

# РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering

XXI век

**том 90, номер 4, 2026**

**В номере:**

**РАДИОЛОКАЦИЯ И СВЯЗЬ**

и др.



тел./факс: (495) 625-9241  
e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)  
<http://www.radiotec.ru>



# Алгоритмы функционирования: передача, прием и обработка сигналов

Научная статья

УДК 681.515:623.746.-519

DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202604-10>

## Реализация алгоритма стабилизации положения квадрокоптера в автономном режиме пилотирования

И.К. Антонов<sup>1</sup>, П.А. Арбузов<sup>2</sup>, А.С. Ненашев<sup>3</sup>, П.А. Прохоркин<sup>4</sup>, В.В. Солдатенко<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup> ГК «Комплексные системы» (Москва, Россия)

<sup>1</sup> aik@csc.ru; <sup>2</sup> p.arbuzov@meta-systems.ru; <sup>3</sup> anatoliy.nenashev@bg-optics.ru;

<sup>4</sup> p.prokhorkin@meta-systems.ru; <sup>5</sup> v.soldatenko@meta-systems.ru

### Аннотация

**Постановка проблемы.** На сегодняшний день режимы управления квадрокоптером, в которых оператор освобождается от необходимости постоянно следить за положением аппарата, востребованы и у начинающих пилотов, и у профессионалов, параллельно осуществляющих управление полезной нагрузкой. Однако большинство таких режимов реализуются с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), которые в настоящее время активно подавляются. В связи с этим разработка и настройка датчиков для автономной навигации, с помощью которых можно стабилизировать положение квадрокоптера в пространстве, являются актуальными задачами.

**Цель.** Разработать и реализовать алгоритм управления квадрокоптером в режиме стабилизации положения с применением оптического датчика изображения и лазерного измерителя дальности (лидара) при отсутствии сигнала СРНС.

**Результаты.** Рассмотрена возможность обеспечения достаточно точного позиционирования БПЛА в режиме, подобном так называемому режиму Loiter, доступному только при наличии сигналов СРНС (GPS Mode). Построен алгоритм управления квадрокоптером, позволяющий в автоматическом режиме поддерживать заданное положение при отсутствии воздействия на органы управления и быстро переходить от вынужденного движения к стабилизации положения относительно земной системы координат. В результате проведения натурного эксперимента показано, что разработанный алгоритм сохраняет робастность в условиях сильной зашумленности сигнала датчиков и при этом поддерживает требуемое качество управления.

**Практическая значимость.** Представленный алгоритм управления квадрокоптером в режиме стабилизации положения с применением оптического датчика изображения и лазерного измерителя дальности (лидара) при отсутствии сигнала СРНС может быть использован в программном обеспечении систем управления БПЛА.

### Ключевые слова

Автономная навигация и пилотирование БЛА, автоматическое управление квадрокоптером, автоматическая стабилизация положения квадрокоптера

### Для цитирования

Антонов И.К., Арбузов П.А., Ненашев А.С., Прохоркин П.А., Солдатенко В.В. Реализация алгоритма стабилизации положения квадрокоптера в автономном режиме пилотирования // Радиотехника. 2026. Т. 90. № 4. С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202604-10>

A brief version in English is given at the end of the article

### Введение

В настоящее время при управлении летательными аппаратами использование сигналов таких глобальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС), как GPS, ГЛОНАСС и др. затруднено и для малых, и для сверхмалых БПЛА квадрокоптерной схемы. Основой навигационного комплекса таких БПЛА

являются спутниковые приемники, имеющие небольшие габаритные размеры и массу. Они позволяют реализовать комфортные режимы управления [1], такие как режим полета Loiter, при котором квадрокоптер удерживает точку по координатам и высоте. Альтернативы таким датчикам нет, особенно, в задачах получения параметров скорости и положения относительно земной системы координат. Использование в этом случае инерциальных систем с характеристиками, обеспечивающими длительный автономный полет, ограничивается слишком большой массой и габаритными размерами этих устройств, не говоря уже об их стоимости.

