

# **Оптимизация характеристик сложного технического изделия на этапе проектирования**

## **Optimization of the Characteristics of a Complex Technical Product at the Design Stage**

УДК 65.01

Получено: 15.03.2022

Одобрено: 04.04.2022

Опубликовано: 25.06.2022

### **Дубовский В.А.**

Канд. техн. наук, преподаватель Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева.

e-mail: dubovskiy@inbox.ru

### **Dubovsky V.A.**

Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Military Academy of Logistics. Army General A.V. Khruleva

e-mail: dubovskiy@inbox.ru

### **Кузнецов А.В.**

адъюнкт Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева

e-mail: apollo181@mail.ru

### **Kuznetsov A.V.**

Adjunct of the Military Academy of Logistics. Army General A.V. Khruleva

e-mail: apollo181@mail.ru

### **Пак А.Ю.**

Канд. экон. наук, доцент кафедры таможенного дела Российского университета дружбы народов

e-mail: ay.pak@yandex.ru

### **Pak A.Yu.**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Customs, Peoples' Friendship University of Russia

e-mail: ay.pak@yandex.ru

### **Сысуюев С.Ю.**

Канд. военных наук, Михайловская военная артиллерийская академия, доцент

### **Sysuev S.Yu.**

Candidate of Military Sciences, Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Associate Professor

### **Аннотация**

В статье изложены некоторые аспекты формализации и оптимизации характеристик сложных технических изделий. Доказана необходимость «параллельного» совершенствования составных частей при оптимизации характеристик изделия. Предложено использовать системный подход в качестве основы для данных процессов,

также в общем виде сформулирована задача оптимизации характеристик разрабатываемого изделия.

**Ключевые слова:** техническое задание, сложное техническое изделие, системный подход, требования, разработка.

### **Abstract**

The article describes some aspects of formalization and optimization of the characteristics of complex technical products. The necessity of "parallel" improvement of components while optimizing the characteristics of the product is proved. It is proposed to use a systematic approach as the basis for these processes, and the problem of optimizing the characteristics of the product being developed is also formulated in general terms.

**Keywords:** terms of reference, complex technical product, system approach, requirements, development.

Современный уровень научно-технического прогресса и уровень развития инноваций позволяют создавать и в последующем эксплуатировать сложные технические изделия (СТИ) различного назначения с высокими конструктивно-эксплуатационными показателями. Однако качественное решение этих задач, а также сокращение сроков разработки может быть обеспечено только при условии широкого внедрения математических методов и автоматизированной системы управления на всех стадиях проектирования и испытания СТИ.

Известно множество публикаций в данной предметной области, среди них работы ученых и специалистов в области управления жизненным циклом сложных технических изделий, таких как: А.И. Буравлев [1], Ю.Л. Вященко [2], А.С. Афанасьев [2], Д.П. Гасюк [3], В.Н. Половинкин [4], А.В. Дышкантюк [4], Л.А. Мартыщенко [5], А.Е. Филюстин [5] и мн. др. При их несомненной теоретической ценности и практической значимости, следует отметить, что постановка задачи оптимизации характеристик в них не нашла должного рассмотрения.

В этой связи данная задача и порядок ее решения представляется актуальными. Вербально она может быть сформулирована следующим образом. Необходимо определить оптимальные значения конструктивно-эксплуатационных характеристик СТИ или отдельных его элементов, которые обеспечивают экстремум принятой целевой функции, определяющей основной критерий качества образца, и реализацию установленных тактико-техническим заданием (ТТЗ) требований при заданных условиях его эксплуатации [6 - 13].

Корректное решение рассматриваемых задач оптимизации возможно только на основе системного подхода, т.е. при формализации должны учитываться условия эксплуатации СТИ, сложившаяся или предполагаемая система технического обслуживания, характеристики других систем или изделий, с которыми взаимодействует разрабатываемое изделие или его элементы [14 - 19]. При этом СТИ должно рассматриваться как сложная система, состоящая из множества подсистем и имеющая, как правило, многоэтапный процесс функционирования [20 - 27]. Это приводит к необходимости решения задачи оптимизации в несколько взаимоувязанных этапов, каждый из которых обычно реализуется на основе своего специфического алгоритма [28 - 36]. Иными словами, процесс решения подобных задач должен иметь сложную иерархическую структуру (рис. 1).

