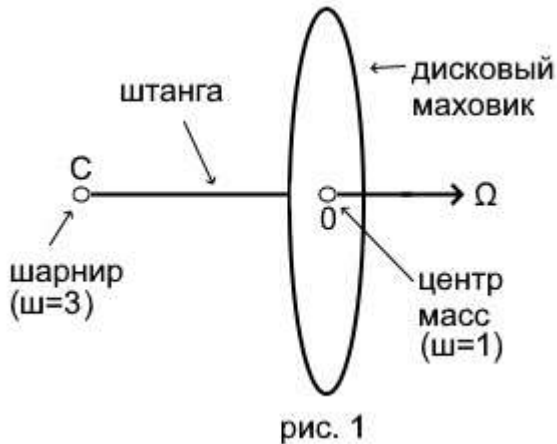


Качественное представление гироскопических сил.

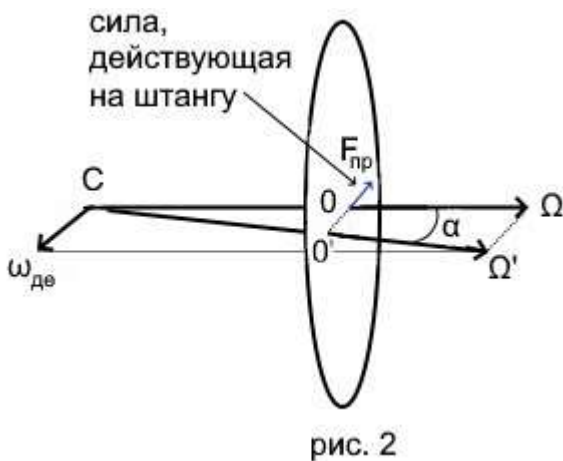
Классического пример.

Обычный гироскоп имеет симметричный твердый маховик, установленный на жесткой штанге. Без ограничения общности последующих построений маховик можно считать диском. Маховик раскручивается вокруг оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр масс, как это изображено на рис.1:



При вращении маховика с угловой скоростью Ω устанавливается симметричное распределение упругих сил относительно центра масс в случае его совпадения с центром вращения.

Если штанге, вокруг которой вращается маховик, придать дестабилизирующую угловую скорость $\omega_{де}$ вокруг стационарной точки C в направлении, не совпадающем с направлением угловой скорости раскрученного маховика, то ось и центр вращения маховика сместятся, как это показано на рис.2:



В результате маховик будет вращаться вокруг некоторой точки O' , смещенной относительно точки O , с угловой скоростью Ω' . Для вращения маховика вокруг точки O' на центр масс маховика (точке O) должна действовать центростремительная сила, направленная в точку O' . Эта сила будет действовать на маховик со стороны штанги, а маховик будет действовать на штангу в точке O с равной по величине силой $F_{пр}$, но в противоположном направлении - от точки O' , как это изображено на рис.2.

Может показаться, что эта сила направлена на дальнейшее увеличение угла α между осью симметрии маховика и мгновенной осью его вращения. Но, на самом деле, эта сила создает вращение маховика в перпендикулярном направлении – создает угол β , а не увеличивает угол α , что иллюстрируется на рис.3:

