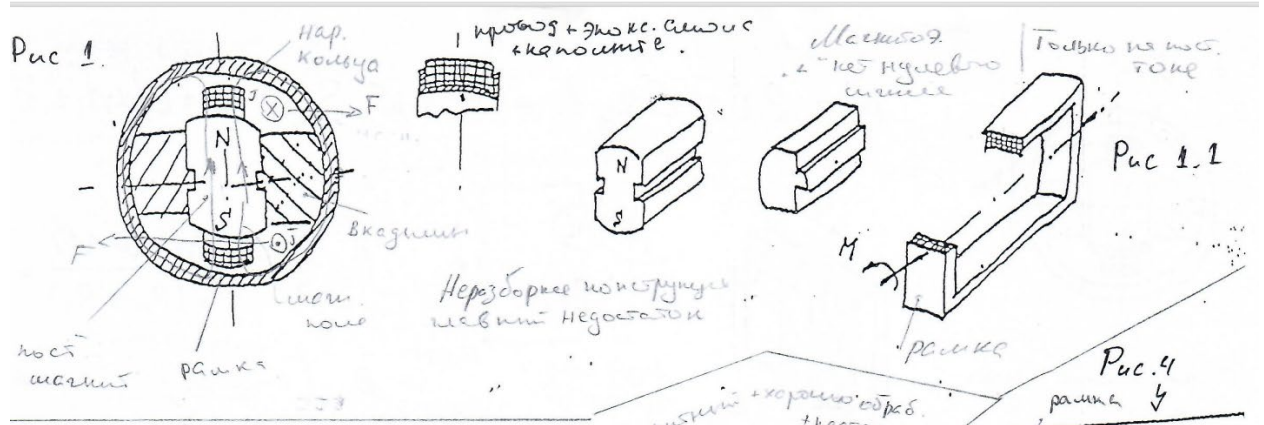


1 сентября

Магнитоэлектрические датчики момента, управляются только постоянным током. Особенности: это приборы, имеющие минимальный нулевой момент. Минимальный нулевой момент, что это значит – нет управляющего тока, - нет момента. Например, (Электромагнитные) после того как сформировали воздействие управляя током, у них нулевой сигнал, а нулевой сигнал просто тяжение, создаваемое датчиком, (нулевой сигнал сильно мешает, нужно обеспечить малым). Нет воздействия никакого, появляется нулевой сигнал (от внутренних причин, как упоминали ранее, момент тяжения самого датчика)



Что содержит магнитоэлектрический датчик?

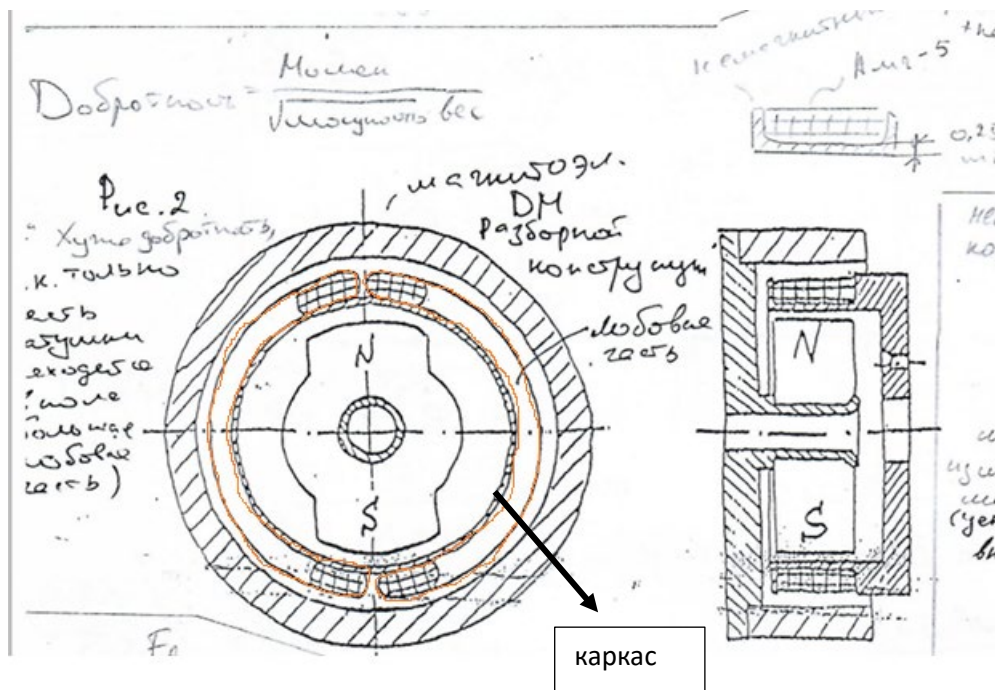
Постоянный магнит, рамка которая содержит катушку.

(Рис.1) Магнит создает магнитное поле, намагничивающая сила (F). Линии магнитного поля охватывают магнитопровод. Магнит создаёт магнитный поток, магнитный поток проходит через зазор и должен замыкаться по наружному магнитопроводу и возвращаться на южный полюс. (Магнитный поток всегда замкнут). Рамка запитывается постоянным током. Правило левой руки, руку нужно поместить в зазор, чтобы линии магнитного поля, входили в ладонь, пальцы по направлению тока, сила по направлению большого пальца.

Магнит и два вкладыша, которые входят в канавки магнита и наружная поверхность обработана по цилиндрической поверхности, так чтобы она могла опираться на внутреннюю поверхность кольца (иногда крепят на винтики). Вкладыш делается из немагнитного материала, если будет магнитный, то материал магнита не пойдет в зазор, он будет замыкаться. (датчик не будет работать) Не поняла, спросить на консультации!!! (44:00-46:00)

Немагнитные материалы – фторопласт, керамика, алюминий, бронза или латунь, титан.

Наружное кольцо – магнитопровод из магнитомягкого материала. Магнитомягкие материалы и магнитотвердые. Из магнитомягких делаются магнитопроводы. Из магнитотвердых – постоянные магниты. МТМ – магнитотвердый материал. Кольцо – магнитомягкий. Магнитомягкий материал – железо и сплавы железа с никелем (пермаллой – 50% никеля, супермаллой – 79 % никеля), обладают маленьким сопротивлением протекания магнитного потока. Магнитотвердый материал, который сохраняет свою намагниченность, структура такая, представляет доменную структуру. Эти домены после действия магнитного поля, приобретают определенную структуру материала и становятся хорошими хранителями намагничивающей силы. В качестве магнитотвердых материалов используются сплавы алюминия, никель, кобальт (Альнико, 12 типов), у нас называются ЮНДК. ЮНДК-15 слаболегированный сплав. (перечисление разных ЮНДК из дз). Магнитотвердые материалы определяют крутизну масштабного коэффициента датчика. Акселерометр должен сохранять свою намагниченность в течении долгих лет, до 15 лет в условиях температуры, сохранять до  $10^{-4}$  % точности. Внутри материала встречаются домены – уроды



Удобно иметь датчик момента разборной конструкции. (Рис.2).

В этом датчике имеется магнит и магнитопровод, который представляет собой единую сборку. Магнит посажен на центральную втулку. Магнитопровод кольцевой посажен на крепежную деталь. Магнитный зазор такой же, как и в неразборной конструкции. Но катушки укреплены на каркас, на втулку с элементом каркасика. Не намотаны по кругу, делается плоская катушка, а потом её изгибают по наружной поверхности цилиндра. Две катушки охватывают цилиндр.

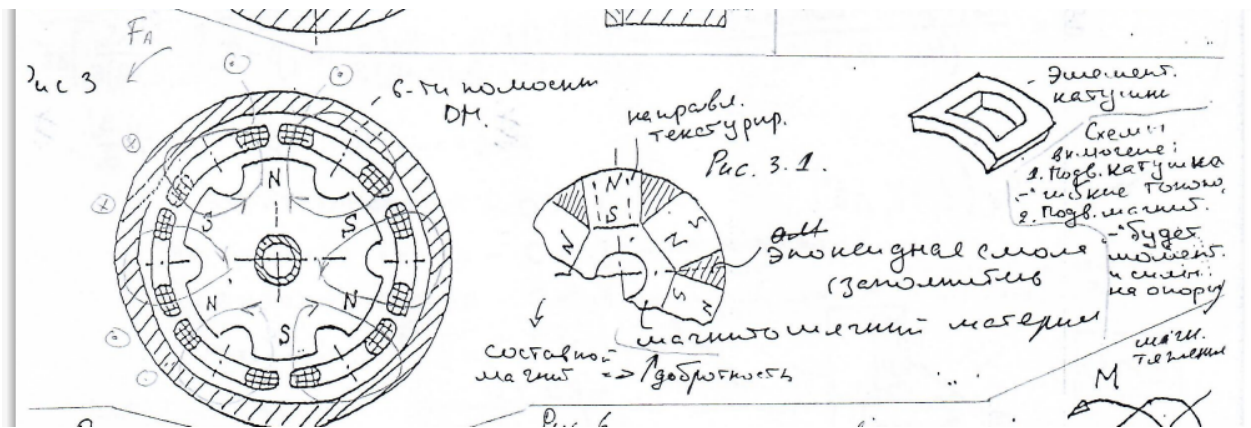
Две катушки. Одна справа идёт, потом по каркасику наклеены катушка и нижняя часть разрезана?. И слева также.

Работает по одному и тому же принципу, что и первый датчик (Рис.1) В обеих катушках, находящихся в северном полюсе, ток течет в одну сторону, по правилу левой руки определяем силу. Момент создает только часть катушки, которая находится в силовом магнитном поле. (Над и под магнитом). По бокам нет магнитного поля, нет сил. Та часть катушки которая не образует момента, является лобовой частью катушки. (Они бесполезны), чем они короче, тем лучше. Ток в них течёт, сопротивление есть, значит выделяется мощность, идёт нагрев, а нагрев к моменту не приводит.

В неразборной, то рабочей частью катушки которая создаёт момент, которая находится в магнитном поле. Имеются лобовые части, они пущены не сверху вниз, а по окружности стаканчика, к которому положена катушка. В разборной 1,5 раза длиннее катушка, чем в неразборной. Эффективность – добротность датчика момента. Отношение момента к потребляемой мощности. У разборной хуже, по сравнению с неразборной. Так как длинные лобовые части. Магнит тот же самый что и в неразборной.

Из чего делается стаканчик, на котором расположена обмотка? Корпус стаканчика делается из немагнитного материала. Иначе его будет тянуть магнитное поле, появится вредный момент. В разборной конструкции можно вытащить катушку, не меняя магнитную систему. Что лучше подвижная катушка или подвижная магнитная система? Если мы делаем подвижную катушку, катушка полностью не магнитная, поэтому никакого тяжения магнитного здесь не будет (Это хорошо). Если вы делаете подвижную магнитную систему, то магнит будет зависеть от взаимодействия внешних магнитов (Это хуже). Магниты тяжелые. **Какое достоинство подвижной магнитной системы? А не надо делать разборными???** (Кто то кашлянул и перебил Коновалова, несколько раз переслушивала, так и не услышала!!!! **НЕ КАШЛЯЙТЕ, НЕ БОЛЕЙТЕ!!!**). В подвижной катушке нужно изготавливать токоподводы, а они запарны, с ними морока. Чтобы провода не тянули и не создавали момента при повороте.

Третий вариант, когда магнит подвижный, а катушка и магнитопровод размещают на корпусе. Лёгкая магнитная система, токоподводов делать не надо (Вообще хорошо, да не так 😊). **Нельзя разделять магнит от магнитопровода.** Только вместе. В чем недостаток датчика с двухполюсным магнитом на разобранной конструкции? (Рис.2) Длинные лобовые части, не создают момента. Эффективность из-за этого плохого. Для этого укорачивают лобовые части. Поэтому начали применять шестиполюсный магнит.(Рис.3)

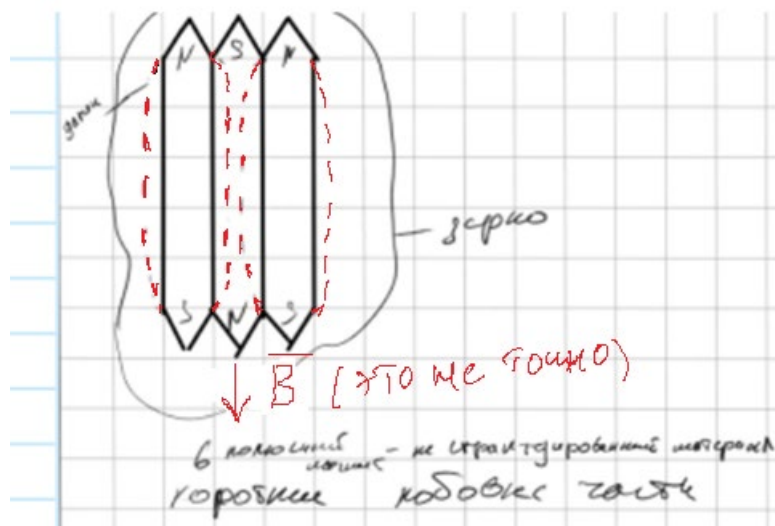


Здесь такие же катушки, могут быть со стаканчиком или без. Катушки короткие. Их 6 штук. Благодаря этому, получаются короткие лобовые части. Фактически получается 3 датчика. Эффективность к сожалению в три раза не лучше по сравнению с неразборной. В чем причина? Здесь используется шестиполюсный магнит, а такой магнит трудно делать. Домены хаотично расположены в магнитотвердом материале, они не создают мощного магнитного потока в одном направлении. Надо материал подвергать к термомагнитной обработке. Что за обработка? Кусок магнитотвердого отлит, помещаются в специальную трубу, либо газ который не поглощается магнитным материалом. Нагреваем кварцевую трубу, в которой содержится



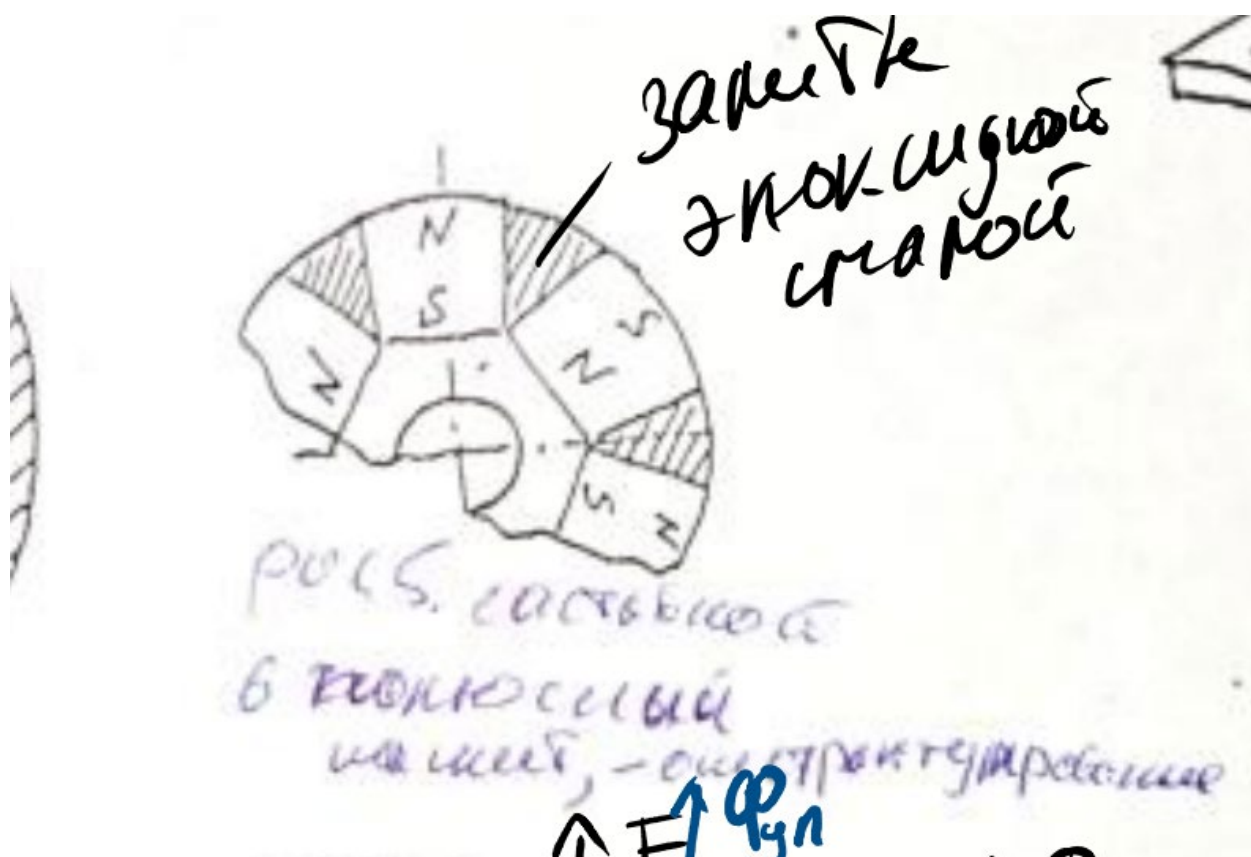
кусок материал магнитотвердого под 1210<sup>0</sup> и включаем электромагнит, который создаёт мощное магнитное поле, пронизывающий этот кусок материала. Потом по известному закону, температуру понижают. После этой обработки, материал магнитотвердый, приобретает текстуру, а именно домены длинной стороной устанавливается по тому, магнитному полю, к которому приложили к термомагнитной обработке. Доменная структура.

Домены расширяются если внешнее магнитное поле по направлению с ними не совпадает, и сужаются если совпадают. (Почему так не понятно). Домен посередине, как внутренний добавочный магнит. Как границы сместились, потом они не возвращаются. Есть гистерезис у этих границ. Весь кусок железа превращается в дополнительный магнит. После обработки, домены выстраиваются по такому же способу. Направление предпочтительное. В зазоре будет большое магнитное поле, причем выигрыш очень заметен, в материале ЮНДК-25 БА.

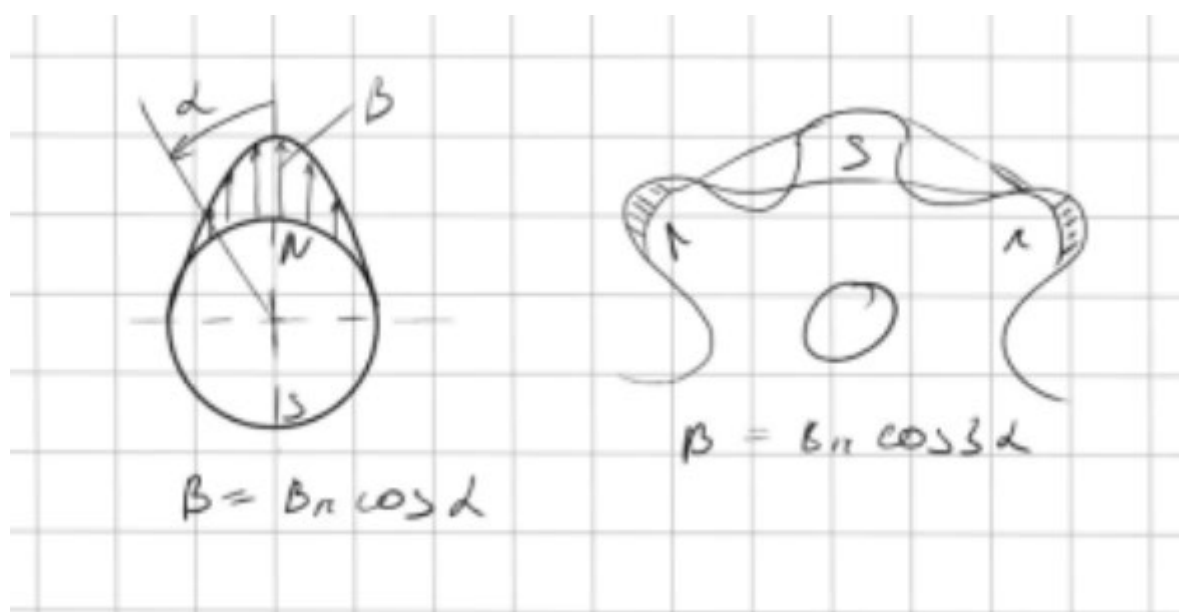


(Красным цветом, показано уширение доменов)

ЮНДК-25, ЮНДК-25БА, БА означает, что материал подвергся термомагнитной обработке. (Текстурированный материал). Не текстурированный материал ЮНДК-25. Материалы с БА в два раза лучше, за счет термомагнитной обработки. В двухполюсных магнитах — текстурированный материал, в шестипольном нетекстурированный, он хуже. Делают составной магнит.



Устанавливаются магниты (6 двухполюсных магнитов текстурированных, прошедших термоманитную обработку) на шестигранную деталь из магнитомягкого материала. Раз структура сформирована, получаете выигрыш в два или в два с половиной раза, на составном магните. Чтобы магниты удерживались, их магнитом заливают или пластмассой. Хороший датчик с хорошей характеристикой. Короткие лобовые части катушки.



Плохо, что магнитная индукция меняется по косинусному закону, потому что если рамка поворачивается, то меняется масштабный коэффициент прибора. Косинус малых углов примерно равен единице, то изменение  $B$  очень мало.

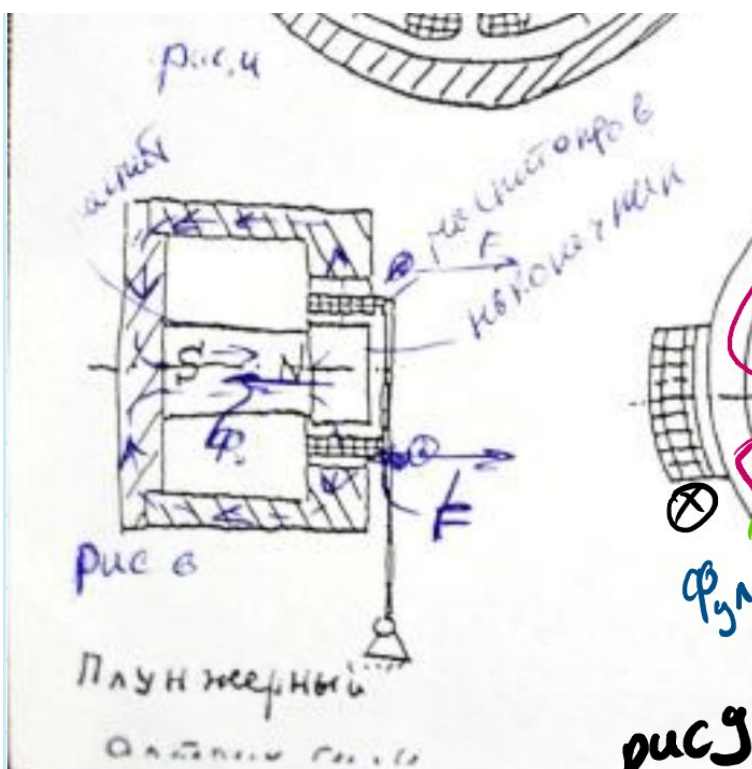
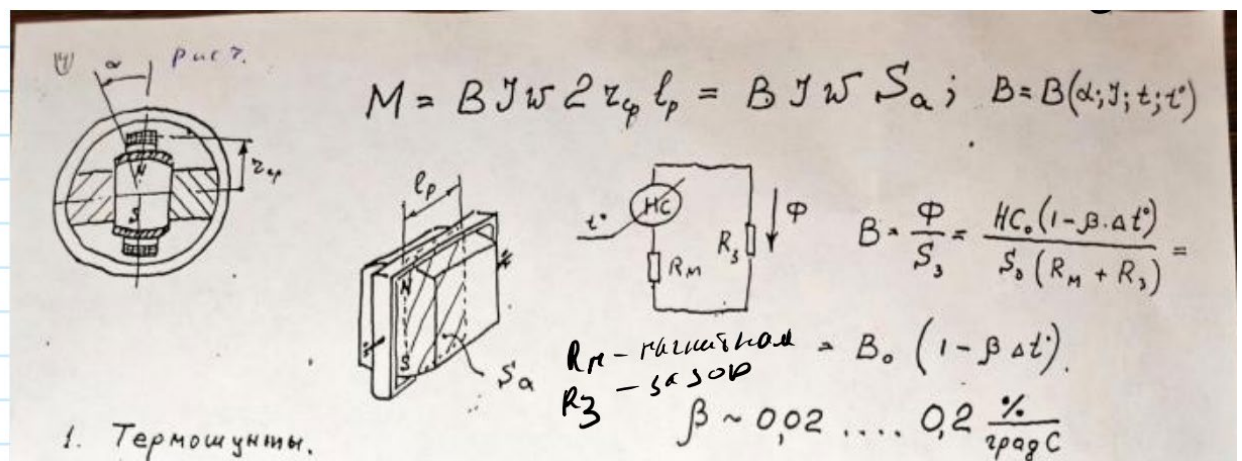
В шестиполосном магните.

Зависит от косинуса трёх альфа. А это изменение косинуса заметно, влияет на коэффициент чувствительности по положению катушки.

Чему равен момент в разборной конструкции?

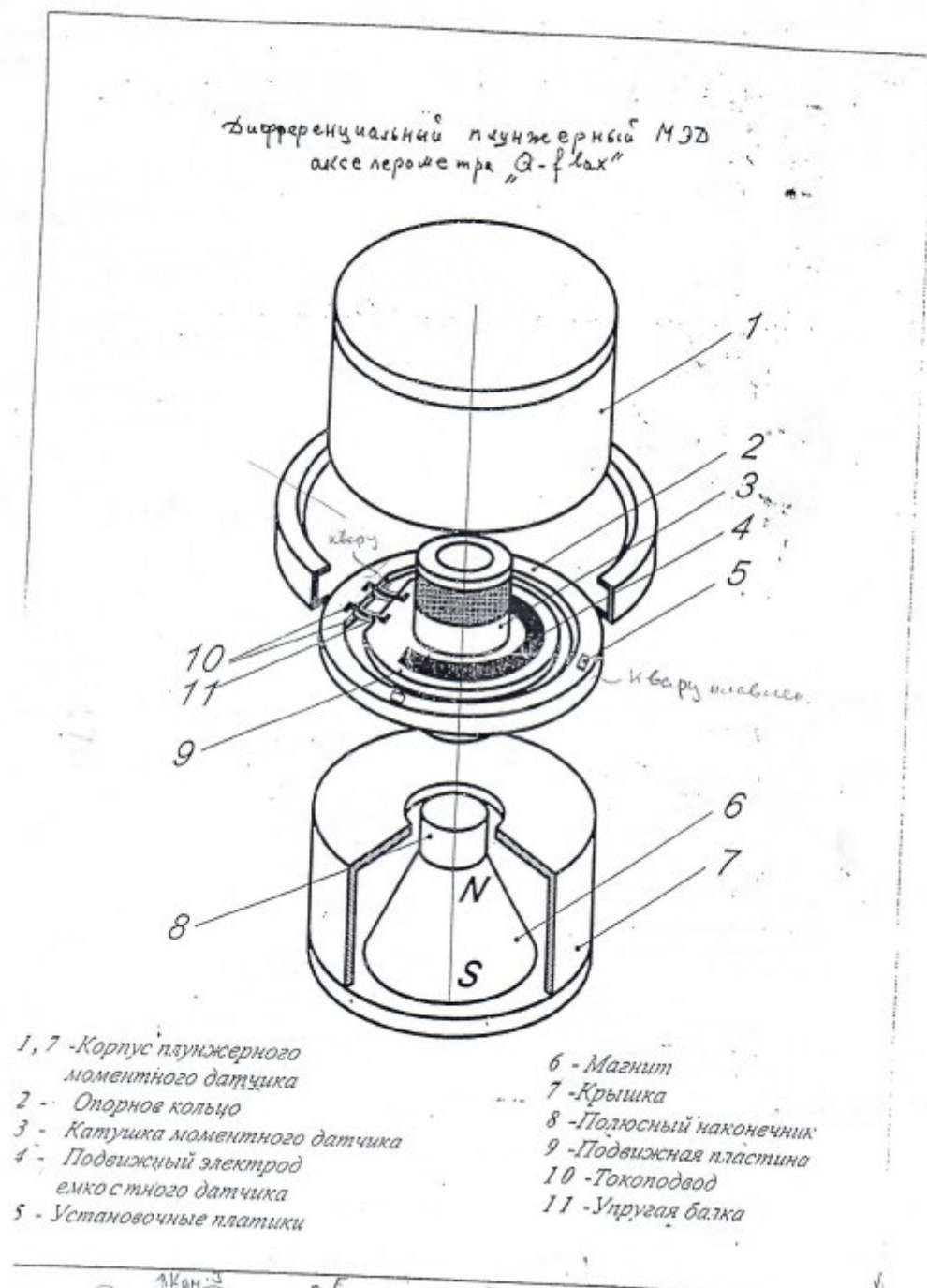
Он равен произведению- магнитной индукции\*ток\*число витков\*2 радиуса среднее (радиус сечения катушки)\* длину рабочей части катушки (где часть катушки находится в магнитном поле). 2 радиуса среднее\*длину рабочей части = активной площади катушки.

Число витков и площадь всегда должны сохраняться со временем, даже при воздействии температуры. Материалы магнитные могут деградировать со временем. Может меняться со временем, температуры и угловое положение катушки влияет.



## Проигрыватель (Наушники).

Внутри проигрывателя имеется постоянный магнит, полюсный наконечник (магнитомягкий материал), цилиндр с дном – магнитопровод. Из северного полюса выходит магнитный поток, протекает через: полюсный наконечник, наружную часть магнитопровода и возвращается назад.

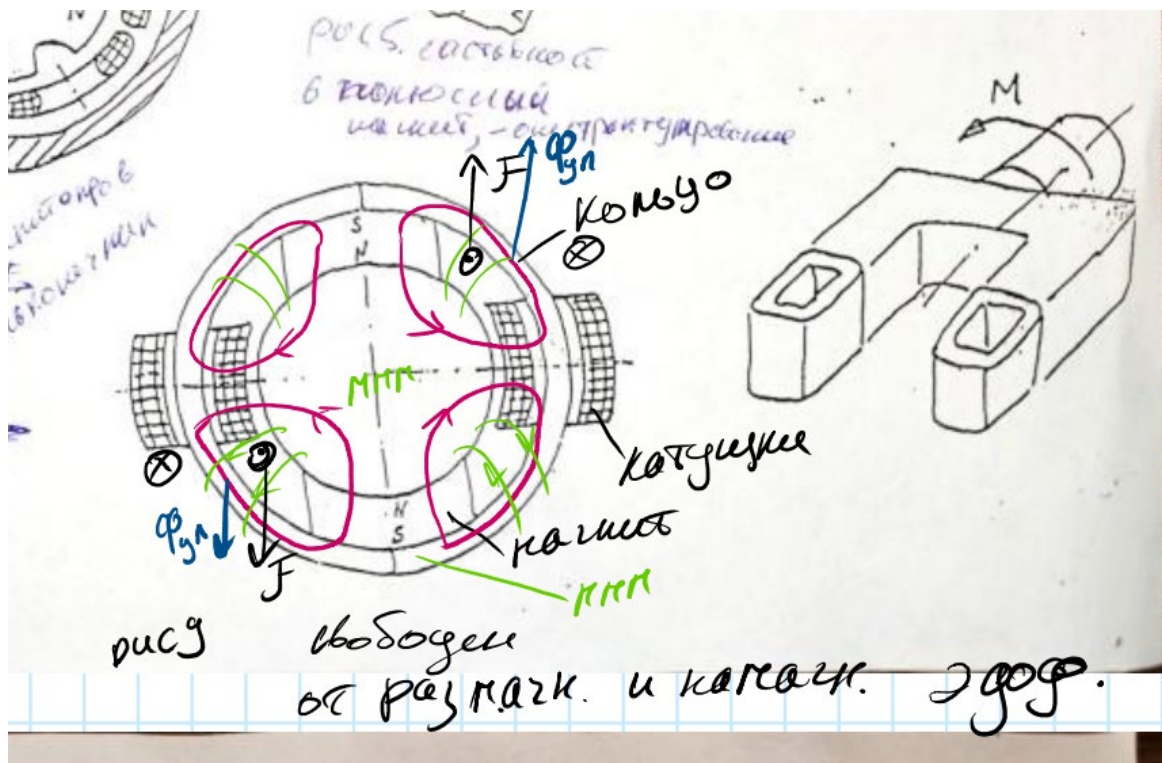


## Акселерометр КуФлекс

Центральная пластина из аморфного кварца (стекло). В этом кварце химическим путем вытравлена щель круговая и оставлены две перемычки, которые удерживают подвижную пластину относительно наружного кольца.



На центральную лопасть наклеиваются две катушки вот такого типа, как здесь показано?. Магнитопроводы. Магниты конические. Два магнитопровода с двумя катушками, образуют силу? (систему магнитную)??? А лопасть с катушками представляет собой маятник, который закреплен в упругих перемычках, толщиной 20 микрон. Лопасть может легко поворачиваться при малейших ускорениях. По поверхности перемычек напылено золото, тонким слоем золота, с помощью которого передается ток с кольца на пластину и потом на катушки. На лопасти наклеен датчик угла, представляет собой подвижный электрод напыленный на лопасть, а неподвижный электрод корпуса магнитных датчиков 1 и 7. Электроды четыре, два сверху и снизу, два емкости между электродами и заземленными корпусами магнитных систем, одинаково находящихся по середине или больше меньше смещению. Можно определить где находится лопасть, это сигнал снимается тоже с токоподводов напыленных на балке, поступает на усилитель, усилитель формирует ток обратной связи, позволяет определить ускорение этого акселерометра.



Какая особенность у прибора?

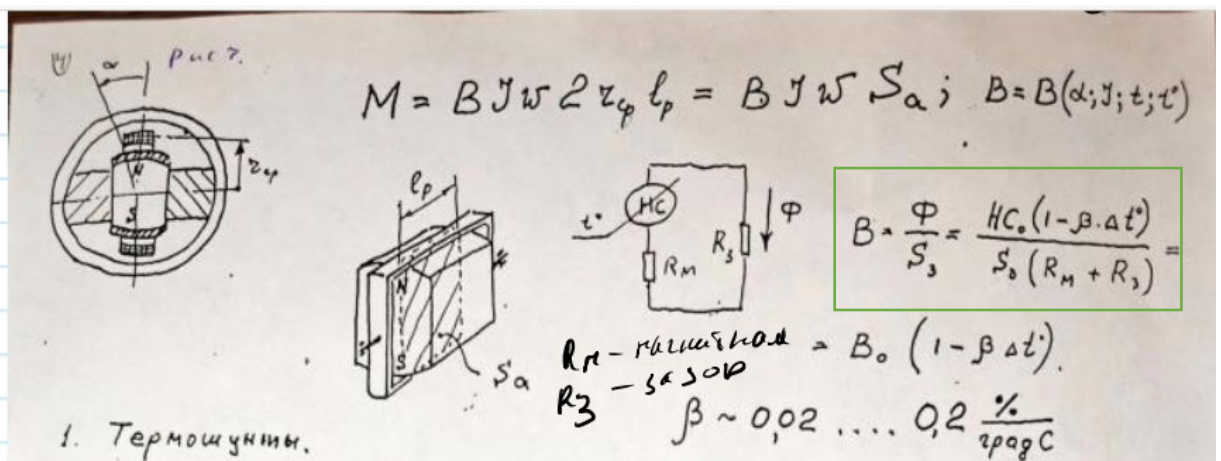
Кольцевой ток в катушке, создаёт магнитное поле, которое можно найти по правилу буравчика. Помимо потока создаваемым магнитом, появляется другой поток  $\Phi_{уп}$  от тока управления. Замыкается по тому же самому кольцу, в данном случае он будет вычитаться от основного потока (магнита), если поменять направление тока, то поток от тока будет суммироваться с основным потоком, следовательно, в зависимости от направления тока (определяется направлением ускорения) получим либо большую, либо меньшую крутизну датчика момента. Эффект намагничивания – размагничивания от тока



управления. Катушка с током, её втягивает в себя магнитопровод, она притягивает в себя железку. Если железка неподвижна, то катушку в себя притягивает (в магнитопровод). Электромагнитный момент магнитоэлектрического датчика момента. Притяжение. Независимо оттого куда направлен этот ток и вообще какой ток не имеет значение, всегда катушка втягивается в магнитопровод. Даже при переменном токе втягивается. Момент сила пропорциональна квадрату тока. На знак тока никак не реагирует. Каким образом с ней бороться? (позже). Здесь понятно зачем делаются катушки на лопасти, потому что верхняя катушка электромагнит втягивается вверх, а нижняя вниз. Поскольку у вас имеется дифференциальный датчик с одинаковыми магнитопроводами, то вверху втягивающая сила и нижнее взаимно компенсируется и тогда остается магнитоэлектрическая сила, которая нас интересует.

