

# АВТОНОМНОЕ НАВЕДЕНИЕ БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ: ПРОБЛЕМА ТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ РУЛЯМИ

**САЦЮК Александр Владимирович**, канд. техн. наук, доцент<sup>1</sup>; e-mail: alexandrsatsuk@gmail.com  
**ШВАЛОВ Дмитрий Викторович**, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой<sup>2</sup>; e-mail: d\_shvalov@mail.ru

<sup>1</sup> Донецкий институт железнодорожного транспорта, кафедра «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника», Донецк

<sup>2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Ростов-на-Дону

В статье представлена разработка математической модели автономного наведения для беспилотных летательных аппаратов, основанная на компьютерном зрении. Предложенная модель использует нелинейную функцию отклика с динамическим изменением коэффициента нелинейности в зависимости от расстояния до цели, что позволяет улучшить точность и стабильность наведения беспилотных летательных аппаратов, учитывая разные условия их полета и характеристики цели. Также рассмотрена проблема несоответствия пропорций видеокadra, и предлагаются методы нормирования координат квадрата на экране для обеспечения равномерного и предикабельного отклика беспилотных летательных аппаратов. В результате разработана улучшенная адаптивная математическая модель, которая обеспечивает более эффективное управление беспилотными летательными аппаратами, позволяя им точнее следить за целью и удерживать ее в центре кадра в различных условиях полета.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, компьютерное зрение, объект интереса, автономное наведение, автоматическое регулирование, адаптивное управление.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381

## ▼ Введение

В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к разработке автономных систем наведения для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Такие системы открывают новые возможности для применения БПЛА в различных областях с целью мониторинга состояния, например, окружающей среды [1], объектов инфраструктуры различных предприятий [2, 3], в том числе железнодорожного транспорта [4, 5], транспортных потоков [6] и др. При этом весьма актуальной является задача автоматического управления параметрами полета БПЛА (высота, маршрут, целенавешение, позиционирование), которая решается на основе применения технологий компьютерного зрения [7–10]. Важнейшее значение имеет обеспечение точности управления (наведения на цель) в нестационарных условиях, когда, с одной стороны, БПЛА подвержен воздействию разнонаправленных воздушных потоков, а с другой — объект наведения находится в движении [11–13].

## 1. Проблема обеспечения точности управления рулями БПЛА

Одним из ключевых элементов автономной системы наведения является точное управление рулями БПЛА, которое позволяет ему точно удерживать целевой объект в центре кадра. В данной статье предлагается математическая модель автономного управления для системы, использующей МРІ-камеру и микрокомпьютер для обработки изображений. Система автономного наведения передает информацию о положении объекта в поле зрения камеры в автопилот БПЛА посредством протокола Mavlink [5]. Автопилот использует полученные данные для управления сервоприводами, отвечающими за элероны и руль высоты, что позволяет БПЛА ориентироваться на цель [14]. При этом руль направления не используется в системе наведения, так как он управляется полетным контроллером для компенсации ветра и других возмущений. Таким образом, задача точного и стабильного автономного наведения сводится к разработке математической

модели управления элеронами и рулем высоты БПЛА в зависимости от положения целевого объекта в кадре видеопотока.

К одной из важнейших проблем можно отнести несовершенство алгоритма, который точно связывает положение объекта в кадре с необходимым отклонением рулей [15]. Это критически важно для стабильной и эффективной работы системы наведения, поскольку от точности управления рулями зависит способность БПЛА точно следовать за указанной целью. Разработка эффективного алгоритма наведения с использованием компьютерного зрения является ключевым шагом к созданию полностью автономных и безопасных систем управления БПЛА, что откроет новые возможности для их широкого применения в различных сферах.

Система управления рулями БПЛА, использующая компьютерное зрение, основывается на визуальном отслеживании объекта в поле зрения камеры. В классическом понимании этого процесса поле зрения камеры делится на мнимую сетку из пикселей, где каждый участок сетки соответствует определенному отклонению рулей БПЛА [15]. При движении объекта в поле зрения камеры система определяет участок сетки, в котором он находится, и отправляет в автопилот БПЛА через протокол Mavlink уникальный код, соответствующий этому участку. Этот код сигнализирует автопилоту о необходимом отклонении рулей. Например, если объект смещается вверх по экрану, система определяет, что он переместился в участок, соответствующий отклонению руля высоты в определенную сторону. Автопилот получает этот код и отклоняет руль высоты соответствующим образом. Аналогично смещение объекта влево соответствует отклонению элеронов в определенную сторону. Размер участков сетки и коэффициенты отклонения рулей должны быть оптимизированы для обеспечения стабильной и эффективной работы системы наведения. Данный подход позволяет создать простую и эффективную систему наведения БПЛА, основанную на визуальном отслеживании объекта в поле зрения камеры.

Однако точность управления рулями БПЛА при таком подходе напрямую зависит от правильного выбора коэффициентов и функций,

связывающих положение отслеживаемого объекта в кадре с необходимым отклонением элеронов и руля высоты. Неверные значения коэффициентов могут привести к нежелательным последствиям, ограничивая возможности системы наведения и даже ставя под угрозу безопасность полетов.