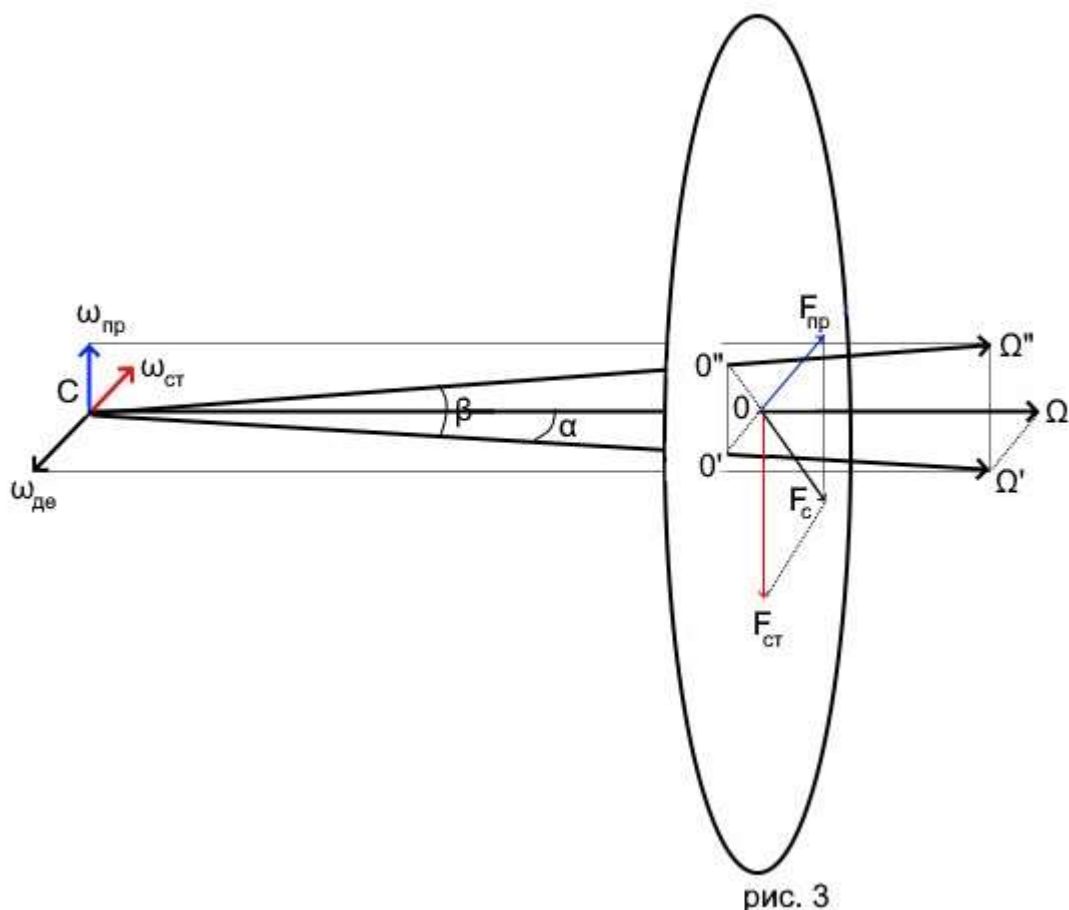


рис. 3

Действительно, сила $F_{пр}$ направлена вдоль дестабилизирующего вектора $\omega_{де}$, но момент этой силы создает вектор угловой скорости не параллельный вектору $\omega_{де}$, а перпендикулярный ему! Таким образом, реакцией гироскопа на внешнее механическое воздействие является не прямое противодействие, как это принято у твердых тел, а перпендикулярное.

Векторы Ω , Ω' , Ω'' представляют не физические оси твердых тел, а угловые скорости физических твердых тел. И если на физическую штангу действует сила, создающая момент относительно шарнирного крепления штанги, то угловая скорость штанги будет направлена перпендикулярно плоскости действия силы и перемещения штанги. Этим фактом и объясняется кажущееся странным смещение вектора угловой скорости гироскопа перпендикулярно приложенной к нему силе.

Реакция маховика на внешнее воздействие не заканчивается указанным смещением вектора его угловой скорости. Вновь появившаяся дополнительная угловая скорость маховика $\omega_{пр}$ сместит мгновенный центр вращения маховика в точку O'' , а полная угловая скорость маховика станет равной вектору Ω'' . При дополнительном смещении мгновенного центра вращения изменится и направление центростремительной силы, действующей на центр масс маховика. С этой силой штанга действует на центр масс маховика, а он действует на штангу с такой же по величине, но противоположно направленной силой $F_{с}$ изображенной на рис.3.