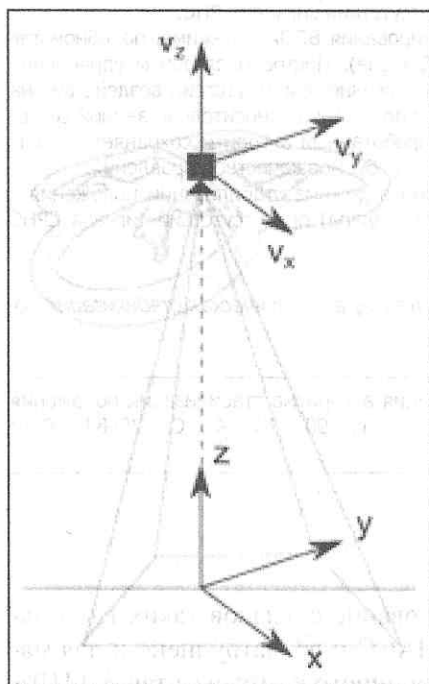
Тем не менее режимы управления квадрокоптером, в которых оператор освобождается от необходимости постоянно следить за положением аппарата, востребованы не только начинающими пилотами, но и профессионалами, которые параллельно решают задачи управления полезной нагрузкой. В связи с этим разработка и настройка датчиков для автономной навигации, позволяющих стабилизировать положение квадрокоптера в пространстве, являются актуальными задачами.

**Ц е л ь р а б о т ы** – разработать и реализовать алгоритм управления квадрокоптером в режиме стабилизации положения с использованием оптического датчика изображения и лазерного измерителя дальности (лидара) при отсутствии сигнала СРНС.

Для обоснования выбора способа управления БПЛА была построена математическая модель и определен формальный закон управления в каналах полетного контроллера на основе универсального протокола Mavlink [6]. Экспериментальная часть выполнена с использованием реального летательного аппарата с установленными на борту датчиками и компьютером-компаньоном, работающим в режиме реального времени.

### Конструкция и схема установки комбинированного датчика

Для экспериментов был выбран комбинированный датчик, состоящий из видеокамеры и лидара. В качестве камеры использовали видеокамеру с центральным затвором (Global Shutter), обеспечивающую одновременное формирование изображения всего кадра с достаточно высокой частотой формирования кадров (FPS). Режим работы датчика на данной частоте позволял сохранять и обрабатывать кадры в высоком разрешении без сжатия. Лидар обеспечивал достоверное измерение дальности в пределах рабочего диапазона высот  $H$  (100...120 м). Оптические оси камеры и лидара необходимо было совместить с центром кадра (для выполнения данного условия можно устранить дисторсию камеры и механических настроек).



**Рис. 1.** Схема работы оптического датчика (видеокамеры)

**Fig. 1.** Optical sensor camera installation scheme

Обработка сигналов комбинированного датчика осуществлялась на борту летательного аппарата на одноплатном компьютере в ОС Linux с использованием библиотек графического ускорителя, что позволило достичь требуемого быстродействия и исключить необходимость передачи изображения на наземную станцию управления.

На рис. 1 показана схема работы комбинированного датчика (видеокамеры и лидара) и системы координат, связанные с БПЛА и землей. Лидар устанавливается соосно с видеокамерой и напоминает датчик оптического потока, формирующий карту сдвигов по полю изображения при движении платформы, на которой установлены датчики. Однако алгоритм Лукаса–Канеде [2], применяемый в датчиках оптического потока (Optical Flow), в указанных ранее условиях при высоком значении отношения путевой скорости к высоте ( $W/H$ ) работает некорректно. Поэтому сдвиг изображения, соответствующий перемещению БПЛА в пространстве, определяется с помощью коррелятора на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Также можно использовать алгоритмы SIFT, SURF и др. [7, 8], позволяющие установить взаимное соответствие между точками пары изображений. Однако они вносят в показания датчика значительный шум, что заставляет от них отказаться.

