

УДК 629.7.05

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.007)

## Метод совместной калибровки инерциальных датчиков беспилотного летательного аппарата с применением нейронных сетей

В.А. Смирнов<sup>1</sup>, М.Н. Правидло<sup>2</sup>, А.Б. Снедков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Акционерное общество «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел» им. И.И. Торопова», Москва, Российская Федерация

**Резюме:** В статье рассматриваются методы, а также технические средства контроля и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем, предназначенных для установки на беспилотный летательный аппарат. Рассматриваются принципы создания систем управления, построенных на инерциальных датчиках различных видов. Выявляются недостатки при использовании традиционных методов разработки основанных на прямом снятии показаний с датчиков при помощи программного обеспечения. Описываются конструкция современных инерциальных датчиков с указанием их составных элементов и частей. Определяется технология создания испытательного стенда для оценки точности калибровки датчиков. Приводятся формулы, на которых основана работа испытательного стенда, исходя из его геометрии. Указываются формулы используемые при традиционном методе вычисления значений по показаниям, получаемых с инерциальных датчиков. Описывается процесс обучения нейронной сети, позволяющий компенсировать недостатки присущие традиционному методу калибровки. Демонстрируется эксперимент по сопоставлению фактических значений со значениями, полученными в ходе расчётов. Проводится сравнительный анализ традиционного метода совместной калибровки инерциальных датчиков с методом, основанным на использовании нейронных сетей. Определяются преимущества использования данного метода калибровки инерциальных датчиков в условиях требований, предъявляемых к современным системам управления.

**Ключевые слова:** датчики, гироскоп, акселерометр, калибровка, система управления

**Для цитирования:** Смирнов В.А., Правидло М.Н., Снедков А.Б. Метод совместной калибровки инерциальных датчиков беспилотного летательного аппарата с применением нейронных сетей. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(3). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SmirnovSoavtors\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SmirnovSoavtors_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.007

## Method for joint calibration of inertial sensors of an unmanned aerial vehicle using neural networks

V.A. Smirnov<sup>1</sup>, M.N. Pravidlo<sup>2</sup>, A.B. Snedkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal state budgetary educational institution of higher education "MIREA - Russian Technological University", Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint Stock Company "State machine-building design bureau "Vympel" named after I.I. Toropova", Moscow, Russian Federation

**Abstract:** The article deals with methods and technical means of control and testing samples of information-measuring and control systems intended for installation on unmanned aerial vehicles. The

principles of creation of control systems built on inertial sensors of various types are considered. Shortcomings are revealed in the use of traditional methods of development based on direct readings from sensors with the help of software. The design of modern inertial sensors with indication of their components and parts is described. The technology of creating a test bench for evaluating the accuracy of sensor calibration is defined. Formulas on which the work of the test bench is based on its geometry are given. Specifies formulas used in the traditional method of calculating values from inertial sensors. Describes the process of learning the neural network to compensate for the disadvantages inherent in a traditional calibration method. The experiment of comparing actual values with the values obtained during the calculations is demonstrated. The traditional method of joint inertial sensor calibration is compared with the method based on neural networks. The advantages of using this method of inertial sensor calibration under the requirements of modern control systems are determined.

**Keywords:** sensors, gyroscope, accelerometer, calibration, control system

**For citation:** Smirnov V.A., Pravidlo M.N., Snedkov A.B. Method for joint calibration of inertial sensors of an unmanned aerial vehicle using neural networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: : [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SmirnovSoavtors\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SmirnovSoavtors_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.007 (In Russ).

## Введение

В настоящее время актуальным является вопрос создания технических средств отработки образцов информационно-измерительных и управляющих систем. Одной из главных проблем создания таких систем является «человеческий фактор». В зависимости от тех или иных ситуаций это приводит к появлению различного рода ошибок и недочетов, что негативно отражается на проектировании системы в целом. Ярким примером таких ошибок являются опечатки при вводе формул или недоработки при сборке калибровочных стендов в связи с попытками сократить время, затраченное на разработку проекта [1].

Другой проблемой создания современных управляющих систем является постоянная необходимость повышения точности изготовления. Повышенный класс отклонений размеров, допусков формы и расположений поверхностей приводит к снижению возможности повторяемости конструкций. Данная проблема также влечет за собой большой процент брака изготовленных образцов, и как следствие, увлечению времени изготовления проекта на подгонку и доработку изделий.

Одним из способом решения вышеизложенных проблем является применение нейронных сетей [2, 3].

Возможности нейронных сетей позволяют вывести формулу зависимости показаний датчика от измеряемой величины без участия человека. При этом нейронная сеть при выводе формулы также будет сама вычислять необходимость устранения «эффекта шума» для каждого датчика индивидуально.

