

Интегрированная система обеспечения безопасности полетов беспилотных воздушных транспортных средств в едином воздушном пространстве «умного города»*

В.В. Косьянчук, А.А. Обознов, Е.Ю. Зыбин, Ю.В. Бессонова

В работе рассматривается концепция построения интегрированной системы обеспечения безопасности полетов беспилотных воздушных транспортных средств (БВТС) в едином воздушном пространстве «умного города», включающая разработку методов, направленных на обеспечение эксплуатационной безопасности, минимизирующей риски, связанные с отказами оборудования; функциональной безопасности, направленной на устранение рисков, связанных со столкновениями; психофизиологической безопасности, учитывающей управление БВТС с учетом особенностей человека-оператора. В основу методов эксплуатационной и функциональной безопасности положен единый подход, основанный на безмодельной обработке информации о входных и выходных сигналах БВТС. Внедрение такого подхода позволит, прежде всего, масштабировать системы безопасности полетов на различные классы БВТС без необходимости создавать сложные математические модели каждого объекта в отдельности.

Ключевые слова: эксплуатационная безопасность, функциональная безопасность, психофизиологическая безопасность, беспилотные воздушные транспортные средства, «умный город».

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06091).

Введение

Концепция «умного города» в части использования беспилотных воздушных транспортных средств (БВТС) предполагает эффективное использования ресурсов БВТС для управления городской инфраструктурой и удовлетворение потребностей жителей городов, причем к безопасности полетов БВТС предъявляются достаточно высокие требования [1–7].

Для минимизации или устранения рисков эксплуатации БВТС в едином воздушном пространстве «умного города» необходимо создать интегрированную систему обеспечения безопасности полетов БВТС, учитывающую эксплуатационную безопасность, минимизирующую риски, связанные с отказами оборудования; функциональную безопасность, устраняющую риски, связанные со столкновениями; психофизиологическую безопасность, предполагающую управление БВТС с учетом особенностей человека-оператора.

Подобные задачи в сфере безопасности полетов БВТС разрозненно рассматриваются рядом международных организаций, например, JARUS, EUROCAE, EUROCONTROL. Известны и теоретические подходы к решению отдельных задач [8–13]. Например, при решении задачи эксплуатационной безопасности традиционно предполагается наличие полной и достаточной информации, используемой по отдельности в различных бортовых и наземных информационных системах. Для БВТС такие условия трудновыполнимы. Зачастую такая информация отсутствует либо трудно формализуема. В результате неполнота, некорректность, неадекватность данных при-



КОСЬЯНЧУК
Владислав Викторович
профессор,
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем



ОБОЗНОВ
Александр Александрович
профессор,
Институт психологии РАН



ЗЫБИН
Евгений Юрьевич
Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем



БЕССОНОВА
Юлия Владимировна
Институт психологии РАН

водит к недостоверным результатам. Еще более сложны ситуации при возникновении нескольких угроз, в условиях присутствия существенных возмущений, ошибок и неопределенностей, скачкообразных изменений параметров математической модели объекта и внешней среды и т. д. Решение задач функциональной безопасности в практическом плане чаще всего сводится к применению систем предупреждения столкновений, в основу которых положены прямые измерения положения воздушных судов на достаточно большом расстоянии и введении алгоритмов облета по заранее заданным траекториям.

В данной статье рассматривается единый подход к решению рассматриваемых задач, основанный на безмодельной обработке информации о входных и выходных сигналах БВТС. Внедрение такого подхода позволит, прежде всего, масштабировать результаты на различные классы БВТС без необходимости создавать сложные математические модели каждого объекта в отдельности.

В целом, подход носит междисциплинарный характер, интегрируя исследования в области теории управления, идентификации, отказоустойчивости и инженерной психологии при решении задач, связанных с обеспечением безопасности полетов БВТС как полностью автономных, так и использующих интеллектуальные человеко-машинные интерфейсы, с разными уровнями принятия решений.

Методы обеспечения эксплуатационной безопасности

Методы обеспечения эксплуатационной безопасности позволяют обнаруживать отказы в контуре управления БВТС. Причем необходимо сосредоточиться на наиболее критичных отказах с позиции обеспечения безопасности полетов. В группу таких отказов можно отнести отказы двигателя и отказы в системе управления полетом. Обычно БВТС

имеет несколько силовых установок, и в этой связи отказы двигателя не являются критичными, а вот отказы в системе управления могут приводить к серьезным последствиям.

Выделим в системе управления исполнительную, измерительную и вычислительную подсистемы. Вычислительная подсистема обычно имеет трех- или четырехкратное резервирование, и отказ одного из каналов не приводит к потере управляемости. Наиболее критичны отказы в измерительной подсистеме, так как датчики информации не резервированы, а отказ датчика приводит к разрыву обратной связи в контуре управления, что может привести к неустойчивости движения.

В этой связи сформулируем задачу следующим образом. Необходимо построить алгоритм контроля технического состояния измерительной подсистемы БВТС при следующих ограничениях:

- измеряются выходные сигналы системы управления;
- измеряются параметры полета БВТС, причем нет достоверной информации о том, что датчик работает исправно или выдает сигнал, не соответствующий реальному вектору измерений;
- модель системы неизвестна (имеется только допущение, что модель линейна);
- внешние возмущения неизвестны.

Пусть модель динамики полета БВТС представлена в виде [14, 15]

$$x_{i+1} = Ax_i + Bu_i, \quad (1)$$

$$y_i = Cx_i + Du_i, \quad (2)$$

где x , y , u – вектора состояний, измерений и управлений; A , B , C , D – матрицы собственной динамики, эффективности управления, измерений и прямой связи; i – дискретные моменты времени.

Отказ измерительной подсистемы моделируется введением в уравнение (2) матрицы отказов F в виде

$$y_i = F(Cx_i + Du_i) = FCx_i + FDu_i, \quad (3)$$

где $F = \text{diag}([f_1 \dots f_k \dots f_n])$, f_k – элементы матрицы отказов, характеризующие отклонение коэффициентов усиления отказавших каналов измерений от номинальных значений $f_k = 1$ ($f_k \neq 1 \neq 0$). В случае, когда $f_k = 1$, отказа нет, если $f_k \neq 1$, то произошел отказ.

С учетом сделанных допущений необходимо обнаружить отказ и определить, какой именно датчик отказал, при условии, что параметры модели A , B , C , D не известны, а доступна информация только о сигналах управлений u_i и измерений y_i .

Представим модель (1)–(2) в виде «черного ящика», структура и параметры которого не известны, как показано на рис. 1, где Z – матрица входных сигналов, Y – матрица выходных сигналов.



Рис. 1. Задача «черного ящика».

Будем считать, что задача на *рис. 1* может быть сведена к линейному матричному уравнению $\Omega Z = Y$ с известными матрицами Z и Y .

Известно, что это уравнение разрешимо при выполнении матричного условия [16, 17]:

$$Y\bar{Z}^R = 0, \quad (4)$$

где $\bar{Z}^R$ – правый делитель нуля, удовлетворяющий условию $Z\bar{Z}^R = 0$.

Это условие существует всегда, оно однозначно, единственно и использует только информацию об известных входных и выходных сигналах системы управления. В случае выполнения данного условия можно говорить о том, что входные и выходные сигналы согласованы для данной модели. Если же произошел отказ, меняется оператор системы Ω , и в этот момент входы и выходы системы будут не согласованы. Условие разрешимости выполняться не будет, а это свидетельствует об отказе в системе. По сути, проверяя это условие можно сделать однозначный вывод о том, есть ли в системе отказ или нет.

Используем это свойство для решения задачи обнаружения и локализации отказов. Запишем модель динамики полета БВТС в пространстве состояний (1)–(2) в виде эквивалентной модели типа «вход–выход» [15]:

$$y_i = \Omega z_i, \quad (5)$$

где $\Omega = [\hat{A} \quad \hat{B} \quad \hat{D}]$, $\hat{A} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{C}^L$, $\hat{B} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} (B - A \tilde{C}^L D)$,

$\hat{D} = D$, $z_i = \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ u_{i-1} \\ u_i \end{bmatrix}$, а матрицы $\tilde{C}^L$ и $\bar{C}^L$ обладают следующими

свойствами:

$$\bar{C}^L C = 0, \quad \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \bar{C}^L \end{bmatrix} C \begin{bmatrix} \tilde{C}^R & \bar{C}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Предположим, что в момент времени i нам также известны h предыдущих значений сигналов. Тогда можно записать в матричном виде модель (5) при $i < i_f$

$$Y_i^h = \Omega Z_i^h, \quad (6)$$

где $Z_i^h = [z_{i-h+1} \quad \dots \quad z_{i-1} \quad z_i]$.

Если рассмотреть выражение (6) в виде линейного матричного уравнения, то по аналогии с (4) можно записать его условие разрешимости

$$Y_i^h \bar{Z}_i^{hR} = 0, \quad (7)$$

которое в момент возникновения отказов при $i_f \leq i \leq i_f + h - 1$ нарушается:

$$Y_i^h \bar{Z}_i^{hR} \neq 0, \quad (8)$$

что позволяет его использовать в качестве простого непараметрического критерия обнаружения и локализации отказов k -го канала измерительной подсистемы системы управления полетом БВТС

$$\varepsilon_i(k) = Y_i^h(k) \bar{Z}_i^{hR} = Y_i^h(k) \begin{bmatrix} Y_{i-1}^h \\ U_{i-1}^h \\ U_i^h \end{bmatrix}^R. \quad (9)$$

На практике в качестве скалярного количественного критерия выполнения условия (9), как правило, используется норма Фробениуса

$$\varepsilon_i(k) = \|Y_i^h(k) \bar{Z}_i^{hR}\|_2 = \left\| Y_i^h(k) \begin{bmatrix} Y_{i-1}^h \\ U_{i-1}^h \\ U_i^h \end{bmatrix}^R \right\|_2. \quad (10)$$

Модель (1)–(2) не учитывает влияния случайных возмущающих факторов в уравнении состояния. Их влияние обуславливает тот факт, что критерий (10) будет иметь вероятностный характер, и решение об отказе датчика принимается по превышению значения некоторого настраиваемого порога.

