

УДК 629.7.058.82

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «ОДНООСНЫЙ СИЛОВОЙ ГИРОСТАБИЛИЗАТОР»

*Токарев Д.К., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»*

*Научный руководитель: Кулешов А.В., к. т. н., доцент  
кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»  
[shakhnov@iu4.bmstu.ru](mailto:shakhnov@iu4.bmstu.ru)*

Статья посвящена вопросам проектирования и изготовления лабораторной установки, предназначенной для проведения лабораторной работы по изучению принципа действия, устойчивости и точности одноосного силового гиросtabilизатора.

*Гиросtabilизатор (ГС)*- это прибор, предназначенный для поддержания неизменным углового положения какого-либо объекта стабилизации в инерциальном пространстве и управления этим положением. Вместе с разгрузочным устройством или следящим приводом ГС представляет собой систему автоматического регулирования, и при выборе его параметров используются не только принципы теоретической механики, но и методы теории автоматического регулирования.

На рис.1 изображен лабораторный стенд, основными элементами которого являются: силовой одноосный гиросtabilизатор 1 и пульт управления 2.

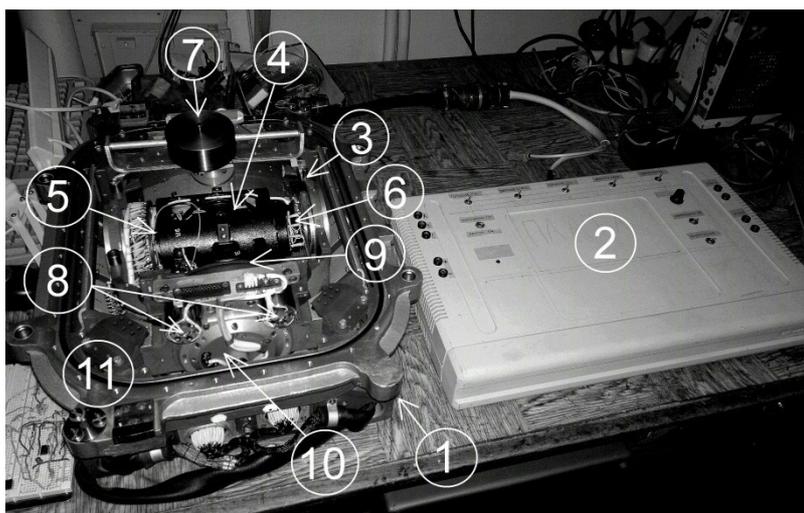


Рис. 1. 1– гиросtabilизатор, 2– пульт управления, 3– платформа, 4– двухстепенной гироскоп, 5– ДУ на оси прецессии гироскопа, 6– ДМ на оси прецессии гироскопа, 7– подвижный груз, 8– двигатели разгрузки, 9– редуктор, 10– ДУ на оси стабилизации, 11– основание (корпус)

Питание стенда осуществляется подачей на него с помощью пульта управления переменного трехфазного напряжения 40 В частотой 1000 Гц от генератора и постоянного напряжения 27 В от источника постоянного напряжения Б1-7 (на рисунке не изображены). Для регистрации рабочих сигналов элементов ГС и канала обратной связи (ОС) используется осциллограф, подключаемый к соответствующим выводам на пульте управления.

Макет гиросtabilизатора разработан на основе малогабаритной инерциальной системы (МИС). На его платформе 3, выполненной в виде рамы, установлен «сухой» двухстепенной гироскоп 4 таким образом, что ось его чувствительности параллельна оси стабилизации. На оси прецессии гироскопа установлены датчик угла 5 индукционного типа, который является источником сигнала для канала ОС, и электромагнитный датчик момента 6, необходимый для управления гиросtabilизатором. Гироскоп установлен на платформе в трехколенных шарикоподшипниковых опорах. Использование шарикоподшипников такого типа в несколько раз снижает вредные моменты трения, возникающие в опорах.