### Математическая модель движения БПЛА

Перемещение камеры в пространстве определяется величиной сдвига изображения на двух смежных кадрах, отнесенное к фокусному расстоянию объектива с учетом высоты:

$$S_{i+1} = S_i + \Delta S_i,$$

где  $\Delta S_i = \frac{H_i \Delta X_i}{f}$ .

Фактически  $\frac{\Delta S_i}{\Delta t} = V_i$ , где  $\Delta t$  – интервал времени между

смежными кадрами. Это позволяет получить оценку значения скорости в направлении соответствующей оси в системе координат изображения. Полагая, что ось  $Ox$  направлена поперек полета, а ось  $Oy$  – вдоль, можно оценить скорость БПЛА относительно земли (рис. 2).

Запишем уравнения движения квадрокоптера в трехмерном пространстве:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \tag{1}$$

где  $x(t)$  – вектор состояния;  $A$  – невырожденная матрица коэффициентов;  $Bu(t)$  – управляющее воздействие.

Для вертикального канала

$$x(t) = [z(t), v_z(t)]^T, \quad u(t) = u_z(t), \quad \begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{v}_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ v_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_z(t).$$

В режиме стабилизации поддерживается нулевое значение вертикальной скорости. При этом сила тяжести компенсируется составляющей силы тяги двигателей, направленной вверх:

$$u_z(t) = m(a_z - g).$$

Режим поддержания заданной высоты называют Altitude Hold (AltHold). Задав закон управления в вертикальной плоскости таким образом, можно управлять летательным аппаратом в продольном и поперечном каналах без необходимости вручную поддерживать необходимую высоту полета.

Если считать, что продольный и поперечный каналы управления независимы, то получим уравнения движения вдоль соответствующих осей в скалярном виде с учетом (1):

$$u_x(t) = ma_x - \text{sign}(v_x)F_r,$$

$$u_y(t) = ma_y - \text{sign}(v_y)F_r,$$

где  $F_r$  – фактор внешних воздействий.

Данное допущение в незначительной степени «идеализирует» модель движения квадрокоптера в системе координат, связанной с Землей, поскольку полетный контроллер квадрокоптера настраивается так, чтобы управление по каналам было развязано. Далее перейдем к синтезу управления квадрокоптером в продольном и поперечном каналах.

### Особенности системы управления квадрокоптера

Управление в продольном и поперечном канале квадрокоптера осуществляется отклонением правой ручкой (стиком) пульта дистанционного управления (ПДУ), которое преобразуется в широтно-импульсный сигнал управления (ШИМ). Управление в соответствующем канале передается полетному контроллеру, работающему в режиме AltHold.

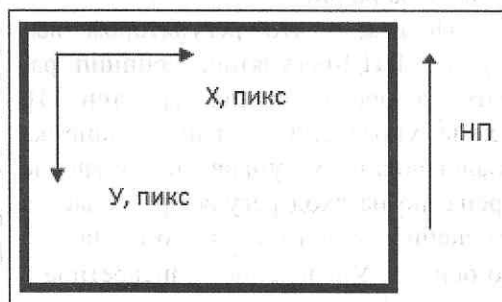


Рис. 2. Система координат изображения (НП – направление полета БПЛА)  
Fig. 2. Image coordinate system

тром типа «скользящее среднее» [4]. Однако даже после фильтрации пропорциональную составляющую не удалось использовать в контуре управления, так как наблюдалась задержка соответствующего сигнала. Это обстоятельство не позволило получить в классической схеме управления достаточно быстрое затухание переходного процесса и требуемую «резкость управления», характерную для режима Loiter.

### Варианты схемы управления в режиме стабилизации положения

В качестве альтернативы ПИД-регулятору можно использовать регулятор релейного типа, в том числе работающий в скользящем режиме (Sliding Mode Control, SMC).