Что на что реагирует?

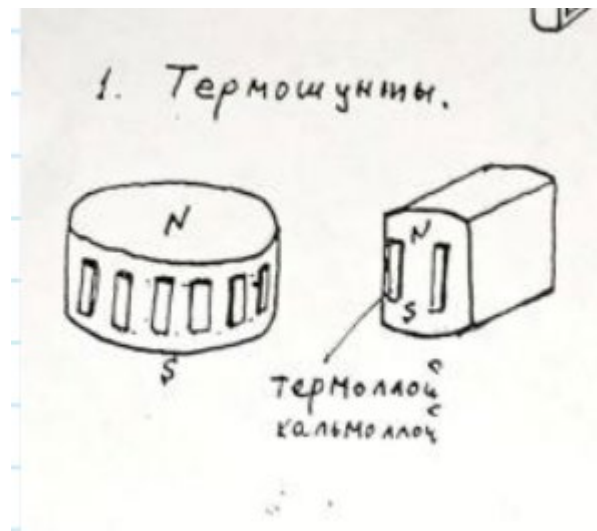
Вот угол, нулевое положение катушки относительно магнитопровода, там у нас имеется косинусная зависимость, также накладывается на эту зависимость мелкие изменения индукции из-за пузырьков воздуха, из-за включения грязи в сплав. Надо выравнять индукцию в зазоре, для того чтобы выравнять индукцию в зазоре, используется так называемый башмаки 😊. То есть на полюса магнита накладываются тоненькие пластиночки из магнитомягкого материала. Поскольку материал магнитомягкий, то вот здесь индукция у нас разная, то поскольку приложен электромагнитный материал, то сразу эта разность индукции, даёт боковой поток, который выравнивает магнитный поток в зазоре, в зависимости от альфа.



Источник намагничивающей силы определяется доменной структурой и зависит от температуры. Магнитное поле проходит через зазор, имеется магнитное сопротивление зазора  $R_s$ . Магнитный поток проходит через сам магнит, магнит тоже обладает магнитным сопротивлением  $R_M$ , поэтому получается сумма этих сопротивлений. Тогда индукция есть значение потока

деленное на площадь зазора, а поток сам отношение намагничивающей силы деленное на  $(R_m + R_z)$ .  $\beta \Delta t^0$  - температурная зависимость намагничивающей силы у магнита. Чем выше температура, тем меньше намагничивающая сила.

$\beta$ -0,2 у ЮНДК,  $\beta$ -0,02 у сплавов редкоземельных (самарий кобальт 5). Температурный диапазон работы датчика  $100^0$  от -60 до 80. 2% изменения магнитной силы недопустимо. Надо бороться с этим. Для этого используют термощунты, на поверхность магнита приклеивают или примагничивают кусочки магнитного материала, которые называют термоллой или кальмаллой.



Это материал который имеет большую зависимость индукции насыщения от температуры. В шунте та доменная структура, которая существует вся развернулась, вся перестроилась. Поэтому намагничивающее поле меняется, а поток остается прежним. Индукция насыщения она меняется с температурой, когда температура максимальна, то поток шунтирующий проходящий через этот шунт, получается минимальным. Когда охлаждается, то поток этот растёт. Если мы поставим шунты, то с одной стороны с ростом температуры, поток уменьшается поскольку на -бетта. Но с другой стороны уменьшается шунтирующий поток, потому что при росте температуры, уменьшается индукция термоллой, тем самым шунтирующий поток, поэтому подобрав количество иглочек термощунтов, можно регулировать шунтирующий поток. Можно устранить влияние - бетта. Но не идеально, можем менять дискретно. Ступенчатое изменение. Скачком. Компенсация не полная. Иногда намеренно вводят погрешность в прибор такую, которая компенсирует погрешность другую. В данном случае так и делают.

$$H_C = H_C (1 - \beta \Delta t); \quad \Phi_{ш} = B_{ш} \cdot n \cdot S_{ш} (1 - \beta_{ш} \Delta t)$$

$$B = \frac{H_C (1 - \beta \Delta t) - B_{ш} n R_M S_{ш} (1 - \beta_{ш} \Delta t)}{(R_M + R_3) S_3} = B_0 \left\{ \left[ 1 - \frac{B_{ш} \cdot n \cdot R_M S_{ш}}{B_0 (R_M + R_3) S_3} \right] - \left[ \beta - \beta_{ш} \frac{B_{ш} \cdot n \cdot R_M S_{ш}}{B_0 (R_M + R_3) S_3} \right] \Delta t \right\}$$

$$B_0 [1 - \dots] = B'_0; \quad [\beta - \beta_{ш} \dots] = -\gamma_1 \frac{B'_0}{B_0};$$

$$B' = B'_0 (1 + \gamma_1 \Delta t)$$

$\gamma_1 < 0$  - недокомпенсация  
 $\gamma_1 = 0$  - полная компенсация  
 $\gamma_1 > 0$  - перекомпенсация

$m \ell \alpha = B \omega S_\alpha I_{gm}; \quad U_{вих} = I_{gm} Z_{эт} = \frac{m \ell \alpha Z_{эт}}{B'_0 (1 + \gamma_1 \Delta t) \cdot \omega \cdot S_\alpha}$

165 м. п.т. к скорости вращения

Внимание на гамма.

Делают перекомпенсацию. Когда закон изменения индукции будет равняться (зеленая рамка). Перекомпенсация означает, что выбрали большее число иголок чем нужно. Изменился знак температурной погрешности прибора. Если раньше температура поднималась, а индукция уменьшалась, масштабный коэффициент становился больше при одинаковом ускорении, то в случае перекомпенсации получается наоборот. Температура растет и индукция растёт, соответственно масштабный коэффициент получается другой. Как можно повлиять на масштабный коэффициент ещё? С одной стороны мы влияем с помощью иголок.

$\gamma_1 > 0$  - перекомпенсация

$$m \ell \alpha = B \omega S_\alpha I_{gm}; \quad U_{вих} = I_{gm} Z_{эт} = \frac{m \ell \alpha Z_{эт}}{B'_0 (1 + \gamma_1 \Delta t) \cdot \omega \cdot S_\alpha}$$

$$U_{A0} = I_{gm} Z_{gm} (1 + \alpha_{cu} \Delta t); \quad I_{ш} = \frac{U_{A0}}{Z_{ш}}; \quad I_{ош} = I_{gm} + I_{ш} =$$

$$= I_{gm} \left( 1 + \frac{Z_{gm}}{Z_{ш}} \right) \left[ 1 + \frac{Z_{gm}/Z_{ш}}{1 + Z_{gm}/Z_{ш}} \alpha_{cu} \Delta t \right] = \frac{m \ell \alpha (1 + Z_{gm}/Z_{ш})}{B'_0 (1 + \gamma_1 \Delta t) \omega S_\alpha} (1 + \gamma_2 \Delta t)$$

$\gamma_1 = \gamma_2; \quad U_{вих} = I_{ош} Z_{эт} = \frac{m \ell \alpha Z_{эт}}{B'_0 \omega S_\alpha} (1 + \gamma_2 \Delta t)$

$\gamma_1 \sim 2 \cdot 10^{-4}$

$\frac{Z_{gm}/Z_{ш}}{1 + Z_{gm}/Z_{ш}} \cdot 0,004 = 2 \cdot 10^{-4} \rightarrow Z_{ш} \sim 20 Z_{gm}$

величина перекомпенсации

165 м. п.т. к скорости вращения

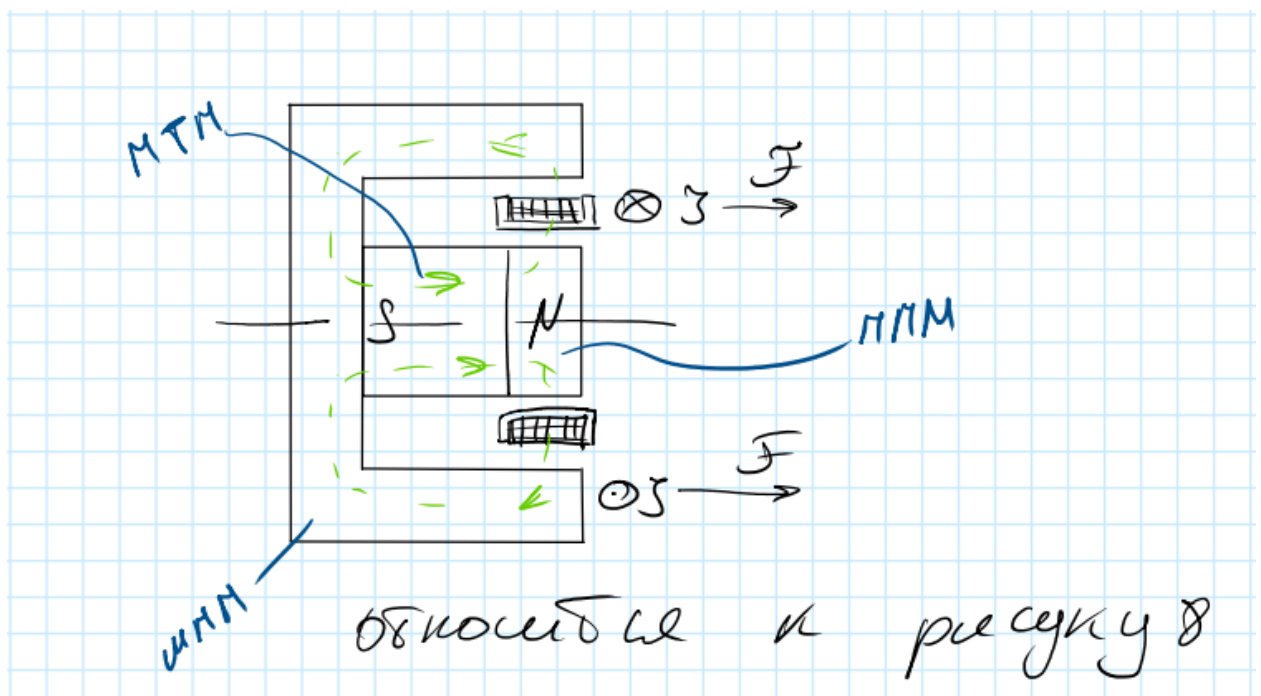
На электрической схеме. Ток к двум обмоткам протекает, создаёт момент, потом он течёт по эталонному сопротивлению. Эталлонное сопротивление включается, для того чтобы определить масштабный коэффициент прибора. И назад на усилитель идёт. Получается выходной сигнал пропорционален току.

В идеале у нас внешний момент акселерометра уравнивается числом витков,  $B$ ,  $S_a$ , ток. (красная рамка). Значит напряжение будет равняться следующей формуле. Выходной сигнал пропорционален выходному ускорению  $a$ . Но в знаменателе есть член, который связан с перекомпенсацией.

Если нет зависимости от температуры, то этой штуки в знаменателе нет. Раз магнит зависит от температуры, то это есть.

Давайте испортим прибор. Давайте включим параллельно датчику момента сопротивление шунта. Оно будет искажать работу прибора. Но раз катушка сделана из меди. А медь с температурой меняет своё сопротивление. Если нагревается прибор, то на катушке растёт напряжение, значит растёт ток протекающий через шунт. И часть тока идущее через общее сопротивление становится зависящий от температуры медной обмотки. Выбрав сопротивление шунта определенным образом, можем полностью убрать ошибку перекомпенсации. Можем полностью убрать это влияние.

8 сентября



Плунжерный датчик. Полусный наконечник из магнитомягкого материала. Магнитомягкий материал служит для того чтобы, поле которое создается магнитом замыкается вот таким образом. Имеется катушка. По обмотке идёт кольцевой ток, магнитное поле по магнитомягкому материалу, равномерно распределяется, поэтому здесь равномерное магнитное поле в зазоре. Дальше возникают магнитоэлектрические силы. Показаны направления тока на рисунке. Правило левой руки. Силы действующие на катушки будут

направлены следующим образом. (На рисунке). Сила может выталкивать катушку из зазора, либо назад втягивать.



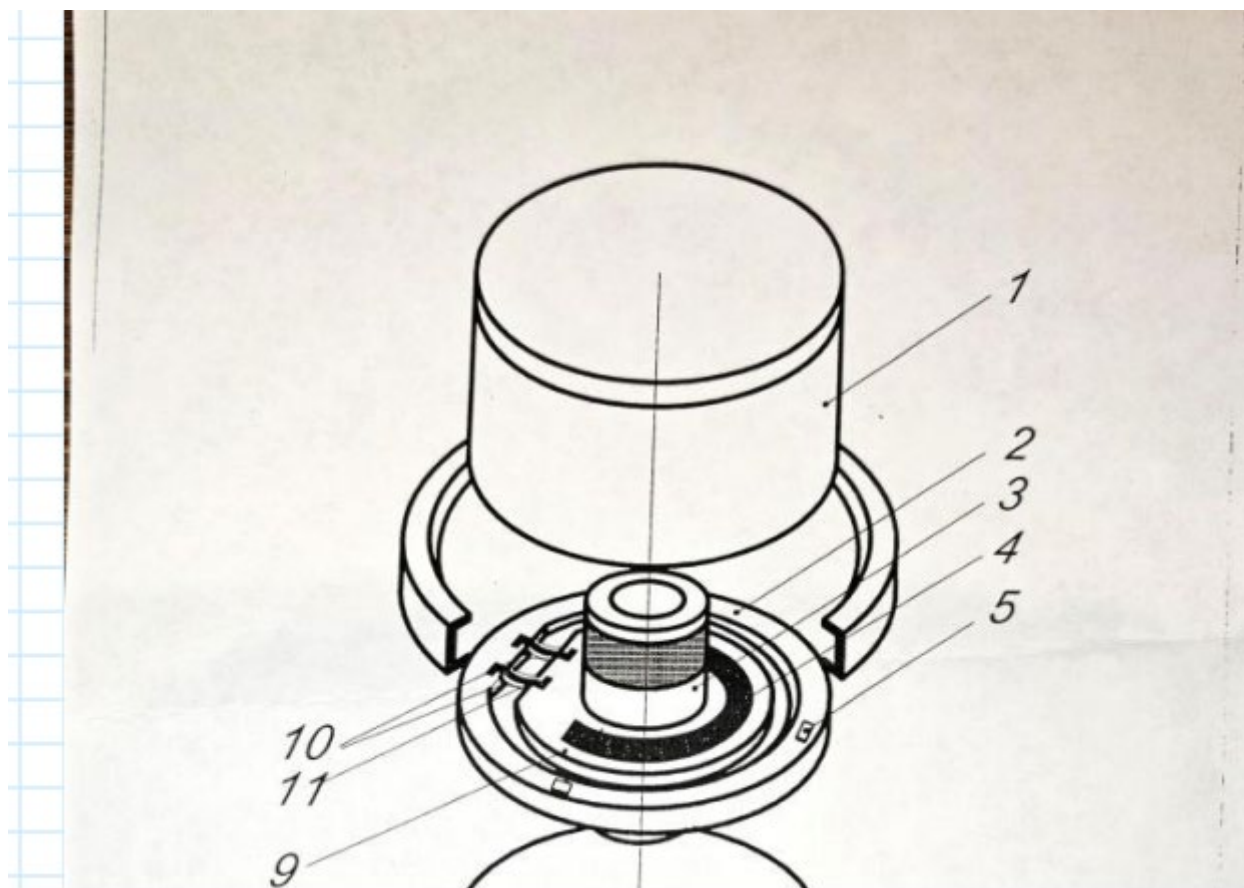
Акселерометр Куфлекс. Почему дорого стоят приборы? Хотя они и простые по конструкции. (так как индивидуальное производство, не массовое).

Диск из плавленого кварца, толщина 0,6 мм. Используются материалы типа фоторезисторов, которые устойчивы к травлению. Кварц травят плавиковой кислотой. В качестве защитного материала использовался пектин (сироп от яблок). Сироп наносился на шайбу, подсушивался, получалась плёнка, жта плёнка устойчива к воздействию плавиковой кислоты, правда долго нельзя выдерживать. Травят только открытые участки. Делают кольцо и травят хитро. Берут шайбу, колечко. Колечко не защищено и щель не защищена. Защищено там где балки, остальное травится. Дальше эту шайбу помещают в плавиковую кислоту. Глубину ямки можно померить, зная на какую глубину травится. Всё закрыто пектином, через который плавиковая кислота не проходит, а остальное открыто и пошло травление в глубь. Потом открывается следующий участок. Там есть балки. (Звонят сегодня из Молдавии, сумашедшие, всё никак не успокоятся 😊) И начинает травить. (Опять прекрасный рингтон, не из Молдавии позвонили, отсюда позвонили). Эти участки встречаются, образуется дырка сквозная. Поскольку появляется дырка, здесь остаётся материал, если начальный подтрав был на глубину 10 микрон, то вот здесь 20 микрон. Получается центральный язычок, который может колебаться на упругих балочках, толщиной 20 микрон. Упругие допускают большие деформации по углу, порядка 30°. Опоры не нужны. Кварц прекрасный материал, не

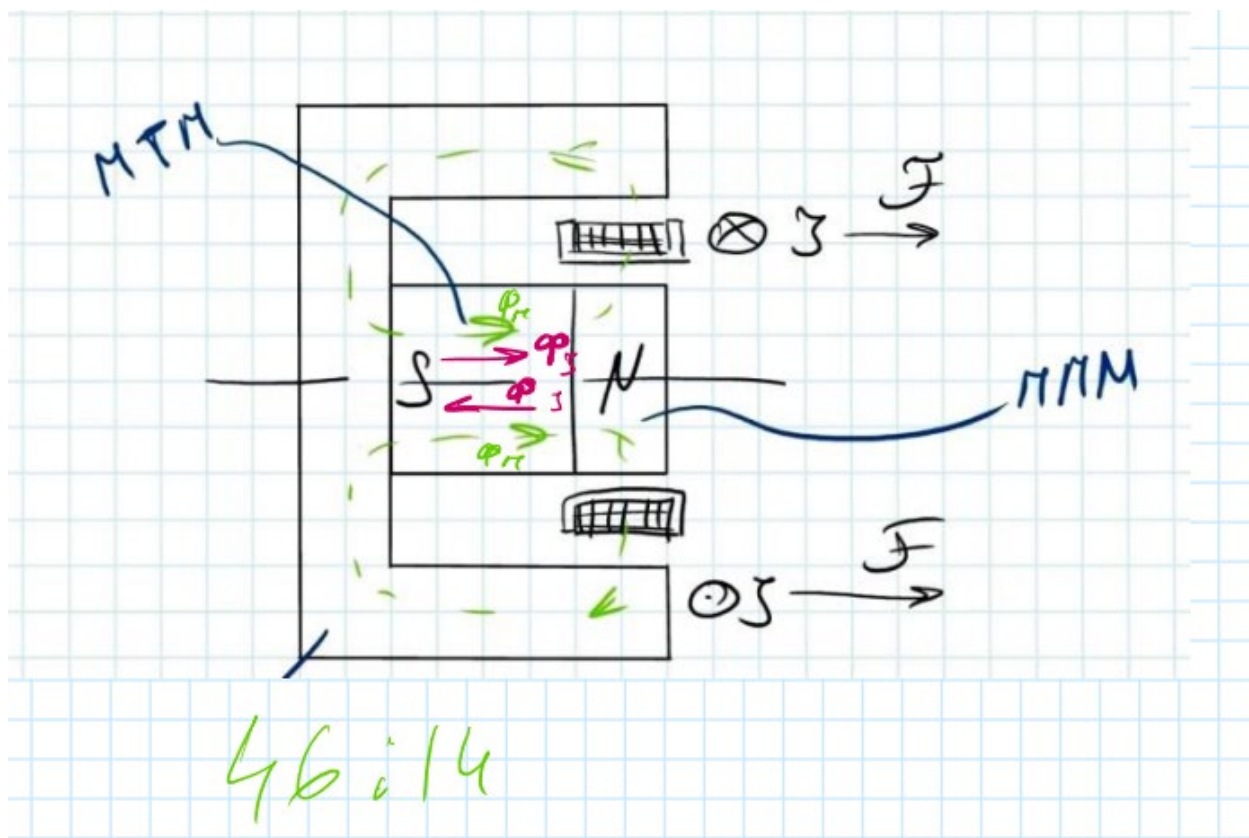


гистеризесный, не проявляет специфических свойств. Отмывают пластину и напыляют металл.

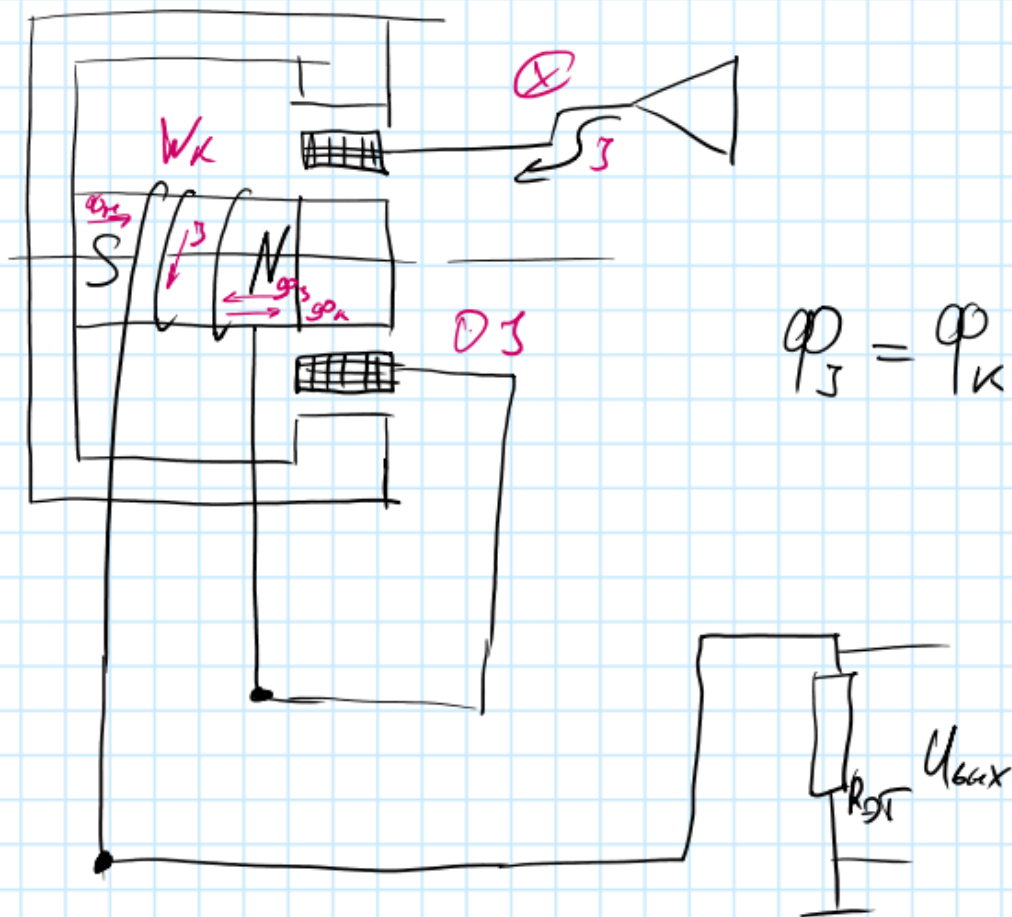
Контакт идёт через тонкий слой золота, толщина 2000 ангстрем. (0,2 микрона). Золото практически никакого сопротивления не оказывает и обеспечивает подвод электричества к язычку. Напыляется электрод, от него тоже делается токоподвод. Это электроды ёмкостного датчика положения, имеются две пластины, зазор между ними меняется, ёмкость меняется. Изменение ёмкости фиксируется. Можете увидеть на сколько сместился маятник.



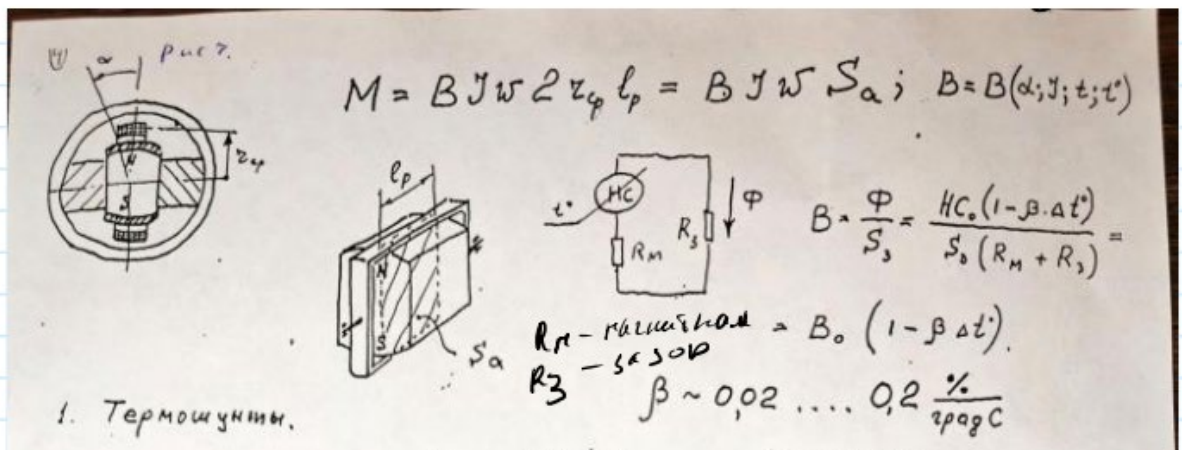
Токоподводы 10 и 11. Не требуется никаких операций. Золото просто напыляется (прекрасный рингтон, покоя не дадут). Две катушки с двух сторон. Две магнитные системы. Для того чтобы магнитные датчики нормально работали, нужны магнитные системы. Сверху снизу два корпуса, на них наклеивается сбоку деталь соединительная 2. Эти корпуса сжимаются. Получается готовый прибор. Основной акселерометр во всём. Высокая точность. Много технологических тонкостей в нём.



Особенность куфлекс, есть эффект размагничивания магнита, за счет того что в катушке протекает ток, если вот такой ток протекает по катушке, пользуясь правилом буравчика. Протекает поток от магнита, а вот эта катушка она создаёт собственное магнитное поле  $\Phi_y$  управления. Если ток течет так. То он уменьшает магнитное поле, создаваемое магнитом. А если другое направление тока, то поток управления увеличивает общий магнитный поток. То в зазоре получается либо больше, либо меньше – не постоянный. Ток мешает работе датчика. Ток создает ненужный момент. Катушка с током притягивается к железу. Если пускаем ток, то катушка стремится в магнитопровод. Электромагнитная сила. С этим эффектом надо бороться. Делаются две катушки сверху и снизу, дифференциальные датчик. Две магнитные системы. Две катушки. Их взаимодействие с магнитными цепями компенсируется. Это называется дифференциальный датчик. Делается дифференциальным для того чтобы исключить влияние тока на показания прибора. А можно ли не делать два датчика и обойтись одним датчиком? Да можно. Акимов предложил другую схему плунжерного датчика.



(Схема Акимова). Постоянный магнит, полюсный наконечник, магнитопровод, катушка с каркасом. Чтобы избежать подмагничивания или размагничивания магнита, расположил вторую обмотку и соединил с усилителем, который питает эту катушку. Ток от усилителя течет, одновременно течет по этой катушке и на эталлонное сопротивление, с которого снимается выходное напряжение акселерометра. Эти катушки создают подмагничивающее или размагничивающее эффект. При таком токе, создается поток управления, от этих катушек. А эта катушка включена встречно этой катушке.  $W_k$  (дубльвэ компенсационное) эта катушка создаёт  $\Phi_k$  эф компенсационный, причем  $\Phi_y = \Phi_k$ .  $\Phi_m$  остаётся неизменным, этот общий магнитный поток остается неизменным, значит крутизна у датчика сохраняется постоянным. Компенсационная обмотка полезна, хорошо работает.



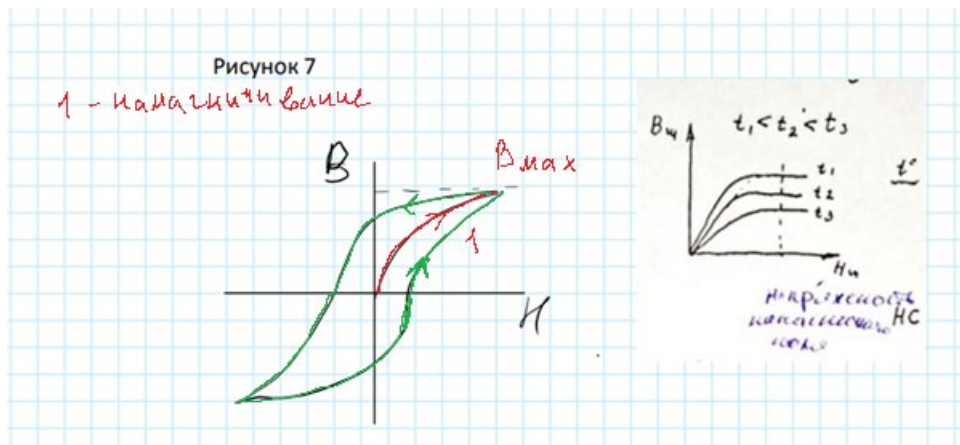
Если катушка находится в середине зазора, то расположение в наибольшей индукции, если повернуть, то попадает в зону разреженного поля, крутизна уменьшается, поэтому надо стремиться к тому, чтобы рамочка никуда не отклонялась. Надо сделать, так чтобы рамочка оставалась всё время в одном и том же положении, независимо от того какое ускорение или какую скорость измеряет гироскопический прибор. Как это сделать? Что такое астатические системы?

Всякая система регулирования она имеет статическую ошибку. Если самолет отклоняется от заданного курса, то гироскоп сохраняет неподвижное положение, момент отклонился, повернул статор датчика угла и с этого датчика угла снимается сигнал равный отклонению самолета от курса (Как будто Кулешов по другому объяснял...). Уменьшают это отклонение, но до нуля довести нельзя. Какое-то согласование должно сохраниться. Это рассогласование носит название статической ошибки. Но есть следящие системы, которые внутри компенсационного контура поставлен интегратор. Если есть интегратор, то появляется сигнал отклонения самолёта, этот сигнал интегрируется в интеграторе, запоминается, самолет возвращается на тот же самый угол. А отклоненные рули удерживаются за счет того, что интегратор накопил сигнал управляющий, поддерживающий отклонение руля. Такая система она без статической ошибки называется астатическая. То же самое в акселерометре. Появилось ускорение, под действие ускорения маятник отклоняется, с емкостного датчика снимается сигнал. Этот сигнал поступает на усилитель. Усилитель создает ток датчика момента, датчик момента удерживает маятник от дальнейшего отклонения. Маятник отклонился, появились все эти сигналы и ток датчика момента удерживает маятник в отклоненном положении. Ток пропорционален измеряемому ускорению. Это статическая ошибка. Потому что отклонение маятника, которое нужно для того чтобы скомпенсировать момент инерционный, он обязательно должен быть. А если в контур поставить интегратор, то тогда маятник отклонился, интегратор накопил управляющий сигнал, он поддерживает ток датчика момента, который

нужен, а маятник при этом возвращается полностью к нулевому положению. Эта система астатическая. Для того чтобы хорошо работал датчик момента, у которого момент зависит от угла альфа, нужно этот угол альфа устранить, для этого делают астатическую систему. Тогда маятник возвращается в ноль, деформации балочек обращается в ноль, повышается точность прибора.

Влияние времени. Нужен стабильный магнит для длительного времени эксплуатации прибора. У магнита должны быть хорошие энергетические характеристики. В материале ЮНДК есть температурный коэффициент конструкции на уровне 0,02 % на градус. Если много градусов, изменение очень большое индукции.

Самарий кобальт 5 обладает большой энергией, по сравнению с ЮНДК. Но температурный коэффициент не 0,02 % на градус, а 0,2% на градус. То есть в 10 раз хуже, чем у ЮНДК. Каким способом бороться с тепловой зависимостью материала? Используются термошунты (термоллой или кальмоллой). В чем особенность этих материалов? Из этих материалов, вырезаются тоненькие иголочки, пластиночки, и эти пластиночки примагничиваются к магниту. Они магнитомягкие, хорошо прилипают к магниту, их дополнительно наклеивают. Иголочек делается много. В чем особенность этого материала?

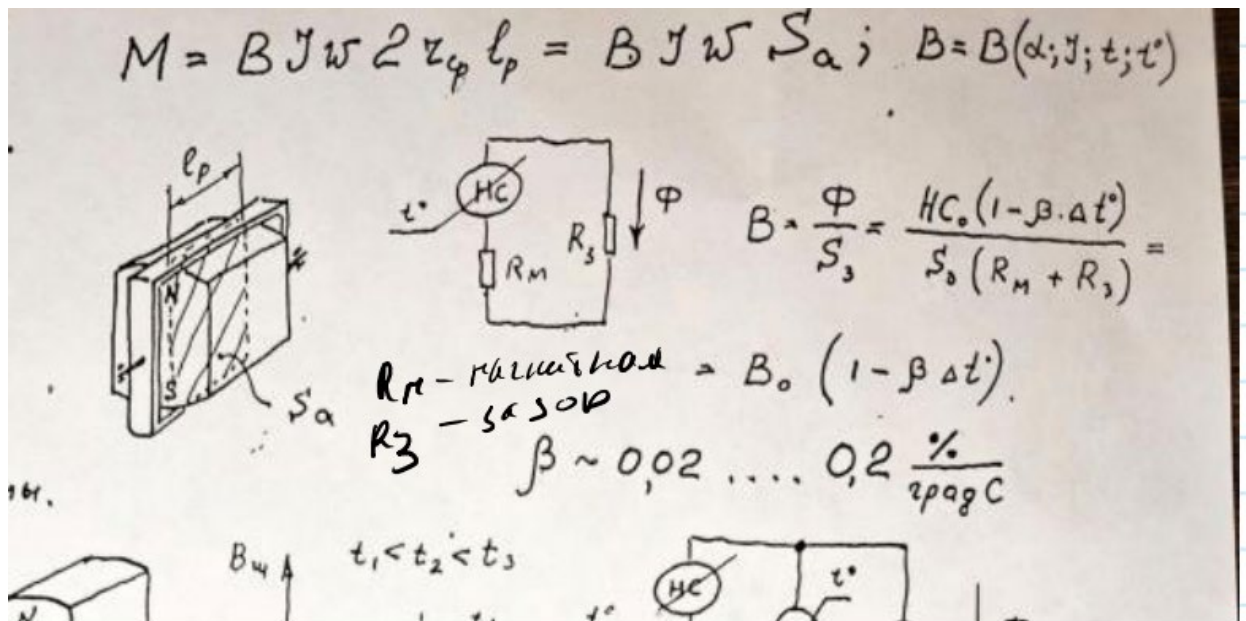


Петля гистерезиса. Когда материал намагничивают (участок красный 1), он достигает  $B_{\max}$ , это говорит о том, что все домены выстроились должным образом и больше не хотят перестраиваться. То есть материал насытился. Нас интересует только участок насыщения.