Сила $F_{с}$ складывается из ранее представленной силы $F_{пр}$, связанной со смещением центра вращения маховика из точки O в точку O' , и силы $F_{ст}$, связанной с дальнейшим смещением этого центра из точки O' в точку O'' . Вновь появившаяся сила $F_{ст}$, как следует из построений на рис.3, создает угловую скорость $\omega_{ст}$ в направлении, противоположном первопричине всех событий – дестабилизирующей угловой скорости $\omega_{де}$.

Вектор $\omega_{ст}$ оказывает стабилизирующее действие на движение гироскопа - он действует против дестабилизирующего внешнего воздействия и уменьшает возмущение в движении гироскопа.

На этом первый цикл обработки внешнего воздействия заканчивается и начинается следующий цикл с уменьшенной величиной возмущения. После второго цикла возмущение,

очевидно, станет еще меньше, и так будет продолжаться, пока начальное возмущение не будет отработано до сколь угодно малой величины.

Если штанге гироскопа не придается начальная дестабилизирующая угловая скорость, а прикладывается непрерывно действующая постоянная дестабилизирующая сила, вращающая ось гироскопа, то процесс установится в другом положении – в положении, когда сформируется постоянная реакция на постоянное возмущение.

Постоянное дестабилизирующее возмущение можно представить, как момент сил $M_{де}$, вращающий гироскоп вокруг оси, проходящей через точку C шарнирного крепления штанги, как это изображено на рис.4:

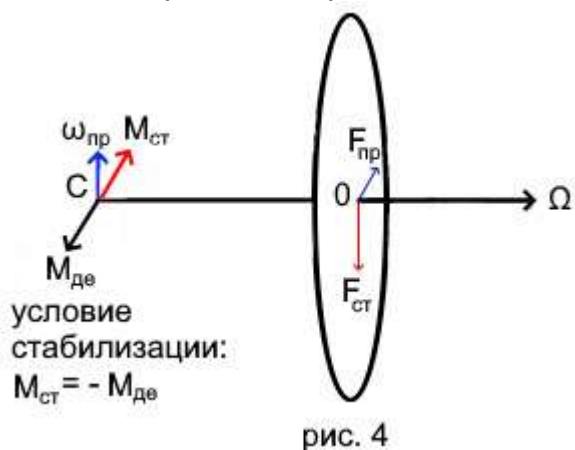


рис. 4

Реакция гироскопа заключается в формировании прецессии, при которой возникает момент $M_{ст}$, равный по величине, но противоположно направленный по отношению к дестабилизирующему моменту $M_{де}$. Постоянный стабилизирующий момент $M_{ст}$ создается представленной выше стабилизирующей силой $F_{ст}$, которая возникает при постоянной скорости прецессии $\omega_{пр}$ соответствующей величины и направления.

С помощью построений, подобных представленным выше, не сложно проверить, что при смене направления дестабилизирующего момента на противоположное, меняется на противоположное и направление угловой скорости прецессии, что соответствует многочисленным экспериментальным данным.

Выше представлена модель стабилизации гироскопа только в первом приближении. Во втором приближении следует учитывать, что при стабильной прецессии формируется стабильный угол между центральной осью симметрии маховика и осью его вращения, как это поясняется на рис.5:

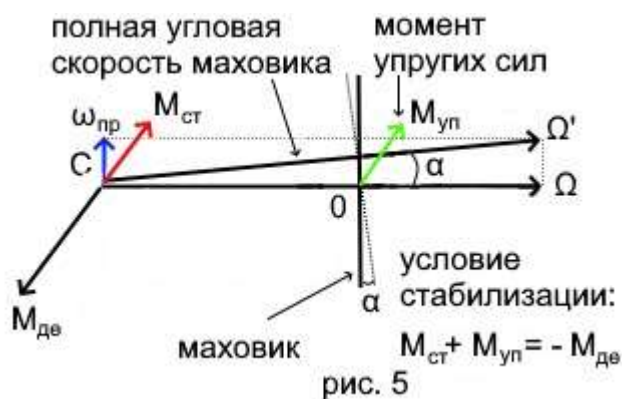


рис. 5

Таким образом, ось вращения не только смещается, но и разворачивается относительно оси симметрии маховика. При этом, очевидно, возникает не только центростремительная сила, действующая на центр масс маховика, но и упругие силы, направленные на разворот плоскости маховика перпендикулярно оси его вращения.

