

Силовые эксперименты с 'летающим' гироскопом

В.Т. Шкатов

Аннотация—Исследовалось поведение механического гироскопа в режиме управляемой прецессии. Установка включала в себя электропривод собственно гироскопа, а также реверсивный электропривод регулируемой прецессии. Оба привода выполнялись на основе микродвигателей постоянного тока. Дополнительно к этому в состав установки входила кольцевая направляющая дорожка (рампа), с которой стартовало устройство. С дорожкой сопрягалось одноколёсное шасси, установленное на подвижном плече гироскопа. Наблюдались и оценивались силовые эффекты в режиме “лечения гироскопа на привязи”. Кроме ожидаемых по теории силовых (моментных) проявлений изучались более тонкие реакции гироскопической системы на характеристики подстилающего рельефа. Оказалось, что подвижная система практически не чувствует лёгкие элементы этого рельефа (поперечные полоски бумаги, наклеенные вдоль рампы), но заметно реагирует на более существенные компоненты подстилки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, гироскоп – это устройство, способное реагировать на изменение ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчёта. Изобретён в 1817 г. Иоганном Бенебергером [1], в дальнейшем усовершенствован Уолтером Р.Джонсоном (1832) [2], [3] и Л.Фуко (1852) [4]. Гироскопы классифицируются по числу степеней свободы: двухстепенные и трёхстепенные, а также по принципу действия: механические (роторные, вибрационные) и оптические (волоконно-оптические, интегрально-оптические) на эффекте Саньяка [5]. Широко используются в системах управления и контроля летательных аппаратов с инерциальной системой навигации.

Полная схема гироскопа включает в себя три ортогональных оси: ось вращения ротора, ось прецессии, ось приложения внешних сил, рис.1. Основная рабочая формула: $\vec{M} = \vec{\Omega}_p \times \vec{L}$, где \vec{M} – вектор момента внешних сил, приложенного к оси вращения ротора гироскопа; $\vec{\Omega}_p$ – вектор угловой скорости прецессии гироскопа; \vec{L} – вектор момента импульса гироскопа.

Прецессия – явление, при котором момент импульса тела меняет своё направление в пространстве под действием момента внешней силы.

В обычном, показывающем, режиме, а также в случаях использования гироскопов в контуре автоматиче-

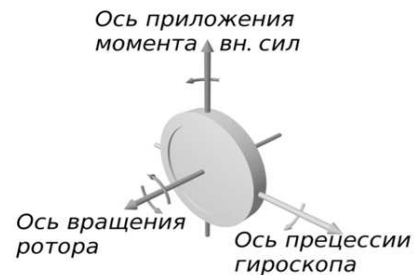


Рис. 1. Схема осей гироскопа.

ского управления контролируемым объектом, стараются максимально снизить внешние нагрузки по оси М, при этом снижаются и параметры свободной прецессии. Однако представляет интерес и работа гироскопа в режиме не свободной прецессии, когда выходной величиной является ненулевой момент относительно силовой оси.

Постановка задачи. Исследовать поведение гироскопа в силовом режиме, с активной управляемой прецессией. Оценить возможность появления не скомпенсированной вертикальной силы “тяги” при работе гироскопа на шарнирном подвесе с горизонтальной осью, не проходящей через центр тяжести ротора.

II. СХЕМА УСТАНОВКИ

На рис.2 показана одна из схем экспериментальной установки, рассчитанной на демонстрацию “полёта” гироскопа и индикацию результирующей вертикальной силы.

Установка содержит два электропривода постоянного тока с двигателями ДПМ-25, соответственно, для раскрутки гироскопа и реверсивного управления прецессией. Привод прецессии включает в себя понижающий редуктор 1/10, щёточную контактную систему для подвода электропитания и рычажную систему с одноосным шарниром. Блок прецессии в целом подвешен на пружинах и может скользить вдоль вертикального штока. В состав подвески входит штывевой прицел, наблюдаемый в теодолит, а также опорный рычаг для начальной установки главной оси гироскопа.