Преимуществом скользящего режима управления является высокая надежность. Этот режим предполагает вынуждающее управление, при котором процесс управления проходит по динамической траектории, заданной разработчиком. Кроме того, он позволяет управлять нелинейными системами с неопределенностью, и объектами, для которых математическая модель полностью не известна, что актуально в рассматриваемом случае. Однако реализация управления в скользящем режиме при решении поставленной задачи может привести к возникновению эффекта дребезжания (chattering) – появлению быстрых колебаний вокруг скользящей поверхности из-за высокочастотного переключения сигнала управления, а это, в свою очередь, ведет к нежелательным эффектам. При больших ошибках управления и возмущениях высокие частоты переключения и значительное усилие управления (требуемое SMC) также являются недостатком.

Управление в релейном режиме в канале крена (рис. 5) предполагает использование следующего правила:

$$\text{if}(\Delta X_{\text{И}} < (\text{SetPoint} - \text{Hist}); 0; 1),$$

где  $\Delta X_{\text{И}}$  – измеренное значение параметра (скорости); SetPoint – установленное значение срабатывания реле (исполнительного устройства); Hist – гистерезис (определяет длину импульса).

Амплитуда импульса при этом фиксирована. Ее значение подбирается так, чтобы не «вызвать» сразу переход в другую фазу – включение регулятора в обратном направлении.

Измеренное значение параметра предварительно фильтруется с использованием рекуррентного алгоритма вычисления скользящего среднего [4]:

$$\Delta X_N = \Delta X_{N-1} + (\Delta X_{\text{ИЗМ}} - \Delta X_{N-1})k$$

или эмпирической формулы [5]

$$\Delta X_N = \Delta X_{N-1} - \text{sign}(\Delta X_{N-1} - \Delta X_{\text{ИЗМ}})k(|\Delta X_{N-1} - \Delta X_{\text{ИЗМ}}|)^{1/2}.$$

График мгновенного смещения по поперечной оси и вид соответствующего ему управления в релейном режиме показаны на рис. 6.

Для схемы управления, показанной на рис. 5, характерен дрейф вдоль соответствующей оси, обусловленный внешним воздействием (ветер). Графики соответствующих зависимостей представлены на рис. 7, где окружностью отмечено влияние шумов датчика на срабатывание регулятора, вызывающие высокочастотные колебания аппарата. Попытка устранить данный эффект путем расширения зоны нечувствительности (увеличением гистерезиса) приводила к ухудшению точности регулирования. Следовательно, данный вариант не позволит получить нужное качество управления, которого изначально предполагалось достичь.

