

539.1

ЯДЕРНЫЕ ГИРОСКОПЫ***)

Вот уже несколько лет производятся интенсивные исследования, направленные на поиски путей использования в приборах инерционной навигации вновь открытых физических явлений и эффектов. В результате этих исследований появилась группа приборов, в дальнейшем названных «ядерными гироскопами», с помощью которых можно определить изменение угла или угловой скорости, но в которых вращающееся маховое колесо заменено чувствительным элементом, не имеющим ни одной движущейся детали.

*) При большой интенсивности света поглощение в криптоцианине достигает насыщения.

**) Мощность контролируется сравнением исследуемого сигнала со вспомогательным импульсом второй гармоники, образуемым в кварце⁴.

***) См. J. H. S i m p s o n, Nuclear Gyroscopes, Astronautics and Aeronautics 2, No. 10, 42 (1964).

Что же положено в основу работы приборов такого рода? Известно, что атомное ядро, кроме массы и заряда, обладает еще и собственным моментом количества движения, или спином. Электрические заряды ядра создают ядерный дипольный магнитный момент, представляющий собой «рукоятку» для ориентировки и контроля спина ядра; правда, дипольный момент ограничивает возможность использования этого спина в чувствительном элементе гироскопа строго определенными методами, разделяемыми на две группы: статические и динамические.

К первой относятся методы, в которых считается, что атомные ядра сохраняют первоначальную ориентацию в инерциальном пространстве до тех пор, пока никаких внешних возмущений этой ориентации (главным образом магнитных полей) нет.

А ко второй — относятся методы, в которых определяются все изменения в динамическом поведении ядерной намагниченности, обусловленные вращением.

Статические методы требуют создания области с нулевым магнитным полем (что трудно выполнимо), ибо даже небольшое магнитное поле, общее для всех ядер, вызывает отклонение и прецессию ядерной намагниченности в инерциальном пространстве.

Вот почему для создания ядерных гироскопов используются главным образом динамические методы, часть которых уже проверена на практике. Данные о вращении можно, например, получить за счет определения видимого сдвига ларморовской частоты (частота прецессии), который замечает наблюдатель, вращающийся вокруг вектора магнитного поля H_0 . Для этого наблюдателя частота ω смещается относительно значения в состоянии покоя γH_0 на величину $\Delta\omega$ — скорость вращения, т. е.

$$\omega = \gamma H_0 + \Delta\omega,$$

где коэффициент пропорциональности γ (гиромагнитное отношение) есть величина, характерная для данного вида ядер.

На практике производились непосредственные наблюдения этого сдвига на протонах в воде при сравнительно больших скоростях (несколько об/мин) методом свободной прецессии в слабом поле.

Более практичным методом наблюдения за величиной $\Delta\omega$ будет метод, в котором не обязательно знать величину напряженности магнитного поля и не требуется чрезмерная стабильность этого поля. Для этого достаточно добавить к ядрам одного типа группу ядер второго типа; при этом можно найти два резонансных сигнала, частота которых определяется уравнениями

$$\omega_1 = \gamma_1 H_0 + \Delta\omega, \quad \omega_2 = \gamma_2 H_0 + \Delta\omega.$$

Обе эти частоты являются двумя независимыми наблюдаемыми переменными, тогда как напряженность магнитного поля и скорость вращения — двумя неизвестными. Интегрирование этого уравнения для ω_2 по времени дает полную фазу ядерного сигнала и суммарный угол вращения.

Был проведен ряд экспериментов, в которых наблюдались изменения частоты бienia между зеемановскими переходами в сверхтонких уровнях основного состояния рубидия-87. Единичный энергетический уровень основного состояния атома рубидия расщепляется на ряд близко расположенных сверхтонких уровней. Под воздействием слабого магнитного поля каждый из них в свою очередь расщепляется на ряд уровней Зеемана (два ряда со слегка различными резонансными частотами в одном и том же магнитном поле). Таким образом, в принципе, поскольку одновременно наблюдаются два резонанса, необходимость в абсолютной стабильности магнитного поля отпадает.

В другом способе эти два резонанса представляют собой ядерные зеемановские уровни основного состояния изотопов ртути Hg-199 и Hg-201.

