



УДК 004.422.8

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Е. Куренных^a, В.А. Судаков^{b,a}

^a Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

^b Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Российская Федерация

Адрес для переписки: Alex71321@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.11.16, принята к печати 13.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-348-353

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Куренных А.Е., Судаков В.А. Поддержка принятия решений на основе имитационного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 348–353. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-348-353

Аннотация

Предложено решение задачи выбора лучшего варианта имитационной модели из конечного множества альтернатив в процессе поддержки принятия решений. Для оценки вариантов решений используются методы многокритериального анализа альтернатив. Дана теоретико-множественная формализация процедуры интеграции имитационных моделей и моделей поддержки принятия решений. Решена задача выбора рационального набора параметров имитационной модели с учетом задаваемых пользователем ограничений, путем применения эвристического метода оптимизации на базе локальной стратегии поиска. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, образующее отдельный модуль в системе поддержки принятия решений «Космос», что дает возможность ранжировать альтернативы, представленные имитационными моделями. Архитектура программного обеспечения разработана в объектно-ориентированной парадигме. Для реализации системы использованы языки программирования C# и T-SQL. В совокупности с клиент-серверной архитектурой по технологии тонкого клиента это обеспечивает полную кроссплатформенность и дает пользователю свободу в выборе аппаратного и программного обеспечения для взаимодействия с системой. Система поддержки принятия решений «Космос» позволяет оценить результаты имитационного моделирования с использованием как традиционных подходов к ранжированию альтернатив на базе взвешенной суммы, мультипликативной свертки, идеальной точки, так и нечетких и гибридных подходов определения предпочтений лица, принимающего решения. Предлагаемое программное обеспечение является полностью независимым от предметной области, что позволяет решать с его помощью научно-технические задачи как гражданского, так и военного назначения.

Ключевые слова

поддержка принятия решений, имитационное моделирование, многокритериальность, рационализация, клиент-серверная архитектура

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 16-01-00571-а.

DECISION SUPPORT BASED ON SIMULATION

A.E. Kurennykh^a, V.A. Sudakov^b

^a Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

^b Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Alex71321@yandex.ru

Article info

Received 21.11.16, accepted 13.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-348-353

Article in Russian

For citation: Kurennykh A.E., Sudakov V.A. Decision support based on simulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 348–353 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-348-353

Abstract

The paper deals with a possible solution to the problem of choosing the best variant of a simulation model from a finite set of alternatives in the process of decision-making support. Evaluation of possible solutions is carried out via methods of multi-criteria analysis of alternatives. The integration of simulation models and models of decision support is set-theoretically

formalized. The problem of choosing the rational set of simulation model parameters, considering restrictions imposed by experts, is solved by heuristic optimization method based on the local search strategy. Developed algorithms and software form a separate module in the decision support system (DSS) "Space" that makes it possible to rank alternatives submitted by simulation models. DSS software architecture is developed by means of object-oriented paradigm and is built of C# and T-SQL code. Combined with client-server model via thin-client architecture it gives additional flexibility to the users due to their option preferences of hardware and software. DSS "Space" allows ranking of simulation results using both traditional methods, such as weight and multiplicative function, ideal value and fuzzy and hybrid models of user's preferences identification. Designed software allows applying it for variable scientific and technical civil and military problems due to its universality.

Keywords

decision support, simulation, multicriteriality, rationalization, client-server architecture