Данная особенность позволяет отойти от необходимости изготовления конструкций изделий повышенной точности. Нейронная сеть также будет выявлять особенности изготовленной конструкции изделий и выводить необходимые формулы уже с учетом существующий отклонений.

Возможность нейронных сетей вычислять необходимость устранения «эффекта шума» датчиков, также используется для повышения стабильности выдаваемого сигнала в условиях воздействия вибраций, возникающих в процессе эксплуатации изделия и, одновременно, для устранения постоянных смещений, образующихся из-за люфтов в конструкции.

## Материалы и методы

Традиционно на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) устанавливаются микро электромеханические системы (МЭМС) инерциальных датчиков. Одними из таких инерциальных датчиков МЭМС являются акселерометр и гироскоп [4, 5].

На БПЛА показания указанных датчиков позволяют вычислить углы крена и тангажа, которые схематично изображены на Рисунке 1.

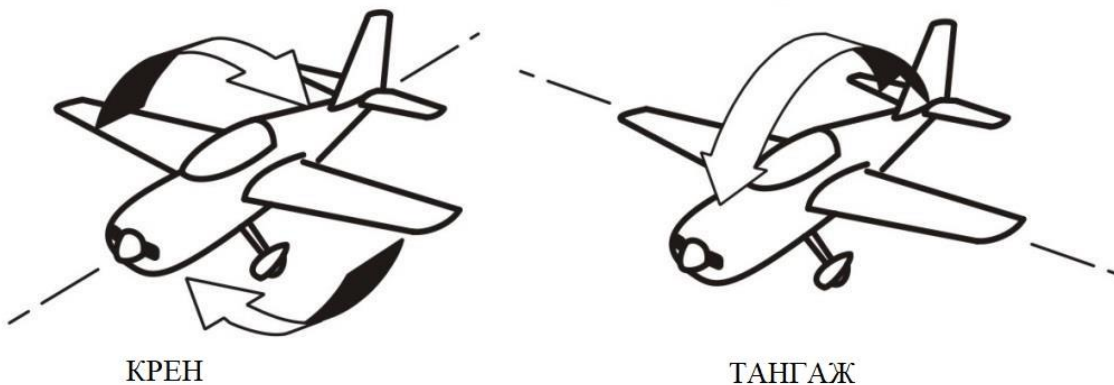


Рисунок 1 – Углы вращения летательного аппарата  
Figure 1 - Aircraft rotation angles

МЭМС гироскоп состоит из двух подвижных масс, которые находятся в непрерывном движении в противоположных направлениях. Как только произойдет изменение угловой скорости, сила Кориолиса, будет действовать в перпендикулярном направлении, и вызовет смещение масс, пропорциональное величине угловой скорости. Так как движущиеся электроды (роторы) сенсорной части датчика расположены рядом с фиксированными электродами (статоры), то любое смещение будет вызывать изменение электрической емкости конденсаторов, образованных статорами и роторами. Таким образом, осуществляется преобразование угловой скорости гироскопа в электрический параметр, величина которого детектируется специализированной схемой [6].

Гироскоп позволяет измерить скорость вращения устройства, соответственно для того, чтобы привести скорость к углу поворота мы должны её интегрировать. С этим положением связана основная проблема ориентации только при помощи гироскопа — из-за постоянного интегрирования не совсем точных измерений угловых скоростей, вызванных смещением нуля или температурными эффектами, мы получим дрейф ориентации, или, другими словами, она будет "уплывать" от истинного значения [7].

МЭМС акселерометр состоит из отдельной пробной массы, которая смещается при возникновении ускорения вдоль данной оси, после чего данные перемещения фиксируются емкостными датчиками.

С помощью измерений акселерометра можно напрямую определить его ориентацию относительно опорного вектора, которым в данном случае является гравитационное ускорение [8].

Формулы вычисления углов крена и тангажа на БПЛА с использованием трех-осевого гироскопа и трех-осевого акселерометра широко описаны в различных литературных источниках [9]. Обозначим оси относительно, которых происходит вычисление углов тангажа и крена, как «x» и «y» соответственно, а перпендикулярную им ось обозначим как «z».

Вычислим углы тангажа и крена по акселерометру по формулам:

$$\alpha_{\text{танг\_акс}} = \arctg\left(\frac{F_x}{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}\right) \quad \alpha_{\text{крен\_акс}} = \arctg\left(\frac{F_y}{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}}\right), \quad (1)$$

где  $F_x$  – показание акселерометра по оси «x»,  $F_y$  – показание акселерометра по оси «y»,  $F_z$  – показание акселерометра по оси «z»

Вычислим углы тангажа и крена по гироскопу по формулам:

$$\alpha_{\text{танг\_гиро}} = \alpha_{\text{танг\_гиро\_пред}} + G_x \quad \alpha_{\text{крен\_гиро}} = \alpha_{\text{крен\_гиро\_пред}} + G_y, \quad (2)$$

где  $G_x$  – показание гироскопа по оси «x»,  $G_y$  – показание гироскопа по оси «y», а  $\alpha_{\text{танг\_гиро\_пред}}$  и  $\alpha_{\text{крен\_гиро\_пред}}$  – значение предыдущего измерения углов тангажа и крена по гироскопу.