Подвижный груз 7, установленный на платформе, позволяет создавать момент относительно оси стабилизации величиной до  $2 \cdot 10^3 \text{ сН} \cdot \text{см}$ . В качестве привода разгрузки используются два асинхронных двухфазных двигателя 8 типа

ДМ-1 с редуктором 9. Поворот платформы относительно основания 11 вокруг оси стабилизации фиксируется датчиком угла 10, представляющим собой синусно-косинусный трансформатор (СКТ). Полуоси платформы установлены в корпусе гиросtabilизатора с использованием шарикоподшипников. Передача сигналов с подвижной части прибора на неподвижную осуществляется с помощью гибких проводов, собранных в жгут.

Результатом предварительных работ [1] явилась замена внутренней рамы МИС двухстепенным гироскопом, изготовление платы ОС согласно принципиальной схеме гиросtabilизатора и монтаж на ней элементов, а также изготовление усилителей мощности. На текущий момент разработан и изготовлен пульт управления гиросtabilизатором, произведен электрический монтаж гиросtabilизатора и осуществлено его подключение к пульта управления. Таким образом, в настоящее время имеется возможность запуска лабораторной установки. Проверка работы стенда показала, что система «пульт-гиросtabilизатор» работает исправно.

Разработка пульта управления (рис. 2 а,б) заключалась в выборе корпуса и компоновке на нем элементов (разъемов питания, органов управления гиросtabilизатором, индикаторов, разъемов сигнальных проводов датчиков углов и платы ОС, а также разъемов связи пульта с гиросtabilизатором).

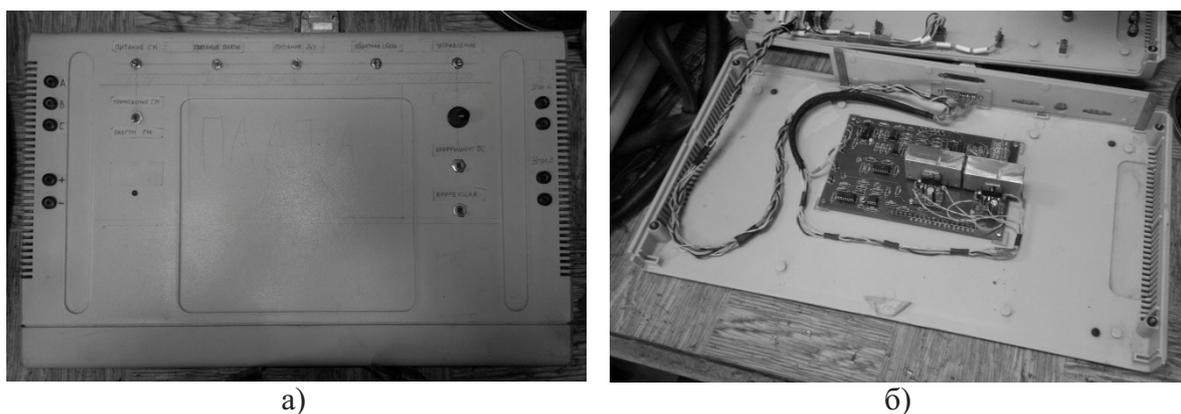


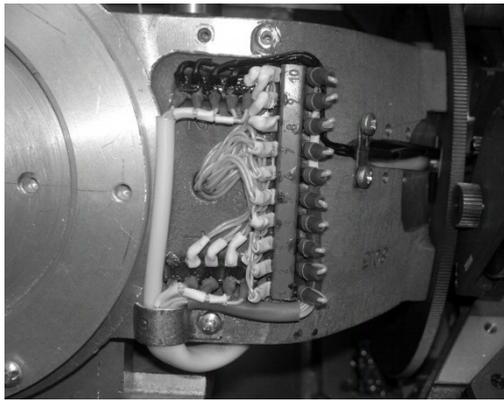
Рис. 2. Пульт управления

а) общий вид, б) нижняя часть корпуса пульта с установленной на ней платой ОС

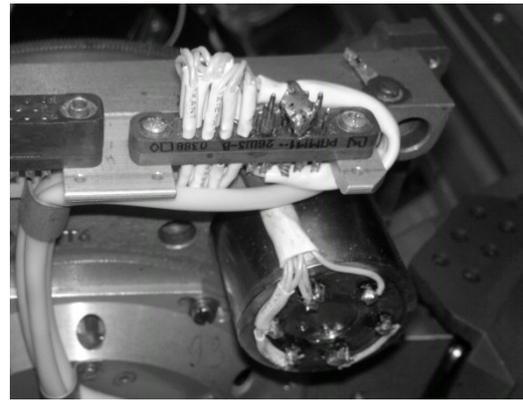
Разъемы питания и разъемы сигнальных проводов были размещены с учетом относительного расположения пульта управления, источников питания, осциллографа и гиросtabilизатора. Таким образом, на левой стороне пульта установлены разъемы питания, а на правой разъемы сигнальных проводов.