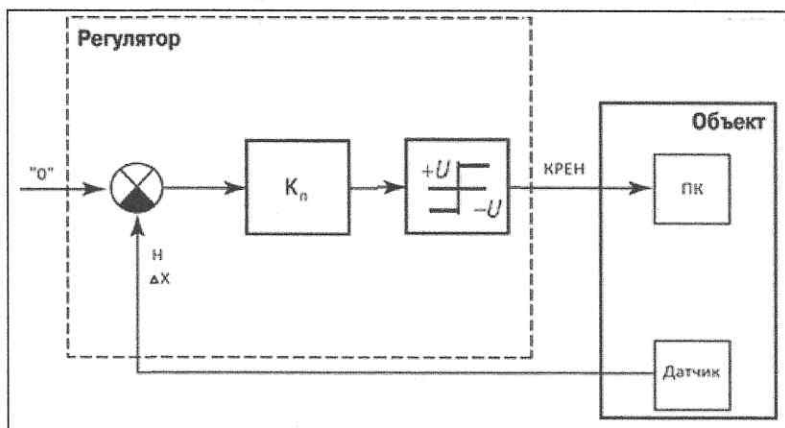


Рис. 5. Схема управления в релейном режиме в канале крена

Fig. 5. Control circuit in relay mode

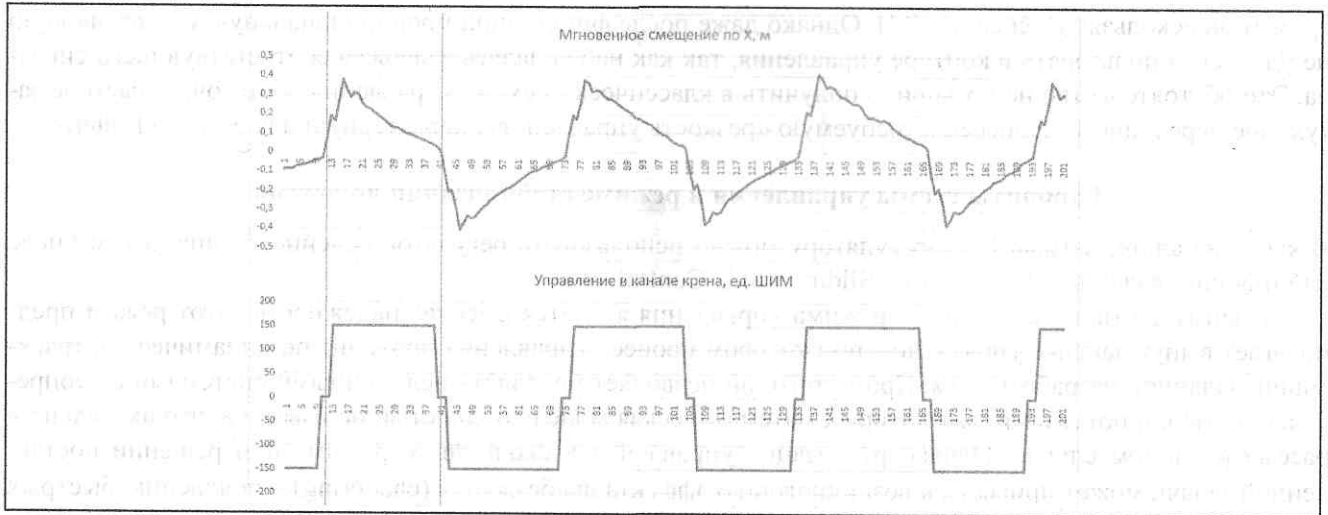


Рис. 6. График зависимости мгновенного смещения по поперечной оси от управляющего значения  
 Fig. 6. Dependence of instantaneous displacement along the transverse axis on the control value