Используя формулы комплиментарного фильтра, углы, вычисленные по гироскопу, откорректируем по значению углов, вычисленных по акселерометру:

$$\alpha_{\text{танг\_датч}} = \alpha_{\text{танг\_гиро}} * 0.9 + \alpha_{\text{танг\_акс}} * 0.1 \quad \alpha_{\text{крен\_датч}} = \alpha_{\text{крен\_гиро}} * 0.9 + \alpha_{\text{крен\_акс}} * 0.1 \quad (3)$$

Для измерения фактических углов крена и тангажа рассмотрим возможность применения лазерных бесконтактных датчиков определения расстояния – дальномеров. Преимуществами использования дальномеров взамен механических средств измерения являются отсутствие подвижных частей, простота монтажа, а также возможность снятия показаний при помощи программного обеспечения. К недостаткам таких датчиков можно отнести незначительную зашумленность сигнала, что успешно компенсируется стандартными средствами при помощи программных фильтров [10].

Рассмотрим подробно стенд для измерения фактических углов крена и тангажа, который схематично изображен на Рисунке 2.

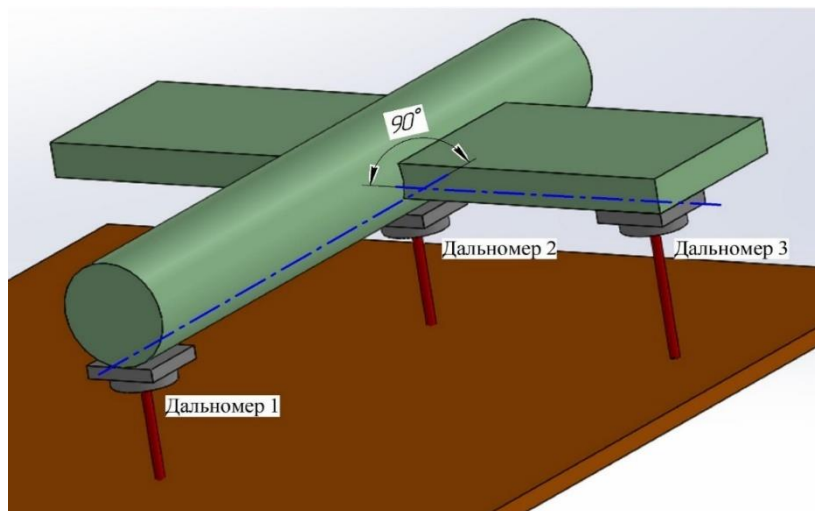


Рисунок 2 – Конструкция испытательного стенда  
 Figure 2 - Test bench design

Имеется ровная горизонтальная плоскость параллельно которой размещен БПЛА. Требуемого позиционирования БПЛА можно добиться при помощи пузырькового уровня.

На БПЛА закреплены три дальномера. Лучи дальномеров перпендикулярны плоскости, и, как следствие, перпендикулярны осям БПЛА. При этом если провести ось между Дальномером 1 и Дальномером 2, а также ось между Дальномером 2 и Дальномером 3, то угол между указанными осями составит  $90^\circ$ , а в их точке пересечения должен находиться Дальномер 2.

При наклоне БПЛА в разные стороны, показания Дальномера 1 и Дальномера 2 отвечают за вычисление угла тангажа, а показания Дальномера 2 и Дальномера 3 отвечают за вычисление угла крена.

Обозначим расстояния, измеряемые Дальномером 1, Дальномером 2, Дальномером 3 как  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  соответственно. При этом обозначим выбранное расстояние между Дальномером 1 и Дальномером 2 как  $r_1$ , а выбранное расстояние между Дальномером 2 и Дальномером 3 как  $r_2$ .

Геометрия вычисления фактических углов тангажа и крена изображена на Рисунке 3.

