Министерство образования и науки РФ

Федеральное агентство по образованию

ГОУ ВПО

Саратовский Государственный Технический Университет

Кафедра “Приборостроение”

РАМОЧНЫЙ ДАТЧИК УГЛА

Пояснительная записка к курсовой работе по курсу

“Электрические измерения”

Саратов 2007

**Реферат**

Рамочный датчик угла, индукционный датчик угла с подвижной катушкой, магнитопровод, ротор, статор, обмотка.

Объектом исследования является рамочный индукционный датчик угла.

Цель работы – расчет и проектирование рамочного индукционного датчика угла.

В процессе работы производится выбор необходимых параметров и обосновывается их выбор в процессе расчётов, которые включают в себя расчет магнитных и электрических величин.

**Содержание**

Введение

1. Теоретическая часть

1.1 Назначение и область применения

1.2 Конструкция индукционного датчика угла с подвижной катушкой

1.3 Принцип действия индукционного датчика угла с подвижной катушкой

1.4 Вывод формул для определения величины и крутизны выходного сигнала

1.5 Технические данные индукционных датчиков угла рамочного типа

1.6 Погрешности индукционного датчика угла с подвижной катушкой

1.7 Достоинства и недостатки рамочного датчика угла

2. Расчетно-конструкторская часть

2.1 Расчет параметров катушек и воздушного зазора

2.2 Расчет выходных параметров

Заключение

Список использованных источников

**Введение**

В гироскопических приборах наиболее широко применяются индукционные датчики угла и значительно реже фотоэлектрические, потенциометрические, емкостные.

Информация о физических величинах измеряемых гироприборами, содержится обычно в углах поворота одних конструктивных узлов гироприборов относительно других. Поскольку гироприборы в большинстве случаев используют в качестве датчиков систем автоматического управления, возникают задачи измерения этих углов с высокой точностью и представления полученной информации в наиболее удобной для дальнейшего использования форме.

Простейшие способы измерения углов, например с помощью круговых шкал и индексов, в современных гироприборах применяются редко. Широкое применение нашли различные типы специальных преобразователей угла поворота механических углов в электрический сигнал.

Такие преобразователи являются датчиками угла. Обычно ДУ состоят из двух частей: статора, устанавливаемого на неподвижной части, и ротора, устанавливаемого на подвижной части.

В данной работе рассматривается и производится расчет обмоток и параметров индукционного рамочного датчика угла: величины зазора между статором и ротором, эффективного числа витков обмотки возбуждения, эффективного число витков вторичной обмотки, сечение провода обмотки возбуждения, длины пакета статора.

**1. Теоретическая часть**

**1.1 Назначение и область применения**

Индукционные датчики угла рамочного типа представляют собой устройства, выходной электрический сигнал которых пропорционален угловому перемещению вторичной обмотки в магнитном поле, создаваемом обмоткой возбуждения.

В гироскопических приборах для определения угла поворота подвижной системы часто используют индукционные датчики угла с подвижной катушкой, которые часто называют рамочными датчиками (РДУ). РДУ в основном используется в двухстепенных гироскопических приборах средней и высокой точности для измерения малых углов поворота подвижной части прибора относительно неподвижной.

**1.2 Конструкция индукционного датчика угла с подвижной катушкой**

Схемы рамочных датчиков имеют различные конструктивные варианты. Конструкция датчика определяется в первую очередь назначением, во вторую – конструкцией прибора в целом.

Основными величинами, характеризующими работу датчика угла, являются:

а) потребляемые мощность и ток при номинальных значениях напряжения возбуждения и частоты сети;

б) рабочий диапазон угла поворота;

в) крутизна выходной характеристики;

г) степень линейности выходного напряжения в зависимости от угла поворота ротора;

д) симметрия выходного напряжения в зависимости от изменения знака угла;

е) остаточная э.д.с. в нулевом положении;

ж) выходное сопротивление датчика;

и) значение реактивного момента.

Индукционный датчик с подвижной катушкой представляет собой дифференциальный трансформатор с воздушным зазором, вторичная (сигнальная) обмотка которого располагается в воздушном зазоре. Существует две схемы рамочных датчиков. На рисунке 1, *а* представлена схема рамочного датчика, дифференциального по потоку, а на рисунке 1, *б* - схема датчика, дифференциального по э. д. с.