В качестве собственно гироскопа использован внешний ротор привода жёсткого диска персонального компьютера ПК, представляющий собой кольцо из магнитного материала на алюминиевом диске с осью. Сами

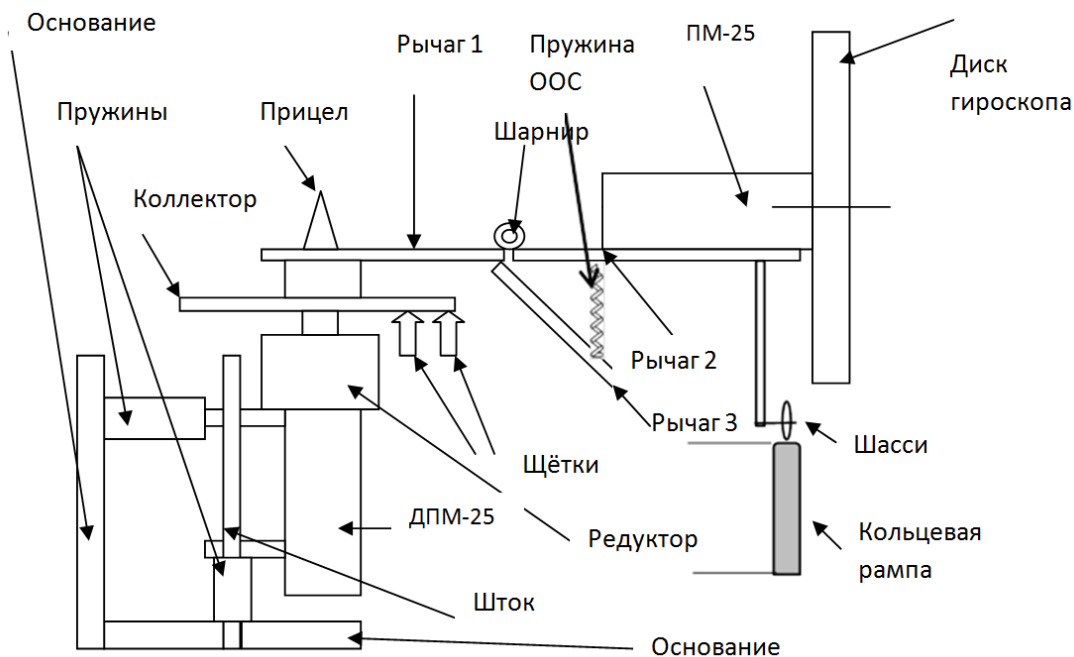


Рис. 2. Схема установки №1.

по себе магнитные особенности ротора в отношении данной конфигурации интереса не представляют, однако они пригодились для грамотной оценки скорости вращения ротора в составе гироскопа посредством индуктивного съёма информации.

Перед запуском «полёта» ротор гироскопа раскручивается до ≈ 3000 оборотов в минуту при определённом направлении вращения и отсутствии питания на двигателе привода прецессии. Затем постепенно увеличивается напряжение питания этого привода, при этом появляется вынужденная прецессия оси гироскопа, которая выражается в повороте этой оси с качением шасси по кольцевой рампе. При правильном сочетании направления прецессии с направлением вращения гироскопа и необходимой скорости прецессии, примерно 1 оборот за 8-10 секунд, двигатель гироскопа вместе с ротором отрывается от рампы (взлетает). Устойчивость вертикального положения гироскопа в полёте обеспечивается наличием несущего рычага с одноосным шарниром и пружины обратной связи по положению. На рис. 3 приведено фото основной части установки, гироскоп находится в «полётной» конфигурации.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ 1

Полёт сам по себе очевиден и демонстрируется уверенно, в том числе и с реверсом прецессии при неизменном направлении вращения гироскопа. В таком случае гироскоп не поднимается, а «ныряет».

