

## ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.586

### РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА УГЛОВ КРЕНА И ТАНГАЖА

© 2023 г. Я. Н. Гусеница<sup>1,\*</sup>, С. А. Покотило<sup>1</sup>, А. В. Ефремов<sup>1</sup>, А. В. Малькута<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

\*E-mail: era\_1@mil.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 05.10.2023 г.

Проанализированы существующие датчики углового положения (наклона) различных объектов и оценены их достоинства и недостатки. Разработана оригинальная конструкция датчика углов тангажа и крена, который может быть использован при проведении топогеодезических работ, а также при разведке и прокладке маршрутов движения военной техники с целью оценки проходимости в условиях сложного ландшафта для исключения опрокидывания техники. Разработана рабочая конструкторская документация для изготовления опытного образца датчика в Военном инновационном технополисе «ЭРА».

DOI: 10.56304/S2782375X23020080

#### ВВЕДЕНИЕ

Датчики углового положения, также называемые инклинометрами, используются для измерения углов наклона стационарных и подвижных объектов относительно местной вертикали. Такие измерения востребованы в самых разных областях: для мониторинга вулканической активности и параметров движения оползней; при разведке полезных ископаемых; для контроля состояния опор мостов и линий электропередачи; для контроля углового положения опор уличного освещения, дорожных знаков и светофоров. Индикация углов тангажа и крена важна при эксплуатации морских судов. Кроме того, датчики наклона встраиваются в противоугонные системы транспортных средств, крепятся к упаковке товаров при транспортировке, позволяют регулировать положение солнечных панелей и имеют много других применений.

Важными характеристиками, которые следует учитывать при выборе таких датчиков, являются диапазон углов наклона и количество осей, относительно которых выполняют измерения. По технологиям, используемым для оценки углов наклона, датчики делятся на емкостные (наполненные жидкостью, с пузырьками газа в жидкости), электролитические, MEMS-акселерометры (устройства, объединяющие в себе взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров для измерения углов) и инерционные IMU-системы (система, которая определяет свое положение в пространстве, используя свойства инерции тел, т.е. определяет, на какой угол и по

какой оси она была повернута и была смещена относительно начальной точки).

В зависимости от объекта установки датчики углов наклона можно разделить на две категории:

— статические, используемые на таких статических объектах, как антенны, системы мониторинга состояния конструкций, солнечные панели (регулировка и отслеживание положения), выравнивание шасси для промышленных станков и инструменты для точного нивелирования;

— динамические — для измерения углов наклона подвижного объекта относительно его центра масс, например устройства активной защиты от опрокидывания сельскохозяйственной техники, в том числе в случаях, когда объект подвергается быстрым перемещениям, вибрации или ударам.

Одной из возможных областей применения датчиков наклона могут быть топогеодезические работы для описания, например, профиля горных дорог и определения наиболее опасных участков на них, а также для оценки рельефа картографируемой местности, в ходе которых возникает необходимость автоматизации измерений углов крена и тангажа. Для этих целей целесообразно использовать мобильный объект, на котором смонтирован датчик углов крена и тангажа. При этом измерения и регистрация величин углов должны вестись непрерывно в ходе перемещения мобильного объекта по заданному маршруту. Такие измерения могут быть востребованы при прокладке маршрутов движения военной техники в условиях сложного рельефа местности для исключения ее опрокидывания.

Анализ технических решений и конструктивных исполнений существующих датчиков углового положения показал, что в настоящее время простых в изготовлении и эксплуатации датчиков, которые позволяли бы с достаточным уровнем точности определять и регистрировать углы крена и тангажа, на рынке недостаточно [1–3].