Если коэффициенты отклонения рулей слишком грубые, БПЛА будет реагировать на изменения положения объекта в кадре слишком резко. Это может привести к нестабильному полету, где БПЛА будет совершать резкие маневры, неконтролируемо изменяя направление и высоту полета. Такая нестабильность полета не только снижает точность наведения, но и увеличивает риск столкновения с препятствиями или другими воздушными судами. Кроме того, резкие изменения направления полета приводят к повышенному энергопотреблению, что сокращает время полетов и ограничивает возможности применения БПЛА.

Слишком малые коэффициенты отклонения рулей приводят к медленной реакции БПЛА на изменения положения объекта. В результате БПЛА не сможет точно следовать за целью, особенно при быстром движении цели или в условиях нестабильной атмосферы. Это также может привести к потере цели, так как БПЛА не сможет вовремя скорректировать свой курс и оказаться в нужном положении. Кроме того, увеличение времени полетов из-за медленной реакции может оказаться нежелательным в ситуациях, где время играет решающую роль.

Таким образом, существующие алгоритмы управления рулями БПЛА, основанные на компьютерном зрении, страдают от неточности и недостаточной адаптивности при управлении БПЛА в нестационарных условиях. Линейные модели не учитывают динамику полета и внешние факторы, такие как ветер. Нелинейные модели с фиксированным коэффициентом нелинейности не обеспечивают оптимальную чувствительность при разных расстояниях до цели. Целью статьи является разработка улучшенной адаптивной математической модели для автономного наведения БПЛА, которая обеспечивает точное управление рулями, учитывая нелинейность отклика, динамически изменяющийся коэффициент

нелинейности в зависимости от расстояния до цели и нормировку координат квадрата на экране для равномерного и предсказуемого отклика.

## 2. Линейная модель управления рулями БПЛА

Описанный выше принцип управления из-за своей простоты применяется во многих беспилотных системах. В управлении БПЛА, при котором отклонение аппарата определяется положением объекта относительно участков сетки, существует линейная зависимость между положением объекта и отклонением рулей. Это происходит потому, что каждому участку сетки соответствует определенный код отклонения относительно середины, и при перемещении объекта из одного участка в другой он меняется на заданную величину. Следовательно, изменение положения объекта на определенное расстояние всегда приводит к изменению кода отклонения на определенное значение. Таким образом, общий вид математической модели линейного управления рулями БПЛА будет иметь вид:

$$\begin{cases} PWM_E = k \cdot (x) \\ PWM_V = l \cdot (y) \end{cases} \quad (1)$$

где  $PWM_E$ ,  $PWM_V$  — отклонение значений ШИМ ( $PWM$ ) для сервоприводов элеронов и руля высоты соответственно в микросекундах;

$k$ ,  $l$  — коэффициенты пропорциональности, которые определяют чувствительность отклонения элеронов к изменению положения объекта интереса по осям  $X$  и  $Y$  видеокадра;

$x$ ,  $y$  — координаты центра объекта интереса по осям  $X$  и  $Y$ .

Обозначим, что понятие «объект интереса» в пространстве видеокадра представляет собой прямоугольную или квадратную область, которая ограничивает набор пикселей, заданный оператором. Эта область, называемая  $ROI$  (*Region of Interest*), является ключевым элементом в компьютерном зрении, поскольку концентрирует внимание алгоритма на определенной части изображения.  $ROI$  может быть определена вручную или автоматически с по-

мощью алгоритмов обнаружения объектов. Середина области  $ROI$  (центральный пиксель) определяет положение цели в пространстве видеокадра.

Если рассматривать практическое применение математической модели, например, для реализации алгоритма наведения в программе, то модель (1) примет вид:

$$\begin{cases} PWM_E = N + \frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}} \cdot \Delta_{\max\_E} \cdot \delta_E \\ PWM_V = N + \frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}} \cdot \Delta_{\max\_V} \cdot \delta_V \end{cases}, \quad (2)$$

где  $N$  — значение  $PWM$ , которое соответствует нейтральному положению сервоприводов (в пикселях);

$R_x$ ,  $R_y$  — ширина и высота видеокадра (в пикселях);  $x$ ,  $y$  — текущие отклонения по горизонтали и по вертикали  $ROI$  в пикселях;

$x - \frac{R_x}{2}$ ,  $y - \frac{R_y}{2}$  — координаты центра экрана

по осям  $X$  и  $Y$ ;

$\frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}}$ ,  $\frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}}$  — относительное смещение

$ROI$  от центра экрана по осям  $X$  и  $Y$ ;

$\Delta_{\max\_E}$ ,  $\Delta_{\max\_V}$  — коэффициент, учитывающий максимальное изменение  $PWM$  для сервопривода и руля высоты;

$\delta_E$ ,  $\delta_V$  — коэффициенты чувствительности управления сервоприводом элерона и руля высоты.

