

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 519: 004.942

doi: 10.30987/2658-4026-2024-2-173-179

## Имитационное моделирование радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель

Илья Александрович Чепурнов<sup>1✉</sup>, Владимир Владимирович Прохоренко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; Москва, Россия

<sup>1</sup> chepurnov@bmstu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2982-994X>

<sup>2</sup> prokhorenkoww@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5575-0181>

### Аннотация.

Актуализирована проблема совершенствования математических моделей компьютерных тренажеров зенитных ракетных комплексов. Рассмотрены разработанные на кафедре зенитных ракетных войск военного учебного центра МГТУ им. Н.Э. Баумана частные имитационные модели процесса самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель и зоны действия секторной многофункциональной радиолокационной станции. Описано программное приложение для имитационного моделирования радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель, разработанное авторами с использованием пакета MATLAB. Представленные имитационные модели и программное приложение могут быть использованы как при разработке и совершенствовании компьютерных тренажерных моделей, так и в составе отдельных автоматизированных обучающих систем для подготовки операторов зенитных ракетных комплексов в военных вузах и военных учебных центрах.

**Ключевые слова:** имитационная модель, тренажер, оператор, зенитный ракетный комплекс, зона действия, воздушная цель, траектория, радиолокационная станция, зенитная управляемая ракета, методы наведения, MATLAB

**Для цитирования:** Чепурнов И.А., Прохоренко В.В. Имитационное моделирование радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель // Эргодизайн. №2 (24). 2024. С. 173-179. <http://dx.doi.org/10.30987/2658-4026-2024-2-173-179>.

Original article

Open access article

## Simulation Modelling of a Radar Semi-Active Homing System for a Guided Missile at an Air Target

Ilya A. Chepurnov<sup>1✉</sup>, Vladimir V. Prokhorenko<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bauman Moscow State Technical University; Moscow, Russia

<sup>1</sup> chepurnov@bmstu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2982-994X>

<sup>2</sup> prokhorenkoww@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5575-0181>

### Abstract.

The problem of improving mathematical models of computer simulators for anti-aircraft missile systems has been updated. The paper considers private simulation models of the homing process of a guided missile at an air target and the coverage area of a sector multifunctional radar station developed at the Department of Anti-Aircraft Missile Forces of the Military Training Centre of Bauman Moscow State Technical University. The paper describes a software application for simulating a radar semi-active homing system for a guided missile at an air target, developed by the authors using the MATLAB package. The presented simulation models and software application can be used both in developing and improving computer training models, and as part of individual automated instruction systems for training operators of anti-aircraft missile systems at military universities and in military training centers.

**Keywords:** simulation model, simulator, operator, anti-aircraft missile system, coverage area, air target, trajectory, radar station, anti-aircraft guided missile, guidance methods, MATLAB

## Введение

Стремительное совершенствование современных образцов зенитного ракетного оружия обуславливает усложнение требований, предъявляемых к уровню профессиональной подготовки операторов зенитных ракетных комплексов (ЗРК).

Наиболее качественной подготовке операторов ЗРК в военных вузах и военных учебных центрах способствует применение тренажерных средств, обеспечивающее быстрое сокращение разрыва между теорией и практикой.

Тренажерные средства для подготовки операторов ЗРК обеспечивают [12]:

- формирование, совершенствование и поддержание на требуемом уровне у обучаемых профессионально важных знаний, качеств, навыков и умений операторской деятельности в штатных условиях;
- формирование и поддержание состояния готовности к эффективным действиям в нештатных (экстремальных, аварийных) ситуациях;
- слаживание одного или нескольких взаимодействующих боевых расчетов ЗРК;
- восстановление утраченных навыков и умений.