Центральная часть пульта отведена для нанесения изображения электрической схемы обратной связи ГС с возможностью измерения сигналов в ее характерных точках. По этой причине, а также для удобства использования, органы управления стабилизатором установлены вдоль границ пульта. Последовательность расположения органов управления соответствует последовательности включения элементов гиростабилизатора и проведения опытов в процессе выполнения лабораторной работы. Плата ОС установлена на нижнюю часть корпуса пульта управления таким образом, что имеется возможность ее быстрого демонтажа для ремонта и регламентных работ. Тот факт, что усилители мощности включают в себя силовые транзисторы, потребовал изготовления специальных радиаторов. Электромонтаж пульта управления производился в соответствии с электрической принципиальной схемой. Как результат, шины платы ОС и усилителей мощности были соединены с элементами, расположенными на верхней крышке корпуса пульта, и разъемами связи пульта и ГС. На данный момент пульт управления обладает следующей функциональностью: питание гиromотора с возможностью его раскрутки по и против часовой стрелки, питание платы ОС, питание обоих датчиков угла и съем информации с них и включение обратной связи.

Также был выполнен электромонтаж гиростабилизатора. На выходной разъем основания ГС были выведены: провода питания гиromотора, датчика момента 6 и датчика угла 5 (рис. 1); провода выходных сигналов обоих датчиков углов; провода, относящиеся к иным элементам двухстепенного гироскопа (например, двигателю трехколесных подшипников, управляющему им реле и т.д.); провода питания датчика угла 10; провода питания и управления двигателями разгрузки. Для удобства электромонтажа и проведения регламентных и ремонтных работ на платформе были установлены соединительные колодки (рис. 3 а,б). Также опытным путем был найден оптимальный способ закрепления гибкого токоподвода, при котором упругий момент, создаваемый его проводами, является минимальным. Стоит отметить, что реализация токоподвода в виде упругого жгута лишила платформу возможности неограниченно вращаться в опорах. Но так как условия лабораторной работы подразумевают повороты платформы на малые углы, то данное ограничение вращения допустимо.



а)



б)

Рис. 3. Соединительные колодки  
а) на наружной раме ГС, б) на основании ГС

Для согласования гиросtabilизатора с пультом управления был изготовлен соединительный кабель. Исходя из особенностей конструкции пульта, один конец кабеля был распаян на два разъема типа DB-25 и DB-9, имеющих 25 и 9 контактов соответственно. Другой его конец является ответной частью к разъему выходного кабеля гиросtabilизатора.

В настоящее время основной является задача построения амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) гиросtabilизатора. В лабораторной работе по изучению одноосного силового ГС предполагается демонстрация различных режимов его функционирования: устойчивая работа ГС, потеря устойчивости и введение корректирующего звена. Знание частотных характеристик позволит правильно подобрать коэффициент усиления ОС гиросtabilизатора, параметры элементов корректирующего звена, а также прогнозировать поведение ГС при внесении поправок в схему. Для построения ЧХ необходимо знать следующие параметры прибора: величину кинетического момента  $H$  гироскопа, момент инерции  $J_0$  наружной рамы с установленной на ней платформой, гироскопом и грузом относительно оси стабилизации, момент инерции  $A_0$  двухстепенного гироскопа с внутренней рамкой вокруг оси рамки и коэффициент усиления  $K_{ос}$  обратной связи. По причине отсутствия технических и массо-габаритных характеристик элементов гиросtabilизатора вышеперечисленные параметры необходимо определить опытным путем. В [1] были приведены следующие значения кинетического момента  $H$  и угла прокачки  $\beta$  гироскопа:  $H = 2,5 * 10^4 \text{ сН} * \text{см} * \text{с}$ ,  $\beta = 10^0$ . Стоит отметить, что данные параметры были несколько уточнены в ходе проведения экспериментов.