В дальнейшем усилия были сосредоточены на экспериментальной оценке величины возможной осевой «тяги» устройства в квази-изолированном случае. На основании пробных измерений тяги в установке №1, рис. 2, был сделан вывод о том, что результирующая



Рис. 3. Общий вид устройства для демонстрации «полёта» гироскопа. Облегчение старта «полёта» достигается установкой под электродвигателем гироскопа обрезиненного колеса-шасси, которое может при разбеге катиться по кольцевой рампе. Примечание: Под ротором гироскопа можно наблюдать странное «размытие» изображения фоновых предметов: пола и стеллажа.

вертикальная «тяга» в целом по платформе при её подвеске на упругих элементах невелика.

В качестве упругих элементов применялись отрезки резиновой тесьмы и стальные пружины в разном исполнении.

Был определён коридор экспериментальных ошибок, внутри которого оставалась надежда на получение ненулевой тяги. Этот коридор оценивается в $\pm 0,75\%$ по

отношению к весу подвешиваемой части, в абсолютном выражении это составляет $\pm 0,003 \cdot 9,8Н$.

Работы оказались сложными ввиду недостатка в лаборатории требуемого набора точных механических компонентов.

Кроме этого, испытания сопровождались малопонятными и значительными колебаниями подвижной части, а также поломками электродвигателей. Всё это затрудняло измерения искомых величин. Тем не менее, в оригинальном эксперименте с лёгкими бумажными индикаторами был "выделен" интересный эффект с силовым отжимом указанных индикаторов вниз "полем летающего" гироскопа (ЛГ), рис.4. Этот эффект был взят на особую заметку и в дальнейшем использован в измерительном варианте установки №2, рис.5.



Рис. 4. Индикация силового поля под летающим гироскопом. На кольцевую рампу наклеивались длинные полоски из бумаги, которые отгибались вниз в виде волны при "пролёте" над ними гироскопа. При вращении гироскопа в отсутствие прецессии (полёта) полоски практически не отклонялись.

В качестве упругого элемента установки №2 использовалась балка из бытового "ламината" длиной 1300 мм и шириной 200 мм. Один конец балки защемлялся на верстаке в консольной компоновке, а на втором её конце устанавливался блок ЛГ с одним из компонентов датчика положения. Для компенсации паразитной модуляции моментом веса ЛГ при его вращении в конструкцию был введён регулируемый пассивный противовес массой около 250 г. Юстировка производилась при угле подъёма ЛГ, соответствующем "полёту" (рис.6).

Рабочим компонентом датчика положения служил ферритовый стержень, приклеенный к концу доски снизу. На него одевалась с зазором индуктивная катушка, входящая в состав LC-генератора, работающего в диапазоне частот 18-26 кГц. Для тарировки измерителя



Рис. 5. Установка №2 - механизм "летающего" гироскопа установлен на конце длинной упругой балки, оснащённой индуктивным датчиком вертикального перемещения и аналого-цифровым преобразователем.

и проверки его линейности использовались навески известной массы (оцинкованные стальные шайбы) 16 г, предварительно взвешенные на цифровых весах с ценой деления 1 г. Разрешение датчика по положению платформы ± 100 Гц/грамм веса, разрешение оцифровки сигнала ± 10 Гц. Собственная частота подвески 1,5 Гц, диапазон ожидаемых частот прецессии 0,1-0,25 Гц. Добротность системы подвески вместе с платформой не хуже 10...12.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ 2

Уже первые испытания системы показали наличие в режиме "летания" устойчивых вертикальных колебаний с механической амплитудой конца балки ± 3 мм и частотой 0,2-0,25 Гц (частота прецессии в установке №2). Так как гироскоп в несимметричной схеме устанавливался на самом конце балки, то его активная часть в активной прецессии имела возможность накатываться (наезжать) на плоскость балки и съезжать с неё, зависая над "пустотой" (рис.6). Фаза колебаний была однозначно привязана к фазе наезда и схода ЛГ с конца консоли, рис.8,9. Относительная фаза механических колебаний легко определялась даже визуально.