В настоящее время для подготовки операторов ЗРК широко применяются компьютерные тренажеры. Органы управления и сигнализации в таких тренажерах представлены графическими компьютерными образами с возможностью использования компьютерных манипуляторов различного вида. Основными достоинствами компьютерных тренажеров являются: малая стоимость, относительно короткие сроки разработки и легкость тиражирования [4]:

Вместе с тем, математические модели существующих компьютерных тренажеров для подготовки операторов ЗРК, как правило, недостаточно универсальны, могут быть приближенными, а в ряде случаев не иметь под собой содержательной физической модели и являться лишь «черным ящиком» с соответствующим входным и выходным сигналами. Кроме того, такие модели часто не замкнуты, т.е. требуют дополнительных данных, получаемых с помощью физического эксперимента.

В некоторых случаях недостающие данные можно получить с помощью приближенных (инженерных) моделей и расчетных методов. Однако в подавляющем большинстве случаев

эти методы полуэмпирические и обеспечивают оценку искомых параметров для схематизированных условий и конструктивных решений. Кроме того, инженерные модели, как правило, линейны и позволяют приближенно предсказать только интегральные характеристики.

Одним из решений этой проблемы является разработка эффективных и легко реализуемых в тренажерных комплексах имитационных моделей основных процессов, характерных для функционирования ЗРК.

Широко используемая в современных ЗРК радиолокационная полуактивная система самонаведения на конечном участке полета ракеты требует облучения (подсвета) воздушной цели наземным первичным источником электромагнитной энергии. В роли такого источника, как правило, выступает многофункциональная радиолокационная станция (МРЛС). Полуактивная головка самонаведения (ГСН), установленная на борту ракеты, обеспечивает захват и сопровождение цели по угловым координатам, дальности и (или) скорости, определение параметра рассогласования. Выработка команд управления ракетой на основном участке полета осуществляется в МРЛС и передается на борт ракеты с помощью командной линии радиосвязи. В состав ЗРК, использующего радиолокационную полуактивную систему самонаведения, входят также пусковые установки, обеспечивающие подготовку и пуск ракет, командный пункт с автоматизированными рабочими местами операторов и средства электроснабжения [2, 6, 9].

Цель статьи – представление результатов разработки имитационных моделей процессов, характерных для радиолокационного полуактивного самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель, а также их программной реализации.

## 1. Модель процесса самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель

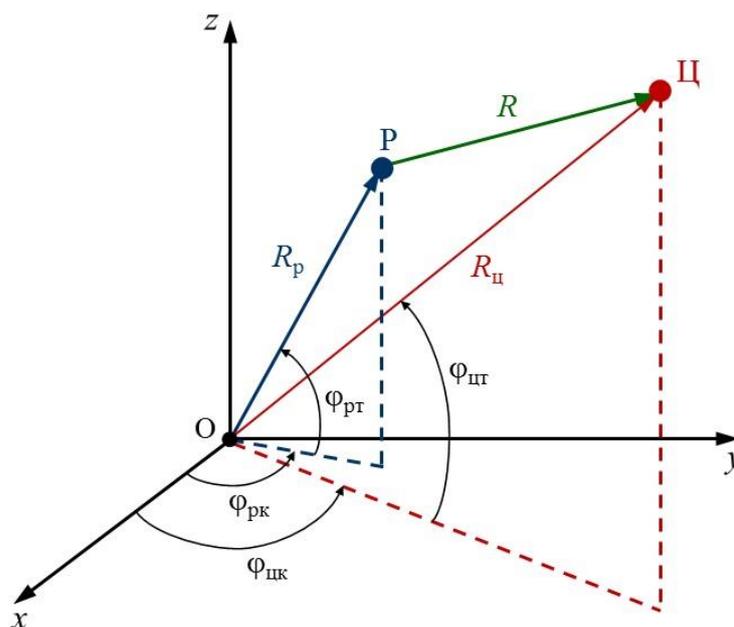
Как известно [1], решение задачи управления полетом ракеты заключается в определении рассогласования, т.е. отклонения ракеты от заданного законом управления положения. В системе самонаведения управляемой ракеты для определения местоположения ракеты относительно цели в

течение всего полета используется координатор. При самонаведении ракеты по методу пропорционального сближения основным измеряемым в координаторе параметром является угол поворота линии «ракета-цель»  $\varphi$ .

