

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

531.383+538.12

ДЕМОНСТРАЦИЯ С ПРОВОДЯЩИМ ГИРОСКОПОМ
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

При движении массивного проводника в магнитном поле в нем возникают вихревые токи, магнитный момент которых, взаимодействуя с внешним полем, оказывает влияние и на само движение проводника. Это явление, важное для геомагнетизма¹ и движения искусственных спутников в магнитном поле Земли², представляет общезначительный интерес³. Теория движения проводящего гироскопа в магнитном поле рассмотрена в работах Е. Н. Кузнецова⁴.

Некоторые особенности поведения проводящего гироскопа в магнитном поле могут быть обнаружены в достаточно простых опытах и объяснены в рамках элементарной теории гироскопа. Для этих опытов используется свободный симметричный гироскоп из массивного проводника, уравновешенный на кардановом подвесе (диаметр латунного диска гироскопа 110 мм, толщина 20 мм). Кольца карданова подвеса разрезаны, чтобы в них не возникали индукционные токи при движении в поле. Гироскоп помещается между полюсами электромагнита, напряженность поля которого 1000 э при зазоре 200 мм. В конструкции гироскопа отсутствуют намагничивающиеся детали. Гироскоп раскручивается нитью, наматываемой на его ось, поэтому его угловая скорость не превышает 1000 об/мин. В первом опыте проводится наблюдение наиболее интересного явления — ориентации оси собственного вращения гироскопа по силовым линиям магнитного поля. При выключенном магните располагают ось гироскопа под углом 40—50° к направлению поля и раскручивают его. Затем включают магнитное поле и наблюдают, как ось изменяет свое положение до тех пор, пока не расположится вдоль направления магнитного поля. Следует повторить опыт, изменив направление вращения гироскопа и (или) поля на противоположное. Во всех случаях ось гироскопа поворачивается кратчайшим путем к направлению магнитного поля, описав дугу острого угла между своим начальным положением и направлением поля.

Оказывается, что вектор момента количества движения гироскопа устанавливается параллельно или антипараллельно вектору магнитного поля в зависимости от того, острый или тупой угол был между ними в начальном положении. Таким образом, ось собственного вращения проводящего гироскопа ориентируется вдоль силовых линий магнитного поля, но, в отличие от магнитной стрелки, не указывает направление вектора магнитного поля. Наглядное объяснение этого явления может быть сделано в следующих опытах со специальными начальными условиями.

Во втором опыте перед включением поля ось гироскопа устанавливается перпендикулярно полю. После включения магнитного поля гироскоп тормозится и быстро останавливается; его ось остается неподвижной. Рассмотрение этого опыта удобно провести в неподвижной системе отсчета с началом в центре масс гироскопа (рис. 1). Пусть вектор магнитного поля \mathbf{H} направлен по оси Z , вектор момента количества движения \mathbf{N} — по оси Y . При таком расположении в латунном диске гироскопа возникают объемные вихревые токи, направление которых на видимой стороне диска показано на рисунке стрелками. Магнитный момент этих токов \mathbf{P}_m , пропорциональный угловой скорости вращения ω и напряженности магнитного поля \mathbf{H} , направлен по оси X . При изменении направления вращения гироскопа или направления магнитного поля вектор магнитного момента также меняет свое направление на противоположное. Во всех этих случаях, когда ось гироскопа перпендикулярна

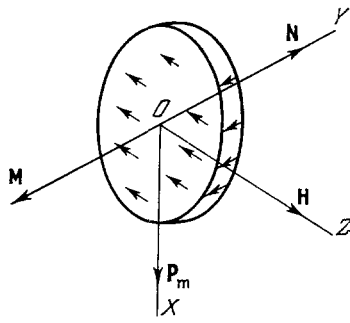


Рис. 1.

полю, на него действует механический момент $\mathbf{M} = [P_m \mathbf{H}]$, направленный против вектора момента количества движения и вызывающий только торможение гироскопа. Величина механического момента пропорциональна квадрату напряженности поля *).

Третий опыт проводится с начальным положением оси гироскопа вдоль силовых линий магнитного поля (по оси Z). После включения магнита не наблюдается

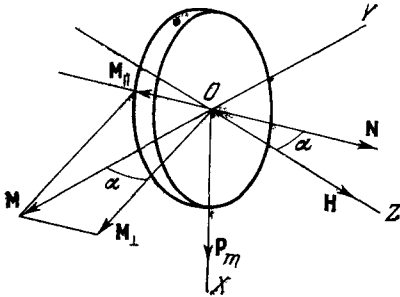


Рис. 2.