Получается, что ЛГ ощутимо чувствует профиль поверхности, над которой летает. При этом он "проваливается" во впадинах рельефа и "взлетает" на его горках. А так как в нашем случае рельеф является упругим элементом подвески и измерений, то он отвечает на вертикальные манипуляции ЛГ противофазными движениями.

Но центр тяжести системы по-прежнему остаётся "на месте" в пределах нового, более узкого коридора ошибок. Он составляет при общей массе платформы с противовесом 690 ± 1 г около 1 г, т.е. всего 0,15%.

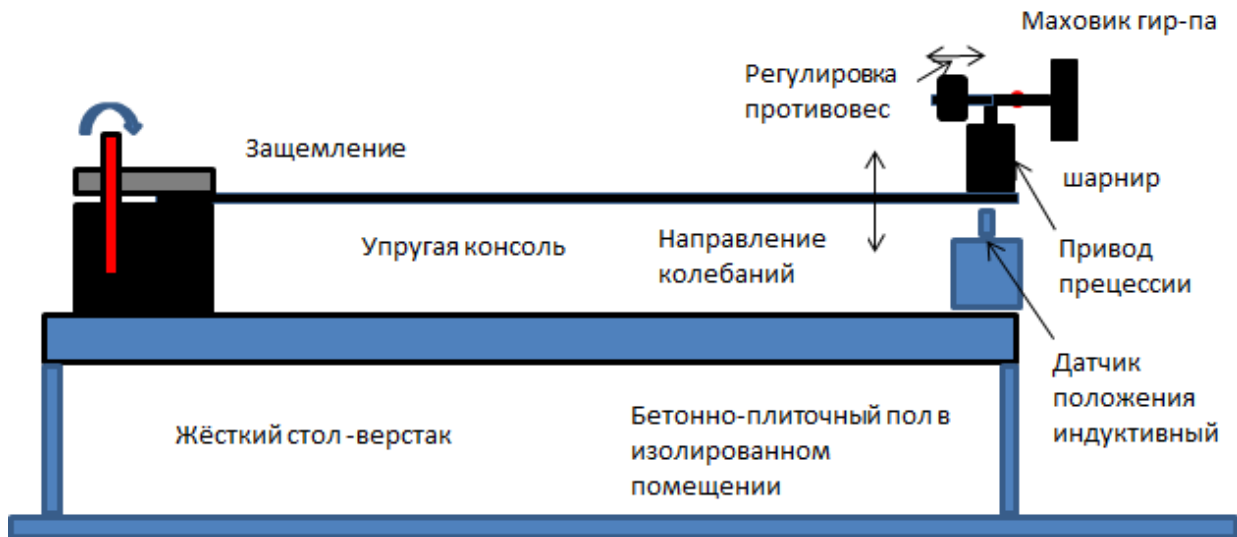


Рис. 6. Схема установки №2 с балкой с одним защемлением.