Выражение (2), которое является моделью управления сервоприводами в зависимости от перемещения точки (центрального пикселя квадратной области  $ROI$ ) по видеокадру, подтверждает линейность управления рулями БПЛА. При этом в компьютерном зрении важным фактором, влияющим на точность управления, является настройка разрешения камеры.

Однако такая линейная зависимость (рис. 1) не всегда приводит к желаемой точности и стабильности в реальных условиях. Например, при большом удалении объекта от центра кадра небольшое смещение объекта может привести к значительному отклонению рулей, что может привести к нестабильности полета. Кроме того, линейная зависимость не учитывает динамику полета БПЛА и внешние факторы, такие как ветер.

### 3. Нелинейная модель управления рулями БПЛА

С учетом вышесказанного следует предусмотреть некоторую нелинейность в алгоритме управления, которая обеспечивает более точное и стабильное управление рулями. Например, может быть использована функция нелинейного отклика, которая увеличивает отклонение рулей при большом удалении объекта от центра кадра и уменьшает его при меньшем удалении. Также может быть использована система *PID*-регулятора, которая учитывает ошибки наведения и корректирует отклонение рулей в реальном времени [2].

Нелинейная функция отклика позволяет учитывать более сложные зависимости между положением объекта и отклонением рулей. Примером такой функции может быть выражение:

$$\begin{cases} PWM_E = N + \frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}} \cdot \Delta_{\max\_E} \cdot \delta_E \cdot \left|\frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}}\right| \cdot e^{nE} \\ PWM_V = N + \frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}} \cdot \Delta_{\max\_V} \cdot \delta_V \cdot \left|\frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}}\right| \cdot e^{nV} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $nE, nV$  — показатель степени, который контролирует степень нелинейности по управлению рулями направления и высоты.

Такая нелинейность системы уравнения модели автономного наведения БПЛА может принести значительные преимущества, улучшая точность, стабильность и адаптивность системы.

В системе (3) при  $nE > 1$  (или  $nV > 1$ ) нелинейность делает отклик более чувствительным при больших отклонениях *ROI* от центра. Это позволяет более резко реагировать на большие смещения *ROI*, улучшая точность наведения при больших отклонениях.

И наоборот, при  $nE < 1$  (или  $nV < 1$ ) нелинейность делает отклик менее чувствительным при больших отклонениях *ROI* от центра. Это помогает сгладить отклик и уменьшить нежелательные вибрации и нестабильность при больших смещениях центра области *ROI* (рис. 2).

