

УДК 004.4'2:519.85

DOI 10.34822/1999-7604-2020-2-32-40

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ

Г. С. Вересников

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук, Москва, Россия
E-mail: veresnikov@mail.ru*

Решение задач параметрического синтеза на предварительных этапах проектирования технических объектов не всегда происходит в условиях неопределенности, связанной со случайным характером исследуемых процессов. При недостатке статистических данных информацию о параметрах технических объектов получают от экспертов. В этом случае для разработки теоретической и алгоритмической основ решения задач параметрического синтеза проектных решений целесообразно применение теорий, рассматривающих работу с экспертной информацией. В результате исследований была выбрана теория неопределенности Б. Лю, в которой выведены аналитические выражения для расчета числовых характеристик функций, зависящих от неопределенных параметров, задаваемых экспертами посредством функций распределения неопределенности. В статье рассматриваются вопросы построения инструментальной программной среды, которая используется для решения задач параметрического синтеза проектных решений на основе обработки экспертной и статистической информации. Описывается разработанный прототип инструментальной программной среды, используя который лицо, принимающее решения, получает гибкий инструмент для построения и применения оптимизационных моделей, в которых целевые функции и ограничения зависят от случайных и неопределенных параметров.

Ключевые слова: инструментальная программная среда, неопределенность, оптимизационная модель, теория неопределенности.

TOOL SOFTWARE ENVIRONMENT FOR PARAMETRIC SYNTHESIS OF PROJECT DESIGN IN PRELIMINARY DESIGN OF TECHNICAL OBJECTS UNDER UNCERTAIN PARAMETERS

G. S. Veresnikov

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: veresnikov@mail.ru*

Solution of parametric synthesis tasks at preliminary stages of the technical objects design is not always found under uncertainty related to random nature of the investigated processes. The information on the parameters of the technical objects is received from the experts upon an insufficiency of statistical data. In this situation, it is worth to apply theories considering expert information processing in order to develop theoretical and algorithmical bases for solving the design tasks of parametric synthesis. As a result of study B. Liu's uncertainty theory is chosen, in which analytical forms for calculating the numerical characteristics of functions depending on uncertain parameters, which are set by experts using uncertainty distribution functions, are derived. The article considers the issues of tool software environment used for solving the tasks of design solutions parametric synthesis based on expert and statistical information processing. The prototype of the

tool software environment, using which the decision-maker (DM) will get an adaptable tool to establish and apply optimization models where the target functions and limitations depend on random and uncertain parameters is described.

Keywords: tool software environment, uncertainty, optimization model, uncertainty theory.

Введение

Проектирование сложных технических объектов (ТО), требующее решения задач синтеза значительного количества параметров, представляет собой многоэтапный итерационный процесс, характеризующийся возрастающей детализацией проектных решений. Он связан с формированием данных, позволяющих принимать обоснованные решения, базирующиеся на оптимальных компромиссах, снижающих экономические и технические риски.

В инженерной практике проектирование принято разделять на внешнее (концептуальное) и внутреннее. Внутреннее проектирование состоит из условно выделенных предварительного, эскизного и рабочего этапов. В результате выполнения тесно взаимосвязанных этапов концептуального и предварительного проектирования формируются окончательный вариант технического задания и аванпроект (предварительный проект, в котором содержатся и обосновываются основные проектные решения). Разработка и корректировка этих документов может занимать годы работы высококвалифицированных специалистов, поскольку в них отражаются в основном неизменные на всех последующих этапах создания проекта ТО решения, сформированные при этом в условиях неопределенности параметров на основе эмпирического опыта разработчиков, базирующегося на неполной и не всегда достоверной информации (не позволяющей оценить надежность/уровень вероятности удовлетворения проектных решений техническим требованиям).

На начальных этапах проектирования ТО полный набор исходных данных, как правило, не может быть точно определен, поскольку значения ряда параметров становятся известны на завершающих этапах проектирования ТО, когда основные проектные решения уже приняты, конкретизированы состав и тип оборудования, определена технология производства, проведены испытания. В связи с этим данные о проектируемом ТО нередко являются результатом обработки статистической или экспертной информации, и в этом случае параметры ТО представлены недетерминированными величинами, точные значения которых неизвестны в момент принятия проектных решений [1].