Проверка работоспособности критерия (10) осуществлялась на полной нелинейной модели БВТС квадрокоптерного типа со штатной системой управления полетом (СУП) со следующими векторами измерений $y = [V \quad \alpha \quad \Theta \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z \quad \gamma]^T$ и управлений $u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T$, где V – скорость полета (м/с); α , Θ , γ , β – углы атаки, наклона траектории, крена и скольжения (град); ω_x , ω_y , ω_z – угловые скорости крена, рыскания и тангажа (град/с); u_i – скорости вращения соответствующих двигателей БВТС (град/с). Схема численного моделирования приведена на *рис. 2*.

На *рис. 2* введено понятие накопителя данных, осуществляющего накопление информации о входных и выходных переменных. С математической точки зрения формируются матрицы Y_i , U_i на некотором интервале времени h , названном шириной окна контроля. Ширина окна контроля выбирается в процессе моделирования.

В процессе полета в модуле функционального контроля технического состояния используется критерий с шириной окна контроля $h=17$, гарантирующей время настройки алгоритма, не превы-

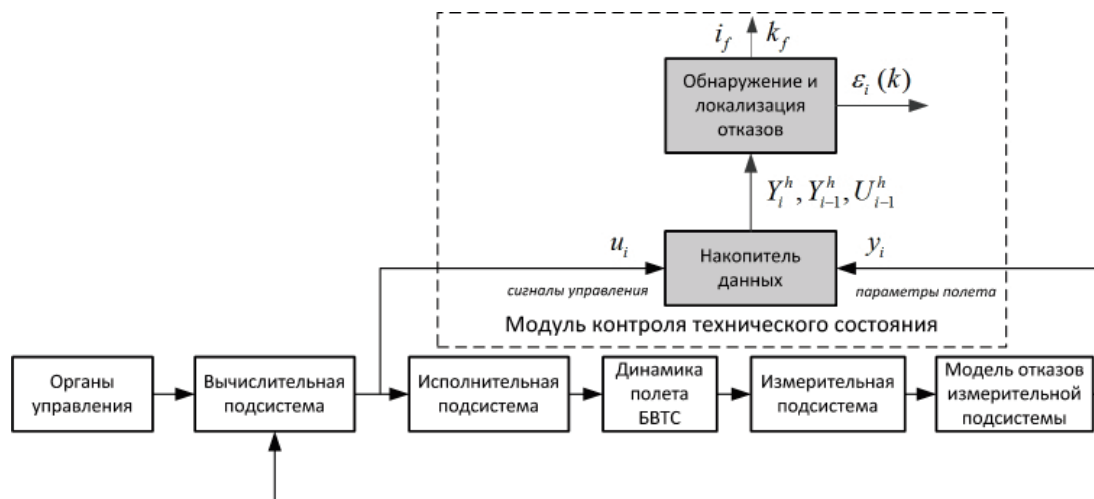


Рис. 2. Схема численного моделирования.

шающее 0.17 с. Возникновение оди-ночного отказа каждого датчика моделировалось на 0.4 с полета с коэффициентом отказа $f_k=0$ для сценариев отсутствия управления и управления по тангажу. Соответствующие графики, иллюстрирующие отказ некоторых датчиков, представлены на рис. 3–6.

Видно, что при отсутствии управления значения критерия близки к нулю и имеют стохастический характер для всех каналов измерений, что позволяет достоверно утверждать о работоспособности СУП. Все графики при возникновении отказов имеют форму с четко выраженными импульсами в отказавших каналах, что позволяет говорить о том, что задача обнаружения отказов датчиков решена. Таким образом, используя выражения можно решать задачу обнаружения отказов измерительной подсистемы БВТС с использованием безмодельного подхода.

Использование безмодельного подхода позволяет применять данный подход для различного класса БВТС, информация о математической модели которых неизвестна. Это ключевое преимущество рассматриваемого подхода перед другими подходами. Именно поэтому подход можно использовать для решения задачи обеспечения эксплуатационной безопасности БВТС в условиях модельных неопределенностей.

Методы обеспечения функциональной безопасности

Подсистема функциональной безопасности предназначена для предотвращения рисков, связанных со столкновениями БВТС. В этой связи сформулируем задачу следующим образом. Необходимо построить алгоритм прогнозирования параметров движения маневрирующего судна посадки БВТС при следующих ограничениях:

- входные сигналы системы управления судна посадки неизвестны (имеется только допущение, что сигналы линейны);
- модель динамики судна посадки неизвестна (имеется только допущение, что она линейна);
- внешние возмущения неизвестны;
- измеряются только координаты судна посадки.

Необходимо построить прогноз траектории движения судна посадки при условии, что управляющее воздействие изменяется во времени, но сам закон управления неизвестен.

В этой связи построение трендов изменения параметров не дает приемлемого результата, а отсутствие информации о входном воздействии не позволяет использовать подходы, основанные на моделях. Рассмотрим применение безмодельных подходов для решения этой задачи.

Пусть динамика судна посадки описывается линейной дискретной моделью

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B u_i, \quad (11)$$

$$y_i = C_y x_i^y, \quad (12)$$

где y_i – измеряемые пространственные координаты судна; x_i^y – неизвестный вектор состояния судна; A_y, B, C_y – неизвестные матрицы собственной динамики, эффективности управления и измерения судна; u_i – неизвестный вектор управления, формируемый в виде

$$x_{i+1}^u = A_u x_i^u, \quad (13)$$

$$u_i = C_u x_i^u, \quad (14)$$

где x_i^u – неизвестный вектор состояния системы управления; A_u, C_u – неизвестные матрицы собственной динамики и выхода системы управления (рис. 7).

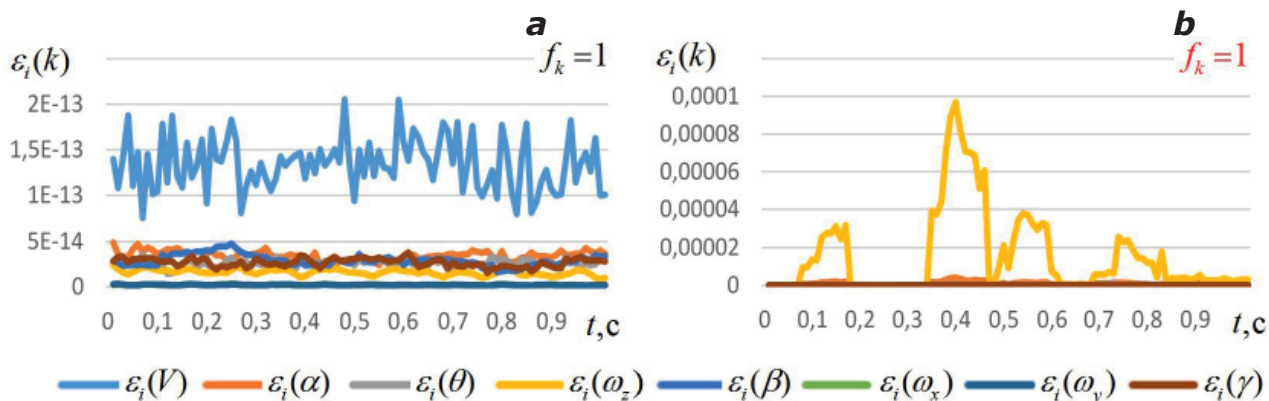


Рис. 3. Значения критерия при отсутствии отказов: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

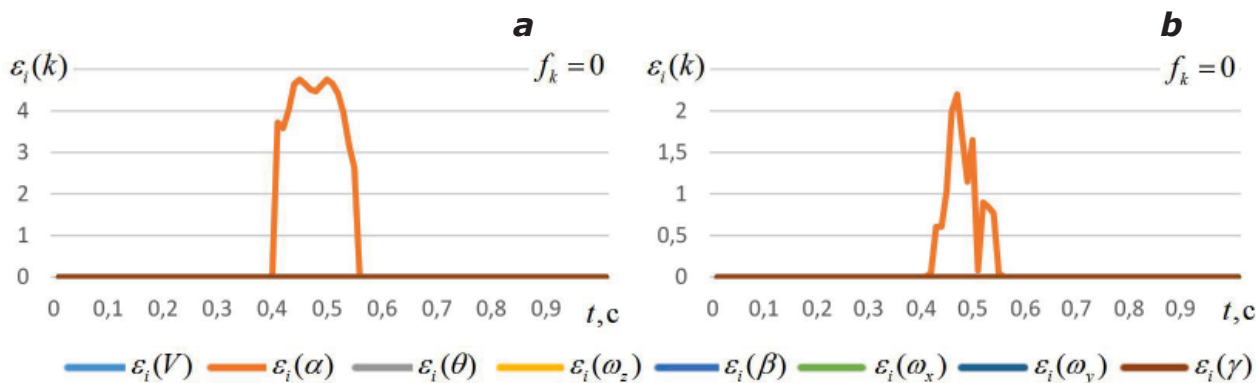


Рис. 4. Значения критерия при отказе датчика α: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

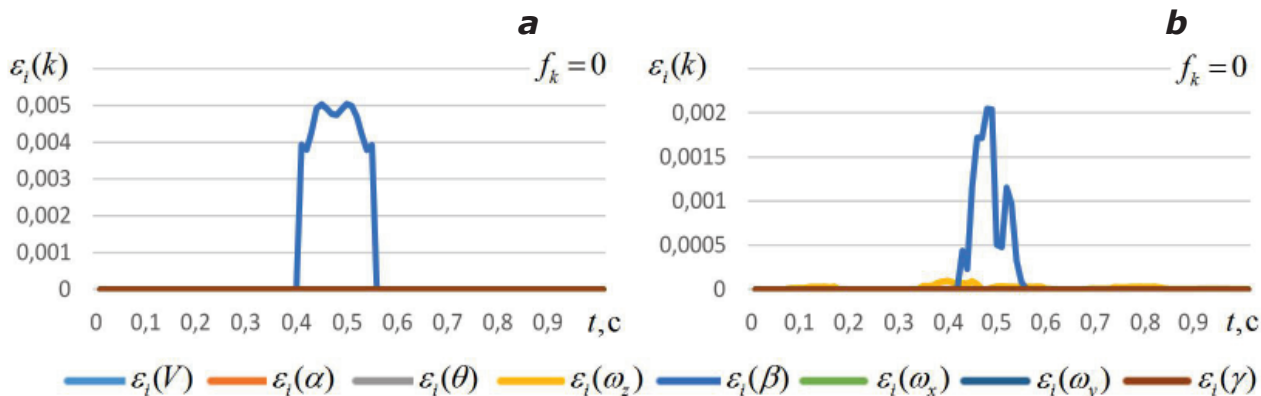


Рис. 5. Значения критерия при отказе датчика β: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