изменения скорости вращения гироскопа и положения его оси. Результат опыта не изменится, если изменить направление вращения гироскопа или направление магнитного поля на противоположное. Вращение гироскопа постепенно тормозится лишь силами трения, как и в отсутствие поля. Это связано с тем, что при положении оси гироскопа вдоль поля и установившейся скорости вращения вихревых токов нет; магнитный и механический моменты равны нулю.

В общем случае начальное положение вектора \mathbf{N} составляет с вектором \mathbf{H} угол α ($0 < \alpha < \pi$), что соответствует первому опыту (рис. 2). В той же системе отсчета при выбранных направлениях векторов \mathbf{N} и \mathbf{H} вектор магнитного момента P_m направлен по оси X , а его величина убывает с уменьшением угла α . Механический момент \mathbf{M} удобно разложить на составляющие — параллельную оси гироскопа $M_{\parallel} = P_m H \sin \alpha$ и перпендикулярную $M_{\perp} = P_m H \cos \alpha$. M_{\parallel} , направленная противоположно вектору \mathbf{N} , уменьшает его величину и вызывает торможение гироскопа. M_{\perp} изменяет направление вектора \mathbf{N} , что и объясняет поворот оси гироскопа к направлению поля, наблюдавшийся в первом опыте. Этот поворот оси может рассматриваться как прецессия гироскопа вокруг оси, перпендикулярной плоскости, в которой лежат векторы \mathbf{N} и \mathbf{H} . Угловая скорость этой прецессии $\Omega = d\alpha/dt = P_m H \times \cos \alpha / N$. Когда ось гироскопа расположится вдоль поля, магнитный и механический моменты обращаются в нуль, и прецессия прекращается. Рассмотрев также случаи, когда начальные направления вектора \mathbf{N} и (или) вектора \mathbf{H} изменены на противоположные, можно убедиться в том, что движение оси гироскопа всегда будет происходить кратчайшим путем к направлению силовых линий магнитного поля. Вектор \mathbf{N} должен устанавливаться параллельно вектору \mathbf{H} , если в начальном положении угол α между ними был острый, и антипараллельно, если этот угол был тупой.

Все эти особенности поведения проводящего гироскопа наблюдаются в первом опыте. Выбор начального положения оси гироскопа ($\alpha = 40-50^\circ$) выгоден тем, что в этом положении торможение ослаблено в достаточной степени и гироскоп успевает ориентироваться по полю, сохранив собственное вращение.

Наблюдаемая во втором опыте неподвижность гироскопа в положении, перпендикулярном полю, связана с тем, что в этом положении компонента M_{\parallel} , вызывающая торможение гироскопа, максимальна, а M_{\perp} равна нулю. При этом свободно вращающийся гироскоп успевает остановиться раньше, чем скажется неточность установки его оси перпендикулярно полю. Если у гироскопа исключить одну степень свободы, связав кольца карданова подвеса, то при определенном положении относительно поля оставшихся двух взаимно перпендикулярных осей можно наблюдать те же явления. Поэтому для лекционной демонстрации может с успехом использоваться и гироскоп более простой конструкции с двумя степенями свободы, например в виде медного шарика диаметром 30 мм (рис. 3).

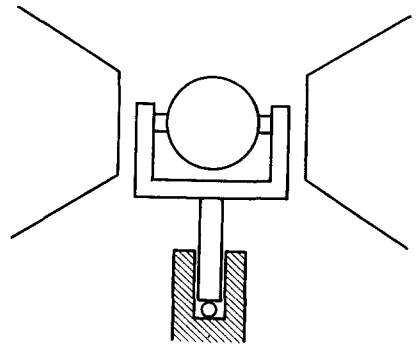


Рис. 3.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

К. Н. Баранский

*) При скоростях вращения гироскопа, значительно превышающих используемые в этих опытах, распределение вихревых токов должно измениться так³, что вектор магнитного момента отклонится в сторону, противоположную вектору \mathbf{H} . Описываемые здесь эффекты должны при этом ослабнуть.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Elsasser, Phys. Rev. **72**, 821 (1947).
2. В. В. Белецкий, Космические исследования **1** (3), 339 (1963).
3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М., Физматгиз, 1959.
4. Е. Н. Кузнецов, Изв. АН СССР (Механика), № 4, 124 (1965); Диссертация (МГУ, 1966).