Оценка угловой скорости вращения линии «ракета-цель»  $\dot{\varphi}$  производится фильтром координатора, в качестве которого может быть использован дифференцирующий фильтр второго порядка [3]. Такой фильтр позволяет получить оценку фильтруемой величины (в нашем случае – оценку угла

поворота линии «ракета-цель»  $\hat{\varphi}$ ), а так же её производные (оценки угловой скорости  $\hat{\dot{\varphi}}$  и углового ускорения  $\hat{\ddot{\varphi}}$  вращения линии «ракета-цель»).

Основные геометрические соотношения для моделирования системы самонаведения управляемой ракеты представлены на рисунке 1. На рисунке вертикальная плоскость, в которой находятся ракета (Р) и цель (Ц), определяет плоскость тангажа, а горизонтальная плоскость, совпадающая с плоскостью  $xu$ , определяет плоскость курса.



**Рис. 1. Основные геометрические соотношения для моделирования системы самонаведения управляемой ракеты**

**Fig. 1. Basic geometric relationships for modeling a guided missile homing system**

Положение цели задается координатами:

$$x_{ц} = R_{ц} \cos \varphi_{цт} \cos \varphi_{цк}, y_{ц} = R_{ц} \cos \varphi_{цт} \sin \varphi_{цк}, z_{ц} = R_{ц} \sin \varphi_{цт},$$

где:  $R_{ц}$  – дальность до цели;  $\varphi_{цт}$  – угол наклона линии визирования цели в плоскости тангажа;  $\varphi_{цк}$  – угол наклона линии визирования цели в плоскости курса.

Координаты, определяющие положение ракеты:

$$x_p = R_p \cos \varphi_{пт} \cos \varphi_{рк}, y_p = R_p \cos \varphi_{пт} \sin \varphi_{рк}, z_p = R_p \sin \varphi_{пт},$$

где:  $R_p$  – дальность до ракеты;  $\varphi_{пт}$  – угол наклона линии визирования ракеты в плоскости тангажа;  $\varphi_{рк}$  – угол наклона линии визирования ракеты в плоскости курса.

Для имитационного моделирования процесса самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель авторами был выбран метод пространства состояний, который, в

отличие от классических методов, позволяет осуществить четкую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур [5, 8, 10].

Движение системы в пространстве состояний представляется кривой и отражает изменение положения вектора состояния в этом пространстве. Модели в пространстве состояний описывают поведение объекта управления или системы в целом во временной области и позволяют работать не только с линейными системами и нулевыми начальными условиями. Пространство состояний представляет собой матричную форму записи системы дифференциальных уравнений системы автоматического управления, адаптированную для теории управления путем выделения из формы Коши алгебраических уравнений, связывающих внутренние координаты системы с выходными (выходными).

Так, фильтр координатора ракеты в пространстве состояний можно описать уравнением:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\phi} = \mathbf{A}_{\phi}\mathbf{X}_{\phi} + \mathbf{B}_{\phi}\mathbf{U}_{\phi},$$

где:  $\mathbf{X}_{\phi}$  – вектор состояния фильтра;  $\mathbf{U}_{\phi}$  – вектор входных воздействий на фильтр;  $\mathbf{A}_{\phi}$  и  $\mathbf{B}_{\phi}$  – матрицы фильтра.