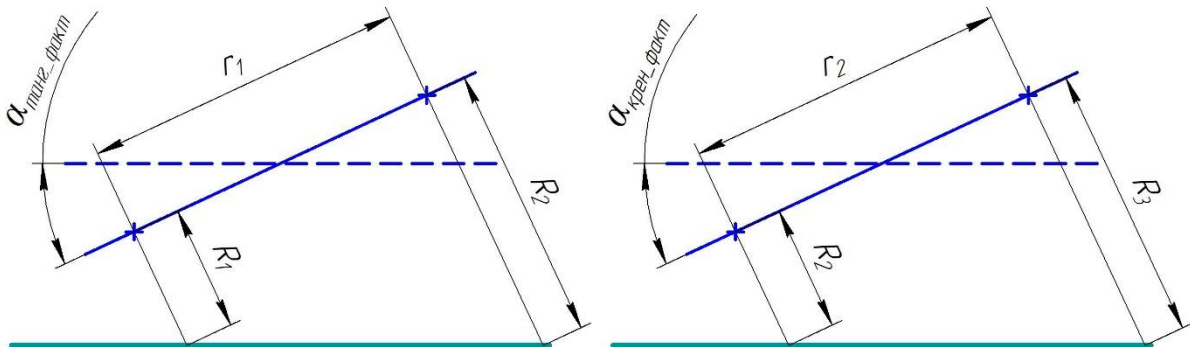


Рисунок 3 – Схема расчета геометрии испытательного стенда  
 Figure 3 - Calculation scheme of the test bench geometry

В соответствии с указанной геометрией вычислим фактические углы тангажа и крена по формулам:

$$\alpha_{\text{танг\_факт}} = \arcsin\left(\frac{R_2 - R_1}{\sqrt{(R_2 - R_1)^2 + r_1^2}}\right) \quad \alpha_{\text{крен\_факт}} = \arcsin\left(\frac{R_3 - R_2}{\sqrt{(R_3 - R_2)^2 + r_2^2}}\right) \quad (4)$$

Внутри БПЛА, размещённого на стенде, установим датчики – трехосный гироскоп и трехосный акселерометр, так чтобы оси датчиков совпали с осями, относительно которых вычисляются углы тангажа и крена БПЛА.

Наклоняя БПЛА из стороны в сторону, запишем показания дальномеров, акселерометра и гироскопа. Затем вычислим по формулам расчетные значения углов тангажа и крена.

Теперь рассмотрим метод совместной калибровки акселерометра и гироскопа с применением нейронных сетей [10]. Необходимо заново произвести замеры на спроектированном стенде, наклоняя БПЛА из стороны в сторону.

Записав показания дальномеров, акселерометра и гироскопа, обучим на них предложенную нейронную сеть. Показания трех-осевого акселерометра и трех-осевого гироскопа обозначим как входные данные, а показания дальномеров обозначим как выходные данные.

Обучив нейронную сеть, обозначим полученные углы как  $\alpha_{\text{танг\_нейр}}$  и  $\alpha_{\text{крен\_нейр}}$ . После получения положительных результатов испытаний необходимо запрограммировать обученную нейронную сеть в систему управления БПЛА.

### Результаты

Построим графики рассчитанных традиционным способом значений углов тангажа и крена, полученных с акселерометра и гироскопа. На графиках, изображенных на Рисунке 4 и Рисунке 5, показаны зависимости углов тангажа и крена БПЛА от времени измерения.