Эти силы создают момент $M_{уп}$ упругих сил, направленный на вращение штанги гироскопа в направлении оси вращения маховика. Сила $F_{ст}$ создает момент $M_{ст}$ в том же направлении, и сумма моментов $M_{уп}$, $M_{ст}$ компенсирует дестабилизирующий момент $M_{де}$.

С учетом дополнительного стабилизирующего фактора процесс, очевидно, также придет в устойчивое состояние, но с несколько меньшей угловой скоростью прецессии, чем в первом

приближении. Однако, первичным фактором стабилизации останется именно прецессия – только она создает как стабилизирующую силу $F_{ст}$, так и дополнительный стабилизирующий момент $M_{уп}$ упругих сил.

Почему не падает юла?

При строго вертикальном положении оси вращения юлы ее маховик действует на опору таким образом, что сумма сил в любом направлении, перпендикулярном оси вращения, равна нулю, как это иллюстрируется на рис.6:

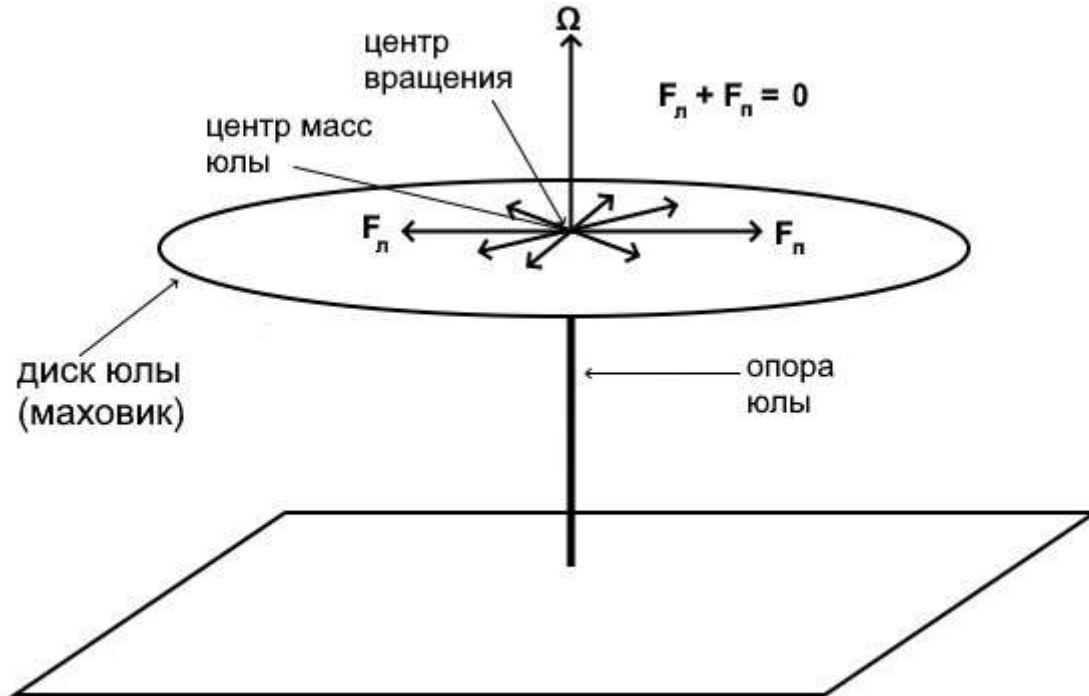


рис. 6

Силы $F_{л}$ и $F_{п}$, лежащие на одной прямой и действующие влево и вправо на одну точку оси не взаимоуничтожаются, а суммируются при расчете деформаций.