Современные подсистемы инженерного анализа [2–3], входящие в САПР и предназначенные для решения задач параметрического синтеза проектных решений, базируются в основном на детерминированных и вероятностных моделях и алгоритмах. Если точные значения параметров ТО неизвестны, то применение расчетных и оптимизационных моделей, предназначенных для вычислений с детерминированными значениями, может привести к неэффективным и недопустимым решениям. В связи с этим необходимость учета неопределенности параметров при проектировании ТО в настоящее время повсеместно признана, а научные исследования в данной области имеют высокую актуальность и практическую значимость. Проблема недостатка статистических данных, необходимых для применения вероятностных моделей и алгоритмов на предварительных этапах проектирования, обуславливает необходимость разработки инструментальных программных средств, обеспечивающих решение задач параметрического синтеза с использованием экспертных данных.

В результате анализа способов работы с экспертными данными, предлагаемых в мировой научной литературе [4–10], для решения задач параметрического синтеза на этапах предварительного проектирования ТО была выбрана теория неопределенности [10], в которой обеспечивается эффективный инструмент решения оптимизационных задач, базирующийся на возможности формирования аналитических выражений для вычисления числовых характеристик целевых функций и ограничений, зависящих от неопределенных параметров, задаваемых экспертами посредством функций распределения неопределенности.

По аналогии с аксиоматикой Колмогорова в теории неопределенности [10] рассматривается пространство неопределенности $(\Gamma, \mathcal{A}, M)$, где Γ – непустое универсальное множество, $\mathcal{A}$ – σ -алгебра на Γ , M – мера неопределенности. Каждому элементу λ из $\mathcal{A}$ – событию – ставится в соответствие число $M\{\lambda\}$, определяющее меру неопределенности этого события как степени уверенности эксперта в том, что это событие произойдет. Мера неопределенности $M\{\cdot\}$, удовлетворяет аксиомам нормальности, дуальности, субаддитивности, произведения.

Аксиома нормальности: $M\{\Gamma\} = 1$.

Аксиома дуальности: $M\{\lambda\} + M\{\lambda^c\} = 1$ для любого события λ ($\lambda^c = \Gamma \setminus \lambda$).

Аксиома субаддитивности: для каждой счетной последовательности событий

$$M\{\bigcup_{i=1}^{\infty} \lambda_i\} \leq \sum_{i=1}^{\infty} M\{\lambda_i\}.$$

Аксиома произведения: пусть $(\Gamma_k, \mathcal{A}_k, M_k)$ – пространства неопределенности для $k = 1, 2, \dots$, тогда мера неопределенности на произведении σ -алгебр $\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 \times \dots$ удовлетворяет равенству

$$M\{\prod_{k=1}^{\infty} \lambda_k\} = \bigwedge_{k=1}^{\infty} M\{\lambda_k\}.$$

В работах [11–12] автором статьи разработаны отсутствующие в теории неопределенности оптимизационные модели, которые предлагается использовать в инструментальной программной среде, предназначенной для параметрического синтеза проектных решений на основе обработки экспертной и статистической информации.

Методология построения инструментальной программной среды для решения задач параметрического синтеза в условиях неопределенности параметров

Предлагается методология построения инструментальной программной среды, в рамках которой проводится отделение функциональных подсистем, предназначенных для решения задач параметрического синтеза, от библиотеки алгоритмов и информационной модели процесса параметрического синтеза. Под информационной моделью понимается множество взаимосвязанных сущностей и их атрибутов, позволяющих отразить структуры исходных данных и моделей, динамику формирования и принятия решений по синтезу параметров ТО. Это позволяет обеспечить инвариантность подсистем к исходным данным, реализации моделей и алгоритмов. Кроме того, подобный подход к организации инструментальной программной среды обеспечивает эффективность процесса разработки новых функциональных подсистем и алгоритмов, используемых при проектировании ТО, т. к. не требует изменения других подсистем.

Каждая функциональная подсистема как самостоятельная часть инструментальной программной среды включает стандартизированные интерфейсы для взаимодействия с моделями и алгоритмами, используемыми при решении задач параметрического синтеза. Такой подход к разработке функциональных подсистем обоснован принципами и опытом объектно-ориентированного программирования. Стандартизированные интерфейсы содержат описания (спецификацию) выполняемых моделями и алгоритмами функций, типов входных и выходных данных. Таким образом, посредством абстрактного представления моделей и алгоритмов к ним предъявляются функциональные требования и обеспечивается независимость их реализации от реализации функциональных подсистем.