В обеих схемах (рисунок 1, *а* и *б)* катушки возбуждения *1* располагаются на полюсах магнитопровода *2* и питаются переменным напряжением. В воздушных зазорах магнитопроводов располагаются плоские сигнальные катушки 3, которые крепятся на специальных кронштейнах *4* (рисунок 1, в), жестко связанных с помощью рычага *5* с осью *6,* угол поворота которой требуется измерить.

При поворотах оси прибора сигнальная катушка (рамка) перемещается в зазоре магнитопровода перпендикулярно магнитным силовым линиям потока возбуждения.

Рисунок 1 - Индукционные датчики угла с подвижной катушкой:

*а*- дифференциальный по потоку;

*б*- дифференциальный по э. д. с.;

*в*- схема крепления рамки датчика

Элементы рамочных датчиков имеют следующее конструктивное решение: катушки — плоские, прямоугольной или круглой формы; обмотка катушек выполняется медным проводом, диаметром порядка 0,03…0,05 *мм* (для сигнальных катушек) и 0,08…0,12 *мм* (для катушек возбуждения)*.* Катушки возбуждения крепятся на специальном плоском кронштейне, который часто выполняется из пластмассы и имеет на своей поверхности углубления для размещения катушек. Катушки укрепляются на кронштейне с помощью клея или лака. В другой модификации сигнальные катушки укладываются в специальные формы и заливаются синтетической смолой. После застывания смолы получается монолитная деталь. Кронштейн с сигнальными катушками крепится к рычагу обычно винтами.

Магнитопровод датчика набирается из листов электротехнической стали или пермаллоя. Магнитопровод обычно укрепляется на корпусе прибора, рамка — на оси чувствительного элемента. Крепление магнитопровода должно предусматривать возможность регулировки его углового положения. В некоторых гироскопических приборах магнитопровод крепится на подвижном элементе прибора. Это делается для сокращения числа токоподводов к подвижному узлу прибора, так как катушки возбуждения датчика могут быть подключены параллельно со статорными обмотками гиромотора, следовательно, дополнительных токоподводов не требуется. Однако в этом случае, кроме заметного возрастания момента инерции гироузла, возможно появление дополнительных моментов тяжения вокруг выходной оси прибора, обусловленных наличием в конструкции чувствительного элемента значительных ферромагнитных масс.

**1.3 Принцип действия индукционного датчика угла с подвижной катушкой**

Рассмотрим принцип работы рамочного датчика, дифференциального по потоку [1]. На рисунке 2 представлен вид сверху на правую сторону сигнальной катушки и торец правого полюса нижней части магнитопровода датчика. Для простоты объяснения принципа работы магнитные потоки выпучивания учитывать не будем. В центральном (нулевом) положении рамки датчика часть потока возбуждения (первая), которая пронизывает площадь 1, 2, 2', 1', сцепляется со всеми витками сигнальной катушки, часть потока, которая пронизывает тело намотки, т. е. площадь 2, 3, 3', 2' (вторая), сцепляется лишь с частью витков. Часть потока, пронизывающая площадь 3, 4, 4', 3', совсем не сцепляется с витками сигнальной катушки.

Рисунок 2 - К пояснению принципа действия датчика с подвижной катушкой

В сигнальной катушке э. д. с. индуцируюттолько первая и вторая части потока. В левой половине сигнальной катушки (см. рисунок 1, *а*) поток возбужденияраспределяется аналогично. Разница состоит лишь в том, что поток в левой половине катушки имеет направление, противоположное направлению потока в правой части.

При центральном положении сигнальной катушки э. д. с, наводимые в ней левой и правой ветвями потока возбуждения, будут равны по величине и противоположны по направлению. Результирующее выходное напряжение датчика; в этом случае равно нулю.

При смещении сигнальной катушки, например, влево (см. рисунок 2), часть потока правого полюса, которая совсем не сцеплялась с витками сигнальной катушки, увеличивается, а часть потока, которая полностью сцеплялась, уменьшается. Следовательно, э. д. с, наводимая правой ветвью потока возбуждения, уменьшится. Картина перекрытия левого полюса рамкой будет обратной: та часть потока левого полюса, которая совсем не сцеплялась с витками сигнальной катушки, уменьшается, а которая сцеплялась полностью - увеличивается. Если рамка не выходит при своем смещении за пределы полюса, то потокосцепление той части потока, которая пронизывала рамку, останется неизменным. Следовательно, э. д. с, наводимая левой ветвью потока возбуждения, увеличится. В результате с сигнальной катушки будет сниматься напряжение , пропорциональное линейной величине смещения рамки

x = ρβ.

