

<https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202402.477-487>
УДК 519.688

Оригинальная статья

Построение комплекса программ, моделирующих наведение зенитных управляемых ракет

С. Н. Чёрный¹, В. Р. Кристалинский^{2,1*}

¹ ФГКВОУ ВО «Военная ордена Кутузова академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Смоленск, Российская Федерация

Адрес: 214027, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Котовского, д. 2

² ФГБОУ ВО «Смоленский государственный университет», г. Смоленск, Российская Федерация

Адрес: 214000, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Пржевальского, д. 4

* kristvr@rambler.ru

Аннотация

Система Wolfram Mathematica представляет собой весьма эффективное средство, способное осуществлять моделирование функционирования сложных систем различного, в том числе, военного назначения. Она позволяет выводить результаты моделирования в численном и в аналитическом виде, строить графики и анимационные ролики. Однако к недостаткам этой системы относится невозможность ввода и вывода данных в стандартном интерфейсе и построения комплексов программ, переключение между которыми осуществлялось бы с использованием привычных пользователю элементов интерфейса. Однако имеется возможность включать документы, созданные в системе Wolfram Mathematica в состав проекта, реализованного средствами языка C#. Это позволяет избавиться от указанного недостатка. Расчеты осуществляются средствами системы Mathematica, а интерфейс программы является стандартным интерфейсом приложения Windows. При этом возможен вывод созданных системой Mathematica графиков и диаграмм. Особенно эффективным использование данной технологии является при моделировании сложных систем, которые могут функционировать различным образом в различных условиях. В этом случае требуется использование различных документов Wolfram Mathematica, при этом выбор требуемого осуществляется с использованием стандартных средств интерфейса языка C#. В предлагаемой работе данный подход реализован на примере разработки комплекса программ, моделирующих процесс наведения на цель зенитной управляемой ракеты различными методами. При этом для каждого метода наведения используется своя форма для ввода данных и вывода результатов моделирования. Такой комплекс может использоваться в ходе научных исследований и в учебном процессе военных и гражданских вузов.

Ключевые слова: комплекс программ, система Wolfram Mathematica, язык программирования C#, наведение зенитных управляемых ракет

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чёрный С. Н., Кристалинский В. Р. Построение комплекса программ, моделирующих наведение зенитных управляемых ракет // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2024. Т. 20, № 2. С. 477-487. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202402.477-487>

© Чёрный С. Н., Кристалинский В. Р., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Building a Set of Programs Simulating the Guidance of Anti-Aircraft Guided Missiles

S. N. Chernyi^a, V. R. Kristalinskii^{b,a*}

^a Russian Federation Armed Forces Army Air Defense Military Academy awarded the order of Kutuzov, named after the Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky, Smolensk, Russian Federation

Address: 2 Kotovsky St., Smolensk 214027, Russian Federation

^b Smolensk State University, Smolensk, Russian Federation

Address: 4 Przhevalsky St., Smolensk 214000, Russian Federation

* kristvr@rambler.ru

Abstract

The Wolfram Mathematica system is a very effective tool capable of simulating the functioning of complex systems for various purposes, including military ones. It allows you to display simulation results in numerical and analytical form, build graphs and animated videos. However, the disadvantages of this system include the inability to input and output data in a standard interface and build software packages, switching between which would be carried out using user-familiar interface elements. However, it is possible to include documents created in the Wolfram Mathematica system as part of a project implemented using the C# language. This allows you to get rid of this drawback. Calculations are performed using the Mathematica system, and the program interface is a standard Windows application interface. At the same time, it is possible to output graphs and diagrams created by the Mathematica system. The use of this technology is especially effective when modeling complex systems that can function in different ways under different conditions. In this case, the use of various Wolfram Mathematica documents is required, while the required selection is carried out using standard C# interface tools. In the proposed work, this approach is implemented by the example of the development of a set of programs that simulate the process of targeting an anti-aircraft guided missile by various methods. At the same time, each guidance method uses its own form for entering data and displaying simulation results. Such a complex can be used in the course of scientific research and in the educational process of military and civilian universities.

Keywords: software package, Wolfram Mathematica system, C# programming language, guidance of anti-aircraft guided missiles

Conflict of interests: The authors declares no conflict of interest.