На рис. 1 представлена обобщенная схема информационного обмена в инструментальной программной среде для решения задач параметрического синтеза при предварительном проектировании ТО в условиях неопределенности параметров.



Рис. 1. Схема информационного обмена в инструментальной программной среде для решения задач параметрического синтеза при предварительном проектировании ТО в условиях неопределенности параметров

Примечание: схема разработана автором.

Используя функциональные подсистемы рассматриваемой инструментальной программной среды, лицо, принимающее решения (ЛПР), в интерактивном режиме создает, изменяет, применяет модели и алгоритмы для решения задач параметрического синтеза при проектировании конкретных ТО. Если при формировании данных о параметрах ТО используется и статистическая, и экспертная информация, то для выполнения расчетов формируются и применяются оптимизационные модели следующего вида [11–12]:

$$\begin{cases} \min_{\bar{x}}(\max)[d_1[f_1(\bar{x}', \bar{\xi}, \bar{\omega})], \dots, d_m[f_m(\bar{x}', \bar{\xi}, \bar{\omega})]] \\ P(M[g_j(\bar{x}', \bar{\xi}, \bar{\omega}) \leq 0] \geq \alpha_{g_j}) \geq \beta_{g_j}, j=1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (1)$$

где $f_i(\bar{x}', \bar{\xi}, \bar{\omega})$, $i=1, \dots, m$ и $g_j(\bar{x}', \bar{\xi}, \bar{\omega})$ — целевая функция и функция ограничений соответственно;

$\bar{x}'$ — вектор оптимизируемых независимых детерминированных или неопределенных параметров ТО;

$\bar{\xi}$ — вектор входных независимых неопределенных параметров;

$\bar{\omega}$ — вектор входных независимых случайных параметров;

d_i — множество числовых характеристик целевой функции;

$M(\bullet)$ — мера неопределенности [10] события $\bullet$;

$P(\bullet)$ — вероятность события $\bullet$;

α_{g_j} — заданный ЛПР уровень меры неопределенности (степени уверенности) для выполнения j -го ограничения, $0 \leq \alpha_{g_j} \leq 1$;

β_{g_j} — уровень вероятности, задаваемый ЛПР для j -го ограничения, $0 \leq \beta_{g_j} \leq 1$;

m — количество целевых функций;

p – количество ограничений.

Функции $f_1(\bar{x}, \bar{\xi}, \bar{\omega}), \dots, f_m(\bar{x}, \bar{\xi}, \bar{\omega})$ моделируются как неопределенные величины, параметризованные случайными величинами. В связи с этим числовая характеристика целевой функции, зависящей от неопределенных и случайных параметров, определяется в два этапа. Сначала находится характеристика функции от неопределенных параметров, при этом случайные величины рассматриваются как параметры этой характеристики. Затем эта характеристика рассматривается как случайная величина и вычисляется ее характеристика, которая и является характеристикой целевой функции.

В качестве характеристик случайных и неопределенных величин могут использоваться математическое ожидание/ожидаемое значение, квантиль для неопределенных и случайных величин, вероятность/степень уверенности непревышения функцией заданной величины. В результате сочетания данных числовых характеристик строятся различные оптимизационные модели, в которых критерии оптимизации зависят от случайных и неопределенных параметров. Способ построения критерия оптимизации (сочетания характеристик случайной и неопределенной величины) зависит от конкретной задачи синтеза параметров ТО, требований к надежности проектных решений и предпочтений ЛПР [1].

Аналогичным образом в оптимизационной модели (1) учитываются «мягкие» ограничения, которые выполняются заданными уровнями уверенности/вероятности. Аналитические выражения для числовых характеристик целевых функций и ограничений, алгоритмы для их вычисления подробно рассмотрены в работе [11].

Построенные оптимизационные модели применяются при выполнении оптимизационных расчетов с использованием выбранных алгоритмов оптимизации (например, генетических алгоритмов, метода роя частиц) и алгоритмов расчета числовых характеристик функций и ограничений, зависящих от недетерминированных параметров.