Чтобы увеличить процент ориентированных ядер в слабом магнитном поле, которое в этом случае используется (1,5 гс), применяется оптическая накачка атомов, находящихся в парообразном состоянии. Оптическая накачка производится за счет изменения угловых моментов количества движения, которое происходит во время резонансного рассеяния между лучом света с круговой поляризацией и атомами ртути в парообразном состоянии.

На рис. 1 показана схема генератора, собранного для работы на ларморовых частотах. Для обнаружения вращений, которые имеют составляющую, перпендикулярную к направлению постоянного магнитного поля, был сконструирован ядерно-индукционный гироскоп, основанный на эквивалентности вращений и слабых магнитных полей (рис. 2).

Поворот, если он имеется, можно считать эквивалентным введению некоторой составляющей магнитного поля, перпендикулярной к магнитному полю H_0 , которая нарушает, таким образом, точное совпадение направлений магнитных полей H_1 и H_0 и снимает энергию связи с H_1 , необходимую для ядерного намагничивания. Результатирующее перемещение ядерного намагничивания представляет собой сложную пре-

цессию ядерной намагниченности вокруг вектора результирующего магнитного поля. Перемещающаяся ядерная намагниченность наводит э. д. с. в катушке, ортогональной к катушке возбуждения. Чтобы уменьшить связь между катушкой возбуждения

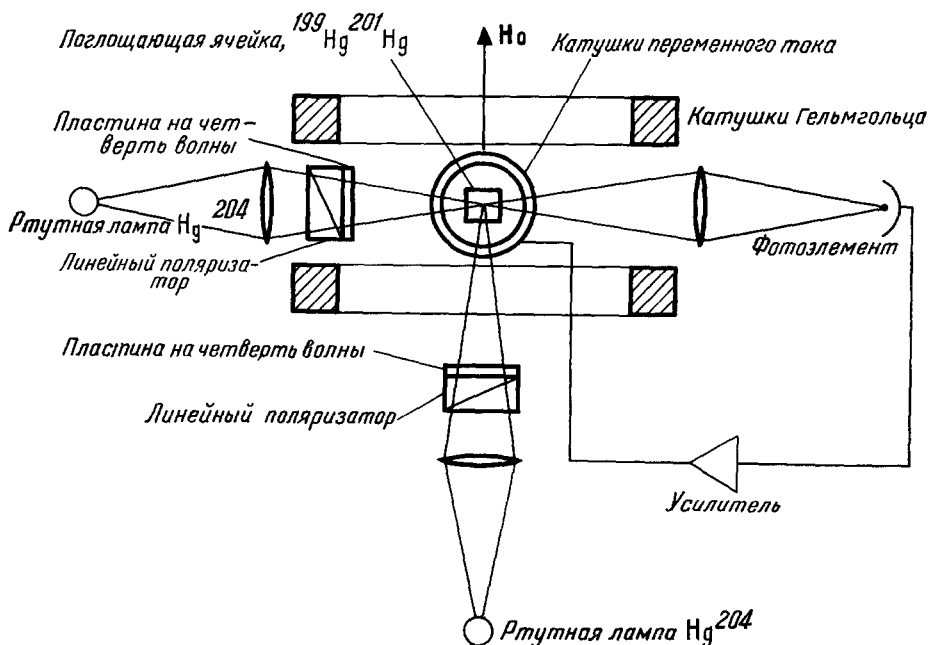


Рис. 1. Управляемый ядерными магнитнорезонансными элементами генератор с оптической накачкой.

Для обнаружения вращений, которые имеют составляющую, перпендикулярную к направлению постоянного магнитного поля, был сконструирован ядерноиндукционный гироскоп, основанный на эквивалентности вращений и слабых магнитных полей (см. рис. 2).

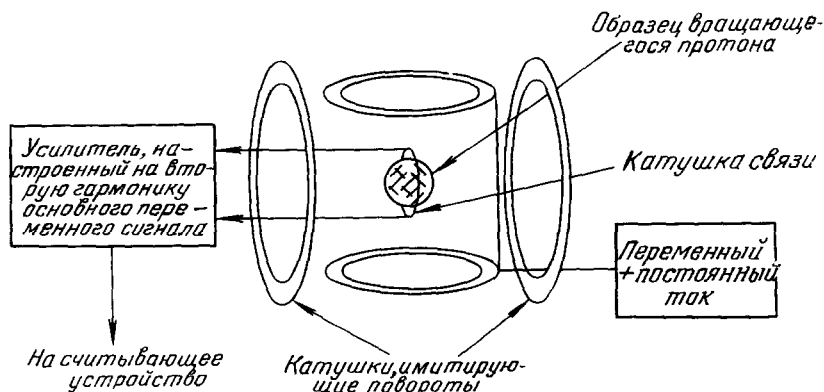


Рис. 2. Опытная модель магнитноиндукционного гироскопа.