Каждая из характеристик справа, соответствует своей температуре. Термоллой обладает сильной чувствительностью к температуре. С нагревом  $B_{\max}$  сильно меняются.

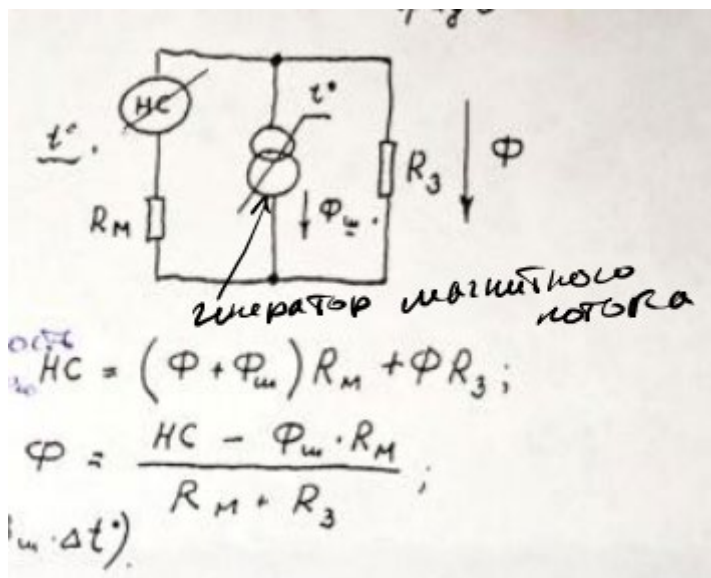
Обратимся к магнитной цепи





Тогда индукция есть значение потока деленное на площадь зазора, а поток сам отношение намагничивающей силы деленное на  $(R_M + R_3)$ .  $\beta \Delta t^0$  - температурная зависимость намагничивающей силы у магнита. Чем выше температура, тем меньше намагничивающая сила. Собственная намагничивающая сила магнита падает с температурой.

Когда наклеиваем на поверхность магнита термошунты, то часть магнитного потока которое создается магнитом, она течет по сопротивлениям + появляется магнитный поток, который замыкается через термошунты. Термошунты быстро приходят в режим насыщения, поэтому они находятся в режиме  $B_{\text{макс}}$ . Тогда эквивалентная схема будет выглядеть вот таким образом.



Сердечник находится в насыщении, поэтому если меняется немного свойство магнитной цепи, как стабилизатор потока, определяется только свойствами термошунта. Генератор потока меняет поток, в зависимости от температуры.

Конечно, тем самым портим магнит. Так как навешали термошунтов, то часть потока пойдет уже не через зазор, а через термошунты. Эффективность у магнита уменьшается.

$$H_c = (\Phi + \Phi_{ш}) R_m + \Phi R_3;$$

$$\Phi = \frac{H_c - \Phi_{ш} \cdot R_m}{R_m + R_3};$$

(Верхняя формула). Намагничивающая сила, равна сумме двух потоков, текущих через зазор, (термошунты + по телу магнита) на сопротивление + падение магнитного напряжения на сопротивлении зазора.

Из этой формулы выражаем поток.

$$\Phi_{ш} = B_{ш} \cdot n \cdot S_{ш} (1 - \beta_{ш} \cdot \Delta t)$$

Поток через термошунты. Это поток уменьшается с температурой. Какая особенность? Магнит с нагревом ухудшает свои свойства. Но шунт при нагреве, он потребляет всё меньшую и меньшую энергию. Шунтирующий поток уменьшается, уменьшается интенсивнее, ухудшаются свойства самого магнита. Поэтому при холодном состоянии много потребляет, а при нагреве перестает. Хотя магнит и слабеет, его подсаживают 😊, то одно другое компенсирует. Какая индукция в системе, в зазоре получается при наличии шунта преобразуют индукцию.

$$B = \frac{H_c (1 - \beta_{ш} \Delta t) - B_{ш} n R_m S_{ш} (1 - \beta_{ш} \Delta t)}{(R_m + R_3) S_3} = B_0 \left\{ \left[ 1 - \frac{B_{ш} n R_m S_{ш}}{B_0 (R_m + R_3) S_3} \right] - \left[ \beta - \beta_{ш} \frac{B_{ш} n R_m S_{ш}}{B_0 (R_m + R_3) S_3} \right] \Delta t \right\}$$

$\underbrace{\quad}_{\text{сопр. магн.}} \quad \underbrace{\quad}_{\text{сопр. зазора}}$

$$B_0 [1 - \dots] = B_0'; \quad [\beta - \beta_{ш} \dots] = -\gamma \frac{B_0'}{B_0};$$

$B_0$  – начальная индукция. В таком включении, индукция зависит от начальной индукции, которая приводится к  $B_0'$ , только  $+\gamma \Delta t$ , шунты сильнее влияют, чем это нужно, поэтому они меняют знак чем это нужно, в индукции.

Если получаю гамма 1 меньше нуля, то поставил пластинок меньше чем нужно. Если гамма 1 больше нуля, то поставил пластинок больше. Создал перекомпенсацию. Делают перекомпенсацию, выбирают пластинки больше чем нужно.

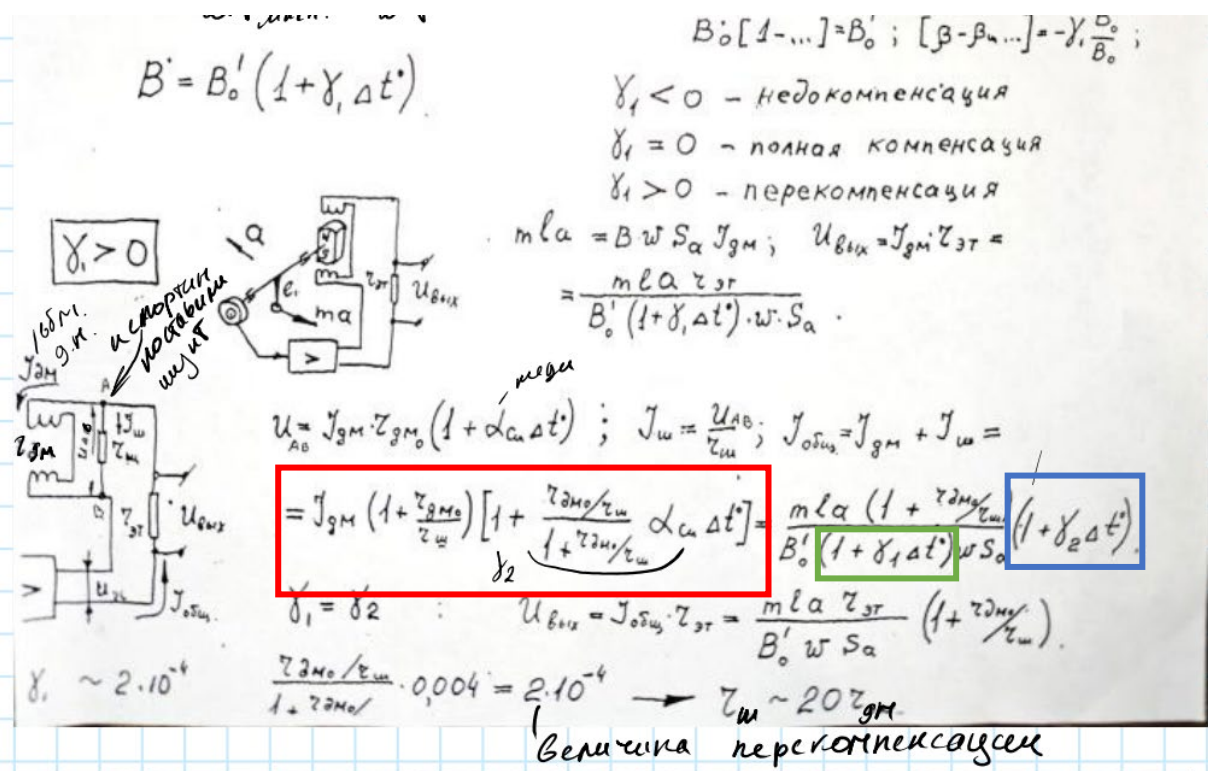


Схема акселерометра, подвешен маятник на камневых опорах, датчик угла, датчик момента. Сигнал с ду поступает на усилитель и на обмотку дм, который развивает момент, удерживающий маятник от отклонения, появилось ускорение а, появился инерционный момент  $m l a$ ,  $l$  — длина плеча. Этот момент уравновешивается моментом, моментного датчика (индукция в зазоре\*число витков в катушке\*активную площадь рамки\*ток). Выходной сигнал у акселерометра будет определяться током датчика момента, вообще ток датчика момента должен быть пропорционален ускорению. Напряжение выхода (ток датчика момента\*прецезионное сопротивление включенное в обратную связь).

Установил то количество шунтов, чтобы обеспечить перекомпенсацию нуля. Чтобы перекомпенсация была полная. Намеренно портят прибор, портят характеристики, создают дополнительный источник погрешности, который имеет знак противоположный знаку той погрешности, которую нам нужно устранить. Вот вам надо устранить погрешность, которая определяется величиной перекомпенсации  $\gamma$  на  $\Delta t$ . Теперь надо ввести такую погрешность, которая выдавала бы такой знак зависимости от температуры.

Давайте испортим прибор. В катушке медь, она меняет сопротивление с изменением температуры. Ток датчика момента, он вообще-то от установки шунта никак не меняется. Если ток изменится, то изменится момент и момент дм, не будет удерживать маятник от дальнейшего отклонения. Момент всегда определяется уровнем ускорения, характеристиками дм. Он останется неизменным, даже если поставим сопротивление шунта параллельно дм. Теперь могу посмотреть, что же у меня за напряжение на добавочном медном сопротивлении, как мне его определить? Мне надо определить напряжение

между точками А и В. Оно равняется току  $I_{дм}$  \* сопротивление  $R_{дм}$ . А сопротивление  $R_{дм}$  будет равняться ( $R_{дм} * (1 + \alpha_{медь} \Delta t)$ ). Катушка нагревается, она меняет своё сопротивление, поэтому здесь появляется дополнительный потребитель тока, который будет зависеть от температуры. Определим, чему равняется ток шунта. Это будет напряжение АВ деленное на сопротивление шунта. Чему равняется общий ток формирующийся усилителем. Он будет равняться сумме токов  $I_{дм}$  и шунта. Подставляю значения и получаю формулу (красная рамка). Ток общий должен создавать момент, который уравнивает инерционный момент. Гамма 1, то что даёт  $I_{дм}$  в перекompенсации (зеленая рамка) (ошибка датчика момента из-за того, что моментную обмотку зашунтировали). Теперь квадратную скобку можно записать как  $(1 + \gamma_2 \Delta t)$  она определяется собственным магнитом с шунтами (синяя рамка). Если я выберу параметры датчика, таким образом, чтобы величина  $\gamma_1$  будет равняться величине  $\gamma_2$ , то у меня числитель и знаменатель взаимно уничтожатся и получается выходной сигнал, который равняется общему току на сопротивление эталонное. То есть температура исчезла для выходного напряжения. Прибор нечувствителен к изменению температуры.

Есть одно опасение, если я поставил такое сопротивление, а не окажется, что это сопротивление очень маленьким и не скажется ли на работе усилителя?  $\gamma_1$  величина  $2 * 10^{-4}$  – перекompенсация. Эту величину намеренно взял с противоположным знаком начальной перекompенсации.  $\beta$  и  $\gamma_1$  у меня одинаковые. Чему равняется сопротивление шунта? Сопротивление шунта должно быть в 20 раз больше сопротивления  $R_{дм}$ . Для усилителя это нипочем. Можем плавно менять сопротивление, можем добиться полной компенсации температурной зависимости. Что плохо? Медная катушка она меняет сопротивление не только из-за температуры, но она ещё нагревается текущим по ней током. Это плохо. Компенсация получается, но она немножко не полная, сказывается нагрев катушки. Этот метод всё равно используют.

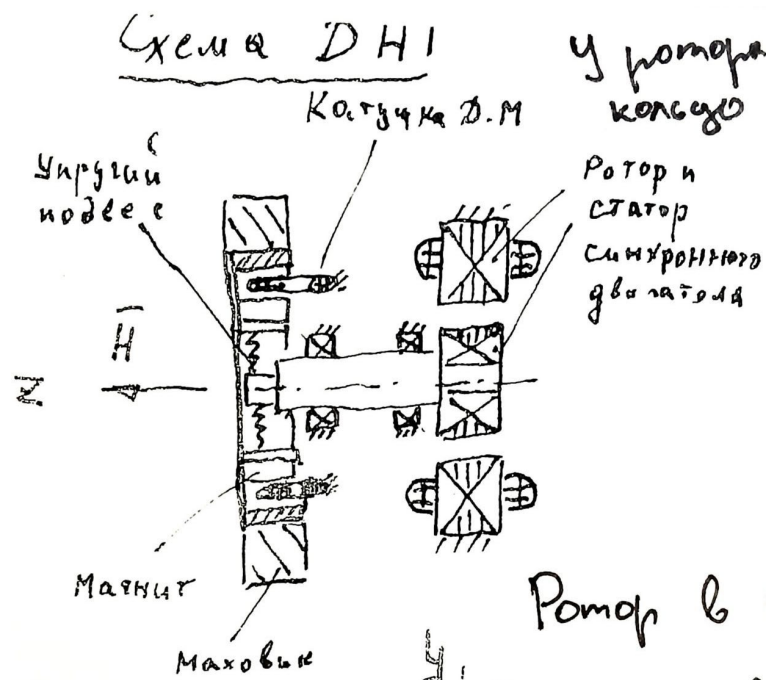
## Лекция 15 сентября

Разговор у нас сегодня будет о датчиках момента, которые применяются в динамически настраиваемых гироскопах (ДНГ).

Напомню вам что такое ДНГ. Он может быть в двух видах. Первый вид – это свободный гироскоп на базе ДНГ.

Что он содержит?

Вот посмотрите на картинку:



У него имеется ротор и ось, на которую установлен двигатель, который крутит эту ось с большой скоростью. Гироскоп имеет большой момент инерции вокруг своей оси  $z$  и получается большой кинетический момент.

Ротор связан с осью. В свободном гироскопе, вообще говоря, должен карданов подвес или какая-то подвеска, которая не создает никаких возмущающих моментов. Это может быть электростатический гироскоп, где крутится сферический ротор или магнитный подвес, где крутится магнитный ротор. Они только электрическим полем связаны поворот с осью подвеса и там момент практически нулевой.



В данном случае, поскольку имеется упругая связь между осью и ротором (Раньше можно было посмотреть и почувствовать эту связь, но уже студенты уронили, поэтому движение не очень ощутимо).

А так, хороший упругий подвес, через промежуточное кольцо или через два делается подвеска. Если повернете на какой-то угол, он будет устанавливаться в положение, перпендикулярное оси вращения.

Как свободный гироскоп использовать нельзя, потому что есть вот упругий момент, но размеры ротора выбраны таким образом, что на него при вращении действуют центробежные силы инерции, они всегда действуют. Момент, от этих центробежных сил инерции при вращении ротора стремится повернуть ротор в положение, когда у него ось, проходящая через диаметр, совпадает с осью вращения двигателя.

Если он не вращается, вы имеете упругий момент, который удерживает его в нулевом положении, а если начинаете вращать (как в регуляторе Уатта).

Представьте подвес и два грузика (он наверно рисовал это на доске, но я загнула как выглядит этот регулятор Уатта):

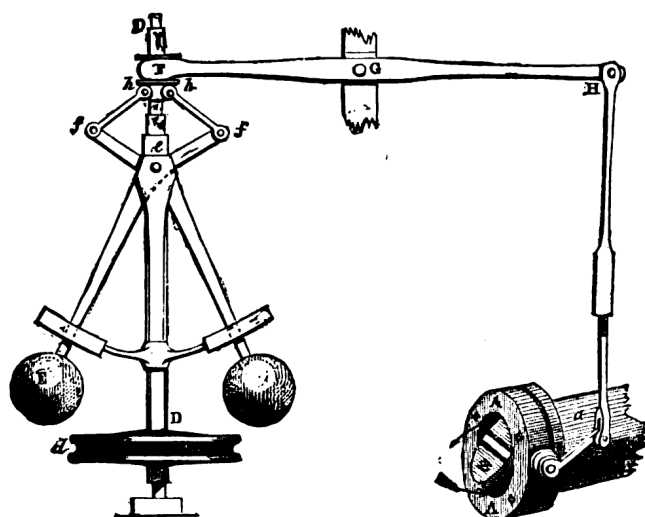


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

При вращении грузики под действием центробежных сил инерции стремятся повернуться относительно оси вращения. Механизм связан пружиной с двумя грузиками и когда скорость начинает быть слишком

большой, отклонение большое, открываются клапаны, которые не дают разгоняться больше, чем нужно.

Такой же эффект вращения, т.е. плоскость ротора стремится совместится с осью  $z$  (это момент центробежных сил инерции). Так вот, когда момент центробежных сил инерции, если подберете скорость определенное вращения и расчетным путем подберете соотношение моментов инерции ротора, то при определенной скорости момент от центробежных сил инерции уравнивает упругий момент.

В результате при малых отклонениях ротора от нейтрального положения два момента взаимно компенсируются и ротор ведет себя как свободное тело.

*Во времена, когда я учился в бауманском институте, был у нас один поэт, который сочинял хорошие стихи, в частности про гироскопы...*

Можно использовать такой гироскоп в гиросtabilизаторе для стабилизации платформы. А если вы имеете еще и датчики момента и введете связи с осями  $x$  и  $y$  (осей, перпендикулярных оси вращения), то ваш прибор будет реагировать на внешние угловые скорости, угловую скорость поворота. Ну естественно надо учитывать влияние гироскопического момента, надо такие связи делать, чтобы датчики момента компенсировали нужный гироскопический момент. В результате ток датчиков момента становится пропорциональным угловой скорости вращения основания. В этом случае уже гироскоп превращается из свободного гироскопа в датчик угловой скорости, причем поскольку тут имеется два направления, по которым можно создавать момент, то вы можете мерить сразу две составляющие скорости вращения основания, т.е. фактически это два ДУСа.

Ну вот я вам здесь на листочке нарисовал некоторые схемки. Первая схемка показана выше.

Здесь показан двигатель вращающий вал, установленный на подшипниках и ротор. Ротор имеет промежуточное кольцо, которое упруго

связывает между валом и ротором (обычно такие кольца делается два). Промежуточное кольцо затем связано с маховиком.

Вот собственно конструктивная схема гироскопа. Вы видите все элементы, они интересны тем, что в центральной части колечка выполнено множество прорезей, которые сделаны электроискровым методом обработки. Эти прорези сделаны таким образом, чтобы в едином куске заготовки (т.е. заготовка единая, это единая таблетка хорошей стали, с хорошими упругими свойствами) образовались все эти четыре элемента.

То есть упругий подвес, связывающий промежуточные кольца (а их два) с валом и упругие подвесы, которые связывают эти промежуточные кольца с ротором. Ротор сам является носителем кин. момента, а остальные элементы – это вспомогательные элементы, которые обеспечивают упругие моменты, лишь бы он был постоянен.

Например, как упругие элементы делаются. Вот тело, ротор и в нем высверливаются два таких отверстия. Упругой перемычкой в этом случае является часть конструкции, которая была не разрушена при высверливании. И тогда вот на этой тоненькой перемычке гироскоп сам может поворачиваться относительно вала. Одна часть связана с валом, с тем которая здесь находится. А другая часть связана с ротором

Ну и дальше необходимые все щелочки, которые нужны для того, чтобы обеспечить полную кинематику движения, они здесь реализуются. Ну это все вам рассказывать должен был Кулешов.

Вот такая конструкция, выполненная из единой детали, исключает необходимость склейки деталей. Потому что первые детали, первые типы гироскопов, используют упругие подвесы отдельно, а кольца и все прочее тоже отдельно, а потом их клеивали в конструкцию. Потом американцы придумали конструкцию, в которой все элементы делаются из единой детали. Тогда нет соединений клеевых, а клей – это не очень стабильный

материал. Все элементы связаны чисто металлическими частям и обеспечивается высокая стабильность и положение нуля.

Задачей является создание датчика угла и датчика момента.

*Я принес вам эту конструкцию, будьте поаккуратней с ними, потому что эти катушки здесь они бескаркасные, они только на обмотках, которые клеим склеены, если вы уроните, то показывать будет просто нечего.*

А так точно довольно сделанные катушки, по кругу расположены, по цилиндрам расположены. И вот эти катушки входят в зазор моментного датчика. Вот кольцевой зазор, в него входит моментный датчик.

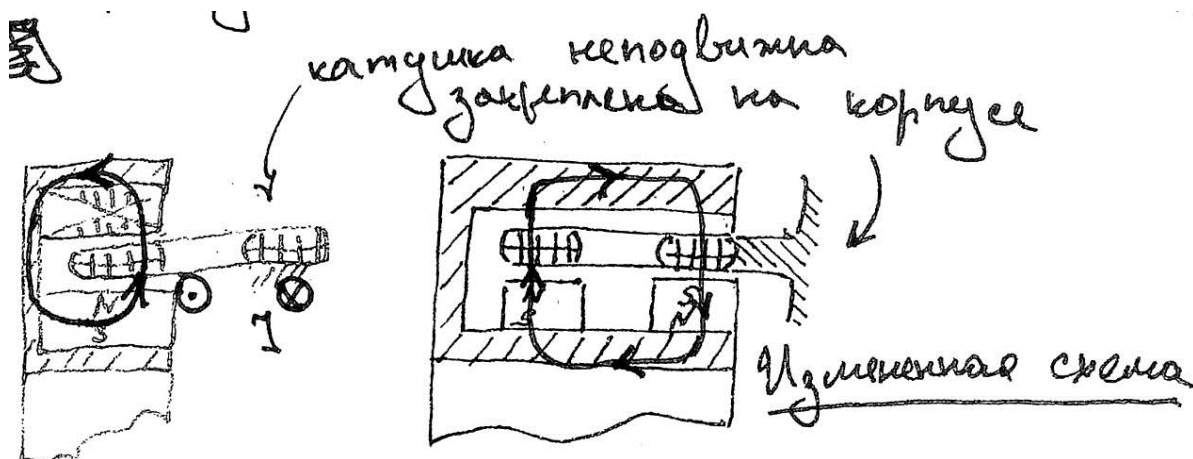
А внутри этих элементов имеются постоянные магнетики, которые мы сейчас рассмотрим, посмотрим, как он формирует управляющий момент.

Главное, что этот управляющий момент должен формироваться при вращении ротора, он не должен мешать по вращению ротора, и он не должен зависеть от скорости вращения.

*Аккуратненько, пожалуйста, с той другой частью работайте.* Но вот я вам говорил, что, к сожалению, это движение, оно маленький угол, здесь порядка 2-3 градусов, всего-навсего угол поворота, уже его не ощутите.

Когда будете смотреть, то вы увидите, что вот этот вот ротор в виде колпачка сделан, а внутрь его вставлен постоянные магниты.

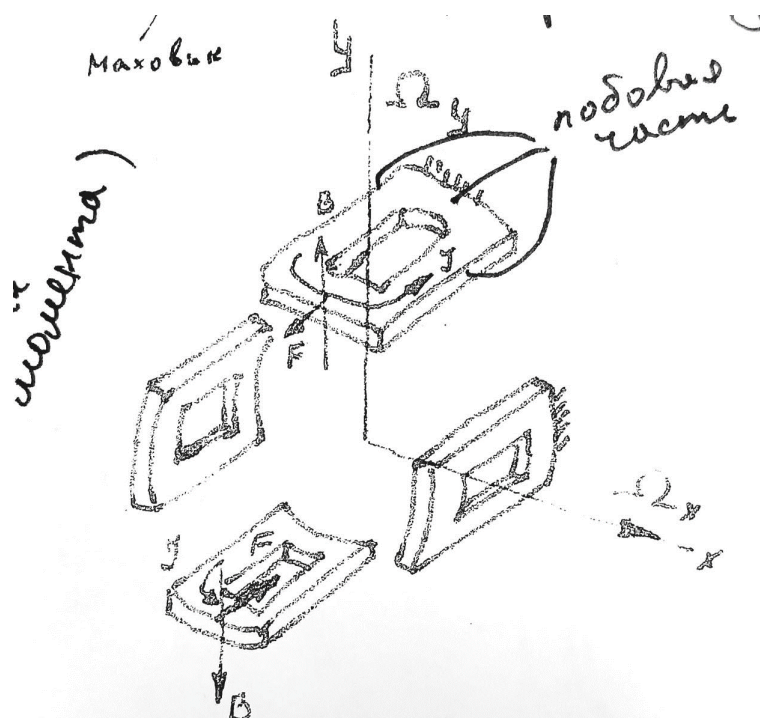
На этом рисунке показана конструкция этого датчика.



Вот это сам ротор, ну я его упругие связи вырисовывать не буду. Дальше здесь располагается магнитопровод, заштриховал я его, чтобы вы сидели чтобы вы видели, что этот магнитопровод выполнен из шихтованного материала. А здесь ставится магнитный торцевой. И в середину ставится тоненькая катушечка. Катушечка неподвижна, она закреплена на корпусе.

По окружности это все распределено. Вот такой сам ротор с маховичком. Магнитопровод может быть, а может его и не быть, в зависимости от того, из какого материала сделан сам ротор. Если ротор сделан из магнитомягкого материала, то тогда не нужен. Делают и так, и так, есть множество вариантов.

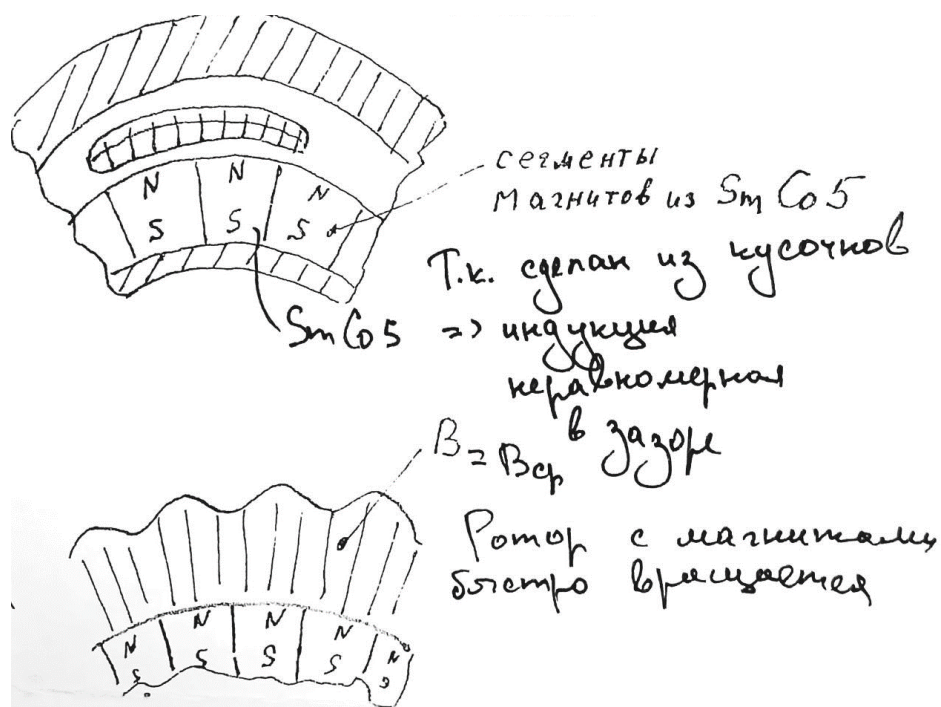
Дальше имеются четыре катушки. Если изображать их пространственно:



Вот эти катушки под 90 градусов укреплены на корпусе и торец этих катушек входит в зазор магнитопровода. Ну и дальше, так сказать, где-то ротор, где-то там эти упругие связи, пока это нам не нужно, мы говорим именно про моментные датчики.



Магнит делается из кусочков:



Почему он из кусочков делается?

Материал для магнитов – это самарий-кобальт 5. Чуть позже поговорим об этом материале.

Его делают на заводе Пышма, на Урале, где изготавливают эти постоянные магниты. Их делают из пластиночек, и эта пластиночка намагничивается так, что у нее верхняя часть N, а нижняя часть S. А потом дальше ее режут на сегменты, обрабатывают и получается множество таких вот магнитиков, которые образуют, после того как их вкладывают в специальную конструкцию, в специальный корпус, и клеят, они склеиваются в единый кольцевой магнит, имеющий радиальную намагниченность.

Почему такая сложная схема изготовления? Самарий-кобальт 5 – это материал, который очень трудно намагничивается. Намагничивание, будем говорить сегодня же, но только позже, но самарий-кобальт 5 – это материал, который обладает громадной магнитной энергией. И чтобы намагнитить этот материал, его надо поместить в очень большое магнитное поле, с очень

большой напряженностью магнитного поля, с очень большой индукцией, намагничивающей именно.

Намагничивают магниты либо с помощью электромагнитов, либо с помощью катушек, которые не содержат магнитного сердечника. Через эти катушки пропускают очень большой ток, который кратковременно создает большую напряженность магнитного поля. Но ток этот громадный, далеко не везде он получается легко.

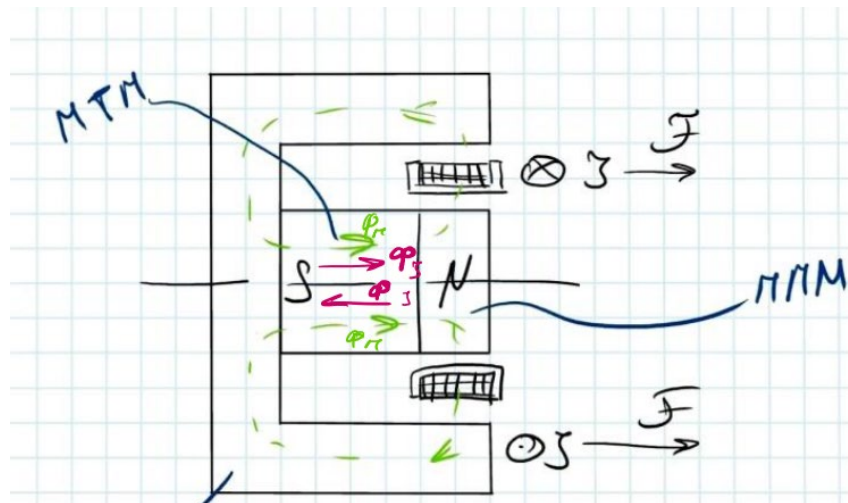
Аппаратура достаточно дорогая и сложная, не на всех предприятиях есть она, поэтому делают кусочки на самом заводе изготовителя редкоземельных материалов и поставляется уже в виде общей пластины. Можно было бы, конечно, не намагниченным поставлять, но тогда создать вот такое радиальное магнитное поле, которое намагнитит сердечник, чрезвычайно сложно. Именно радиальное поле, круговое магнитное поле было бы проще создавать, а вот именно радиальное поле.

Поэтому магнит намагничивается на самом заводе, потом режется на кусочки. Но нам надо собрать из этих кусочков цельный магнитопровод с радиальной намагниченностью. Поэтому вкладывают эти кусочки в специальную аппаратуру, причем они конечно же сопротивляются (так как магниты с одинаковыми магнитными полюсами отталкиваются друг от друга). Они норовят выпрыгнуть из этой формы и специальным образом их сжимают крышечкой и там на клею образуется цельный элемент.

Вот это магнитное поле вытекает отсюда, идет через магнитопровод и замыкается таким образом.

Если в катушке создаем ток, предположим здесь ток в сторону (на вас), тут магнитная поле. Вот только эта часть катушки находится внутри магнитного поля, а все остальное наружу. Здесь вы имеете магнитное поле, направленное вверх. Ток в этой катушке, как я вам нарисовал, вот так вот, здесь на нас, здесь от нас.

Руку ставим так, чтобы силовые линии входили в ладонь, пальцы по направлению тока, тогда сила будет действовать туда вот.



Таких катушечки четыре стоят друг над другом, как вы видите конструкцию. В верхней катушечке у вас сила направлена вот так, а вторая катушечка должна быть включена вот так вот. То есть поток будет направлен также, как и наверху, то есть поток от центра будет идти по радиусу вниз. И мы должны получить здесь силу, направленную в противоположное направление, чтобы создать момент. Чтобы получить такую силу, я должен левую руку использовать. Еще раз проверяем силовые линии.

Это одна пара катушек, вторая пара катушек работает независимо. Она создает момент вокруг другой оси. Раз датчики момента работают независимо, датчики угла тоже независимо, поэтому они определяют, куда отклоняется ротор под действием внешней скорости, то есть куда направлен гироскопический момент, либо он так вот поворачивает, либо по-другому. И с помощью этих катушек мы можем создать момент, который удерживает ротор от отклонения и по тому, и по другому направлению.

А величина тока, который необходим для компенсации этого внешнего момента, который равен кинетическому момента вращения ротора, умноженному на скорость по поперечной оси. Значит у вас крутизна датчика момента, умноженная на ток она должна уравнивать гироскопический момент  $H$  на  $\omega$ .

В результате ток получается пропорциональный составляющей скорости вращения основания, не собственного вращения, а вращения в кинетический момент скорость входит, а произведение кинетического момента на скорости основания по одному из направлений. Значит, по одному направлению одна пара катушек работает, а по второму направлению работает вторая. И, естественно, надо учитывать, что это гироскоп, то есть, учитывать то, что по одной оси имеется вращение, а гироскоп реагирует под действием кинетического момента по другой оси. Вот, это принцип действия такого датчика.

Какие особенности надо сразу отметить:

Такой датчик имеет индукцию, как если бы мы сделали идеальное кольцо, то индукция была бы вот такая. А поскольку он у нас сделан из кусочков, то ясно, что в средней части этого кусочка индукции будет побольше, а по краям поменьше. В зазоре не будет постоянного распределения индукций.

Но дело все в том, что этот ротор с магнитными быстро вращается, поэтому на место катушки приходится то больше, то поменьше, а в целом за какой-то промежуток времени момент определяется средним значением индукции за период вращения маховика. Поэтому тут неравномерность распределения индукции в зазоре, но это значение никакого не имеет,  $B$ , оно же  $B$  среднее, есть  $B$  максимум и минимум.

Какой главный недостаток такого датчика момента?

Большая лобовая часть катушки. Вспоминайте, что такое лобовая часть. Силу создаёт только та часть обмотки, которая находится в магнитном поле. Здесь в магнитном поле находится только вот этот вот кусочек, а все остальное – это лобовая часть, которая не создает момента. Но ток по этой части идет, он греет провод и в общем то если вы хотите получить большой момент, вы должны запустить большой ток в катушку, она будет сильно греться и гореть. Поэтому если датчику предоставляется требования

измерять угловую скорость в районе 50-70 град/с, то это еще нормально. Такая скорость не приводит к сторанию. А в случае, если требования 200 - 300 град/с, то есть динамичный объект, который использует этот ДНГ, то уже длительное время гироскоп не в состоянии обеспечить измерение такой скорости, и он сторит у вас. Поэтому делают по-другому датчик момента, не по такой схеме, а по измененной:



Тут толстый ротор, один магнит ставится вот сюда, второй магнит ставится вот сюда. В одной части N S, в другой S N, и дальше катушка идет. В случае такого выполнения катушки лобовая часть получится уже короткая. Вот эта часть находится в своем магнитном поле, а вот эта часть находится в своем магнитном поле. Только здесь магнитное поле будет идти снизу вверх, а здесь магнитное поле будет идти сверху вниз.