Но если центральная ось юлы начинает наклоняться в любую сторону, то у юлы возникает дестабилизирующая угловая скорость ($\omega_{де}$), и мгновенная ось вращения юлы смещается относительно ее центра масс, как это схематично показано на рис.7:

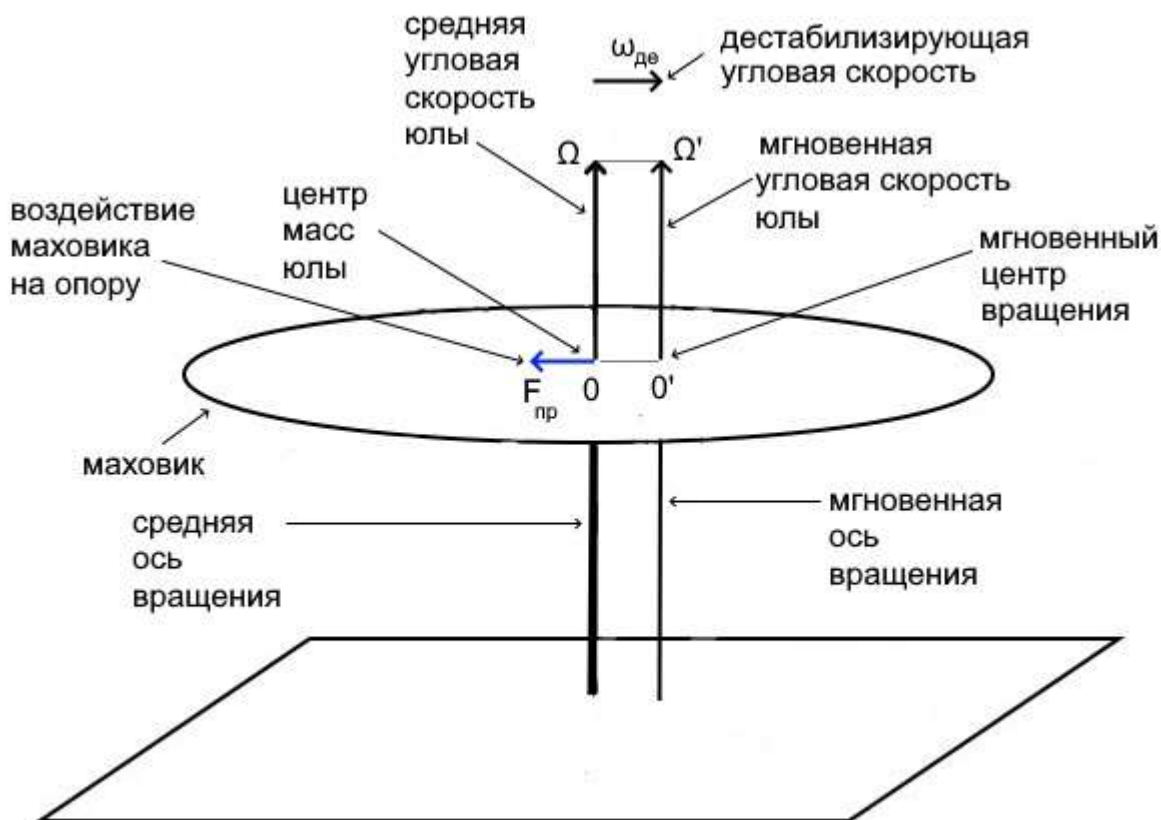


рис. 7

Смещение оси вращения нарушает установившийся баланс внутренних упругих сил, действующих на центр масс маховика юлы - у него появляется центростремительное ускорение, направленное в сторону точки O' мгновенного центра вращения. Это ускорение создается силой, действующей на центр масс маховика со стороны его опоры. С такой же по величине силой действует маховик на свою опору, но в прямо противоположном направлении – в направлении от точки O' . Сила воздействия $F_{пр}$ маховика на свою опору изображена на рис.7.