For citation: Chernyi S.N., Kristalinskii V.R. Building a Set of Programs Simulating the Guidance of Anti-Aircraft Guided Missiles. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2024;20(2):477-487. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202402.477-487>



Введение

В настоящее время широко распространено компьютерное моделирование функционирования сложных систем различного, в том числе, военного назначения. Для разработки соответствующего программного обеспечения могут использоваться различные подходы. Один из них – это использование систем компьютерной математики, в частности, системы Wolfram Mathematica, предоставляющих пользователю широчайший спектр возможностей. Однако недостатком систем компьютерной математики является их специфический не всегда удобный интерфейс и сложность отладки программ. Вторым подходом является использование языков программирования, таких как C, Python и им подобных. Однако возможности этих языков, особенно в области символьных вычислений, даже при использовании библиотек, несравнимы с возможностями систем компьютерной математики. В связи с этим актуальной является задача объединения этих подходов. Такую возможность позволяет реализовать использование интерфейса между системой Wolfram Mathematica и проектом на языке C# с помощью объекта MathKernel, включенного в проект на языке C#. Возможность взаимодействия между этими средствами компьютерного моделирования облегчает то обстоятельство, что сама система Mathematica реализована на языке C. При этом работа интегрированного проекта возможна только при условии наличия на компьютере установленной системы Wolfram Mathematica. Реализация указанного интерфейса при решении задачи об исследовании случайных процессов, моделируемых графами специального вида, рассмотрена в [1]. Данная технология используется также в работах¹ [2]. В настоящей работе показана возможность создания комплекса программ, предназначенного для решения нескольких связанных между собой задач, в котором каждая из задач решается средствами системы Mathematica, а интерфейс всего комплекса реализован на языке C#.

Постановка задачи

Одной из основных задач системы управления зенитной управляемой ракетой (ЗУР) является наведение ракеты на цель. Моделированию процесса наведения ракеты посвящено большое количество исследований (см. например, работы² [3-22]). При этом из всего бесконечного множества возможных траекторий ракеты нужно выбрать наиболее эффективную. Для определения ошибки в положении ракеты (параметра управления) требуется задать требуемые координаты ракеты как функции

координат и параметров движения цели. Эти функции принято называть уравнениями связи³. Вид уравнений связи определяет метод наведения ракеты на цель. Как указано в работе⁴, «методом наведения называется заданный закон сближения ракеты с целью, который в зависимости от координат и параметров движения цели, определяет требуемое движение ракеты, обеспечивающее попадание ракеты в цель». Траектория движения ракеты, определяемая уравнениями метода наведения, называется кинематической траекторией. Методы наведения ракет делятся на применяемые в телеуправляемых системах и методы самонаведения. К первой группе относится, например, метод трех точек, ко второй – метод погони и метод пропорционального движения. Уравнения связи для этих методов приведены, например, в исследовании⁵.

Уравнения связи для методов наведения ЗУР являются весьма сложными. Потому при моделировании процесса наведения ракеты на цель в исследовательских либо в учебных целях оказывается весьма эффективным использование пакета Wolfram Mathematica [23-25]. Однако для использования приведенных в этих работах программ требуется знание достаточно своеобразного интерфейса указанного пакета. Для специалистов предметной области, а тем более для обучаемых, освоение указанного интерфейса может быть весьма сложным. Кроме того, желательно, чтобы работа программ, моделирующих различные методы наведения ЗУР, осуществлялась в рамках единого комплекса. Поэтому была поставлена задача: разработать комплекс программ, моделирующих методы наведения ЗУР с использованием интерфейса между языком программирования C# и пакетом Wolfram Mathematica.

Материалы и методы

Разработанное программное обеспечение позволяет исследователям или преподавателям осуществить исследования влияния изменений исходных данных – скорости ракеты и цели, исходного расстояния до цели и других – на траекторию ракеты и времени до встречи с целью для одного из трех методов наведения: метода трех точек, метода погони и метода пропорционального сближения. Выбор метода осуществляется пользователем в меню, расположенном на главной форме проекта, представленной на рис. 1.

Пользователь выбирает один из методов в выпадающем списке.