Реализацию метода пропорционального сближения в контуре управления ракетой обеспечивает устройство формирования команд, описываемое уравнением состояния:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{уфк}} = \mathbf{N}_{\text{уфк}}\mathbf{U}_{\text{уфк}},$$

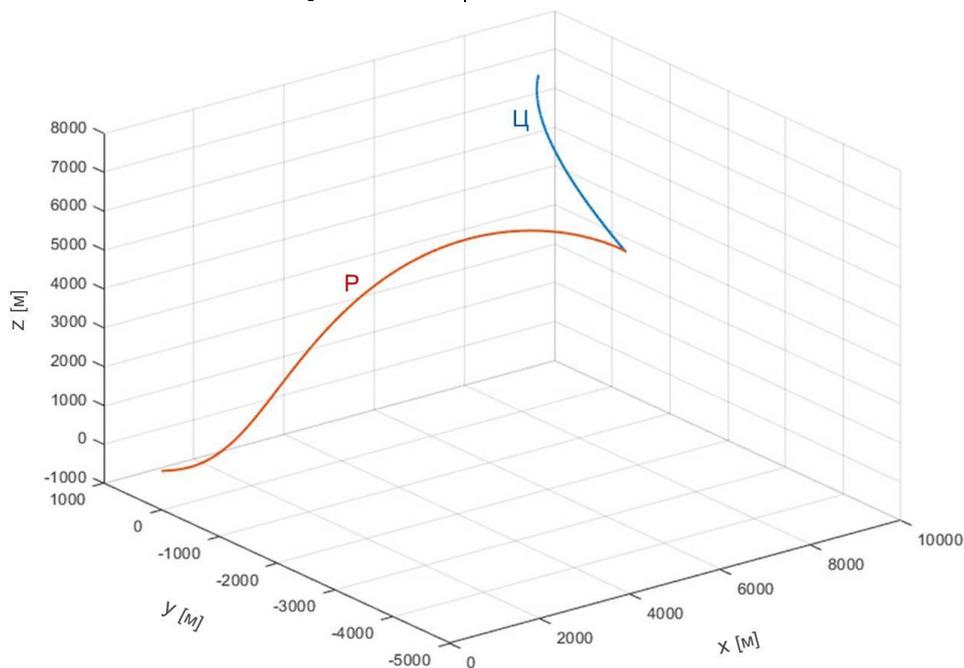
где:  $\mathbf{N}_{\text{уфк}}$  – матрица, учитывающая коэффициент пропорциональности метода наведения;  $\mathbf{U}_{\text{уфк}}$  – вектор входных воздействий, включающий оценки угловой

скорости вращения линии «ракета-цель» в плоскостях тангажа и курса.

Стабилизацию ракеты и управление ее полетом обеспечивает автопилот. В пространстве состояний уравнение автопилота ракеты имеет вид:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{ап}} = \mathbf{A}_{\text{ап}}\mathbf{X}_{\text{ап}} + \mathbf{B}_{\text{ап}}\mathbf{U}_{\text{ап}},$$

где:  $\mathbf{X}_{\text{ап}}$  – вектор состояния автопилота, включающий значения угловых скоростей вращения вектора скорости ракеты в плоскостях тангажа и курса;  $\mathbf{U}_{\text{ап}}$  – вектор входных воздействий на автопилот (команды с устройства формирования команд);  $\mathbf{A}_{\text{ап}}$  и  $\mathbf{B}_{\text{ап}}$  – матрицы автопилота.



**Рис. 2. Результаты моделирования траекторий ракеты и маневрирующей цели**  
**Fig. 2. The results of modeling the flight paths of missile and maneuvering target**

Уравнение цели и ракеты в пространстве состояний, соответственно:

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{ц}} = \mathbf{A}_{\text{ц}}\mathbf{X}_{\text{ц}} + \mathbf{B}_{\text{ц}}\mathbf{U}_{\text{ц}},$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{р}} = \mathbf{A}_{\text{р}}\mathbf{X}_{\text{р}} + \mathbf{B}_{\text{р}}\mathbf{U}_{\text{р}},$$

где:  $\mathbf{X}_{\text{ц}}$  – вектор состояния цели;  $\mathbf{X}_{\text{р}}$  – вектор состояния ракеты;  $\mathbf{U}_{\text{ц}}$  – вектор входных воздействий на цель;  $\mathbf{U}_{\text{р}}$  – вектор входных воздействий на ракету;  $\mathbf{A}_{\text{ц}}$  и  $\mathbf{B}_{\text{ц}}$  – матрицы цели;  $\mathbf{A}_{\text{р}}$  и  $\mathbf{B}_{\text{р}}$  – матрицы ракеты.