На верхнем уровне производится оптимизация характеристик системы в целом, на основе чего разрабатываются ТТЗ и техническое задание (ТЗ) на отдельные подсистемы, которые принимаются в качестве исходных данных для формулировки и решения задач оптимизации характеристик подсистем, рассматриваемых на более низких иерархических уровнях. На основе результатов взаимного согласования характеристик отдельных подсистем и системы в целом, а также проверки их

соответствия заданным ТТЗ (ТЗ) могут проводиться повторные решения задач оптимизации после корректировки условий их постановки (целевых функций, ограничений, принципиальных схем конструкций, математических моделей) или ТЗ на разработку подсистем. Найденные в результате решения задачи характеристики подсистем и системы в целом должны быть полностью согласованы между собой, обеспечивать экстремумы выбранных критериев качества СТИ и соответствовать заданным в ТТЗ требованиям.

Следует отметить, что многоэтапность и иерархичность структуры процесса оптимизации характеристик СТИ связаны не только с тем, что разрабатываемое изделие представляет собой сложную систему, но также и с тем, что проектирование отдельных систем осуществляется, как правило, различными организациями, которые в итоге совместно с головными предприятиями должны создать изделие как единое целое с высокими качественными показателями.

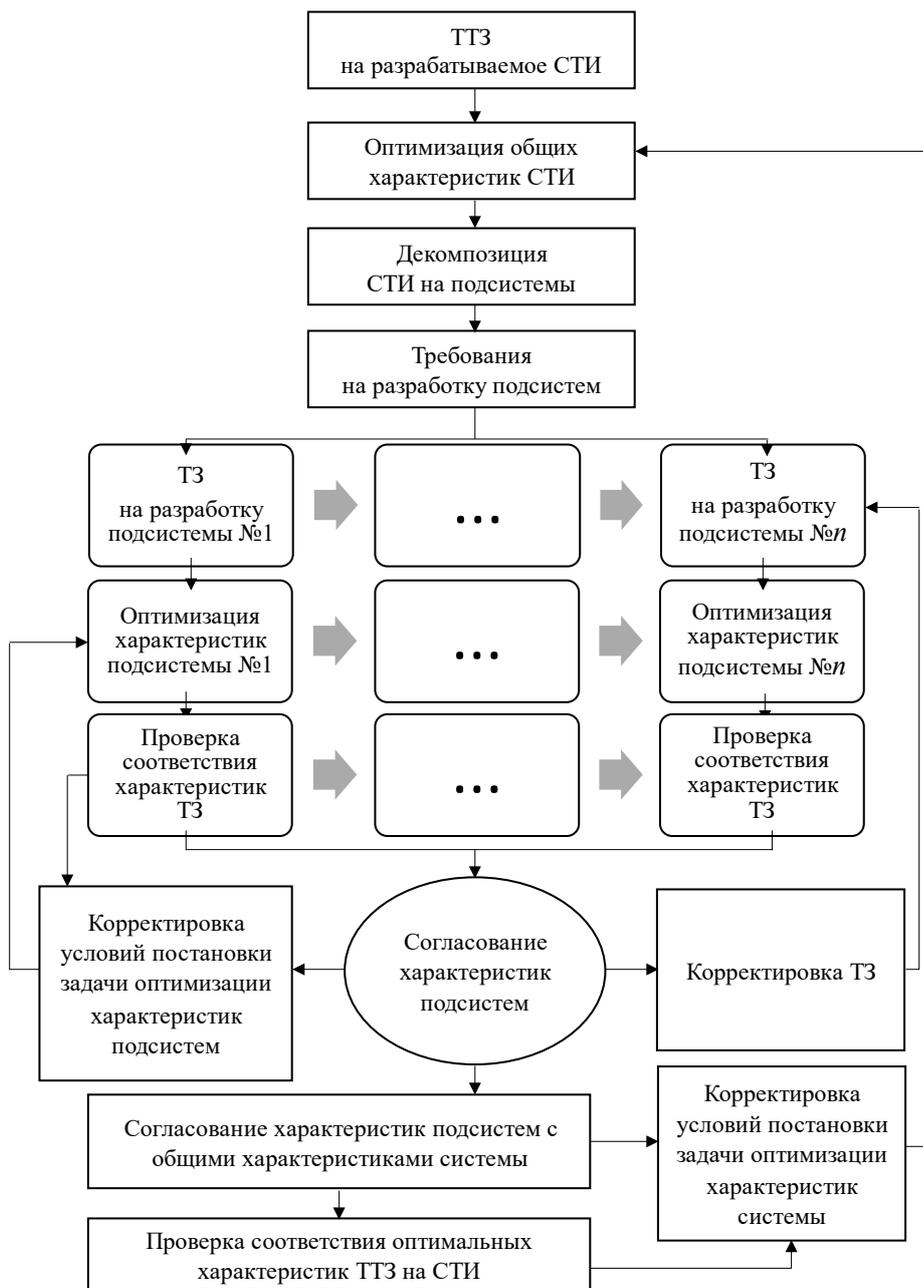
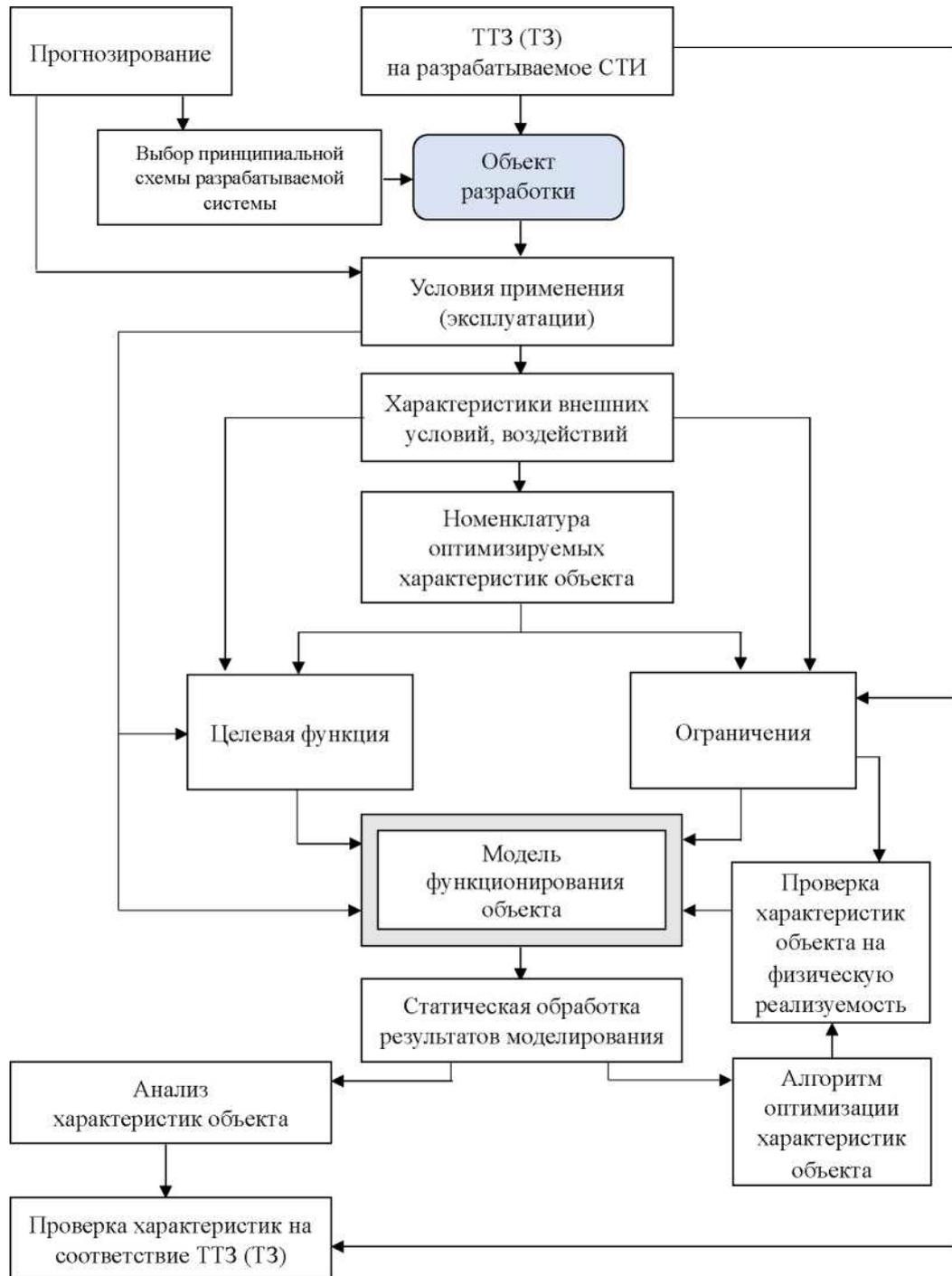