Как указано в работе⁶, «методом трех точек называется такой метод наведения, при котором требуемое движение ракеты определяется условием: ракета в течение всего времени поле-

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619955 Российская Федерация. C#-программа генерации рекуррентного соотношения с применением ядра Wolfram Mathematica: № 2021619211: заявл. 10.06.2021: опубл. 21.06.2021 / А. М. Магомедов ; заявитель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет». EDN: EYJCJUX

² Повышение помехоустойчивости систем самонаведения зенитных управляемых ракет / Н. Г. Мустафаев, И. С. Погребняк, Д. В. Пыханцев, А. Н. Сироткин // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России : Материалы IV Всероссийской НПК. Астрахань: АГУ, 2021. С. 202-208. EDN: SWRWRO; Учёт команд управления в модели траектории полёта зенитной управляемой ракеты / В. И. Лобейко, С. А. Князев, А. К. Бибик, Н. А. Харченко // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России : Материалы IV Всероссийской НПК. Астрахань: АГУ, 2021. С. 300-303. EDN: CBXXBS

³ Неупокоев Ф. К. Стрельба зенитными ракетами. 3-е изд., испр. и доп. М.: Воениздат, 1991. С. 65.

⁴ Там же. С. 66.

⁵ Там же.

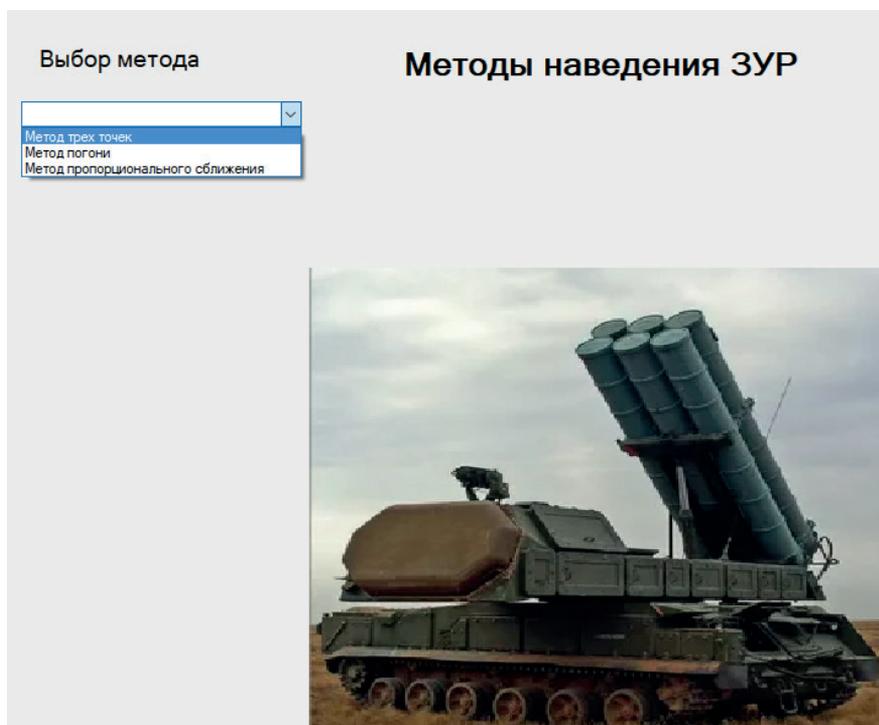
⁶ Там же.



та должна находиться на прямой, соединяющей пункт наведения с целью». При выборе метода трех точек открывается форма для ввода исходных данных необходимых для реализации указанного метода.

Исходными данными для метода являются уравнения траектории полета цели и значения скорости ракеты в заданные

моменты времени. Форма для моделирования метода трех точек с введенными исходными данными представлена на рис. 2. Указанные на нем данные носят условный характер. Для наглядности на форму выведен приведенный в работе⁷ рисунок, иллюстрирующий параметр управления при наведении методом трех точек.



Р и с. 1. Главная форма проекта

F i g. 1. Main form of the project

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the authors.

