

УДК 629.784

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-94-105

Взаимодействие залпа атакующих дронов и залпа зенитных дронов как компьютерная антагонистическая неньютоновская 2D-игра

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Interaction between the Attacking Drones Salvo and the Anti-Aircraft Drones Salvo as a Computer Antagonistic Non-Newtonian 2D Game

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена проблема ухода атакующего дрона от перехвата на заключительном этапе полета. Продолжительность этапа — несколько секунд. Дроны подлетают к цели, взрываются и погибают. Традиционно атакующий и зенитный дроны рассматривают независимо. Предложено рассматривать атакующий и зенитный дроны как единую колебательную систему с антагонистическими составляющими. Антагонистические составляющие соединены с помощью неньютоновского упругого элемента. Рассмотрены тестовая игра с фугасным дроном, тестовая игра с осколочным дроном и 2D-игра залпами. Игра в данном случае — это не традиционная задача оптимизации на минимум, а моделирование компромиссного неустойчивого режима движения. Для 2D-игры залп из трех атакующих дронов работает по трем неподвижным целям. Зенитный залп включает в себя два фугасных и два осколочных дрона. Атакующие дроны «ничего не знают» о зенитном целераспределении, поэтому каждый из них уходит от всех зенитных дронов одновременно. Играет один оператор. Поэтому игра имеет только два параметра — два различных коэффициента жесткости любого неньютоновского упругого элемента. Исследуемая неньютоновская колебательная система является неосцилляционной. Имеют место нарушения известных осцилляционных теорем теории колебаний: с увеличением жесткости частота колебаний системы падает, формы колебаний приобретают дополнительные узлы и т. п.

Ключевые слова: залп дронов, неньютоновский упругий элемент, 2D-игра

The paper considers problem of the attacking drone avoiding interception at the final stage of its flight. Duration of this stage is a few seconds. Drones are flying to the target, explode and die. The literature traditionally considers the attack and the anti-aircraft drones independently. It is proposed to identify the attacking and the anti-aircraft drones as a single oscillatory system with the antagonistic components. Antagonistic components are connected using the non-Newtonian elastic element. Test game with a high-explosive drone, test game with a fragmentation drone and 2D salvo game were considered. The game in this case is not a traditional minimax optimization problem, but appears to be simulation of the compromise unstable motion mode. Salvo of three attack drones in the

2D games is aimed against three stationary targets. Anti-aircraft salvo includes two high-explosive and two fragmentation drones. The attacking drones “know nothing” about the anti-aircraft target distribution; thus, each of them “avoids” the anti-aircraft drones simultaneously. One operator is playing. Therefore, the game has only two parameters, i.e. two different stiffness coefficients of any non-Newtonian elastic element. The non-Newtonian oscillatory system under study is non-oscillatory. There are violations of the well-known oscillation theorems of the oscillations theory: with the increasing rigidity, the system oscillation frequency drops, the oscillation forms acquire additional nodes, etc.

Keywords: drone salvo, non-Newtonian elastic element, 2D game

Традиционно атакующий дрон (АД) и зенитный дрон (ЗД) рассматривают независимо. Так, в публикациях [1, 2] средства мобильной защиты объектов и группы (роя) атакующих (разведывательных) дронов исследованы по отдельности. Теория роения боевых роботов получила развитие в статье [3]. Разработаны методы независимого применения дронов разведки, обороны и нападения.

Рассмотрены вопросы организации отдельного гетерогенного роя, включающего в себя киберфизические устройства различной специализации [4]. Предложено представлять отдельный независимый плотный рой дронов как колебательную систему переменной структуры [5]. Главная проблема здесь — недопущение столкновений между элементами роя. Для построения такой колебательной системы использован теоретико-множественный подход.

Разработан метод графов для получения характеристического полинома и передаточной функции отдельного независимого роя дронов [6]. Предложен механизм построения деревьев и прадеревьев частей графа. Исследованы проблемы создания коммуникационной архитектуры отдельного независимого роя дронов для обмена информацией между ними [7].

Обсуждены вопросы использования нейронных сетей для независимого управления отдельным роем дронов [8]. Разработаны примеры конструкции многоразовых ЗД со стрелковым вооружением [9, 10]. Найдено решение проблемы подавления отдачи оружия при выстреле. Разработана процедура идентификации отдельного дрона по его поведению [11].

Предложен алгоритм оптимальной навигации независимого роя дронов при условии отсутствия столкновений отдельных единиц между собой [12]. Сформулированы основные принципы противодронной защиты объектов

от нападения [13]. Разработаны приемы временной синхронизации функционирования элементов отдельного независимого роя дронов [14].

Рассмотрены вопросы навигации автономного роя дронов в переносной системе координат [15]. Статья [16] содержит 183 ссылки на работы по средствам радиоэлектронной борьбы с несанкционированным использованием дронов. Предложены методы анализа уровня шума, создаваемого роем дронов, и выданы рекомендации по оптимальной компоновке винтового беспилотного летательного аппарата [17].

Анализ указанных и других работ показал, что проблема взаимодействия залпов АД и ЗД изучена недостаточно.

Цель работы — введение в рассмотрение единой колебательной системы АД — ЗД с неньютоновским упругим элементом (НУЭ).

Тестовая игра с фугасным зенитным дроном (ФЗД). Двумерная модель тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ФЗД приведена на рис. 1, а. ФЗД должен подлететь к АД достаточно близко. ФЗД стремится уменьшить расстояние Δ между дронами, а АД — увеличить. Двухмассовый (m_1 и m_2) АД и двухмассовый (m_3 и m_4) ФЗД образуют единую колебательную систему с антагонистическими составляющими. Антагонистические составляющие соединены НУЭ (желтая стрелка). Параметры игры a и b — два различных коэффициента жесткости одного и того же НУЭ.

Одномерная модель тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ФЗД приведена на рис. 1, б. Трения нет. Синяя и зеленая стрелки — это действующие на дроны управляющие силы — силы действия и противодействия, пропорциональные расстоянию Δ между дронами. В совокупности они образуют