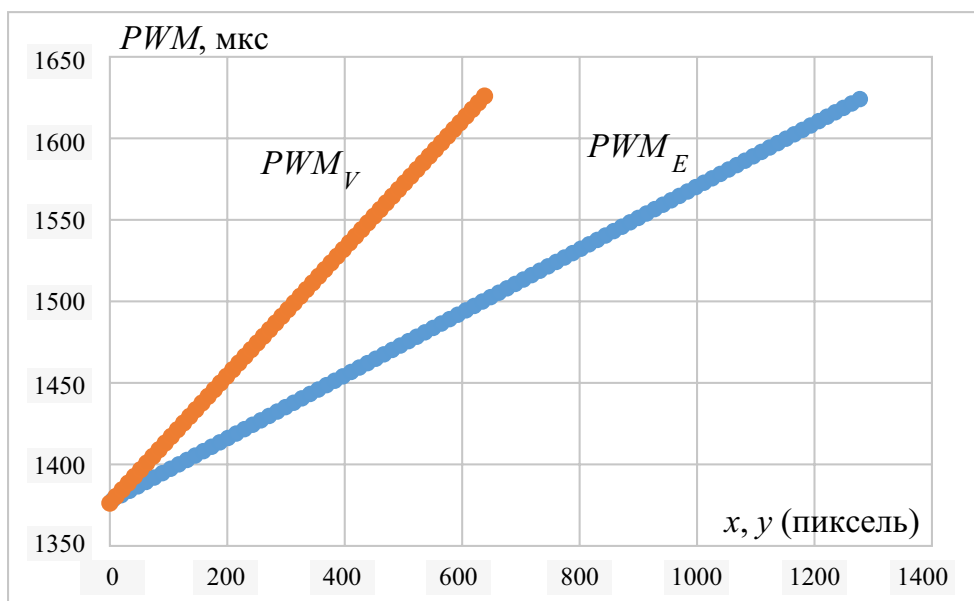
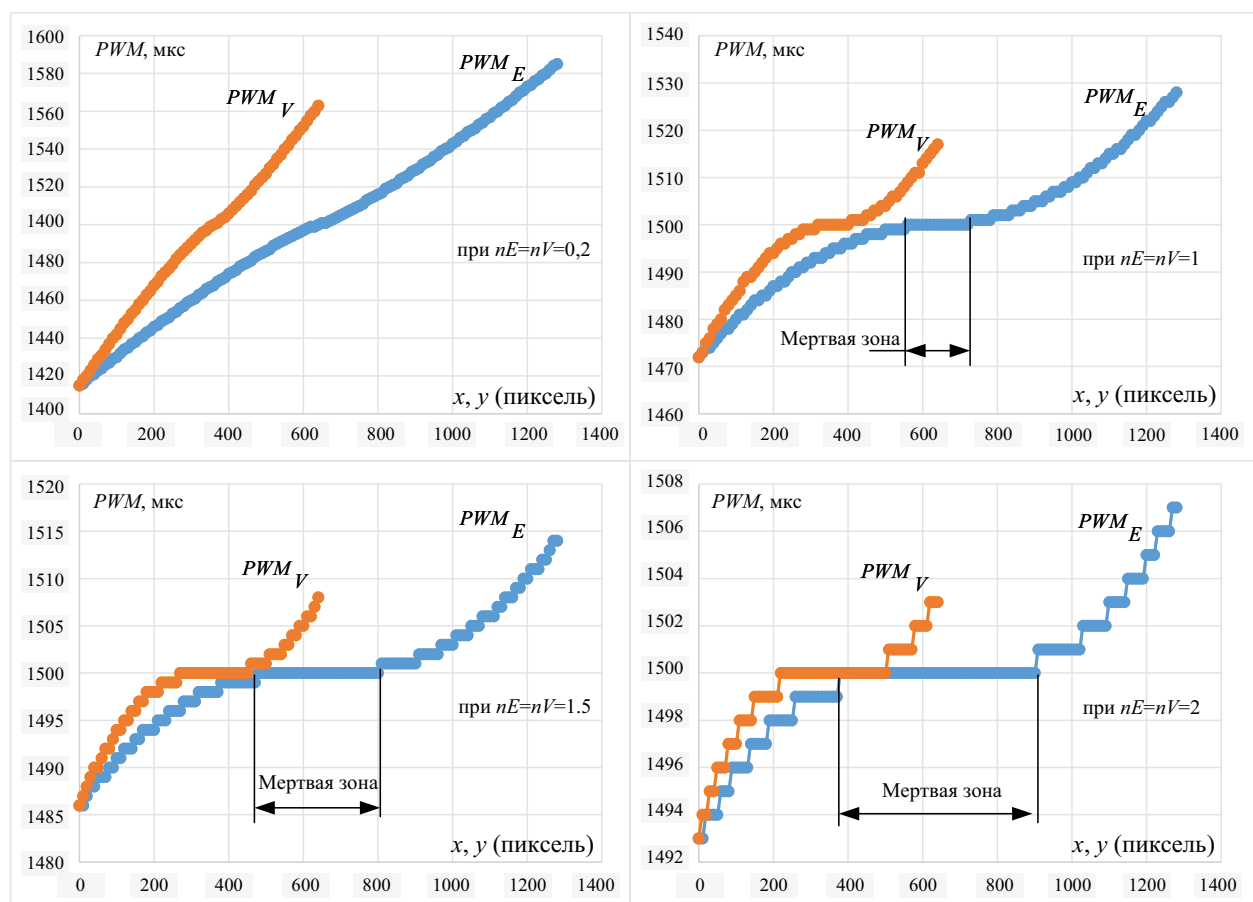


Рис. 1. Линейный характер автоматического управления рулями БПЛА



**Рис. 2.** Нелинейный характер автоматического управления рулями БПЛА с различными коэффициентами нелинейности

Рассмотрим графики, которые получены в результате моделирования выражения (3).

Как видно из полученных графиков, с увеличением степени нелинейности в функции отклика появляется «мертвая зона» для смещений центра области *ROI*. В этой зоне, несмотря на незначительные отклонения заданной области интереса от центра, не происходит передачи управляющих сигналов на рули БПЛА.

Это может быть полезным в ситуациях, когда присутствует тряска борта или вибрация камеры, вызванная встречными потоками воздуха. В таких условиях небольшие смещения *ROI* на экране могут быть вызваны не движением целевого объекта, а вибрацией системы. Использование «мертвой зоны» позволяет исключить нежелательные реакции БПЛА на эти ложные смещения, сохраняя стабильность полета.

С другой стороны, «мертвая зона», которая составляет сотни пикселей (например, при

$nE = 1,5$  или  $nE = 2$ , как показано на рис. 2), может снизить качество выполнения задачи.

Слишком большая «мертвая зона» может существенно снизить чувствительность системы наведения к изменениям положения целевого объекта, делая ее менее отзывчивой на небольшие отклонения. Это связано с тем, что при больших значениях степени нелинейности ( $nE$ ) функция отклика становится более «плоской» в области малых смещений, фактически игнорируя их. В результате БПЛА будет медленнее реагировать на небольшие движения цели, что может привести к потере цели из вида, особенно если она движется быстро или находится на небольшом расстоянии.

Важно учитывать, что оптимальный размер «мертвой зоны» зависит от ряда факторов, таких как скорость движения цели, ее размер, расстояние до нее, а также характеристики системы наведения БПЛА. В некоторых случаях,

например, при наличии сильных вибраций, большая «мертвая зона» может быть необходима для устранения ложных сигналов. Однако в большинстве случаев необходимо стремиться к минимизации «мертвой зоны» для обеспечения максимальной чувствительности и отзывчивости системы наведения.