Рис. 1. Содержание процесса оптимизации характеристик СТИ

Решение задач оптимизации характеристик изделия (или отдельных его подсистем) также представляет собой сложный многоэтапный процесс (рис. 2), который включает: постановку и математическую формулировку задачи; решение оптимизационной задачи; анализ полученных результатов.



**Рис. 2.** Порядок оптимизации характеристик объектов СТИ

При постановке задачи оптимизации на основе ТТЗ, исходя из назначения СТИ, определяется объект разработки, из ряда возможных альтернативных вариантов выбирается его целесообразная (или оптимальная) принципиальная схема, проводится анализ предполагаемых (прогнозируемых) условий эксплуатации изделия и устанавливаются характеристики внешних воздействий и возмущений  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Определяется номенклатура основных характеристик, проектных

параметров изделия  $\bar{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ , оптимальные значения которых требуется найти. На основе анализа назначений, условий эксплуатации системы и ТТЗ (ТЗ) на ее разработку формируется критерий качества системы, т.е. целевые функции задачи оптимизации.

$$\phi = f_1(\bar{x}, \bar{y}). \quad (1)$$

Определяются ограничивающие условия в виде функциональных  $G(\bar{x}, \bar{y})_i \leq a_i$  или параметрических  $b_{1j} \leq x_j \leq b_{2j}$  неравенств. При этом константа  $a_i$  и  $b_j$  определяются ТТЗ (ТЗ), условиями эксплуатации СТИ и опытом разработки аналогичной продукции.

На этапе постановки задач оптимизации должна быть разработана математическая модель, с достаточной полнотой и точностью описывающая процесс функционирования изделия и связывающая ее выходные характеристики  $\bar{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$  с оптимизируемыми параметрами  $\bar{y}$  и возмущениями  $\bar{x}$  с помощью функциональных зависимостей или систем уравнений (алгебраических, дифференциальных, интегральных)

$$\bar{z} = f_2(\bar{x}, \bar{y}). \quad (2)$$

Если процесс функционирования разрабатываемого изделия является многоэтапным, то математические модели должны формироваться применительно к каждому этапу.

Таким образом, задача оптимизации характеристик разрабатываемого СТИ в общем виде формулируется следующим образом: найти значения характеристик и проектных параметров  $\bar{y}$  изделия, процесс функционирования которого описывается уравнением вида (2), при условии максимизации (или минимизации) целевой функции  $\phi$  и удовлетворения принятых ограничений.