По рисунку может возникнуть представление, что сила $F_{пр}$ направлена прямо на дальнейшее смещение оси симметрии юлы от мгновенной оси ее вращения и на прямое увеличение возникшего дисбаланса. Однако, сила, действующая влево при смещении оси вращения вправо, не увеличивает имеющийся дисбаланс, а добавляет дисбаланс в перпендикулярном направлении. Действительно, сила $F_{пр}$ вызывает появление у опоры угловой скорости $\omega_{пр}$, перпендикулярной дестабилизирующей угловой скорости $\omega_{де}$, как это показано на рис.8:

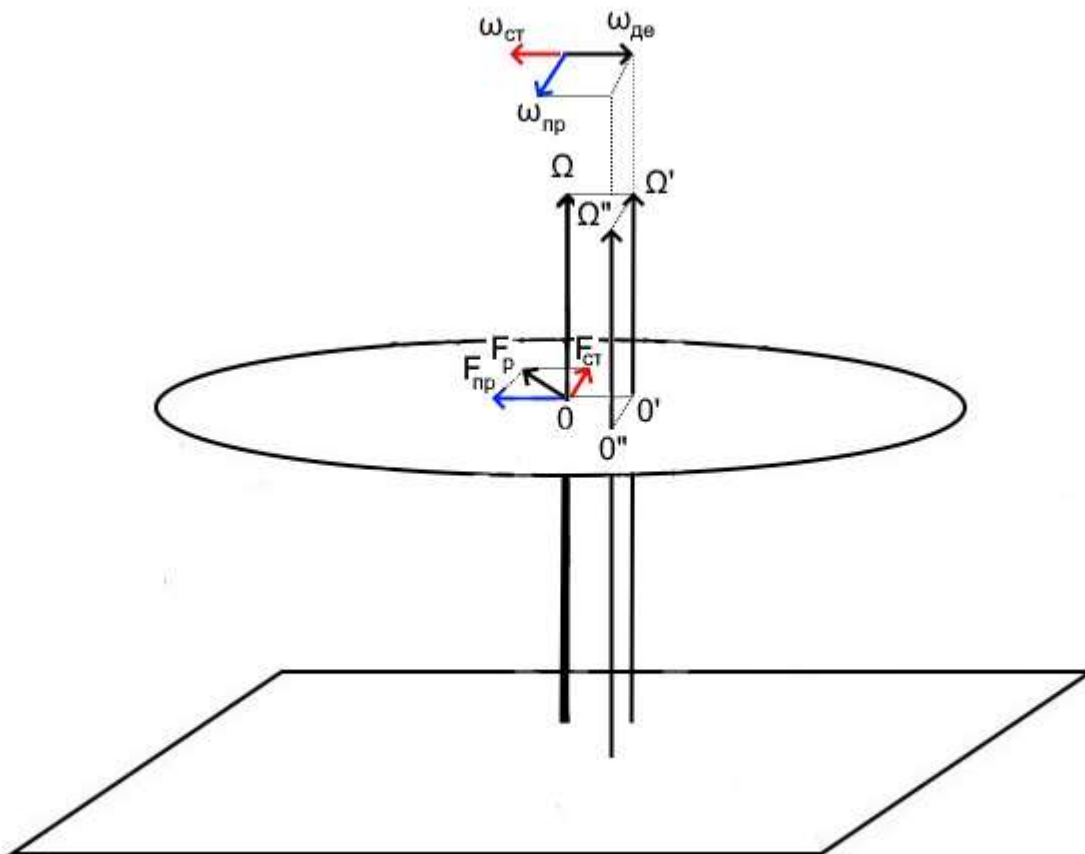


рис. 8

Добавление угловой скорости опоры юлы в направлении, перпендикулярном уже имеющемуся дисбалансу, на первый взгляд не способствует стабилизации юлы. Действительно, при добавлении еще одной составляющей в суммарную угловую скорость Ω'' мгновенный центр вращения маховика смещается в точку O'' и еще больше удаляется от центра масс юлы – точки O .