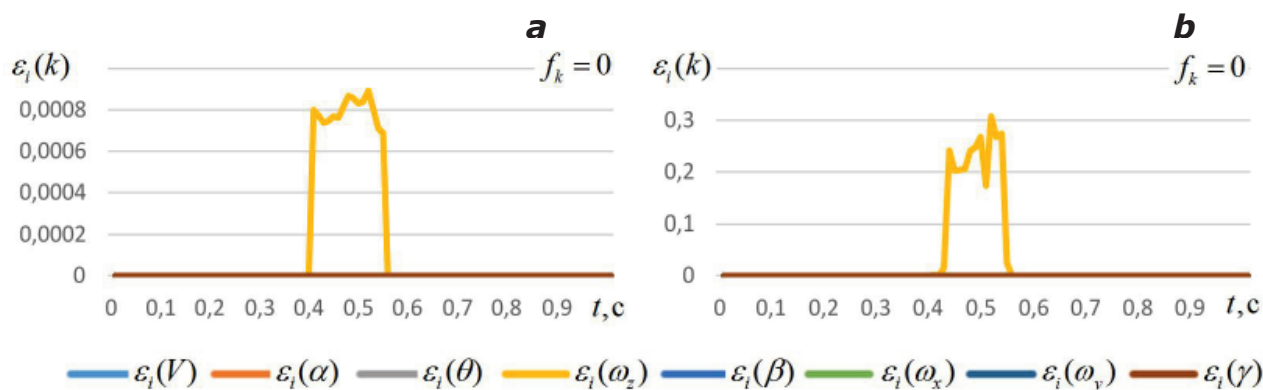


Рис. 6. Значения критерия при отказе датчика ω_z: а – при отсутствии управления, б – при управлении по тангажу.

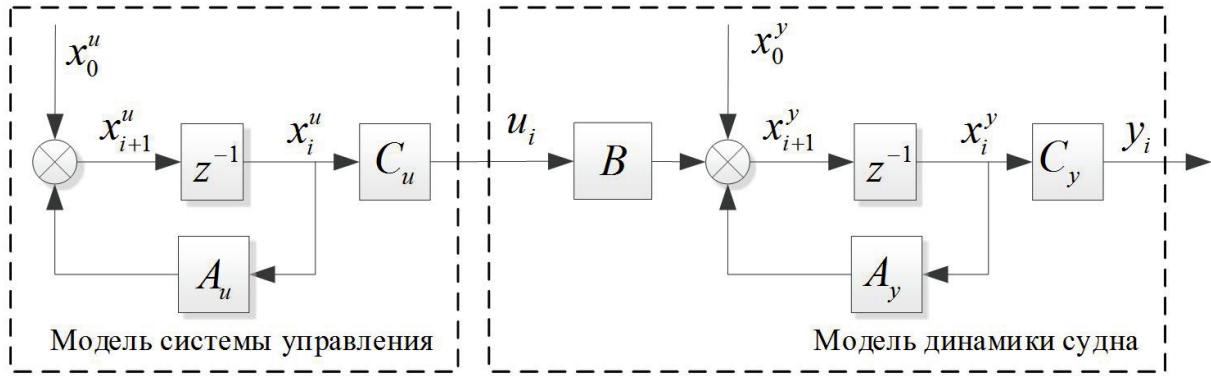


Рис. 7. Модель маневрирующего судна посадки.

Подставим (14) в (11)

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B C_u x_i^u, \quad (15)$$

объединим выражения (15) и (13), и запишем эквивалентную (11)–(14) модель с расширенным вектором состояния

$$x_{i+1} = A x_i, \quad (16)$$

$$y_i = C x_i, \quad (17)$$

где

$$x = \begin{bmatrix} x^y \\ x^u \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_y & B C_u \\ 0 & A_u \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_y & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

или в блочно-матричном виде

$$Y_{i+1}^{v,1} = A Y_i^{v,1}, \quad (19)$$

где v – индекс наблюдаемости,

$$Y_i^{v,1} = \begin{bmatrix} y_{i-v} \\ y_{i-v+1} \\ y_{i-v+2} \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \tilde{C}^L \\ \tilde{C}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{C}^L, C = \begin{bmatrix} C \\ C A \\ C A^2 \\ \vdots \\ C A^v \end{bmatrix}.$$

Предположим, что наблюдение за судном посадки ведется на протяжении некоторого времени $h + 1$, тогда модель (19) примет вид

$$Y_{i+1}^{v,h} = A Y_i^{v,h}, \quad (20)$$

где

$$Y_{i+1}^{v,h} = \begin{bmatrix} Y_{i-h+1}^{v,1} & \dots & Y_i^{v,1} & Y_{i+1}^{v,1} \end{bmatrix},$$

$$Y_i^{v,h} = \begin{bmatrix} Y_{i-h}^{v,1} & \dots & Y_{i-1}^{v,1} & Y_i^{v,1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

из которого можно записать линейное матричное уравнение идентификации параметров эквивалентной модели

$$A Y_i^{v,h} = Y_{i+1}^{v,h}. \quad (22)$$

Тогда для разрешимости уравнения (22) необходимо и достаточно обеспечить выполнение следующего условия:

$$Y_{i+1}^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = 0, \quad (23)$$

где правый делитель нуля определяется из выражения

$$Y_i^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = 0. \quad (24)$$

В итоге, после подстановки (21) в (23), прогнозирование вектора измерений осуществляется по формуле

$$\hat{y}_{i+1} = -Y_i^{1,h} R_{i-1} r_i^+, \quad (25)$$

где $Y_i^{1,h} = [y_{i-h} \dots y_{i-1} y_i]$, r_i^+ – псевдообращение, а элементы делителя нуля определяются из условия (24)

$$Y_i^{v,h} \overline{Y_i^{v,h}}^R = \begin{bmatrix} Y_{i-1}^{v,h-1} & Y_i^{v,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ r_i \end{bmatrix} = 0. \quad (26)$$

Проверка работоспособности формулы (25) осуществлялась на полной нелинейной динамической модели судна посадки с вектором измерения $y = [x_e y_e z_e V_x V_y V_z \gamma \vartheta \psi \omega_x \omega_y \omega_z]$, x_e, y_e, z_e – пространственные координаты (м), V_x, V_y, V_z – линейные скорости (м/с), γ, ϑ, ψ – углы крена, тангажа, рысканья (град), $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости (град/с), $u = [u_1 u_2]^T$, u_1 – угол отклонения руля (град), u_2 – скорость вращения двигателя [14].

Для формирования матриц измерений на интервале наблюдения использовался накопитель информации. В блоке синтеза алгоритма прогнозирования реализованы формулы (25)–(26). Ширина окна наблюдения выбрана $h = 15$, индекс наблюдаемости $v = 4$. Сигналы управления имеют синусоидальный вид для угла отклонения руля и линейно нарастающий с ограничением по скорости для скорости вращения двигателя. Динамика элементов вектора состояния приведена на рис. 8.

Результаты численного моделирования показывают высокие характеристики точности и быстродействия решения задачи. Ошибки прогнозирования траектории движения судна не превышают четвертого десятичного знака по всем пространственным координатам (рис. 9). Ранг матрицы Ганкеля данных не превышает 7, поэтому настройка алгоритма с учетом индекса наблюдаемости происходит в течение 10 измерений, то есть с учетом шага дискретизации 0.05 с, всего за 0.5 с, при появлении зависимых столбцов, а, следовательно, и правого делителя нуля у матрицы данных вида (26).

Полученные результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории судна подтверждают работоспособность и очень быструю настройку

разработанного метода в условиях полной параметрической и непараметрической неопределенности.

Практическая реализация разрабатываемого безмодельного подхода позволит повысить точность прогнозирования и решить задачу обеспечения безопасности полетов БВТС в условиях городской застройки и учитывать особенности движения маневрирующих судов посадки.

Методы учета психофизиологического состояния оператора БВТС

Рассмотрим особенность учета психофизиологического состояния оператора БВТС с целью снижения