Полученные в результате моделирования в среде MATLAB траектории управляемой ракеты и маневрирующей воздушной цели представлены на рисунке 2.

Матричная форма записи, применяемая в пространстве состояний, имеет неоспоримое преимущество при численном решении, а

ясность математических формулировок и самих решений не ухудшается даже для многомерных систем, описывающих поведение сложных систем.

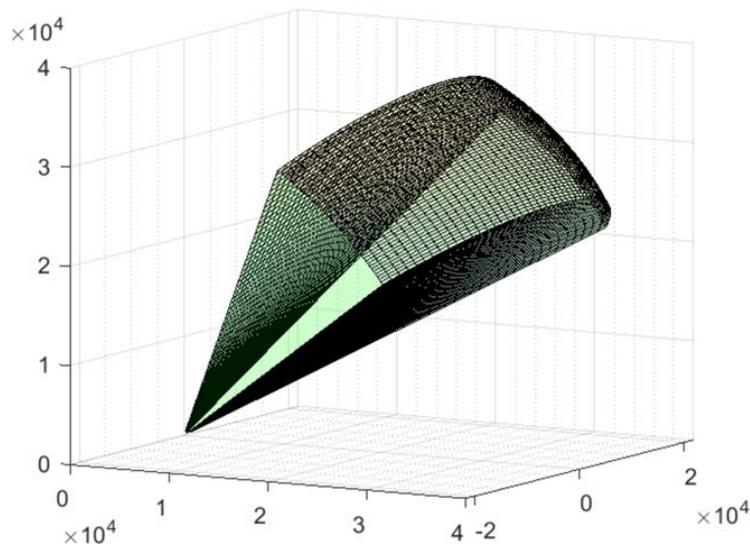
## 2. Модель зоны действия секторной МРЛС

МРЛС современных ЗРК выполняют роль средств обнаружения, опознавания, сопровождения воздушных целей и наводимых на них управляемых ракет, устройств передачи команд управления, а также станций подсвета цели для обеспечения работы бортовых радиопеленгаторов ракет. Использование в МРЛС фазированных антенных решеток (ФАР) в сочетании с быстродействующими вычислительными комплексами позволяет одновременно

сопровождать несколько десятков целей и наводить на них более десяти управляемых ракет [2].

Зоной действия радиолокационной станции называют область, в пределах которой

станция обнаруживает цели с определенной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги [11].



**Рис. 3. Модель зоны действия секторной МРЛС в среде MATLAB**  
**Fig. 3. Model of the sector multifunctional radar coverage area in MATLAB**

Зона действия секторной МРЛС (рис. 3) определяется следующими параметрами [7]:

– угловыми размерами по азимуту  $\alpha$  и углу места  $\varepsilon$ ;

– максимальной и минимальной дальностями действия МРЛС:

$$R_{\max}(\alpha, \varepsilon) = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{и}} \cdot G_{\text{а}}^2(\alpha, \varepsilon) \cdot \lambda_{\text{в}}^2 \cdot \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{пр min}}}}, \quad R_{\min} = \frac{c \cdot \tau_{\text{и}}}{2},$$

где:  $P_{\text{и}}$  – импульсная мощность МРЛС;  $G_{\text{а}}(\alpha, \varepsilon)$  – коэффициент усиления ФАР МРЛС;  $\lambda_{\text{в}}$  – рабочая длина волны МРЛС;  $\sigma_{\text{ц}}$  – ЭПР цели;  $P_{\text{пр min}}$  – чувствительность приемного устройства МРЛС;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в свободном пространстве;  $\tau_{\text{и}}$  – длительность зондирующего импульса.