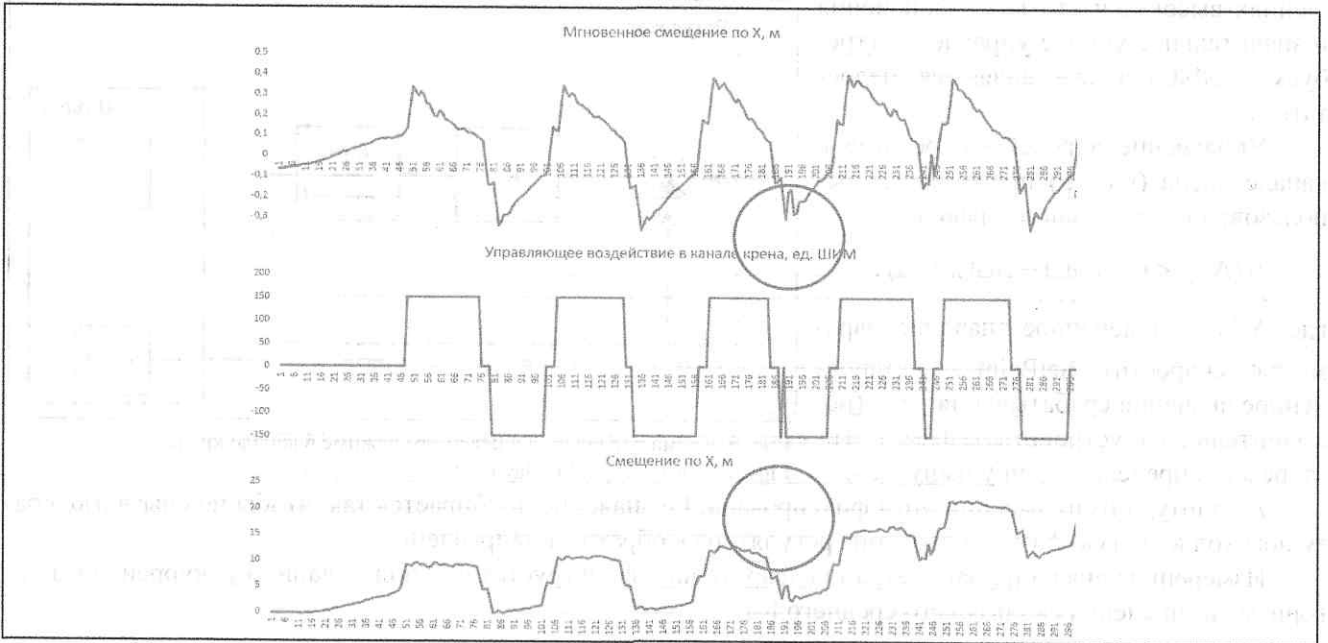


Рис. 7. Графики зависимости смещения по поперечной оси от управляющего воздействия  
 Fig. 7. Dependence of displacement along the transverse axis on the control action

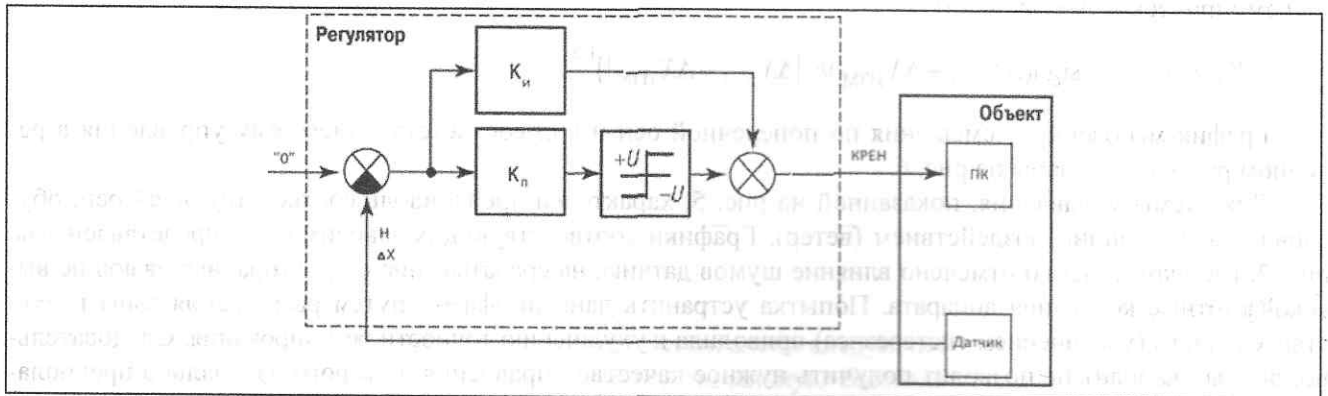


Рис. 8. Схема управления в комбинированном режиме в каналах крена и тангажа  
 Fig. 8. Control scheme in combined mode

Учитывая уже полученные результаты, введем в схему управления, представленную на рис. 5, зависимость управляющего воздействия от интегральной составляющей измерений регулируемого параметра. Полученная таким образом схема приведена на рис. 8, но и она не обеспечивает требуемого качества управления, поскольку вызывает большие отклонения от заданного значения SetPoint в переходном процессе.

### Схема управления в комбинированном режиме и результаты натурального эксперимента

Оценив характер зависимостей отклонений и мгновенного смещения от управляющего воздействия, модифицируем схему управления, как показано на рис. 9. В этой схеме предусмотрено последовательное включение релейного и ПИД-регулятора. Момент включения определяется ключевым элементом, который срабатывает при попадании измеряемой величины в заданный диапазон.

Графики зависимости смещения по поперечной оси  $Ox$  от управляющего воздействия в режиме с последовательным включением релейного и ПИД-регулятора приведены на рис. 10.