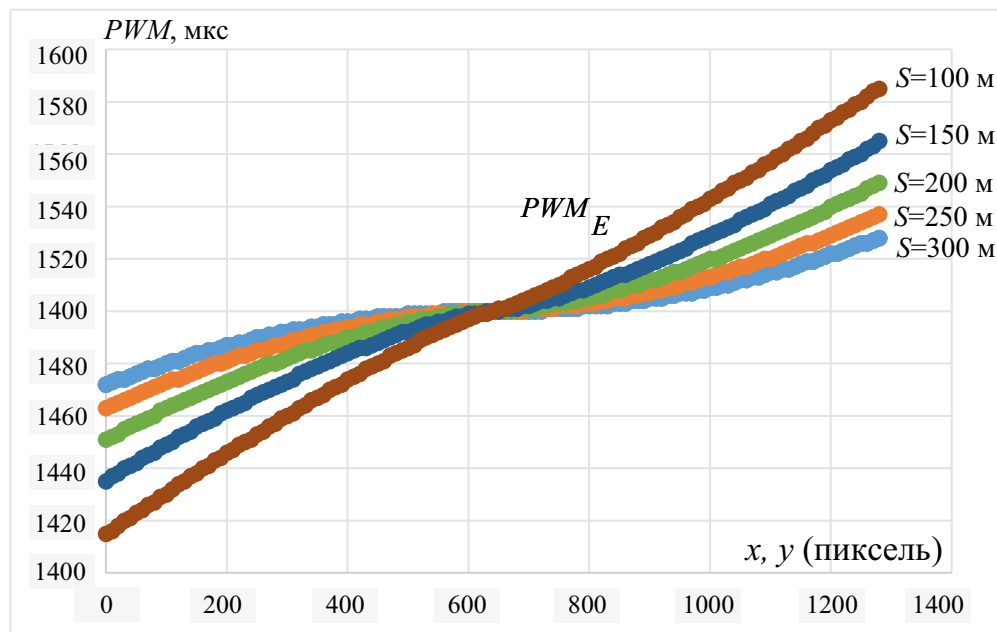
Это позволяет сделать вывод, что модель (3) должна учитывать расстояния до объекта в пределах видимости лидара, тем самым изменять величину «мертвой зоны». Это достигается путем изменения параметров  $nE, nV$ .

Изменение коэффициента нелинейности ( $nE, nV$ ) в зависимости от расстояния до объекта в системе наведения БПЛА может существенно повысить ее точность и стабильность. Принцип основан на том, что при близком расположении объекта небольшие изменения в положении  $ROI$  на экране отражают более значительные изменения в реальном пространстве. Следовательно, необходима более высокая чувствительность системы наведения, чтобы точно отслеживать движение цели (уменьшить  $nE, nV$ ). Наоборот, при дальнем расположении объекта те же самые изменения в положении  $ROI$  отражают незначительные изменения в реальном пространстве. В этом случае более высокая чувствительность может

привести к нестабильности и лишним маневрам БПЛА.

Таким образом, динамически изменяя коэффициент нелинейности в зависимости от расстояния до объекта, можно создать более адаптивную систему наведения, которая будет точнее отслеживать цель и удерживать ее в центре кадра независимо от расстояния (4). Это достигается путем увеличения чувствительности при ближнем расположении цели (уменьшить  $nE, nV$ ) и снижения чувствительности при дальнем расположении (увеличению  $nE, nV$ ). Например, можно использовать линейную зависимость между коэффициентом нелинейности ( $nE, nV$ ) и обратным квадратом расстояния до цели ( $S$ ). Такая функция обеспечит более высокую чувствительность при ближнем расположении и плавное снижение чувствительности при увеличении расстояния (рис. 3):

$$\begin{cases} PWM_E = N + \frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}} \cdot \Delta_{\max\_E} \cdot \delta_E \cdot \left|\frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}}\right| \cdot e^{\left(\frac{nE \cdot S}{k_s}\right)} \\ PWM_V = N + \frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}} \cdot \Delta_{\max\_V} \cdot \delta_V \cdot \left|\frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}}\right| \cdot e^{\left(\frac{nV \cdot S}{k_s}\right)} \end{cases}, \quad (4)$$



**Рис. 3.** Семейство графиков модели автоматического управления элеронами БПЛА с учетом приближения к объекту интереса



где  $S$  — расстояние до объекта, м;

$k_s$  — коэффициент, определяющий скорость изменения показателя степени.

Как видно из графика (рис. 3), после передачи управления от оператора искусственному интеллекту (трекеру) с расстояния 300 м модель демонстрирует более резкое отклонение рулей при приближении БПЛА к цели, чем при дальнем расположении объекта. Стоит заметить, что такая модель не требует информации о скорости цели. Это связано с тем, что модель уже учитывает изменения в положении цели в зависимости от расстояния, не завися от того, как быстро или медленно движется объект.

К примеру, если цель движется быстро, БПЛА будет чаще корректировать свое положение, чтобы оставаться в центре кадра, но модель управления будет оставаться той же, и основной параметр — расстояние до цели — не изменится. Таким образом, модель с динамически изменяющимся коэффициентом нелинейности уже учитывает основные факторы движения цели и не требует дополнительной информации о скорости.