Алгоритмы обработки данных о недетерминированных параметрах ТО применяются для формирования функций распределения неопределенности и вероятности на основе экспертной и статистической информации. Эти функции используются при построении аналитических выражений и расчете числовых характеристик целевых функций и ограничений. В итерационном процессе проектирования ТО созданные с использованием инструментальной среды оптимизационные модели могут применяться неоднократно при уточненных экспертных данных о параметрах проектируемого ТО.

Если после расчетов по многокритериальным оптимизационным моделям получено множество Парето, то требуется произвести выбор из альтернативных вариантов проектных решений. Для этих целей могут использоваться интерактивные человеко-машинные процедуры, аксиоматические и эвристические методы [13–15].

Прототип инструментальной программной среды

Разработан прототип инструментальной программной среды для решения задач параметрического синтеза при предварительном проектировании ТО в условиях неопределенности параметров. Используя этот прототип, ЛПР имеет возможность строить оптимизационные модели с критериями оптимизации, позволяющими обеспечить усреднение целевых функций по недетерминированным параметрам, надежность, робастность проектных решений. Работа с прототипом инструментальной программной среды состоит из трех основных этапов.

Этап 1. В рамках задачи синтеза параметров ТО производится формирование исходных данных, которые используются для построения оптимизационных моделей. На рис. 2 представлен пример интерфейса инструментальной среды при решении задачи синтеза основных весовых параметров пассажирского самолета на этапе предварительного проектирования.

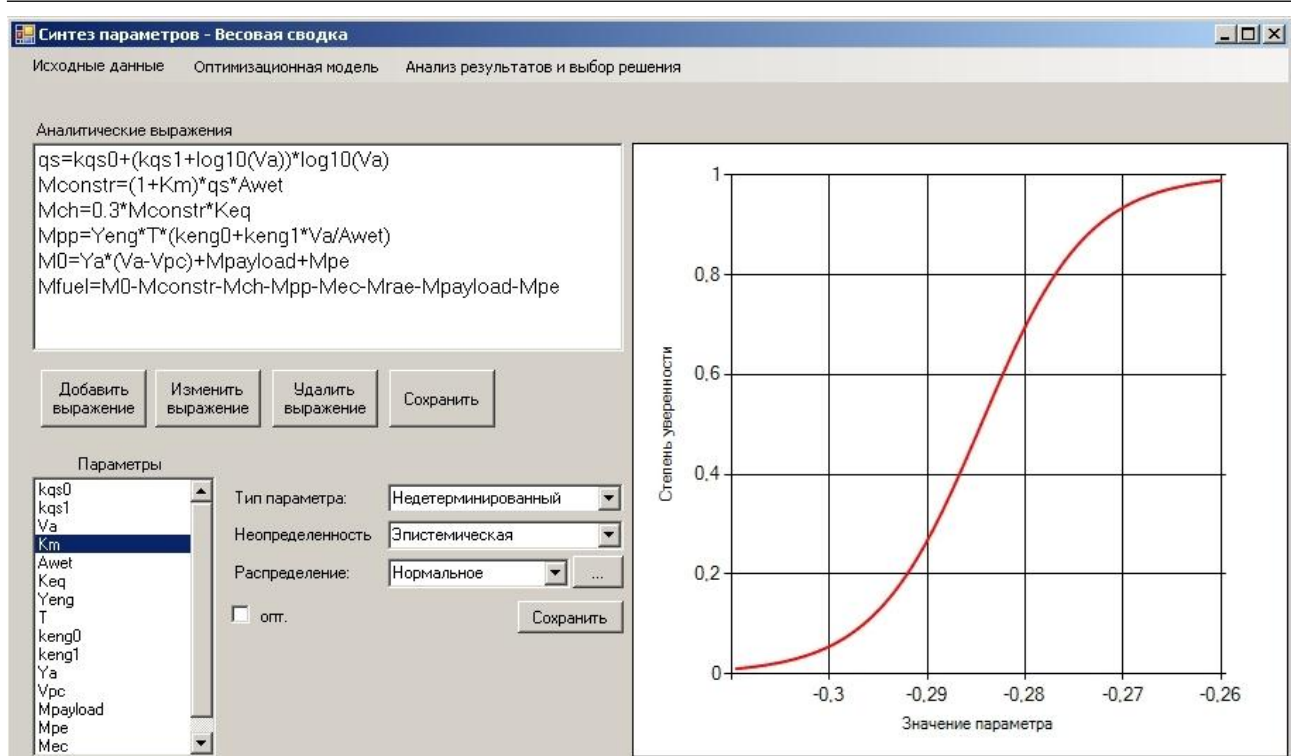


Рис. 2. Формирование исходных данных для построения оптимизационных моделей [11]

Примечание: скриншот автора.