Моделирование процесса радиолокационного обнаружения и сопровождения воздушной цели основано на определении факта попадания (непопадания) координат траектории ее движения в границы зоны действия секторной МРЛС и последующей их фильтрации.

### 3. Программное приложение для имитационного моделирования радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель

Важным преимуществом среды MATLAB является то, что помимо привычных расчетных моделей, она позволяет создавать

программные приложения для имитационного моделирования, которые можно дополнить необходимым программируемым функционалом, в частности предварительно заданными сценариями.

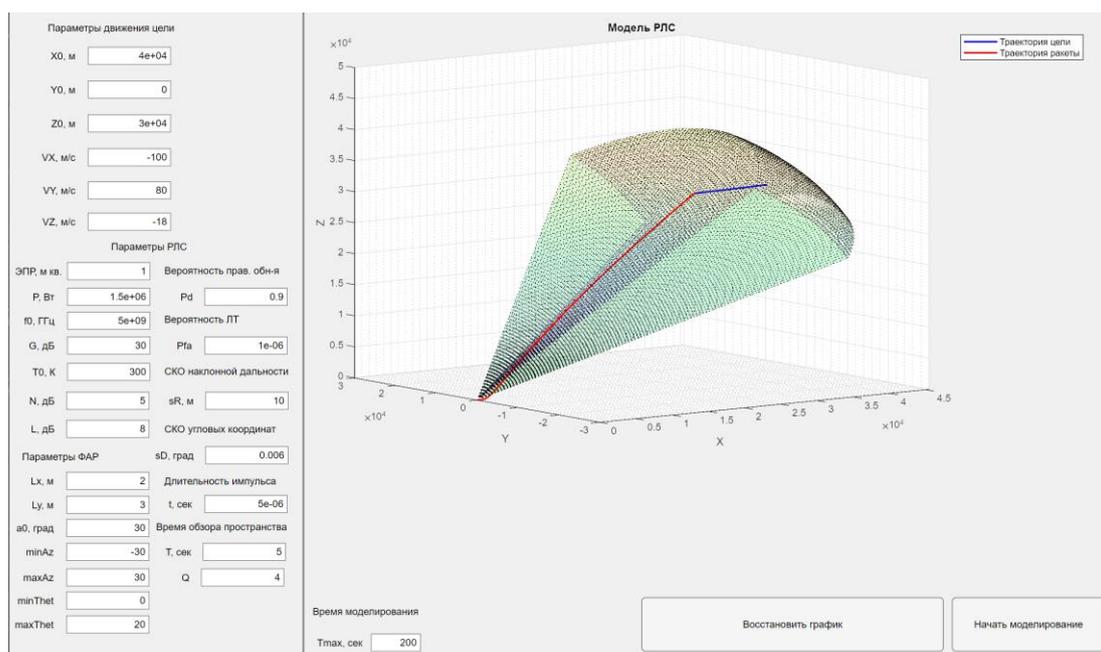
На основе вышеописанных частных моделей с использованием пакета MATLAB авторами разработано программное приложение для имитационного моделирования радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель.

Разработанное приложение обладает интуитивно понятным графическим интерфейсом, позволяющим задавать требуемые параметры воздушной цели и МРЛС (рис. 4).

Оценка (фильтрация) координат траектории движения цели, попавших в границы моделируемой зоны действия секторной МРЛС, осуществляется с помощью программно реализованного в приложении фильтра Калмана.

#### Заключение

Результаты имитационного моделирования с использованием разработанного приложения, подтвердили адекватность разработанных моделей расчетным данным, характеризующим процесс самонаведения управляемой ракеты на цель.



