

¹АО «Государственное
машиностроительное
конструкторское бюро "Вымпел"
им. И. И. Торопова»,
г. Москва

²МИРЭА — Российский
технологический университет,
г. Москва

АДАПТИВНАЯ КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА УГЛА ГИРОСКОПА

В статье предлагаются методы, а также технические средства контроля и тестирования информационно-измерительных систем. Рассмотрены методы разработки и калибровки датчика угла поворота, входящего в систему управления полетом. Определен принцип создания испытательного стенда для оценки точности калибровки датчиков угла. Описан процесс обучения нейронной сети, позволяющий компенсировать недостатки, присущие традиционному методу калибровки. Проведен сравнительный анализ традиционного метода совместной калибровки датчиков угла с методом, основанным на использовании нейронных сетей.

Ключевые слова: датчик угла, гироскоп, датчик Холла, калибровка, система управления.

Введение. Отработка различных устройств информационно-измерительных и управляющих систем является актуальной задачей при проектировании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Надежность системы управления БПЛА напрямую влияет на безопасность полета, а также на вероятность выполнения итогового полетного задания. В целях повышения надежности системы управления БПЛА зачастую прибегают к методу резервирования. Одним из видов резервирования является дублирование, то есть объединение нескольких датчиков одного типа для обеспечения выдачи единого сигнала. При этом возникает проблема повышения сложности фиксирования показаний с датчиков одного типа. Приведение показаний с различных датчиков к единому сигналу является нетривиальной задачей. Учитывая, что датчики одного типа располагаются с некоторым смещением относительно друг друга, то и показания, получаемые с этих датчиков, будут отличаться друг от друга. В традиционном способе приведение показаний к единому сигналу требует выведения различных зависимостей и формул. Однако данные зависимости будут актуальными только в том случае, если места установки датчиков будут неизменными [1]. Данное обстоятельство накладывает определенные обязательства к точности готового изделия, что в случае неблагоприятных условий приводит к увеличению времени на его изготовление. Одновременно выведение необходимых формул для комплексной работы датчиков приводит к увеличению трудозатрат необходимых на разработку системы управления БПЛА в связи с необходимостью ее дальнейшей отработки на испытаниях.

Одним из способов решения вышеуказанных проблем является применение нейронных сетей.

Данный способ позволяет избежать прямого поиска необходимых вычислений и формул. Применение нейронной сети также позволит отвязать показания датчика от его места положения, так как данная особенность будет заложена в его алгоритме формирования сигнала [2, 3]. Кроме того, комплексная работа датчиков под управлением нейронной сети позволит повысить точность сигнала за счет накопления большего количества статистических данных.

Теория. Традиционно система управления БПЛА включает в себя различные виды инерциальных устройств, которые служат для определения своего положения в пространстве. Одним из видов таких устройств является гироскопическая вертикаль, которая определяет направления плоскости горизонта, а также углы наклона БПЛА относительно этой плоскости. В качестве гироскопической вертикали может служить гироскоп с тремя степенями свободы, ось которого стремится сохранять своё направление в мировом пространстве. Положение каждой из трех осей такого гироскопа фактически не влияет на положение гироскопа в других осях, а следовательно, в целях упрощения рассмотрим конструкцию гироскопа с одной степенью свободы.

Классический гироскоп (рис. 1) состоит из быстровращающегося ротора, который закреплен на основании так, что его ось может свободно поворачиваться в любом направлении относительно центральной точки. При изменении угла наклона основания гироскопа положение оси вращения ротора в пространстве остается неизменным. Углы, образующиеся между осью ротора и основанием гироскопа, при установке гироскопа на БПЛА будут являться углами крена и тангажа самого БПЛА [4, 5]. Для определения угла поворота оси ротора от-