Сначала ЛПР вводит аналитические выражения целевых функций и ограничений с детерминированными параметрами. Затем для каждого параметра, автоматически выделенного из этих выражений, выбирается тип параметра – детерминированный или недетерминированный. Если параметр является недетерминированным, то указывается тип неопределенности. Для детерминированных параметров задаются точные значения, для недетерминированных параметров в зависимости от выбранного типа неопределенности вводятся функции распределения вероятности и неопределенности. Также выбираются оптимизируемые параметры и задаются диапазоны их изменения.

Функции распределения вероятности для случайных параметров задаются в аналитическом виде. Функции распределения неопределенности для неопределенных параметров задаются экспертами непосредственно в аналитическом виде или набором эмпирических данных, которые затем аппроксимируются функцией распределения неопределенности.

Этап 2. В интерактивном режиме формируется оптимизационная модель с числовыми характеристиками целевых функций и ограничений (рис. 3).

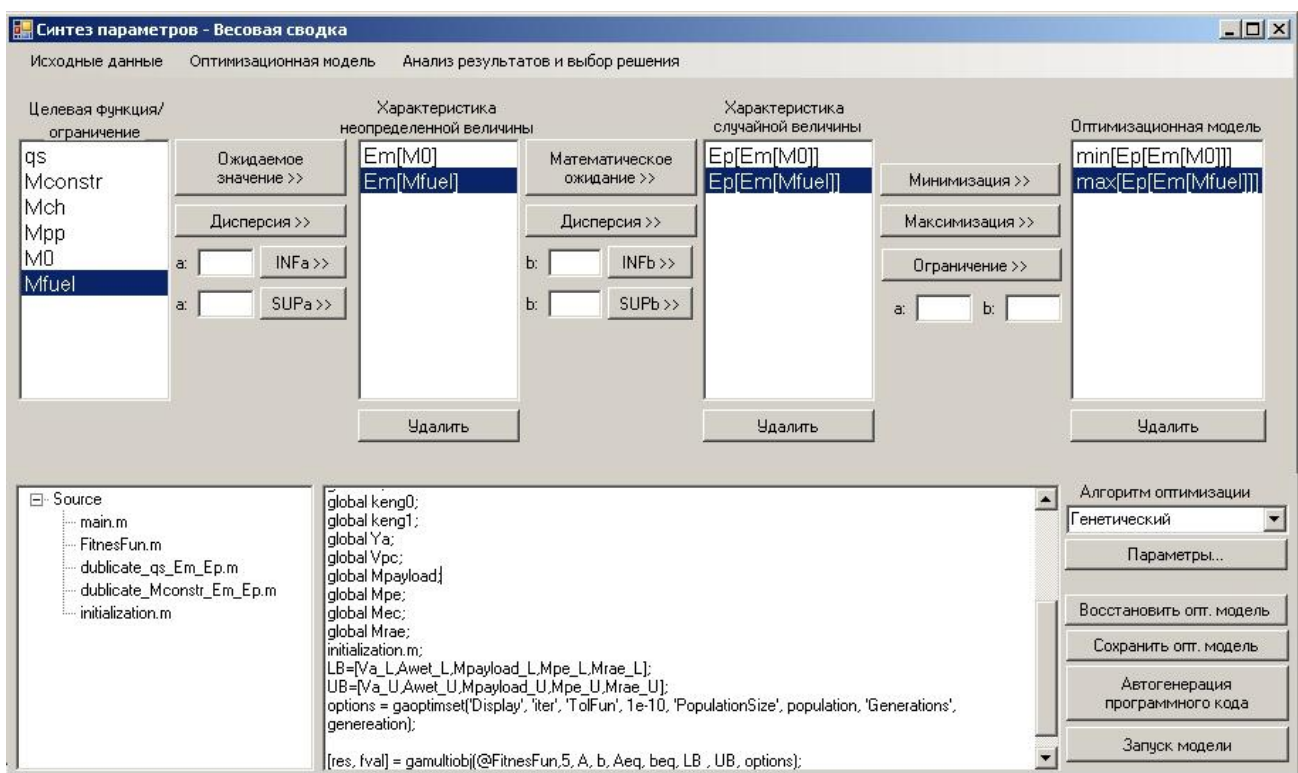


Рис. 3. Построение оптимизационной модели

Примечание: скриншот автора.