Значит если вы пускаете по этой катушке ток, то естественно, что в первой катушке у вас будет все то же самое, что и здесь. То есть сила будет направлена вот сюда. А здесь сила будет направлена сюда же, в эту же сторону. И направление тока изменилось, и направление магнитного потока изменилось, то есть сила осталась вот сюда.

Коротенькие получатся лобовые части, они хоть и будут греться, но они будут греться даром, они будут создавать момент. Поэтому вот при таком двойном датчике момента получается возможность измерять угловые скорости порядка 300-400-500 градусов в секунду. Это требуется для



небольших ракет, для зенитных ракет, где высокая маневренность и необходимо обеспечивать управление.

*Вот все, что относится к конструкции. Есть ли вопросы? Все у вас разрисовано, то, что я вам рассказывал. Есть ли какие-то вопросы по конструкции ДНГ или по конструкции датчика момента?*

Датчик угла, забегая немножко вперед, мы должны будем изучать эти датчики угла еще на следующем семестре. Вот эти вот сердечки, внутри стоящие с катушечками, вот индукционный датчик угла, который позволяет либо вот такой угол мерить, либо вот такой угол мерить.

Ну как работает этот прибор?

Если у нас идеальный ДНГ, тогда катушечки приклеены точно под 90 градусов друг другу. И они создают момент только по интересующему нас направлению, только по тому направлению, которое определяется положением датчика угла. В этом случае прибор работает идеально.

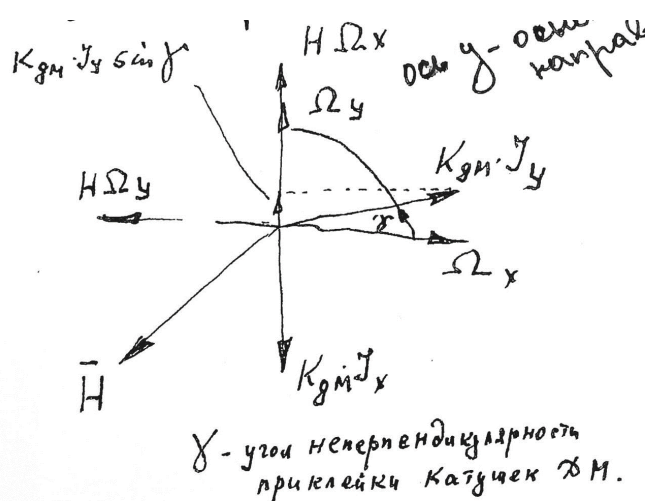
Ну,  $H$  это, так сказать, гироскопический момент. Он определяется скоростью вращения от двигателя. И имеется две переносные скорости.  $\Omega_x$  и  $\Omega_y$ . Значит, при наличии скорости  $\Omega_x$ , горизонтальной скорости, возникает гироскопический момент, который стремится совместить  $H$  с вектором  $\Omega_x$ . Этот гироскопический момент направлен вертикально вверх  $H$  на  $\Omega_x$ . Если одновременно с этим имеется угловая скорость  $\Omega_y$ , вертикально вверх направленная, то возникает второй гироскопический момент, который стремится совместить вектор кинетического момента с вертикальной уже осью. Этот момент направлен горизонтально влево.

Если катушки строго друг другу, то мы получаем уравнение  $H$  на  $\Omega_x$  равняется  $K_{\text{дм}}$  на ток, протекающий в датчике, состоящем на оси  $X$ . А второе уравнение это  $H$  на  $\Omega_y$ , гироскопический момент, он равняется моменту датчика момента второго, значит  $K_{\text{дм}}$  на ток  $I_y$ .  $I_y$  будет

пропорционален  $\Omega_y$ , а ток по оси  $x$  будет пропорционален  $\Omega_x$ . Это в случае, если идеально сделан датчик.

Теперь давайте подумаем. Технологически можно ли обеспечить точную приклейку этих катушек?

Катушки будут разные немножечко по размерам, с определенным допуском сделаны, угловое положение. Хотя вот здесь между катушечками предусмотрены какие-то вкладыши, которые позволяют эти катушечки центрировать друг относительно друг друга, то есть обеспечивают угол примерно 90 градусов. Вкладыши чуть-чуть отличается друг от друга, они не идеальны, чуть-чуть туда-сюда может сместиться приспособление. Там везде же зазоры, их надо предусмотреть для того, чтобы собиралась эта конструкция, не впихивать, нарушая изоляцию проводов и прочее. Нужны специальные приспособления. И вот эти специальные приспособления делаются с зазорами, а эти зазоры сказываются на точность взаимной ориентации катушек. То есть катушки имеют ось. Угол между моментами будет отличаться от 90 градусов на какую-то величину ошибки гамма.



Вот я вам нарисовал случай, когда у меня за основу, за основное управление выбрана ось  $Y$ . Первую ось я назначаю по своему усмотрению. Ставлю на стол, вращаю и говорю, ага, вот это у меня ось  $Y$ . Тогда ищу положение, когда положение ротора, вращая его на какой-то уголок, вот так

вот. Вот видите, здесь штырек торчит. Этот штырек не случайно торчит. Это не из-за того, что не довинчен какой-то винтик. Это просто центрирующий штырек, он определяет положение измерительной оси. Вот я закрепил по измерительной оси и, предположим, когда я устанавливал штырек, то я точно установил так, чтобы у меня по оси Y ошибки не было. Тогда вся ошибка, которая имеется. То есть направление момента  $K_{\text{дм}}$  на  $I_y$  не будет совпадать с направлением гироскопического момента  $H$  на  $\Omega_y$ , а будет отличаться на угол ошибки, обозначенный  $\gamma$ .

$$H \Omega_x = K_{\text{гм}} (J_x - J_y \sin \gamma)$$

$$H \Omega_y = K_{\text{гм}} J_y \cos \gamma$$

$$J_y = \frac{H}{K_{\text{гм}}} \Omega_y$$

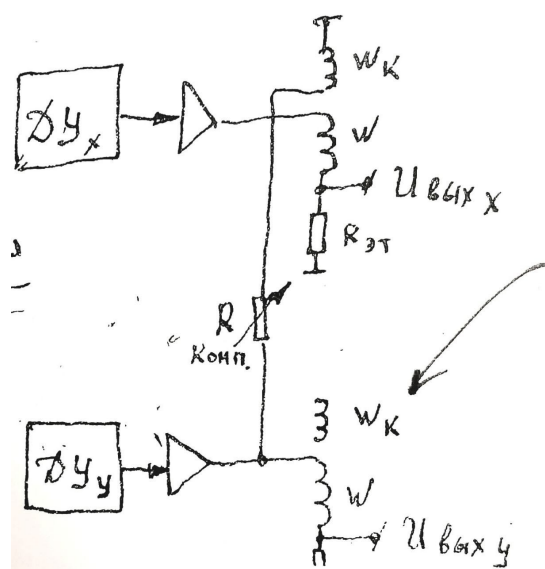
$$J_x = \frac{H}{K_{\text{гм}}} (\Omega_x + \underbrace{\Omega_y \gamma}_{\text{ошибка!}})$$

Значит, тогда это будет проекция  $K_{\text{дм}}$  на  $I_y$  на косинус гамма. Косинус гамма – это почти единица, тут можно его и не учитывать. На вертикальной у вас практически не имеет проекции. А вот на ось X он будет иметь проекцию. В этом случае ток по оси X будет с ошибкой

Тут не хоть тресни, но обеспечить идеально перпендикулярное положение катушек датчика момента, невозможно, физически невозможно, технологически невозможно.

Как выходит из этого положения?

Обычно в датчике момента гироскопа обеспечивается связь. Сигнал с датчика угла, стоящий на оси X. Угол X – это угол, возникающий под действием гироскопического момента  $H$  на  $\Omega_y$ . Сигнал датчика угла идет на усилитель и поступает в катушку, которая находится на оси X. Значит, ток выхода падающие на эталонном сопротивлении, то есть падение напряжения на эталонном сопротивлении, оно пропорционально угловой скорости. То же самое делается и по второму каналу, по каналу Y.



Вот это связи идеального гироскопа, когда нет ошибки от угла гамма. А если есть ошибка от угла гамма, то начинают портить гироскоп. Начинают портить датчики момента. В датчики момента вматывают еще несколько витков. Ну, там, скажем, само число витков там 300-400, делают еще 5 виточков дополнительно. И выводят его как дополнительную катушку. Вот она написана у меня как W компенсационная. Значит, если у меня есть эта ошибка, то я с выхода Y через подбираемое сопротивление завожу ток в компенсационную обмотку, которая создает момент вокруг оси X, который направлен вниз. И этот момент компенсирует проекцию моментов основного датчика момента на ось, компенсируя вот эту вот ошибку.

Если надо по второй оси такую же корректировку проводить, значит, тогда делают, используют и вторую корректирующую обмотку, вводят сигнал этот туда.

Значит, в итоге, как осуществляется регулировка, прибор ставят на очень точную поворотную установку, фиксируют положение штырька, так как оно положено по использованию. И дают сначала разворот по одной оси, базируясь только на штырек. То есть вам надо привязать оси гироскопа к положению этого штырька, посадочной поверхности гироскопа и штырек. Они определяют угловое положение, при котором надо держать этот гироскоп. Когда даете положение перпендикулярное плоскости штырька, то у вас должен появляться сигнал только на оси, скажем, X. А появляется сигнал на оси Y. Значит, тогда вы берете переменное сопротивление, ставите его в канал Y и вращаете до тех пор, пока сигнал по оси Y не пропадет. Потом поворачиваете гироскоп на 90 градусов и теперь же вращаете не по оси X, а по оси Y. И смотрите, сигнал должен быть только на одном эталонном сопротивлении, а на другом он должен быть равен нулю. Он не должен чувствовать движение по другой оси. Если чувствует, то вы берете тогда и регулируете второе компенсационное сопротивление до тех пор, пока не устранили. Иногда эта операция проводит несколько раз. То есть сначала компенсирует одну, потом вторую, потом повторно компенсирует и так две-три итерации полностью позволяют устранить вот эту вот ошибку датчика угловой скорости.

Ну, в итоге мы смотрели почти все возможные вариации датчиков момента.

*Вам будет потом рекомендована книга Пятин “Постоянные магниты”. Вот эта книжечка, в которой рассмотрены множество вариаций создания датчиков момента. Их типов гораздо меньше, чем я рассказываю, потому что ДНГ и прочие это какие-то специальные уже датчики. Такое разнообразие для нас не существенно. Если вы знаете, как работает основной датчик, то в любом вы разберетесь легко.*

Следующая задача наша – это научиться рассчитывать датчики. Для того, чтобы рассчитать моментный датчик, мы уже с вами знаем, что в



момент моментного датчика это произведение индукции магнитной на ток, на число витков и на активную площадь рамочки. Эти все величины нам должны быть известны, площадь активной рамочки подсчитывается из конструкции. Число витков сколько выбрали, столько выбрали. Подобрать оптимальное количество витков, меняя размеры диаметра, то вы можете экспериментировать сколько угодно. Просто имейте в виду, что ни в коем случае свойства датчика момента путем варьирования числа витков и сопротивления датчика на энергетические особенности, на энергетические характеристики датчика момента никак не сказывается. Мы с этим делом еще познакомимся чуть дальше. Ток мы сами задаем. И нам надо сказать, какой момент развивает этот датчик.

Единственное, чего у нас нет, это у нас нет магнитной индукции. Мы должны научиться определять эту магнитную индукцию. Причем какая магнитная индукция нужна?

В зазоре, в середине зазора, магнитная индукция одна, на краях зазора другая, и так далее. Мы должны учесть все геометрические характеристики. И вообще нас интересует среднее значение индукции, которое приходится на площадь сечения катушки. Вот тогда это найдем величину момента.

*Я не очень уверен, что вы помните из курса физики магнитные цепи... (про лекторов из МГУ). Сейчас времена изменились... какие-то птицы и песни.*

Вообще все магнитные поля подобны. Все уравнения, как тепловые процессы, течение жидкости, течение газа, магнитные процессы и прочее, они описываются сходными уравнениями, особенно уравнениями статики. сходными уравнениями. Такие же уравнения используются и для электрических полей. А с электрическими полями вы хорошо знакомы. Поэтому если я дам сейчас аналогию между параметрами магнитных цепей и параметрами электрических полей, то вам может быть будет ясно.

Аналогия:

$J \rightarrow \Phi$ [Вб]	$\rho \rightarrow \mu$ [Гн/м]
$J/S \rightarrow B$ [Тл]	$1/\rho \rightarrow \int \mu$ [Гн]
$R \rightarrow R_m$ [1/Гн]	$\mathcal{E} \mathcal{D} \mathcal{C} \rightarrow J \mathcal{V}$ [А]
$1/R \rightarrow G$ [Гн]	$\rightarrow H_c \ell_m$ [А]
	$U = J \cdot R \rightarrow \Phi R_m$ [А]
	$\rightarrow H \ell$

Чем характеризуются электрические процессы? Ток, который измеряется в амперах. В магнитных цепях аналог электрического тока это магнитный поток. Поток обозначается буквой  $\Phi$  и измеряется в системе СИ, измеряется в Веберах.

Плотность электрического тока. Если через проводник течет ток, и если вы этот ток поделите на площадь сечения проводника, то образуется плотность электрического тока. Не так часто используют плотность электрического тока в расчетах электрических цепей, хотя все-таки используются.

Например, проектируют обмотку трансформатора. Там это множество витков катушки, катушки эти греются и если мы слишком большую плотность тока зададим, если сопротивление будет достаточно большим, и ток большой, то просто сгорит этот трансформатор, завоняет и сгорит. Поэтому ограничивают плотность тока. Для трансформатора, скажем, большая плотность тока, смотрите справочные книжки по электротехнике, то там порядка 5 ампер на квадратный миллиметр, больше не полагается, будет перегреваться. Плотность тока при некоторых случаях учитывается. Ну скажем если потенциометр проектировать, сейчас не о них речь, но опять же, там вот один слой, намотанный на каркасик. Какой каркасик? Металлический каркасик. От него тепло будет хорошо от этой проволоочки отводиться. Если эта проволоочка находится в воздухе, значит один теплообмен будет нагреваться больше. Если же прибор имеет жидкостное

заполнение, тогда проволочка находится в жидкости, плотность тока можно сделать больше. В жидкости делают 8 ампер на квадратный миллиметр. А при однослойной катушечке в воздухе там порядка 20 и больше.

Плотность тока вообще параметр, который иногда используется, хотя не очень часто. Так вот в магнитных полях, плотность магнитного потока имеет специальное название, она называется индукция, обозначается буквой  $B$ . И в системе СИ она измеряется в Теслах. Индукция измеряется в Теслах. Чтобы определить индукцию, надо поток поделить на площадь магнитопровода. Участка магнитного провода, через который течет этот поток. Тесла – это Вебер, деленный на квадратный метр.

Дальше электрическое сопротивление, хорошо знакомая вам величина. В омах измеряется. Для магнитных цепей применяется магнитное сопротивление. Я обозначил как  $R$ -магнитное. Оно измеряется как единица, деленная на Генри. Это магнитное сопротивление какого-то участка цепи, или всей цепи может быть.

Теперь в электрических цепях есть понятие проводимости. Редко, но говорят, что цепь имеет такую-то проводимость. Что такое проводимость? Это единица, деленная на сопротивление. Не очень часто используют эту проводимость как понятие. Проводимость магнитных цепей, обозначается  $G$ , измеряется в Генри, и это один из основных параметров. О сопротивлении магнитных цепей говорят достаточно редко, а вот о проводимости, так сказать, чаще говорят. В литературе вы можете найти такое понятие, что проводимость измеряется в «мо». Сопротивление измеряется в «омах», а здесь «мо» – обратная величина.

Дальше идет  $\rho$ , для электрических цепей это удельное сопротивление материала.  $\rho$  для меди, напоминаю вам эту цифру, целых 0,017 тысячных Ом на метр, деленный на квадратный миллиметр. Да, в электрических цепях очень часто используется. В магнитных цепях никакого магнитного

сопротивления не используется понятия магнитных цепях. это ниша, деленная на  $\rho$ . Для электрических цепей почти не используется.

Но есть понятие удельная проводимость, это единица, деленная на  $\rho$ . Для электрических цепей практически не используется. А вот в магнитных цепях, магнитная проводимость или магнитная проницаемость обозначается как  $\mu$ , это Генри, делённые на метр. То есть это проводимость одного метра длины магнитопровода, Генри, делённые на длину участка магнитопровода. Тут, конечно, могут быть и не метры, а могут быть миллиметры. Это очень важный параметр. Например, магнитомягкий материал, типа пермаллой. Магнитомягкий материал имеет колоссальную проводимость по сравнению с воздухом, иногда 200 тысяч получается, громадное. Поэтому, когда говорят, что магнитное поле распространяется по магнитной цепи из магнитомягкого материала без потерь, с очень высокой степенью достоверности это соответствует действительности. Хотя, когда речь идет о гироскопии, все вещи, которыми обычно пренебрегают, она вылезает, и расчеты без учета магнитной проницаемости магнитопровода получаются не очень точными.

В электрических цепях есть электродвижущая сила. Это может быть либо аккумулятор, либо какая-то выходная обмотка генератор. Измеряется ЭДС в вольтах. В магнитных цепях тоже, только уже не электродвижущая сила, а магнитодвижущая сила. Иногда ее записывают как намагничивающую силу. Иногда пишут магнитодвижущую силу, но мы будем пользоваться НС. Для катушки с обмоткой, по которой течет ток, Соленоид – это источник намагничивающей силы. Величина НС равна произведению тока на число витков. Число витков величина безразмерная, поэтому измеряется она в Амперах. А если вы имеете какой-то другой источник, например гальванический, его эквивалент в магнитных цепях – это постоянный магнит. Магнит намагничен, тут ни витков, ни токов нет, поэтому намагничивающая сила определяется как произведение  $H_c$ ,

коэрцитивная сила. Коэрцитивная сила – удельная намагничивающая сила магнетика длиной 1 метр, измеряется в Амперах, деленных на метры.

Есть еще понятие падение электрического напряжения. Это произведение тока на сопротивление электрической цепи. В магнитных цепях есть аналог – это произведение магнитного потока  $\Phi$ , умноженное на сопротивление магнитного провода. То есть  $\Phi$ , умноженное на  $R$  – магнитное. Либо Вебер, деленный на Генри, или можно заменить его понятием Тесла на метры. Падение магнитного напряжения, магнитной движущей силы на кусочке, а участке магнитопровода. Либо это воздушный зазор, либо это сам магнит, либо это какой-то магнитопровод. В зависимости от того, какой участок будет соответствующее падение магнитного напряжения. И вот когда мы говорим о падении магнитного напряжения на магнитопроводе из магнитомягкого материала, поскольку мю громадное, сопротивление получается очень маленькое, падение напряжения получается очень маленькое, поэтому в уравнениях, в обычных расчетах не учитывают, кроме нашей с вами гироскопии.

Второй вариант падения магнитного напряжения – это падение магнитного напряжения на единичке длины магнитопровода. Падение магнитного напряжения на единичке магнитопровода обозначается как  $H$  и носит название напряженность магнитного поля. Это будет Ампер, деленный на метр. А если эту напряженность умножить на полную длину участка магнитопровода, то будет падение напряжения на участке магнитопровода,  $H$  на длину магнитопровода (не на длину магнита, а на длину пассивной части магнитопровода).

Дальше будет легче, потому что вы аналогию представляете. Сопоставить с электрическими цепями, хорошо вам знакомыми вы можете, и дальше вам легче будет.



Теперь дальше расчет магнитной индукции. Для того, чтобы рассчитывать магнитную индукцию, надо знать характеристику магнитного материала.

## Семинар 15 сентября

Пояснение к тому, как можно не клеить отдельные элементы. Речь идет о том, что нам нужно определить характеристики магнитного материала.

Каким образом это делается?

Вырезается образец из магнитотвердого материала, характеристики которого надо определить. Причем тут могут быть два варианта. Первый вариант показан на рисунке, который я вам сделал. Вторым вариантом делается таким образом, то есть берется кусочек материала, который нас интересует, имеется магнитопровод из магнитомягкого материала, который обладает идеальными магнитными характеристиками и который никаким образом не ограничивает магнитное поле.

Кольцевой образец не всегда хорош, потому что вам надо определить характеристики материала текстурированного, а при кольцевой вырезке текстурированный материал не получается. Не будет меняться по кругу. В принципе, можно сделать так же по кругу, но, кстати, здесь не делается.

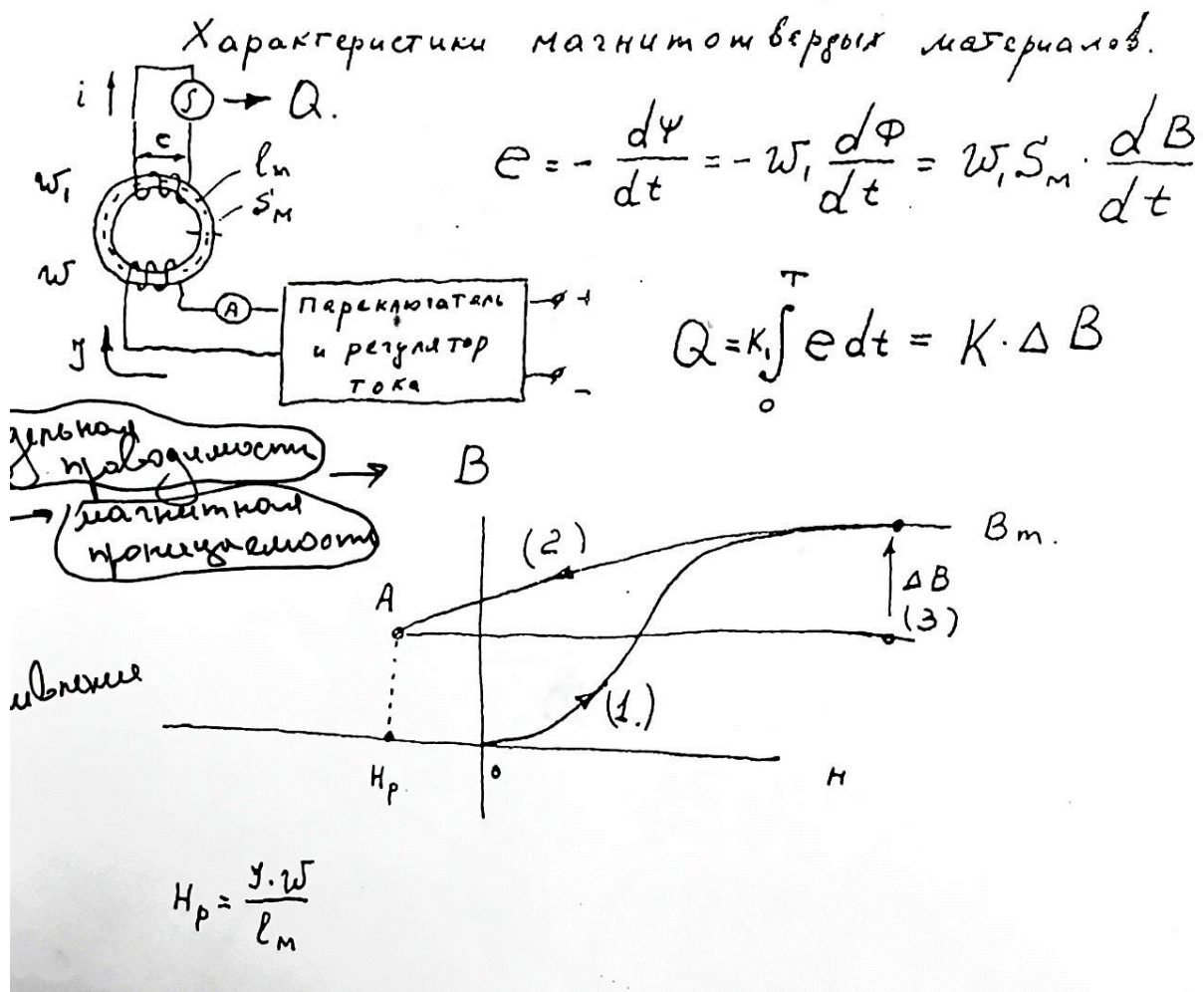
Значит, что с этим образцом делается?

У него наматываются две катушечки,  $W$  и  $W1$ . Причем катушка  $W$  подключается к переключателю и регулятору тока. А катушка  $W1$ , она подключается к интегратору.

Если пользоваться литературой, то в некоторых устройствах описывается вторая катушечка. По баллистическому гальванометру подключена. Это специальный гальванометр, который обладал большими интегрирующими свойствами, сейчас их не применяют. Он хороший тем, что вы задаете импульс тока через обмоточку, а потом по инерции эта обмоточка отклоняется на большой угол и возвращается назад. Толчок и дальше, куда забросить этого зайчика светового по шкале.

Проще говоря, ставится интегратор в эту цепь. И смотрится интеграл от ЭДС, который находится в катушечке у  $W1$ .

В образце выделяется длина образца. Если это кольцевой, то это длина кольца всего, если в данном варианте, то  $L$ , будет площадь сечения  $S$ . Ну а у внешнего магнитопровода параметры не договариваются, поскольку это, как мы сказали, элемент с бесконечной большой проводимостью. Значит,  $L$ -магнита и  $S$ -магнита.



Дальше в катушку  $W$ , вводят ток от регулятора, катушка  $W1$  подключается к интегратору. Меняют ток. А когда меняют ток, то значит меняют намагничивающую силу. А поскольку длина магнита известна, то меняют напряженность магнитного поля. Если вы поделите намагничивающую силу на передмагнит, то получится в получается напряженность магнитного поля. Получается все больше и больше и больше ток вы даете и начинает меняться поток, меняться начинает индукция и откладывается  $B$ , начальный участок кривой намагничивания.

При этом смотрят что же здесь на выходе. Я двигаю движок больше, больше, больше. У меня магнитное поле все больше, больше, больше. Раз магнитное поле меняется, то появляется и напряжение, индуцируется напряжение (вспоминайте Фарадея с его экспериментами).

Когда магнитное поле меняется, то появляется ЭДС. Вот я меняю ЭДС, сначала есть ЭДС, а потом я вышел уже на режим насыщения. Когда я меняю напряженность магнитного поля, а индукция уже не меняется. Тогда ЭДС пропадает. Дальше я двигаю, а ЭДС равняется нулю. Я гарантирую, что я уйду на этот участок кривой намагничивания.

Теперь второе, что второе делается? Какой-то ток я выбираю, назначаю размагничивающее поля. То есть я меняю направление тока. Меняю направление размагничивающего поля. И тогда от этого значения я уйду куда-то туда. У нас, если говорить о полной кривой намагничивания, то она будет вот такая вот такая. Меня интересует вот этот вот кусочек, вот этот вот участок. Вот он мне нужен. Поэтому я вот пришел сначала в эту точку, а потом я выбрал Н-размагничивание, меня интересует какое В здесь. Я могу определить интеграл от  $e$ . Я меряю  $e$  и меряю интеграл от  $e$ .

ЭДС  $e$ , оно равняется минус  $\frac{d\psi}{dt}$ . Пси – это потокосцепления, это величина потока через магнитопровод, который проходит внутри катушки. Здесь внутри катушки проходит полный поток, поэтому будет равняться  $-W1$ , она всегда такая, умноженная на  $\frac{d\Phi}{dt}$ . Потому что потокосцепление – это есть произведение потока, протекающего внутри катушки, умноженное на число витков.

С другой стороны, мы знаем, что поток – это у нас произведение,  $-W1$  остается, площади магнита умножить на  $\frac{dB}{dt}$ .

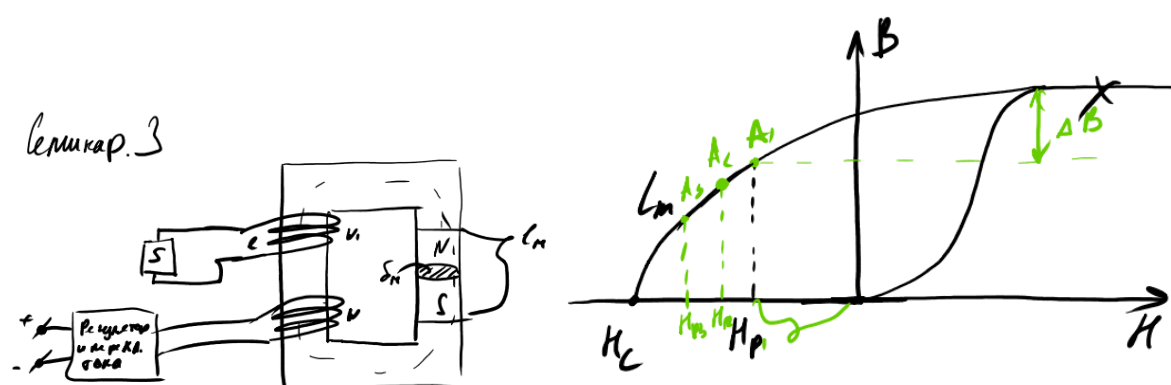
То есть мы фактически имеем ЭДС, равную коэффициенту, который мы можем подсчитать. Это все известно из размеров, число витков и площадь магнита известны. И ЭДС пропорционально производной от

индукции по времени. А поскольку это интеграторов, то здесь я получаю на выходе заряд  $Q$ , который равняется  $K1$  умножить на интеграл от нуля до времени изменения, на  $\epsilon$  на  $dt$ .

То есть я переключил намагничивающую силу с положительной на отрицательную. Величина вот эта мне известна  $H$ -размагничивания. И определил, какое приращение  $\Delta B$ .

Можно записать как некоторый коэффициент  $K$ , который, в принципе, можно подсчитать, зная параметры интегратора, умножить на  $\Delta B$ . То есть положение этой точки  $A$  может быть определено.

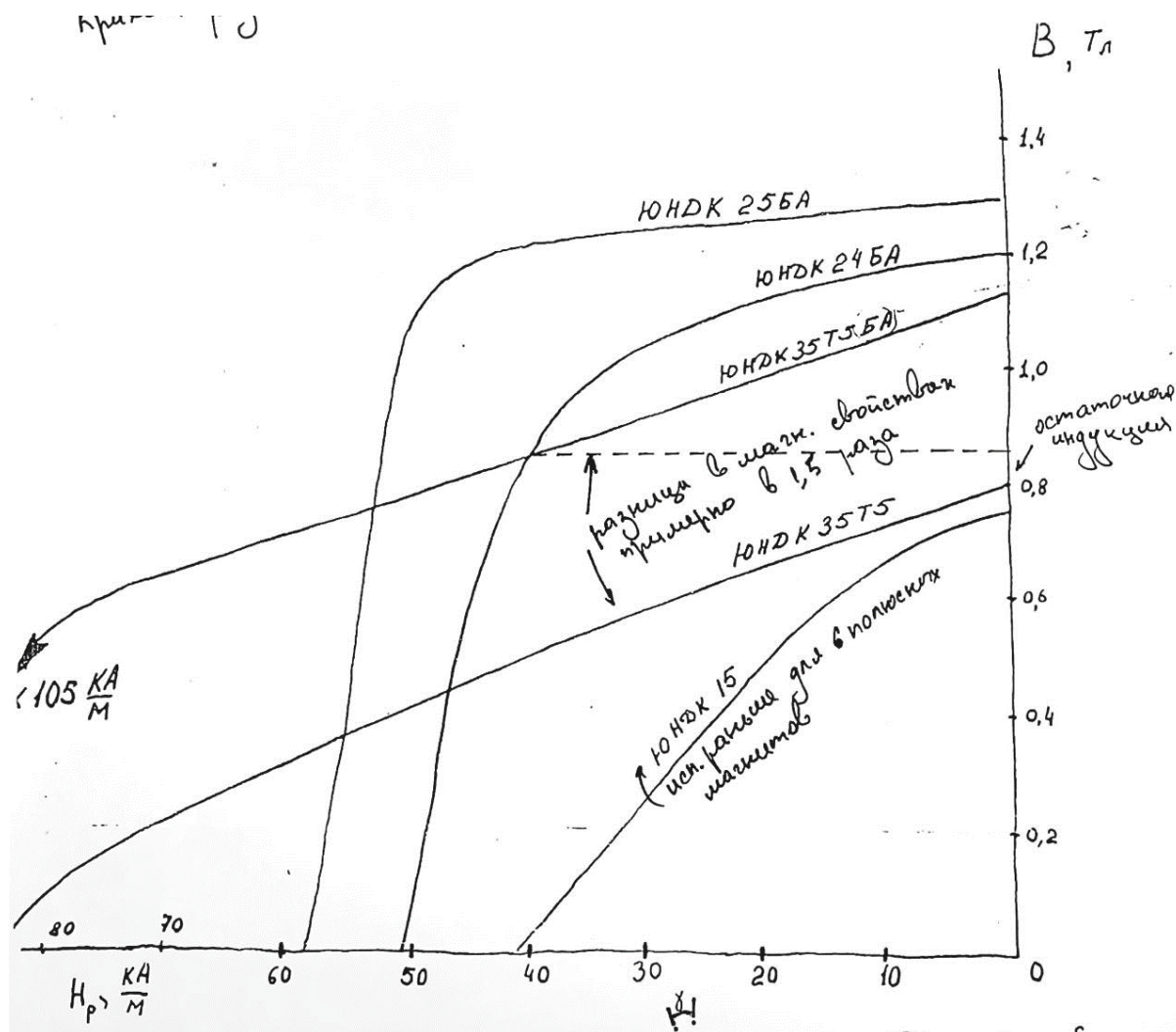
Значит, первое, что я делаю, я намагничиваю магнит до насыщения. Потом переключая, размагничивающее поле делаю наружу размагничивающим. И вижу, насколько скакнула индукция. Это будет  $A1$ . Потом повторно я включаю первое направление до намагничивающей силы и дохожу до точки  $E$ . До точки  $E$  дохожу снова. А затем я переключая ток на противоположный, но уже соответствующий другому значению  $H$ -размагничивающее второе и так далее. Точка  $A2$ . А здесь это будет  $E1$ ,  $E2$ ,  $E3$  и так далее. То есть множество точек вот этих вот я получаю на этом участке.



И, наконец, я подобрал напряженность магнитного поля, размагничивающего, которое полностью убирает индукцию. То есть

индукция становится равной нулю. Тогда это значение  $H_c$ , это будет равно коэрцитивной силе.

Магнитные материалы все подвергаются таким экспериментам, таким проверкам. И в результате мы получаем следующую характеристику:



Вот эта кривая, которая получается, она носит названия кривая размагничивания. Я вам привел данные по кривым размагничивания для разных магнитных материалов. Ну, ЮНДК-материалы, это же материалы альнико, как вы знаете.

Вот ЮНДК-15 – слабенький магнитный материал. Я уже говорил вам о нем. Литой материал, из которого делали шестиполюсные магнитные, не текстурированные.



Дальше приведена характеристика ЮНДК-35Т5. Это очень хороший материал магнитный. Но без буквы БА. Сплав, то точно такой, который нужен для хорошего магнита, а поскольку он не подвергся термомагнитной обработке, то характеристика вот такая хреноватая, как я бы сказал. Индукция 0,8 всего на всего, а коэрцитивные силы там порядка 85.

Дальше сплав ЮНДК-24БА, 25 БА. Эти сплавы имеют большую остаточную намагниченность, вот по вертикальной оси В в Теслах отложена. Значит, 1,2 и 1,4 Тесла. Но коэрцитивная сила у них не очень большая, то есть размагничивать их внешним полем достаточно просто. Чем меньше коэрцитивная сила, тем меньше энергии запасет магнитом и тем легче он размагничивается.

А вот посмотрите на сплав ЮНДК-35Т5БА. Внизу без БА, а сверху БА. Намагниченный в процессе нагревания, в котором домены выстроились уже заранее по направлению будущего намагничивающего поля. Смотрите, 0,8 или почти 1,2 по индукции. А коэрцитивной силе вместо 90 до 105 килоампер на метр. То есть сильно увеличилась энергетическая способность.