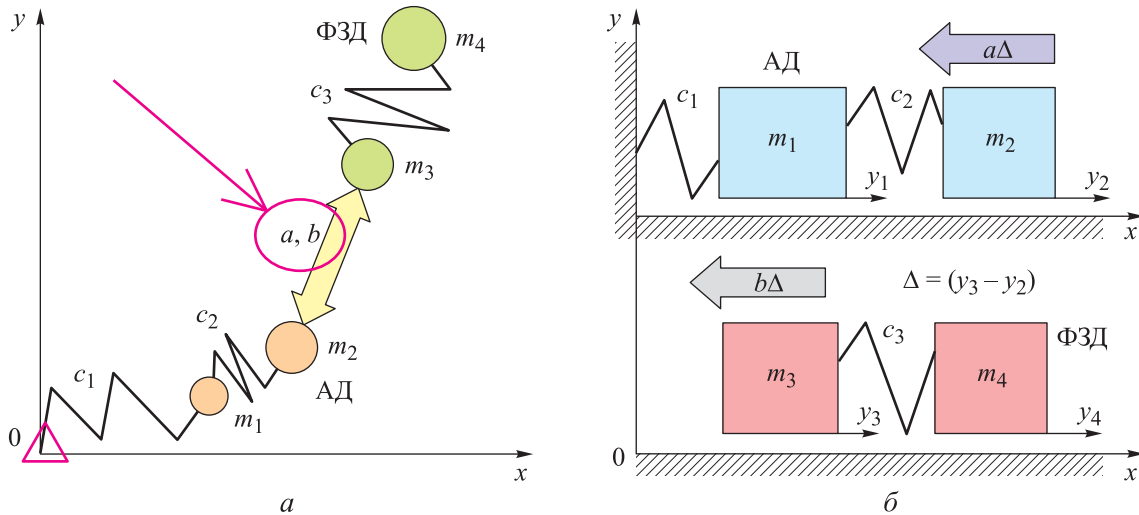


Рис. 1. Двумерная (а) и одномерная (б) модели тестовой компьютерной антагонистической ньютоновской игры с ФЗД

НУЭ (на рис. 1, б не показан). Эти силы действуют по одной прямой и приложены к разным телам.

Несимметричная матрица жесткости одномерной модели имеет вид

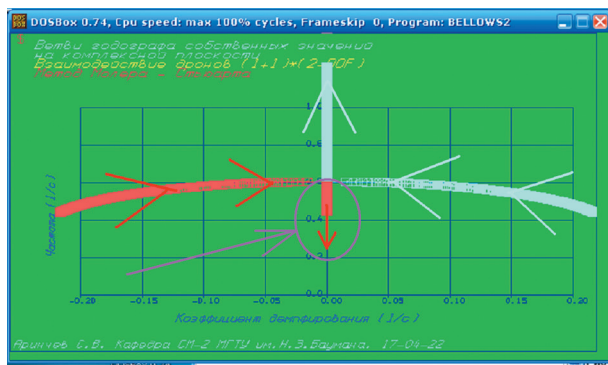
$$\begin{vmatrix} -c_1 - c_2 & c_2 & 0 & 0 \\ c_2 & -c_2 + a & -a & 0 \\ 0 & b & -c_3 - b & c_3 \\ 0 & 0 & c_3 & -c_3 \end{vmatrix}$$

Рассматриваемая колебательная система — неосцилляционная [18–20]. Эволюция собственных значений характеристического показателя на комплексной плоскости показана на рис. 2, а. Параметр игры *a* зафиксирован, параметр игры *b* растет от некоторого минимально-

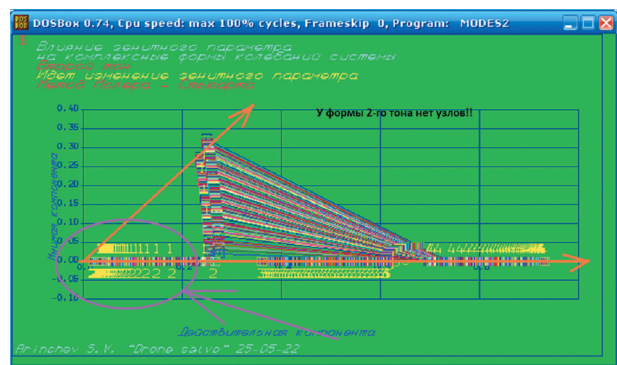
го до некоторого максимального значения. Фиолетовая стрелка и овал фиксируют уменьшение собственной частоты при увеличении жесткости. Это есть нарушение известной осцилляционной теоремы классической теории колебаний, согласно которой с увеличением жесткости частота растет.

Эволюция формы колебаний второго тона на комплексной плоскости показана на рис. 2, б. Видно, что форма колебаний второго тона не имеет узла. Это — нарушение известной осцилляционной теоремы классической теории колебаний, по которой форма колебаний второго тона имеет один узел.

Нарушения указанных осцилляционных теорем часто имеют место в задачах теории колебаний неконсервативных систем с несимметричной частотной матрицей [21].



а



б

Рис. 2. Эволюция собственных значений характеристического показателя (а) и формы колебаний второго тона (б) модели игры с ФЗД на комплексной плоскости

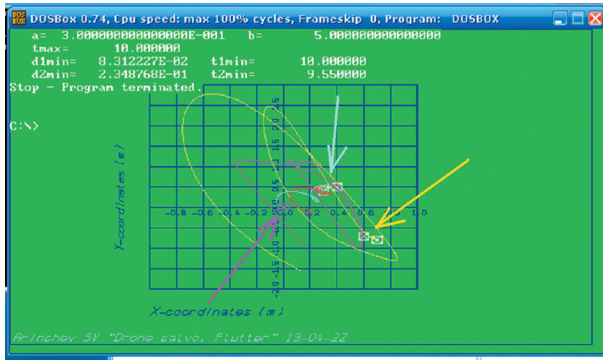


Рис. 3. Интерфейс тестовой компьютерной антагонистической ньютоновской игры с ФЗД

Игра здесь — это решение задачи Коши с начальными условиями. Уравнения динамики игры имеют вид

$$\begin{aligned} -m_1\ddot{x}_1 - c_1x_1 + c_2(x_2 - x_1) &= 0; \\ -m_1\ddot{y}_1 - c_1y_1 + c_2(y_2 - y_1) &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -m_2\ddot{x}_2 - c_2(x_2 - x_1) - a(x_3 - x_2) &= 0; \\ -m_2\ddot{y}_2 - c_2(y_2 - y_1) - a(y_3 - y_2) &= 0; \\ -m_3\ddot{x}_3 + c_3(x_4 - x_3) - b(x_3 - x_2) &= 0; \\ -m_3\ddot{y}_3 + c_3(y_4 - y_3) - b(y_3 - y_2) &= 0; \\ -m_4\ddot{x}_4 - c_3(x_4 - x_3) &= 0; \\ -m_4\ddot{y}_4 - c_3(y_4 - y_3) &= 0. \end{aligned}$$

Начальные условия интегрирования:

$$\begin{aligned} x_j(0) &= x_{j0}; \quad y_j(0) = y_{j0}; \\ \dot{x}_j(0) &= 0; \quad \dot{y}_j(0) = 0, \quad j = 1, \dots, 4. \end{aligned}$$