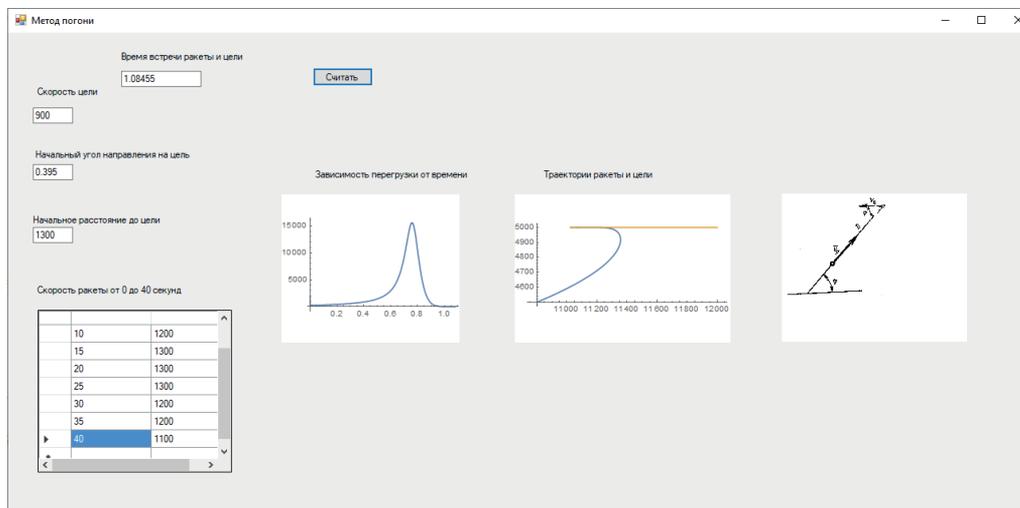
Время (с)	Скорость (м/с)
0	700
1	550
2	510
3	480
4	450

Р и с. 2. Форма для ввода исходных данных для метода трех точек

F i g. 2. Input form for the three-point method

⁷ Там же.

Р и с. 5. Форма для ввода исходных данных для метода погони
Fig. 5. Form for entering initial data for the chase method



Р и с. 6. Форма с результатами расчетов для метода погони
Fig. 6. Form with calculation results for the chase method

```
mathKernel1.Compute("V = "+tbV.Text.ToString());
mathKernel1.Compute("\[CurlyPhi]0 = "+tbphi.Text.
ToString());
mathKernel1.Compute("d0 = "+tbd0.Text.ToString());
```

После запуска расчетов выполняется слегка скорректированная программа, описанная в [25]. Форма с результатами расчетов представлена на рис. 6.

Кроме указанных двух методов, программы для которых приводились в наших предыдущих работах [24, 25], в комплекс включена программа, моделирующая наведение методом пропорционального сближения. «Методом пропорционального сближения называется метод наведения, при котором в течение

всего времени полета ракеты к цели угловая скорость поворота вектора скорости ракеты остается пропорциональной угловой скорости линии ракета-цель»⁹. Исходными данными для моделирования наведения ЗУР методом погони являются скорость цели, начальный угол направления на цель (φ_0), начальный угол между траекторией ракеты и поверхностью земли (θ_0) начальное расстояние до цели, коэффициент пропорциональности k и скорость ракеты в заданные моменты времени. При $k = 1$ и $\varphi_0 = \theta_0$ уравнения связи метода пропорционального сближения переходят в уравнения метода погони. Уравнения связи для метода пропорционального сближения¹⁰ могут быть представлены в виде

⁹ Там же. С. 108.

¹⁰ Там же. С. 110.



Метод пропорционального сближения

Скорость цели:

Theta0:

Начальный угол направления на цель:

Начальное расстояние до цели:

k:

Расчет

Время встречи ракеты и цели:

Скорость ракеты от 0 до 40 секунд

25	1300
30	1200
35	1200
40	1100

Diagram illustrating the proportional approximation method with labels: Траектория ракеты, Траектория цели, Траектория метода пропорционального сближения, Траектория выноса цели, $V_p = \text{const}$, $V_p = \text{const}$.

Р и с. 7. Форма для ввода исходных данных для метода пропорционального сближения
F i g. 7. Input form for the initial data for the proportional approximation method

Метод пропорционального сближения

Скорость цели:

Theta0:

Начальный угол направления на цель:

Начальное расстояние до цели:

k:

Расчет

Время встречи ракеты и цели:

Траектории ракеты и цели

Зависимость перегрузки от времени

Скорость ракеты от 0 до 40 секунд

25	1300
30	1200
35	1200
40	1100

Graphs showing trajectory and load dependence.

Р и с. 8. Форма с результатами расчетов для метода пропорционального сближения
F i g. 8. Form with calculation results for the proportional approximation method



$$\begin{cases} \dot{D} = -V_u \cos \varphi - V_p \cos((k-1)\varphi + \theta_0 - k\varphi_0) \\ D\dot{\varphi} = -V_u \sin \varphi - V_p \sin((k-1)\varphi + \theta_0 - k\varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

При $k = 1$ и $\varphi_0 = \theta_0$ уравнения связи метода пропорционального сближения переходят в уравнения связи метода погони.