Существенным недостатком рамочного датчика дифференциального по потоку является сильное влияние на его выходной сигнал внешних переменных магнитных полей. Это влияние выражается в увеличении нулевого сигнала и в изменении крутизны характеристики датчика. Значительно меньше подвержен влиянию внешних магнитных полей рамочный датчик, дифференциальный по э. д. с. (см. рисунок 1, *б*). В этом датчике одна и та же ветвь потока возбуждения пронизывает две плоские сигнальные катушки, которые смонтированы рядом на одном кронштейне и включены последовательно, встречно.

При подаче питания на обмотку возбуждения в магнитопроводе статора возникает пульсирующий магнитный поток. Этот поток, пересекая воздушный зазор между явно выраженными полюсами, делится на две части на противоположной стороне. Пересекая воздушный зазор и размещённые в нём сигнальные катушки, пульсирующий магнитный поток индуцирует в них э. д. с.  и , имеющие в зависимости от положения ротора относительно статора различную величину и так как сигнальные обмотки включены магнитовстречно, то и разные знаки.

Рис 3 - Схема включения

Поэтому при центральном положении ротора относительно статора суммарная э. д. с. в этих катушках будет равна нулю, так как э. д. с.  и  будут одинаковы по величине, но различны по знаку. При отклонении кронштейна с сигнальными катушками от центрального положения потокосцепление одной из двух сигнальных катушек будет больше, чем другой, и суммарная э. д. с. не будет равна нулю как э. д. с.  и  не будут одинаковы по величине. А поскольку сигнальные обмотки замкнуты на нагрузку, то по электрической цепи потечёт ток, пропорциональный величине нагрузки и суммарной э. д. с. Вследствие этого с сигнальных катушек снимается результирующее напряжение .

**1.4 Вывод формул для определения величины и крутизны выходного сигнала**

Выведем формулу для определения крутизны выходного сигнала датчика, дифференциального по э. д. с. [1] Обычно в датчиках, дифференциальных по э. д. с, для получения большего числа потокосцеплений, а следовательно, и большей крутизны, ширина намотки *с* каждой из сигнальных катушек составляет больше половины ширины полюса, т. е. с>а/2. Кроме того, между сигнальными катушками имеется изоляционный промежуток шириной *t* (рисунок 4).

Выходное напряжение датчика

*U1I =E1-E2*,(1)

где и *Е2* — э. д. с, наведенные соответственно в левой и правой сигнальных катушках.

Определим величины и *Е2*, предположив, что сигнальные катушки имеют прямоугольную форму, а кронштейн с сигнальными катушками повернулся по часовой стрелке на малый угол β так, что линейное перемещение рамки слева направо составляет величину ρβ (см. рисунок 4).

Рассмотрим контур *dx,* находящийся на расстоянии *х* от торца полюса. Поток, пронизывающий этот контур, равен:

*Фх = В Sx,* (2)

где *B= ab* — индукция в зазоре; *Sx=bx*— площадь, заполненная потоком .

Рисунок 4 - К выводу аналитического выражения характеристики датчика с подвижной катушкой

Подставляя значения *В и* *Sx* в(2), получаем

****** (3)

Число витков сигнальной катушки, содержащихся в контуре *dx,* равно:

*wdx =,* (4)

где *k3* — коэффициент заполнения окна сигнальной катушки; *h* — толщина сигнальной катушки; *q* — сечение провода сигнальной катушки.

Элементарная э.д.с, наводимая в контуре *dx,* равна:

*πf* (5)

Подставляя (3) и (4) в (5), получим

*πfФxdx*

Интегрируя выражение *dE2,* получим

*2 πf(ρβ)* (6)

Аналогично определяется величина:

*πf* ** *(ρβ)* (7)

Потоки выпучивания также наводят э.д.с. в сигнальных катушках. Обозначив эти э.д.с. через *Е1в* и *Е2в,* получим:

** (8)

Точно рассчитать э.д.с. *Е1в* и *Е2в* трудно, так как сложно точно учесть распределение и интенсивность потоков выпучивания. Ввиду меньшей интенсивности потоков выпучивания по сравнению с рабочим потоком приближенно считаем:

*Е1в Е2в* (9)

Подставляя (7) и (8) в (9), а последнее,с учетом приближенного равенства (10) в (1), получаем

*-U* = *2 πf ρ(a-t)β* (10)

В (11) поток

Ф= *Θ/R0 = wI/R* (11)

где / — ток в катушке возбуждения; *Ro —* магнитное сопротивление рабочего зазора.