Каждый дрон имеет свою функцию промаха. На рис. 1, *a* неподвижная цель показана треугольником в начале координат. Функция промаха АД по неподвижной цели

$$d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}.$$

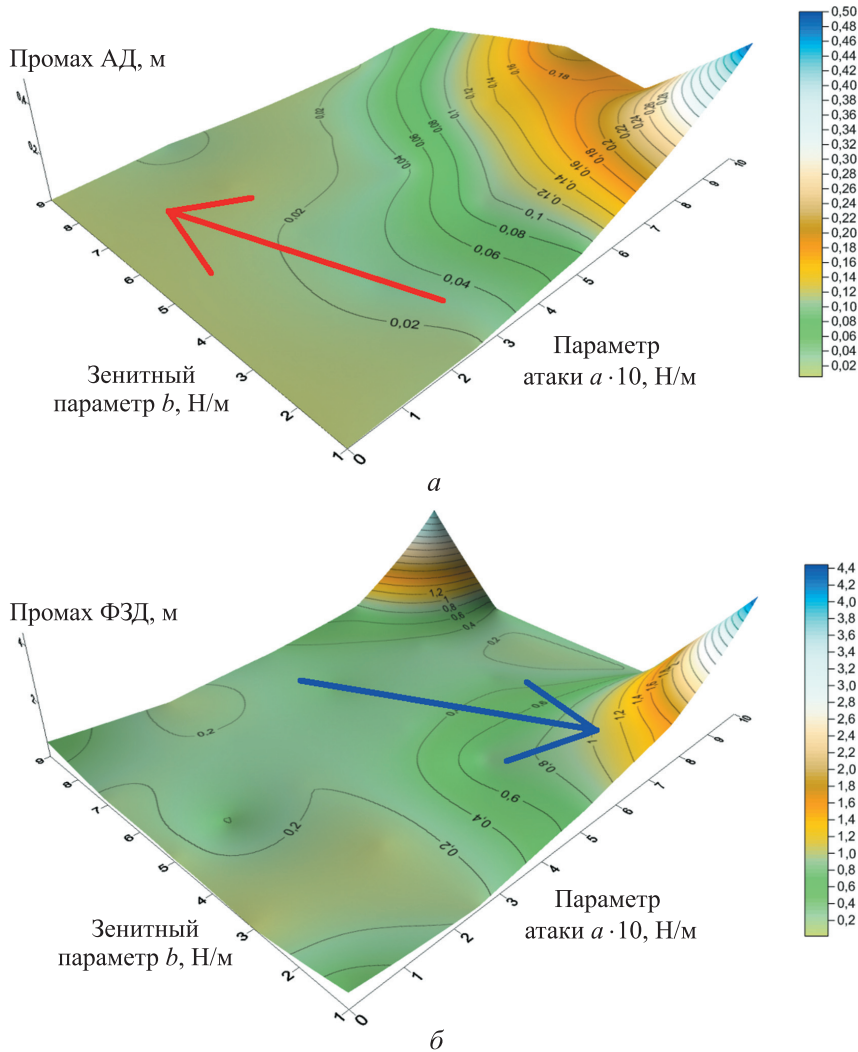


Рис. 4. Поверхности промахов АД (а) и ФЗД (б) на плоскости параметров игры

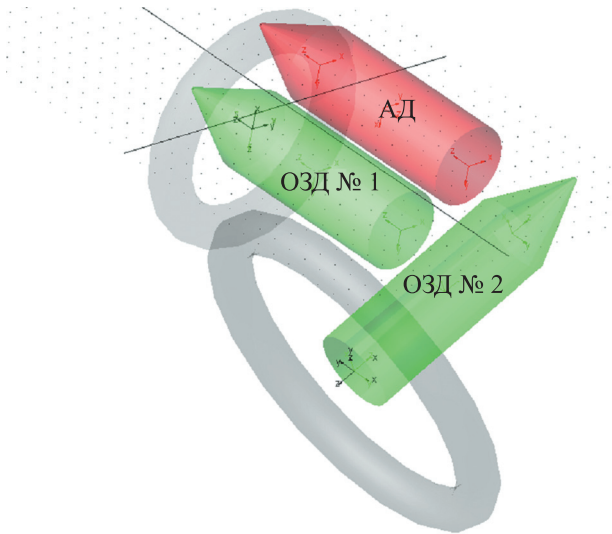


Рис. 5. Фрагмент компьютерной антагонистической ньютоновской игры при параллельном и перпендикулярном расположении ОЗД относительно АД

Функция промаха ФЗД по АД

$$d_2 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}.$$

Интерфейс тестовой компьютерной антагонистической ньютоновской игры с ФЗД приведен на рис. 3. Программа написана на языке Fortran для среды DOSBox. Продолжительность игры — 10 с. Голубая стрелка показывает начальное положение АД, желтая — начальное положение ФЗД. Движение — неустойчивое, оно имеет колебательный характер. Форма колебаний второго тона не имеет узлов.

В игре достигнут компромисс, «когда все живы и здоровы». Выбор компромисса (рис. 4, а и б) поясняют поверхности промаха на плоскости значений параметров игры. С точки зрения АД (см. рис. 4, а) решение следует выбирать по красной стрелке, где промах равен нулю. Но в этой точке промах ФЗД (см. рис. 4, б) тоже равен нулю, т. е. АД будет перехвачен и сбит. По этой причине решение игры следует выбирать по синей стрелке, где промахи значительны, а движение колебательной системы неустойчивое.

Тестовая игра с осколочным зенитным дроном (ОЗД). ОЗД должен не только подлететь к АД, но и развернуться определенным образом, чтобы осколки полетели в нужном направлении. Если АД и ОЗД № 1 параллельны (рис. 5), то осколки поражают цель. Если АД и ОЗД № 2 перпендикулярны, то осколки летят мимо.

Двумерная модель тестовой компьютерной антагонистической ньютоновской игры с ОЗД приведена на рис. 6, а где r_{12} и r_{34} — осевые векторы двухмассового АД и ОЗД; $\Delta r = r_{34} - r_{12}$ — зенитный угол линейной размерности. ОЗД стремится этот угол уменьшить, а АД — увеличить. АД и ОЗД образуют единую колебательную систему с антагонистическими составляющими.

Черными стрелки на рис. 6, а обозначены управляющие силы, которые пропорциональны Δr . Параметры игры a и b — два различных коэффициента жесткости одного и того же НУЭ, работающего по зенитному углу. Здесь должен быть еще один НУЭ, работающий по дальности, но он не рассмотрен в этой тестовой игре.