Форма для ввода исходных данных для метода пропорционального сближения представлена на рис. 7. На форму выведен рисунок из работы¹¹, иллюстрирующий соотношение между методом пропорционального сближения, методом погони, а также методом параллельного сближения.

Ввод данных из объекта DataGridView реализован аналогично предыдущему. Для ввода остальных данных используются следующие команды

```
mathKernel1.Compute("V =" + tbV.Text.ToString());
mathKernel1.Compute("\[Theta]0 =" + tbtheta.Text.ToString());
mathKernel1.Compute("\[CurlyPhi]0 =" + tbphi.Text.ToString());
mathKernel1.Compute("d0 =" + tbd.Text.ToString());
mathKernel1.Compute("k =" + tbk.Text.ToString());
```

Программа в виде, включенном в проект на C#, имеет вид

```
mathKernel1.Compute("«d1, \[CurlyPhi]1 = NDSolveValue[{d'[t] == -V Cos[\[CurlyPhi][t]] - V1[t] Cos[(k - 1) \[CurlyPhi][t] + \[Theta]0 - k \[CurlyPhi]0], d[t] \[CurlyPhi]'[t] == V Sin[\[CurlyPhi][t] - V1[t] Sin[(k - 1) \[CurlyPhi][t] + \[Theta]0 - k \[CurlyPhi]0], d[0] == d0, \[CurlyPhi][0] == \[CurlyPhi]0}, {d, \[CurlyPhi]}, {t, 0, 26}, InterpolationOrder -> 6, Method -> \[StiffnessSwitching]»");
```

```
mathKernel1.Compute("p = FindRoot[d1[t] == 0, {t, 25}");
mathKernel1.Compute("t2 = t / . p");
tbRes.Text = mathKernel1.Result.ToString();
mathKernel1.Compute("S[t_] = {40000 - V t, 5000}");
mathKernel1.Compute("x[t_] = S[t][[1]] - d1[t] Cos[\[CurlyPhi]1[t]");
mathKernel1.Compute("y[t_] = S[t][[2]] - d1[t] Sin[\[CurlyPhi]1[t]");
```

Список использованных источников

- [1] Кристаллинский В. Р., Лютикас П. Л. О построении интерфейса между документом Wolfram Mathematica и проектом Visual Studio на языке C# // Системы компьютерной математики и их приложения. 2024. № 25. С. 26-31. EDN: ONAVNY
- [2] Gong X., Chen W., Chen Z., Yuan W. Closed-Form Solutions of Miss Distance for Higher-Order Guidance System // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2024. Vol. 60, No. 2. P. 2331-2349. <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3353717>
- [3] Созинов П. А., Горевич Б. Н. Аналитическая модель движения зенитной управляемой ракеты средней (большой) дальности // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2023. № 1. С. 14-38. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-14-38>
- [4] Созинов П. А., Горевич Б. Н. Кинематический анализ методов пропорциональной навигации применительно к наведению зенитной управляемой ракеты на баллистическую цель // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2022. № 2(41). С. 74-92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-2-74-92>
- [5] Джевандиров П. Ф., Молоканов К. В. Повышение точности наведения зенитных управляемых ракет на участке самонаведения // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1(13). С. 55-58. EDN: TLMJML
- [6] До К. Т. Повышение точности системы самонаведения зенитных ракет путём применения пропорционально-дифференциального регулятора в системе стабилизации // Символ науки. 2023. № 3-1. С. 21-29. EDN: WSFCOK

¹¹ Там же.

```
pictureBox1.Image = null;
mathKernel1.GraphicsHeight = pictureBox1.Height;
mathKernel1.GraphicsWidth = pictureBox1.Width;
mathKernel1.Compute("ParametricPlot[{{x[t], y[t]}, {40000 - V t, 5000}}, {t, 0, t2}");
if (mathKernel1.Graphics.Length > 0)
pictureBox1.Image = mathKernel1.Graphics[0];
mathKernel1.Compute("k1[t_] = Abs[x'[t]*y''[t] - x''[t]*y'[t] / V1[t]");
pictureBox2.Image = null;
mathKernel1.GraphicsHeight = pictureBox2.Height;
mathKernel1.GraphicsWidth = pictureBox2.Width;
mathKernel1.Compute("Plot[k1[t], {t, 0, t2}, PlotRange -> Full]");
if (mathKernel1.Graphics.Length > 0) pictureBox2.Image = mathKernel1.Graphics[0];
```

Вначале решается система дифференциальных уравнений (1), затем решается уравнение, то есть ищется момент времени, в который ракета встречается с целью, затем строятся траектории движения ракеты и цели и график зависимости перегрузки от времени.