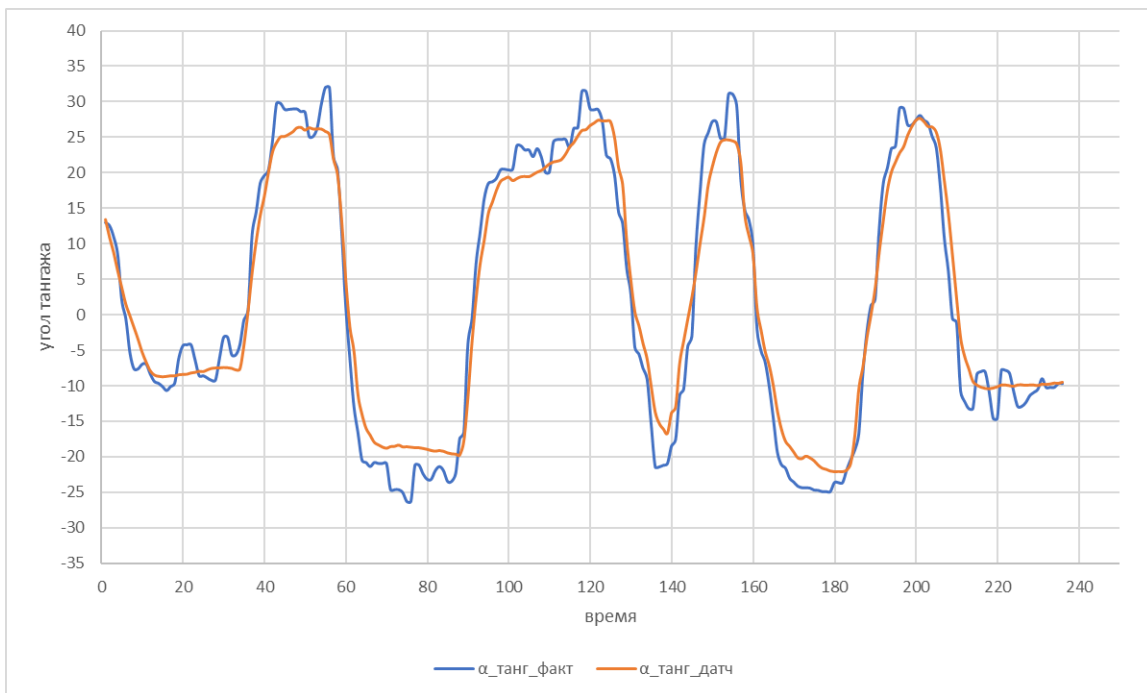


Рисунок 4 – График расчетного угла тангажа  
 Figure 4 – Plot of calculated pitch angle

На графиках, изображенных на рисунке 4 и рисунке 5, синим цветом обозначены значения  $\alpha_{\text{танг\_факт}}$ ,  $\alpha_{\text{крен\_факт}}$ , полученные по показаниям дальномеров. Неровности линий графика на горизонтальных участках обуславливаются незначительной зашумленностью сигнала с дальномеров.

Красным цветом на указанных графиках обозначены значения, рассчитанные по формулам  $\alpha_{\text{танг\_датч}}$ ,  $\alpha_{\text{крен\_датч}}$  для акселерометра и гироскопа.

Вертикальное смещение красных и синих графиков является результатом взаимной несоосности расположения на БПЛА датчиков дальмера, акселерометра и гироскопа.

Несомненно, вышеупомянутые недостатки, связанные с некорректным отображением сигнала датчиков, можно устранить при помощи поправочных коэффициентов и цифровых фильтров, однако это потребует дополнительного времени при разработке проекта. В качестве альтернативы традиционного способа, теперь для получения значений углов крена и тангажа воспользуемся нейронной сетью, обученной на показаниях акселерометра и гироскопа по значениям, полученным с дальномеров.



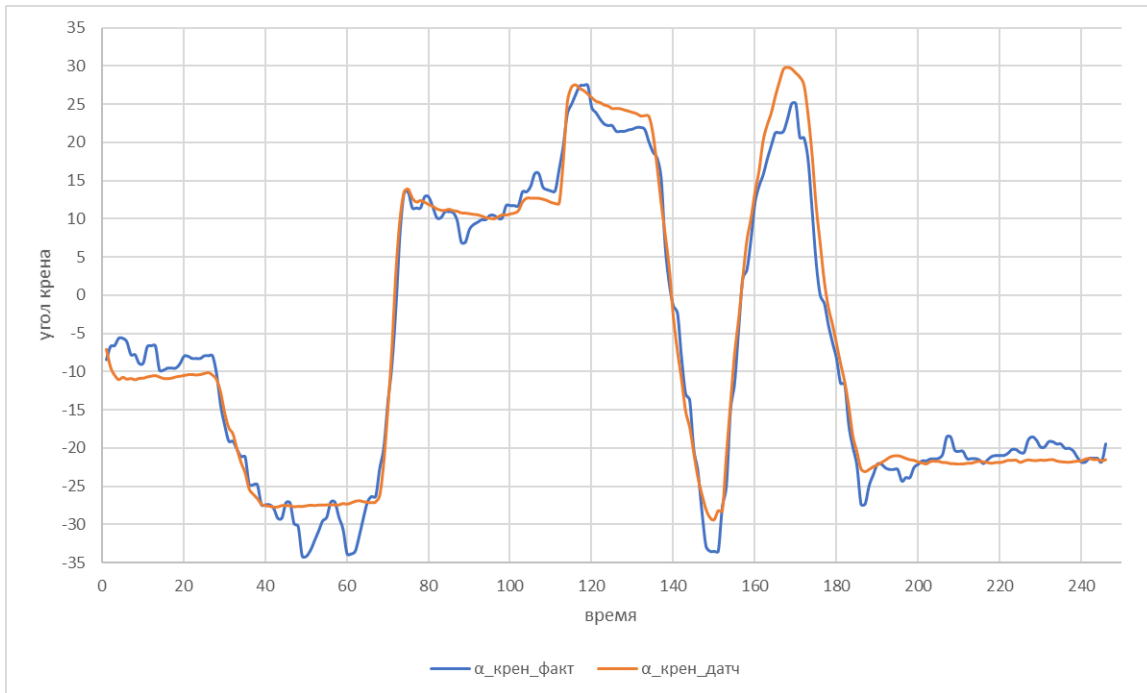


Рисунок 5 – График расчетного угла крена  
Figure 5 – Plot of calculated roll angle

Проверим на части исходных данных получившийся результат, который занесем в Таблицу 1.