Цель работы — предложить конструкцию датчика углов крена и тангажа, обладающую мировой новизной, изобретательским уровнем и промышленно применимую.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В 1748 г. Л. Эйлер для описания вращения твердого тела относительно неподвижной точки  $O$  ввел углы тангажа  $\vartheta$ , крена  $\gamma$  и рыскания  $\psi$ , которые определяют положение тела в прямоугольной декартовой системе координат  $Oxyz$ , связанной с его центром масс, относительно аналогичной неподвижной системы координат  $Ox_1y_1z_1$  (рис. 1). Угол  $\vartheta$  между осями  $Oz$  и  $Oz_1$  называют углом нутации. Лежащую на пересечении плоскостей  $Oxy$  и  $Ox_1y_1$  нормаль  $K$  к плоскости  $Ozz_1$  называют линией узлов, угол  $\gamma$  между линией узлов и осью  $Ox$  — углом собственного вращения, угол  $\psi$  между осью  $Ox_1$  и линией узлов — углом прецессии. Если угол  $\vartheta$  равен 0 или  $\pi$ , то плоскости  $Oxy$  и  $Ox_1y_1$  совпадают. В этом случае положение линии узлов неопределенно, поэтому неопределимы и значения углов прецессии и нутации (можно определить лишь их сумму или разность) [4].

Положение подвижной системы координат относительно неподвижной системы координат при заданных углах Эйлера можно получить с помощью последовательных независимых поворотов тела:

- на угол  $\psi$  вокруг оси  $Oz_1$ ;
- на угол  $\vartheta$  вокруг линии узлов  $OK$ ;
- на угол  $\gamma$  вокруг оси  $Oz$ .

Практическое использование при описании движения твердого тела нашли термины: “угол тангажа”, “угол крена”, “угол рыскания”:

- угол крена  $\gamma$  — угол между поперечной осью объекта и горизонтальной плоскостью;
- угол тангажа  $\vartheta$  — угол между продольной осью объекта и горизонтальной плоскостью;
- угол рыскания  $\psi$  — угол между продольной осью объекта и вертикальной плоскостью.

Разработанный датчик углов крена и тангажа представляет собой шарообразный корпус-резервуар, наполовину заполненный оптически прозрачной жидкостью требуемой вязкости (для обеспечения демпфирования поплавка от колебаний), в котором размещены чувствительный элемент (поплавок) со светоотражающей нижней поверхностью, фотоприемная матрица, в центре

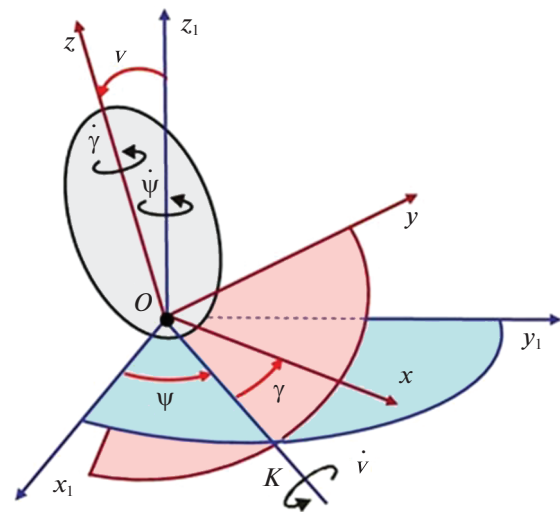


Рис. 1. Сферическое движение твердого тела. Углы Эйлера.

которой расположен источник оптического излучения, а также вычислительное устройство. Корпус-резервуар выполнен в виде полого шара, а чувствительный элемент — в виде диска, установленного в центре корпуса, при этом нижняя поверхность диска является отражающей в заданном диапазоне оптического излучения.

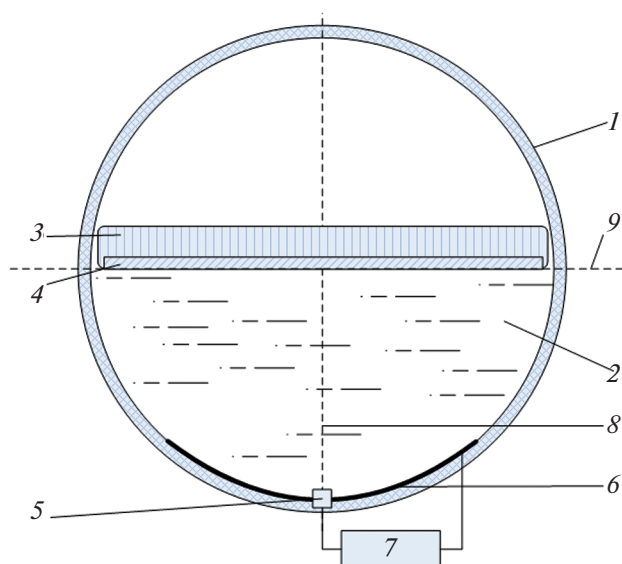
Источник и приемник оптического излучения установлены в нижней части корпуса, а определение величины углов крена и тангажа выполняется вычислительным устройством в зависимости от положения проекции отраженного поплавком оптического луча на фотоприемной матрице.