*Слушайте, я должен с вами, так сказать, откровенно поговорить. К сожалению, тут ваши приятели, они ушли с лекцией, нифига не слушают. Мне завтра ехать в город Серпухов. Завод один, который приборный. Там появились граждане. Один из них из Крыма приехал с завода Фиолент, другой с польским уклоном.*

*Вот Фирма производила очень хорошие приборы. Магниты делали специалисты в городе Воронеж. Хорошая фирма, которая умеет работать с постоянными магнитами. Они делали постоянные магниты для акселерометров, обрабатывали их по нужной технологии, производили термомагнитную обработку, и уже готовые магниты поставляли на фирму. Потом их использовали в приборе, намагничивали. И я сам проверял*

*эти приборы лет 5 назад. Прекрасные приборы были, гораздо лучше, сравнительно проводили испытания.*

*В общем-то, к сожалению, у нас в России есть такая особенность. Каждая фирма, которая производит приборы, она устанавливает свои законы, свои стандарты на проведение испытаний. И устанавливает так, что невозможно обеспечить сравнение. Трудно каждому отсчёту параметров приборов, надо канцелярской скрепкой приклеивать того испытателя, который тоже делал эксперименты или того, кто писал функции по испытаниям. Делается это для того, чтобы невозможно было сравнить приборы. Каждая фирма говорит, что у меня самые хорошие приборы, у меня вот там такие-то параметры, у меня такие-то параметры. Несопоставимые параметры, невозможно оценить. Этим сильно отличается ситуация на Западе от ситуации в России. Законодатель моды – это, во-первых, акселерометр Куфлекс, который я вам уже рассказывал об этом Куфлексе. И главный производитель этого Куфлекса – фирма, первая начинала работу фирмы BM Light, потом... Вторая фирма, я даже забыл, как ее название. Третья фирма, куда все эти технологии продали, которая скупил все эти технологии, это Хануэл. Вот эта фирма Хануэл, она является законодателем моды, по отношению к которому можно проводить сравнение приборов. Причем четко расписано, подробно, по шагам, как измерять разрешающую способность. Поэтому кто-то говорит, что разрешающая способность такая, где всегда можно проверить, повторив вот эти эксперименты. Они что-то там померили по неизвестной какой методике и получили потрясающие результаты. Ну и, конечно, если выходить на внешний рынок с приборами, то те приборы, которые не соответствуют стандарту, который во всем мире признан, кроме России, всегда можно оценить... У нас ситуация такая. Одна фирма валится, каждая, в общем-то, встретила свое...*

*Ну и когда выделялись приборы для одной системы, которая хорошо известна из телевизионных сообщений, так называемых, то нам надо было определить, какие приборы ставить. Естественно все фирмы, выпускающие приборы, хвалят свою продукцию.*

*Пришлось заказчикам этих приборов обратиться на кафедру, где имеется автоматический стенд для испытания приборов, единственный автоматический стенд, наверное, в России. Кафедральная разработка, хорошая разработка. Ну и мы на этой базе проверяли приборы, которые выпускались четырьмя нашими фирмами, плюс еще китайские приборы, которые подсунули. В результате мы нашли, что приборы фирмы, о которой я рассказывал, имели наибольшие характеристики. Они стали использоваться. Но на меня, правда, руководители других фирм обиделись. Поперёк, правда, не поперёшь, как говорится. Что дали ваши приборы, были одинаковые методики в испытании всех. То и, так сказать... Но пообижались, пообижались, перестали.*

*Так вот, теперь приехали, так сказать, граждане с запредельных стран, и они, профессиональные, и все прочее. На фирме часто менялись руководители, потому что мы входим в состав холдинга, а холдинг своих людей подсовывает. За последние годы сменилось четверо, четыре директора сменилось. И сейчас пришел новый директор, который обратил внимание на то, что качество прибора резко ухудшилось. И стабильность масштабного эффекта стала низкая, а была наилучшая среди других фирм. С другим сигналом проблемы появились и так далее.*

*Бауманский институт, он разбирается в этих приборах лучше всех. Посмотрели, обнаружили, что один из специалистов украинского профиля предложил не покупать такие магниты, очень дорогие. Первая имеет хорошую технологическую базу, может делать постоянные магниты, прекрасно работать могут со своим магнитом. Зачем покупать, зачем тратить деньги. Поэтому они нашли фирму, где производят материалы,*

*предположим ЮНДК-35Т5. Вот они стали покупать этот материал, сами стали делать. Дальше я обратил внимание, подождите, а по какому направлению, вот у вас брусок металла, а по какому направлению вы вырезаете эти магниты? Они электроискровым методом вырезали вот этот цилиндр магнита. А по какому направлению вы вырезаете? По-разному направлению вырезаем.*

Те, кто не ходят на лекции, они ни хрена не знают. А кто ходит на лекции, кто слышал меня, они уже понимают, что брусочек, который сделан, если он подвергался термомагнитной обработке, то он имеет определенное направление, по которому надо вырезать эти магниты. Если они вырезаются абы как, сегодня так, завтра по-другому, то сегодня это будет направление одно, завтра другое и говорить о стабильности магнитных свойств уже нельзя. Ну, нельзя это говорить.

Потом, обработка этих магнитных материалов. У меня были случаи, когда мы делали приборы с корейцами вместе по контрактам с Бауманским институтом. Естественно, под контролем, соответствующих органов все это шло, нельзя такими вещами заниматься, естественно мы получали разрешение на поставки и совместные испытания.

Так вот эти проверки делали для прибора типа Куффлекса. Вот правда, не Куфлекс, а Сифлекс (кремневый маятник). Получалась индукция в магнитопроводе, в зазоре, на уровне, скажем, 0,35-0,36 Тл. Теперь мы поставили туда по контракту наш материал, магнитный материал, и они сами стали делать из этого материала магниты. Сделали, индукция после намагничивания 0,29. Почему? Они, естественно, с претензией. Почему индукция такая? Но мы только что из такого же материала делали магниты.

У нас получалось 0,36, а у них 0,29. Пришлось мне ехать туда, в лаборатории, пытались намагничивать. Изумительная фирма, такие станки стоят, автоматы шикарные, швейцарские. Денег туда вложено уйма. Я пытаюсь на магните и так, и сяк, и боком, и так, 0,29 больше ничего не

получается. Начинаем пояснять, размеры идеальные, чистота поверхности зеркальная, все сделано на высшем уровне. Начинаем выяснять, а как вы обрабатываете эти магниты? А какой вы припуск на технологической операции обработки цилиндрической поверхности у этого магнита создаете? Ну, они говорят, скажем, порядка 10 микрон. Пришлось улыбнуться и сказать, ну нельзя такой давать припуск. Почему? А потому что вы достаточно глубоко затрагиваете структуру материала. А структура материала, значит тогда какой-то слой цилиндра, в середине остается текстурованный материал, а по окружности, где вы обработали, эта текстура уже нарушилась. И там уже нет этой ориентации доменов, она уже стала смешанной. Поэтому мы потеряли 0,7 Теслы. Это очень много. То есть прибор просто рассчитывал на одно значение ускорения. А дает он, скажем, не больше 0,2 микрона.

Тут сразу возмущение. Сколько времени уйдет на обработку? На маленькой подаче надо все это дело проводить. Но все-таки заставили их. Сделали, 0,36 стало.

Вот сколько тонкостей, которые связаны с изготовлением тех же самых магнитов. Это я только коснулся краешка самого. Там еще тысячи тонкостей. Например, структура материала. Материал работает при температурах от плюс 80 градусов до минус 55.

Но оказывается, что материал магнитный, он меняет свою структуру. Вот материал типа ЮНДК-35Т5, он имеет структуру аустенит. Это такие крупные кристаллы, именно однородные кристаллы. Но при отрицательных температурах, например, при минус 40 градусах, структура магнитного материала меняется. Вместо аустенитной структуры устанавливается мартенситная структуры, т.е. елочкой. Это можно видеть, между прочим, есть в фильме, я могу принести и показать, как структура аустенитная меняется на мартенситную. Но сплав магнитопровода, это уже не магнита, а магнитопровода. Сплав с аустенитной структурой имеет температурный

коэффициент линейного расширения примерно 0,6 ппм на градус. 0,6 млн на градус нагрева. Кварц, из которого делается маятник, он имеет температурный коэффициент линейного расширения 0,5 ппм на градус. То есть они очень близки друг к другу, поэтому, когда сильно меняется температура, там взаимные смещения деталей получаются ничтожно маленькими. А когда структура становится мартенситной, то температурный коэффициент скачком изменяется от уровня 0,6 ппм на градус к уровню 15 ппм на градус. Размер сопряженных с кварцевой пластиной деталей меняется значительно. Когда переход этот, нуль скакнул на довольно большую величину, порядка 200 микрожета, 300 микрожета, и потом застабилизировался. Если повторный цикл идет, нагрели, все перешло опять в состояние аустенита, потом начали охлаждать, дошли до точки выпадения аустенита – опять скачок.

Кривые нагрева остужения, там получается несколько скачков. Конечно, когда потребители видят эти скачки, они бракуют эти приборы. Такие приборы куда не годятся. То же самое и здесь. Структура этого магнита.

Первое, о чем мы говорили, это надо обрабатывать его самым тщательным образом, следить за, между прочим, задачей, которые относятся к четвертой нашей специализации, к технологам. Технологии должны заниматься вот этим вопросом. Это их вопрос, и тонкий вопрос, которые конструкторы не знают. Но, в первую очередь, уметь исследовать эти процессы должны технологи.

*Дальше, что еще? На что обращать внимание? Конечно, еще надо обращать внимание на то, кто делает эти материалы. Вот скажем есть такой завод Гусь Хрустальный, самый лучший кварц в России. Кварц, который выпускает Гусь Хрустальный, КУ-1 марка, то от среднего качества, но более ли менее терпимый. Но Гусь Хрустальный приказал долго жить, его обанкротили, скорее всего. И образовалось множество*



*мелких фирмочек вокруг. Ну, естественно, эти фирмочки раньше входили в Хрустальный. Они там получили отливки, пули, так называемые, из этого кварца. Потом сейчас они его режут, обрабатывают, и продавать начали. И вот каждая фирма продает эти пластины по своей цене.*

Покупаем эти пластины, смотрим какие характеристики. Как групповыми технологиями обработки кварца начинает заниматься, то в качестве защитной пленки на кварц, надо напылять металл. Потом еще фоторезисты могут защищать, это специальные операции. Так вот, металл на кварцевую пластиночку, это называется варка такого размера, 100-миллиметровая пластина, вырезанная из булей с очень прочными размерами. Дальше надо его закрыть маской, которая не пускает травитель к кварцу. Потом опустить в плавящую кислоту и проводить травление. Либо медью мы покрываем, либо медью с примесью ванадия, можно золотом покрывать. Но потом золото или покрытие, как серебряную бумажку с конфеты, можно содрать. То есть адгезия напыленного металла к кварцу близка к нулю. И не будет работать. При такой адгезии, травитель под маску заберется и там натравите неизвестно что.

Поэтому, прежде чем напылять металл, берут эту кварцевую пластиночку и всю погружают на короткое время в травитель. Чуть-чуть появляется небольшая шероховатость на поверхности, хотя она крайне нежелательна. Ну, в общем, поверхность становится подготовленной для принятия металла, для напыления металла. После того, как подтравили чуть-чуть, нам на единицы микрон надо подтравить. А потом напыляют металл, и его скальпелем не сдерешь, не счистить, чтобы он прямо прицепился к этому просто.

Дальше вот провели такую адгезию, отчистили от металла, просто провели такое подтравливание. И с удивлением мы обнаруживаем, так вот, проверив эти кристаллы, идеальная чистота поверхности, идеальные

оптические свойства, никаких свирий плавленого кварца не возникает, которые искажают прохождения света через эту пластиночку.

Вот смотрим, даже невооруженным глазом видны цепочки пузырьков. Причем эти пузырьки не выходят на поверхность. Они находятся в средней части пластиночки кристалла. Оказывается, в кварце имеется вода, в связанном состоянии. Если мы начнем травить этот кварц, то, конечно, пузырьки эти придут к поверхности. Дальше ничего хорошего не получится.

А дальше система какая? Дальше смотрим, кварц имеет марку КУ-1. Кто дешевле продает? Самую дешевую находят. Разрешается покупать кварц только самый дешевый. Дальше начинаются фокусы, пузыри какие-то всплывают, их не должно быть, но они могут появляться. И кварц, и металл, внесли ряд модернизаций, и приборы стали никуда не годные.

*Завтра мне надо ехать и драться с ними. Я не знаю, целый я оттуда уеду или не целый. Я расскажу, как делаются магниты, как делаются балки, как выглядят балки, которые получены из привезенного мной японского кварца с чистотой поверхности 5/9. У нас такого кварца, к сожалению, нет, потому что его можно получить только с газовой фазой. Это очень сложный процесс. На некоторых фирмах его начинают осваиваться. Вообще-то это очень опасно менять установившиеся технологии и пускать граждан в посудную лавку, всекольную лавку, которую грязными сапогами начинают носить свои изменения. Гнать надо их просто и не допускать к работе. Ну, в общем, сложные ситуации.*

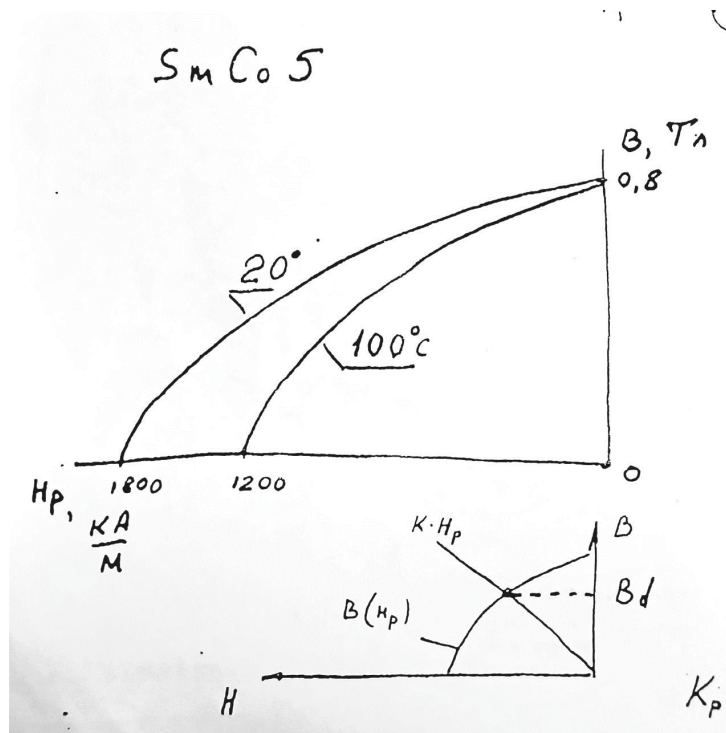
Железо, вот это вот магнитопроводы для приборов. Та же самая история. Вот рядом с нами институт имени Бардина, это, так сказать, черной металлургии, там были лаборатории высокого уровня, которые делали прецизионные сплавы. Сейчас от этих лабораторий мало чего осталось. Все прихватизировали, поделили, на подразделения маленькие, которые, так сказать, торгуют. Кто дешевле, у того и покупают,

разрешается покупать. И потом приходят свитки, упаковки приходят на завод.

Вот начинаем проверять температурный коэффициент линейного расширения. Должно быть 0,7 ппм на градус. Берем одну упаковку, 1,1 вместо 0,7, второе 0,9, третье 0,7. Одна упаковка, одна плавка. Ну а для разных упаковок, для разных сплавов еще хуже получается. То есть, в общем-то, чтобы вы представляли, с чем вам придется столкнуться.

Но потом, вы знаете, что мы должны довести до насыщения. Точно так же, как мы проводим экспериментально, точно так же мы доводим до насыщения этот магнитный материал, а потом отпускаем его. И размагничивающий эффект создаёт воздушный зазор. И что-то там остается от  $H_p$ . Вот это – остаточная намагниченность материала. Её ещё на 10% уменьшают, для того чтобы была стабильная индукция. Все домены-уроды должны стряхнуть, чтобы они пришли в устойчивость.

Теперь внизу я привёл вам график зависимости индукции от  $H$ -размагничивающего.



Те же самые графики, что и наверху, но эти графики даны для материала самарий-кобальт 5. Я дал отдельный график, потому что масштаб совершенно не съедобный получается. Если бы я на первом графике показал график, где самарий-кобальт 5, то начало координат было у нас здесь, а коэрцитивная сила была в этом корпусе, который, так сказать, за двором нашим.

То есть для сплава ЮНДК-35Т5БА это 105 кА/м, да? А для самарий-кобальта — 1800 кА/м. Колоссальная разница. В 18 раз больше. Индукция насыщения 0,8 Тесла всего-навсего, не очень большая. Я привел здесь же, на этом графике зависимости от температуры: при 100 градусах мы имеем график с коэрцитивной силой, который заканчивается на 1200 кА/м, а для 20 градусов — до 17000 кА/м.

Материалы тех лекций, где мы ввели разговор о стабилизации температурного коэффициента магнитного материала с помощью термомагнитных шунтов. Термомагнитные шунты с материалом самарий-кобальт 5 редко используются. А вот мешают в сплав самарий кобальт 5 гадолиний, и диспрозий. Фактически, это те же самые магнитные шунты, только они равномерно распределены по всему объёму магнитного материала. Они позволяют получать фактически одну линию для минус 40 и для плюс 40.

Но, опять же, это далеко не все фирмы владеют этой технологией. В Соединенных Штатах Америки владеет этой технологией фирма «Рекома». И она производит сверхдефицитный и сверхнедоступный для продажи материал, который называется... Можно получить материал, где-то вообще любой, вообще температурный коэффициент по всему диапазону, ну, или расчетные значения этого температурного коэффициента. Ну, у нас тоже работают в этом направлении, тоже добавки те же самые делают, правда. Я не помню, какого редкоземельного материала у нас нет, вроде гадолиний. Если американцы используют...

Для расчета нам нужны эти характеристики. Без этих характеристик рассчитать магнитную систему невозможно.

Теперь давайте посмотрим, как идёт намагничивание материала. Первый случай, наиболее хороший – это намагничивание материала в арматуре. Так прямо и пишется: «намагничивание в арматуре».

То есть магнит вставляется, скажем, если магнитная система неразборной конструкции, то сначала её собирают с ненамагниченным магнитом, а потом к этому магнитопроводу, снаружи уже, подводят полюса постоянного магнита и включают очень большой ток кратковременно. Это быстрый процесс, поэтому в качестве намагничивающего поля нужно использовать поле, создаваемое током разряда конденсаторов. Берут батарею конденсаторов, много конденсаторов, и через переключатель подводят... Вы кратковременно... Вот эти все конденсаторы подключены к обмотке электромагнита. И дальше вы кратковременно замыкаете цепь. Вот у вас здесь поток магнита всплыл до предела, а потом он уменьшается. Вот этого вот импульсного намагничивания хватает для того, чтобы намагнитить магнит. Но магнит намагничивается вместе с магнитопроводом.

Что значит намагничивание в арматуре?

Это намагничивание магнита вместе с магнитопроводом. Почему магнитопровод не мешает намагничивать? Он насыщается. Поле настолько большое, что оно насыщает этот магнитопровод, и оставшееся магнитное поле проникает внутрь магнита и намагничивает его до насыщения.

Если самарий-кобальт 5, то его приходится намагничивать без электромагнита. Там просто на воздухе. Там ещё сложнее. Очень сложно. Колоссальную напряжённость магнитного поля создать, чтобы его завести в насыщение. То есть если смотреть на петлю, то она чуть ли не горизонтально будет расположена. Очень большой ток надо. Конденсаторов множество. Катушки здоровые, но определённые. Потому

что если много витков намотать, то индуктивность большая. Индуктивность будет большая, и ток будет медленно нарастать, а нужны кратковременные импульсы.

Теперь начинается расчет. Я зарисовал магнитопровод для неразборной конструкции. Внутри у меня постоянный магнит, дальше магнитопровод из магнитно-мягкого материала. Я к этому магнитопроводу из магнитно-мягкого материала подвожу полюса электромагнита и даю разряд тока через катушки. У меня магнит намагничивается.

Как рассчитать какая получится магнитная индукция? Для этого я рисую схему, эквивалентную этой магнитной системе.

Что в неё входит?

Первое – это источник намагничивающей силы. По той табличке, которую я вам давал по аналогии, мы видим, что намагничивающая сила может быть определена как  $H_s$ , умноженное на длину магнита.

Как течёт этот магнитный поток?

Он проходит через воздушный зазор. Воздушный зазор имеет сопротивление для магнитного поля, равное  $R_v$ . То есть длина зазора, делённая на  $\mu_0$  и на площадь. И второе, – это магнитный поток протекает по самому магниту. А магнит он обладает внутренним сопротивлением для протекания потока.

То же самое, как, скажем, батарейку карманного фонарика или ещё что-нибудь: ток не до бесконечности идёт. Он ограничивается внутренним сопротивлением батарейки. Если вам надо проверить, хорошая батарейка или плохая, вы берете обычный тестер, обычный амперметр, ставите там предел, где-то 10 ампер, и накоротко замыкаете на прибор. Естественно, прибор не сгорает, потому что внутреннее сопротивление источника, оно ограничено, оно, так сказать, будет, ну, у батарейки, оно будет, так сказать, такой величины, что, так сказать, максимальный ток не превышает одного амперметра. Хотя, если вы такой фокус попытаете провести с батареей



аккумулятора автомобиля, то вы получите хорошее сгорание провода, так и прочее. Все зависит от того, какие размеры, какие параметры источника питания.

Но то, что внутреннее сопротивление есть, ограничивает величину потока. Вот такая схема. Сопротивление магнитопровода наружного я им пренебрегаю. Это, вообще говоря, ошибка. Нельзя пренебрегать для наших задач. Но для того, чтобы грубо считать, какая индукция, это сделать можно, потому что магнитопровод обладает очень маленьким магнитным сопротивлением. У него  $\mu$  в десятки, в сотни, в тысячи раз больше, чем у воздуха, поэтому при наличии воздушного зазора, сопротивление магнитопровода можно не учитывать. Получается тогда уравнение:  $H_c$  (коэрцитивная сила), умноженная на  $L$  магнита, равняется падению магнитного напряжения: поток умножить на магнитное сопротивление магнита и плюс поток умножить на сопротивление воздушного зазора. Вот такое получается уравнение.

Случай намагничивания в armатуре.

$$H_c l_m = \Phi \cdot R_m + \Phi R_g$$

$$H_c l_m = H_d \cdot l_m + B_d \cdot S_m \cdot R_g$$

$$H_d = H_c - H_p$$

$$H_p l_m = B_d \cdot S_m \cdot R_g$$

$$B_d (H_p) = \frac{l_m}{S_m \cdot R_g} \quad H_p = K H_p; [K]: \frac{T}{A/m}$$

$$B_g = \frac{B_d \cos \gamma}{(1 + \delta_{D_m}) \cdot K_p}; \quad B_{g_p} = B_g \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\theta} \cos \beta$$

$$K_p = \frac{G_g}{G_0} - \text{коэф. рассеяния магнитного поля}$$

Уравнение простенькое, а найти величину потока невозможно, потому что мы не знаем, как меняется сопротивление магнита при протекании потока. Начинаем тогда делать кое-какие преобразования. С левой стороны  $H_s$  на  $L$  магнита. Я вместо «поток умножить на сопротивление магнита» перехожу к понятию напряжённость магнитного поля в магните  $H_d$ , умноженная на длину магнита. Это получится вторая формула для падения напряжения:  $H$  на  $L$  цепи. В данном случае  $L$  цепи – это  $L$  магнита. И вместо потока я записываю индукцию  $B$ , умноженную на площадь магнита. Это то же самое, что и поток. Умножить на сопротивление  $R$  воздушное.

Преобразуем. Да, значит, теперь, вот  $H_d$ , оно состоит из двух частей. Первая – это коэрцитивная сила, крайняя точка кривой размагничивания.  $H_d$  – напряжённость магнитного поля внутри магнита. И оно равно коэрцитивной силе минус напряжённость размагничивающего поля. Произвожу преобразование и получаю уравнение в виде:  $H$  размагничивающее, умноженное на  $L$  магнита, равняется  $B_d$ , умноженное на  $S$  магнита, умноженное на  $R$  воздушного зазора.

Отсюда я получаю формулу:  $B_d$  в зависимости от напряженности магнитного поля, равняется  $L$  магнита, делённое на  $S$  магнита, на  $R$  воздушного зазора, умноженное на  $H$  размагничивающее. Вот это уравнение мы уже решать можем.

Почему мы можем это решать? В правой части этого уравнения, это уравнение прямой зависимости индукции от  $H_r$ , а в левой части – результат эксперимента нашего. Мы определили, как зависит  $B_d$  внутри магнита от напряжённости размагничивающего поля. Значит, я получаю два уравнения. Первое уравнение – это вот эта кривая размагничивания, которую мы получили экспериментально. А второе – это уравнение прямой, которое проходит через ноль и через какую-то точку, которая соответствует этой прямой. Наклон этой прямой:  $L$  магнита на  $S$  магнита на  $R$  воздушное. И то, и другое, и третье – всё известно. Значит, я записываю это уравнение

как  $K$  на  $H$  размагничивающее, где величина  $K$  – это наклон прямой. И величина  $K$  носит название прямой размагничивания. Точка пересечения этих двух линий, кривой размагничивания и прямой размагничивания, даст мне точку  $B_d$ , то есть какая индукция в серединочке магнита. Вот это вот величина, которую мне нужно было определить.

Значит,  $K$ , название – прямая, коэффициент прямой размагничивания, или коэффициент размагничивания, лучше сказать. Размерность его – генри на метр, она записана у вас в генри на метр, что то же самое, что Тесла, деленная на ампер на метр. А поскольку именно в размерности Тесла на килоампер на метр, то эту прямую уже очень просто построить, просто поставить, думать о коэффициентах не нужно.

Но это индукция в средней части магнита. Мы знаем, какой поток идёт через магнит. Но этот поток выходит из магнита не только на торце, а он еще вылезает с углов (утечка) и с боковых поверхностей тоже утечка через поверхность, а меня интересует индукция в зазоре магнитопровода датчика момента. Поэтому я эту индукцию определяю как  $B$  дельта, умноженное на косинус  $\gamma$  (помните, что у нас по косинусному закону распределена индукция в зазоре), делённое на единицу плюс  $\delta$  на  $D_m$  (отношение площадей зазора, кривой зазор, к площади центрального сердечника) и умноженное на коэффициент размагничивания.

Коэффициент размагничивания,  $K_r$  обозначен, он показывает, какая часть потока не доходит до торца магнита, а уходит просто на боковые участки, то есть эта часть не участвует в создании момента. А дальше мы нашли значение индукции в какой-то точке зазора. Но нам с этой точки зазора никакого прока нет, нас интересует среднее значение индукции, приходящееся на площадь катушки. Поэтому мы должны пересчитать, должны найти интегральный поток, текущий через площадь сечения катушки, отклонённой от центра на угол  $\gamma$ . И учесть угловую ширину катушки, это  $\theta$  катушки будет. И получаем, на угол не  $\gamma$ , а на угол  $\beta$ , на

отклонение катушки, мы тогда получим, что делается в самой катушке, и найдём индукцию, которая нужна для определения крутизны датчика момента.

*Ну, вот это всё. Я прошу прощения, если вас чуть-чуть утомил.*

## Лекция 22 сентября

Так, значит, мы с вами на прошлой лекции начали изучать метод расчёта магнитного поля в магнитопроводе датчика момента с двухполюсным магнитом. Ну, в общем-то, похожий метод для других цепей применяется.

Как определяется зависимость индукции от напряжённости размагничивающего поля, это мы с помощью этой установки определили. Данные по кривым размагничивания содержатся в справочной литературе. На любой магнитный материал имеется в справочниках кривые размагничивания. Я вам привёл эти кривые размагничивания для сплава ЮНДК-25БА, ЮНДК-24БА, ЮНДК-35Т5, ЮНДК-35Т5БА и ЮНДК-15. Последний не очень интересный для нас материал, его использовали раньше для изготовления шестиполюсного магнита. Поскольку это материал, который не текстурированный был, получается вот этот магнит, поскольку у него шесть полюсов, это три датчика в одном объёме, то более-менее момент был приемлемый и крутизна этого датчика была. Но такой материал практически не используется.

Как идёт расчёт? Мы для расчёта берем двухполюсный магнит, причём будем рассматривать случай намагничивания магнита в арматуре.

Чем интересен этот случай? Что значит намагничивание магнита в арматуре?

Собирается магнитная система, а именно: материал магнита вставляется в магнитопровод. Ну, он удерживается соответствующими вкладышами, ведь я просто эти вкладыши не показывал. Вы прекрасно знаете уже конструкцию этого магнитопровода. Затем этот магнитопровод помещают между полюсов электромагнита так, чтобы продольная линия магнита совпадала с направлением намагничивающего поля. Намагничивание, питание этого магнита выбирается большим так, чтобы напряжённость магнитного поля была порядка двух-трёх десятых

килоампер на метр, то есть такая напряжённость, при которой материал кольца магнитопровода насыщается. И причём ещё большой ток, что он все свои способности исчерпал, потому что он насытился и просто становится как воздух. А то, что осталось, та намагниченность, она проходит внутрь этого кольца и протекает по магниту. А затем мы выключаем это магнитное поле и сам магнит начинает создавать магнитное поле в зазоре. Причём это, естественно, слабее получается, чем намагничивающее. Оно с той точки, которая выбрана для насыщения, спускается до точки, которую мы определяли с помощью вот этой установки для намагничивания. Мы это поле изобразим между полюсами магнита и кольцом. Равномерное магнитное поле имеется в зазоре.

Я нарисовал схему, и дальше я нарисовал схему, эквивалентную для магнитной цепи.

*Значит, я должен сразу перед вами извиниться. Не за себя извиняться, а за методы расчёта магнитных цепей, которые приводят во многих учебниках и справочниках. У нас же много... халтурят. Мы вот этот расчёт ведём, используя массу допущений.*

Ну, какие допущения?

Например, когда я вот так от магнитной цепи в реале, вот так провод кольцевой и магнит, перехожу к эквивалентной магнитной цепи.

Я записал в кружочке здесь намагничивающая сила  $H_c$  умноженная на  $L$  магнита. Теперь магнитная цепь. В магнитной цепи имеется воздушный зазор. Для него магнитное сопротивление  $R_v$  обозначено. И имеется внутреннее сопротивление магнита. Так же, как и внутреннее сопротивление электрической батарейки, гальванического элемента. Часть магнитного напряжения падает на внутреннем сопротивлении магнита.

Какое здесь уже допущение?

Сложное распределение магнитного потока в магнитной цепи, оно описывается уравнением математической физики. Для каждого участка



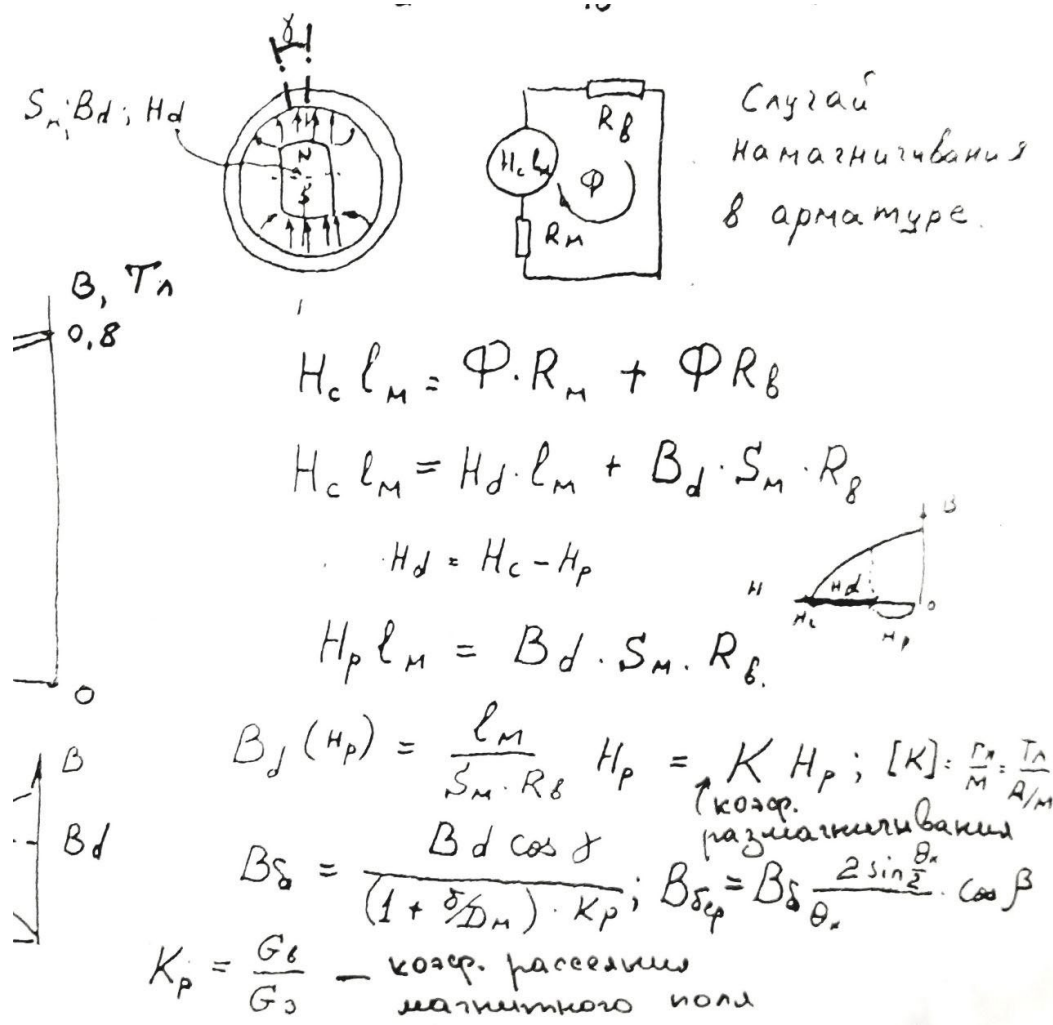
вводятся граничные условия, скажем, кольцевого зазора, цилиндрическая поверхность магнита, цилиндрическая поверхность магнитопровода, дальше угол магнита и поверхность магнитопровода, второй участок, боковая поверхность магнита и поверхность магнитопровода, третий участок. Для каждого этого случая решается уравнение распределения магнитного потока. Достаточно громоздкая математическая задача. А потом вам надо соединить решения.

Распределение магнитного потока в кольцевой щели, которое мы получили, у него только два граничных условия. А граничное условие справа и слева – это индукция магнитная, которая для цилиндрической среды должна совпадать с распределением индукции с угла. А дальше распределение с угла должно переходить на распределение индукции по боковой поверхности. То есть это такая, так сказать, тяжёлая задача, по-хорошему, это тяжёлая задача, требующая хорошей усидчивости исследователя. Но я вынужден работать не с распределёнными параметрами, как в реальной цепи, а с сосредоточенными. Значит, здесь, конечно, это грубое приближение. Идут на такое приближение вынужденно. Частично это оправдывается тем, что точность расчета магнитных цепей не очень большая. Почему?

Вы покупаете магнитный материал или получаете магнитный материал. Предположим, вы покупаете сплав ЮНДК-24БА. Осредненная его характеристика идет от 1,2 тесла до 50 кА/м. Это осреднённая магнитная характеристика. А вот вы купили один слиток материала, одну партию этого материала. У него не 1,2, а 1,25 или 1,15 тесла вместо 1,2. Также отличается коэрцитивная сила. То есть процентов на 10 у разных упаковок, у разных поставок может отличаться. Вы можете считать и до сотых, и до тысячных для одного материала, а пришёл другой материал, и результат, в общем-то, стал не совсем верен. Поэтому особенно за точностью здесь

гнаться не стоит. Раз сам материал такой неопределённый, то и это оправдывает неточность расчета.