Таблица 1 – Данные для обучения нейронной сети  
Table 1 - Data for neural network training

Входные данные для обучения						Выходные данные для обучения		Результат обучения	
$F_x$	$F_y$	$F_z$	$G_x$	$G_y$	$G_z$	$\alpha_{танг}$ факт	$\alpha_{крен}$ факт	$\alpha_{танг}$ нейр	$\alpha_{крен}$ нейр
11,82	-3,16	114,25	2,32	-3,24	0,43	-11,70	16,55	-9,32	13,42
22,41	0,38	97,01	-0,96	-2,50	-1,19	-18,79	15,23	-13,57	14,09
22,02	1,67	102,28	-0,51	-4,21	-0,94	-12,44	13,21	-11,58	13,06
25,71	3,35	98,78	0,56	-2,93	-1,22	-13,32	10,40	-14,18	14,33
27,86	-0,43	102,23	-1,52	-1,02	-0,34	-17,13	10,28	-18,41	13,02
28,25	-0,47	103,00	0,12	-1,41	0,11	-19,08	12,12	-18,02	13,51

Как видно из таблицы 1, полученный результат обучения достаточно точный. Теперь можно рассмотреть графики, изображенные на Рисунке 6 и Рисунке 7, построенные по значениям углов тангажа и крена полученных с дальномеров и значения углов тангажа и крена полученных по расчетам нейронной сети.

На графиках, изображенных на рисунке 6 и рисунке 7, синим цветом обозначены показания, полученные от дальномеров. Неровности линий графика на горизонтальных участках также как и в предыдущий раз говорят об «эффекте шума» самих дальномеров. Теперь рассмотрим данные, полученные от нейронной сети после ее обучения, которые представлены красным цветом. На графиках красная линия точно повторяет синюю линию, несмотря на упомянутую до этого несоосность расположения дальномеров и датчиков-МЭМС в БПЛА. При этом красная линия графика, на горизонтальных

участках, также имеет неровности, что является результатом обучения по зашумлённому сигналу дальномеров.

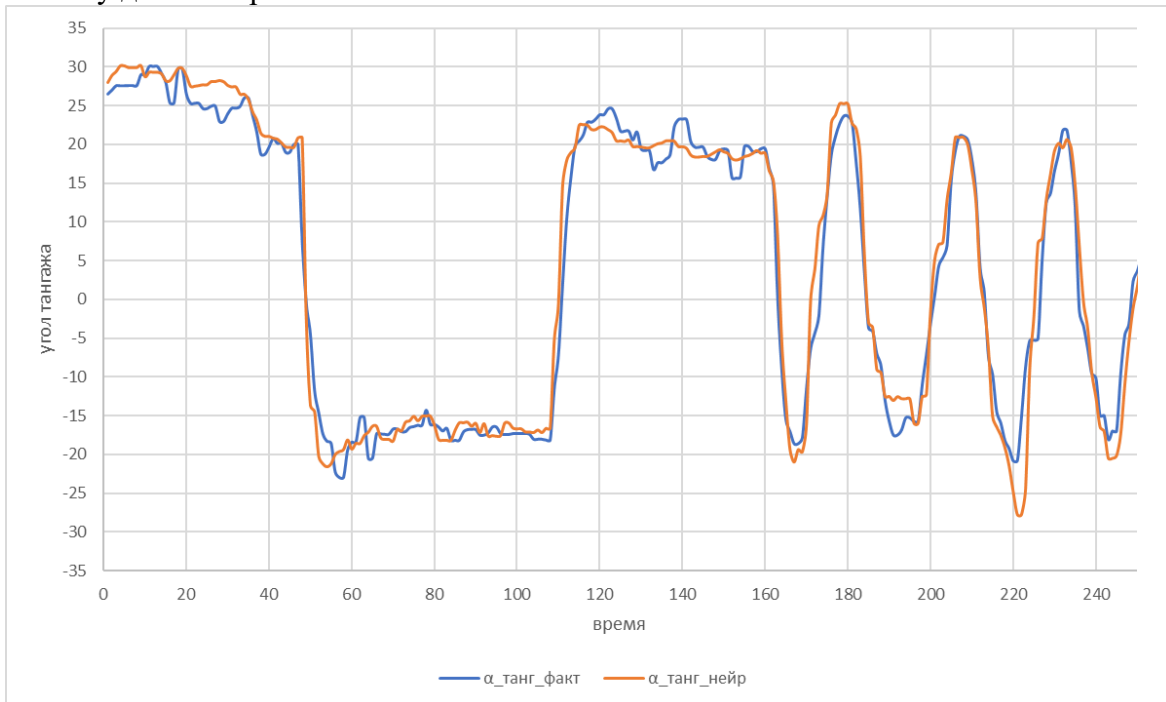


Рисунок 6 – График угла тангажа, полученного с помощью нейронной сети  
Figure 6 - Plot of the pitch angle obtained from the neural network