Acknowledgements

This project was supported by the RFBR, 16-01-00571-a

Введение

Имитационное моделирование является мощным средством, заменяющим натурные эксперименты, когда они невозможны или слишком дорого обходятся. С помощью имитационной модели (ИМ) можно пронаблюдать на компьютере как будет вести себя во времени та или иная система, которая на данный момент, возможно, существует только «на бумаге». Одним из главных преимуществ компьютерного моделирования является возможность получить достаточное количество статистических данных для того, чтобы с высокой степенью вероятности судить об успешности или провале проектируемой системы, минимизировав при этом затраты. Получаемые при этом статистические оценки принято называть критериями оценки результатов моделирования (КОРМ) [1]. Дополнительное преимущество использования имитационных моделей заключается в возможности применения к задачам, которые невозможно или очень сложно описать или решить в аналитическом виде, т.е., например, охарактеризовать поведение объекта с помощью системы дифференциальных уравнений, получая при этом точные значения всех параметров путем решения этих уравнений. Класс задач, не описываемых аналитическими моделями, действительно велик и требует применения имитационного моделирования как единственного способа всестороннего анализа. Этими задачами, например, могут быть бизнес-процессы, боевые действия или дорожное движение. ИМ, которая, как правило, представляется имитационной программой, функционирует под управлением системы имитационного моделирования (СИМ). Основными задачами СИМ являются отсчет модельного времени, автоматизация процесса проектирования имитационной программы, автоматизация сбора статистики и т.д. На данный момент на рынке представлено множество СИМ. Наиболее распространенной и апробированной является GPSS, некоторые особенности которой рассмотрены в работе [2]. Также стоит отметить СИМ anyLogic, занимающую ведущие позиции в России и мире. На данный момент, с одной стороны, отмечается, что практическое применение имитационных моделей растет, что гарантирует спрос и делает использование имитационного моделирования в поддержке принятия решений актуальной задачей [3, 4]. С другой стороны, практически любая научно-техническая задача характеризуется сотнями критериев, а порой их количество может исчисляться тысячами. В случае ИМ этими критериями являются и входные (параметры), и выходные данные (КОРМ). Такая размерность вектора критериев делает невозможным «ручной» анализ альтернатив, что требует внедрения системы поддержки принятия решений (СППР) с многокритериальными методами ранжирования. Одной из таких является СППР «Космос», подробно описанная в работах [5–13]. Внедрение возможности ранжирования альтернатив, в качестве которых выступают имитационные модели, позволит существенно упростить выбор наилучшего варианта проектируемой системы.

Постановка и формализация задачи

Пусть имеется задача поддержки принятия решения, которую можно охарактеризовать следующими составляющими:

- задача (в общем случае их может быть несколько) – некий объект (система или процесс) реального мира, который необходимо исследовать на предпроектной стадии;
- множество альтернатив – объекты, каждый из которых представлен уникальной имитационной моделью (уникальные структура модели и параметры), подлежащие ранжировке, среди которых лицо, принимающее решения (ЛПР), выбирает рациональное решение;
- множества параметров имитационной модели, а также оценок ее выходных характеристик.

Для формализации задачи можно ввести следующие обозначения.

Пусть дано множество задач \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \{\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_i, \dots, \mathbf{T}_n\}, i = \overline{1, n}.$$

Для каждой задачи \mathbf{T}_i , предполагающей использование имитационного моделирования, дано свое подмножество альтернатив \mathbf{A}_i :

$$\mathbf{A}_i = \{\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ij}, \dots, \alpha_{im}\}, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m},$$

где α_{ij} – j -я альтернатива для i -й задачи;

$$\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_i, \dots, \mathbf{M}_n\}, i = \overline{1, n}$$

– множество имитационных моделей, соответствующих каждому из подмножеств альтернатив так, что каждому подмножеству альтернатив \mathbf{A}_i соответствует множество \mathbf{M}_i моделей, где

$\mathbf{M}_i = \{\mu_1(\mathbf{A}_1, \mathbf{E}_1), \mu_2(\mathbf{A}_2, \mathbf{E}_2), \dots, \mu_j(\mathbf{A}_j, \mathbf{E}_j), \dots, \mu_m(\mathbf{A}_m, \mathbf{E}_m)\}, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$, μ_j – вариант имитационной модели,

$$\mathbf{A}_j = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l, \dots, \lambda_{k_j}\}, l = \overline{1, k_j}; j = \overline{1, m};$$

$$\mathbf{E}_j = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_s, \dots, \xi_{v_j}\}, l = \overline{1, v_j}; j = \overline{1, m},$$

\mathbf{A}_j – множество параметров модели (входных данных), а \mathbf{E}_j – множество оценок характеристик ее функционирования (выходных данных).