С целью повышения точности определения углов крена и тангажа в вычислительное устройство с датчиков ускорений мобильного объекта вводятся данные о его линейных ускорениях в продольном и боковом направлениях, что обеспечивает исключение погрешностей определения углов тангажа и крена при боковых и продольных ускорениях мобильного объекта.

Для привязки данных об углах крена и тангажа к координатам местности в вычислительное устройство вводятся текущие координаты мобильного объекта из навигационного модуля.

При достижении мобильным объектом критических (недопустимых) углов крена и/или тангажа (например, на крутых склонах или на сильно пресеченной местности) для предупреждения оператора (водителя) вычислительное устройство датчика выдает электрический сигнал на срабатывание звуковой сигнализации, которая прекращается при возврате углов в диапазон допустимых значений.

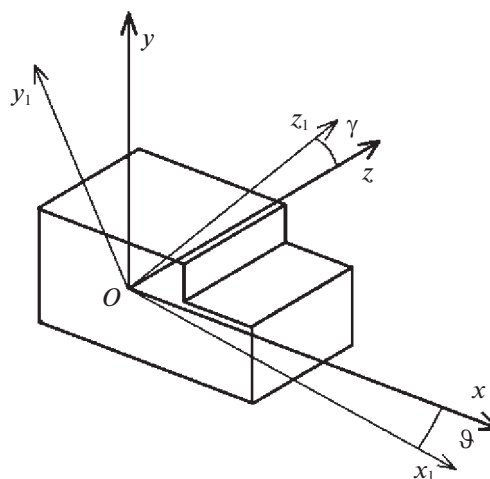
Датчик тангажа и крена представлен на рис. 2—4. Конструкция заявляемого датчика углов крена



**Рис. 2.** Схема взаимного расположения элементов конструкции устройства: 1 – корпус-резервуар, 2 – жидкость, 3 – поплавок, 4 – отражающая поверхность поплавка, 5 – источник оптического излучения, 6 – приемник оптического излучения, 7 – вычислительное устройство, 8 – местная вертикаль, 9 – горизонтальная плоскость.

и тангажа изображена на рис. 2, где использованы следующие обозначения: 1 – корпус-резервуар, 2 – жидкость, 3 – поплавок, 4 – отражающая поверхность поплавка, 5 – источник оптического излучения, 6 – приемник оптического излучения, 7 – вычислительное устройство, 8 – местная вертикаль, 9 – горизонтальная плоскость, при этом луч от источника оптического излучения 5 попадает на нижнюю часть поплавка 3 и, отражаясь от поверхности 4, попадает на приемник оптического излучения 6, который преобразует световой поток в электрический сигнал, поступающий в вычислительное устройство 7, которое и формирует данные об углах крена и тангажа относительно углов смещения луча источника излучения относительно местной вертикали.

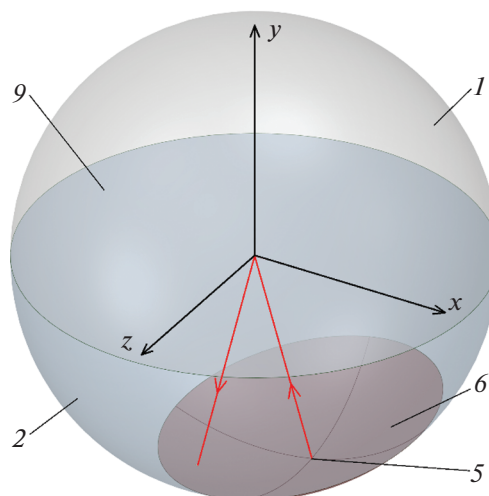
Устройство работает следующим образом. Отсчетной системой координат является нормальная (неподвижная) система координат  $XYZ$ , в которой ось  $OY$  является местной вертикалью и перпендикулярна горизонтальной плоскости (рис. 3). При этом в начальный момент времени ось  $OX$  совпадает с продольной осью мобильного объекта, а ось  $OZ$  совпадает с его поперечной осью. Мобильный объект, на котором размещен датчик углов крена и тангажа, связан с подвижной системой координат  $X_1Y_1Z_1$ . Центры подвижной и неподвижной систем координат совпадают. Объект, а следовательно, и подвижная система координат могут перемещаться относительно отсчетной горизонтальной плоскости по углам крена  $\pm\gamma$