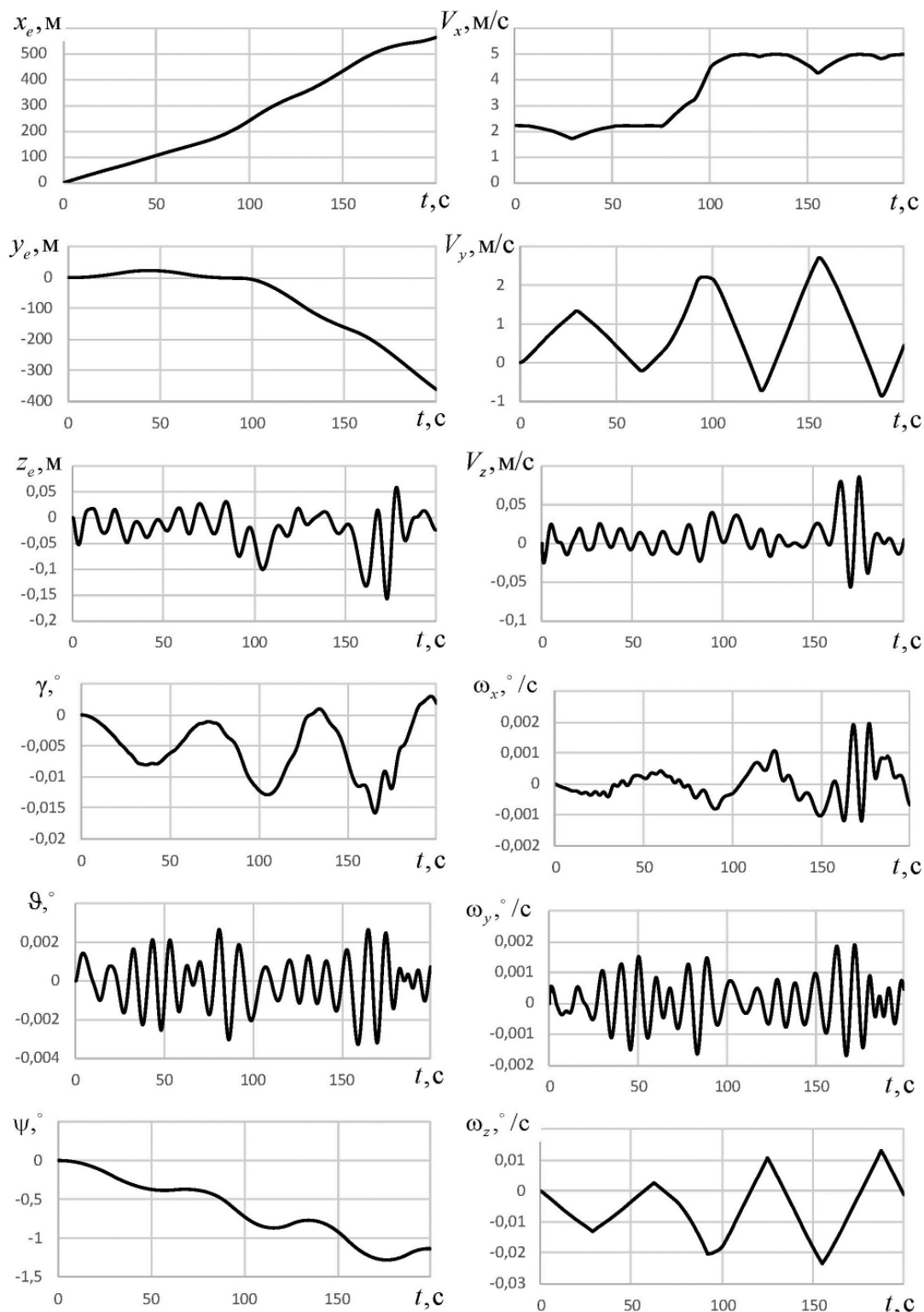


Рис. 8. Вектор состояния судна посадки.

количества ошибок, допускаемых операторами БВТС при распределении внимания оператора БВТС и допускаемых им при пилотировании ошибок. Актуальность задачи подтверждается количеством происшествий со сложными техническими средствами вследствие проблем восприятия и идентификации, распределения внимания и ситуационной осведомленности [18, 19].

Рассмотрим также задачу посадки БВТС на маневрирующую платформу. Причем в качестве платформы выберем судно, плывущее по реке в условиях города. Этот случай наиболее сложен, вследствие особенностей учета движения подвижной платформы. При такой постановке задачи пилот БВТС должен осущест-

влять пилотирование с заданной скоростью и удерживать в поле зрения движущуюся платформу.

Рассмотрим несколько постановок задачи:

- 1) полет в простых метеоусловиях без отказа;
- 2) полет в сложных метеоусловиях;
- 3) полет с ограничением времени посадки;
- 4) полет с отказом;
- 5) полет в условиях утомления оператора БВТС.

Для оценки психофизиологического состояния оператора БВТС анализировались расширение зрачка человека и его глазодвигательная активность.

Изменения диаметра зрачка отражали постепенное нарастание нагрузки под влиянием усложняющих факторов и их сочетания на трех этапах полета:

- 1) полет к месту посадки;
- 2) поиск посадочной платформы в районе посадки и слежение за ней;
- 3) непосредственно сам этап посадки.

Вариативность диаметра зрачка на разных этапах полетного задания и в разных сериях эксперимента представлена на *рис. 10*.

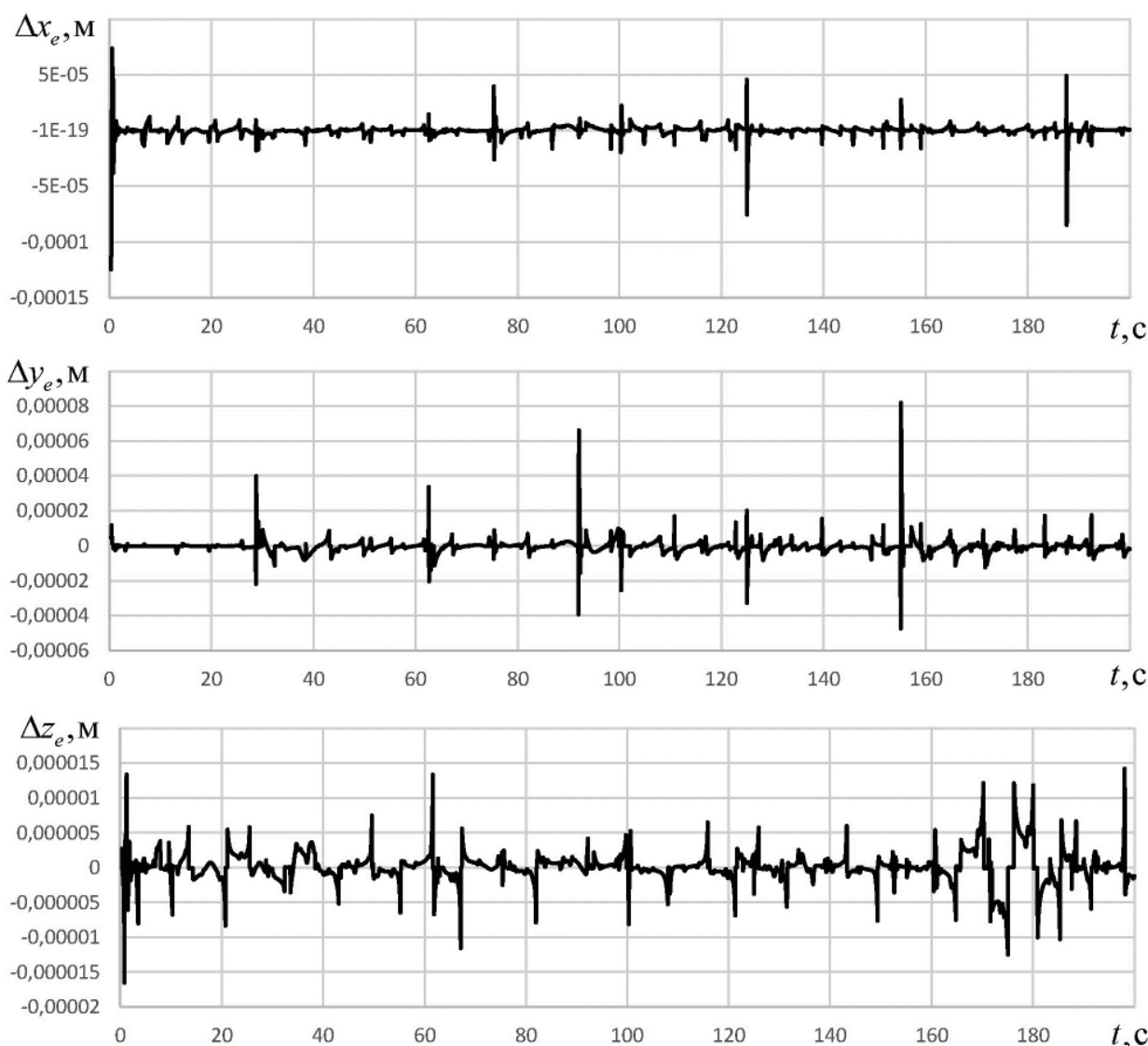


Рис. 9. Ошибки прогнозирования траектории движения судна посадки.

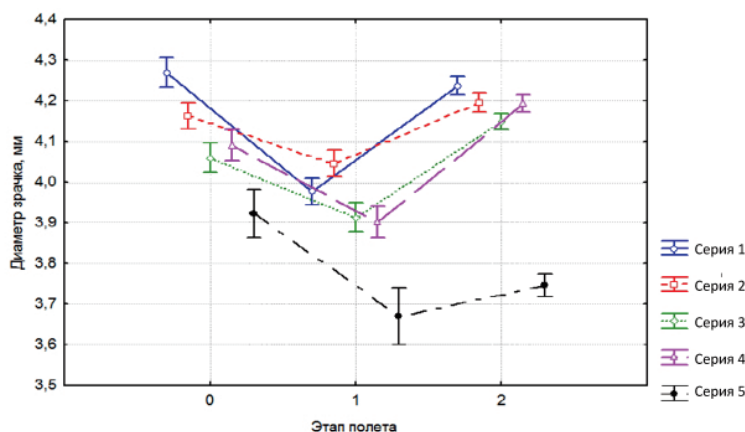


Рис. 10. Вариативность диаметра зрачка на разных этапах полетного задания и в разных сериях эксперимента.

Наименьший диаметр зрачка соответствует самой высокой когнитивной нагрузке. Это было зафиксировано при выполнении совместного поиска движущейся платформы и выдерживанием заданной скорости полета. Максимальный уровень нагрузки отмечается в пятой серии, выполняемой под влиянием утомления оператора.

Для детального исследования характера распределения внимания операторов в процессе выполнения полетного за-

дания был проведен анализ результатов показателей оculoмоторной активности. Зависимость амплитуд саккад от длительности фиксаций приведен на рис. 11.

При усложнении условий полета значительно снижается средняя длительность фиксации и возрастает амплитуда саккад (рис. 12).