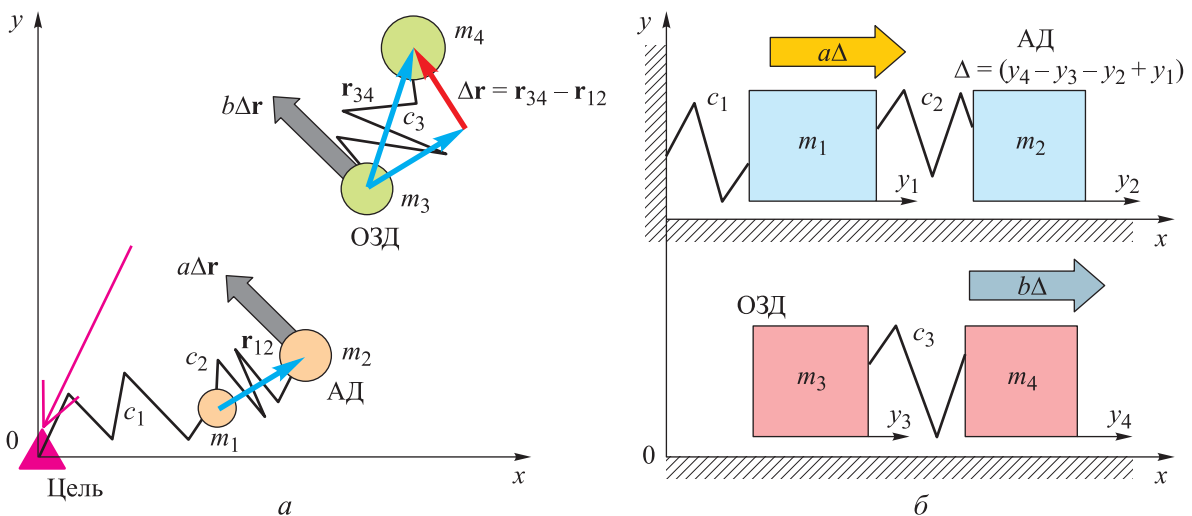


Рис. 6. Двумерная (а) и одномерная (б) модели тестовой компьютерной антагонистической ньютоновской игры с ОЗД

Одномерная модель тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ОЗД приведена на рис. 6, б. Трения нет. Синяя и желтая стрелки — это управляющие силы, действующие на дроны — силы действия и противодействия, пропорциональные величине Δr . В совокупности эти силы образуют НУЭ (на рис. 6, б не показан), работающий по зенитному углу.

Несимметричная матрица жесткости одномерной модели имеет вид

$$\begin{pmatrix} -c_1 - c_2 + a & c_2 - a & -a & a \\ c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & c_3 \\ b & -b & c_3 - b & -c_3 + b \end{pmatrix}.$$

Эволюция формы колебаний первого тона одномерной модели тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ОЗД на комплексной плоскости приведена на рис. 7. Желтая стрелка показывает, что маркеры данного собственного вектора лежат по разные стороны от начала координат. Таким образом, форма колебаний первого тона модели имеет узел. Это есть нарушение известной осцилляционной теоремы классической теории колебаний [18], согласно которой форма колебаний первого тона не имеет узлов.

Игра здесь — это решение задачи Коши с начальными условиями. Уравнения динамики игры имеют вид

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{x}_1 - c_1 x_1 + c_2 (x_2 - x_1) + a \Delta r_x &= 0; \\ -m_1 \ddot{y}_1 - c_1 y_1 + c_2 (y_2 - y_1) + a \Delta r_y &= 0; \\ -m_2 \ddot{y}_2 - c_2 (y_2 - y_1) &= 0; \\ -m_3 \ddot{x}_3 + c_3 (x_4 - x_3) &= 0; \\ -m_3 \ddot{y}_3 + c_3 (y_4 - y_3) &= 0; \\ -m_4 \ddot{x}_4 - c_3 (x_4 - x_3) + b \Delta r_x &= 0; \\ -m_4 \ddot{y}_4 - c_3 (y_4 - y_3) + b \Delta r_y &= 0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\Delta r = (\Delta r_x; \Delta r_y),$$

где Δr_x , Δr_y — координатные составляющие зенитного угла Δr линейной размерности,

$$\Delta r_x = x_4 - x_3 - x_2 + x_1; \quad \Delta r_y = y_4 - y_3 - y_2 + y_1.$$

Начальные условия интегрирования:

$$x_j(0) = x_{j0}; \quad y_j(0) = y_{j0}; \quad \dot{x}_j(0) = 0; \quad \dot{y}_j(0) = 0, \quad j = 1, \dots, 4.$$

В рассмотрение введены следующие функции:

- промах АД по неподвижной цели (рис. 8, фиолетовая стрелка)

$$d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2};$$

- промах по дальности ОЗД по АД

$$d_2 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2};$$

- промах по зенитному углу ОЗД по АД

$$d_3 = \sqrt{\Delta r_x^2 + \Delta r_y^2}.$$

Интерфейс тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ОЗД в среде DOSBox приведен на рис. 8. Для выбранных значений параметров игры a и b продолжительность игры составляла 20 с. Движение дронов — неустойчивое. Достигнут компромисс: цель АД не поражена, но сам АД ушел от перехвата.

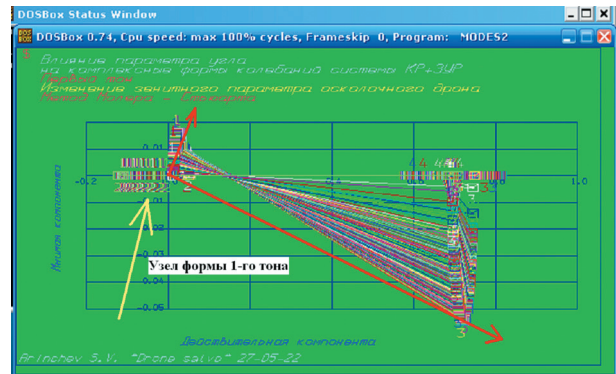


Рис. 7. Эволюция формы колебаний первого тона одномерной модели тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ОЗД на комплексной плоскости

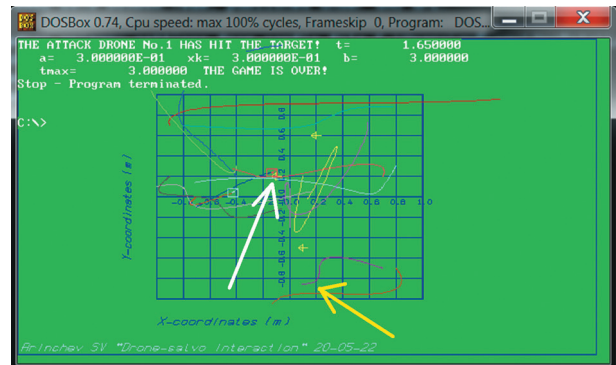


Рис. 8. Интерфейс тестовой компьютерной антагонистической неньютоновской игры с ОЗД в среде DOSBox

2D-игра залпами. Модель 2D-игры залпами приведена на рис. 9, а. Залпы АД и ЗД включают в себя семь беспилотных летательных аппаратов: АД № 1–3, ФЗД № 1 и 2, ОСД № 3 и 4. АД работают по трем неподвижным целям (см. рис. 9, а сиреневые «бочки»).

ФЗД должны подлететь к АД, а ОСД — еще и развернуться определенным образом, чтобы осколки полетели в нужном направлении. Два

указанных залпа образуют единую колебательную систему с антагонистическими составляющими. Антагонистические составляющие соединены НУЭ двух типов: НУЭ по дальности, НУЭ по зенитному углу.