**Рис. 4. Интерфейс приложения для имитационного моделирования радиолокационной полуактивной системы самонаведения управляемой ракеты на воздушную цель**  
**Fig. 4. Application interface for simulation of a semi-active radar guided missile homing system an aerial target**

Представленные имитационные модели и программное приложение могут быть использованы как при разработке и совершенствовании компьютерных тренажерных моделей, так и в составе отдельных автоматизированных обучающих

систем для подготовки операторов зенитных ракетных комплексов в военных вузах и военных учебных центрах.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Архангельский И.И., Афанасьев П.П., Болотов Е.Г. и др.** Проектирование зенитных управляемых ракет М.: Изд-во МАИ, 2001. 730 с. ISBN 5-7035-2335-4.
2. **Бурмистров С.К.** Справочник офицера воздушно-космической обороны. Тверь: ВА ВКО, 2006. 564 с.
3. **Ивойлов А.Ю., Федоров Д.С., Жмудь В.А. и др.** Использование дифференцирующего фильтра второго порядка для фильтрации сигналов акселерометра и определения производной // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 4(10). С. 9-14. EDN VIXJHL.
4. **Красовский А.А.** Военно-техническая подготовка: ведение в специальность. М.: Машиностроение, 1995. 304 с. ISBN 5-217-02386-4.
5. **Михалевиц С.С., Байдали С.А., Чучалин И.П. и др.** Алгоритм моделирования систем автоматического управления методом пространства состояний // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 5. С. 233-237. EDN PVBDIV.
6. **Неупокоев Ф.К.** Стрельба зенитными ракетами. М.: Воениздат, 1991. 343 с. ISBN 5-203-00265-7.
7. **Прохоренко В.В., Чепрунов И.А., Черваков В.О. и др.** Моделирование процесса наведения управляемой ракеты на воздушную цель с использованием системы MATLAB // Актуальные вопросы состояния и перспектив развития вооружения, военной и специальной техники Воздушно-космических

#### REFERENCES

1. **Arkhangelsky I.I., Afanasyev P.P., Bolotov E.G. et al.** Design of Anti-Aircraft Guided Missiles. Moscow: MAI Publishing House; 2001. 730 p. ISBN 5-7035-2335-4.
2. **Burmistrov S.K.** Handbook of an Aerospace Defense Officer. Tver: VA VKO; 2006. 564 p.
3. **Ivoilov A.Yu., Fedorov D.S., Zhmud V.A., et al.** Using a Derivative Filter for Filtering of the Second Order Signal from the Accelerometer and the Calculating of Derivative. Automation and Software Engineering. 2014;4(10):9-14.
4. **Krasovsky A.A.** Military Technical Training: Introduction to the Specialty. Moscow: Mashinostroenie; 1995. 304 p.
5. **Mikhalevich S.S., Baidali S.A., Chuchalin I.P., et al.** Algorithm for Modelling Automatic Control Systems Using the State Space Method. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2012;321(5): 233-237.
6. **Neupokoev F.K.** Firing Anti-Aircraft Missiles. Moscow: Voenizdat; 1991. 343 p. ISBN 5-203-00265-7.
7. **Prokhorenko V.V., Cheprunov I.A., Chervakov V.O., et al.** Modeling the Process of Guiding a Guided Missile to an Air Target Using the MATLAB System. In: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference on Current Issues of the State and Prospects for the Developing Weapons, Military and Special Equipment of the Aerospace

сил: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 229-236. EDN JXAEXH.

8. **Филиповский В.М.** Системы управления в пространстве состояний. СПб.: СПбПУ, 2022. 75 с.

9. **Чепурнов И.А.** Профессиографическое исследование профессиональной деятельности операторов зенитных ракетных комплексов // Психология и психотехника. 2023. № 3. С. 97-107. DOI 10.7256/2454-0722.2023.3.43982. EDN XIQFKC.