**Рис. 3.** Системы координат мобильного объекта: (связанная) подвижная  $X_1Y_1Z_1$  и нормальная (неподвижная)  $XYZ$ .

(плоскость  $Z_1OY_1$ ) и тангажа  $\pm\theta$  (плоскость  $X_1OY_1$ ). Величины этих углов будут равны углам отклонений луча источника оптического излучения от местной вертикали.

В начальный момент оси неподвижной и подвижной, связанной с мобильным объектом, систем координат совпадают, и направление светового пучка источника оптического излучения (светодиода) 5, сфокусированного в центр корпуса-резервуара, совпадает с местной вертикалью 8, нижняя поверхность 4 поплавка 3 совпадает с плоскостью 9 горизонта, а угол между лучом источника излучения 5 (или лучом отраженного сигнала, попадающего на приемник 6) и местной



**Рис. 4.** Общий вид схемы измерения углов крена и тангажа.

вертикалью  $\theta$  будет равен нулю (соответственно, равны нулю углы крена и тангажа).

При появлении углового движения мобильного объекта подвижная система координат будет менять свое угловое положение относительно неподвижной системы, и жестко связанный с подвижной системой координат датчик углов крена и тангажа будет фиксировать углы крена и тангажа мобильного объекта относительно местной вертикали. Соответственно, будут менять свое угловое положение относительно местной вертикали все геометрические точки, расположенные внутри полости шара, в том числе точки расположения источника излучения и фотоприемной матрицы, отклоняясь от местной вертикали на один и тот же угол. В то же время поплавков датчика останется в горизонтальном положении и будет перпендикулярен местной вертикали при любых угловых перемещениях объекта.

Угловые перемещения источника излучения и фотоприемной матрицы относительно местной вертикали возможны в продольной и поперечной плоскостях (рис. 3) по углу тангажа (угол между осями  $OX$  и  $OX_1$ ) и по углу крена (угол между осями  $OZ$  и  $OZ_1$ ). Соответственно, за счет отклонения от местной вертикали зеркально отраженный поверхностью поплавка световой пучок в точке, совпадающей с центром шара корпуса-резервуара и попадающий на фотоприемную матрицу, будет нести информацию о величинах углов крена и тангажа, так как каждый элемент фотоприемной матрицы связан с величинами углов тангажа и крена (рис. 4).

Электрический сигнал с выхода приемника 6 фотоприемной матрицы поступает в вычислительное устройство 7, в котором регистрируется положение центра отраженного сигнала оптического излучения, угловые координаты которого будут соответствовать углам крена и тангажа. Изменения проекции отраженного поплавком луча на фотоприемной матрице будут соответствовать приращениям углов крена и тангажа. Фотоприемная матрица состоит из светочувствительных элементов, в горизонтальной плоскости имеет форму круга или прямоугольника. Плотность пикселей по всей площади матрицы одинаковая. Каждый пиксель матрицы соответствует строго определенным величинам углов крена и тангажа.

Выбор формы фотоприемной матрицы обуславливается диапазоном предельных углов крена/тангажа и технологичностью ее монтажа внутри шарообразной поверхности корпуса. При круглой форме матрицы предельно допустимые измеряемые углы крена и тангажа будут одинаковы, однако технологически смонтировать ее сложнее, чем при прямоугольной форме. Кроме того, прямоугольная форма матрицы при ориентации ее вдоль продольной оси мобильного объекта позво-

ляет обеспечить измерение углов тангажа, которые в 2–3 раза превышают предельно допустимые для мобильного объекта углы крена. Размер пикселя матрицы составляет 12 мкм. Уменьшение размера пикселя (менее 12 мкм), с одной стороны, снижает светочувствительность матрицы и, с другой стороны, повышает уровень шумов [5, 6]. Кроме того, уменьшение размера пикселя ведет к увеличению стоимости матрицы.