Таким образом, требуется программно реализовать соответствие между объектами $\mathbf{T}, \mathbf{A}, \mathbf{M}, \mathbf{A}$ и \mathbf{E} . С учетом того, что задание соответствия между \mathbf{T} и \mathbf{A} в СППР «Космос» уже реализовано, задача сводится к связыванию множеств $\mathbf{A}, \mathbf{M}, \mathbf{A}$ и \mathbf{E} , т.е. соотношению

$$\forall \alpha_j (\alpha_j \in \mathbf{A}_i) \exists \mu_j (\mathbf{A}_j, \mathbf{E}_j) [\mu_j \in \mathbf{M}_i], i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}.$$

Также отдельно можно рассмотреть задачу рационализации ИМ – задачу подбора рационального вектора параметров моделируемой системы.

Пусть:

n – количество параметров имитационной модели;

m – количество оценок числовых характеристик процесса функционирования моделируемой системы;

$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}, i = \overline{1, n}$ – вектор параметров имитационной модели;

$\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m\}, j = \overline{1, m}$ – вектор оценок числовых характеристик процесса функционирования системы;

$$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}, i = \overline{1, n},$$

где a_i – ограничение слева на количество используемых ресурсов в моделируемой системе;

$$\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\}, i = \overline{1, n},$$

где b_i – ограничение справа на количество используемых ресурсов в моделируемой системе.

С учетом введенных обозначений формализованная запись задачи оптимизации (рационализации) имеет вид

$$\max_{\mathbf{X}} \{y_j = f(\mathbf{X})\}$$

или, в зависимости от предпочтений пользователя, может быть

$$\min_{\mathbf{X}} \{y_j = f(\mathbf{X})\},$$

где под $f(\mathbf{X})$ подразумевается преобразование имитационной программой вектора ее параметров в одну из выходных характеристик y_j , которую пользователь выбрал в качестве целевой функции.

Ограничение:

$$x_i \leq b_i, (i = \overline{1, n})$$

$$x_i \geq a_i, (i = \overline{1, n}),$$

которое в частном случае может иметь вид $x_i \geq 0, (i = \overline{1, n})$.

Это одна из наиболее общих формализованных постановок оптимизационной задачи [14].

Следует отметить, что в большинстве практических задач $m > 1$. Иначе говоря, оптимизируемая задача относится к разряду многокритериальных. Для ее решения в рамках СППР «Космос» реализован гибридный метод выявления предпочтений [11, 12]. Данный метод позволяет учесть зависимость по предпочтениям, не требует существенных затрат времени на построение пользователем функций предпочтений, работает с векторным критерием произвольной размерности. Пользователь выделяет в пространстве критериев непересекающиеся области. Для них задается строгое отношение предпочтения. В практических задачах ранжирования альтернатив часто несколько недоминируемых альтернатив попадают в одну область. В этом случае предлагается воспользоваться количественным методом сопоставления альтернатив внутри заданной области. В настоящее время существует и открытая программная реализация гибридного метода анализа альтернатив в рамках веб-сервисов поддержки принятия решений на сайте ws-dss.com.

Программная реализация

Программная реализация предложенных алгоритмов выполнена с использованием объектно-ориентированного языка C# и DDL/DML языка SQL. Выбор платформы .Net обусловлен ее общностью как для самой СППР «Космос», так и для использованной в данной работе системы имитационного моделирования «СИМ-C#». Выбранный подход обладает рядом преимуществ, обусловленных тем, что взаимодействие обеспечивается на уровне Common Language Runtime (CLR) платформы .Net [15]. Однако

имеются и некоторые недостатки, связанные с тем, что язык C#, как и платформа .Net, является проприетарным программным обеспечением (ПО).

