа: <http://www.noesisolutions.com/Noesis/about-optimus>. – Назв. с экрана.

14. CAD/CAE Design Technology for Reliability and Quality [Электронный ресурс] / OptiY. – Режим доступа: <http://www.optiy.eu/Features.html>. – Назв. с экрана.

15. Nexus – New Standards for Optimization and Process Integration [Электронный ресурс] / iChrome. – Режим доступа: <http://ichrome.com/solutions/nexus>. – Назв. с экрана.

16. Numerical Optimization, Software Engineering and Cloud Computing. XTREME Technology [Электронный ресурс] / Optimal Computing. – Режим доступа: <https://optimalcomputing.be/xtreme-technology.php>. – Назв. с экрана.

17. Dynamic software & engineering. CAE-based Robust Design Optimization. optiSLang [Электронный ресурс] / DYNARDO. – Режим доступа: <http://www.dynardo.de/en/software/optislang.html>. – Назв. с экрана.

18. HEEDS MDO – Multidisciplinary Design Optimization Software [Электронный ресурс] / Red Cedar Technology. – Режим доступа: http://www.redcedartech.com/products/heeds_mdo. – Назв. с экрана.

19. PIAO [Электронный ресурс]: официальный сайт / PIDOTECH. – Режим доступа: <http://www.pidotech.com/en/product/piano.aspx>. – Назв. с экрана.

20. VisualDOC – Software for Process Integration and Multidisciplinary Design Optimization [Электронный ресурс] / Vanderplaats Research & Development, Inc. – Режим доступа: <http://www.vrand.com/visualDOC.html>. – Назв. с экрана.

21. Kimeme – A new flexible platform for multi objective and multidisciplinary optimization [Электронный ресурс] / CyberDyne. – Режим доступа: <http://www.cyberdyne.it/>. – Назв. с экрана.

22. LIONoso – The integrated tool for Machine Learning and Intelligent Optimization [Электронный ресурс] / LIONlab. – Режим доступа: <http://lionoso.com/>. – Назв. с экрана.

23. API [Электронный ресурс]: Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/API>. – Назв. с экрана.

24. Visual programming language [Электронный ресурс]: From Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_programming_language. – Назв. с экрана.

25. Dataflow programming [Электронный ресурс]: From Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Dataflow_programming. – Назв. с экрана.

26. Odorizzi S. Industrial improvement of CAE through the PIDO [Электронный ресурс] / University of Padua. – Режим доступа: http://www.ozeninc.com/downloads/Industrial_Improvement_through_Process_Integration.pdf. – Назв. с экрана.

27. PIDO [Электронный ресурс]: From Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/PIDO>. – Назв. с экрана.

28. OptiY - Multidisciplinary Analysis and Optimization [Электронный ресурс] / OptiY. – Режим доступа: <http://optiy.de/download/Brochure.pdf/>. – Назв. с экрана.

29. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – 2-е изд., исправ. и дополн. – М.: Физматлит, 2007. – 256 с.

30. ESTECO Unveils modeFRONTIER 2014 [Электронный ресурс] / Technology for Optimal Design Engineering. – Режим доступа: <http://www.deskeng.com/de/esteco-unveils-modefrontier-2014/>. – Назв. с экрана.

Поступила в редакцию 14.12.2015.

*Рецензент: д-р техн. наук, доц. А.В. Кондратьев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*