Центростремительная скорость центра масс юлы, очевидно, при этом увеличивается и меняет направление с точки O' на точку O'' . Тогда реактивная сила F_p , с которой маховик действует на свою опору, будет направлена от точки O в противоположную от точки O'' сторону, как изображено на рис.8.

Сила F_p раскладывается на составляющие – ранее представленную силу $F_{пр}$, (появившуюся при смещении центра вращения из точки O в точку O') и $F_{ст}$ (появляющуюся при дальнейшем смещении центра вращения из точки O' в точку O''). Сила $F_{ст}$ также, как и ранее сила $F_{пр}$, вызывает появление и рост дополнительной угловой скорости юлы. Эта дополнительная угловая скорость ($\omega_{ст}$) показана на рис.8, и, как следует из представленных построений, вектор $\omega_{ст}$ направлен против вектора $\omega_{де}$ дестабилизации вращения юлы, и потому он является стабилизирующим фактором.

Таким образом, в ответ на дестабилизирующее воздействие в форме угловой скорости наклона оси юлы, ее упругие силы создают угловую скорость прецессии, перпендикулярную дестабилизирующей угловой скорости, а прецессия вызывает появление и рост стабилизирующей угловой скорости, действующей против начальной дестабилизации вращения юлы. И это процесс продолжается до полной отработки возмущения.

При вращении реальной юлы она непрерывно испытывает дестабилизирующие воздействия и потому непрерывно находится в процессе стабилизации, прецессируя ("танцуя") при этом.

Представлена процедура стабилизации угловой скорости юлы, а не ее угловых отклонений. Стабилизирующий фактор действует упреждающе на отклонения юлы еще на "стадии замысла", когда появляется только скорость в направлении физического отклонения, но еще не отклонение. Эти дестабилизирующие скорости и обрабатываются. А если по произвольным причинам угловое отклонение все-таки возникнет, то гиросtabilизация не будет его обрабатывать, она будет работать на его сохранение.

Если юлу раскрутить и поставить на плоскость под некоторым углом к вертикали, то гироскопические силы будут стабилизировать этот угол, а не приводить ось юлы в вертикальное положение. При наличии заметного начального угла на юлу будет действовать заметный регулярный дестабилизирующий гравитационный фактор, и потому прецессия юлы будет также регулярной, что и подтверждается экспериментально.

У гиростабилизации отсутствует понятие устойчивого равновесного положения материального тела, гиростабилизация противодействует изменениям вектора скорости материального тела, а не изменениям вектора его положения.

Подъем тяжелых маховиков.

Множество демонстраций этого фокуса опубликовано в интернете. Тяжелый (около 20 кг.) раскрученный до 3-5 тыс. об/мин маховик на длинной штанге (около 1м.) держат на весу одной рукой за конец штанги. Не вращающийся маховик с трудом удается удерживать в таком положении и двумя руками.

Фокус достаточно прост и объясняется действием гироскопических сил.

Если штангу с раскрученным маховиком удастся поднять и зафиксировать горизонтально, а это удастся только со значительными усилиями и двумя руками, то удержанию конструкции в этом положении будут способствовать гироскопические силы, как это поясняется на рис.9:

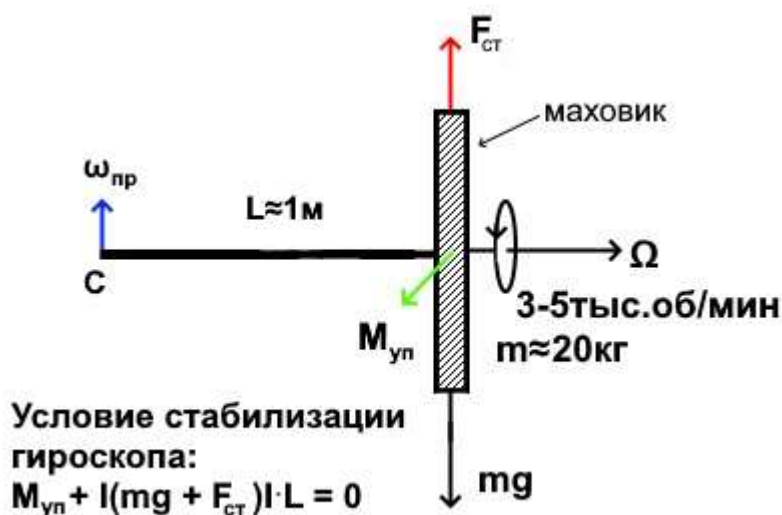


рис. 9

Действительно, при горизонтальном положении штанги и возможности ее свободного вращения с угловой скоростью прецессии вокруг точки **С**, стабилизирующая гироскопическая сила ($F_{ст}$) может в значительной степени скомпенсировать вес (mg) гироскопа, а совместно с упругим гироскопическим моментом ($M_{уп}$) стабилизирующая сила полностью компенсируют момент силы тяжести маховика относительно точки **С** (условие стабилизации гироскопа). Тогда для удержания изображенной конструкции в горизонтальном положении требуется прикладывать к штанге лишь незначительные усилия, что демонстрируется на многочисленных видеороликах и поясняется на рис.10, где представлены силы конструкции, действующие на точку **С**:

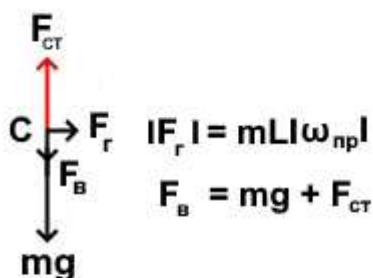


рис. 10

Для стабилизации требуется приложить усилия в точке **С**, компенсирующие горизонтальную **F_г** и вертикальную **F_в** силы, действующие на эту точку со стороны конструкции.

Горизонтальная сила **F_г** равна по величине центростремительной силе, действующей при вращении массы **m** маховика с постоянной угловой скоростью прецессии **ω_{пр}** по окружности радиуса **L**. Вертикальная сила **F_в**, действующая на опору в точке **С**, складывается из веса маховика и представленной выше гироскопической силы **F_{ст}**, возникающей при прецессии гироскопа с угловой скоростью **ω_{пр}** и частично компенсирующей вес маховика.

Таким образом, если для подъема раскрученного маховика требуется, по крайней мере, приложить силу равную его весу (**mg**) с одновременной не простой балансировкой для обеспечения горизонтального положения штанги при ее подъеме, то для удержания поднятой горизонтальной штанги, прикладывая к ней усилие в точке **С**, требуется компенсировать только часть веса маховика и чуть придерживать конструкцию в горизонтальном направлении, обеспечивая гироскопу необходимую для прецессии относительно небольшую центростремительную силу.

Никакой мистической силой гироскоп не обладает, это, в первую очередь, реактивная ("центробежная") сила, возникающая при смещении центра вращения массивного маховика. Реактивная гироскопическая сила действует со стороны маховика на опору, вызывая ее неожиданные движения или отсутствие ожидаемого движения. Но эта "мистическая" сила гироскопа рассеивается стоит чуть придерживать ось гироскопа, не позволяя ей свободно прецессировать.

Не следует считать, что массивный маховик, как барон Мюнхгаузен, поднимает сам себя. Маховик использует для этого запасенную в нем энергию. Если бы барон имел в кармане, например, два мощных вращающихся навстречу пропеллера, достал их, направил в одну сторону и улетел, это и было бы подобием "фокуса" с подъемом тяжелого маховика, объясняемым известными эмпирическими законами общей физики.