Одномерная модель 2D-игры с семью дронами приведена на рис. 9, б. Здесь цветные стрелки — силы действия и противодействия по дальности, а черные — силы действия и про-

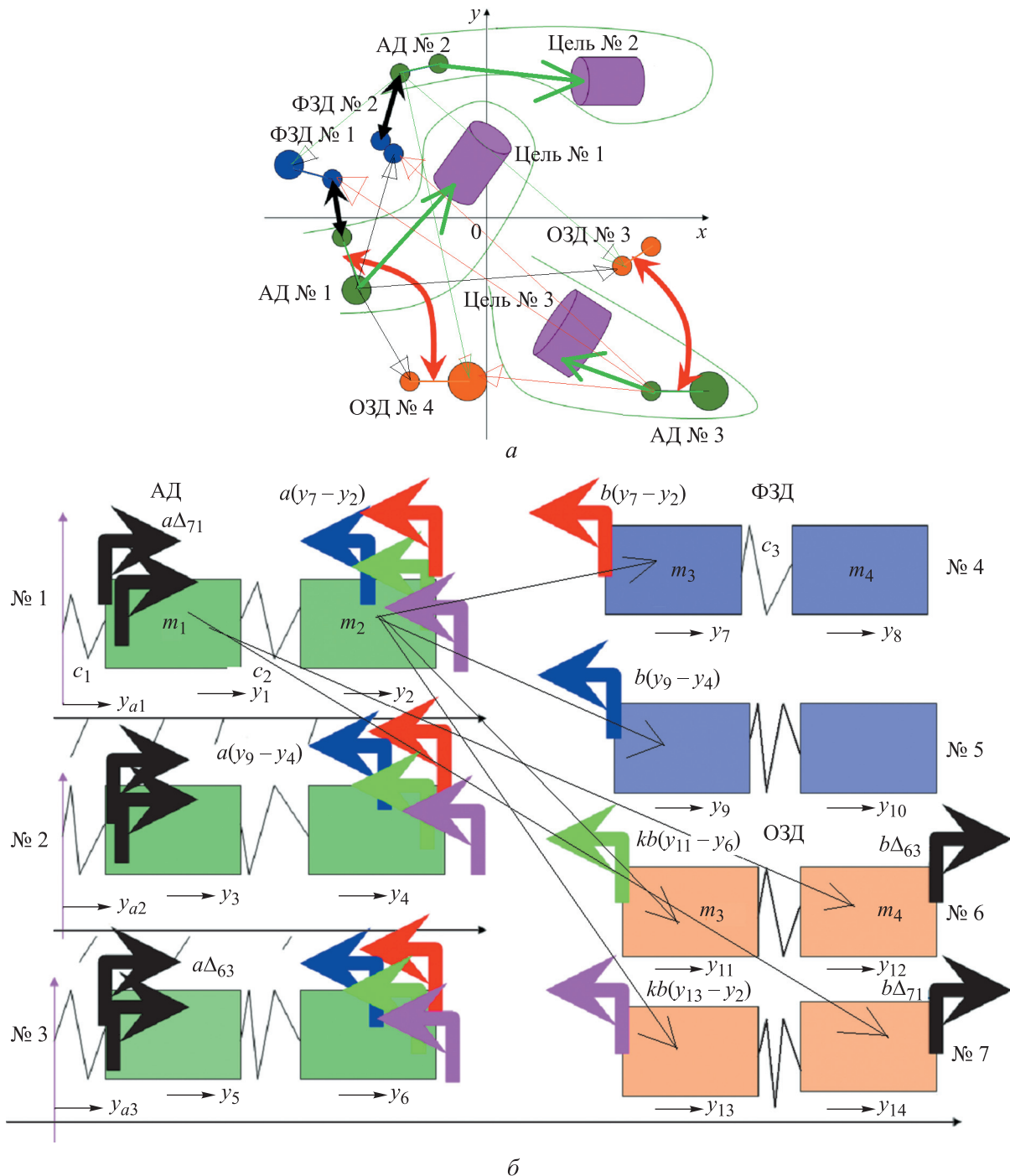


Рис. 9. Двумерная (а) и одномерная (б) модели с семью двухмассовыми дронами

тиводействия по зенитному углу. Всего восемнадцать НУЭ.

Матрица жесткости одномерной модели 2D-игры залпами размером 14×14 имеет вид

$$\begin{pmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a & -a & a \\ c_2 & \Phi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_1 & \Phi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a & -a & a \\ 0 & 0 & c_2 & \Phi_3 & 0 & 0 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_1 & \Phi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & a & -a & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_2 & \Phi_3 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 & -a & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_4 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_4 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & kb & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_5 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & -b & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_6 & \Phi_7 & 0 & 0 \\ 0 & kb & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_5 & c_4 \\ b & -b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_6 & \Phi_7 \end{pmatrix},$$

где

$$\Phi_1 = -c_1 + 2a - c_2; \quad \Phi_2 = -2a + c_2;$$

$$\Phi_3 = -c_2 + 4a; \quad \Phi_4 = -c_3 - b;$$

$$\Phi_5 = -c_4 - kb; \quad \Phi_6 = c_4 - b; \quad \Phi_7 = -c_4 + b.$$

Играет один оператор, поэтому имеются только два параметра игры a и b — коэффициенты жесткости любого из восемнадцати НУЭ. Коэффициент редукции управляющей силы по дальности $k < 1$. Он означает, что условие по дальности для ОЗД не такое жесткое, как условие по дальности для ФЗД.

Игра здесь — это решение задачи Коши с начальными условиями. Уравнения динамики игры для сил в проекции на ось OX имеют вид