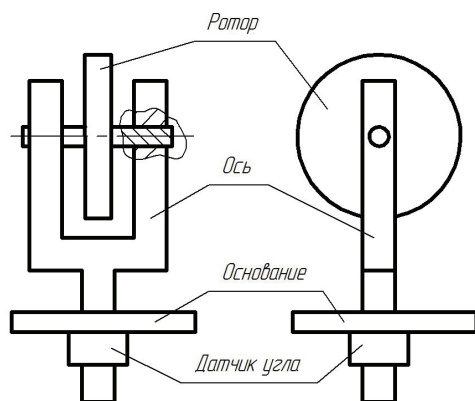


Рис. 1. Схематическое изображение гироскопа

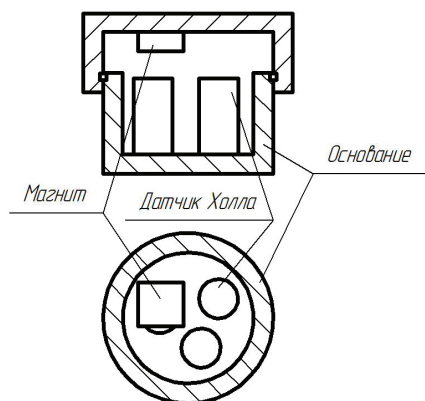


Рис. 2. Условная конструкция датчика угла

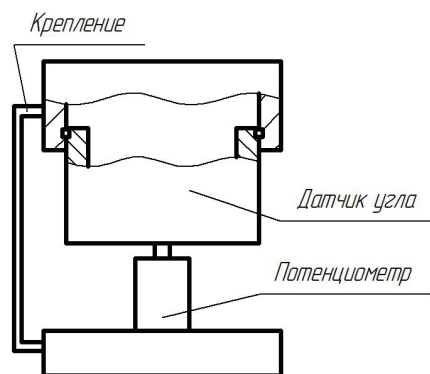


Рис. 3. Испытательный стенд

носительно основания гироскопа на сам гироскоп устанавливаются датчики угла.

Датчик угла предназначен для преобразования угла поворота вращающегося объекта в показания, позволяющие найти угол поворота его оси. Помимо установки данного датчика на гироскопическую вертикаль, датчик угла может быть установлен на те агрегаты БПЛА, где также требуется определять углы поворота или наклона. В качестве примера таких агрегатов можно привести управляющие поверхности БПЛА, такие как элероны, руль направления и руль высоты, углы поворота которых требуются системе управления для обеспечения стабильности полета. Также указанный датчик может быть установлен на прибор, определяющий аэродинамические углы — углы наклона

БПЛА относительно набегающего потока воздуха. Предлагаемая конструкция датчика угла (рис. 2) состоит из трех датчиков Холла и вращающегося вокруг них магнита. Датчик Холла представляют собой датчики магнитного поля. При вращении магнит то приближается, то отдаляется от датчиков Холла, которые фиксируют изменения магнитного поля. Следовательно, показания датчика Холла линейно зависят от его расстояния до магнита.

Преимущества данной конструкции состоят в том, что магнит не касается датчика Холла, что уменьшает влияние трения при вращении. Одновременно стабильность сигнала, выдаваемого датчиком Холла, не зависит от расстояния между магнитом и датчиком Холла, так как его можно подстраивать поправочными коэффициентами. Данная особенность снижает требования к точности конструкции датчика угла, а следовательно, уменьшает время на его изготовление в производстве [6].

Для выведения формулы расчета угла поворота при смещении магнита относительно датчика Холла необходимо упростить схему конструкции и ввести некоторые допущения [7].

Имеется ось, относительно которой вращается магнит, на расстоянии S от магнита. Неподвижно установленный датчик Холла также находится на расстоянии S от указанной оси и измеряет расстояние H от себя до магнита. Тогда формула угла поворота датчика будет иметь синусоидальную зависимость (1).

$$\alpha = 2 \arcsin\left(2 \frac{S}{H}\right). \quad (1)$$

Для калибровки показаний, выдаваемых датчиком угла, рассмотрим конструкцию стенда (рис. 3). Имеется датчик угла, закрепленный на неподвижном основании. На его поворотной оси зафиксирована ручка потенциометра, корпус которого также закреплен на неподвижном основании. Потенциометр представляет собой вращающийся контакт, образующий регулируемый делитель напряжения. Потенциометр осуществляет полное перемещение регулируемой точки за один оборот его ручки. Обозначим крайние значения, выдаваемые потенциометром как z_n и z_k . Тогда формула зависимости текущего показания z_m потенциометра от угла поворота его ручки будет иметь вид:

$$\alpha = \frac{z_m \cdot 2\pi}{z_k - z_n}. \quad (2)$$

Учитывая, что в предлагаемой конструкции датчика угла присутствуют три датчика Холла, то в процессе обработки каждый из датчиков будет выдавать сигнал в пределах своего диапазона измерений [8].

Разность диапазонов измерений датчиков Холла связана с «шумами» каждого из датчика, а также разбором их местоположения относительно магнита.

В традиционном способе для комплексной оценки итогового сигнала необходимо отдельно рассчитать угол поворота магнита относительно каждого датчика, а затем найти среднееарифметическое значение. Данный подход позволит повысить точность в измерении, однако в дальнейшем итоговый сигнал должен быть подвергнут обработке цифровыми фильтрами для его сглаживания [9].