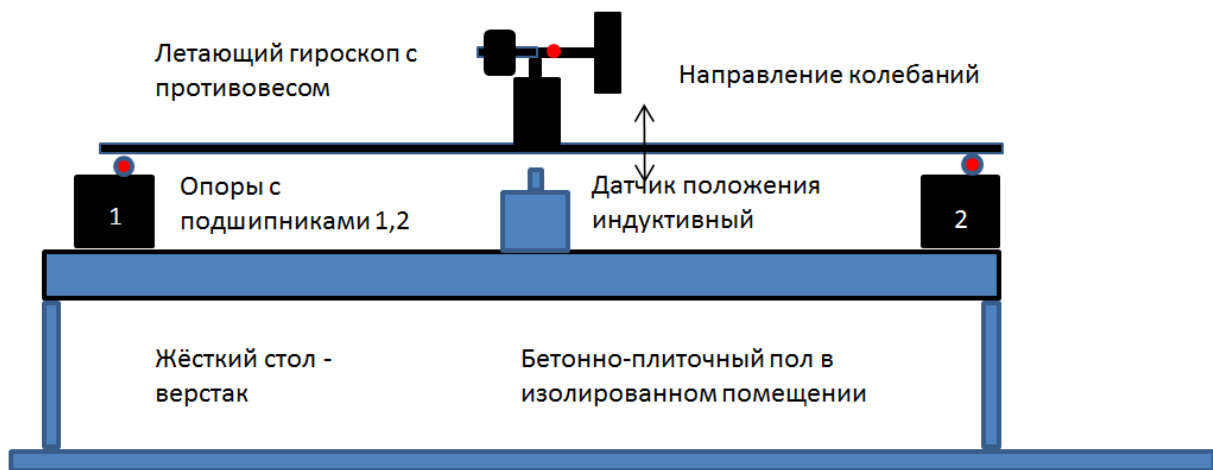


Рис. 7. Схема установки №2 с балкой с подшипниками на обоих концах.

По-видимому, небольшой небаланс колебаний всё-таки остаётся, но в пределах нового коридора ошибок. Под остаточным дебалансом амплитуд понимается неравенство верхних и нижних амплитуд колебаний на рис.8. Встроенная калибровка навесками массы плюс/минус 15 г при погрешности весов 1 г не даёт возможности утверждать о физической значимости такой разбалансировки. Амплитуда колебаний вверх в единицах массы оценивается как 13,5 г, а вниз 14,5 г, что в системе СИ соответствует величине сил 0,132 и 0,142 Н. По отношению к массе активной части ЛГ 200г это составляет в среднем 7%. Не так уж мало.

Произведён также контрольный эксперимент с платформой, установленной на двухопорной балке (на концах опорные шарикоподшипники) из материала того же типа, длиной около 2300 и шириной 200 мм - рис.7. Платформа с ЛГ размещалась в середине балки. Период собственных колебаний измерительной системы уменьшился с 0,8 до 0,4 секунд, а упругость балки уве-

личилась в 22 раз. Соответственно, во столько же раз уменьшилась чувствительность балки относительно нагружения центральным грузом. Поэтому вместо разрешения ± 1 г получаем ± 4 г. Диагностика оптическая через теодолит Т-30. В этом варианте констатировалось практическое отсутствие колебаний.

Кроме феномена “копирования” рельефа летающим гироскопом, можно отметить ещё несколько особенностей в его поведении.

В условиях более однородного рельефа под гироскопом описанные выше колебания не наблюдаются. Явно имеют место дополнительные вертикальные усилия на подвижную часть гироскопа, “летающего” близко от поверхности с жёстким рельефом. Они позволяют уменьшить скорость прецессии. Это видно из эксперимента с несимметричной балкой.

В специальном эксперименте с бумажными полосками-флажками выяснилось, что гироскоп с искусственно заторможенной прецессией, но с



Рис. 8. Запись в ПК калибровочной кривой (левая половина) и колебаний системы, связанных с положением диска гироскопа: над балкой и за её концом.



Рис. 9. Сглаженный участок колебаний в диапазоне 190-230 сек. Неравномерность амплитуды колебаний объясняется взаимным скольжением фазы считывания АЦП по отношению к фазе колебаний. Частота считывания 1 Гц, а частота колебаний сигнала в данных условиях около 0,244 Гц, т.е. на период колебаний приходится всего 4 точки считывания с некоторым скольжением из-за некратности частот.

вращением маховика, заметно не отклоняет флажки, в то время как в номинальном режиме с прецессией эти флажки отклоняются вниз во время прохода над ними "летающего" гироскопа.