Исходя из вида и сложности математической модели целевой функции (1), ограничивающих условий, внешних возмущений  $\bar{x}$ , а также числа оптимизируемых параметров  $\bar{y}$ , определяется метод решения уравнений (2) (аналитический, численный, статистических испытаний), разрабатываются алгоритмы статистической обработки результатов моделирования и решения задачи оптимизации.

Задачи оптимизации характеристик отдельных элементов изделия и особенно его подсистем во многих случаях, в частности, при их эскизной обработке, могут быть сформулированы в сравнительно простой форме. При этом для решения указанных задач часто могут успешно применяться аналитические методы оптимизации, которые позволяют не только найти оптимальные значения искомых характеристик, но и определять влияние на них различных факторов.

На практике для получения аналитических решений задач оптимизации характеристик СТИ часто применяются методы исследования функций на экстремум. При этом в случае малого числа оптимизируемых параметров и небольшом числе ограничений может использоваться метод подстановки, когда из ограничивающих условий одни оптимизируемые параметры можно выразить через другие в явном виде. Тогда после подстановки этих зависимостей в критерий качества  $\phi$  удастся его представить как функцию одного из оптимизируемых параметров  $y_s$  в виде

$$\phi = \phi_3(\bar{x}, y_s, a_i, b_j). \quad (3)$$

После чего оптимальное значение находят решением уравнения  $\frac{\partial \phi}{\partial y_s} = 0$ .

Если метод подстановки применить не удастся, то часто аналитическое решение задач оптимизации может быть получено на основе метода множителей Лагранжа, когда из целевой функции  $\phi(\bar{x}, \bar{y})$  и ограничений  $G(\bar{x}, \bar{y})'_i \leq 0$  записывается функция Лагранжа

$$L = \phi(\bar{x}, \bar{y}) + \sum_i v_i G(\bar{x}, \bar{y})'_i, \quad (4)$$

где  $v_i$  – множители Лагранжа.

Оптимальные значения характеристик  $y_s^*$  находятся в результате решения системы уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial y_s} = 0 \quad G(\bar{x}, \bar{y})'_i = 0.$$

После определения оптимальных значений параметров на основе математического моделирования производится подробный анализ конструктивно-эксплуатационных характеристик СТИ при заданных условиях эксплуатации и проверка соответствия его характеристик требованиям ТТЗ (ТЗ).

При отсутствии решения, удовлетворяющего требованиям, т.е. в случае если критериальные требования не удовлетворяются, представляются возможными два варианта действий [37 - 41]:

для разработчика – расширение множества альтернатив проектно-конструкторских решений;

для заказчика – снижение требований (снижение значений характеристик, сокращение набора функций). Вполне очевидно, что данный выбор должен осуществляться с позиций баланса интересов каждой стороны.

Таким образом, на основании изложенного представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Оптимизация характеристик СТИ представляет собой сложный многоаспектный процесс, требующий учета множества факторов.

2. Предложенная процедура позволяет формализовать процесс оптимизации характеристик разрабатываемых и модернизируемых изделий и может послужить теоретическим базисом для внедрения в практику разработки СТИ систем поддержки принятых решений на основе экспертных систем и искусственного интеллекта, содержащим соответствующее обеспечение: математическое (модели процессов функционирования СТИ и его элементов; модели, описывающие порядок действий разработчика, алгоритмы оптимизации характеристик образцов СТИ), программное (программы реализации моделей и алгоритмов на ЭВМ) и информационное (база данных по типовым, стандартным, конструктивным элементам, материалам, ГОСТам, нормам, таблицам допусков, стоимости и т.д.).

3. Наличие единого информационного контура, объединяющего с помощью информационных каналов в единое целое ЭВМ заказчика, головных и смежных разработчиков, исполнителей, наличие в нем единой обеспечивающей базы, возможность концентрации информации в ЭВМ и оперативного ее получения на любых этапах опытно-конструкторских работ позволяют вести систематический контроль за процессом разработки изделий и оказывать активное влияние со стороны заказчика и головных разработчиков, что в итоге позволит повысить обоснованность выбора конструкторских решений и сократить сроки проектирования.