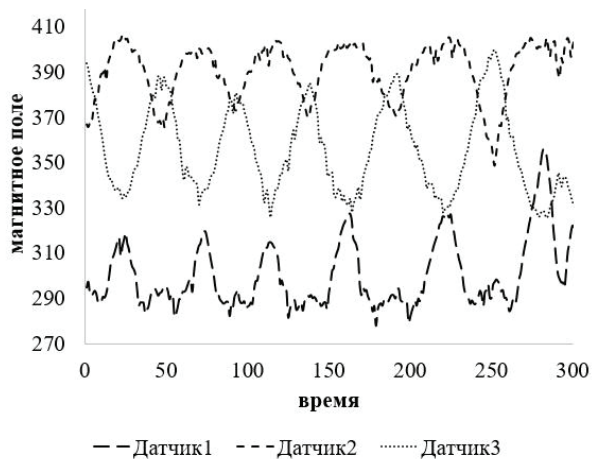


Рис. 4. График показаний датчиков Холла

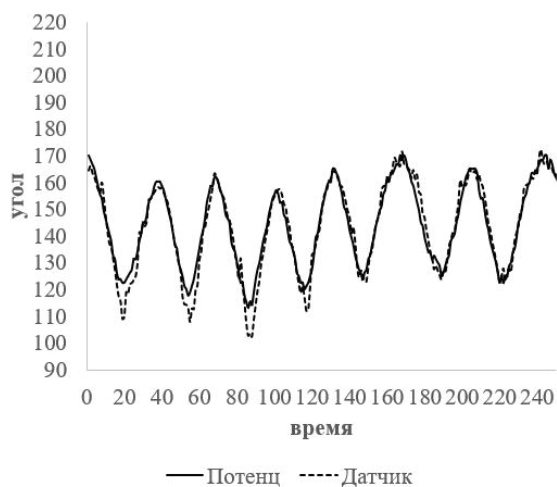


Рис. 5. График прямых показаний датчиков Холла

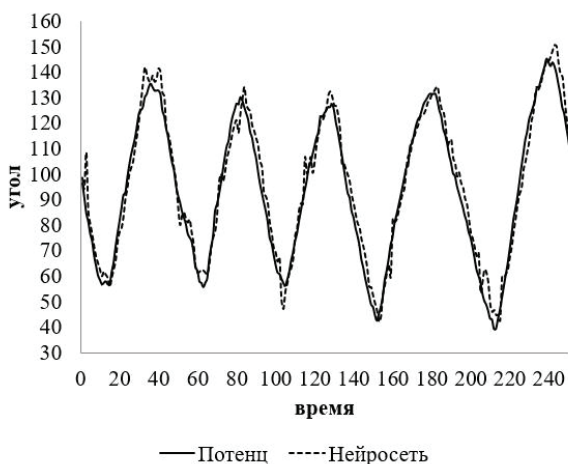


Рис. 6. График адаптивных показаний датчика Холла

При калибровке датчика угла способом с применением нейронных сетей необходимо предварительно обучить систему управления для формирования единого сигнала. Для этого требуется произвести замеры, а затем сопоставить показания одновременно с трех датчиков Холла относительно угла поворота потенциометра. Тогда нейронная сеть благодаря внутренним алгоритмам сможет самосто-

тельно определить зависимость, необходимую для правильной работы системы управления в целом [10].

Результаты экспериментов. Рассмотрим график показаний, выдаваемых тремя датчиками Холла при вращении ручки потенциометра (рис. 4).

Находясь на разном расстоянии от магнита, датчики Холла показывают различные данные. Например, датчик 1 не полностью охватывает радиус действия магнита, а следовательно, его показания на участках отдаления магнита от датчика 1 отсутствуют. При этом датчик 2 и датчик 3 противоположно ориентированы относительно магнита, поэтому их показания обратно пропорциональны друг другу.

Приведя показания каждого из датчиков Холла к углу поворота потенциометра, а затем, найдя среднее арифметическое, получим представленный график (рис. 5).

На данном графике сплошной линией обозначаются показания, получаемые с потенциометра, а пунктирной линией — показания, получаемые с датчиков Холла. Расхождение в местах перегиба графиков обусловлено тем, что показания датчиков Холла изменяются по синусоидальной зависимости. Следовательно, показания датчиков Холла должны уточняться поправочными коэффициентами. Прерывистость показаний датчиков Холла указывает на шум сигнала, который следует дополнительно обработать цифровыми фильтрами.