Длительность фиксаций подчиняется полимодальному распределению с выделением кластеров ультракоротких компенсирующих фиксаций (<90 мс); коротких амбиентных 90–140 мс; предфокальных 140–200 мс; фокальных 200–350 мс и экстрадлинных фиксаций. Фокальные фиксации ассоциированы с более высокой эффективностью совмещенной деятельности: успешным поиском и идентификацией цели, корректным считыванием и выдерживанием показаний скорости. Совмещенная деятельность со-

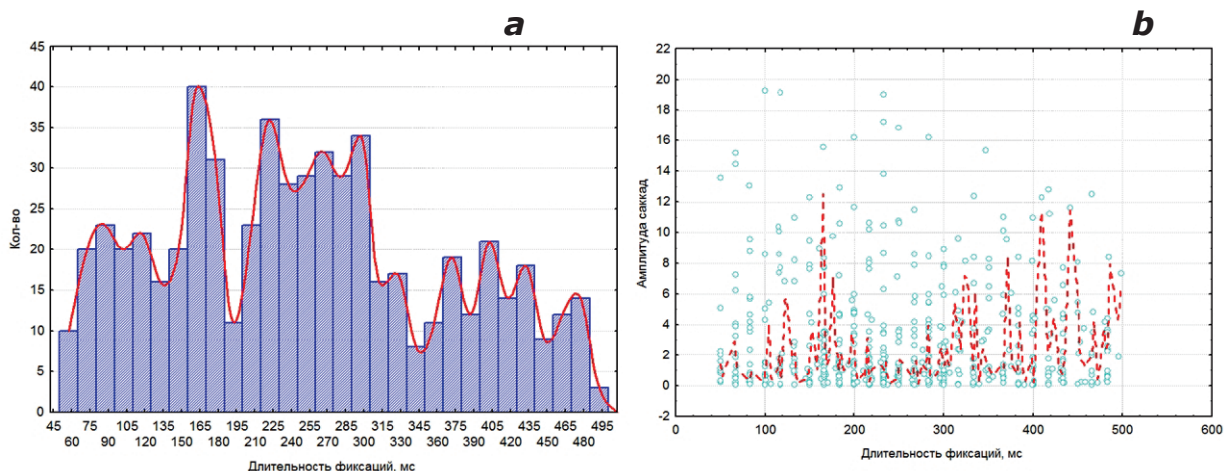


Рис. 11. Длительность фиксаций (а) и зависимость амплитуды саккад от длительности фиксаций (б).

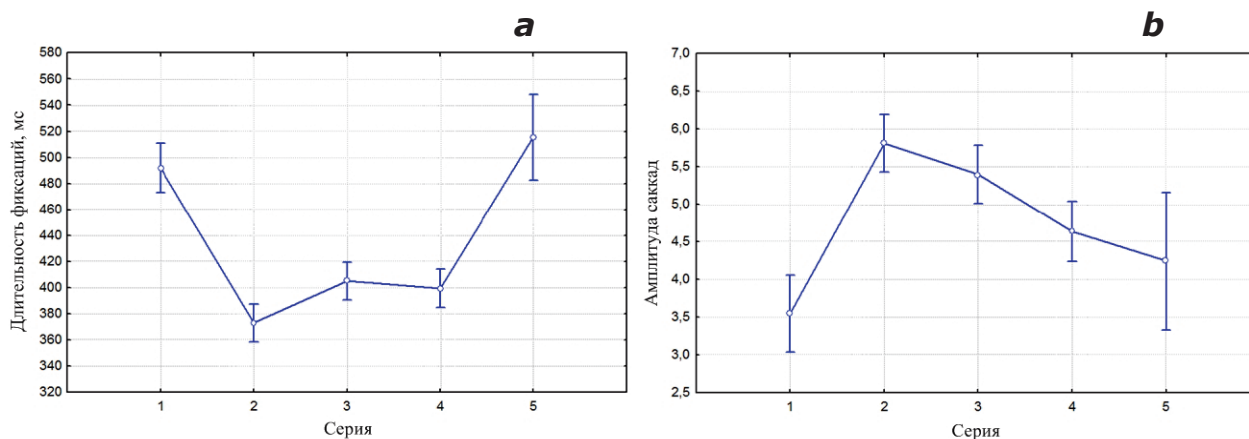


Рис. 12. Средняя длительность фиксаций (а) и амплитуда саккад (б).

проводилась ожидаемым эффектом туннелирования – в сложных условиях совмещенные задачи становятся конкурирующими, приоритет приобретает поиск цели, что отражается в увеличении длительности фиксации в соответствующей области интерфейса за счет уменьшения длительности фиксации в других зонах.

Результаты моделирования также показали, что операторы сосредотачивали внимание на задаче поиска и опознания подвижной платформы в ущерб контролю скорости полета, что приводило к ошибкам пилотирования (в 29% случаев) и ее отклонениям от заданных значений (в 36% случаев).

По данным регистрации окулоmotorной активности операторов установлено, что при выполнении совмещенной деятельности взор операторов сосредотачивался на зоне для обзора посадочной площадки. Такое сосредоточение сопровождалось ростом длительности зрительных фиксаций этой зоны за счет сокращения длительности фиксаций в пространственно удаленной зоне интерфейса, в которой индизировался указатель скорости.

Показано, что в процессе выполнения совмещенной деятельности с воссозданием усложненных условий выполнения полетного задания (ухудшение метеоусловий, отказ) возрастает операциональное психическое напряжение операторов (индексы Р.М. Баевского), развивается зрительное утомление. Вследствие этого значительно возрастает когнитивная нагрузка операторов. Подобная ситуация создает предпосылки для проявлений психологических (когнитивных) уязвимостей.

Подводя итог отметим: на основании подходов, основанных на анализе

расширения зрачка человека и его глазодвигательной активности, можно разработать методы определения ухудшения работоспособности оператора БВТС.

Заключение

Для обеспечения безопасности полетов БВТС предложено использовать интегрированную систему обеспечения безопасности полетов БВТС. Эта система должна включать методы обеспечения эксплуатационной безопасности, регистрирующей техническое состояние и отказы бортового оборудования; методы обеспечения функциональной безопасности, направленные на устранение рисков, связанных со столкновениями; методы учета психофизиологического состояния оператора БВТС с целью снижения количества ошибок, допускаемых операторами БВТС при распределении внимания и допускаемых ими при пилотировании ошибок.

Объединение всех задач в единый комплекс позволит сократить общее количество обрабатываемой информации за счет использования общих информационных моделей, повысить осведомленность оператора БВТС о летной ситуации, достоверность используемой для принятия решения информации, ранжировать опасные признаки по уровням критичности и построить систему поддержки принятия решений, учитывающую взаимосвязь как внешней обстановки, так и технического состояния БВТС.

Разработанные методы и алгоритмы составят основу систем контроля безопасности и предотвращения опасных полетных ситуаций, позволяющую проводить оценку особых ситуаций полета, построение карты уровней угроз, и на ее основе формировать наиболее предпочтительное управление БВТС, удовлетворяющее требованиям безопасности полетов с использованием всех доступных способов прогнозирующего контроля с учетом динамики полета и технического состояния БВТС.

Научная значимость полученных результатов состоит в том, что развиваемые в рамках безмодельных методов алгоритмы диагностики и прогнозирования не требуют априорной информации о модели динамики полета БВТС. Независимость от модели БВТС разрабатываемых методов обнаружения, локализации неисправностей и прогнозирования параметров его движения позволяет существенно повысить достоверность и точность получаемых решений за счет исключения ошибок, связанных с модельными неопределенностями.

Литература

1. K. AL-Dosari, N. Fetais
Safety, 2023, 9(3), 64. DOI: 10.3390/safety9030064.
2. S.A.H. Mohsan, N.Q.H. Othman, Y. Li, M.H. Alsharif, M.A. Khan
Intell. Serv. Robot., 2023, 16, 109. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
3. N. Abbas, Z. Abbas, X. Liu, S.S. Khan, E.D. Foster, S. Larkin
Appl. Sci., 2023, 13(17), 9881. DOI: 10.3390/app13179881.
4. N. Thakur, P. Nagrath, R. Jain, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
B Machine Intelligence and Data Analytics for Sustainable Future Smart Cities. Studies in Computational Intelligence, Vol. 971, Eds U. Ghosh, Y. Maleh, M. Alazab, Al-S. K. Pathan, FRG, Cham, Springer, 2021, pp. 329–333. DOI: 10.1007/978-3-030-72065-0_18.

5. J. Vodák, D. Šulyová, M. Kubina
Sustainability, 2021, 13(10), 5746.
DOI: 10.3390/su13105746.
6. R. Jain, P. Nagrath, N. Thakur, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
B Development and Future of Internet of Drones (IoD): Insights, Trends and Road Ahead, SSDC, Vol. 332, Eds R. Krishnamurthi, A. Nayyar, A. E. Hassanien, FRG, Cham, Springer, 2021, 109–140. DOI: 10.1007/978-3-030-63339-4_4.
7. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, F. Mohammed
Technol. Forecast. Soc. Change, 2020, 153, 119293.
DOI: 10.1016/j.techfore.2018.05.004.
8. D. Gettinger
Public Safety Drones, 3rd Edn, USA, MN, Annandale, Center for the Study of the Drone, Bard College, 2020.
9. *Drones in Smart-Cities: Security and Performance*, Ed. Fadi Al-Turjman, Elsevier, 2020, 238 pp.
DOI: 10.1016/C2019-0-00992-2.
10. M.A. Khan, B.A. Alvi, E.A. Safi, I.U. Khan
B Proc. The 28th Int. Conf. on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (IN, Tamil Nadu, 28–29 January, 2018), IN, Tamil Nadu, 2018, pp. 1–6.
11. A. Ataei, I.C. Paschalidis
B Proc. The 54th IEEE Conf. Decision and Control (JP, Osaka, 15–18 December, 2015), JP, Osaka, IEEE, 2015, pp. 5130–5135.
DOI: 10.1109/CDC.2015.7403022.
12. M. Polka, S. Ptak, L. Kuziora, A. Kuczynska
B Drones – Applications, Ed. G. Dekoulis, UK, London, IntechOpen, 2018, pp. 83–96.
DOI: 10.5772/intechopen.73320.
13. A. Nayyar, B.L. Nguyen, N.G. Nguyen
B Proc. The 1st Int. Conf. Sustainable Technologies for Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1045, IN, Rajasthan, Jaipur, 29–30 March, 2019, SG, Singapore, Springer, 2020, pp. 563–580.
DOI: 10.1007/978-981-15-0029-9_45.
14. В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин, В.В. Гласов, Л. Тань
Мехатроника, автоматизация, управление, 2021, 22(12), 660.
DOI: 10.17587/mau.22.660-670.
15. Ju.V. Bondarenko, E.Yu. Zybin
Civil Aviation High Technologies, 2020, 23(3), 39.
DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-39-51.
16. Yu. Bondarenko, A. Chekin, E. Zybin, V. Kosyanchuk
IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., 2020, 714(1), 012004.
DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012004.
17. E. Zybin, V. Kosyanchuk, S. Karpenko
MATEC Web of Conferences, 2017, 03011.
DOI: 10.1051/mateconf/20179903011.
18. A.Yu. Akimova, A.A. Oboznov
Psychology in Russia: State of the Art, 2022, 15(1), 20.
DOI: 10.11621/pir.2022.0102.
19. В.В. Косьянчук, Ю.В. Бессонова, А.А. Обознов, А.Н. Занковский, И.И. Грешиников, И.А. Махортов
Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда, 2022, 7(4), 227. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_25_4_010.