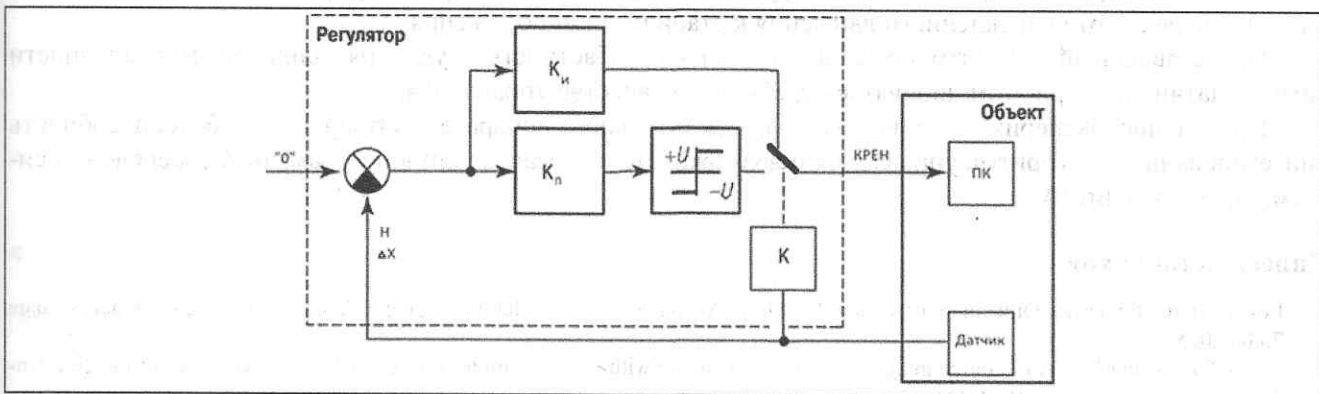


Рис. 9. Схема управления в комбинированном режиме в каналах крена и тангажа с последовательным включением релейного и ПИД-регулятора

Fig. 9. Control circuit in combined mode with series activation of relay and PID regulator