Т.е. причины, связанные только с аэродинамикой быстровращающегося маховика гироскопа, не вносят заметного вклада в вертикальное положение бумажных "датчиков ветра". А в боковом направлении эти бумажки имеют гораздо большую жёсткость и не реагируют на тангенциальные потоки воздуха от вращения

маховика.

В условиях большей удалённости рельефа от активной части ЛГ оптимальная частота принудительной прецессии возрастает от 0,1 до 0,244 оборота/секунду. Оптимальная частота прецессии устанавливается оператором посредством регулировки напряжения питания на двигателе прецессии по условию подъёма плеча гироскопа до горизонтального положения. В исходном состоянии это плечо имеет отрицательный угол (по отношению к горизонтальной плоскости) примерно -

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

20...-25 градусов. В зависимости от расстояния до подстилающего рельефа и его формы потребная частота на практике изменяется, в частности она растёт с увеличением расстояния до рельефа.

Внутри трехгранной пирамиды на основе деревянного штатива частота прецессии также увеличивается в среднем на 3,8%. Результат работы летающего гироскопа внутри пирамиды показывает необходимость принудительного увеличения частоты прецессии на 3,8% при прочих равных условиях. По-видимому, возможно использование механического гироскопа с автоматическим уравниванием его положения, посредством регулировки питающего привод прецессии напряжения, в качестве механического датчика тонких, в том числе торсионных, полей (ТП).

V. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Гироскоп “летает” на полужёсткой привязи с одноосным шарниром и активной прецессией. Это удобно для исследования более тонких эффектов.

2. Искомая ненулевая вертикальная тяга “летающего” гироскопа осталась внутри коридора ошибок в 0,15% общего веса платформы.

3. Подтвердилась идея об образовании упругой “вакуумной” подушки под диском ЛГ [6], [7]. По-видимому, эта подушка взаимодействует силовым образом с “вакуумным” полем ближайшего предметного окружения. Вероятна связь механизма “полёта” ЛГ с работой “массо-динамических сил” В.Н.Самохвалова [8].

4. Величина требуемой скорости прецессии для данного угла подъёма ЛГ зависит от размера “вакуумной подушки” и, тем самым, от конкретной формы подстилающего рельефа.

- [1] Johann G. F. Bohnenberger (1817) «Beschreibung einer Maschine zur Erläuterung der Gesetze der Umdrehung der Erde um ihre Axe, und der Veränderung der Lage der letzteren» («Описание машины для объяснения законов вращения Земли вокруг своей оси и изменения направления последней») *Tübinger Blätter für Naturwissenschaften und Arzneikunde*, vol. 3, pages 72-83.
- [2] Walter R. Johnson (January 1832) "Description of an apparatus called the rotascope for exhibiting several phenomena and illustrating certain laws of rotary motion," *The American Journal of Science and Art*, 1st series, vol. 21, no. 2, pages 265—280.
- [3] Illustrations of Walter R. Johnson's gyroscope («rotascope») appear in: Board of Regents, Tenth Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution. ... (Washington, D.C.: Cornelius Wendell, 1856), pages 177—178.
- [4] L. Foucault (1852) "Sur les phénomènes d'orientation des corps tournants entraînés par un axe fixe à la surface de la terre," *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris)*, vol. 35, pages 424—427.
- [5] Georges Sagnac. L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme, *Comptes Rendus* 157 (1913), S. 708—710.
- [6] В.Т.Шкатов. Первое сообщение в группу «Вторая физика», создано и отправлено 13.02.13. О летающем гироскопе.
- [7] В.Т.Шкатов. Второе сообщение в группу «Вторая физика», создано и отправлено 01.03.13. Измерение веса летающего гироскопа.
- [8] В.Н.Самохвалов. Экспериментальные исследования взаимного вращения несбалансированных тонких дисков. Труды международной научной конференции «Торсионные поля и информационные взаимодействия-2009». Хоста, Сочи, 25-29 авг., 2009, стр.320-325.