English

Integrated Flight Safety System for Unmanned Aerial Vehicles in a Single “Smart City” Sky*

Vladislav V. Kosyanchuk

Professor,
State Research Institute of Aviation Systems
7 Victorenko Str., Moscow, 125167, Russia
vvk@gosniias.ru

Alexander A. Oboznov

Professor,
Institute of Psychology, RAS
13–1 Yaroslavskaya Str., Moscow, 129366, Russia
aao46@mail.ru

Eugene Yu. Zybin

State Research Institute of Aviation Systems
7 Victorenko Str., Moscow, 125167, Russia
zybin@gosniias.ru

Yulia V. Bessonova

Institute of Psychology, RAS
13–1 Yaroslavskaya Str., Moscow, 129366, Russia
bessonovajv@ipran.ru

Abstract

The paper discusses the concept of building an integrated flight safety system for unmanned aerial vehicles (UAVs) in a single smart city sky, including the designing of the operational safety methods, minimizing the risks associated with equipment failures; functional safety methods, eliminating the risks associated with collisions; psychophysiological safety methods, taking into account the control of the vehicle based on the characteristics of the human operator. The methods of operational and functional safety are based on a unified approach for model-free processing of information on the input and output signals of the UAV's flight control system. The realization of this approach will allow, first of all, scaling flight safety systems to different classes of aircrafts without the need to create complex mathematical models of each object separately.

Keywords: operational safety, functional safety, psychophysiological safety, unmanned aerial vehicles, smart city.

*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06091).

Images & Tables



Fig. 1. Black box problem.

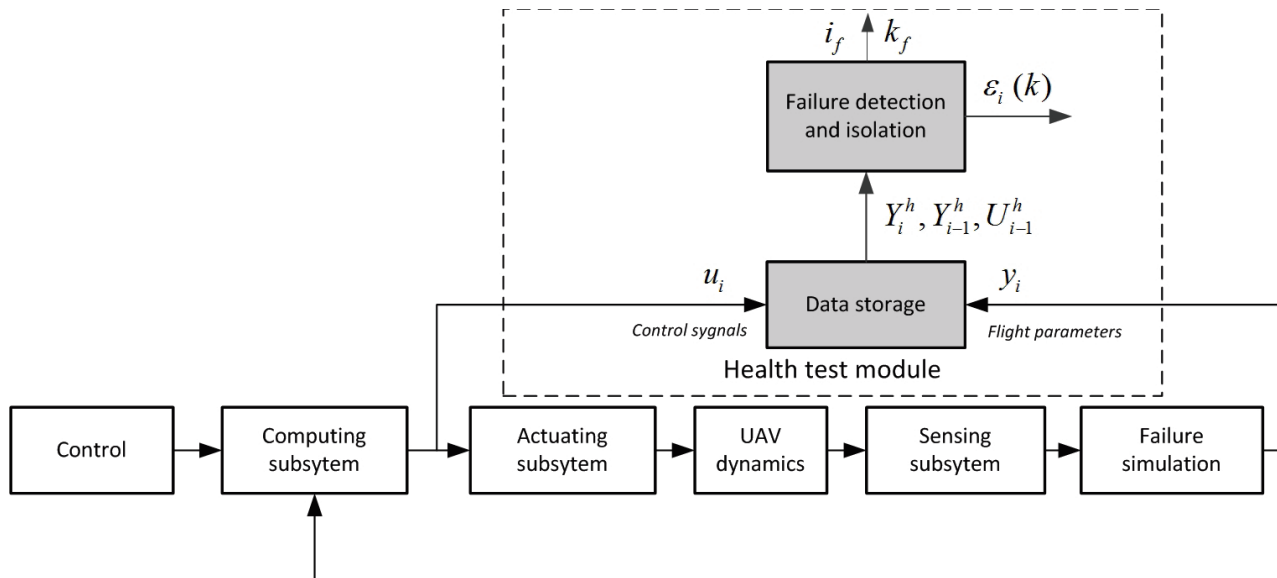


Fig. 2. Numerical simulation scheme.

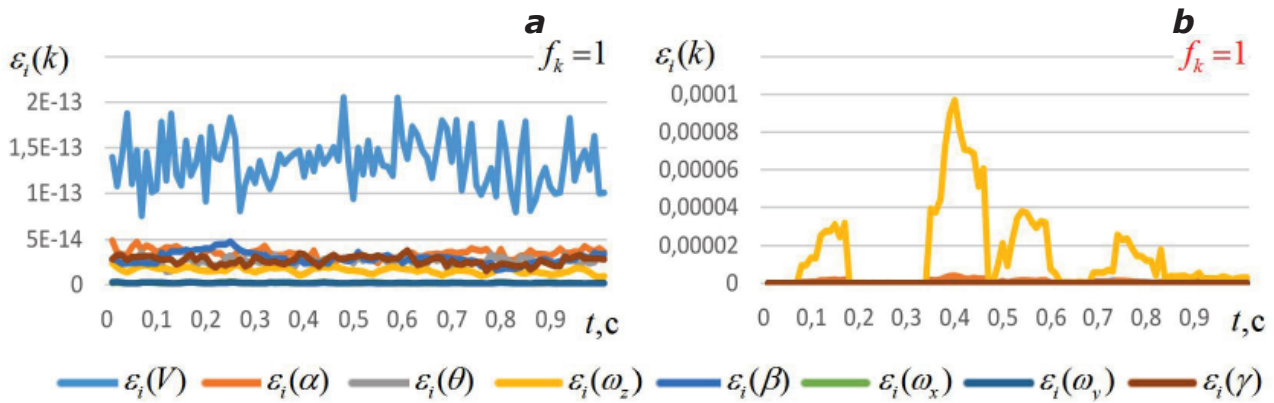


Fig. 3. Values of criterion (10) in the absence of failures: a – absence of control, b – pitch control.

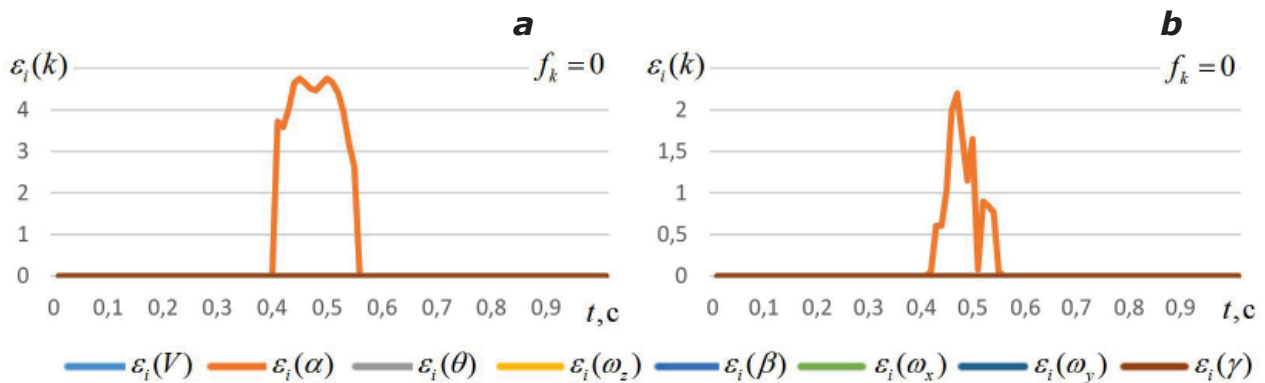


Fig. 4. Values of criterion (10) in case of α sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

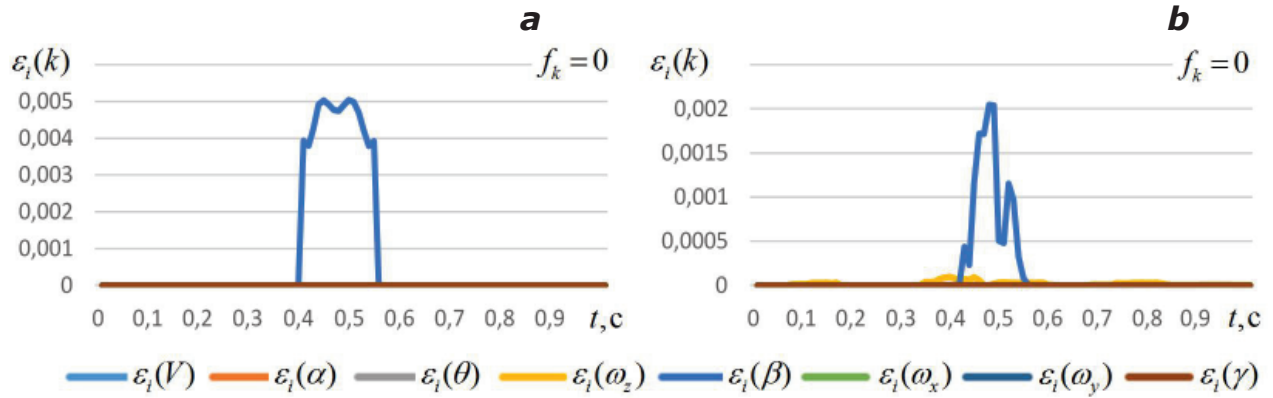


Fig. 5. Values of criterion (10) in case of β sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

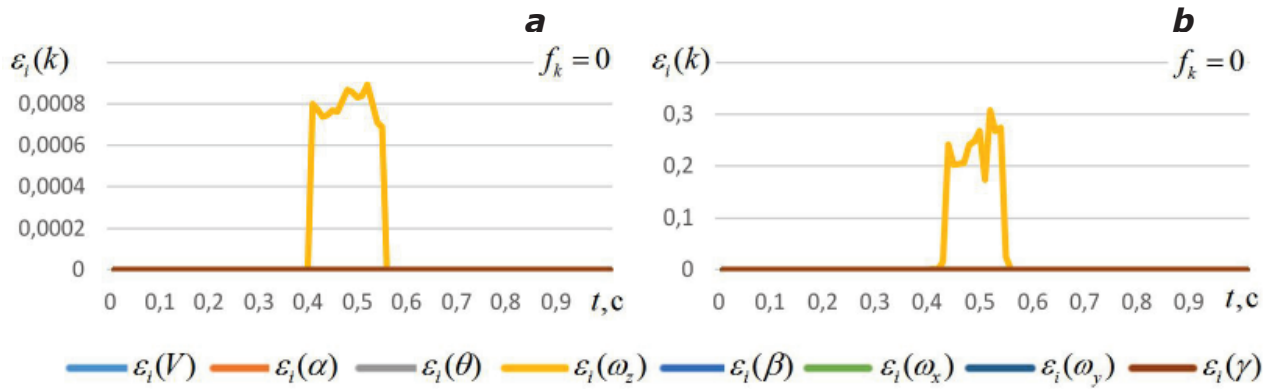


Fig. 6. Values of criterion (10) in case of ω_z sensor failure: a – absence of control, b – pitch control.