Еще одно замечание, которое сопровождает все рассмотренные выше модели (1–4), это различные наклоны графиков к оси абсцисс. Если графики моделей управления элеронами и рулем высоты имеют разный наклон к оси  $X$ , то это означает, что отклик БПЛА на смещения области  $ROI$  будет несимметричным. Например, при смещении  $ROI$  вправо элероны могут отклоняться более резко, чем руль высоты. Это может привести к нежелательному поведению БПЛА, например, к повороту с одновременным кренлением или к неровному движению при попытке удерживать целевой объект в центре области  $ROI$ .

Несоответствие пропорций видеокadra (неквадратная форма) влияет на отклик системы наведения БПЛА, так как нормировка координат области  $ROI$  относительно ширины и высоты кадра осуществляется неравномерно. Это приводит к разному отклонению рулей при смещении центра области интереса по осям  $X$  и  $Y$ , делая движение БПЛА непредсказуемым и нестабильным.

Для устранения этой проблемы необходимо привести модели управления элеронами и рулем высоты к одному углу наклона к оси  $X$ , что

обеспечит более равномерный и предикабельный отклик БПЛА на смещения области интереса, делая его движение более плавным и стабильным. Это особенно важно при полетах в сложных условиях, например, при сильном ветре или турбулентности, где нестабильность движения может привести к потере контроля над БПЛА. Для решения этого вопроса предлагается привести нижнюю часть модели путем вычитания коэффициента, который учитывает разницу между высотой и шириной видеокadra. С учетом этого математическая модель (4) примет вид:

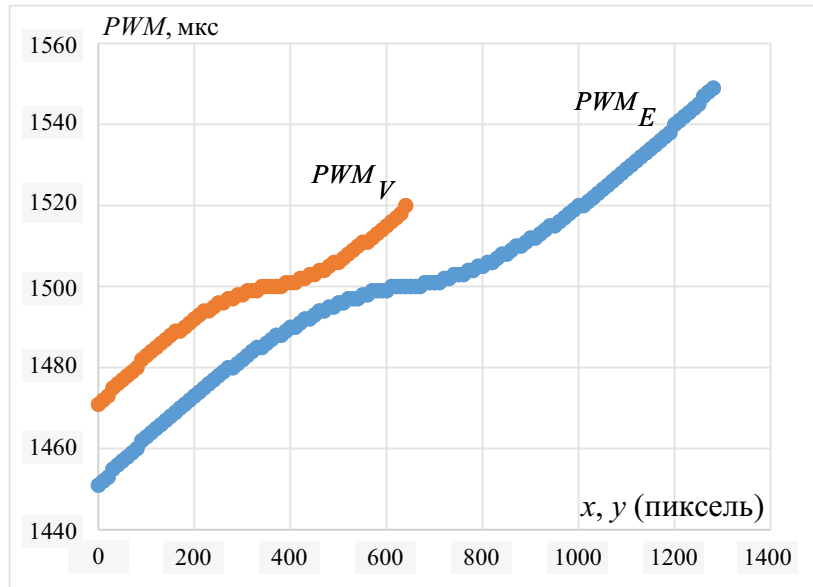
$$\left\{ \begin{aligned} PWM_E &= N + \frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}} \cdot \Delta_{\max\_E} \cdot \delta_E \cdot \left| \frac{\left(x - \frac{R_x}{2}\right)}{\frac{R_x}{2}} \right| \cdot e^{\left(nE + \frac{S}{k_s}\right)} \\ PWM_V &= N + \frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}} \cdot \Delta_{\max\_V} \cdot \left(\delta_V - \frac{R_y}{R_x}\right) \cdot \left| \frac{\left(y - \frac{R_y}{2}\right)}{\frac{R_y}{2}} \right| \cdot e^{\left(nV + \frac{S}{k_s}\right)} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где  $\frac{R_y}{R_x}$  — коэффициент, который позволяет

учесть несоответствие отношений ширины и высоты видеокadra.

### Заключение

Представленные в статье результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. Задача создания эффективной системы автономного наведения для беспилотного летательного аппарата может быть решена с использованием технологий компьютерного зрения. При этом возникает проблема нелинейности в системе наведения, связанная с тем, что отклик БПЛА на небольшие изменения положения целевого объекта в кадре может быть неадекватным из-за вибраций, неточностей датчиков и особенностей динамики полета. Для решения этой проблемы предложено использовать нелинейную функцию отклика с динамически изменяющимся коэффициентом нелинейности ( $nE$ ), что позволяет учитывать расстояние до цели и обеспечивать более точное и стабильное управление. С помощью нелинейности можно создать «мертвую зону» для смещений области наведения, которая исключает нежелательные реакции БПЛА



**Рис. 4.** График адаптивной модели управления рулями БПЛА

на незначительные изменения положения цели, вызванные вибрациями системы. Также при решении рассматриваемой задачи возникает проблема несимметричности отклика системы на смещения по осям  $X$  и  $Y$ , связанная с неквадратной формой видеокadra. Для ее решения предложено использовать нормированные координаты центра области интереса относительно ширины и высоты кадра, что позволяет учесть разницу между этими параметрами.