Другой особенностью разработанного ПО является клиент-серверная архитектура, которая дает относительную свободу конечному пользователю СППР, позволяя выбирать необходимые прикладное и системное ПО с учетом желания заказчика, и, что самое важное, не требует высокой вычислительной мощности на автоматизированном рабочем месте. На рис. 1 представлена схема классов, которые используются в СППР для ранжирования альтернатив, расчетов, а также некоторые из вспомогательных классов, обеспечивающих взаимодействие пользователя с системой.



Рис. 1. Схема основных классов программного обеспечения системы поддержки принятия решений «Космос»

Классы *task* и *alternative* служат для работы с задачами и альтернативами соответственно. Классы *criteria*, *pair_crit_comp*, *crit_value*, *preference* и прочие используются для работы с критериями альтернатив и способами их оценивания. Класс *Ranking* содержит в себе методы и поля, необходимые для выполнения главной задачи СППР – ранжирования альтернатив.

Применение разработанного программного обеспечения

Результаты использования имитационного моделирования в процессе поддержки принятия решений можно проиллюстрировать на примере системы массового обслуживания (СМО) (рис. 2), для которой были выделены параметры и критерии оценки результатов моделирования, модельные события, а также была построена имитационная программа, которая описывает функционирование данной СМО во времени.

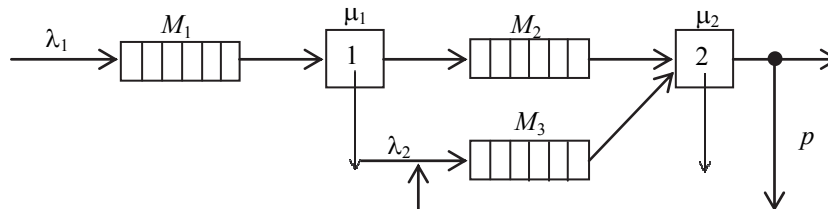


Рис. 2. Структурная схема системы массового обслуживания, использованной в тестовом примере

На схеме квадратами «1» и «2» обозначены каналы обслуживания с заданными для них интенсивностями обслуживания μ_1 и μ_2 соответственно, прямоугольниками обозначены очереди, длина которых ограничена и задана величинами M_i ($i = \overline{1,3}$) и в которых могут находиться заявки, ожидающие обслуживания. Также заданы интенсивности входных потоков λ_1 и λ_2 , заявки из которых поступают в очереди, и вероятность p , с которой заявке может потребоваться дообслуживание после прохождения второго канала обслуживания. По результатам прогона имитационной модели собирается статистика по занятости каналов обслуживания, длинам очередей и потерям заявок при входе в очередь (рис. 3).

Ранги альтернатив

| Наименование | вероятность необходимости дообслуживания | время прогона | длина очереди 1 | длина очереди 2 | длина очереди 3 | интенсивность входа 1 | интенсивность входа 2 | интенсивность обслуживания 1 | интенсивность обслуживания 2 | Оценка вероятности занятости КО1 | Оцен. вероятн. занят. КО2 |
|--|--|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| тест с привязкой модели | 0,55 | 240 | 3 | 4 | 5 | 5 | 8 | 0,25 | 0,4 | 0,741327 | 0,9405 |
| тест с привязкой модели Оптимизированная | 0,1 | 240 | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 0,7 | 0,3 | 0,317697 | 0,987 |

Рис. 3. Альтернативы модели системы массового обслуживания и числовые значения некоторых критериев

При запуске процедуры ранжирования для каждой альтернативы будет высчитан соответствующий ранг, численное значение которого можно посмотреть при необходимости, а сами альтернативы будут упорядочены в соответствии с их рангами (рис. 4). Полагаясь на это упорядочение – вверху списка находится альтернатива, наилучшим образом удовлетворяющая требованиям и предпочтениям эксперта – ЛПР может делать выводы о целесообразности реализации на практике того или иного варианта системы.