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{x}_1 - c_1(x_1 - x_{a1}) + a(x_{12} - x_{11} - x_2 + x_1) + \\ + a(x_{14} - x_{13} - x_2 + x_1) + c_2(x_2 - x_1) = 0; \\ -m_2 \ddot{x}_2 - c_2(x_2 - x_1) - a(x_7 - x_2) - a(x_9 - x_2) - \\ - a(x_{11} - x_2) - a(x_{13} - x_2) = 0; \\ -m_1 \ddot{x}_3 - c_1(x_3 - x_{a2}) + a(x_{12} - x_{11} - x_4 + x_3) + \\ + a(x_{14} - x_{13} - x_4 + x_3) + c_2(x_4 - x_3) = 0; \\ -m_2 \ddot{x}_4 - c_2(x_4 - x_3) - a(x_7 - x_4) - a(x_9 - x_4) - \\ - a(x_{11} - x_4) - a(x_{13} - x_4) = 0; \\ -m_1 \ddot{x}_5 - c_1(x_5 - x_{a3}) + a(x_{12} - x_{11} - x_6 + x_5) + \\ + a(x_{14} - x_{13} - x_6 + x_5) + c_2(x_6 - x_5) = 0; \\ -m_2 \ddot{x}_6 - c_2(x_6 - x_5) - a(x_7 - x_6) - a(x_9 - x_6) - \\ - a(x_{11} - x_6) - a(x_{13} - x_6) = 0; \\ -m_3 \ddot{x}_7 + c_3(x_8 - x_7) - b(x_7 - x_2) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -m_4 \ddot{x}_8 - c_3(x_8 - x_7) = 0; \\ -m_3 \ddot{x}_9 - b(x_9 - x_4) + c_3(x_{10} - x_9) = 0; \\ -m_4 \ddot{x}_{10} - c_3(x_{10} - x_9) = 0; \\ -m_5 \ddot{x}_{11} + c_4(x_{12} - x_{11}) - kb(x_{11} - x_6) = 0; \\ -m_6 \ddot{x}_{12} - c_4(x_{12} - x_{11}) + b(x_{12} - x_{11} - x_6 + x_5); \\ -m_5 \ddot{x}_{13} + c_4(x_{14} - x_{13}) - kb(x_{13} - x_2) = 0; \\ -m_6 \ddot{x}_{14} - c_4(x_{14} - x_{13}) + b(x_{14} - x_{13} - x_2 + x_1) = 0, \end{aligned}$$

где $x_j(0) = x_{j0}; \dot{x}_j(0) = \dot{x}_{j0}; j = 1, \dots, 14$.

Уравнения динамики игры для сил в проекции на ось OY имеют вид

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{y}_1 - c_1(y_1 - y_{a1}) + a(y_{12} - y_{11} - y_2 + y_1) + \\ + a(y_{14} - y_{13} - y_2 + y_1) + c_2(y_2 - y_1) = 0; \\ -m_2 \ddot{y}_2 - c_2(y_2 - y_1) - a(y_7 - y_2) - a(y_9 - y_2) - \\ - a(y_{11} - y_2) - a(y_{13} - y_2) = 0; \\ -m_1 \ddot{y}_3 - c_1(y_3 - y_{a2}) + a(y_{12} - y_{11} - y_4 + y_3) + \\ + a(y_{14} - y_{13} - y_4 + y_3) + c_2(y_4 - y_3) = 0; \\ -m_2 \ddot{y}_4 - c_2(y_4 - y_3) - a(y_7 - y_4) - a(y_9 - y_4) - \\ - a(y_{11} - y_4) - a(y_{13} - y_4) = 0; \\ -m_1 \ddot{y}_5 - c_1(y_5 - y_{a3}) + a(y_{12} - y_{11} - y_6 + y_5) + \\ + a(y_{14} - y_{13} - y_6 + y_5) + c_2(y_6 - y_5) = 0; \\ -m_2 \ddot{y}_6 - c_2(y_6 - y_5) - a(y_7 - y_6) - a(y_9 - y_6) - \\ - a(y_{11} - y_6) - a(y_{13} - y_6) = 0; \\ -m_3 \ddot{y}_7 + c_3(y_8 - y_7) - b(y_7 - y_2) = 0; \\ -m_4 \ddot{y}_8 - c_3(y_8 - y_7) = 0; \\ -m_3 \ddot{y}_9 - b(y_9 - y_4) + c_3(y_{10} - y_9) = 0; \\ -m_4 \ddot{y}_{10} - c_3(y_{10} - y_9) = 0; \\ -m_5 \ddot{y}_{11} + c_4(y_{12} - y_{11}) - kb(y_{11} - y_6) = 0; \\ -m_6 \ddot{y}_{12} - c_4(y_{12} - y_{11}) + b(y_{12} - y_{11} - y_6 + y_5); \\ -m_5 \ddot{y}_{13} + c_4(y_{14} - y_{13}) - kb(y_{13} - y_2) = 0; \\ -m_6 \ddot{y}_{14} - c_4(y_{14} - y_{13}) + b(y_{14} - y_{13} - y_2 + y_1) = 0, \end{aligned}$$

где $y_j(0) = y_{j0}; \dot{y}_j(0) = \dot{y}_{j0}; j = 1, \dots, 14$.

Для семи двухмассовых дронов имеем 28 уравнений динамики и 56 начальных условий. С увеличением числа дронов число уравнений системы и число слагаемых каждого отдельного уравнения пропорционально растут. Радиус-векторы неподвижных целей № 1–3 определяют соответствующими выражениями

$$\mathbf{r}_{a1} = (x_{a1}; y_{a1}); \quad \mathbf{r}_{a2} = (x_{a2}; y_{a2}); \quad \mathbf{r}_{a3} = (x_{a3}; y_{a3}).$$

Использовано девять функций промаха, куда входят целераспределение атаки и зенитное целераспределение. Последнее включает в себя

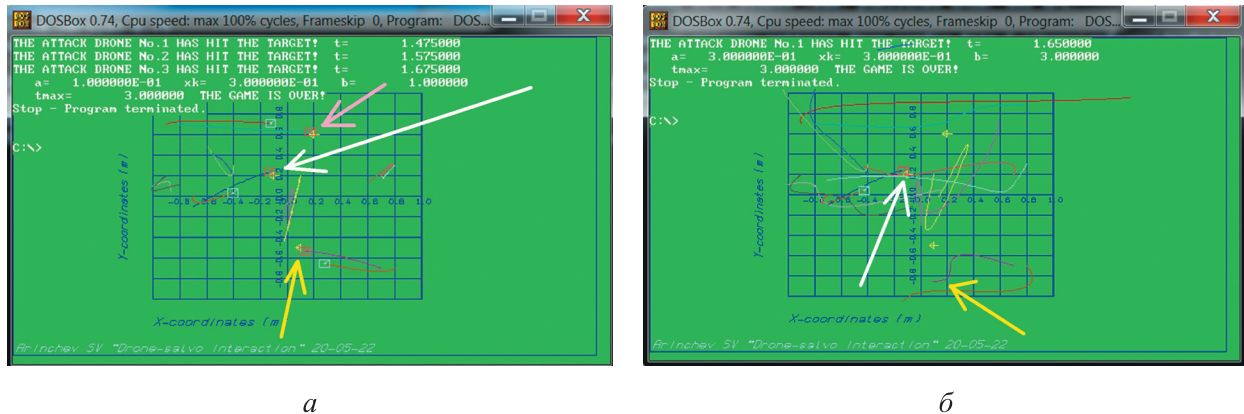


Рис. 10. Интерфейсы игры залпами при различных значениях параметров игры:
 а — все цели поражены; б — АД № 3 «струсил»

целераспределение по дальности и зенитному углу.