Форма с результатами расчетов представлена на рис. 8.

Заключение

Таким образом, нами показана возможность создания программных комплексов, интегрирующих возможности языка программирования C# и системы Wolfram Mathematica на примере решения задачи моделирования процесса наведения на цель зенитных управляемых ракет. Представленный комплекс программ может использоваться при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе гражданских и военных вузов. В целом описанная в статье технология разработки программного обеспечения может быть эффективным средством моделирования процессов и систем различного назначения в научно-исследовательских и в учебных целях.



- [7] Фам К. Ф., Филимонов Н. Б. Компьютерный анализ эффективности методов самонаведения крылатой ракеты на маневрирующие воздушные цели // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2022. № 9. С. 17-22. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2022-9-17-22>
- [8] Математическая модель процесса наведения управляемой ракеты с активной радиолокационной головкой самонаведения на групповую воздушную цель, состоящую из пары вертолетов / А. А. Кучин, С. А. Горбунов, А. А. Хадур, К. В. Парфенов // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2021. № 1(12). С. 43-48. EDN: PQQNBR
- [9] Буренко Е. А. Математическая модель контура управления системы радиотеленаведения // Труды МАИ. 2023. № 132. С. 18. EDN: URFOAW
- [10] Алиева Г. В. Г., Агамалиев Р. М. О. Исследование экстремального режима работы полуактивной системы наведения на цель управляемых снарядов // Труды МАИ. 2024. № 136. С. 16. EDN: WNAHQO
- [11] Practical Integrated Guidance and Control for the High-Speed Anti-Ship Missile to Counter Switching Targets Under a Short Time-to-go Condition / Y. Zhang [et al.] // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2022. Vol. 23. P. 143-156. <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00422-7>
- [12] Huang J., Wu P., Li X. Research on Dynamically Corrective Hit Probability Model of Anti-air Missile Integrated in War Game System // Engineering Letters. 2022. Vol. 30, No. 2. P. 757-763. URL: https://www.engineeringletters.com/issues_v30/issue_2/EL_30_2_40.pdf (дата обращения: 30.01.2024).
- [13] Guidance Simulation and Experimental Verification of Trajectory Correction Mortar Projectile / X. Sun [et al.] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 15609-15622. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052883>
- [14] Design and Analysis of Missile Control Effectiveness, Visualized through MATLAB / K. Prasad [et al.] // Advances in Cognitive Science and Communications. ICCCE 2023. Cognitive Science and Technology ; ed. by A. Kumar, S. Mozar, J. Haase. Singapore: Springer, 2023. P. 969-978. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8086-2_91
- [15] Research on Integration Technology of Guidance and Fuze for Air Defense Missile / S. Yang [et al.] // Proceedings of 2023 Chinese Intelligent Systems Conference. CISC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering ; ed. by Y. Jia, W. Zhang, Y. Fu, J. Wang. Vol. 1091. Singapore: Springer, 2023. P. 151-161. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6886-2_14
- [16] Bużantowicz W. Matlab Class for Rapid Visualization of Missile-Target Engagement Scenarios // Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. 2023. Vol. 14, No. 4(54). P. 23-36. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1646>
- [17] Chattering-free discrete-time sliding mode control for integrated missile guidance and control system / X. Wang [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2022. Vol. 237, issue 7. P. 1546-1556. <https://doi.org/10.1177/09544100221131212>
- [18] Reinforcement learning-based missile terminal guidance of maneuvering targets with decoys / T. Deng [et al.] // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36, issue 12. P. 309-324. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.028>
- [19] Bhattacharjee D., Chakravarthy A., Subbarao K. Nonlinear model predictive control and collision-cone-based missile guidance algorithm // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2021. Vol. 44, No. 8. P. 1481-1497. <https://doi.org/10.2514/1.G005879>
- [20] Generalized Polynomial Guidance for Terminal Velocity Control of Tactical Ballistic Missiles / G. H. Moon [et al.] // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2021. Vol. 22. P. 163-175. <https://doi.org/10.1007/s42405-020-00291-6>
- [21] Robust Finite-Time Control for Guidance Law with Uncertainties in Missile Dynamics / F. Tao [et al.] // Journal of Aerospace Technology and Management. 2024. Vol. 16. Article number: e0524. <https://doi.org/10.1590/jatm.v16.1324>
- [22] Seidametova Z. Combining Programming and Mathematics through Computer Simulation Problems // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2732. P. 869-880. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200869.pdf> (дата обращения: 30.01.2024).
- [23] Кристалинский В. Р., Константинов Г. В. О моделировании методов наведения зенитных управляемых ракет с помощью системы Wolfram Mathematica // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 52-58. EDN: ZKVRNB
- [24] Кристалинский В. Р., Чёрный С. Н. О моделировании методов наведения самонаводящихся ракет в системе Wolfram Mathematica // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 3. С. 686-694. <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202003.686-694>
- [25] Кристалинский В. Р., Кристалинский Р. Е. О решении задач математической физики в системе Wolfram Mathematica // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 4. С. 981-991. <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201904.981-991>