Тут тоже самое, что и 15 сентября:



Я заменил распределение магнитного потока на магнитную цепь с сосредоточенными параметрами. Дальше я из этой цепи записываю уравнение Кирхгофа:  $H_c$  на  $L$  магнита равняется падению магнитного напряжения на сопротивление магнита  $\Phi$  на  $R$  магнита плюс  $\Phi$  на  $R$  воздушного зазора. Переписываю немножечко в другом виде. То есть я, скажем,  $\Phi$  на  $R$  магнита могу записать как  $H_d$  (напряжённость магнитного поля в магните) умножить на  $L$  магнита. То же самое, что ток на сопротивление (в электрической цепи). Оно в магнитной цепи может записываться как  $\Phi$ , умноженное на  $R$  магнита, или как  $H$ , напряжённость внутри магнита, умноженное на  $L$ . Это у нас было на прошлой лекции с

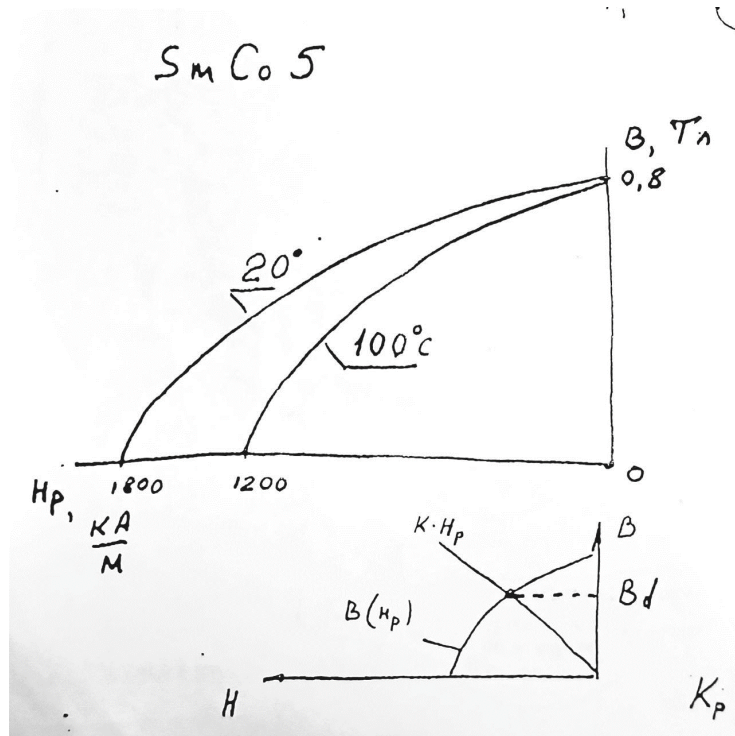
вами. И второе слагаемое я записываю:  $\Phi$ , это будет у меня индукция магнитного поля магнитной нейтрали, умноженное на площадь магнита. Почему нейтраль берется? Через эту нейтраль протекает полный магнитный поток. Дальше он расходится по сторонам, и дальше напряжённость магнитного поля падает.

Теперь, чему равна индукция в магните? Коэрцитивная сила магнита складывается из двух составляющих. Первая – это напряжённость размагничивающего поля. А второе – это то, что остается в самом магните  $H_d$ .

Для чего я это делал? Я не могу решать первое уравнение в таком вот виде. Оно выглядит простенькое, всего одна строчка. Но у меня нет функции  $R$  магнита, как  $R$  магнита зависит от напряжённости магнитного поля, от потока зависит. Поэтому я буду производить преобразования. Они все справедливые и простые. В итоге я получил уже новое уравнение, в котором мне всё известно. В левой стороне  $H$  размагничивающая на  $L$  магнита. Это уравнение прямой. В правой стороне  $B_d$ , которая зависит от  $H$  размагничивающей, которую мы определили при эксперименте. Я вот из этого уравнения получаю  $B_d$  от размагничивающего поля равняется длина магнита, делённая на площадь магнита, делённая на  $R$  воздушное и на  $H$  размагничивающую. Или некоторый коэффициент  $K$  на  $H_r$ . Коэффициент  $K$  носит название коэффициент размагничивания. Размерность этого коэффициента из формулы получается генри на метр. Но генри на метр – то всё равно, что тесла, делённая на ампер на метр.

То есть вот этот график для кривых размагничивания построен в координатах тесла по одной оси, а по второй оси килоампер на метр, ну или ампер на метр. Вы можете построить прямую размагничивания. Это прямая, которая проходит через нулевую точку и с наклоном  $K$  идет до пересечения с кривой размагничивания. То есть, когда у нас прямая (коэффициент размагничивания) сравнивается по величине, то уравнение решено. Мы

находим индукцию  $B_d$ . Это точка пересечения прямой размагничивания и кривой размагничивания. Это я нашел индукцию в магнитной нейтрали.



Дальше. Меня эта индукция в магнитной нейтрали мало устраивает. Она мне не очень интересна. Мне надо посмотреть, какая индукция находится в месте, где расположена катушка. Поэтому я перехожу с индукции  $B_d$  к индукции  $B_\delta$ .  $B_\delta$  – это индукция в зазоре магнитной системы.

Чем она отличается?

Ну, там, где  $B_d$ , это прямоугольное сечение. А  $B_\delta$  – это цилиндрическое сечение по серединке воздушного зазора. Ну, естественно, у цилиндра больше площадь, чем у прямоугольника центрального. Поэтому я вынужден пересчитывать  $B_d$  на новую геометрию, большую площадь. Плюс к тому, значение индукции в каждой точке, которая определяется углом  $\gamma$ . В этой точке индукцию я знаю. Это магнитное поле, проходящее через магнит. Оно выходит не только сюда, а частично уходит на бок. С угла течет. Ну а если вы посмотрите вот с этой стороны, то там ещё два угла

появляются, с которых поле утекает. Вот это вот утекающее поле мы оцениваем коэффициентом рассеивания магнитного поля.

Когда я ищу  $B\delta$  в точке, где я отметил, то это  $B\delta$ , оно получается меньше, чем  $Bd$ , потому что, во-первых, площадь побольше и плюс к тому она еще уменьшается на коэффициент размагничивания. Где коэффициент размагничивания есть отношение проводимости магнитного поля воздушного зазора к проводимости всех зазоров и рабочего воздушного зазора, и всех участков рассеивания магнитного поля.

$G_v$  – это полная магнитная проводимость всех воздушных зазоров, отнесённая только к проводимости зазора кругового, то есть зазора, где находится катушка.

Но, опять же, индукция в какой-то точке  $\gamma$  меня не очень интересует. Меня интересует индукция, которая приходится на катушку. То есть катушка находится где-то здесь. Она отклонена относительно центра на угол  $\beta$ . Меня интересует значение индукции, которое приходится на площадь катушки  $B\delta_{ср}$ . Чтобы найти его, я должен взять параметр, который называется угловая ширина  $\theta$  катушки. Это будет  $B\delta$ , умноженное на два синуса ( $\theta$  катушки пополам), делённое на  $\theta$  катушки, и на косинус  $\beta$ . Косинус  $\beta$ , мы знаем, что у нас индукция в воздушном зазоре распределена по косинусу. Вот это вот, так сказать, то, что мы на прошлой лекции с прослушали, то, что ваши коллеги так и не освоили.

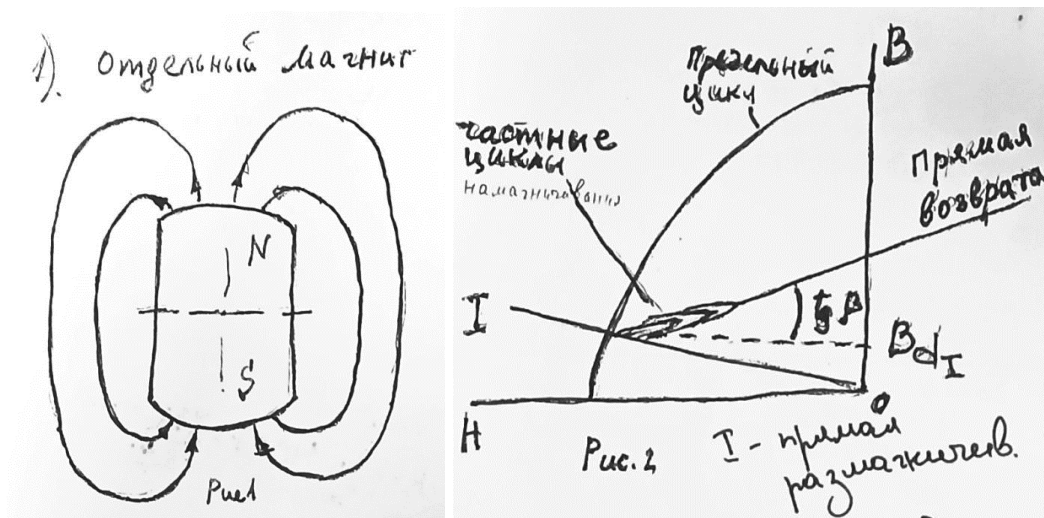
Теперь следующий раздел. Намагничивание в armатуре – наилучший случай. Оно даёт наибольшую магнитную индукцию. Но не всегда возможно пользоваться намагничиванием в armатуре. Иногда магнит намагничивается отдельно от armатуры. То есть через него пропускается здоровый ток через электромагнит. Кстати сказать, это не всегда большой ток, протекающий долго. Я не знаю, сколько времени занимает протекание тока, но я знаю, что это очень маленькая величина. Мне просто и в литературе даже не попадалось, потому что где-то говорилось, сколько

надо. Я думаю, наверное, какие-то микросекунды, может быть, определяется даже не только свойствами магнита, сколько параметрами электромагнита. А что там в магните делается по времени, я не знаю.

Чаще всего большой ток приходится включать. Большой ток – это сильный нагрев обмотки электромагнита. И мощность тратится очень большая, и может обмотку какую-то поварить. Поэтому ставят конденсаторы. Заряжают конденсаторы до довольно большого напряжения. А потом их отключают от внешней цепи и дают разряд тока через обмотку электромагнита. Получается всплеск тока через электромагнит. И этого всплеска по времени достаточно для того, чтобы магнит ушёл в насыщение. А сколько он там будет в насыщении, это никого не волнует, того, что раз в насыщении находится, значит, там будет стоять от этого насыщения. А потом, когда намагничивающее поле пропадёт, то дальше всё идёт по тем процессам, которые используются при определении кривых намагничивания магнитного материала. Как конденсаторы разрядили через катушки, получился всплеск магнитного поля, этот магнитный поток насытил постоянный магнит. А потом этот магнитный поток уменьшился до состояния, которое определяется коэффициентом размагничивания.

Я ещё раз обращаю ваше внимание. Вернёмся к тому, что я вам рассказывал. Вот эти графики. Коэффициент размагничивания – это отношение длины магнита к площади магнита и к сопротивлению воздушного зазора. Воздушный зазор, если маленький, то получается сопротивление тоже маленькое. А вот когда мы берём отдельный магнит, то длина магнитных линий силовых. Я нарисовал в первом случае отдельный магнит и магнитное поле, которое вокруг этого магнита образуется за счёт собственной намагниченности. Значит, это длинные магнитные линии, поэтому коэффициент размагничивания получается маленький. Я подсчитываю коэффициент размагничивания, пока про

проводимость я не говорю. Как определять проводимость, мы чуть-чуть позже. Получается небольшой.



Дальше, по уже известному нам методу, мы уже знаем, как считать индукцию магнитного поля в нейтральном сечении магнита. Неважно, на магнитопроводе или нет. Если у нас есть  $R$  воздушное, есть длина магнита, площадь магнита, то я могу определить, какая индукция в нейтральном сечении магнита. Для этого я должен воспользоваться кривой размагничивания. И я строю прямую размагничивания, которая имеет наклон  $K$  размагничивания 1.  $K$  размагничивания 1 – это будет длина магнита, делённая на площадь магнита, умноженная на проводимость воздушного потока для отдельно взятого магнита.

$G_{m1}$  – малая величина  
(большой воздушный зазор,  
нет магнитопровода)

$$K_{разм1} = \frac{l_m}{S_m} G_{m1} \quad (\text{рис. 2})$$

Проводимость маленькая. Получаю прямую размагничивания. Строю прямую размагничивания. Я её обозвал 1. Римской цифрой 1 обозначил. Когда я вытащу этот магнит из электромагнита, между полюсов

электромагнита, то индукция у него упадёт до уровня  $B_d1$ . То, что мы определяем по первому методу.

Следующая операция с этим магнитом: этот намагниченный магнит засовывается внутрь магнитопровода. Установка магнита в магнитопроводе.

Что при этом делается с магнитным материалом?

Оказывается, что магнитный материал в случае, когда мы не делаем внешнее магнитное поле, а просто убираем размагничивающее воздействие воздушного зазора, она начинает меняться не по предельному циклу намагничивания. Предельный цикл намагничивания, вот это вот цикл, знакомая вам петля, гистерезисный цикл. Мы нашли эту точку  $B_d1$ , и начинаем замыкать полюса, то начинает меняться индукция вот по такому вот закону. Такие вот петельки получаются. Это называются частные циклы намагничивания.

Для материалов, которые используются в наших приборах, материалы особые, хорошие материалы, у них эти все частные циклы они получаются узенькие, и, в общем-то, их можно заменить прямой. Все-таки это частные циклы, то есть, если я чуть-чуть сдвинулся, а потом назад, то я по петле пойду. Кривые получаются очень узенькие. И в принципе они могут быть заменены прямой. Эта прямая носит название прямая возврата. Эта прямая идёт под углом бетта (на рисунке 2). Для точки  $B_d1$  можем найти значение прямой возврата.

Ну как найти?

Взять справочник, в справочнике приведена вот такая характеристика. Возвратная (обратная, реверсивная) магнитная проницаемость –  $\mu_r$ . Тангенс бетта есть  $\mu_r$ .

Когда мы начинаем запихивать магнит после намагничивания в магнитопровод, то, естественно, магнитное поле увеличивается, в зазоре



появляется большее поле, чем было, поле растёт, но оно растёт не так быстро, как хотелось.

Как определить магнитную функцию после того, как я засунул магнит в магнитопровод?

Я должен посмотреть, какой коэффициент размагничивания будет в магнитопроводе. Вообще говоря, мы с вами уже определяли коэффициент размагничивания. Мы знаем, что он у нас равняется  $L$  магнита, деленное на  $S$  магнита на  $R$  воздушного зазора. Точно так же находим коэффициент  $K$  размагничивания 2, как мы находили этот коэффициент размагничивания на случай намагничивания магнита в арматуре.

2) Установка магнита в магнитопровод

$\frac{1}{\mu} B = M_c$  (или  $M_r$ ) — реверсивная

магнитная проницаемость

(Ю.М. Лягин, Справочник)

$$K_{разм2} = \frac{L_m}{S_m} \cdot G_m$$

$G_m$  — из варианта намагничивания в арматуре (рис 3)

разборка магнитной системы (рис 4)

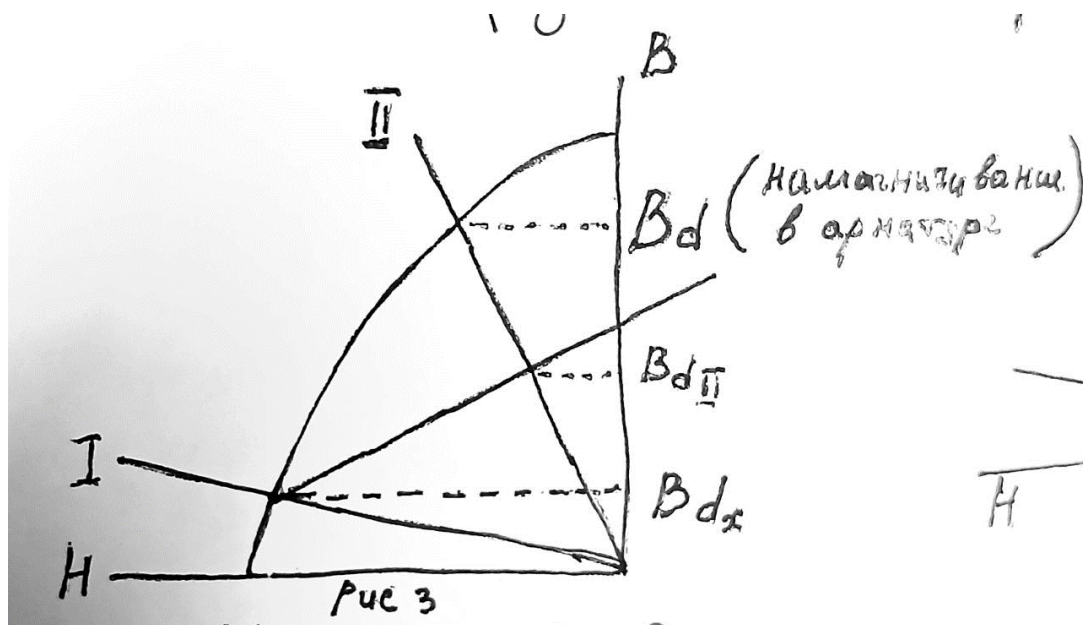
намагничивания)

до разборки

У меня получилось. Естественно, коэффициент  $K$  размагничивания 2 гораздо больше, чем коэффициент размагничивания 1, и я строю прямую размагничивания вторую. Прямая размагничивания будет точно такая же, как и для магнита, намагниченного в арматуре.

Раньше, когда намагничивали в арматуре, то я получал точку  $B_d$ . То есть это была точка пересечения прямой размагничивания с предельным циклом намагничивания, с кривой размагничивания предельного цикла. А сейчас у меня уже по предельному циклу ничего не меняется. По частному

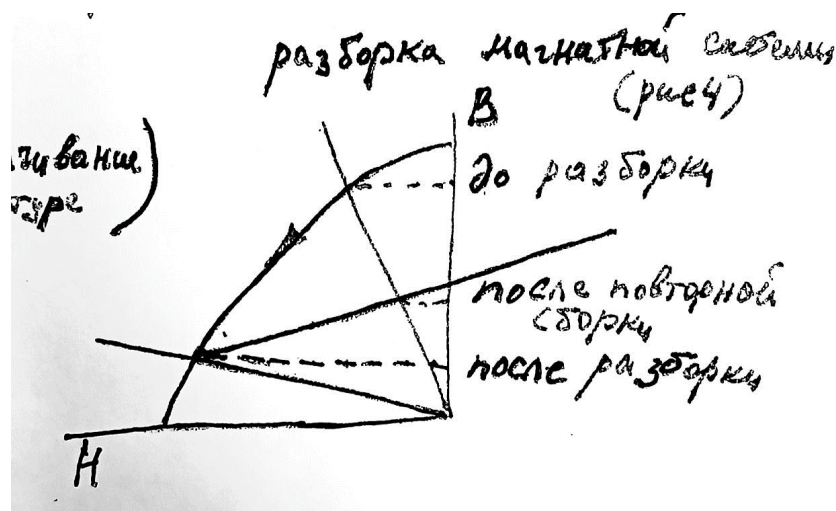
циклу, по прямой возврата меняется индукция. Значит, я получаю вместо индукции  $B_d$ ,  $B_{d2}$ , которая здорово меньше, чем индукция  $B_d$ . Значит, поэтому выгоднее намагничивать в арматуре. Вы знаете, что здесь вы получаете, например, вдвое больше.



Вот у нас есть магнитная система, и мы вытаскиваем из неё магнит. Почему, собственно, я когда вначале открывал картиночки, я писал, что первая самая схема – это неразборная конструкция магнитной системы с двухполюсным магнитом.

Почему она неразборная?

Когда мы бы вытащили магнит, потеряли бы поле. Почему потеряли?



До разборки у вас было прямое размагничивание, которое пересекалось с предельным циклом размагничивания. Это было состояние индукции  $B$  до разборки. Когда я вытащил магнит, то я от прямой размагничивания второй перешёл к первой прямой размагничивания. Я перешёл на нижний уровень. После разборки индукция соответствует нижней точке пересечения прямой размагничивания и предельного цикла кривой размагничивания. После этого, когда я вставляю магнит обратно в магнитопровод, то я уже перехожу к пересечению не по предельному циклу, а к прямой возврата. То есть график после повторной сборки идёт до нового значения индукции, которая существенно меньше, чем была начальная индукция. Поэтому магнитные цепи после намагничивания в арматуре ни в коем случае нельзя разбирать, не предпринимая специальных мер.

Какие меры?

Иногда конструктору приходится проектировать, скажем, двигатели постоянного тока, которые устанавливаются на рамах карданного подвеса. Отдельная рама, внутренняя, у неё имеется ось. На этой оси висит, скажем так, магнитопровод с катушкой. Ротор магнитной системы устанавливается на другом кардановом кольце. Двигатель бескорпусной, когда вы собираете кольца вместе, то магнит входит в взаимодействие с катушками, и до того, пока его не собрали, никакого взаимодействия нет.

Как быть?

Вы должны магниты намагнитить в арматуре, а они у вас болтаются на отдельном кольце. Естественно, они сами по себе перейдут по прямой 1 к частным циклам и от индукции мало чего останется.

Можно что-нибудь делать?

Нельзя допускать вытаскивания магнитов из магнитопровода. Нужен какой-то специальный магнитопровод. Берут шайбу из магнитомягкого материала, прикладывают к ротору с многими магнитами, замыкают магнитное поле каждого из магнитов через вот эту шайбу. Там зазора

воздушного нет. И тогда магнитное поле находится даже выше, чем во 2 точке. И вы можете производить сборку. Собрали, вставили карданное кольцо, внутреннее карданное кольцо, промежуточное кольцо. Всё там закрепили, подшипники закрепили, всё закрепили. А потом взяли и отвинтили это технологическое кольцо от магнитов. Всё равно уже магниты будут находиться в своём родном магнитопроводе.

Мы не всегда можем обеспечивать намагничивание магнита в арматуре. Сплавы ЮНДК они намагничиваются все в арматуре. А вот сплавы из редкоземельных материалов, типа самарий-кобальт 5. Значит, его намагнитить в электромагните практически невозможно, потому что индукцию надо создавать громадную, такую, чтобы насытить этот материал, у него такую напряжённость создать магнитного поля, что никакой материал электромагнита не справится с такой напряжённостью. Самарий-кобальт 5 намагничивают отдельно от арматуры. Делают катушки без магнитопровода. Через эти катушки от конденсатора пропускают громадный ток. Всплеск магнитного поля очень большой получается, который намагничивает вот этот материал самарий-кобальт 5.

Дальше поставка с завода. Иногда, правда, на самих заводах наших, гироскопических, очень хороших, есть собственные установки для домагничивания. Но всё равно домагничивают отдельно от магнитопровода. Потому что, если у него будет магнитопровод, такой короткий, колоссальный всплеск магнитного поля, даст громадный ток Фуко и все это загасится. Поэтому только отдельно можно. Вы намагнитили, либо вы получили с завода намагниченный, либо здесь, перед установкой в прибор намагнитили, и дальше работаем с тем, что остлось.

Вот как быть здесь, потому что это явно случай намагничивания без арматуры?

Теперь нам надо знать свойства материала самарий-кобальт 5. У него настолько длинная, настолько пологая кривая предельного цикла

намагничивания, что у этого материала практически кривая предельного цикла совпадает с прямой возврата. То есть для этого материала нет размагничивания, нет перехода от  $B_d$  к  $B_{d2}$ . Его прямая возврата идёт почти по кривой предельного цикла. И считается так же, как для размагничивания, потому что что-то разбивать на два этапа бессмысленно, всё равно мы определяем по прямой уже возврата, которая совпадает с предельным циклом, определяем величину  $B_d$ . Не  $B_{d2}$ , а  $B_d$ .

Итак, мы с вами научились рассчитывать магнитную индукцию. Следующее, что у нас расчётное, теорию мы поняли, но у нас пока нет проводимости.

Как решается задача?

Решается методом, который носит название метода возможных путей магнитного потока. Если переводить на нормальный язык, то можно назвать его ненаучным методом тыка, никакой математической строгости в этом методе нет.

Начинается применение этого метода с такой фразы: «Нарисуем схему магнитной цепи и нарисуем возможный вид магнитных потоков».

А на самом деле, как оно распределено? Посчитать в данном случае, когда пользуемся методом возможных путей потока, мы не можем. Что нас здесь оправдывает? Первое, я вам уже говорил, что требований к строгости большого расчёта нет, потому что один образец магнитного материала от другого может немножечко отличаться. Процентом на 10 может отличаться. Поэтому, ну ошибёмся мы, рисуя это магнитное поле, или не ошибёмся, что особо страшного?

В принципе можно рассмотреть, как распределено это магнитное поле, здесь два метода.

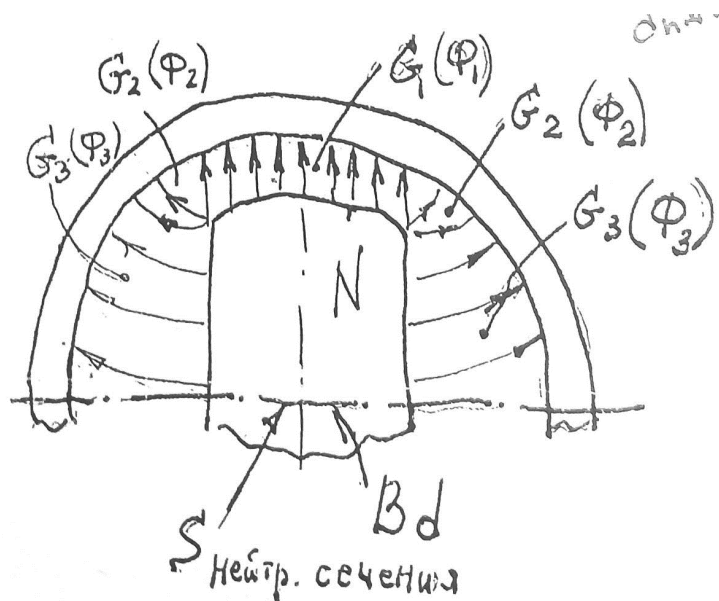
Первый – это берутся тончайшие опилочки ферромагнетика, железа. Берется торец магнитной системы, накладывается на него бумажечка, и дальше на эту бумажечку сыпется вот этот порошок магнитный, и он

втягивается в магнитное поле. Мы видим, как распределены эти силовые магнитные линии. Картинку мы можем посмотреть, и тогда, зная такие картинки, мы можем рисовать более-менее что-то похожее на настоящее распределение.

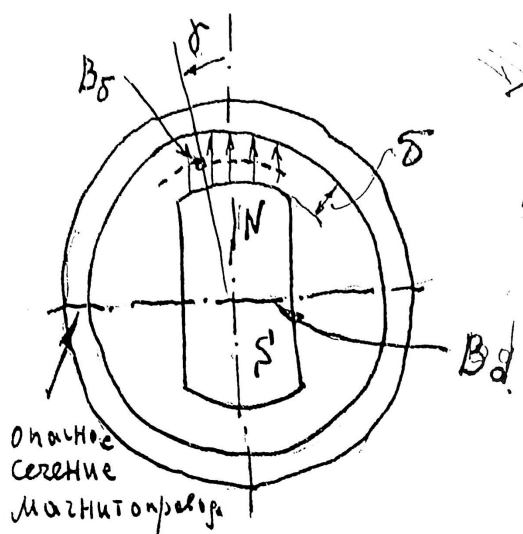
Есть более строгий метод. Он базируется на аналогии магнитных и электрических процессов, электрических токов. Вырезается из фольги кольцо магнитопровода, вырезается форма магнитика, наклеиваются они на основание так, как в реальной магнитной системе. Между вот этими электродами, которые сформировали, подводятся проволоочки электрического тока. Сверху накладывается промокательная бумага, смоченная электролитом. Что такое промокательная бумага, вы, конечно, не знаете. Есть такая бумага, которая очень гигроскопичная, которая собирает чернила. Вот её намачивают в растворе электролита и накладывают на эту поверхность, так, чтобы она прилипла и к кольцу, и к фольге. Теперь берут тестер, соединяют, предположим, с магнитом. Берут карандаш, и вот к карандашу второй конец тестера. И ставят на промокательную бумагу в какой-то точке. Ну, тестер показал, предположим, 0,7 вольт. Вот вы перемещаете этот карандаш по поверхности промокательной бумаги таким образом, чтобы напряжение 0,7 вольта оставалось постоянным. Значит, в результате вы получаете эквипотенциальную кривую. Потом вы передвигаете в положение, где напряжение 1 вольт, ну и так далее. Получаете семейство эквипотенциальных поверхностей. Силовые линии идут нормально к эквипотенциальным поверхностям. Поэтому вы можете нарисовать какое распределение, в данном случае, электрическое поле между полюсами. Но электрическое поле, статическое, оно распределяется точно так же самое, как магнитное поле. У вас следы от карандаша на бумажке остаются, поэтому вы можете посмотреть, какое поле. В общем, как ни странно, но человек может нарисовать это магнитное поле довольно точно.

Какое это поле получается?

Я нарисовал вам распределение магнитного поля.



Давайте чуть-чуть я возвращусь:



Тут показана катушка, находящаяся в зазоре, отклонена она на угол бета от центрального положения, что я вам рисовал уже. Здесь будет  $B_{\delta}$  среднее – это среднее значение индукции, приходящееся на сечение катушки.

Но мы не имеем права использовать для расчёта  $B_{\delta}$  среднее. Почему? Вспоминайте, что я вам уже читал по поводу стабильности

намагниченности магнитов. Когда мы рассматривали магниты, то определяли, что у них имеется:

Первая – это зависимость магнитной индукции от тока управления.

Второе – это зависимость магнитной индукции от углового положения катушки.

Третья – это временная зависимость.

Четвёртая – это температурная зависимость.

Так вот, временная зависимость – это самая опасная. Температуру можно как-то вычислить, скомпенсировать технически. А вот во времени скачком индукция может измениться, и в какой-то момент произошло, никто не знает. А, предположим, если у вас на 0,1% эта индукция изменилась, то, значит, изменился масштабный коэффициент инерциальной системы, и вместо точности  $10^{-4}\%$ , вы уже получаете точность 0,1%, а это дает погрешность при полете на 20000 км, дает погрешность в километры.

Вот я вам тогда говорил, что для стабилизации магнитного поля в магнитных системах, используют предварительное размагничивание, то есть намагничивают материала до упора. Но потом я должен подвергнуть вот этот моментный датчик принудительному размагничиванию. Дальше я засовываю этот магнитный датчик в катушку специальную, даю ток, вот на эту катушку, маленький ток, переменный. И под переменным током она немножко размагничивается. Убираю этот ток, смотрю, сколько осталось. Потом ещё дать немножечко, ещё дать немножечко. А сколько осталось я мерю с помощью датчиков Холла, которые позволяют определить индукцию. То есть я должен засунуть в зазор датчик Холла.

Вы помните, что это такое?

Это пластиночка, к которой подведены два электрода под 90 градусов. Когда по одной оси пускают ток, то по поперечной, выходное напряжение равно нулю. А если в этот датчик всовываете магнитное поле, то чем



больше магнитное поле, тем больше появляется напряжение на двух поперечных контактах.

Тоненький датчик Холла помещают в зазор и с помощью него измеряют индукцию. Ну вот получилось у меня, скажем, 0,4 тесла. Очень хорошая. Мне надо на 10% уменьшить, то есть получить 0,36 тесла. Вот я, значит, меняю переменное магнитное поля, убираю. Ах, ба, у меня изменилась на одну сотую тесла. Ещё, ещё. И до тех пор, пока я уже не размагничу этот магнит до нужной величины, я провожу эти операции. Ну, это достаточно быстро, так сказать, минуты занимает операция. Но в расчёте я обязан учитывать наличие этой операции. Потому что если я не рассчитаю и размагничу, то у меня получится нестабильный датчик момента. Я написал, что 10% поля я уже потеряю.

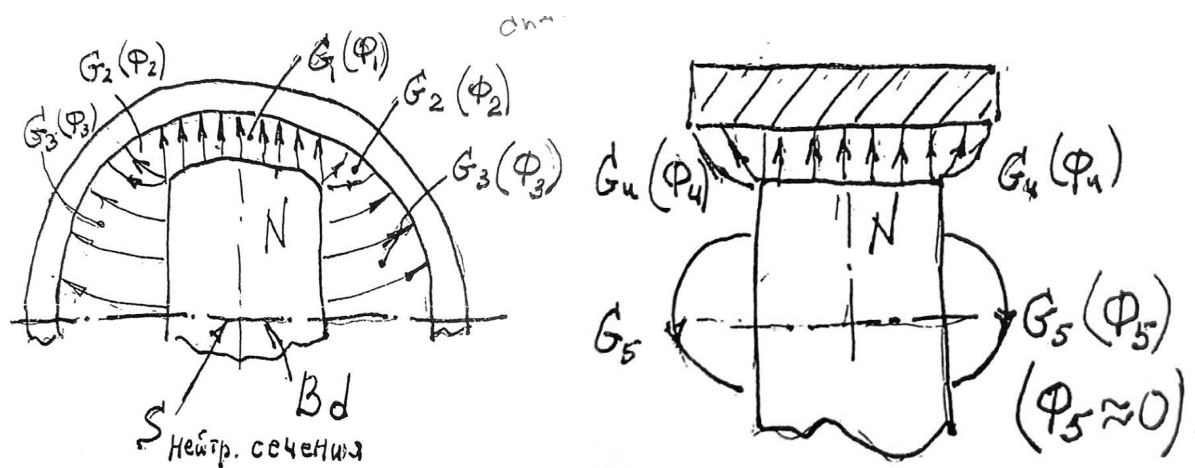
Дальше я рисую распределение магнитного поля. Какое оно у меня будет?

Первое – это основной зазор, образованный поверхностью магнита и магнитопровода. Здесь равномерное магнитное поле. Оно особенно равномерно будет, если я использую магнитный башмак. Что такое магнитный башмак вы помните, накладочка на полюса, тоненькая пластиночка из магнитомягкого материала. Вообще какие-то микронестабильности надо убрать.

Значит, вот G1 – у меня равномерное магнитное поле. Теперь с угла идёт магнитное поле на кольцо – это проводимость G2, поток утечки с торца. Я нарисовал. Дальше с боковой поверхности течёт магнитное поле на кольцо. Ну, оно течёт, конечно, неравномерно, потому что около торца магнита большая намагниченность, а в середине уже нет никакой намагниченности, там уже ничего нет. Но всё равно какой-то участок G3 имеется.

Теперь второе сечение магнита. Вдоль магнита у меня тоже равномерное магнитное поле. С торцов есть участок Ф4 – это выпучивание

магнитного тока на выступающие края магнитопровода. Ну и дальше от Северного полюса к Южному через воздух тоже идёт замыкание, участок  $G_5$ . Но  $G_5$  – это очень маленький поток, обычно им пренебрегают, потому что проводимость этого участка в сотни раз меньше, чем  $G_2$ ,  $G_4$  и так далее. Поэтому  $G_5$  обычно в первом приближении не учитывают.



Через кольцевой магнитопровод текут все потоки. Магнит, все потоки собираются на кольце магнитопровода. Но вверху, напротив полюса N, только часть магнитного потока собирается. Весь магнитный поток собирается в сечении нейтралей, то есть маленьких кусочков, которые совпадают с магнитной нейтралью магнита. Здесь через площадь кольца течёт полный магнитный поток. Полный магнитный поток должен быть меньше, чем возможности магнита пропускать магнитное поле.

*Дальше идет история про какого-то очень активного и заинтересованного аспиранта, но тупого, он там какую-то хуйню изобрел в Питере. Коновалов хочет ему Нобелевскую премию дать.*

## Семинар 22 сентября

Мы с вами рассмотрели, что такое потоки, определили, какая индукция в среднем сечении зазора, нашли есть ли насыщение в магнитопроводе.