Разработанная улучшенная математическая модель системы автономного наведения БПЛА учитывает динамику полета, влияние внешних факторов (ветра, вибраций) и несоответствие ширины и высоты кадра. Эта модель обеспечивает более точное и стабильное управление БПЛА, что позволяет ему эффективно следить за целью и удерживать ее в центре кадра в разных условиях полета. Дальнейшие исследования могут быть направлены на улучшение точности и скорости работы системы наведения с помощью более сложных алгоритмов обработки изображений, а также на разработку адаптивных систем, которые будут самостоятельно настраиваться в зависимости от условий полета. ▲

#### Библиографический список

1. Шевченко О.Ю., Боричевский А.Б. Использование беспилотных летательных аппаратов для ведения мониторинга использования территорий // Эко-
2. Зоев И.В., Марков Н.Г., Рыжова С.Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 11. С. 34–49. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2346
3. Лещенко Б.Г. Беспилотный летательный аппарат с применением средств машинного зрения на транспортном предприятии // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2018. № 2(23). С. 29–33. EDN: YMZPJВ
4. Башаркин М.В., Исaiчева А.Г., Исaiчева Н.А. Тепловизионный контроль рельсовой линии с помощью БПЛА // Автоматика, связь, информатика. 2024. № 9. С. 14–16. DOI: 10.62994/AT.2024.9.9.004
5. Сацюк А.В., Воробьева А.А. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2023. № 68. С. 13–21.
6. Чебыкин И.А., Семенов С.С. Анализ транспортного потока с помощью искусственного интеллекта // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2020. Т. 1. С. 354–358. EDN: LVTUDN



7. Лебедев А. О., Васильев В. В. Алгоритм управления полетом БПЛА над железной дорогой в автоматическом режиме с использованием компьютерного зрения // Автометрия. 2021. Т. 57. № 4. С. 85–90. DOI: 10.15372/AUT20210410
8. Калиновский Н. Применение систем компьютерного зрения в беспилотных летательных аппаратах: новые возможности для робототехники // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2024. № 3(234). С. 108–110. DOI: 10.22184/1992–4178.2024.234.3.108.110
9. Обзор методов визуальной навигации и алгоритмов планирования пути для беспилотных летательных аппаратов / М. П. Корсаков [и др.] // Главный механик. Т. 21. № 6(250). С. 25–33. EDN: NRJWBM
10. Россолов Р. А., Лысков Р. А., Давыдов Н. Н. Автономная система позиционирования БПЛА в замкнутом пространстве с использованием компьютерного зрения // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 3. С. 14–17. EDN: YYHGZV
11. Широков И. Б., Зинченко Е. Г. Система автоматизированной посадки БПЛА на движущуюся платформу на базе алгоритмов технического зрения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 293–297. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-293-297
12. Контроль зависания БПЛА для автоматической посадки на передвижную платформу корабля / А. А. Силкин [и др.] // Морской вестник. 2023. № 3(87). С. 105–107. EDN: BDMWCW
13. Гетманцев А. Ю., Тихомиров Н. В., Меньшакова Т. В. Синтез многоуровневой архитектуры системы наведения и автоматической посадки беспилотного летательного аппарата на движущееся транспортное средство // Экстремальная робототехника. 2024. № 1(34). С. 461–470. EDN: PGYWXX
14. Сацюк А. В., Воевода Е. Г., Стажарова Л. Н. Анализ трекеров алгоритмов компьютерного зрения в вопросах отслеживания объектов в видеопотоке // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сборник научных трудов. Ростов н/Д.: РГУПС, 2023. С. 407–412.
15. Сацюк А. В., Воевода Е. Г. Анализ трекеров алгоритмов компьютерного зрения в вопросах отслеживания подвижных объектов в видеопотоке // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2023. № 71. С. 54–65.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 4. P. 372–381*  
 DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381

### Autonomous UAV guidance using computer vision: the problem of precise rudder control

#### Information about authors

**Satsiuk A. V.**, PhD in Engineering, Associate Professor<sup>1</sup>.

E-mail: alexandrsatsuk@gmail.com

**Shvalov D. V.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the department<sup>2</sup>.

E-mail: d\_shvalov@mail.ru

<sup>1</sup> Donetsk Institute of Railway Transport, Department of Automation, Telemechanics, Communications and Computer Science, Donetsk

<sup>2</sup> Rostov State Transport University, Department of Railway Automation and Telemechanics, Rostov-on-Don

**Abstract:** the development of a mathematical model of autonomous guidance for unmanned aerial vehicles based on computer vision is presented. The model uses a nonlinear response function with dynamic variation of the nonlinearity coefficient depending on the distance to the target, which improves the accuracy and stability of unmanned aerial vehicle guidance given different flight conditions and target characteristics. The problem of video frame aspect ratio mismatch is also considered and methods for normalizing the coordinates of the square on the screen to ensure uni-form and predicable unmanned aerial vehicle response are proposed. As a result, an improved adaptive mathematical model is developed that provides more efficient motion control for the unmanned aerial vehicle, allowing it to accurately track the target and keep it in the center of the frame under different flight conditions.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, computer vision, autonomous guidance, region of interest, automatic control, adaptive control.