Отраженный поплавком оптический луч от источника излучения облучает сразу несколько пикселей фотоприемной матрицы. В связи с этим для увеличения точности определения углов крена и тангажа вычислительным устройством проводятся усреднение электрического сигнала по пятну рассеивания падающего луча и вычисление координат в угловых единицах центра пятна в развернутой в плоскость фотоприемной матрицы, что обеспечивает увеличение точности определения углов тангажа и крена. Кроме того, с целью повышения точности определения углов крена и тангажа в вычислитель наряду с данными по углам крена и тангажа от датчиков ускорений вводятся данные о линейных ускорениях мобильного объекта в продольной и боковом направлениях (на рисунках не показано), что обеспечивает исключение погрешностей определения углов тангажа и крена при поворотах мобильного объекта и ускорениях при его движении.

Привязка данных об углах крена и тангажа к координатам местности проводится с помощью введения в вычислитель текущих координат мобильного объекта из навигационного модуля.

С целью предупреждения оператора (водителя) о достижении мобильным объектом критических значений углов крена и тангажа (например, на крутых склонах или на сильно пресеченной местности) вычислительное устройство датчика выдает электрический сигнал на срабатывание звуковой сигнализации, которая прекращается при возврате углов в диапазон допустимых значений.

На разработанный датчик углов крена и тангажа подана заявка на изобретение [7], разработана рабочая конструкторская документация и на базе Военного инновационного технополиса «ЭРА» изготавливается его опытный образец. С учетом предполагаемого размещения датчика углов крена и тангажа на автотранспортных средствах военного назначения на гусеничном или колесном ходу датчик изготавливается с учетом требований к группе исполнения 1.4.2 ГОСТ РВ 20.39.304-98 [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная конструкция датчика углов крена и тангажа отличается от существующих аналогов новизной и оригинальностью, простой конструкции, высокой технологичностью из-

готовления, высокой точностью измерений углов крена и тангажа (не более  $0.5^\circ$ ) и широкими функциональными возможностями применения по назначению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корон В.Я., Горшков Д.Г., Леонов Н.А. и др.* Патент RU 2682589 Российская Федерация, МПК G01C 19/44 (2006.01), G01C 19/44 (2018.08). Датчик крена и тангажа: № 2018123123; заявл. 25.06.2018; опубл. 19.03.2019.
2. *Заец В.Ф., Калабухов В.С., Качанов Б.О. и др.* Патент RU 2714144 Российская Федерация, МПК G01C 23/00 (2006.01), G01C 23/00 (2019.08). Малогабаритная адаптивная курсовертикаль: № 2016150691; заявл. 22.09.2016; опубл. 12.02.2020.
3. *Alattar Zaid M., Dennes Albert E., Figueroa Ernesto E. et al.* Patent US 9581444 B2 CPC Class G01, Electronic roll pitch and yaw sensor using conductive fluid. Application Number: US-201514753540-A, Application Date: 2015-06-28, Grant Date: 2017-02-27.
4. *Самсонов В.А.* Эйлера углы // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. 2020. <https://bigenc.ru/physics/text/4940239>
5. *Медведев В.* Таблица характеристик матриц цифровых фотоаппаратов. 2017. <https://vt-tech.eu/articles/foto/277-tablitsa-kharakteristik-matrirts-tsifrovyykh-otoapparatov.html>
6. *Андреев В.* Как узнать размер пикселя матрицы? 2021. <https://vasili-photo.com/articles/pixel-size.html>
7. *Гусеница Я.Н., Ефремов А.В., Чернов В.И., Малькута А.В., Покотило С.А.* Заявка на изобретение № 2021140001/28, МПК G01C 1/00 (2006.01). Датчик углов крена и тангажа: заявл. 30.12.2021.
8. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. М.: Стандартинформ, 2015. С. 54.