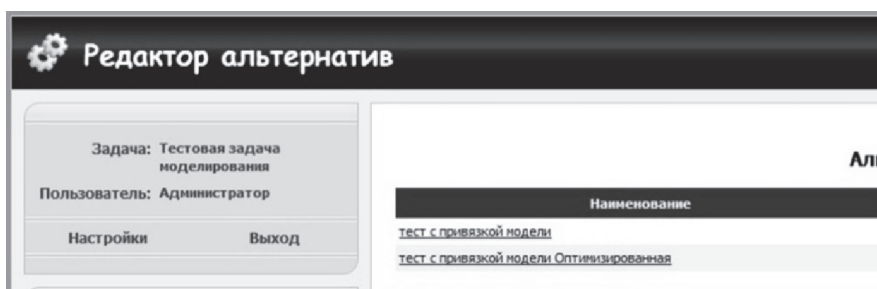


Рис. 4. Ранжировка альтернатив

Заключение

В описанном проекте разработано программное и алгоритмическое обеспечение для поддержки принятия решений на основе имитационного моделирования, а также реализован эвристический метод рационализации параметров имитационной модели. Представленный программный продукт нашел применение для оценки эффективности сил общего назначения, а также актуален для моделирования программ экспериментов на российском сегменте Международной космической станции [16].

Литература

1. Хахулин Г.Ф. Основы конструирования имитационных моделей. М.: НПК Поток, 2002. 209 с.
2. Алиев Т.И. Погрешности моделирования высоконагруженных систем в GPSS WORLD // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. №1 (83) С. 70–75.
3. Борщев А.В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз // Сборник трудов VII всероссийской конференции "Имитационное моделирование. Теория и практика". Москва, 2015. С. 14–22.
4. Куренных А.Е., Судаков В.А. Подсистема имитационного моделирования в СППР «Космос» // Сборник тезисов докладов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2016.
5. Осипов В.П., Судаков В.А., Хахулин Г.Ф. Информационные технологии формирования этапной программы научно-прикладных исследований на российском сегменте Международной космической станции // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. №12. С. 24–28.
6. Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Предпосылки унификации программных средств поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2013. №3. С. 147–150.
7. Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А., Трахтенгерц Э.А., Загребев Б.В. Методологические основы поддержки принятия решений при планировании научно-прикладных исследований и экспериментов на международной

References

1. Khakhulin G.F. *Fundamentals of Simulation Models Design*. Moscow, Potok Publ., 2002, 209 p. (In Russian)
2. Aliev T.I. Simulation errors of high-loaded systems in GPSS world. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 1, pp. 70–75. (In Russian)
3. Borschchev A.V. Simulation modeling: the state on 2015, trends and prediction. *Proc. VII All-Russian Conference on Simulation Modeling – Theory and Practice*. Moscow, 2015, pp. 14–22. (In Russian)
4. Kurennykh A.E., Sudakov V.A. Simulation subsystem in the DSS "Cosmos". *Proc. V All-Russian Congress of Young Scientists*. St. Petersburg, 2016. (in Russian)
5. Osipov V.P., Sudakov V.A., Khakhulin G.F. Information technology of forming scientific and applied research stage program on the Russian segment of ISS. *Herald of Computer and Information Technologies*, 2012, no. 12, pp. 24–28. (In Russian)
6. Osipov V.P., Sivakova T.V., Sudakov V.A. The background for decision support tools software unification. *Programmnye Produkty i Sistemy*, 2013, no. 3, pp. 147–150. (In Russian)
7. Osipov V.P., Sivakova T.V., Sudakov V.A., Trakhtengerts E.A., Zagreev B.V. Methodological base of support decision-making in the planning of scientific and applied research and experiments on the International Space Station (ISS). *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 80–88. (In Russian)
8. Osipov V.P., Zagreev B.V., Sudakov V.A. A decision support system for developing programs of scientific and applied