Поступила 30.01.2024; одобрена после рецензирования 17.02.2024; принята к публикации 29.04.2024.

Об авторах:

Чёрный Сергей Николаевич, начальник научно-исследовательского центра, ФГКВОВО ВО «Военная ордена Кутузова академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Васильевского» Министерства обороны Российской Федерации (214027, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Котовского, д. 2), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-2789>, Turov_black@mail.ru



Кристаллинский Владимир Романович, доцент кафедры прикладной математики и информатики физико-математического факультета, ФГБОУ ВО «Смоленский государственный университет» (214000, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Пржевальского, д. 4); научный сотрудник, ФГКВУ ВО «Военная ордена Кутузова академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского» Министерства обороны Российской Федерации (214027, Российская Федерация, г. Смоленск, ул. Котовского, д. 2), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1205-990X>, kristvr@rambler.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Kristalinskii V.R., Luticas P.L. About Building an Interface Between a Wolfram Mathematica Document and a Visual Studio Project in C#. *Sistemy komp'yuternoj matematiki i ih prilozheniya* = Computer Mathematics Systems and Their Applications. 2024;(25):26-31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ONAVNY
- [2] Gong X., Chen W., Chen Z., Yuan W. Closed-Form Solutions of Miss Distance for Higher-Order Guidance System. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2024;60(2):2331-2349. <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3353717>
- [3] Sozinov P.A., Gorevich B.N. An analytical model of motion of a medium-range (long-range) surface-to-air missile. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"* = Journal of "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation. 2023;(1):14-38. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-14-38>
- [4] Sozinov P.A., Gorevich B.N. Kinematic analysis of proportional navigation methods as applicable to surface-to-air missile guidance to a ballistic target. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"* = Journal of "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation. 2022;(2):74-92. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-2-74-92>
- [5] Jevanshirov P.F., Molokanov K.V. Improving accuracy of surface-to-air missile guidance in the area of homing. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz-Antej"* = Journal of "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation. 2015;(1):55-58. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TLMJML
- [6] Do Q.T. Improving the accuracy of the anti-aircraft missile homing system by using a proportional differential regulator in stabilization system. *Symbol of Science*. 2023;(3-1):21-29. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WSFCOK
- [7] Pham Q.P., Filimonov N.B. Computer analysis of efficiency of cruise missile homing methods on maneuvering aerial targets. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2022;(9):17-22. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2022-9-17-22>
- [8] Kuchin A.A., Gorbunov S.A., Hadur A.A., Parfenov K.V. Mathematical model of the guidance process of a missile with an active radar homing device at a group air target consisting of a pair of helicopters. *Vestnik Yaroslavskego vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoj oborony*. 2021;(1):43-48. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PQQNBR
- [9] Burenko E.A. Mathematical model control loop guidance system of radio beam riding. *Trudy MAI*. 2023;(132):18. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: URFOAW
- [10] Aliyeva G.V.G., Agamaliyev R.M.O. Research of extreme work regime of semi-active system for homing of guided missiles. *Trudy MAI*. 2024;(136):16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WNAHQO
- [11] Zhang Y., Fan Y., Sun M., et al. Practical Integrated Guidance and Control for the High-Speed Anti-Ship Missile to Counter Switching Targets Under a Short Time-to-go Condition. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2022;23:143-156. <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00422-7>
- [12] Huang J., Wu P., Li X. Research on Dynamically Corrective Hit Probability Model of Anti-air Missile Integrated in War Game System. *Engineering Letters*. 2022;30(2):757-763. Available at: https://www.engineeringletters.com/issues_v30/issue_2/EL_30_2_40.pdf (accessed 30.01.2024).
- [13] Sun X., Gao M., Zhou X., Lv J., Tian F., Qiao Z. Guidance Simulation and Experimental Verification of Trajectory Correction Mortar Projectile. *IEEE Access*. 2021;9:15609-15622. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052883>
- [14] Prasad K., Keerthana P., Firoz S., Akhila G., Bandhavi D. Design and Analysis of Missile Control Effectiveness, Visualized through MATLAB. In: Kumar A., Mozar S., Haase J. (eds.) *Advances in Cognitive Science and Communications. ICCCE 2023. Cognitive Science and Technology*. Singapore: Springer; 2023. p. 969-978. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8086-2_91
- [15] Yang S., Ma J., Lu J., Li D. Research on Integration Technology of Guidance and Fuze for Air Defense Missile. In: Jia Y., Zhang W., Fu Y., Wang J. (eds.) *Proceedings of 2023 Chinese Intelligent Systems Conference. CISC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 1091. Singapore: Springer; 2023. p. 151-161. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6886-2_14
- [16] Bużantowicz W. Matlab Class for Rapid Visualization of Missile-Target Engagement Scenarios. *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*. 2023;14(4):23-36. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.1646>
- [17] Wang X., Wu D., He J., Zhang J., Li S. Chattering-free discrete-time sliding mode control for integrated missile guidance and control system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2022;237(7):1546-1556. <https://doi.org/10.1177/09544100221131212>
- [18] Deng T., Huang H., Fang Y., Yan J., Cheng H. Reinforcement learning-based missile terminal guidance of maneuvering targets with decoys. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2023;36(12):309-324. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.028>