Дальше, что такое коэффициент рассеяния? Это суммарный поток, все потоки собрали: это  $\Phi_1 + 2 \cdot \Phi_2 + 2 \cdot \Phi_3 + 2 \cdot \Phi_4$ . И выделили только поток  $\Phi_1$ , полезный поток.

Коэффициент рассеяния порядка 1,4, иногда побольше немножко. Как эти потоки направлены? Вы видите, они включены параллельно. Мы можем считать, что первая, вторая, третья и четвёртая — они все параллельно включены. Когда мы считаем общую проводимость, то она складывается из суммы всех этих проводимостей.

Дальше мы будем определять величины проводимостей  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  и так далее. Тут придется считать уравнения математической физики, причём считать это не для отдельных поверхностей, не для двух концентрических цилиндров. Проводимость потока  $G_3$  сказывается и на  $G_2$ , и на  $G_1$ , и на  $G_4$ . Они все друг с другом завязаны через граничные условия. Поэтому в нашей технике пренебрегают этой зависимостью. Определяют проводимость для каждого участка простейшей трубки. Первая трубка образована двумя концентрическими поверхностями зазора. Вторая поверхность — это точка угловая магнита и поверхность магнитопровода. Третья — плоская поверхность магнита, цилиндрическая поверхность магнитопровода. Суммируют проводимости, не обращая внимание на то, что они, вообще говоря, друг с другом связаны. *Я уже вам говорил своё отношение к этому методу расчёта. Метод приближённый, но вынужденный.*

В справочниках вы можете найти массу информации о проводимости поверхностей, расположенных друг относительно друга.

Какие поверхности нас интересуют?

Во-первых, две плоскости. Здесь у нас есть два плоских полюса, торцы которых имеют размеры  $A$  и  $L$ , и зазор между ними  $\delta$ . Формулы есть в

справочниках. Проводимость двух сердечников с размерами  $A$  и  $L$ , двух плоскостей, обращённых друг к другу, с зазором  $\delta$ , она равна  $G_{M1}$ :

$$K_{\text{разм}} = \frac{l_m}{S_m \cdot R_e} = \frac{l_m}{S_m} G_{\text{в}}$$

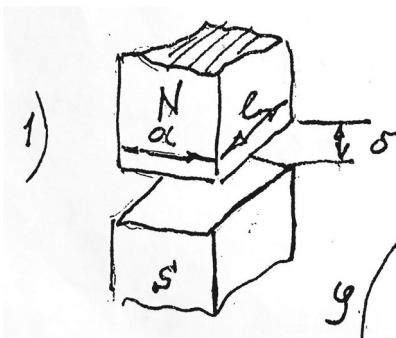
Метод возможных  
линий потока

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$G_{M1} = \mu_0 \cdot \left[ \frac{a \cdot l}{2\delta} + 0,52 \left( 1 + \frac{a}{e} \right) l + 0,308\delta \right]$$

$$G_M \approx \mu_0 \frac{a \cdot l}{\delta} \quad \left( \text{если } \frac{\delta}{a} \leq \frac{\delta}{l} < 0,04 \right)$$

точность 10%



$\mu_0$  – проводимость воздуха.

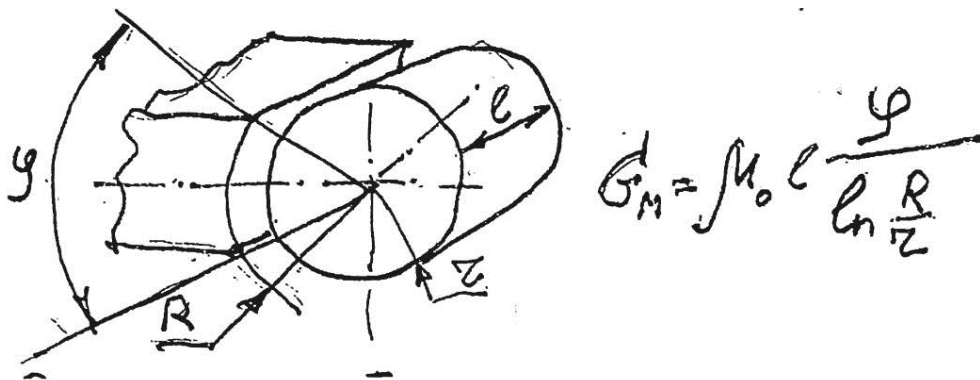
Это более-менее точная формула, полученная методом решения уравнения математической физики. Но если зазоры маленькие, то эта формула, она не простенькая, но всё-таки длинная, может быть упрощена.

И очень полезное упрощение: проводимость вот таких двух поверхностей, обращённых друг к другу, она равна  $\mu_0$ , умноженное на площадь этих поверхностей (площадь полюсов), делённая на зазор. Вот эта формула очень широко используется при расчётах, поскольку если зазор  $\delta$  меньше, чем  $A$  или  $L$  (4% от этих размеров), то точность оценки проводимости составляет 10%, если пользуетесь коротенькой формулой. Удобно пользоваться ей для того, чтобы проверить, не наврали ли вы в расчётах. С помощью этой формулы вы прикидываете, ну, ошибаетесь, может быть, на 10–20%, но когда вы пользуетесь длинными формулами для расчётов, то вероятность того, что вы ошибётесь, гораздо больше, чем эта ошибка.

Поэтому вы прикинули, видите, это на два порядка различается – значит, вы ошиблись при использовании сложной формулы. Потому что когда вы площадь на  $\delta$  делите, то ошибиться практически невозможно.

Поэтому я рекомендую: будете выполнять домашнее задание, проверяйте сами себя. Посчитали  $G_3$  проводимость, вдруг она получилась очень большая или очень маленькая. В отношении, скажем, даже к  $G_1$ .  $G_1$  – это самая большая проводимость, я обычно проверяю. Но вот  $G_3$  получилась большая. А прикиньте: возьмите боковую поверхность магнита, аппроксимируйте кривую линию тоже какой-то косой плоскостью или даже прямой, и прикидывайте. Зазор большой, площадь известная. Прикидываем, да, совсем никуда не годится ответ. Значит, ошиблись при использовании сложных формул, которые соответствуют более сложным случаям расчёта.

Но для нас особо важен случай кольцевого зазора, который встречается в магнитных системах. Это цилиндр, магнитный цилиндр, полюс, который имеет угловую ширину  $\varphi$ , большой радиус  $R$ , маленький  $r$ , длина цилиндра  $L$ . И вот тогда проводимость такого участка равняется  $\mu_0 \cdot L \cdot \varphi$ , делённое на натуральный логарифм отношения  $\frac{R}{r}$ . Ну, вот эту формулу вы используете для подсчёта проводимости.



А дальше я могу вам посоветовать, это книжечка Пятина, где на страницах 185 – 214 приведены формулы для расчёта различных вариантов поверхностей, между которых определяется проводимость. Вот оттуда вы можете брать все эти формулы.

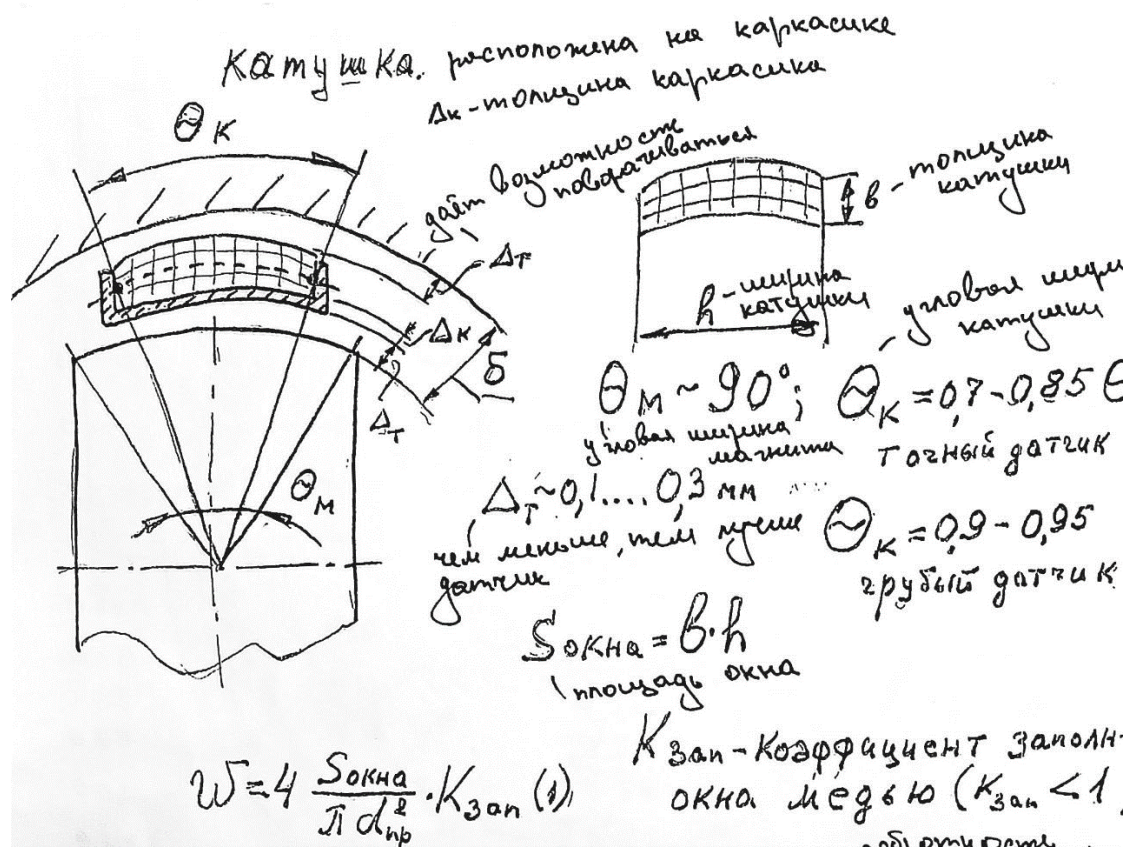
*Вы знаете, это странички того издания, которое у меня имеется. То есть оно переиздаётся довольно часто, этот справочник. Поэтому они*

могут немного меняться. Просто я привожу вам страницы для того, чтобы вы оценили количество этих формул – там их тьма.

Есть книга, «Основы теории и расчета магнитных цепей», автор Буль, но она более сложная.

Вот как мы почти всё сделали для того, чтобы рассчитать датчик момента. Теперь нам остаётся только расчёт катушки.

С одной стороны, её очень просто рассчитать. Рисуем катушку датчика с каркасиком, магнитную систему. Это постоянный магнит, центр, магнитопровод.



Теперь есть средняя линия зазора. Она проходит через среднюю толщину катушки. Обозначается вот этот угол  $\theta_k$  – это угловая ширина катушки.

$\delta$  – зазор, расстояние от внутренней части каркасика до внешней части каркасика носит название  $\Delta_k$ .

Имеется технологический зазор. Что значит технологический зазор? Надо гарантировать, чтобы эта катушка поворачивалась, не зацепляясь за поверхность магнита и за поверхность магнитопровода. Положение катушки определяется подшипниками, опорами подвижного узла. Значит, как опоры относительно кольцевого зазора расположены, зависит от целой системы допусков, какие крышечки имеются, какие цапфы сделаны в подвижном узле, они тоже могут не идеально совпадать с поверхностью катушечки. То есть катушка может иметь радиальное смещение. И вот это радиальное смещение, чтобы оно компенсировалось, не приводило к затиранию, определяется выбором технологического зазора. Чем лучше фирма, чем выше класс работы фирмы, тем меньше технологический зазор. Вообще, работать без  $\Delta_r$  было бы вообще идеально. Надо использовать как можно больше площадь катушки, больше витков, тогда лучше характеристики датчика момента. Технологический зазор – это потеря. Если фирма так себе, то этот технологический зазор составляет, предположим, 0,25 мм. Если фирма очень хорошая, то 0,15 мм.

Толщина каркасика  $\Delta_k$ , его тоже потоньше желательно делать. С другой стороны, он обеспечивает прочность конструкции. Вообще, каркасики хорошо делают в катушке. Правда, иногда делают и без каркасика. Вы уже видели у меня катушки, которые без каркасика сделаны. Просто сам провод, пропитанный эпоксидной смолой, используется.

Ну, дальше расчёты такие делаются.  $\theta_k$  выбирается в пределах  $0,8 - 0,85 \theta_m$ . У меня нарисована маленькая совсем катушка – не очень хорошо, потому что вот это поле, которое идёт здесь и здесь, оно через катушку не проходит. Лишние затраты на создание этого поля. Если я делаю катушку пошире, она охватит больше поля и даст побольше момента.

Для грубых датчиков  $\theta$  катушки равна  $0,9 - 0,95 \theta_m$ . Это для датчиков грубых. То есть в грубых датчиках мы имеем магнит, а катушка может немного свисать по бокам, попадая в зону вот этого бокового

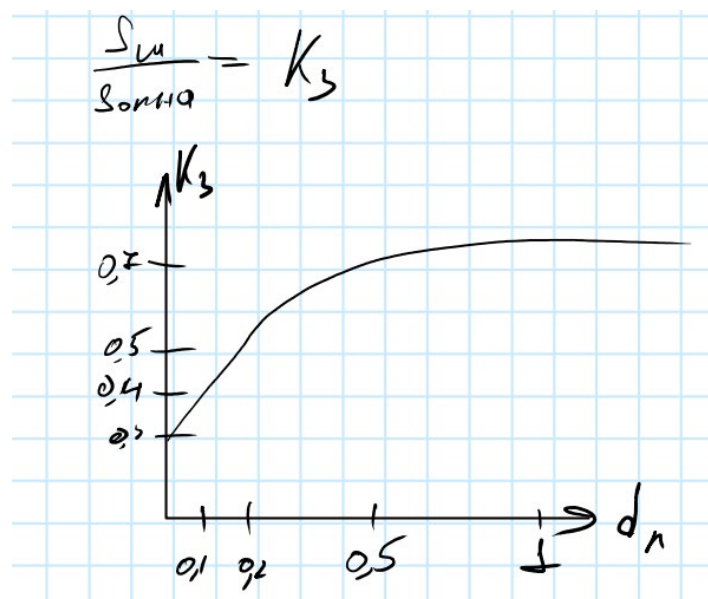
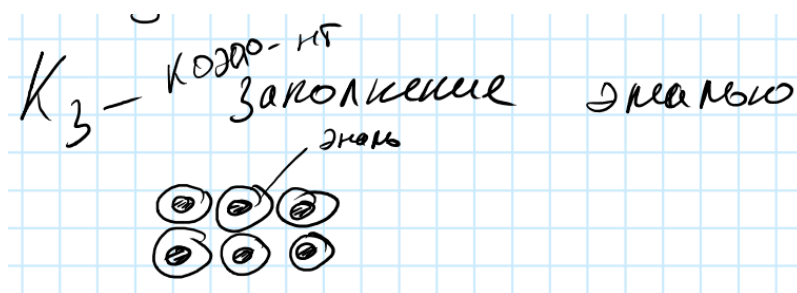


распределения, не только равномерного поля, но и бокового распределения. Здесь не равномерные поля, поэтому условие  $B = \text{const}$  здесь немножко не выполняется, но зато коэффициент добротности выше с большой шириной катушки больше, чем с малой. А здесь малая катушка она, так сказать, занимает вот такую зону, не попадая в зону нелинейного распределения.

Дальше нам надо с вами определить, какое число витков помещается в эту катушку. Число витков  $W$  равно четырем  $S$  окна (площадь окна) на  $K_{\text{зап}}$  (коэффициент заполнения), делённое на  $\pi \cdot d_{\text{пр}}^2$ .

$S$  окна – это площадь заштрихованной части, равна  $b \cdot h$ .

$d$  – диаметр провода обмотки, а  $K_{\text{зап}}$  – это так называемый коэффициент заполнения объема проводом. Когда выкладываете провод, картина в сечении получается следующая: довольно грубая, меди мало, эмали много.





Но, вы знаете, это всё зависит от диаметра провода. Если диаметр провода маленький, то эмаль получается толстая.

Значит, площадь меди, отнесённая к общей площади окна, это и есть коэффициент заполнения. График коэффициента заполнения я вам сейчас нарисую, но я вам дам более точный график.

Иногда приходится сталкиваться с такими случаями, когда на предприятиях инженеры начинают оптимизировать датчик момента. Говорят, я изменю диаметр провода, у меня там больше витков, и я увеличиваю момент. Но при той же самой площади окна этого датчика ничего не получится. Это пустая трата времени.

Предположим, я уменьшаю диаметр провода в два раза. Сечение провода уменьшается в 4 раза (в квадрате). Число витков увеличивается в 4 раза. Длина провода увеличивается в 4 раза. Сопротивление провода  $R$  равно  $\frac{\rho \cdot l}{S}$ .

и чир

добротности  $M$

Оптимизация датчика по  $d_{\text{пров}}$  бессмысленна  $Q = \frac{M}{\sqrt{P_{\text{мощ}}}}$

$d_{\text{пр}} \downarrow 2$ ;  $S_{\text{пр}} \downarrow 4$ ;  $W \uparrow 4$ ;  $l_{\text{пр}} \uparrow 4$  (при  $K_{\text{зан}} \sim \text{const}$ )

$R_{\text{сш}} = \rho_{\text{сш}} \cdot \frac{l_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} \uparrow 16$ ;  $P = I^2 R = \text{const}$ ;  $M = B \cdot I \cdot W \cdot S_{\text{ок}} \cdot \underbrace{\uparrow 4 \uparrow 4}_{\text{не изменяется}}$

$I^2 \downarrow 16$        $I \downarrow 4$

$R_{\text{сш}} = \rho_{\text{сш}} \cdot \frac{4 l_{\text{пр}}}{\pi d_{\text{пр}}^2} (2) \quad U_3(1) \cdot (2) \quad W = \sqrt{\frac{S_{\text{окна}} \cdot K_{\text{зан}} \cdot R_{\text{зм}}}{\rho_{\text{сш}} l_{\text{пр}}}} \quad (l_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{ок}}}{W})$

Поскольку длина увеличилась в 4 раза, а площадь уменьшилось в 4 раза, сопротивление увеличивается в 16 раз.

Дальше мощность, она должна оставаться постоянной. Значит, если мощность  $P = I^2 \cdot R$  постоянна, то при увеличении  $R$  в 16 раз,  $I^2$  должно уменьшиться в 16 раз, следовательно, ток  $I$  уменьшится в 4 раза.

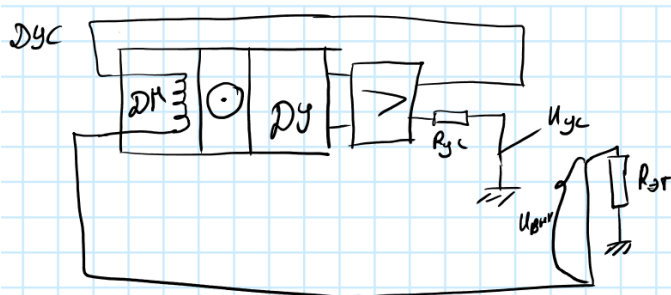
Но это мы ток не считали, а мы просто говорим: чтобы мощность осталась постоянной, а сопротивление увеличилось в 16 раз, то  $I^2$  должно уменьшиться в 16 раз. Тогда мощность останется постоянной. Значит, ток должен уменьшиться в 4 раза.

Теперь смотрим момент, в формулу я подставил: 4 раза меньше ток умножил на 4 раза большее число витков и получил то же самое. То есть вариации с толщиной провода не приводят к никаким изменениям. За исключением того, что если провод тонкий я беру, то коэффициент заполнения уменьшается. А вот для участка, где коэффициент заполнения примерно остаётся постоянным, все эти вариации толщиной провода не имеют вообще никакого значения. *Вот это вы себе помните. Значит, мы не должны заниматься вот этими вариациями.*

Как же выбирать тогда витки? Сколько брать витков?

Ну, вот здесь есть два подхода. Первый подход исходит из того, что вместе с усилителем мы должны обеспечить максимальный момент. То есть усилитель, у него имеются какие-то ограничения. Например, выходное напряжение у него ограничено. Оно определяется источником питания. Усилитель, собственно, это фактически переменное сопротивление, которое мы электрическим путём меняем. И из-за этого выходное напряжение на выходе усилителя меняется.

Надо подобрать такое сопротивление датчика момента, чтобы получить максимальный момент датчика при тех возможностях, которые имеются у усилителя. Ну, так сказать, вот как это делаем? Вообще говоря, надо записывать формулы.



$$M = B S_a I W = B S_a \frac{\Delta U}{R_{ис} + R_{гн}}$$

$$R_{гн} = \rho \frac{L_{гн} W}{\pi d_{гн}^2}$$

$$W = \sqrt{\frac{S_{окна} K_{гн} R_{гн} T}{\rho C_{гн}}}$$

$$M = B S_a \frac{\Delta U}{R_{ис} + R_{гн}} \sqrt{\frac{S_{окна} K_{гн} R_{гн} T}{\rho C_{гн}}}$$

С датчика угла снимается сигнал, он поступает на вход усилителя.

$U_{ис}$  — это внутреннее сопротивление усилителя.

Дальше эталонное сопротивление, с которого снимается сигнал. И все это заводится в датчик момента.

Момент, развиваемый датчиком момента будет равняться  $B \cdot S_a \cdot I \cdot W$ .

Я переписываю таким образом, что здесь у меня  $B \cdot S_a \cdot \frac{\Delta U}{R_{ис} + R_{гн}}$ , где  $\Delta U$  — это разность напряжений.

Почему  $\Delta U$ ?  $U_{вых}$  — это величина, которая определяется ТЗ. Требуется, чтобы у нас крутизна этого датчика была  $1 \frac{\text{В}}{\text{град/с}}$ . А диапазон 10 градусов в секунду. Тогда  $U_{вых}$  равняется 10 В при максимуме. А  $\Delta U$  — это будет отношение выходного напряжения усилителя минус вот эти 10 вольт, которые определяются ТЗ, делённое на сопротивление  $R_{ис} + R_{гн}$ .

Эталонное сопротивление выбирается таким образом, чтобы при максимальном напряжении,  $U_{вых}$  соответствовало техническому заданию.

Дальше, учитывая, что сопротивление датчика момента

$$R_{\text{дм}} = \rho \cdot \frac{L_{\text{ср}} \cdot W}{\frac{\pi \cdot d^4}{2}}$$

Дальше из этой формулы я получу W:

$$W = \sqrt{\frac{S_{\text{окна}} \cdot K_{\text{зан}} \cdot R_{\text{дм}}}{\rho_{\text{м}} \cdot l_{\text{ср}}}} \quad (l_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{нр}}}{W})$$

Подставляю это в формулу для момента и получаю момент.

Мне нужно знать, при каком сопротивлении датчика момента я получу максимальный момент. Для этого мне надо взять производную формулы для момента, найти экстремум. И окажется, что для случаев, когда коэффициент заполнения примерно постоянен, сопротивление датчика момента должно быть примерно равно сопротивлению усилителя, то есть внутреннему сопротивлению усилителя. Ну, результат этот правильный, но он годится для случаев старых усилителей с большим внутренним сопротивлением.

Если мы ведём разговор об усилителях, построенных на операционном усилителе, у которого колоссальный коэффициент усиления, до миллиона, в котором введены отрицательные обратные связи, то для такого усилителя  $R$  усилителя примерно равняется 0. То есть тогда окажется, что датчик момента должен иметь нулевое сопротивление. Что, в общем-то, несуразно. То есть это рассуждение всё справедливо для более-менее старых приборов. Оно всё верно, но, так сказать, цена этого небольшая.

Как быть? Нам надо получить решение задачи.

Тогда берут справочные данные. Открываете справочник и видите: операционный усилитель, который вы используете как усилитель мощности, предположим, имеет выходное напряжение, ну, я, так сказать, не точно сейчас скажу, потому что, во-первых, выходное напряжение операционного усилителя не равно источнику питания. Ну, я возьму 15

вольт: источник питания плюс-минус 15 вольт, значит, больше 15 вольт никак не получится. Ну, вообще, на самом деле, получится где-то 13 вольт, это, так сказать, не супер.

И вот вы должны выбрать такой датчик момента, который соответствует и операционному усилителю, и заданию удовлетворит.

Ну предположим, вам задано спроектировать ДУС.

Требование ТЗ:

Коэффициент усиления 0,5 вольт на градус в секунду.

Максимальная скорость, которую должен измерять ДУС, у датчика угловой скорости, 20 градусов в секунду.

Значит, выходной сигнал при максимальной скорости:

$$20 \cdot 0,5 = 10 \text{ вольт}$$

С эталонного сопротивления я должен снимать напряжение 10 вольт.

Дальше я посмотрел справочники и вижу, что усилитель способен давать 50 миллиампер. Больше не способен. Больше нельзя его нагружать. Тогда для того, чтобы техническое задание выполнить, у меня R эталонное должно быть равно  $10 \text{ В} / 0,05 \text{ А} = 200 \text{ Ом}$ . А у меня 15 В в усилителе. Значит, 5 В может идти на датчик момента.

То есть я пишу: 50 мА равняется максимальному току на выходе усилителя 15 В, делённому на (R эталонное + R датчика момента). И это должно равняться 50 мА. Тогда сумма R эталонного и R датчика момента будет равна  $15 \text{ В} / 0,05 \text{ А} = 300 \text{ Ом}$ . R эталонное у нас 200 Ом, значит, R датчика момента = 100 Ом. Вот.

Я получил сопротивление датчика момента, а дальше я легко определяю число витков через сопротивление датчика момента. Вот такой примитивный подход. Ну, в общем-то, достаточный, и мы всегда так делаем.

Ну, конечно, здесь есть всякие тонкости. Например, есть датчики момента с обмотками клеящимися. У них эффект заполнения другой

немножко. Я дам вам характеристики для клеящихся материалов, для не клеящихся.

Теперь следующий шаг. Что делать? Мы сейчас рассчитали момент, мы рассчитали индукцию, рассчитали число витков, углы знаем. В принципе, мы можем нарисовать этот датчик момента и сказать, какие у него характеристики.

Но теперь у нас появляется вопрос: а хорошо ли мы спроектировали этот датчик момента? И вообще, как можно характеризовать датчик момента, хороший или плохой?

Вот в третьей части гироскопических систем авторы написали, что датчики между собой можно сравнивать по отношению момента к потребляемой мощности. Это грубая ошибка. Почему? Давайте посмотрим. Вот это датчик момента. Я беру у него ток, ну, скажем, 1 миллиампер, получаю момент, какой-то момент получаю, так сказать, один ньютон-метр. Мощность:  $P = I^2 \cdot R$ . Теперь я увеличиваю ток в 2 раза. Что у меня получается? Момент пропорционален току, значит, момент увеличится в 2 раза. Квадрат тока увеличивается в 4 раза. Согласны? Значит, я ток увеличил в 2 раза, то мощность у меня увеличивается в 4 раза. А во втором случае я ток увеличил в два раза, значит, я момент получаю в два раза, то есть получаю 2 Н·м, а мощность я получаю 4 Вт. Значит, в первом случае я беру момент, делю на мощность:  $1/1=1$ , а во втором:  $2/4=0,5$ .

Коэффициент, по которому я сравнил эти параметры, зависит от тока, который я пропускаю через обмотку. То есть бред получается. При каком токе я должен сравнивать тот и другой моментный датчик?

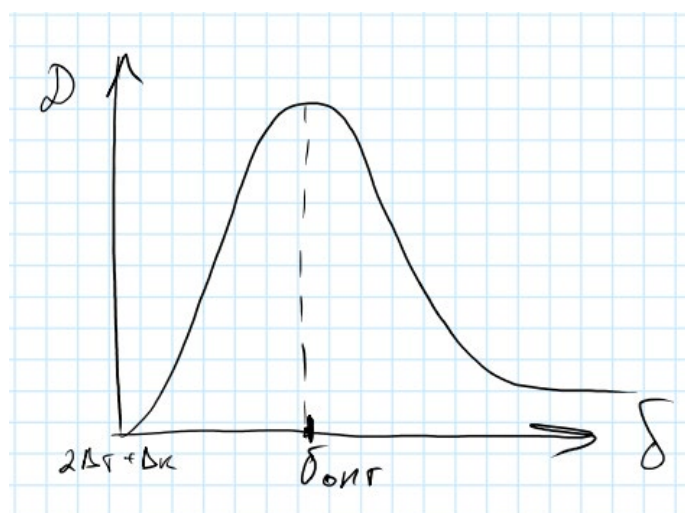
Поэтому правильно использовать коэффициент добротности, который звучит так: отношение момента к корню из потребляемой мощности. Добротность датчика момента, или коэффициент добротности датчика момента, это отношение момента к корню из потребляемой им мощности. Вот эта величина она не зависит от величины тока, от величины момента,

она остаётся постоянной для данной конструкции. Чем она выше, этот коэффициент, тем лучше.

А как этот коэффициент добротности зависит от размеров датчика момента?

Если я сделаю зазор побольше, то я могу в него поместить большее число витков. Но побольше зазор – меньше индукция. Где тут оптимум? То же самое, если я большой беру диаметр датчика и малую длину, то у меня короткая рабочая часть, но большой диаметр. Что лучше? Большой диаметр даёт больший момент, короткая рабочая часть и длинные лобовые части дают малый момент. То есть нужна оптимизация.

Эти параметры, особенно индукция, она нелинейно зависит от размера, её надо искать. Делается расчёт датчика момента для какого-то начального значения зазора. Посчитали, определили, какой коэффициент добротности. Потом взяли и увеличили зазор на 0,1 мм. Опять рассчитали датчик момента. Потом увеличили на две десятых миллиметра. Опять рассчитали. Ну и в другую сторону поискать. В итоге мы получаем, что коэффициент добротности  $K_d$  в зависимости от величины зазора  $\delta$  имеет вид такой: начальная точка – это будет  $2 \cdot \Delta_T + \Delta_K$ , потому что если зазор сделать меньше, то вообще обмотки не будет.



Этот  $\delta$  оптимальный надо искать, так как сразу сказать, какое  $\delta$  оптимальное, трудно. Поэтому берёте вычислительную машину, составляете программу, разрабатываете 50 вариантов, рассчитываете. Довольно хлопотное дело. Бумаги изведёте невероятное количество. Машина легко посчитает.

Значит, вот ваша задача при выполнении домашнего задания будет состоять в том, что вы проведёте расчёт моментного датчика.

Что в вашем задании я хочу видеть?


Читаем задание

Пример расчета магнитоэлектрического датчика момента (Д.М.) с двухнапряжением магнита.

Задание: Найти момент, развиваемый Д.М. с размерами

$D_{корунг} = 40 \text{ мм}$ ;  $\Delta_{техн} = 0,25 \text{ мм}$ ;  $\Delta_{карк.} = 0,4 \text{ мм}$ ;  $R_{дн} = 200 \text{ Ом}$ ;  
 $\delta = 4 \text{ мм}$ ;  $\frac{D_{кор.}}{\Delta_{кор.}} = 1,5$ . Материал магнита - сплав ЮНДК-25БА  
 Магнит намагничивается в сборе с магнитопроводом.  
 Максимальный рабочий угол Д.М.  $\alpha_p = 5^\circ$   
 Допустимый перегрев датчика до  $20^\circ \text{C}$   
 Материал магнитопровода - сталь Арико (индукция насыщ.  $2 T_n$ )

Этап 1. Взаперчивается жёстко Д.М.



Для подсчёта расхода  
 Толщина магнита  $\delta$

Это будут общие цифры для каждого из вас, кроме зазора и технологического зазора, и для каркаса. Материал магнита будет сплав ЮНДК 25БА. У каждого из вас будет свой сплав, поскольку я вам дал графики для разных сплавов, вы можете пользоваться, можете посмотреть.

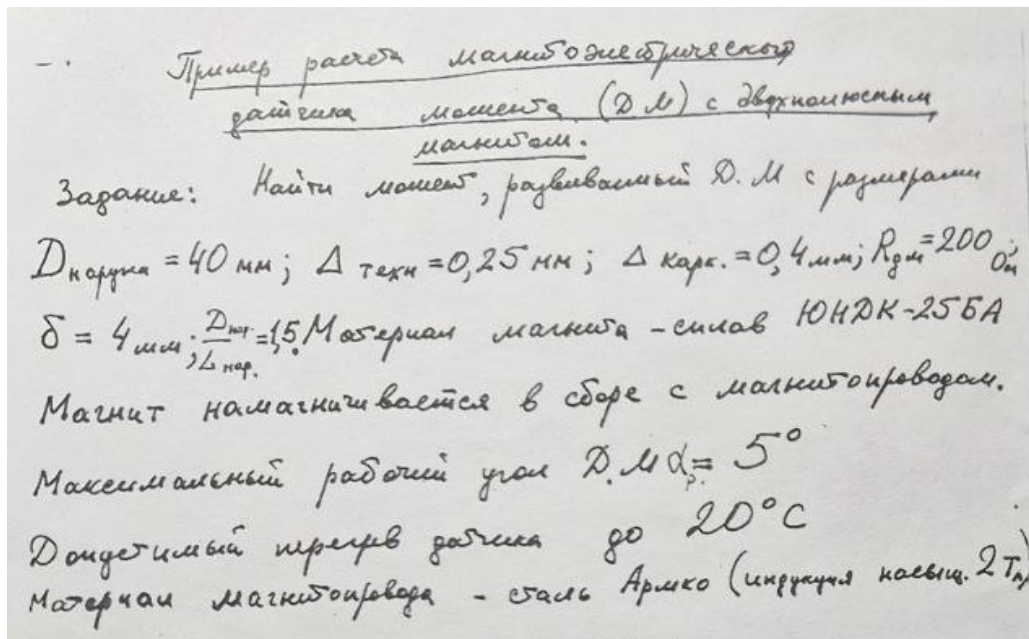
Дальше: магнит намагничивается в сборе с магнитопроводом. Намагничивание в арматуре в первом расчёте. Максимальный рабочий угол 5 градусов. Допустимый перегрев датчика составляет 20 градусов



29 сентября

Был разбор дз. Задание сводится к расчёту магнитоэлектрического ДМ с двухполюсным магнитом.

Задание будет выглядеть след.образом: найти момент, развиваемый ДМ с размерами...

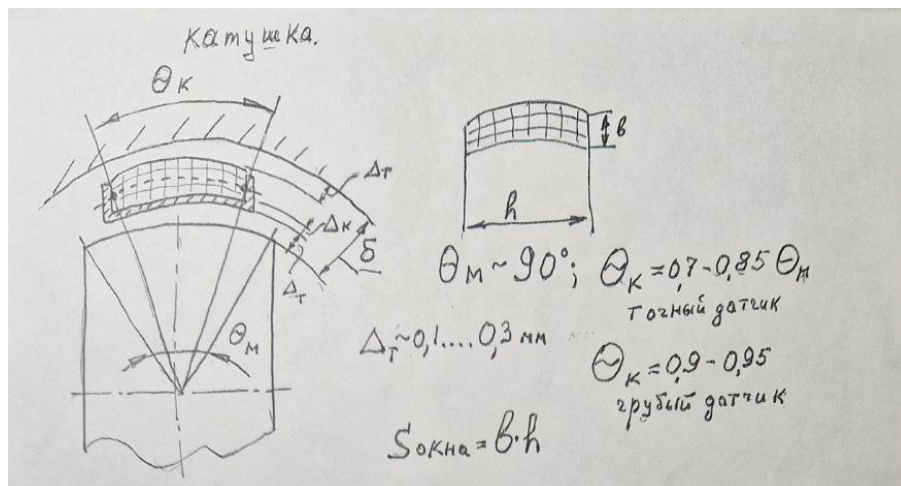


Что такое дельта технологическое? Это было на прошлой лекции (22 сентября).  $\Delta_{\text{карк.}}$  — толщина каркаса;  $R_{\text{дм}}$  — сопротивление ДМ;  $\delta$  — зазор;  $D_{\text{нар}}$  и  $L_{\text{нар}}$  — диаметр и длина наружные соответственно;

Магнит намагничивается в арматуре, иными словами, в сборе с магнитопроводом

Теперь переходим к разбору самого расчёта.