Подставляя (13.32) в (13.31), получаем следующие выражения для величины и крутизны выходного сигнала:

*U*=*2πfρI(a-t)β=kβ*  (12)

*k=2πfρI(a-t)* (13)

**1.5 Технические данные индукционных датчиков угла рамочного типа**

Таблица 1-Технические данные РДУ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметры | РДУ-5 | РДУ-7 |
| Напряжение возбуждения в *В* | 40 | 40 |
| Частота в *Гц* | 500 | 500 |
| Максимальный ток возбуждения в *А* | 0,09 |  0,09 |
| Остаточное напряжение в *мВ* (не более) | 4 | 6 |
| Максимальное выходное напряжение холостого хода в *В* | 30,3 | 4,60,4 |
| Крутизна выходного напряжения в *мВ/мин* | 8 | 10 |
| Вес в *кг* (не более) | 0,015 | 0,015 |

**1.6 Погрешности индукционного датчика угла с подвижной катушкой**

Всем описывающим электроэлементам присущи погрешности, которые по физическим причинам можно разделить на четыре основные группы:

а) погрешности, вытекающие из принципа работы датчика;

б) погрешности от конструктивных ограничений;

в) технологические погрешности;

г) погрешности, вызванные влиянием внешней среды. Первая группа погрешностей, вытекающих из принципа действия, свойственна счетно-решающим электроэлементам, которые предназначены для решения тех или иных функциональных зависимостей.

С этой точки зрения датчики угла являются списывающими элементами, работа которых заключается в преобразовании углового перемещения ротора в пропорциональный ему электрический сигнал. Для выше рассмотренных типов датчиков погрешности, вызывающие нарушение этой пропорциональности, которая чаще всего выражается линейным законом, не связаны с принципом работы датчиков, а являются следствием влияния причин последующих групп. Поэтому остановимся именно на последних трех группах причин, вызывающих погрешности датчиков.

Конструктивные погрешности. Наличие магнитопровода статора и ротора в датчиках угла, как и во всех электрических машинах и аппаратах, приводит к искажению идеальной кривой намагничивания. Нелинейность кривой намагничивания обусловливает нелинейный характер изменения величины выходного напряжения от угла поворота ротора. Кроме того, с нелинейностью кривой намагничивания связано появление высших временных гармоник в намагничивающем токе. Поэтому нелинейность кривой намагничивания, приводит к увеличению остаточного напряжения датчиков. Следует отметить, что все явления, связанные с искажением кривой намагничивания, в датчиках рамочного типа проявляются в значительно меньшей степени, чем в других датчиках. Это объясняется наличием в датчиках рамочного типа значительного по величине воздушного зазора, представляющего собой большое линейное магнитное сопротивление, по сравнению с которым нелинейное сопротивление стального участка магнитной цепи составляет незначительную величину.

Специфическая конфигурация магнитопровода, а также наличие воздушного зазора обусловливают наличие в датчике значительных полей рассеяния. Распределение и расчет этих полей представляет известные трудности. Асимметрия, вводимая полями рассеяния в общую картину поля датчика, вызывает появление асимметрии и нелинейности выходного напряжения датчика при повороте ротора.

Технологические погрешности. Значения допусков на отдельные детали и несовершенство технологии изготовления и сборки датчиков определяют наличие целого ряда погрешностей датчиков угла.

Необходимым условием при установке в гироскопе датчика угла является требование равномерности воздушного зазора между статором и ротором, так как неравномерный воздушный зазор приводит к искажению характеристики выходного напряжения датчика, делая ее несимметричной.

Отличие угла сдвига фазы между напряжениями выходных катушек от 180° приводит к появлению значительного остаточного напряжения, для устранения которого необходимо использовать один из выше рассмотренных методов и которое приводит к дополнительному увеличению несимметричности характеристики выходного напряжения датчиков. Большое влияние на точность датчика рамочного типа оказывает качество намотки рамки - двух встречно включенных катушек, перемещающихся в воздушном зазоре. Несимметричное выполнение этих катушек приводит к тому, что при повороте рамки изменение потокосцепления с каждой катушкой неодинаково, поэтому нелинейность и несимметричность характеристики выходного напряжения такого датчика существенно увеличиваются.