Теперь рассмотрим график, полученный по результатам вычисления нейронной сети (рис. 6). На данном графике пунктирной линией отражены показания, выдаваемые системой управления после обработки сигналов с трех датчиков Холла, а сплошной линией показан сигнал того же потенциометра. Адаптивная система управления спроектирована с применением нейронных сетей. Изначально сигналы с датчиков Холла и показания с потенциометра были загружены в обучающую программу системы управления. В результате, подав на вход системы управления значения датчиков Холла, на выходе получаем обработанный сигнал показывающий угол поворота.

Как видно из графика (рис. 6), ошибка перегиба, выливающаяся в расхождение показаний, исчезла. Это связано с автоматическим подбором коэффициентов, производимых нейронной сетью.

Обсуждение экспериментов. Значения, вычисляемые нейронной сетью, рассчитываются, опираясь на показания датчиков Холла. Показания потенциометра нужны только для обучения нейронной сети, при этом в дальнейшем, когда нейронная сеть обучена, показания потенциометра больше не учитываются при подсчете. На основании вышеизложенного нейронная сеть вычисляет значения углов, ориентируясь на формулы, выведенные с помощью собственных алгоритмов.

Также стоит обратить внимание на то, что при расчете по значениям традиционным способом величина угла рассчитывается как среднееарифметическое значение углов, полученных с каждого датчика Холла. При этом при расчете угла с помощью адаптивной системы управления позволяет получать значения с датчиков Холла напрямую, следовательно, индивидуальная ошибка расчетов каждого датчика не суммируется, что позволяет повысить точность вычислений.

Заключение. Испытательный стенд, спроектированный в процессе написания статьи, позволяет

выполнять калибровку датчиков угла гироскопа, устанавливаемого на 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, 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 не точности конструкции и вычисление поправочных коэффициентов нейронная сеть осуществит самостоятельно на основе внутренних алгоритмов.

Указанное преимущество позволяет снизить время и уменьшить трудозатраты при проектировании системы управления БПЛА в целом.

Библиографический список

1. Белявский А. О., Томашевич С. И. Синтез адаптивной системы управления квадрокоптером методом пассивации // Управление большими системами. 2016. № 63. С. 155–181.
2. Ющенко А. С., Лебедев К. Р., Забихафар Х. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети // Наука и образование: Науч. издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2017. № 7. С. 262–277. DOI: 10.7463/0717.0001282.
3. Андропов С. С., Гирик А. В., Бudyко М. Ю., Бudyко М. Б. Стабилизация беспилотного летательного аппарата // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. № 5. С. 796–800. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-796-800.
4. Wachlin J., Ward M., Costello M. In-canopy sensors for state estimation of precision guided airdrop systems // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 9. P. 357–367.
5. Gomez C., Hagon J., Gregory B. Chapter 21: Using Low-Cost UAVs for Environmental Monitoring, Mapping and Modeling: Examples from the Coastal Zone // Coastal Management. Publisher Elsevier, 2019. P. 465–501. DOI: 10.1016/B978-0-12-810473-6.00022-4.
6. Белоглазов Д. А., Коберси И. С., Косенко Е. Ю. Анализ особенностей практического использования регуляторов си-

стем автоматического управления квадрокоптерами // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. 18 с.

7. Стемпичкий В. Р. Исследование характеристик датчика Холла с различной геометрией активной области // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 3. С. 174–186. DOI: 10.17587/nmst.20.174-186.

8. Green D. Remote sensing, GIS, the geospatial technologies, and Unmanned Airborne Vehicles at Aberdeen University // Scottish Geographical Journal. 2019. Vol. 135 (3). P. 1–12. DOI: 10.1080/14702541.2019.1695896.

9. Каплун Д. И., Ежов С. Н. Особенности реализации цифровой фильтрации // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. 13 с.

10. Смирнов В. А., Правидло М. Н., Снедков А. Б. Метод совместной калибровки инерциальных датчиков с применением нейронных сетей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 3 (30). С. 7–8. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.007.

СМИРНОВ Владимир Алексеевич, начальник бригады, АО «Государственное машиностроительное конструкторское бюро "Вымпел" им. И. И. Торопова», г. Москва.

SPIN-код: 2697-4732

AuthorID (РИНЦ): 1053362

ORCID: 0000-0001-6322-8430

СНЕДКОВ Александр Борисович, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 601887

Адрес для переписки: smirnov007@inbox.ru

Для цитирования

Смирнов В. А., Снедков А. Б. Адаптивная калибровка датчика угла гироскопа // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 85–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-85-88.

Статья поступила в редакцию 01.04.2021 г.

© В. А. Смирнов, А. Б. Снедков