### Литература

1. Буравлев, А.И. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники / А. И. Буравлев, А. А. Пьянков. – Москва: Издательский дом "Граница", 2015. – 304 с. – ISBN 978-5-94691-708-7.
2. Вященко Ю.Л. Системная инженерия, риски, надежность в разработке и производстве изделий военного назначения / Ю. Л. Вященко и др. Балт. гос. техн. ун-т – СПб., 2018. – 572 с.
3. Гасюк Д. П. Функциональное моделирование процессов жизненного цикла вооружения и военной техники / Д. П. Гасюк, В. А. Дубовский, П. А. Дроговоз // Вестник академии военных наук. 2020. № 3 (72). – С. 105-112.
4. Половинкин, В.Н. Системный подход к оценке жизненного цикла вооружения ВМФ и методы его реализации / В. Н. Половинкин, А. В. Дышкантюк // Морской сборник. – 2009. – № 7. – С. 23 – 28.
5. Мартыщенко, Л. А. Военно-научные исследования и разработка вооружения и военной техники: учебник Ч-1 / Л. А. Мартыщенко, А. Е. Филюстин, Е. С. Голик, А. А. Клавдиев. – СПб: МО РФ, 1993. – 301 с.

6. *Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М.* Оптимизация внедрения новых технологий в перспективные образцы артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 4 (74). С. 39-44.
7. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Математические модели и методы в управлении развитием сложных технических систем.- Санкт-Петербург, 2004.- 280 с.
8. *Ведерников Ю.В., Гарькушев А.Ю., Сазыкин А.М.* Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного оружия // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 3-4 (69-70). С. 66-75.
9. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Кежаев В.А., Свертилов Н.И., Шатохин Д.В.* Методы и модели стандартизации и унификации в управлении развитием военно-технических систем.- Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации; 2004.- 279 с.
10. *Чварков С.В.* Модель планирования процессов производства ракетно-артиллерийского вооружения / *С.В. Чварков [и др.]* // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. № 3 (103). С. 141-147.
11. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Афонин П.Н., Гапов М.Р., Сауренко Т.Н.* Модель и метод оптимизации решений при управлении развитием технических средств таможенного контроля // В сборнике: Таможенные чтения - 2017. Современная наука и образование на страже экономических интересов Российской Федерации: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием : В 3 т.. 2017. С. 11-21.
12. *Зегжда П.Д.* Модель формирования программы развития системы обеспечения информационной безопасности организации / *П.Д. Зегжда, Д.П. Зегжда [и др.]* // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2021. № 2 (46). С. 109-117.
13. *Турчак А.А.* Формализация и оптимизация жизненного цикла создания бортовых радиоэлектронных комплексов: монография / *А. А. Турчак, А. Н. Шестун, А. А. Сенцов*; под ред. *Ю. М. Смирнова*. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 294 с.
14. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Герцев В.Н.* Оценивание эффективности системы ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии // Военная мысль. 2001. № 4. С. 39-46.
15. *Anisimov V.G., Zegzhda P.D., Suprun A.F., Anisimov E.G.* The problem of innovative development of information security systems in the transport sector // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Т. 52. № 8. С. 1105-1110.
16. *Тебекин А.В.* Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / *А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.]* // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.
17. *Чварков С.В.* Учет неопределенности при формировании планов инновационного развития военно-промышленного комплекса / *С.В. Чварков [и др.]* // Актуальные вопросы государственного управления Российской Федерации: Сборник материалов круглого стола.- Военная академия генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации, Военный институт (Управления национальной обороной). 2018. С. 17-25.
18. *Васильковский С.А., Сазыкин А.М.* Модель и метод синтеза облика военно-технических систем путем проектной компоновки из унифицированных модулей // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 10-13.
19. *Крикун В.М., Васильковский С.А.* Многоуровневая задача стандартизации технических комплексов // Стандарты и качество. 1992. № 1. С. 30-32.