10. **Чепурнов И.А., Черваков В.О., Желаннова Е.А. и др.** Моделирование системы самонаведения управляемой ракеты в пространстве состояний // Динамика сложных систем – XXI век. 2022. Т. 16, № 4. С. 5-16. DOI 10.18127/j19997493-202204-01. EDN XUKWTE.

11. **Чепурнов И.А., Серов С.А., Воротнюк Ю.С.** Военно-техническая подготовка: ведение в специальность. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 134 с. ISBN 978-5-7038-3610-1.

12. **Черваков В.О., Чепурнов И.А., Потапов В.А.** Классификация и анализ учебно-тренировочных средств для подготовки специалистов зенитных ракетных войск в военных учебных центрах. Теория и практика военного образования в гражданских вузах: педагогический поиск: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2023. С. 242-247. EDN MXJSYZ.

Forces. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2023. p. 229-236.

8. **Filipovsky V.M.** Control Systems in the State Space. Saint Petersburg: Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2022. 75 p.

9. **Chepurnov I.A.** Professiographic Study of the Professional Activities of Operators of Anti-Aircraft Missile Systems. Psychology and Psychotechnics. 2023;3:97-107. DOI 10.7256/2454-0722.2023.3.43982.

10. **Chepurnov I.A., Chervakov V.O., Zhelannova E.A., et al.** Modelling a Guided Missile Homing System in State Space. Dynamics of Complex Systems – XXI Century. 2022;16(4):5-16. DOI 10.18127/j19997493-202204-01.

11. **Chepurnov I.A., Serov S.A., Vorotnyuk Yu.S.** Military Technical Training: Introduction to the Specialty. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University; 2012. 134 p. ISBN 978-5-7038-3610-1.

12. **Chervakov V.O., Chepurnov I.A., Potapov V.A.** Classification and Analysis of Teaching Facilities for Training Specialists of Anti-Aircraft Missile Forces in Military Training Centers. In: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical International Conference on Theory and Practice of Military Education at Civilian Universities: Pedagogical Search; Yekaterinburg: LLC Publishing House UMC UPI; 2023. p. 242-247.

#### **Информация об авторах:**

**Чепурнов Илья Александрович** - доцент, кандидат технических наук, тел. 89263758243, профессор кафедры зенитных ракетных войск военного учебного центра МГТУ им. Н.Э. Баумана, советник Российской академии ракетных и артиллерийских наук, международные идентификационные номера автора: ORCID 0000-0003-2982-994X, Author-ID-РИНЦ 7702-5508

**Прохоренко Владимир Владимирович** - студент, тел. 89269282356, студент кафедры зенитных ракетных войск военного учебного центра МГТУ им. Н.Э. Баумана, международные идентификационные номера автора: ORCID 0000-0001-5575-0181, Author-ID-РИНЦ 3955-8049

#### **Information about the authors:**

**Chepurnov Ilya Aleksandrovich** – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, ph. 89263758243, Professor of the Department “Anti-Aircraft Missile Forces” of the Military Training Centre of Bauman Moscow State Technical University, Advisor to the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, the author’s international identification numbers: ORCID: 0000-0003-2982-994X, Author-ID-RSCI: 7702-5508

**Prokhorenko Vladimir Vladimirovich** –student, ph. 89269282356, student of the Department “Anti-Aircraft Missile Forces” of the Military Training Centre of Bauman Moscow State Technical University, the author’s international identification numbers: ORCID: 0000-0001-5575-0181, Author-ID-RSCI: 3955-8049

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 24.04.2024. Рецензент** –Печников А.Н., доктор технических наук., доктор педагогических наук, профессор Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, член редакционного совета журнала «Эргодизайн»

**The paper was submitted for publication on the 3<sup>rd</sup> of April, 2024; approved after the peer review on the 22<sup>nd</sup> of April, 2024; accepted for publication on the 24<sup>th</sup> of April, 2024. Reviewer** – Pechnikov A.N., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of S.M. Budyonny Military Academy of the Signal Corps, member of the editorial board of the journal “Ergodesign”..