Погрешности, вызванные влиянием внешней среды. При работе датчиков угла в гироскопе на точность их работы оказывают существенное влияние температурные воздействия, а также наличие внешних электромагнитных полей.

Теплоизлучение других элементов гироскопического прибор может привести к принудительному нагреву датчика угла. В это случае решающее значение имеет правильный выбор конструкционных материалов датчика, так как различные коэффициенты линейного расширения деталей датчика могут привести к нарушению первоначально установленной величины и равномерности воздушного зазора, а следовательно, к смещению электрического нуля датчика и искажению характеристики выходного напряжения.

При изготовлении материала магнитопровода датчика из ферритов в результате нагрева происходит значительное ухудшению магнитных свойств последних, что непосредственно приводит к ухудшению параметров датчиков.

**1.7 Достоинства и недостатки рамочного датчика угла**

Достоинства индукционного датчика угла с подвижной катушкой. Значительно меньшая величина реактивного момента. Это объясняется тем, что рамка не имеет ферромагнитных масс и, следовательно, не создает электромагнитного момента; магнитоэлектрический момент рамочного датчика незначителен, так как токи в сигнальной катушке малы.

Значительно меньшая величина нулевого сигнала. Величина нулевого сигнала, обусловленного наличием высших и четных гармоник, в рамочных датчиках также ниже, так как магнитная цепь датчика даже при высоких индукциях в магнитопроводе остается линейной за счет большого воздушного зазора, составляющего величину порядка 2-3 *мм*.

Независимость выходного сигнала датчика (в сдвоенном варианте) от радиальных смещений чувствительного элемента.

Недостатком рамочного датчика является необходимость дополнительных токоподводов к подвижному узлу прибора. Следует также отметить большое потребление энергии рамочным датчиком. Это объясняется необходимостью создания в большом воздушном зазоре датчика требуемой величины индукции. Так же РДУ работает только на переменном токе и требует последующего преобразования выходного сигнала из переменного в постоянный. Выходной сигнал рамочного датчика имеет незначительную мощность, и поэтому всегда подается на промежуточный усилитель, который должен обладать большим входным сопротивлением. Это необходимо для того, чтобы свести к минимуму ток в сигнальной катушке, так как этот ток в основном обусловливает реактивный момент рамочного датчика. К недостаткам так же относится малый диапазон измеряемых углов и значительная нелинейность выходной характеристики.

**2. Расчетно-конструкторская часть**

Согласно техническому заданию, имеем следующие исходные данные для расчета кольцевого индукционного датчика угла:

Таблица 2-Техническое задание

|  |  |
| --- | --- |
| Напряжение возбуждения *U, f* | 26В, 400Гц |
| Число витков катушки возбуждения *w* | 1000 |
|  Число витков сигнальной катушки *w* | 2000 |
| Крутизна выходной характеристики *k*, В/град | 0,4 |
| Габаритные размеры, мм | 20х10 |
| Потребляемая мощность, Вт | 0,8 |
| Сечение полюса, мм2 | 4 |
| Рабочий зазор *δ*, мм | 2 |
| Толщина пакета магнитопровода, мм | 2 |
| Диаметр провода не более, мм | 0,08 |

Методика расчета изложена в [1].

**2.1 Расчет параметров катушек и воздушного зазора**

Рассчитаем параметры катушки возбуждения, выбрав диаметр намоточного провода *d* = 0,06 *мм* (по меди). С помощью чертежа определяем длину среднего витка = 23 *мм*.

Величина активного сопротивления катушки возбуждения при нормальной температуре:

*r=wr=* (14)

*ρ=17,5∙10 Ом∙м* - удельное сопротивление меди при нормальной температуре.

*r = =* 142,4 *Ом*

Определим индуктивное сопротивление катушки возбуждения, для чего в соответствии со схемой замещения [1] (рис. 13.10, *б)* рассчитаем магнитную проводимость зоны зазора *G3* и проводимость утечки *G*y.

Магнитные проводимости рассчитаем «методом определения проводимости по вероятным путям потока». Учитывая геометрию зазора и пользуясь формулами [1] (табл. 13.1), получаем

*G3 =µ G3ГЕОМ,* (16)

где *µ=4π∙10Гн/м* – магнитная проницаемость воздуха.