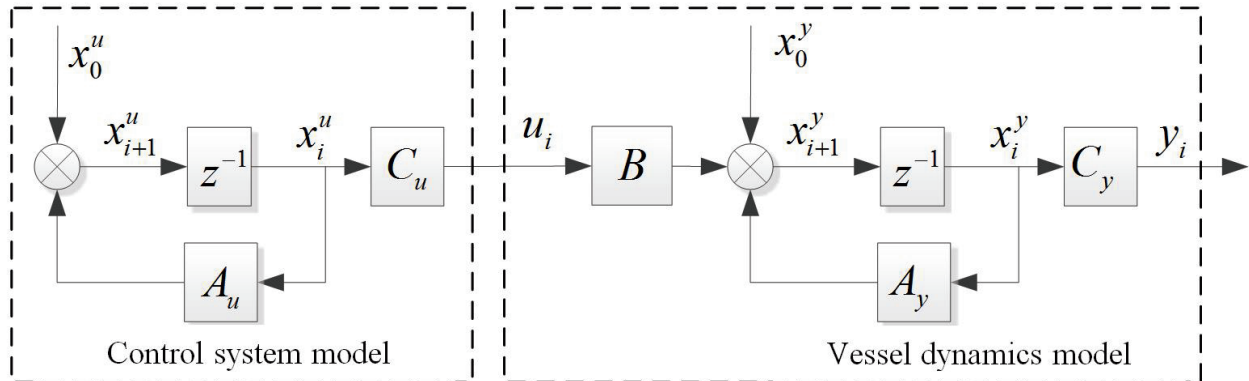


Fig. 7. The model of a maneuvering vessel.

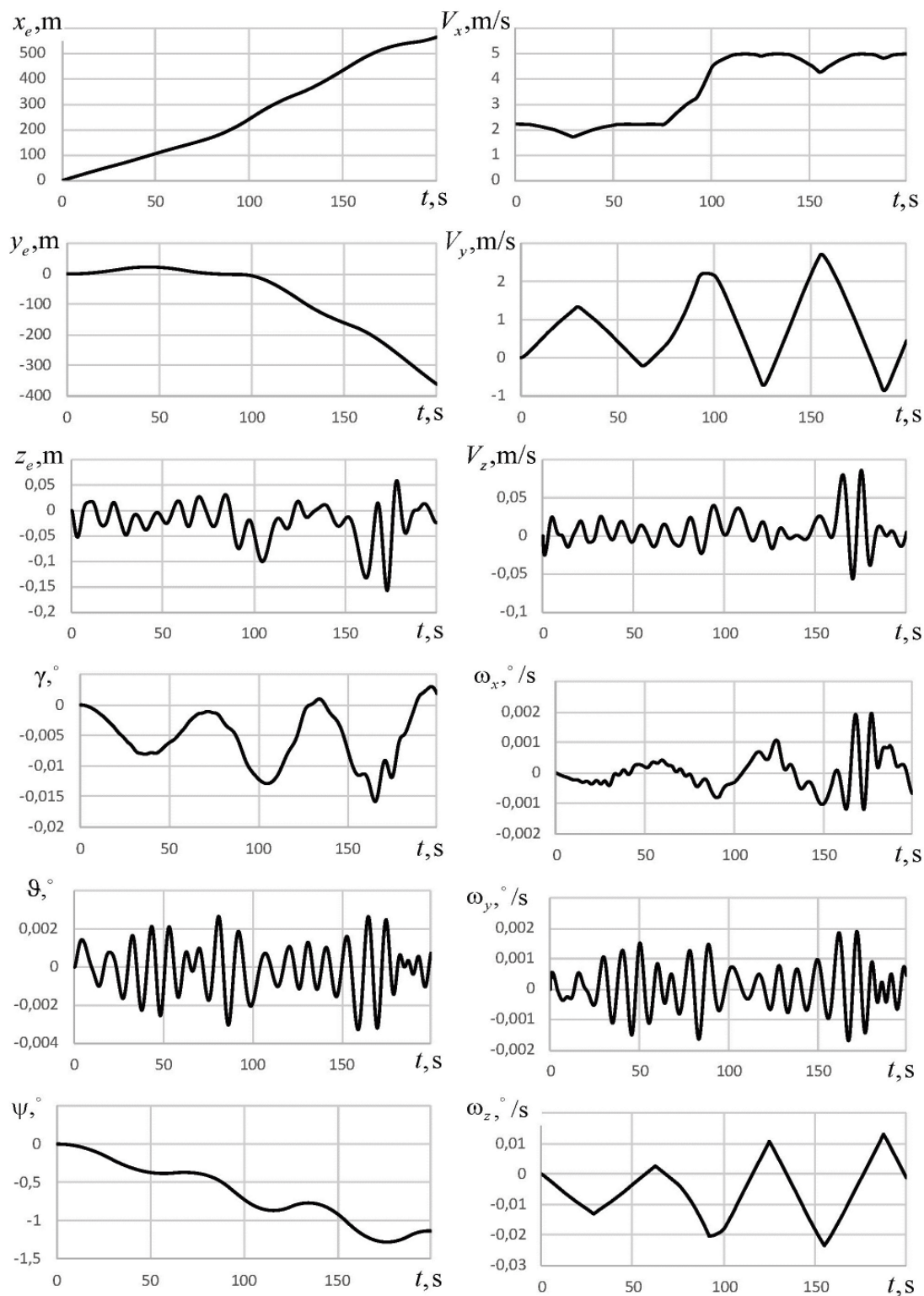


Fig. 8. Vessel state vector.

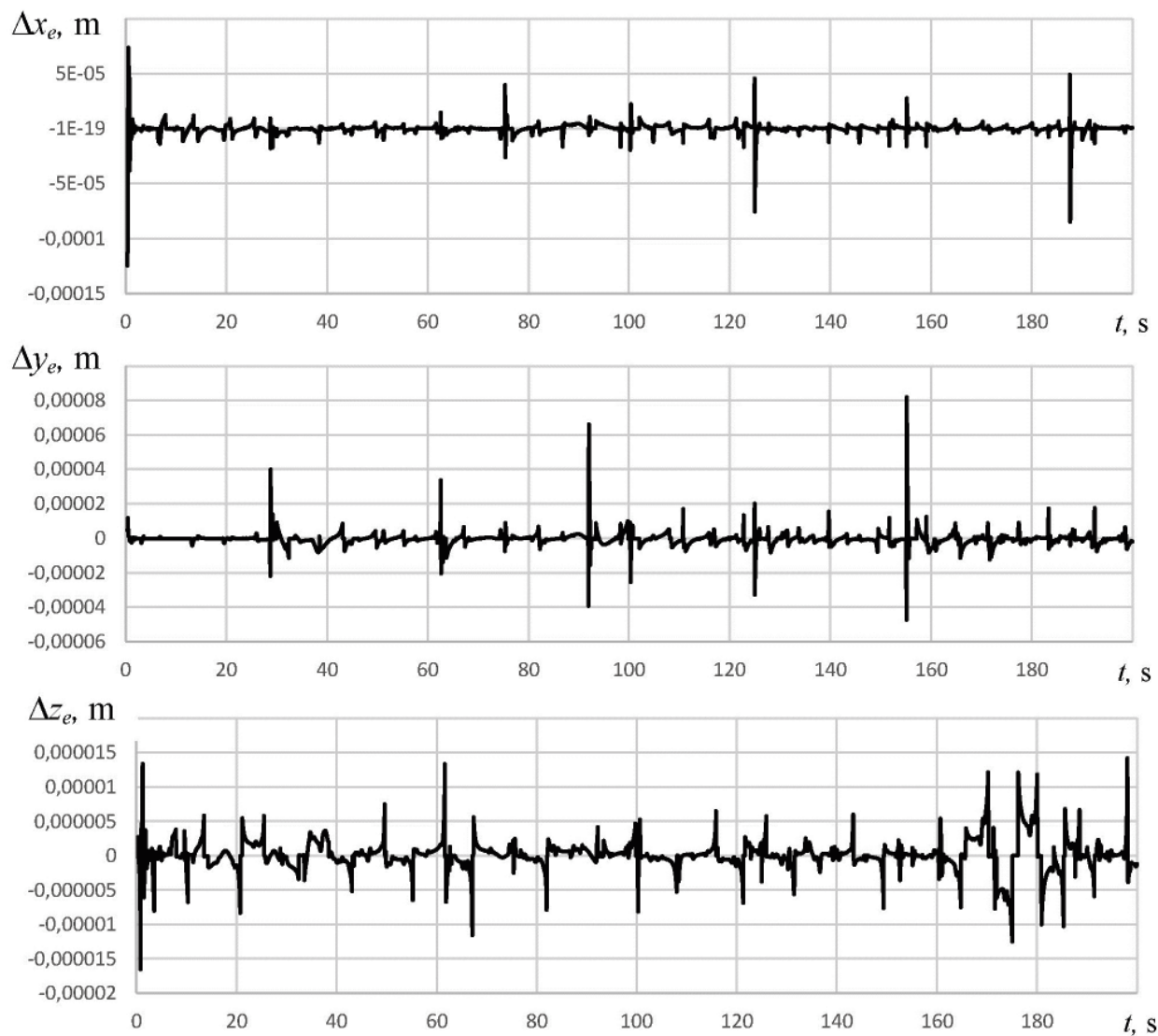


Fig. 9. Errors in predicting the trajectory of the vessel.