В целераспределении атаки (см. рис. 9, а) номер АД соответствует номеру неподвижной цели. Функции промаха залпа АД № 1–3 по неподвижным целям № 1–3 имеют соответствующий вид

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_{a1})^2 + (y_1 - y_{a1})^2};$$

$$d_2 = \sqrt{(x_3 - x_{a2})^2 + (y_3 - y_{a2})^2};$$

$$d_3 = \sqrt{(x_5 - x_{a3})^2 + (y_5 - y_{a3})^2}.$$

Зенитное целераспределение (см. рис. 9, б) следующее: по АД № 1 работает ФЗД № 4, по АД № 2 — ФЗД № 5, по АД № 3 — ОЗД № 6, по АД № 1 — ОЗД № 7. Отметим, что по АД № 1 работают два ЗД: ФЗД № 4 и ОЗД № 7. АД «ничего не знают» о зенитном целераспределении, поэтому каждый АД уходит от всех ЗД одновременно. Функции промаха по дальности ФЗД № 4 и 5 и ОЗД № 6 и 7 по АД № 1–3 имеют соответствующий вид

$$d_4 = \sqrt{(x_7 - x_2)^2 + (y_7 - y_2)^2};$$

$$d_5 = \sqrt{(x_9 - x_4)^2 + (y_9 - y_4)^2};$$

$$d_6 = \sqrt{(x_{11} - x_6)^2 + (y_{11} - y_6)^2};$$

$$d_7 = \sqrt{(x_{13} - x_2)^2 + (y_{13} - y_2)^2}.$$

Функции промаха по зенитному углу ОЗД № 6 по АД № 3 и ОЗД № 7 по АД № 1 определяются соответствующими выражениями

$$d_8 = \sqrt{\Delta r_{x63}^2 + \Delta r_{y63}^2}; \quad d_9 = \sqrt{\Delta r_{x71}^2 + \Delta r_{y71}^2},$$

где Δr_{x63} , Δr_{y63} , и Δr_{x71} , Δr_{y71} — координатные составляющие зенитных углов $\Delta r_{63} =$

$= (\Delta r_{x63}; \Delta r_{y63})$ и $\Delta r_{71} = (\Delta r_{x71}; \Delta r_{y71})$ линейной размерности соответственно,

$$\Delta r_{x63} = x_{12} - x_{11} - x_6 + x_5;$$

$$\Delta r_{y63} = y_{12} - y_{11} - y_6 + y_5;$$

$$\Delta r_{x71} = x_{14} - x_{13} - x_2 + x_1;$$

$$\Delta r_{y71} = y_{14} - y_{13} - y_2 + y_1.$$

Интерфейс игры залпами при различных значениях параметров игры а и б приведен на рис. 10, а. Значения параметров игры невелики. Дроны не обращают особого внимания друг на друга. АД (показаны стрелками) поразили все неподвижные цели (желтые маркеры). Так, сообщение «THE ATTACK DRONE No. 3 HAS HIT THE TARGET!» означает, что АД № 3 поразил цель № 3 в момент времени 1,675 с.

В интерфейсе игры, показанном на рис. 10, б, параметры увеличены в 3 раза. Дроны активно включились в работу. Например, видно, что АД № 3 сначала двигался к цели, а потом «струсил», развернулся и улетел. Цель не поражена. Зато в соответствии с условиями компромисса летательный аппарат не сбит, он остался невредимым и готовым к дальнейшей работе.

Выводы

1. Атакующий и зенитный дроны можно рассматривать как единую колебательную систему с антагонистическими составляющими. Антагонистические составляющие системы соединены НУЭ.

2. Рассмотренная колебательная система — неосцилляционная, так как выявлены нарушения базовых осцилляционных теорем теории колебаний.

Литература

- [1] Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита мобильных объектов от роя ударных дронов. *Защита и безопасность*, 2020, № 4, с. 18–19.
- [2] Сильников М.В., Карпович А.В., Лазоркин В.И. и др. *Научно-методическое обоснование способов применения летательных аппаратов для разведки и поражения целей*. Санкт-Петербург, НПО Специальных материалов, 2022, с. 355–364.
- [3] Савин Л.В. Вариант будущей войны: роение боевых роботов. *Стратегическая стабильность*, 2017, № 1, с. 24–35.
- [4] Проничев А.П., Чечулин А.А., Виткова Л.А. Подход к организации гетерогенного роя устройств. *Информатизация и связь*, 2020, № 5, с. 119–124, doi: <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2020-11-5-119-124>
- [5] Нистюк А.И., Турыгин Ю.В., Хворенков В.В. и др. Алгоритм получения характеристического полинома и передаточной функции динамической модели «роя» дронов. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2018, т. 16, № 4, с. 122–129, doi: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2018-4-122-129>
- [6] Нистюк А.И., Абилов А.В., Хворенков В.В. и др. Разработка роевой технологии для мобильных самоорганизующихся сетей. Идентификация динамических моделей. *Вестник ИжГТУ имени М.Т.Д. Калашиникова*, 2018, т. 21, № 4, с. 136–140, doi: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2018-4-136-140>
- [7] Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы. *Вестник АГУ*, 2020, № 4. URL: <http://vestnik.adygnet.ru/files/2020.4/6465/87-94.pdf>
- [8] Васильев И.С., Кондраненкова Т.Е. Исследование применения нейронных сетей для управления роем дронов. *Сб. тр. конф. Проблемы современной науки и общества: сохранение и развитие наследия великой Победы*. Нижний Новгород, НГИЭИ, 2021, с. 117–122.
- [9] Брусов В.С., Волковой А.В., Друзин С.В. и др. *Беспилотный летательный аппарат-перехватчик*. Патент РФ 2669904. Заявл. 13.02.2018, опубл. 16.10.2018.
- [10] Брусов В.С., Волковой А.В., Друзин С.В. и др. *Беспилотный летательный аппарат-перехватчик*. Патент РФ 2699148. Заявл. 13.02.2018, опубл. 03.09.2019.
- [11] Nassi B., Ben-Netanel R., Shamir A. et al. Game of drones — detecting streamed POI from encrypted FPV channel. *arXiv:1801.03074*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.03074>
- [12] Majd A., Loni M., Sahebi G. et al. Improving motion safety and efficiency of intelligent autonomous swarm of drones. *Drones*, 2020, vol. 4, no. 3, art. 48, doi: <https://doi.org/10.3390/drones4030048>
- [13] Csengeri J. Counter-drone activity as a system. *Security & Future*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 31–34.
- [14] Alsolami F., Alqurashi F.A., Hasan M.K. et al. Development of self-synchronized drones' network using cluster-based swarm intelligence approach. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 48010–48022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064905>
- [15] Yasin J.N., Mohamed S.A.S., Haghbayan M.H. et al. Navigation of autonomous swarm of drones using translational coordinates. *EasyChair Preprint* 2020, № 2971, 11 p.
- [16] Park S., Kim H.T., Lee S. et al. Survey of anti-drone systems: components, design, and challenges. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 42635–42659, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065926>
- [17] Dbouk T., Dikakis D. Quadcopter drones swarm aeroacoustics. *Phys. Fluids*, 2021, vol. 33, no. 5, art. 057112, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0052505>
- [18] Гантмахер Ф.Р., Крейн М.Г. *Осцилляционные матрицы и ядра и малые колебания механических систем*. Москва. Гостехиздат. 1950. 360 с.
- [19] Гантмахер Ф.Р. *Теория матриц*. Москва. Наука. 1988. 548 с.
- [20] Бабаков И.М. *Теория колебаний*. Москва. Наука. 1968. 560 с.
- [21] Аринчев С.В. *Теория колебаний неконсервативных систем*. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. 464 с.