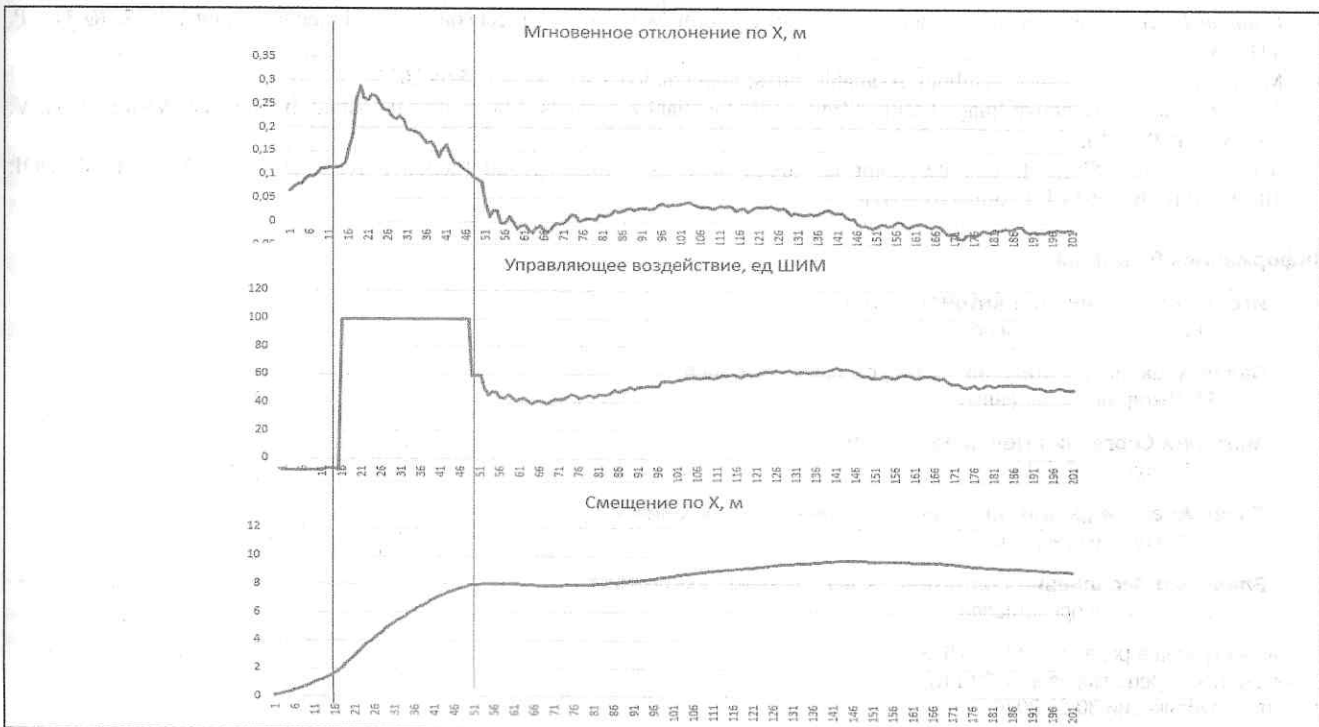


Рис. 10. Графики зависимости смещения по поперечной оси от управляющего воздействия в режиме с последовательным включением релейного и ПИД-регулятора

Fig. 10. Dependence of displacement along the transverse axis on the control action in sequential activation mode of relay and PID regulator

На рис. 10 виден четкий переход от одного типа воздействия к другому. При этом в зависимостях  $X(t_i)$  и  $S(t_i)$  не наблюдается каких-либо артефактов. Переходный процесс во времени длится менее 5 с, что отвечает требованиям к качеству управления.

Таким образом, удалось добиться компромисса при автоматической стабилизации положения квадрокоптера. В этом режиме у оператора нет необходимости длительное время ожидать отработки автоматом заданного положения. Кроме того, уменьшается вероятность выхода из поля зрения визируемого объекта, который является целевым при управлении полезной нагрузкой.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований сформирован алгоритм управления квадрокоптером, который в автоматическом режиме поддерживает заданное положение относительно земной системы координат при отсутствии ручного воздействия на органы управления и обеспечивает быстрый переход от вынужденного движения к стабилизации положения.

Представленный алгоритм позволяет сохранять робастность в условиях сильной зашумленности сигнала датчиков и при этом добиваться требуемого качества управления.

Проведение экспериментов на реальном летательном аппарате подтвердило работоспособность синтезированного алгоритма управления и возможность его реализации в программном обеспечении систем управления БПЛА.

### Список источников

1. Loiter Mode Pixhawk. Описание режимов [Online]. Available: <https://ardupilot.org/copter/docs/loiter-mode.html> access data 25.08.2025.
2. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of Imaging Understanding Workshop. 1981. P. 121–130.
3. ПИД-регулятор [Online]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> access data 27.08.2025.
4. Арбузов П.А., Мерзляков И.В., Степашкин В.Н. Оценка параметров ветрового волнения с использованием данных сверхширокополосного радиолокационного комплекса // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 2. С. 75–82.
5. Fridman L., et al. Position stabilization of a Stewart platform /www.sciencedirect.com // J. of Franclin Institute. 2012. № 349. P. 441–455.
6. MAVLink Developer Guide. [Online]. Available: <https://mavlink.io/en> access data 25.08.2025.
7. David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. V. 60. Iss. 2. P. 91–110.
8. Ashwani Kumar. SURF feature descriptor for image analysis // Imaging and Radiation Research. 2023. V. 6. Is. 2. DOI: 10.24294/irr.v6i2.5643 1. Original Research.

### Информация об авторах

**Игорь Константинович Антонов** – к.т.н.

SPIN-код: не представлен

**Павел Алексеевич Арбузов** – к.т.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: не представлен

**Анатолий Сергеевич Ненашев** – к.ф.-м.н.

SPIN-код: 5418-7719

**Павел Александрович Прохоркин** – ст. инженер-программист

SPIN-код: не представлен

**Владимир Васильевич Солдатенко** – вед. инженер-программист

SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 11.10.2025

Одобрена после рецензирования 20.11.2025

Принята к публикации 30.03.2026