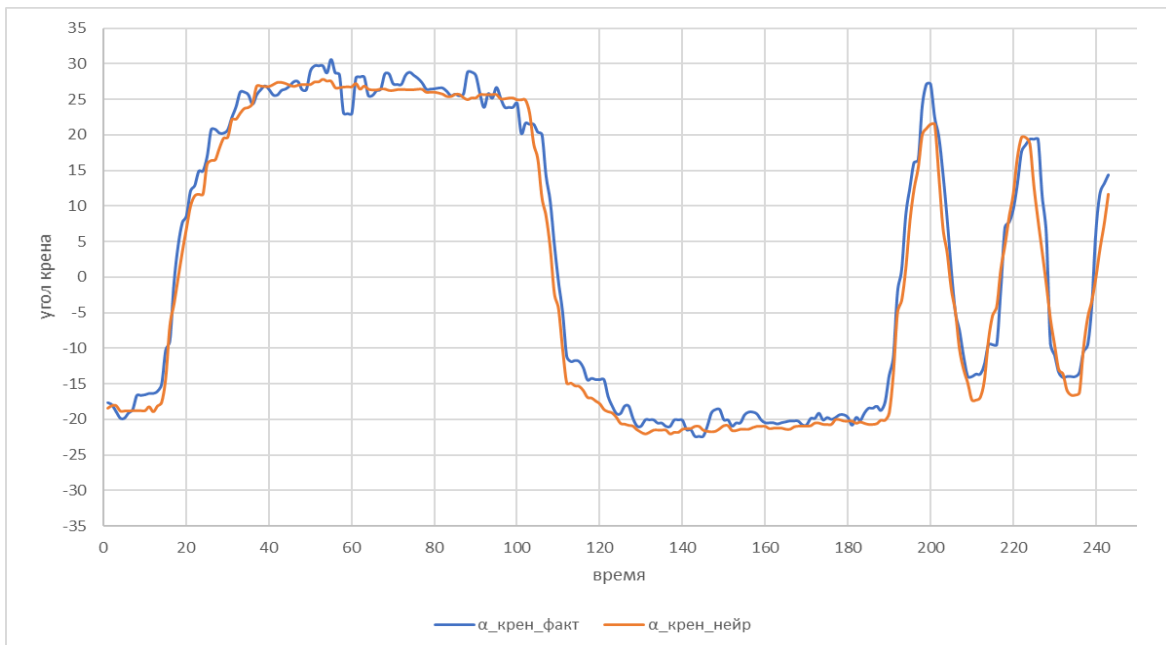


Рисунок 7 – График угла крена, полученного с помощью нейронной сети  
Figure 7 - Plot of the roll angle obtained from the neural network



### Обсуждение

Значения, вычисляемые нейронной сетью, рассчитываются, опираясь на показания акселерометра и гироскопа. Показания дальномеров нужны только для обучения нейронной сети, при этом в дальнейшем, когда нейронная сеть обучена, показания дальномеров больше не учитываются при подсчете. На основании вышеизложенного, нейронная сеть вычисляет значения углов крена и тангажа ориентируясь на формулы, выведенные с помощью собственных алгоритмов.

Также стоит обратить внимание на то, что при расчете по значениям традиционным способом величина  $\alpha_{\text{танг\_датч}}$  зависит только от значений  $F_x, F_y, F_z, G_x$ , а величина  $\alpha_{\text{крен\_датч}}$  зависит только от значений  $F_x, F_y, F_z, G_y$ . При этом каждая величин  $\alpha_{\text{танг\_нейр}}$  и  $\alpha_{\text{крен\_нейр}}$  вычисляемых нейронной сетью комплексно зависят от всех значений  $F_x, F_y, F_z, G_x, G_y, G_z$ , что позволяет самокомпенсировать внутренние ошибки и отклонения.

### Заключение

Спроектированный испытательный стенд, рассмотренный в статье, позволяет выполнять совместную калибровку инерциальных датчиков БПЛА как с применением традиционных методов, так и с помощью нейронных сетей. Для получения точных параметров при использовании формульных вычислений требуется высокое качество изготовления стенда БПЛА, а также последующая подгонка формул при помощи поправочных коэффициентов.