20. *Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Сауренко Т.Н., Чварков С.В.* Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.
21. *Буг С.В., Коритчук В.В., Сауренко Т.Н.* Модель обоснования программы инновационного развития системы тренажерных комплексов министерства Обороны Российской Федерации // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооружённых Сил Российской Федерации. 2021. № 1 (19). С. 30-42.
22. *Черныш А.Я., Мельник Д.А.* Модель поддержки принятия решений при формировании программ инновационного развития предприятий электротехнической отрасли машиностроения // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. № 4 (118). С. 140-151.
23. *Myasnikov A.V., Konoplev A.S., Suprun A.F., Anisimov V.G., Kasatkin V.V., Los' V.P.* Constructing the model of an information system for the automatization of penetration testing // Automatic Control and Computer Sciences. 2021. Т. 55. № 8. С. 949-955.
24. *Зегжда П.Д.* Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности / *П.Д. Зегжда, А.Ф. Супрун [и др.]* // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 4. С. 45-49.
25. *Тебекин А.В.* Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий / *А. В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.]* // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
26. *Сауренко Т.Н.* Оптимизация параметрических рядов продукции предприятия с учетом случайности рыночного спроса / *Т.Н. Сауренко [и др.]* // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 1. С. 10-16.
27. *Сауренко Т.Н.* Оптимизация параметрических рядов продукции предприятия с учетом случайности рыночного спроса и упущенной выгоды / *Т.Н. Сауренко [и др.]* // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 2. С. 3-9.
28. *Черныш А.Я.* Оценка эффективности перспективных автоматизированных информационно-управляющих систем военного назначения на основе натуральных испытаний / *А.Я. Черныш [и др.]* // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. № 1. С. 37-41.
29. *Анисимов В.Г.* Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем / *В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.]* // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 4. С. 57-62.
30. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б.* Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.
31. *Анисимов В.Г.* Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств / *В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.]* // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 6-12.
32. *Тебекин А.В.* Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций) / *А.В. Тебекин, Т.Н. Сауренко [и др.]* // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 6. С. 55-61.
33. *Гарькушев А.Ю., Гасюк Ю.Д.* Моделирование приемо-сдаточных испытаний ракетно-артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 2 (87). С. 95-100.
34. *Ковальчук А.М., Романюта А.Е., Сазыкин А.М.* Оценка эффективности перспективного вооружения и военной техники на основе натуральных испытаний // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 1 (121). С. 42-46.

35. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г.* Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4 (31). С. 26-31.
36. *Анисимов А.В.* Проблема сравнения и выбора варианта построения системы безопасности / *А.В. Анисимов, А.Е. Анисимов [и др.]* // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Четвертой Всероссийской научно-практической конференции.- Санкт-Петербург: Научно-производственное объединение специальных материалов 2001.- С. 348-351.
37. *Тебекин А.В., Песчанникова Е.Н.* Стохастическая модель динамики частных показателей технических инноваций // Журнал исследований по управлению. 2021. Т. 7. № 1. С. 36-43.
38. *Сауренко Т.Н., Лось В.П.* Оценка эффективности систем защиты компьютерных сетей от вирусных атак // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1 (49). С. 11-17.
39. *Сазыкин А. М., Ковальчук А. М., Романюта А. Е.* Методический подход к оценке надежности вооружения и военной техники на основе ограниченного объема натуральных испытаний // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 3-4 (165-166). С. 95-98.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619073 Российская Федерация. Программный модуль поддержки принятия решения по результатам этапа жизненного цикла сложной технической системы военного назначения: № 2020617663: заявл. 14.07.2020; опубл. 10.08.2020 / В. А. Дубовский, Н. И. Дубовская; заявитель Федеральное государственное казенное военное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии Л.В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации.
41. *Анисимов, В. Г.* Методы и модели оптимизации в управлении развитием сложных технических систем / *В. Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.]*. – СПб: Политехника, 2004. – 279 с.