- [19] Bhattacharjee D., Chakravarthy A., Subbarao K. Nonlinear model predictive control and collision-cone-based missile guidance algorithm. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2021;44(8):1481-1497. <https://doi.org/10.2514/1.G005879>
- [20] Moon G.H., Tahk M.J., Han D.H., et al. Generalized Polynomial Guidance for Terminal Velocity Control of Tactical Ballistic Missiles. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2021;22:163-175. <https://doi.org/10.1007/s42405-020-00291-6>
- [21] Tao F., et al. Robust Finite-Time Control for Guidance Law with Uncertainties in Missile Dynamics. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2024;16:e0524. <https://doi.org/10.1590/jatm.v16.1324>
- [22] Seidametova Z. Combining Programming and Mathematics through Computer Simulation Problems. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020;2732:869-880. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200869.pdf> (accessed 30.01.2024).
- [23] Kristalinskii V.R., Konstantinov G.V. On simulation of anti-aircraft guided missile guidance methods using the Wolfram Mathematica system. *Sistemy komp'yuternoj matematiki i ih prilozheniya = Computer Mathematics Systems and Their Applications*. 2020;(21);52-58. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZKVRNB
- [24] Kristalinskii V.R., Chernyi S.N. On Modeling Homing Missile Guidance Methods in the Wolfram Mathematica System. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2020;16(3):686-694. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202003.686-694>
- [25] Kristalinskii V.R., Kristalinskii R.E. Solving Mathematical Physics Problems in the Wolfram Mathematica System. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2019;15(4):981-991. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25559/SITITO.15.201904.981-991>

Submitted 30.01.2024; approved after reviewing 17.02.2024; accepted for publication 29.04.2024.

About the authors:

Sergei N. Chernyi, Head of the Scientific and Research Centre, Russian Federation Armed Forces Army Air Defense Military Academy awarded the order of Kutuzov, named after the Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky (2 Kotovsky St., Smolensk 214027, Russian Federation), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-2789>**, Turov_black@mail.ru

Vladimir R. Kristalinskii, Associate Professor of the Chair of Applied Mathematics and Computer Science, Faculty of Physics and Mathematics, Smolensk State University (4 Przhevalsky St., Smolensk 214000, Russian Federation); Researcher, Russian Federation Armed Forces Army Air Defense Military Academy awarded the order of Kutuzov, named after the Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevsky (2 Kotovsky St., Smolensk 214027, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1205-990X>**, kristvr@rambler.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