При этом применяя метод с использованием нейронной сети, требуется лишь правильно смоделировать технический процесс обучения, а неточности конструкции и вычисление поправочных коэффициентов нейронная сеть осуществит самостоятельно на основе внутренних алгоритмов, что позволяет снизить время и уменьшить трудозатраты при проектировании системы управления БПЛА.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белявский А.О., Томашевич С.И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации. *Управление большими системами*. 2016; 63:155-181.
2. Ющенко А.С., Лебедев К.Р., Забихафар Х. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети. *Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2017;7:262-277.
3. Андропов С.С., Гирик А.В., Будько М.Ю., Будько М.Б. Стабилизация беспилотного летательного аппарата на основе нейросетевого регулятора. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016;5:796-800.
4. Wachlin J., Ward M., Costello M. In-canopy sensors for state estimation of precision guided airdrop systems. *Aerospace Science and Technology*. USA. 2019.
5. Gomez C., Hagon J., Gregory B. Using Low-Cost UAVs for Environmental Monitoring, Mapping and Modeling: Examples from the Coastal Zone. *Coastal Management*. UK. 2019.
6. Белоглазов Д.А., Коберси И.С., Косенко Е.Ю. Анализ особенностей практического использования регуляторов систем автоматического управления квадрокоптерами. *Инженерный вестник Дона*. 2015;3.
7. Green D. Remote sensing, GIS, the geospatial technologies, and Unmanned Airborne Vehicles at Aberdeen University. *Scottish Geographical Journal*. UK. 2019.
8. Казакевич А.С. Акселерометры Analog Devices – устройство и применение. *Компоненты и технологии*. 2007;5.

9. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2017;3(89):32-51.
10. Каплун Д.И., Ежов С.Н. Особенности реализации цифровой фильтрации с изменением частоты дискретизации. *Современные проблемы науки и образования*. 2012;6.

#### REFERENCES

1. Belyavskii A.O., Tomashevich S.I. Sintez adaptivnoi sistemy upravleniya kvadrokopterom metodom passifikatsii. *Upravlenie bol'shimi sistemami*. 2016;63:155-181.
2. Yushchenko A.S., Lebedev K.R., Zabikhafar Kh. Sistema upravleniya kvadrokopterom na osnove adaptivnoi neuronnoi seti. *Nauka i obrazovanie: Nauchnoe izdanie MGTU im. N.Eh. Baumana*. 2017;7:262-277.
3. Andropov S.S., Girik A.V., Bud'ko M.Yu., Bud'ko M.B. Stabilizatsiya bespilotnogo letatel'nogo apparata na osnove neurosetevogo regul'yatora. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2016;5:796-800.
4. Wachlin J., Ward M., Costello M. In-canopy sensors for state estimation of precision guided airdrop systems. *Aerospace Science and Technology*. USA. 2019.
5. Gomez C., Hagon J., Gregory B. Using Low-Cost UAVs for Environmental Monitoring, Mapping and Modeling: Examples from the Coastal Zone. *Coastal Management*. UK. 2019.
6. Beloglazov D.A., Kobersi I.S., Kosenko E.Yu. Analiz osobennostei prakticheskogo ispol'zovaniya regul'yatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya kvadrokopterami. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015;3.
7. Green D. Remote sensing, GIS, the geospatial technologies, and Unmanned Airborne Vehicles at Aberdeen University. *Scottish Geographical Journal*. UK. 2019.
8. Kazakevich A.S. Akselerometry Analog Devices – ustroystvo i primeneniye. *Komponenty i tekhnologii*. 2007; 5.
9. Ivoilov A.Yu. O primenenii MEHMS-datchikov pri razrabotke sistemy avtomaticheskoi stabilizatsii dvukhkolesnogo robota. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. 2017;3(89):32-51.
10. Kaplun D.I., Ezhov S.N. Osobennosti realizatsii tsifrovoi fil'tratsii s izmeneniem chastoty diskretizatsii. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012;6.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Смирнов Владимир Алексеевич**, аспирант кафедры приборов и информационно-измерительных систем, ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация  
e-mail: [smirnov007@inbox.ru](mailto:smirnov007@inbox.ru)  
ORCID: [0000-0001-6322-8430](https://orcid.org/0000-0001-6322-8430)

**Vladimir A. Smirnov**, Post-Graduate Student Of The Department Of Instruments And Information-Measuring Systems, Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education "Mirea - Russian Technological University", Moscow, Russian Federation

**Правидло Михаил Натанович**, доктор технических наук, профессор кафедры авиационных робототехнических систем, директор научно-исследовательского и летно-испытательного центра, АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И. И. Торопова», Москва, Российская Федерация

**Mikhail N. Pravidlo**, Doctor Of Technical Sciences, Professor Of The Department Of Aviation Robotic Systems, Director Of The Research And Flight Test Center, Joint Stock Company "State Machine-Building Design Bureau "Vympel" Named After I.I. Toropova", Moscow, Russian Federation

**Снедков Александр Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и информационно-измерительных систем, директор института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация  
e-mail: [snedkov@mirea.ru](mailto:snedkov@mirea.ru)

**Alexander B. Snedkov**, Candidate Of Technical Sciences, Associate Professor Of The Department Of Instruments And Information-Measuring Systems, Director Of The Institute Of Integrated Security And Special Instrumentation, Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education "MIREA - Russian Technological University", Moscow, Russian Federation