References

- [1] Silnikov M.V., Lazorkin V.I. Active protection of mobile objects from the swarm of combat robots. *Zashchita i bezopasnost*, 2020, no. 4, pp. 18–19. (In Russ.).
- [2] Silnikov M.V., Karpovich A.V., Lazorkin V.I. et al. *Nauchno-metodicheskoe obosnovanie sposobov primeneniya letatelnykh apparatov dlya razvedki i porazheniya tseley* [Methodological grounding for ways of using aircraft for surveillance and target acquisition]. Sankt-Petersburg, NPO Spetsialnykh materialov Publ., 2022, pp. 355–364. (In Russ.).
- [3] Savin L.V. Future war: swarm of combat robots. *Strategicheskaya stabilnost*, 2017, no. 1, pp. 24–35. (In Russ.).
- [4] Silnichev A.P., Chechulin A.A., Vitkova L.A. Approach to management of heterogeneous swarms of devices. *Informatizatsiya i svyaz* [Informatization and Communication], 2020, no. 5, pp. 119–124, doi: <https://doi.org/10.34219/2078-8320-2020-11-5-119-124> (in Russ.).
- [5] Nistyuk A.I., Turygin Yu.V., Khvorenkov V.V. et al. Algorithm for obtaining a characteristic polynomial and transfer function of dynamic model of drone "swarm". *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2018, t. 16, no. 4, pp. 122–129, doi: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2018-4-122-129> (in Russ.).
- [6] Nistyuk A.I., Abilov A.V., Khvorenkov V.V. et al. Development of swarm technology for mobile self-organizing networks. Identification of dynamic models. *Vestnik IzhGTU imeni M.T.D Kalashnikova*, 2018, t. 21, no. 4, pp. 136–140, doi: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2018-4-136-140> (in Russ.).
- [7] Dovgal V.A., Dovgal D.V. Analysis of communication interaction systems for drones performing a search mission as part of a group. *Vestnik AGU*, 2020, no. 4. URL: <http://vestnik.adygnet.ru/files/2020.4/6465/87-94.pdf> (in Russ.).
- [8] Vasilyev I.S., Kondranenkova T.E. [Study on application of neuron networks for control on drones swarm]. *Sb. tr. konf. Problemy sovremennoy nauki i obshchestva: sokhraneniye i razvitiye naslediya velikoy Pobedy* [Proc. Conf. Problems of Modern Science and Society: Preservation and Development of Great Victory Heritage]. Nizhniy Novgorod, NGIEI Publ., 2021, pp. 117–122. (In Russ.).
- [9] Brusov V.S., Volkovoy A.V., Druzin S.V. et al. *Bespilotnyy letatelnyy apparat-perekhvatchik* [Unmanned aerial vehicle — interceptor]. Patent RU 2669904. Appl. 13.02.2018, publ. 16.10.2018. (In Russ.).
- [10] Brusov V.S., Volkovoy A.V., Druzin S.V. et al. *Bespilotnyy letatelnyy apparat-perekhvatchik* [Unmanned interceptor]. Patent RU 2699148. Appl. 13.02.2018, publ. 03.09.2019. (In Russ.).
- [11] Nassi B., Ben-Netanel R., Shamir A. et al. Game of drones — detecting streamed POI from encrypted FPV channel. *arXiv:1801.03074*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.03074>
- [12] Majd A., Loni M., Sahebi G. et al. Improving motion safety and efficiency of intelligent autonomous swarm of drones. *Drones*, 2020, vol. 4, no. 3, art. 48, doi: <https://doi.org/10.3390/drones4030048>
- [13] Csengeri J. Counter-drone activity as a system. *Security & Future*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 31–34.
- [14] Alsolami F., Alqurashi F.A., Hasan M.K. et al. Development of self-synchronized drones' network using cluster-based swarm intelligence approach. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 48010–48022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064905>
- [15] Yasin J.N., Mohamed S.A.S., Haghbayan M.H. et al. Navigation of autonomous swarm of drones using translational coordinates. *EasyChair Preprint* 2020, no. 2971, 11 p.
- [16] Park S., Kim H.T., Lee S. et al. Survey of anti-drone systems: components, design, and challenges. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 42635–42659, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065926>
- [17] Dbouk T., Dikakis D. Quadcopter drones swarm aeroacoustics. *Phys. Fluids*, 2021, vol. 33, no. 5, art. 057112, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0052505>
- [18] Gantmakher F.R., Kreyn M.G. *Ostillyatsionnye matritsy i yadra i malye kolebaniya mekhanicheskikh system* [Oscillating matrixes and kernels and small oscillations of mechanic systems]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1950. 360 p. (In Russ.).

- [19] Gantmakher F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrixes]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 548 p. (In Russ.).
- [20] Babakov I.M. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 560 p. (In Russ.).
- [21] Arinchev S.V. *Teoriya kolebaniy nekonservativnykh system* [Oscillation theory of non-conservative systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 464 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.07.2022

Информация об авторе

АРИНЧЕВ Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Information about the author

ARINCHEV Sergey Vasilyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Взаимодействие залпа атакующих дронов и залпа зенитных дронов как компьютерная антагонистическая неньютоновская 2D-игра. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 1, с. 94–105, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-94-105

Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Interaction between the Attacking Drones Salvo and the Anti-Aircraft Drones Salvo as a Computer Antagonistic Non-Newtonian 2D Game. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 94–105, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-94-105



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Основы проектирования активно-реактивных снарядов с прямоточным воздушно-реактивным двигателем на твердом топливе»

Авторы: В.Е. Смирнов, И.Е. Никитина, Л.А. Розанов

Изложены вопросы устройства и проектирования активно-реактивных снарядов для современных артиллерийских комплексов, оснащенных прямоточными воздушно-реактивными двигателями на твердом топливе (ПВРД на ТТ). Рассмотрены термодинамические основы функционирования и показатели снарядных ПВРД на ТТ, применяемые для них топлива, а также назначение и принцип работы газогенераторного контура ПВРД ТТ. Показаны перспективы увеличения дальности стрельбы артиллерийских боеприпасов за счет применения энергетических установок на твердом топливе.

Для студентов, обучающихся по специальности «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие», изучающих дисциплины «Проектирование управляемых артиллерийских снарядов» и «Специальные двигатели ракетного оружия», может представлять интерес для студентов ряда смежных специальностей, аспирантов и инженеров.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>