Построение оптимизационной модели с использованием прототипа инструментальной программной среды состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Из введенных ранее аналитических выражений выбираются целевые функции и ограничения.

Шаг 2. Для целевых функций выбираются их числовые характеристики как неопределенных величин.

Шаг 3. Для характеристик, сформированных на предыдущем шаге, выбираются их числовые характеристики как случайных величин.

Шаг 4. Для полученных числовых характеристик целевых функций, зависящих от неопределенных и случайных параметров, выбираются условия оптимизации – максимизация или минимизация. Для ограничений задаются уровни меры неопределенности (степени уверенности) и вероятности их выполнения.

После построения оптимизационной модели выбирается алгоритм оптимизации, задаются его параметры и генерируется программный код, который представляет собой совокупность программных модулей и функций на языке Matlab. Этот программный код содержит алгоритм для выполнения расчетов по построенной оптимизационной модели и может выполняться непосредственно в инструментальной программной среде или использоваться для интеграции в другие проблемно-ориентированные программные средства.

Этап 3. После выполнения оптимизационных расчетов с использованием программного кода, сгенерированного прототипом инструментальной программной среды, ЛПР переходит к анализу полученных проектных решений (рис. 4).

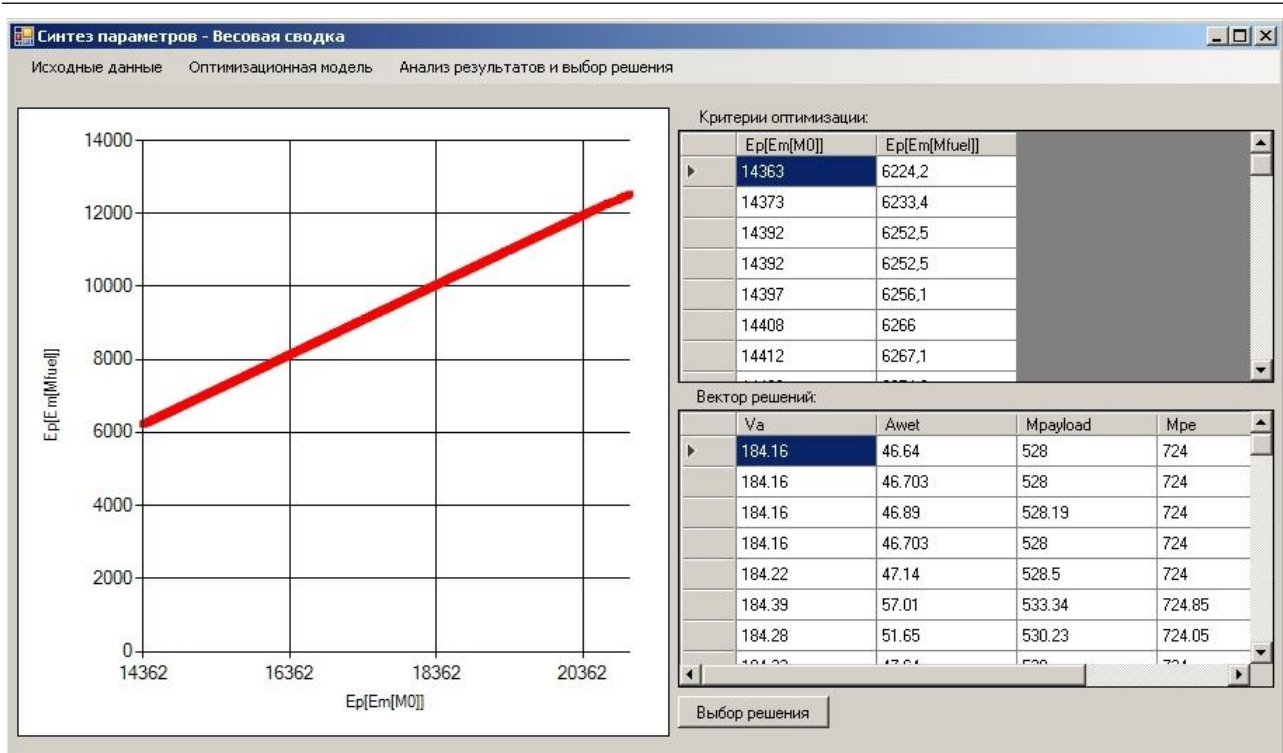


Рис. 4. Анализ результатов выполнения оптимизационных расчетов

Примечание: скриншот автора.