#### References

1. Shevchenko O. Yu., Borichevskii A. B. Ispolzovanie bespilotnykh letatelnykh apparatov dlia vedeniia monitoringa ispolzovaniia territorii // Ekonomika i ekologiia territorialnykh obrazovani. 2015. No. 3. S. 150–152. EDN: UNYNXL (In Russian)
2. Zoev I. V., Markov N. G., Ryzhova S. E. Intellektualnaia sistema kompiuternogo zreniia bespilotnykh letatelnykh apparatov dlia monitoringa tekhnologicheskikh obiektov predpriatii neftegazovoi otrasli // Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Inzhiniring geoesursov. 2019. Vol. 330. No. 11. S. 34–49. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2346 (In Russian)
3. Leshchenko B. G. Bespilotnyi letatelnyi apparat s primeneniem sredstv mashinogo zreniia na transportnom predpriatii // Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova. 2018. No. 2 (23). S. 29–33. EDN: YMZPJB (In Russian)
4. Basharkin M. V., Isaicheva A. G., Isaicheva N. A. Teplovizionnyi kontrol relsovoi linii s pomoshchiu BPLA // Avtomatika, sviaz, informatika. 2024. No. 9. S. 14–16. DOI: 10.62994/AT.2024.9.9.004 (In Russian)
5. Satsiuk A. V., Vorobeva A. A. Osobennosti razrabotki bespilotnykh letatelnykh apparatov dlia otrasli zheleznodorozhnogo transporta // Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2023. No. 68. S. 13–21. (In Russian)
6. Chebykin I. A., Semenov S. S. Analiz transportnogo potoka s pomoshchiu iskusstvennogo intellekta // Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse. 2020. Vol. 1. S. 354–358. EDN: LVTUDN (In Russian)
7. Lebedev A. O., Vasilev V. V. Algoritm upravleniia poletom BPLA nad zheleznoi dorogoi v avtomaticheskom rezhime s ispolzovaniem kompiuternogo zreniia // Avtometriia. 2021. Vol. 57. No. 4. S. 85–90. DOI: 10.15372/AUT20210410 (In Russian)

8. Kalinovskii N. Primenenie sistem kompiuternogo zreniia v bespilotnykh letatelnykh apparatakh: novye vozmozhnosti dlia robototekhniki // Elektronika: Nauka, tekhnologiia, biznes. 2024. No. 3(234). S. 108–110. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.234.3.108.110 (In Russian)
9. Obzor metodov vizualnoi navigatsii i algoritmov planirovaniia puti dlia bespilotnykh letatelnykh apparatov / M. P. Korsakov [i dr.] // Glavnyi mekhanik. Vol. 21. No. 6(250). S. 25–33. EDN: NRJWBM (In Russian)
10. Rossolov R. A., Lyskov R. A., Davydov N. N. Avtonomnaia sistema pozitsionirovaniia BPLA v zamknutom prostranstve s ispolzovaniem kompiuternogo zreniia // Proektirovanie i tekhnologiia elektronnykh sredstv. 2018. No. 3. S. 14–17. EDN: YYHGZV (In Russian)
11. Shirokov I. B., Zinchenko E. G. Sistema avtomatizirovannoi posadki BPLA na dvizhushchiusia platformu na baze algoritmov tekhnicheskogo zreniia // Izvestiia Tulsogo gosudarstvennogo universiteta Tekhnicheskie nauki. 2022. No. 9. S. 293–297. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-293-297 (In Russian)
12. Kontrol zavisaniia BPLA dlia avtomaticheskoi posadki na peredvizhniuu platformu korablia / A. A. Silkin [i dr.] // Morskoi vestnik. 2023. No. 3(87). S. 105–107. EDN: BDMWCW (In Russian)
13. Getmantsev A. Yu., Tikhomirov N. V., Menshakova T. V. Sintez mnogourovnevoi arkhitektury sistemy navedeniia i avtomaticheskoi posadki bespilotnogo letatel'nogo apparata na dvizhushcheesia transportnoe sredstvo // Ekstremalnaia robototekhnika. 2024. No. 1(34). S. 461–470. EDN: PGYWXX (In Russian)
14. Satsiuk A. V., Voevoda E. G., Stazharova L. N. Analiz trekerov algoritmov kompiuternogo zreniia v voprosakh otslezhivaniia obiektov v videopotoke // Tsifrovyie infokommu-nikatsionnye tekhnologii sbornik nauchnykh trudov. Rostov n/D.: RGUPS, 2023. S. 407–412. (In Russian)
15. Satsiuk A. V., Voevoda E. G. Analiz trekerov algoritmov kompiuternogo zreniia v voprosakh otslezhivaniia podvizhnykh obiektov v videopotoke // Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2023. No. 71. S. 54–65. (In Russian)