Поворот, если он имеется, можно считать эквивалентным введению некоторой составляющей магнитного поля, перпендикулярной к магнитному полю H_0 , которая нарушает, таким образом, точное совпадение направлений магнитных полей H_1 и H_0 и снимает энергию связи с H_1 .

и катушкой связи, вторая гармоника сигнала снимается с цепи катушки связи. Такой прибор дает главным образом информацию о скорости.

Точность ядерных гироскопов ограничивается двумя основными факторами. Первый из них — возможность практически сконструировать прибор таким образом, чтобы получить от него максимальную информацию; по существу, это проблема полу-

чения достаточно большого отношения сигнал/шум. Другим более существенным ограничением точности, которую можно ожидать от такого гироскопа, являются шумы намагниченности, т. е. случайные тепловые флуктуации, совпадающие по направлению и по величине с чистой ядерной намагниченностью.

Конструктивные размеры ядерных гироскопов будут определяться теми требованиями, которые устанавливаются в зависимости от условий их применения, т. е. точностью и типом считывающего устройства. На основании проделанных исследований опытных образцов ядерных гироскопов можно сказать, что габариты и общее потребление мощности будут, по всей видимости, почти такими же, как у гироскопов обычного типа. Точность, даваемая приборам, если ее взять как функцию физических размеров и стоимости, также, видимо, вполне выдержит сравнение с обычным гироскопом.

ДОПОЛНЕНИЕ

ГИРОСКОП БЕЗ ЕДИНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ДЕТАЛИ

Если микроскопические заряженные частицы диаметром от 2,5 до 250 мк поместить в вакуум и подвергнуть действию электростатического поля небольшой напряженности так, чтобы они находились во взвешенном состоянии, их можно использовать в качестве чувствительного элемента и, таким образом, создать прибор без единой движущейся детали. Такие приборы будут более точными, более надежными, значительно меньшими по размеру, более легкими и более дешевыми, чем обычные гироскопы и акселерометры. Именно такой прибор разработала американская фирма «Мартин Орландо». Он состоит из вакуумной камеры, в которой расположены электроды, создающие принудительно сбалансированное электрическое поле. Заряженные частицы сферической формы помещаются в эту камеру, где часть из них захватывается и взвешивается в электрическом поле так, что они занимают равновесное положение. Небольшая проекционная лампа освещает эти частицы, и любое изменение их равновесного положения определяется оптическим путем с помощью фотоэлементов. Сигнал оптического рассогласования усиливается и подается на сервосистему, стремящуюся удержать всю систему в нулевом положении. Напряжение рассогласования используется в качестве выходного сигнала.

На основе этого прибора фирма сконструировала акселерометр, способный одновременно реагировать на изменение ускорения по всем трем осевым направлениям. Идеальные рабочие характеристики прибора обуславливаются тем, что его чувствительный «элемент» не подвержен всякого рода абберациям — тепловым, электрическим, фрикционным. Стабильность работы акселерометра не изменяется ни под действием колебаний температуры, внешнего давления, вакуума, ни даже под действием ядерного облучения. Чувствительность прибора может изменяться по желанию от 0,1 до 30 g , а пределы изменения превышают 100 g , что позволяет использовать его в качестве навигационного прибора в условиях свободного падения в управляемых снарядах, ракетах и т. д.

На таком же принципе можно создать гравиметры и гироскопы. В последнем случае заряженная частица помещается в электрическое поле, сформированное так, что частица начинает синхронно вращаться на определенной орбите с заранее установленной орбитальной скоростью. Плоскость орбиты вращения при этом используется в качестве опорной отметки углового положения, применение которого определяется с помощью оптического или электростатического датчика (Design. News. 19, No. 16, 108 (1964)).

Н. М. Колпаков