Для многокритериальных оптимизационных моделей формируется Парето-фронт, который представляется в табличной и графической формах и используется для выбора проектных решений.

С использованием разработанного прототипа инструментальной программной среды были созданы оптимизационные модели для синтеза:

- параметров силовой установки маневренного самолета [16];
- весовых параметров пассажирского самолета [11].

Эти оптимизационные модели с неопределенными входными и оптимизируемыми параметрами позволили обеспечить надежность и робастность проектных решений.

Заключение

Созданы теоретическая и алгоритмическая основы нового класса подсистем САПР для параметрического синтеза, позволяющие сократить время проектирования и достичь улучшенных показателей качества проектируемых технических объектов. Разработаны методология построения и прототип инструментальной программной среды для решения оптимизационных задач синтеза параметров технических объектов на основе обработки экспертной и статистической информации. Прикладные исследования с использованием разработанного прототипа инструментальной программной среды показали эффективность его применения для решения задач параметрического синтеза проектных решений на этапах предварительного проектирования технических объектов.

Литература

1. Вересников Г. С., Панкова Л. А., Пронина В. А. Разработка инструментальной программной среды для решения задач параметрического синтеза при проектировании технических объектов в условиях неопределенности параметров // Автоматизация в промышленности. 2019. № 12. Р. 34–39.

2. Бурнаев Е., Губарев Ф., Морозов С., Прохоров А., Хоминич Д. Многодисциплинарная оптимизация, анализ данных и автоматизация инженерных расчетов с помощью программного комплекса pSeven // CAD/CAM/CAE Observer. 2014. № 4 (88). С. 56–61.
3. CAE-based Robust Design Optimization. optiSLang. URL: <http://www.dynardo.de/en/software/optislang.html> (дата обращения: 21.04.2020).
4. Maji P. K., Biswas R., Roy A. R. Soft Set Theory // Computers & Mathematics with Applications. 2003. Vol. 45. P. 555–562.
5. Вагенкнехт М., Язенин А. В. Возможностная оптимизация. Тверь : ТвГУ, 2012. 140 с.
6. Alefeld G., Mayer G. Interval Analysis: Theory and Applications // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2000. Vol. 121. P. 421–464.
7. Hájek A. Interpretations of Probability // The Stanford Encyclopedia of Philosophy: 2002–2019. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/probability-interpret/> (дата обращения: 21.04.2020).
8. Zimmerman H-J. Fuzzy Set Theory and Applications. 4-th rev. ed. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001. 525 p.
9. Qin H., Max A. Complete Model for Evaluation System Based on Interval-Valued Fuzzy Soft Set // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 35012–35028.
10. Liu B. Uncertainty Theory. 4-th ed. Berlin : Springer-Verlag, 2015. 487 p.
11. Veresnikov G. S., Pankova L. A., Pronina V. A. Models of Uncertain-Random Programming // Advances in Systems Science and Applications. 2019. Vol. 19, No. 2. P. 8–22.
12. Veresnikov G. S., Pankova L. A., Pronina V. A. Preliminary Design with the Epistemic Uncertainty of Parameters // Advances in Systems Science and Applications. 2018. Vol. 18, No. 3. P. 154–164.
13. Ногин В. Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. М. : Физматлит, 2015. 236 с.
14. Кандырин Ю. В. Многокритериальный анализ, выбор и структурирование вариантов в САПР. М. : Изд-во МЭИ, 2013. 320 с.
15. Захаров А. О. Сужение множества Парето на основе взаимно зависимой информации замкнутого типа // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 95–109.
16. Veresnikov G. S., Pronina V. A., Pankova L. A., Ogorodnicov O. V., Ikryanov I. I. Determining Maneuverable Aircraft Parameters in Preliminary Design Under Conditions of Uncertainty // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 112. P. 1123–1130.