- космической станции (МКС) // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С. 80–88.
8. Осипов В.П., Загребев Б.В., Судаков В.А. Система поддержки принятия решений для формирования программ исследований на МКС // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 10. С. 28–41.
 9. Судаков В.А., Хахулин Г.Ф. Процедура дискретизации шкал критериев и ее применение для оценки прикладного эффекта космических экспериментов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 1. С. 3–6.
 10. Батьковский А.М., Нестеров В.А., Судаков В.А., Фомина А.В. Развитие инструментария оценки экономического эффекта инфраструктурных проектов в оборонно-промышленном комплексе // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 124–135.
 11. Ескин В.И., Судаков В.А. Автоматизированная поддержка решений с использованием гибридной функции предпочтений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 3. С. 116–124.
 12. Нестеров В.А., Обносков Б.В., Судаков В.А. Многокритериальная оценка военной техники с использованием гибридной функции предпочтений на примере беспилотных летательных аппаратов // Вооружение и экономика. 2015. № 4(33). С. 55–66.
 13. Zagreev B.V., Osipov V.P., Sudakov V.A. A decision support system (DSS) for developing programs of scientific and applied research and experiments on the Russian segment of the ISS // Proc. 5th European Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2013). Munich, Germany, 2013.
 14. Хахулин Г.Ф., Красовская М.А., Булыгин В.С. Теоретические основы автоматизированного управления (задачи, методы, алгоритмы теории оптимального планирования и управления). М.: МАИ, 2005. 395 с.
 15. Хахулин Г.Ф., Монахов С.В., Евсюков А.А., Судаков В.А., Ескин В.И. Принципы создания и использования объектно-ориентированной системы имитационного моделирования СИМ С#. М.: МАИ, 2015.
 16. Куренных А.Е., Судаков В.А. Имитационное моделирование в СППР «Космос» // Сборник трудов XXVIII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов. Москва, 2017. С. 362–364.
 - research and experiments on the Russian segment of the ISS. *Polet. Obshcherossiiskii Nauchno-Tekhnicheskii Zhurnal*, 2013, no. 10, pp. 28–41. (In Russian)
 9. Sudakov V.A., Khakhulin G.F. Criteria scales discretization procedure and its application for space experiments direct effect. *Herald of Computer and Information Technologies*, 2015, no. 1, pp. 3–6. (In Russian)
 10. Batkovsky A.M., Nesterov V.A., Sudakov V.A., Fomina A.V. The development of tools to assess the economic effect of infrastructure projects in the military-industrial complex. *Questions of Radio-Electronics*, 2016, no. 7, pp. 124–135.
 11. Eskin V.I., Sudakov V.A. Automated decision support using a hybrid preference function. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2014, no. 3, pp. 116–124.
 12. Nesterov V.A., Obnosov B.V., Sudakov V.A. Multi-criteria evaluation of military equipment with hybrid function preferences for example, unmanned aerial vehicles. *Vooruzhenie i Ekonomika*, 2015, no. 4, pp. 55–66.
 13. Zagreev B.V., Osipov V.P., Sudakov V.A. A decision support system (DSS) for developing programs of scientific and applied research and experiments on the Russian segment of the ISS // *Proc. 5th European Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2013)*. Munich, Germany, 2013.
 14. Khakhulin G.F., Krasovskaya M.A., Bulygin V.S. *Theoretical Foundations of Automated Control (Tasks, Methods, Algorithms for Optimal Planning and Control Theory)*. Moscow, MAI Publ., 2005, 395 p. (In Russian)
 15. Khakhulin G.F., Monakhov S.V., Evsyukov A.A., Sudakov V.A., Eskin V.I. *Principles of Creating and Using an Object-Oriented Simulation System SIM C#*. Moscow, MAI Publ., 2005. (In Russian)
 16. Kurennykh A.E., Sudakov V.A. Simulation modeling in the DSS "Cosmos". *Proc. XXVIII Int. Innovation-Oriented Conf. of Young Scientists and Students*. Moscow, 2017, pp. 362–364. (In Russian)

Авторы

Куренных Алексей Евгеньевич – студент, инженер, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, Alex71321@yandex.ru

Судаков Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Российская Федерация; доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, sudakov@keldysh.ru

Authors

Alexey E. Kurennykh – student, engineer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, Alex71321@yandex.ru

Vladimir A. Sudakov – D.Sc., Associate Professor, leading researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047, Russian Federation; Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, sudakov@keldysh.ru