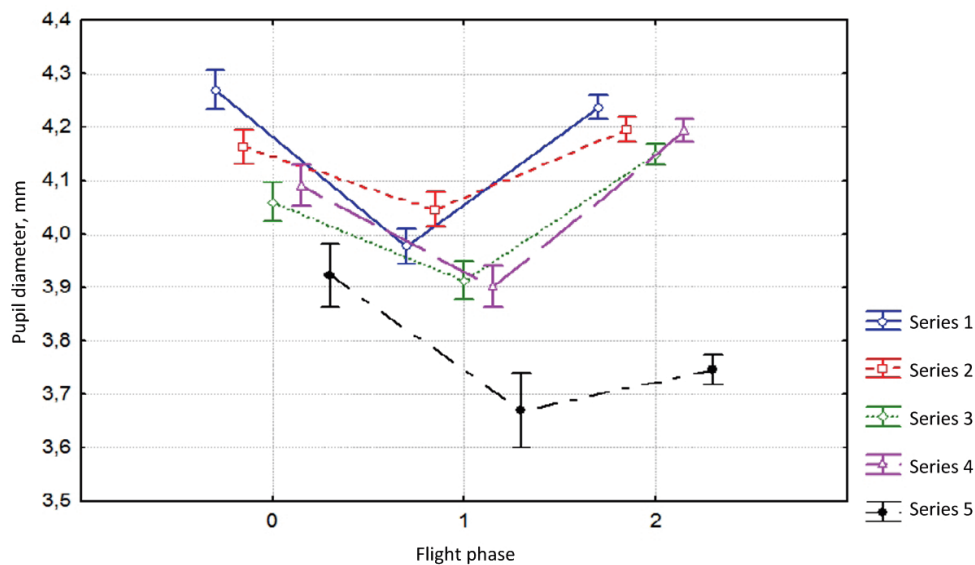


Fig. 10. Variability of human pupil diameter at different stages of the flight phase and in different experimental series.

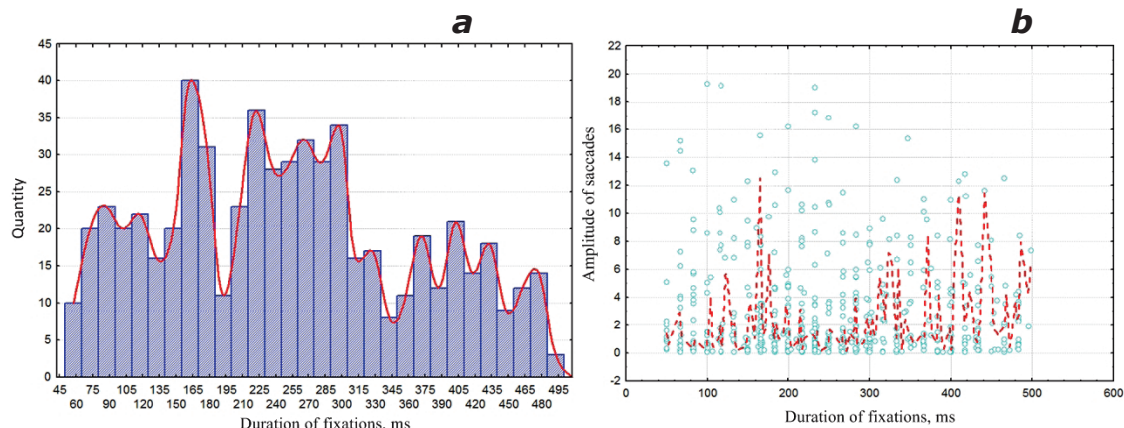


Fig. 11. Duration of fixations (a) and dependence of the amplitude of saccades on the duration of fixations (b).

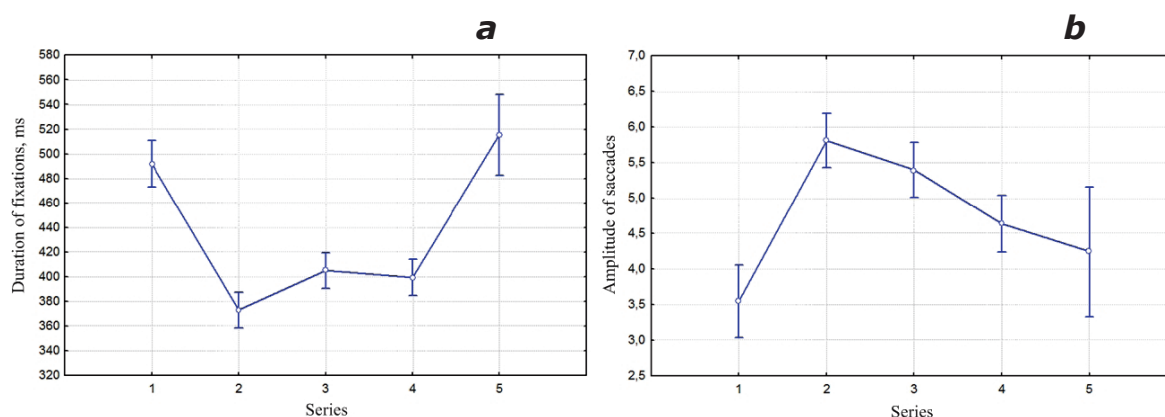


Fig. 12. Average duration of fixations (a) and amplitude of saccades (b).

References

1. K. AL-Dosari, N. Fetais
Safety, 2023, **9**(3), 64. DOI: 10.3390/safety9030064.
2. S.A.H. Mohsan, N.Q.H. Othman, Y. Li, M.H. Alsharif, M.A. Khan
Intell. Serv. Robot., 2023, **16**, 109. DOI: 10.1007/s11370-022-00452-4.
3. N. Abbas, Z. Abbas, X. Liu, S.S. Khan, E.D. Foster, S. Larkin
Appl. Sci., 2023, **13**(17), 9881. DOI: 10.3390/app13179881.
4. N. Thakur, P. Nagrath, R. Jain, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
In Machine Intelligence and Data Analytics for Sustainable Future Smart Cities. Studies in Computational Intelligence, Vol. 971, Eds U. Ghosh, Y. Maleh, M. Alazab, Al-S. K. Pathan, FRG, Cham, Springer, 2021, pp. 329–333. DOI: 10.1007/978-3-030-72065-0_18.
5. J. Vodák, D. Šulyová, M. Kubina
Sustainability, 2021, **13**(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
6. R. Jain, P. Nagrath, N. Thakur, D. Saini, N. Sharma, D.J. Hemanth
In Development and Future of Internet of Drones (IoD): Insights, Trends and Road Ahead, SSDC, Vol. 332, Eds R. Krishnamurthi, A. Nayyar, A. E. Hassanien, FRG, Cham, Springer, 2021, 109–140. DOI: 10.1007/978-3-030-63339-4_4.
7. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, F. Mohammed
Technol. Forecast. Soc. Change, 2020, **153**, 119293. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.05.004.
8. D. Gettinger
Public Safety Drones, 3rd Edn, USA, MN, Annandale, Center for the Study of the Drone, Bard College, 2020.
9. *Drones in Smart-Cities: Security and Performance*, Ed. Fadi Al-Turjman, Elsevier, 2020, 238 pp. DOI: 10.1016/C2019-0-00992-2.
10. M.A. Khan, B.A. Alvi, E.A. Safi, I.U. Khan
In Proc. The 28th Int. Conf. on Electrical, Electronics, Computers, Communication, Mechanical and Computing (IN, Tamil Nadu, 28–29 January, 2018), IN, Tamil Nadu, 2018, pp. 1–6.
11. A. Ataei, I.C. Paschalidis
In Proc. The 54th IEEE Conf. Decision and Control (JP, Osaka, 15–18 December, 2015), JP, Osaka, IEEE, 2015, pp. 5130–5135. DOI: 10.1109/CDC.2015.7403022.
12. M. Polka, S. Ptak, L. Kuziora, A. Kuczynska
In Drones – Applications, Ed. G. Dekoulis, UK, London, IntechOpen, 2018, pp. 83–96. DOI: 10.5772/intechopen.73320.
13. A. Nayyar, B.L. Nguyen, N.G. Nguyen
In Proc. The 1st Int. Conf. Sustainable Technologies for Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1045, IN, Rajasthan, Jaipur, 29–30 March, 2019), SG, Singapore, Springer, 2020, pp. 563–580. DOI: 10.1007/978-981-15-0029-9_45.
14. V.V. Kosyanchuk, E.Yu. Zybin, V.V. Glasov, L. Tan
Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie [J. Mechatronics, Automation, Control], 2021, **22**(12), 660 (in Russian). DOI: 10.17587/mau.22.660-670.
15. Ju.V. Bondarenko, E.Yu. Zybin
Civil Aviation High Technologies, 2020, **23**(3), 39. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-39-51.
16. Yu. Bondarenko, A. Chekin, E. Zybin, V. Kosyanchuk
IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., 2020, **714**(1), 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012004.
17. E. Zybin, V. Kosyanchuk, S. Karpenko
MATEC Web of Conferences, 2017, 03011. DOI: 10.1051/mateconf/20179903011.
18. A.Yu. Akimova, A.A. Oboznov
Psychology in Russia: State of the Art, 2022, **15**(1), 20. DOI: 10.11621/pir.2022.0102.
19. V.V. Kosyanchuk, Yu.V. Bessonova, A.A. Oboznov, A.N. Zankovskiy, I.I. Greshnikov, I.A. Mahortov
Scientific e-JOURNAL Institute of Psychology Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Labor Psychology [IPRAN. Organizatsionnaya psikhologiya i psikhologiya truda], 2022, **7**(4), 227 (in Russian). DOI: 10.38098/ipran.opwp_2022_25_4_010.