Наиболее простой метод определения кинетического момента гироскопа заключается в измерении его угловой скорости прецессии при приложении к наружной раме внешнего момента, т.к. при выключенном контуре ОС одноосный силовой гиростабилизатор представляет собой обычный трехстепенной гироскоп в кардановом подвесе. Возможность поворота гироскопа по внутренней оси ограничена углом прокачки  $\beta$ , величина которого была определена геометрически и составляет согласно расчетам  $11^0$ . Данный угол является достаточно малым, поэтому можно считать, что в его пределах эффективная составляющая кинетического момента гироскопа  $H\cos\beta$  неизменна и равна  $H$ , и, как следствие, что скорость прецессии гироскопа под действием внешнего момента является постоянной. Тогда при известной массе груза  $M$ , помещаемого на один из краев рамки, расстояния  $l$  от ЦМ этого груза до оси стабилизации и времени  $t$ , за которое прецессирующий гироскоп повернется на угол прокачки  $\beta$  и достигнет упора, кинетический момент гироскопа можно будет определить из соотношения (1):

$$H = \frac{Mgl}{\beta/t}; \quad (1)$$

В результате эксперимента было получено следующее значение кинетического момента:  $H = 3 * 10^4 \text{ cH} * \text{см} * \text{с}$ . Проверить полученное значение можно с помощью соотношения (2) при наличии определенной опытным путем величины нутационной частоты  $n_0$  и моментов инерции  $J_0$  и  $A_0$ :

$$n_0 = \frac{H\cos\beta'}{\sqrt{J_0A_0}}; \quad (2)$$

Где  $\beta'$  - угол поворота гироскопа по оси внутренней рамки.

Следующим шагом на пути к построению ЧХ является определение моментов инерции  $J_0$  и  $A_0$ . Так как внутренняя рама и гироскоп защищены кожухом, то это значительно затрудняет доступ к ним и не позволяет напрямую измерить их общий момент инерции  $A_0$  относительно внутренней оси. Момент же инерции  $J_0$ , наоборот, измерить проще, так как имеется возможность установки на основание ГС вспомогательных конструкций. Идея измерения момента инерции  $J_0$  заключается в создании упругой связи между наружной рамой гиростабилизатора и его основанием. На основе полученной колебательной системы возможно реализовать два метода определения  $J_0$ . В первом методе с помощью программного продукта SolidWorks создается модель используемой пружины (т.к. она имеет сложную

конфигурацию) и там же определяется ее жесткость  $C_{np}$ . Затем с помощью генератора напряжения переменного тока на двигатели разгрузки через канал ОС подается гармонический сигнал. В результате под действием момента двигателей наружная рама начинает вынужденно колебаться. Изменением частоты напряжения генератора определяется резонансная частота, которая совпадает с частотой  $f_c$  собственных колебаний системы. При известных значениях  $f_c$  и  $C_{np}$ , момент инерции  $J_0$  можно выразить из соотношения (3):

$$2\pi f_c = \sqrt{\frac{C_{np}}{J_0}} ; \quad (3)$$

Второй метод позволяет избежать вычисления жесткости пружины, а, значит, и ошибок, связанных с неточностями построения ее модели. В этом случае производится измерение резонансных частот двух систем с различными моментами инерции. Разница в моментах инерции обеспечивается перемещением груза 7 (рис. 1). Если до смещения груза система имела момент инерции  $J_0$  и частоту собственных колебаний  $f_{c1}$ , а после смещения груза момент инерции  $J_0 + \Delta J$  (где  $\Delta J$  равен произведению массы груза  $m$  на квадрат его смещения  $l^2$ , т.е.  $\Delta J = ml^2$ ) и частоту собственных колебаний  $f_{c2}$ , то, записывая выражение (3) для обеих систем и выражая из него жесткость пружины  $C_{np}$ , приходим к выражению (4), откуда можно найти искомую величину  $J_0$ :

$$\frac{J_0 + \Delta J}{J_0} = \frac{f_{c1}^2}{f_{c2}^2} ; \quad (4)$$

Использование обоих методов позволяет осуществить проверку полученных результатов.