*G3 =* 4,52∙10*Гн*

Проводимость утечки

*G*y =4,04∙10*Гн*.

Индуктивное сопротивление катушки возбуждения:

*wL*= *2πfw(G3* + *Gy)* (17)

*wL*=2∙3,14∙400∙1000∙(4,52+4,04)∙10=215 *Ом*.

Величина тока возбуждения, при напряжении *U=*26 *В,* равна

*I ==* 112 *мА.*

Определим параметры сигнальной катушки. Для сигнальной катушки выбираем медный провод диаметром *d*=0,03 *мм.* Так как диаметр провода мал, то принимаем коэффициент заполнения окна *k*3 = 0,3.

Число витков сигнальной катушки:

*w=∙21000* (18)

Отсюда

*S= π∙=*4,71 *мм*

Найдем активное сопротивление одной сигнальной катушки. Из чертежа *l=* 9 *мм.*

Активное сопротивление сигнальной катушки:

*r= wr=* (19)

*r= =* 445 *Ом.*

Магнитное сопротивление зазора найдем по формуле:

*R=* (20)

Согласно рис. 13.10 [1 с.341] c учетом заданных габаритов

*а=3 мм, b=2мм.*

*R==*2,65∙10 *1/Гн*

**2.2 Расчет выходных параметров**

Определяем крутизну датчика, учитывая, что радиус поворота рамки

*ρ=* 41 *мм* по формуле (13):

*k=2πfρI(a-t)*,

где *q=π* - сечение провода сигнальной катушки.

*k==*20,68 *В/рад =*0,35 *В/град*

Величина выходного сигнала при максимальном угле поворота *β=*10°:

*U**=k∙β=*3,5 *В.* (21)

Мощность, потребляемая датчиком равна:

*P=Ir* (22)

*P=*0,112∙142,4*=*1,78 *Вт.*

Плотность тока в катушке возбуждения:

*J=* (23)

*J==*39,63 *А/мм.*

**И**ндукция в магнитопроводе равна:

*B=* (24)

*B==*2,24 *Вб/м*

Значения плотности тока и индукции получились вполне допустимыми (приведенный расчет должен рассматриваться как первое приближение).

Для более точного расчета параметров датчика необходимо: при расчете проводимости магнитной цепи использовать «метод расчета проводимости путем построения картины поля», который при больших рабочих зазорах дает более точные результаты, чем «метод определения проводимости по вероятным путям потока»; учесть потери энергии в стали; учесть магнитное сопротивление стали; учесть увеличение активного сопротивления катушки при ее нагреве.

**Заключение**

В ходе проделанной работы были проведены расчёты главных магнитных и электрических составляющих кольцевого рамочного датчика угла.

При заданных характеристиках были найдены: магнитная проводимость зазора *G=*8,56∙10*Гн*, магнитное сопротивление зазора *R=*2,65 ∙10 *1/Гн*, величина активного сопротивления катушки возбуждения *r=*142,4 *Ом*, индуктивное сопротивление катушки возбуждения *wL*=215 *Ом*, активное сопротивление сигнальной катушки *r=* 445 *Ом*, величина тока возбуждения

*I =* 112 *мА*, величина выходного сигнала при максимальном угле поворота

*U**=*3,5 *В*, сечение провода обмотки возбуждения *d=*0,06 *мм*, сечение провода сигнальной обмотки *d=*0,03 *мм*, **и**ндукция в магнитопроводе *B=*2,24 *Вб/м.*

Техническое задание выполнено полностью.

**Список использованных источников**

1. Никитин Е.А. Гироскопические системы, ч.III Элементы гироскопических приборов./ Е.А. Никитин, Д.С. Пельпор. –М.: Высшая школа, 1972. – С.332
2. Асс Б.А. Детали и узлы авиационных приборов и их расчёт: учеб. пособие для студентов вузов / Б.А. Асс, Н. М. Жукова. –М.: Оборонгиз, 1960.
3. Никитин Е.А. Гироскопические системы, ч.III Элементы гироскопических приборов./Е.А. Никитин, Д.С. Пельпор. –М.: Высшая школа, 1988. – С.330
4. Бабаева Н.Ф. Расчёт и проектирование элементов гироскопических устройств./ Н.Ф Бабаева.–Л.: Машиностроение, 1967. – С.480.