Момент инерции  $A_0$  можно определить, зная кинетический момент  $H$  гироскопа и величину нутационного броска  $\alpha_{н.б.}$  в результате приложения некоторого момента  $M_{вн}$  к наружной раме гиросtabilизатора, из соотношения (5):

$$\alpha_{н.б.} = \frac{M_{вн} * A_0}{H^2 * \cos \beta_0} ; \quad (5)$$

Где  $\beta_0$ - угол отклонения оси собственного вращения гироскопа от оси, перпендикулярной плоскости наружной рамы.

Далее следует определение величины коэффициента усиления  $K_{ос}$  обратной связи гиросtabilизатора. На данный момент намечено два пути его определения. В первом случае задается некоторое смещение груза 7 (рис. 1), что приводит к

возникновению внешнего момента  $M^{\text{внеш}}$ , действующего на платформу и равного произведению веса груза  $P$  на величину его смещения  $L$ . Под действием этого момента гироскоп начинает прецессировать вокруг оси внутренней рамы. Сигнал, пропорциональный углу поворота  $\beta$  гироскопа, через канал ОС подается на привод разгрузки, который при определенном значении этого угла уравнивает момент, создаваемый грузом  $G$ , в результате чего прецессия гироскопа прекращается. Зная конечный угол поворота  $\beta'$  гироскопа вокруг внутренней оси и момент  $M^p$ , развиваемый приводом разгрузки при данном значении угла  $\beta'$ , можно определить значение  $K_{oc}$  из соотношения (6):

$$K_{oc} = \frac{M^p}{\beta'} = \frac{M^{\text{внеш}}}{\beta'} = \frac{P * L}{\beta'} ; \quad (6)$$

Второй метод основывается на определении частот характерных точек амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) гиростабилизатора (рис. 4).

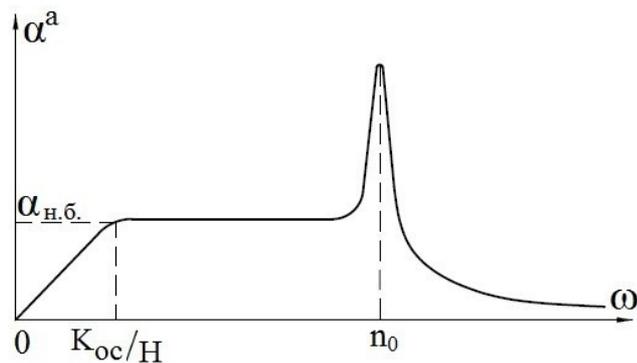


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика гиростабилизатора

Здесь  $\omega$  – круговая частота внешнего гармонически изменяющегося момента,  $\alpha^a$  – динамическая ошибка гиростабилизатора по углу поворота платформы вокруг оси стабилизации,  $\alpha_{\text{н.б.}}$  – значение угла нутационного броска гироскопа,  $K_{oc}/H$  – частота выхода АЧХ на горизонтальный участок,  $n_0$  – нутационная частота гиростабилизатора.

Формирование внешнего возмущения осуществляется подачей гармонического сигнала в канал ОС (аналогично первому методу определения момента инерции  $J_0$ ). Информация об угле поворота рамки вокруг оси стабилизации снимается с ДУ 10 (рис. 1) с помощью осциллографа. Путем изменения частоты сигнала, подаваемого в канал ОС, определяется частота  $\omega'$  начала горизонтального участка АЧХ. Из теоретических расчетов следует, что данная частота равна

отношению  $K_{oc}/H$ . Тогда, зная  $\omega'$  и кинетический момент гироскопа  $H$ , можно найти значение  $K_{oc}$  из равенства (7):

$$\omega' = K_{oc}/H ; \quad (7)$$

Построенная на основании результатов вышеописанных опытов частотная характеристика будет являться базисом для проведения дальнейших работ с данной лабораторной установкой.

#### Список литературы

1. Изотов А.Е. «Макет одноосного силового гиросtabilизатора». Студенческий научный вестник. Сборник статей докладов участников общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая весна – 2012». М.: Издательство МГТУ, 2012.
2. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем, ч. 2. М.: Высшая школа, 1977.