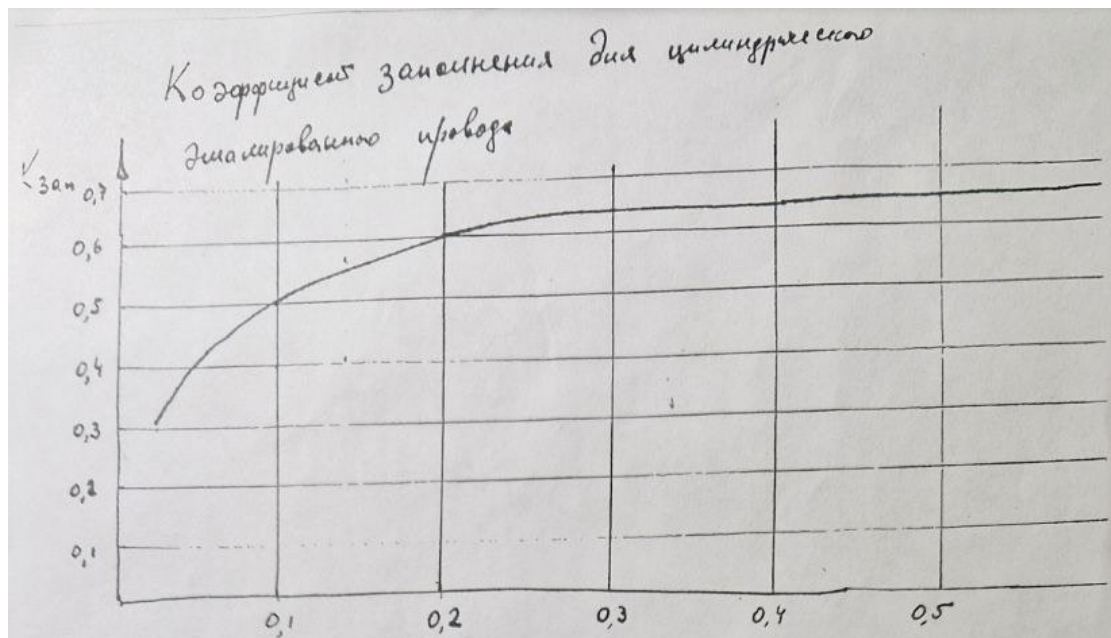
Вот здесь нарисован кусочек ДМ с постоянным магнитом, с краем кольца магнитопровода, с катушкой, которая расположена на каркасике ( $\Delta_k$ ):



Каркасик и поверхность катушки отстоят от поверхности магнита и от поверхности наружного кольца магнитопровода на расстояние  $\Delta_T$ , т.е. это расстояние, которое даёт возможность поворачиваться этой рамочке с катушкой в пределах его диапазона измеряемых углов (в нашем случае в пределах 5 градусов). Угловая ширина магнита указана ( $\theta_M$ ). Угловая ширина катушки (были проведены линии, которые проходят через среднее сечение катушки, т.е. не среднее сечение КАРКАСИКА, а именно КАТУШКИ), обозначается как  $\theta_K$ . Ну и также линейные размеры: толщина катушки ( $b$ ), ширина ( $h$ ) по прямой, не по дуге. Дальше он привёл значения этих величин. Для таких магнитов  $\theta_M$  с двухполюсным магнитом обычно 90 градусов выбирается.  $\theta_K$  выбирается как для точных, хороших датчиков  $(0,7 \dots 0,85) \cdot \theta_M$ . Т.е. катушка не должна вылезать за края магнита при больших углах отклонения, иначе она попадает в разреженно магнитное поле, где индукция меньше и тогда появляется нелинейность у магнитного датчика и тогда появляется погрешность. Если датчик не прецезионный, а грубый, тогда ... в чём недостаток этого точного датчика? Довольно большую часть зазора, который есть индукцией, не используется, потому что там катушки просто нет. Стремятся обеспечить хорошие характеристики, хорошую линейность ДМ, поэтому вынуждены пренебрегать той частью, которая не используется, а для грубого датчика важна величина момента, а о точности (1%-2%) грубый.

Катушка делается шире –  $(0,9-0,95) \cdot \theta_m$ . Даже может оказаться так, что края катушки высовываются за края магнитного поля, т.е. входит уже в поле рассеяния, ничего страшного нет, зато получаем хорошую добротность. Что такое добротность? Добротность – это отношение момента, развиваемого датчиком, к корню квадратному из потребляемой мощности. Ну ещё иногда в качестве добротности иногда используется вес ДМ, но мы немного позже об этом поговорим.  $S_{\text{окна}}$  – площадь окна, т.е.  $b \cdot h$ . Немного не точно, потому что можно было бы и по дуге, но прикинем грубо. Число витков в окне считается как  $S_{\text{окна}}/S_{\text{магнита}}$  по наружной изоляции.

Коэффициент заполнения для цилиндрического эмалированного провода показан на след. рисунке:



Коэффициент заполнения именно медью, т.е. речь идёт именно о медной обмотке. Вокруг этой медной обмотки слой изоляции (эмали), который не даёт виточку к виточки прислониться (медь к меди не прислоняется). Помимо того, что изоляция не позволяет полностью заполнить медью весь зазор, имеются пустоты между двумя цилиндрами. График коэффициента заполнения зависит от толщины провода, где толщина провода составляет 0,04-0,05,  $K_{\text{зап}} = 0,3$ , а остальное всё воздух или изоляция. Чем толще провод, тем больше коэф.заполнения.



*«Последние годы советской власти пытались сделать плоский провод. Ну плоский провод в электрических машинах используется. Пластиночка, покрытая слоем эмали. Вот этих пустот между проводами меньше получается, коэф. Заполнения при больших толщинах стремится к 1. Стали выпускать эти провода и тоненькие, но потом началась перестройка, и заниматься такой ерундой как гироскопией и прочими вещами стало не модно и не выгодно, за границей лучше, нам нечего готовить инженеров по этой специальности, потому что трудно»*

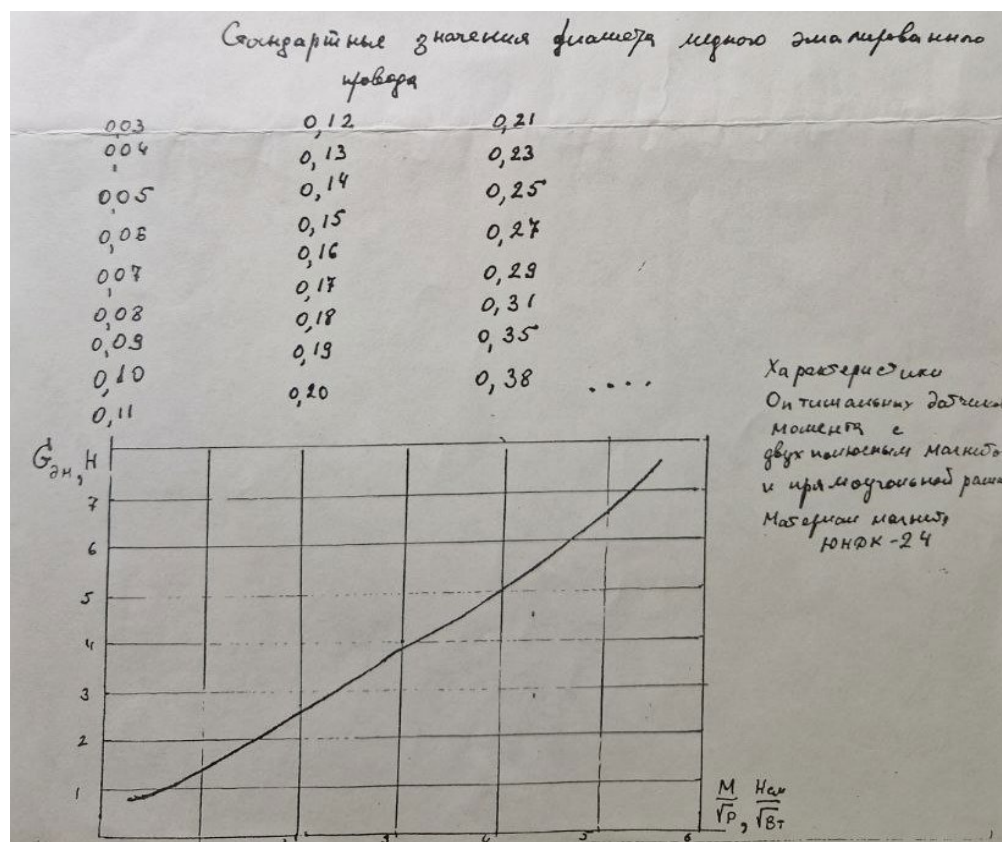
Всю информацию он дал для проводов, которые легко найти на российском рынке. На западе и на востоке довольно широко распространены провода с клейкой изоляцией. Значит, они покрыты тонким слоем эмали, а помимо эмали имеется довольно толстый слой клея. Клей находится в полимеризованном состоянии. Это термопластичный материал. Бывают пластмассы термоактивные, а бывают термопластичные. При нагреве термопластичный материал становится жидким. Тонкий слой изоляции. А клей при контакте двух проводов по слою эмали, которая имеет толщину в мкм, они касаются практически провода касаются, а дальше это всё затекает клеем. Клей проминается так, что он заполняет всё, что только может. Здесь коэф.заполнения получается немного другим.

*«У нас, к сожалению, этих проводов почти нет. Мои попытки навязать предприятиям, так сказать, эти провода очень хорошие в смысле коэф.заполнения, потому что чем он больше, тем лучше характеристики ДМ получатся, больше витков попадёт в зазор и, следовательно, добротность будет больше. Бескаркасные катушки очень прочные, ну хотя можно*

говорить о том, что при выполнении намотки она может всегда пропитываться. Если наматываем вручную, а не на станочке, к сожалению, у нас это встречается, когда наматывают под микроскопом. Вот они намотали первый слой, положили, потом берут колонковую кисточку, макают её в лак, смазывают обмотку и потом сверху на неё второй слой кладут и снова обмоточку. Она получается пропитана вся этим лаком, потом когда этот лак высыхает, ставят это в прибор, а потом эти приборы бывает работают в разной среде. Пока мы с вами говорим о датчиках, которые работают в воздушной среде. Есть поплавковые приборы, у которых подвижный узел взвешен в жидкости так, что реакция давления поплавок на камниевые подшипники и вот цапфа давит на камень собственным весом, а в поплавковом приборе собственный вес компенсируется Архимедовой силой, у которой нет давления на камень. А нет давления, значит, нет силы трения. Но в жидкости требуется иметь абсолютно обезжиренное и обезгаженное тело. А в катушке при такой намотке образуются пузырьки газа. Т.е. нужно ставить в специальную аппаратуру и дальше откачивать газ примерно газ пока все эти пузырьки вылезут из этих склеенных проволочек. Это занимает очень много времени и это очень важно, потому что если этот пузырёчек вылезет, т.е. собрали прибор, загерметизировали, а этот пузырёк вылез, он начинает приставать к поплавку, тянуть, появляются погрешности. Поэтому лучше использовать станки и производить намотку через них. Они стоят недорого, всего 50-60 долларов. А там проводок проходит через катушку. По катушке проходит ток, который нагревает провод довольно сильно. Мощность большая выделяется. Провод быстро движется, и он успевает нагреться. Клей из термопластичного материала становится не как клей, а напоминает ПУСТОЙ клей (что имелось ввиду без понятия). Дальше виточек к виточку прижимается твёрдой изоляцией, клей остывает и становится прочным»



Также имеются стандартные значения диаметра медного эмалированного провода.



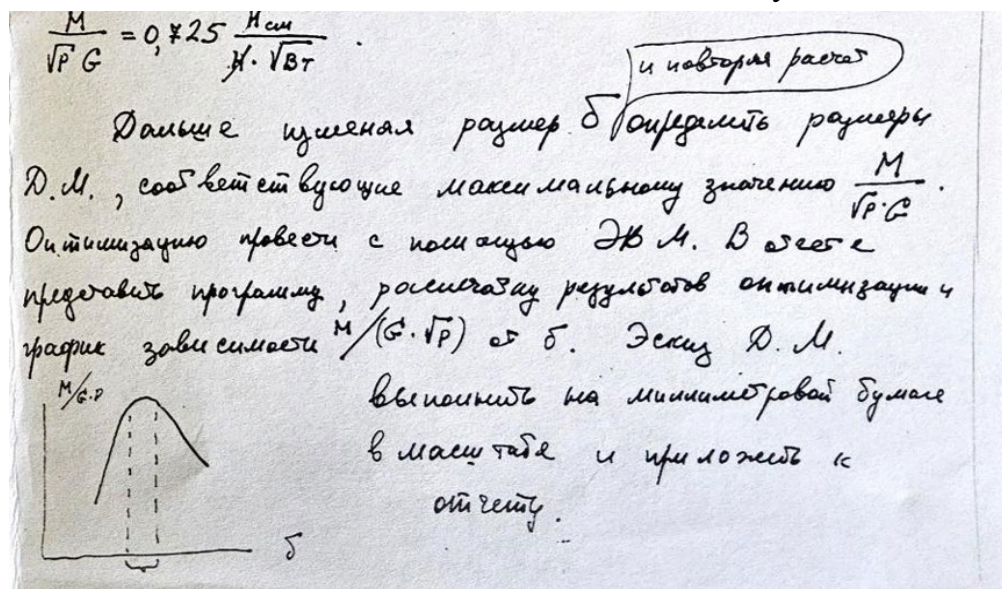
Нужно будет выбрать провод для катушки. Получится примерно 0,157 мм. Это, конечно, очень хорошо, но такого провода в природе просто не существует. Здесь записаны провода, которые могут ставиться в промышленности: либо 0,15, либо 0,16. Ну тут надо смотреть, если получилось 0,157, а мы напишем 0,16, то число витков не получится. Шаг мы должны учесть и округлять всегда в меньшую сторону. Приведён также график для расчёта, который был получен на одной из фирм. Пока что мы делаем просто проверочный расчёт, а потом нужно будет выбрать зазор. Например, в задании был дан зазор 4 мм, а он окажется неоптимальным. Тогда момент ДМ при той же потребляемой мощности будет больше, т.е. нужно будет произвести оптимизационный расчёт и получится вот такой вот график. На вершине оптимальный зазор.  $G$  – вес ДМ. Целый ряд, десятки датчиков которые попали в промежуток от 1 Н до 7 Н были оптимизированы, для каждого из этих датчиков получено оптимальное значение зазора при котором датчик развивает максимальный момент при потребляемой мощности. Скажем, если момент

оптимального датчика равняется 2, то этот датчик может иметь вес 2,5 Н, не меньше. Меньше не получится. Если что, материал магнита ЮНДК-24 БА (забыл дописать БА). Для других материалов будут другие графики. Зазор  $\Delta_{\text{техн.}}$  назначается фирмой изготовителем. Если фирма хорошая, хорошие допуски, то значение  $\Delta_{\text{техн.}}$  будет иметь маленькие значения, потому что чем меньше, тем лучше, чтобы вместо воздуха вместить витки, но рамка, к примеру, имеет цапфы (они должны точно совпадать со средней линией рамки, они могут быть приклеены и не совпадать, скорее всего не будут совпадать, поэтому когда мы эту рамку в очень хороший корпус поместим, рамочка может быть немного перекошена и иметь радиальное смещение, если не дать свободу поворачиваться этой рамочке, то она может касаться либо магнитопровода, либо магнита и начинает затирать, что приводит к неработоспособности), камневые опоры (дырки под камневые опоры должны точно проходить через середину магнитопровода, иначе рамка будет перекошена относительно стенок магнитопровода или магнита и в результате будет получаться перекосяк и отказ), кольцо магнитопровода, а в серединке находится магнит. В хороших фирмах он доходит до 0,15 мм, а в фирмах пониже 0,25 мм. Если датчик большой, то 0,25 мм в целом не так страшно будет, а если маленький с диаметром 25 мм, то страшно.

Каркасики делаются из немагнитного материала. Сплав Алюминий+Германий. Основной материал сплав Алюминий Ал4, который очень хорошо обрабатывается прокаткой. Очень хорошо прокатывается, что получается очень тонкая рамочка и момента не создаёт. Даёт жёсткость конструкции. Иногда делают из Бериллия. Самые тоненькие каркасики – 0,2 мм. Ну а дальше если большие размеры, например, 40 мм размер датчика, то может быть и больше толщина зазора.

Рабочий угол поворота может быть как 5 градусов, так и 0 градусов. Многие приборы компенсационные стараются делать датчик, работающий в одной точке. Вспоминаем материал, где момент зависит от положения рамочки. Если сверхсложная задача по точности 0,0001, то это требует, чтобы катушка находилась в одной точке зазора. Рамку обязывают делать без отклонений. В данном случае в пределах 5 градусов катушка сильно выходить из зазора не должна.

Теперь допустимый перегрев ДМ. Не давалось формул для мощности. Если мы берём зазор, то учитывается ещё толщина каркаса, а добротность будет равна 0 без катушки. Поэтому на графике с прошлой лекции идёт с 0, потом начинает возрастать, а затем убывать. Зазор, в котором много витков, но магнит становится маленьким, а угловая индукция опережает уменьшение момента. Развивает момент до максимального, а потом уменьшается.



Почему мы так подробно говорим о добротности? Ну у нас часто ставится задача обеспечить измерения больших значений ускорения или больших значений угловой скорости. Ускорения в задачах 300-400g получить диапазон измерений. Иногда под воздействием ракеты что-то дальше не могу связать что к чему... Приходится делать акселерометры с очень большим диапазоном ускорений. С одной стороны, хочется иметь больше маятников, потому что чем их больше, тем легче обеспечить разрешающую способность хорошего прибора, малые ускорения можно. А с другой стороны, большая маятниковость, умноженная на 300-400g, создаёт очень большой момент, который трудно компенсировать. ДМ будет иметь большие габариты, в пределах которых... для каждого габариты, для каждого веса свои величины, можем обеспечить только значения момента к корню из мощности только оптимальные, больше получить нельзя. Если мы имеем ограничения по добротности, то можем большой момент получить только за счёт большого тока, подаваемого на ДМ. Он создаёт большой нагрев, т.к. мощность это произведение квадрата тока на удельное сопротивление обмотки. Нагрев вызывает что? Сгорают изоляция, а это приводит к полному отказу прибора.



Как определить? Надо проводить тепловой расчёт при помощи ансиса тепловые потоки, как нагреваются детали. Есть упрощённые методы, потому что тепловой расчёт достаточно сложный. Какое рассеяние можно получить при перегреве.

Оптимизация датчика по  $d_{пр}$ . Бессмысленна  $D = \frac{M}{\sqrt{P}}$

$d_{пр} \downarrow 2$ ;  $S_{пр} \downarrow 4$ ;  $W \uparrow 4$ ;  $l_{пр} \uparrow 4$  (при  $K_{зан} \sim const$ )

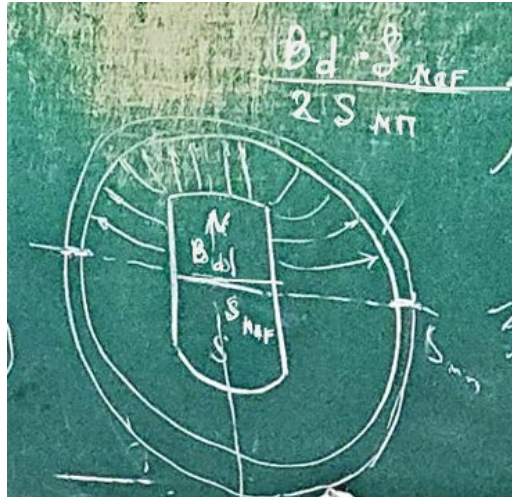
$R_{сш} = \rho_{сш} \cdot \frac{l_{пр}}{S_{пр}} \uparrow 16$ ;  $P = I^2 R = const$ ;  $M = B \cdot \overset{\downarrow 4}{I} \cdot \overset{\uparrow 4}{W} \cdot S_{д} \cdot$   
Не изменяется.

$I^2 \downarrow 16$   $I \downarrow 4$

$R_{сш} = \rho_{сш} \cdot \frac{4l_{пр}}{\pi d_{пр}^2} (2) \quad U_3(1) \cdot (2) \quad W = \sqrt{\frac{S_{окна} \cdot K_{зан} \cdot R_{дм}}{\rho_{сш} l_{пр}}} \quad (l_{сш} = \frac{l_{пр}}{w})$

Зная коэффициенты, можно сказать, что при нашем объёме, какую мощность можно выделить с ДМ при нагреве поверхности на 20 градусов над окружающей средой, при условии, что окружающая среда 60 градусов. Задаёмся вопросом до какой температуры мы имеем право нагревать корпус прибора и охлаждении. Нам задан допустимый нагрев, значит, мы должны решать обратную задачу. Можно сказать при такой поверхности при свободной конвекции, при атмосферном давлении прибор может рассеивать мощность, скажем, не больше 3 Вт. Зная мощность и сопротивление ДМ, можем сказать, что такой-то ток в пределах способен выдержать, а зная ток, мы знаем момент при тех габаритах, магните и индукции.

По поводу магнитопровода. Магнитопровод выбираем таким, чтобы не было во всех точках магнитопровода индукции больше, чем индукция насыщения. Для ДМ типа, который мы рассматриваем, знаем как во всех точках распределена индукция. Если знаем индукцию нейтрали и знаем площадь магнита, знаем площадь магнитопровода, то  $B_t$  умножаем на  $S_{\text{магнита}}$ , тем самым получая поток, а затем делим на  $2S_{\text{магнитопровода}}$ . Получаем индукцию в самом опасном сечении (по нейтрали два штриха)



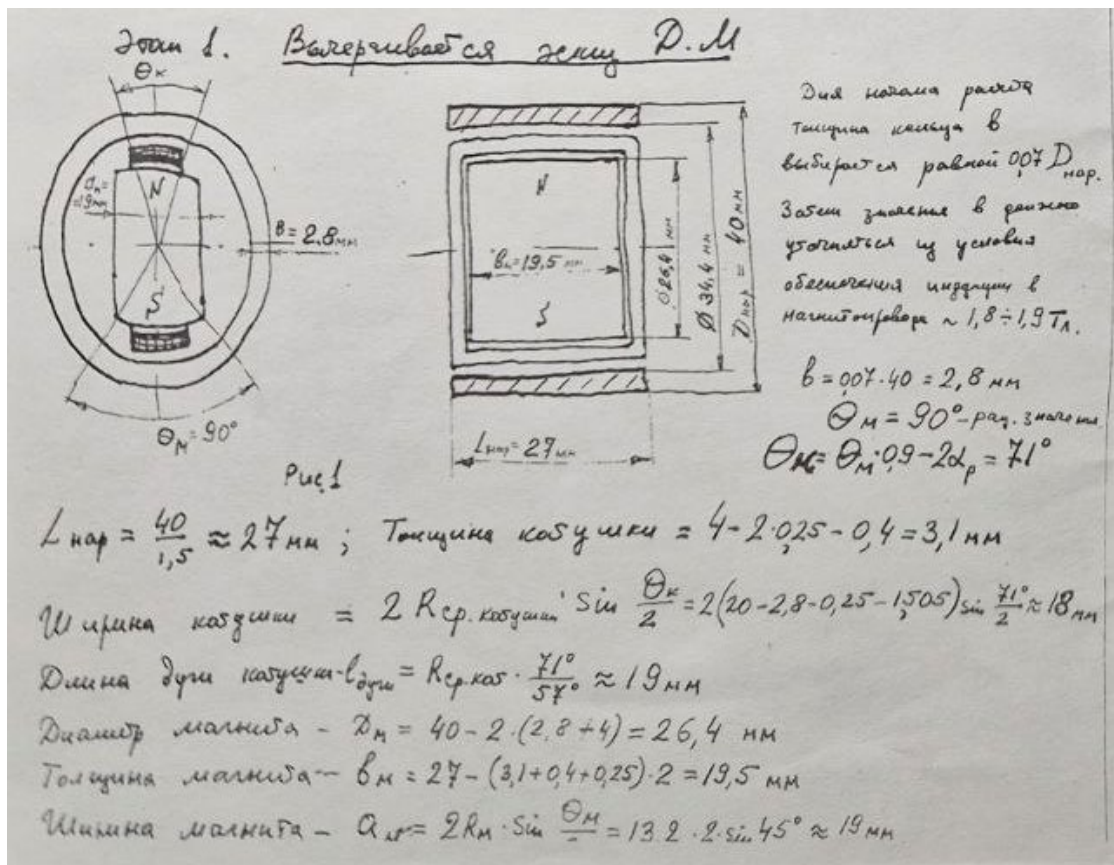
Индукция не имеет права превышать индукцию насыщения материала. Материал выбираем специально таким образом, чтобы индукция была меньше, выбирают сталь АРМКО (железо, небольшой процент кремния) индукция насыщения составляет 2 Тл. Если будем брать пермаллой, то у него индукция насыщения составляет 50М, например, 0,5 Тл. Есть Су пермаллой Су79НМ, у него индукция насыщения 0,4 Тл. Нужно следить за материалами.

Теперь посмотрим, как ведётся расчёт.

На первом этапе рисуется эскиз ДМ. Для того, чтобы нарисовать этот эскиз, все данные есть. Длина датчика момента известна из отношения

$$\frac{D_{\text{нар.}}}{L_{\text{нар.}}} = 1,5.$$

1,5 тоже соответствует опытному датчику момента. Можно сделать очень большой ДМ, но коротенький или сделать маленьким, но длинным. Если сделаем тонким и большим, то получится маленькая рабочая часть, что тоже не хорошо.

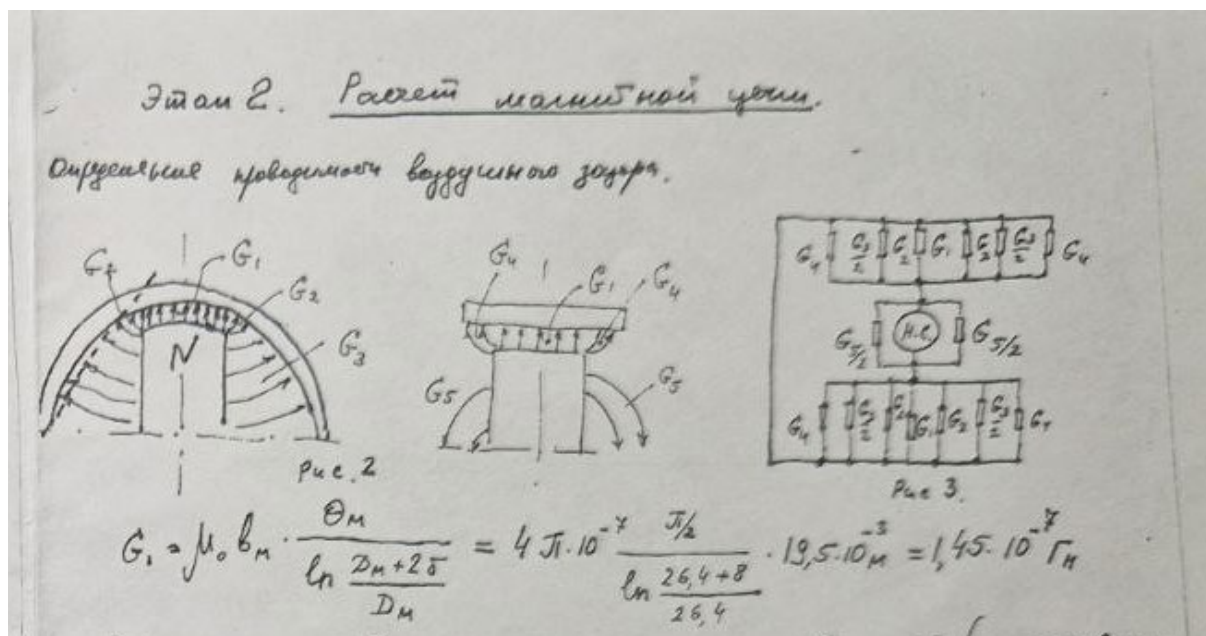


Угловая ширина магнита 90 градусов смело можно нарисовать. Дальше ширина магнитопровода. Тут начинаются сложности, т.к. мы не знаем её. Она определяется индукцией в опасных местах магнитопровода, поэтому можно взять только приблизительную величину. Для начала расчёта выберем толщину кольца магнитопровода равную  $0,07 D_{\text{нар.}}$ . Кому-то повезёт и индукция в магнитопроводе не будет превышать 1,8 Тл, а у кого-то не получится. Узнается это на самом последнем этапе.

Дальше  $\theta_k$  — угловая ширина катушки, которая определяется исходя из требования к точности моментного датчика. Будем считать, что датчик средней точности, тогда будет использоваться  $(0,9-0,95) \cdot \theta_m$ . Ещё стоит учитывать, что само  $\theta_m = 90^\circ$ , тогда получаем  $\theta_k = \theta_m 0,9 - 2\alpha_p$ , где  $\alpha_p$  — угол поворота рамки. Толщина катушки — это зазор  $(\delta) - 2\Delta_{\text{техн.}} - \Delta_{\text{карк.}}$ . Получилась медная обмотка. Ширина катушки высчитывается по дуге. По цифрам итак всё видно. Наружного зазора нет. Мы получили всю необходимую информацию для прорисовки чертежа.

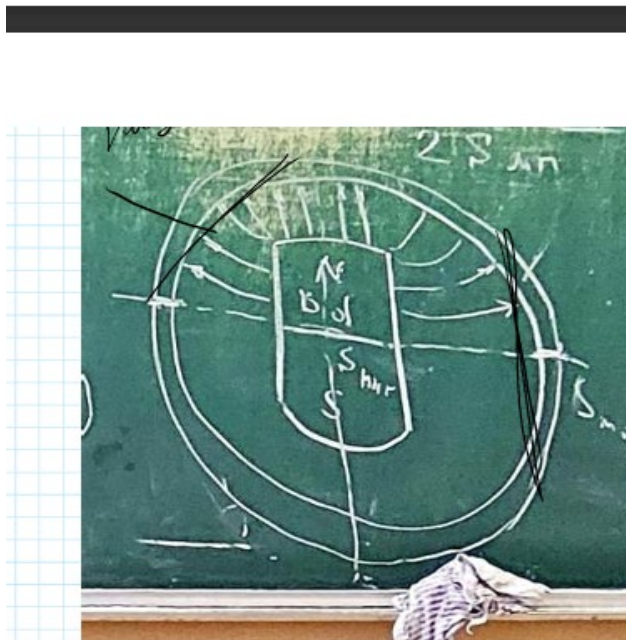
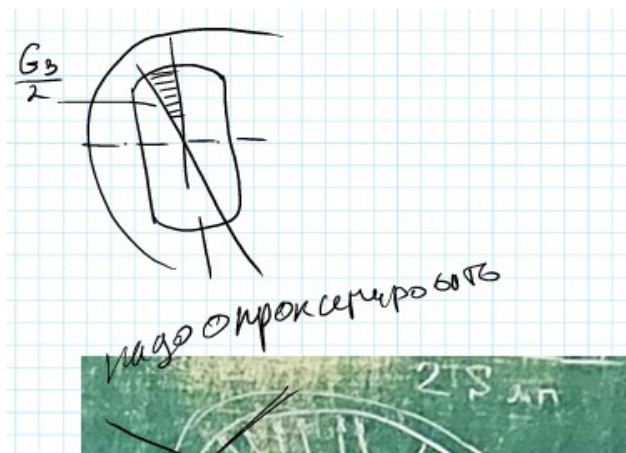
Следующий этап. Определение проводимости воздушного зазора.

Мы сначала рисуем как течёт магнитное поле. Как нам кажется. В зазоре цилиндрическом будет равномерное магнитное поле, потом будет поле выпученное с углов, а затем с боковой поверхности на кольцо это в радиальном сечении. В продольном сечении над кольцевым зазором магнитное поле, потом поле выпучивания, а с верхней части на нижнюю, которой стоит пренебрегать. Источник магнита — источник намагничивающей силы. Часть потока замыкается на себя — это  $G_5$ . Вверху и внизу зазор  $G_1$  есть — это равномерный зазор. Зазоры  $G_2$  и  $G_4$  их по два, но рисуется как один, а так они вверху и внизу симметрично. Теперь у нас есть зазор между боковой поверхностью магнита и магнитопровода — зазор магнитопровода. Первое, что мы знаем, что магнитное поле распределено как показано на рисунке. Предположительно треугольное намагничивание.

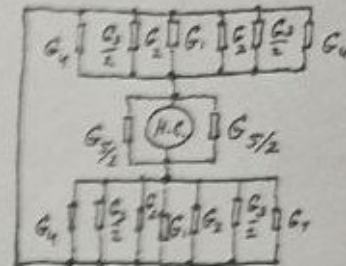
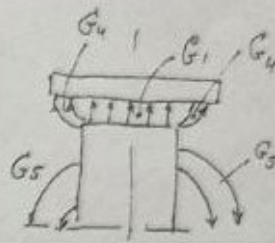
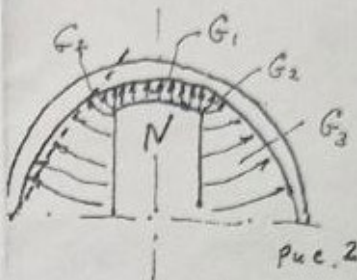




Мы исходим из того, что у нас какая-то средняя намагниченность., поэтому проводимость  $G_3$  делим пополам. Если бы было равномерное, было бы иначе. Если будем пользоваться книжечкой Пятина Постоянные магниты, то для каждого вида зазора мы найдём похожие формулы. Если говорить о потоках выпучивания, то край магнита из точки выходит. А у нас не плоскость как у Пятина, а окружность. Такой формулы мы не найдём нигде. Это не страшно, потому что потоки выпучивания имеют малую проводимость. Поэтому если ошибёмся на 10%, то общая ошибка будет небольшая. Если мы хотим посмотреть на цилиндрическую поверхность, то нужно будет аппроксимировать.



Дифференциал проводимости воздушного зазора.

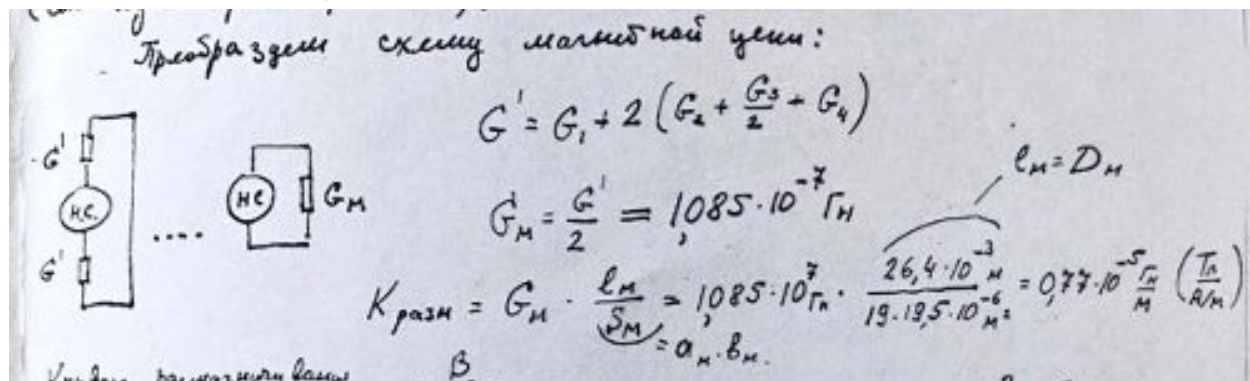


$$G_1 = \mu_0 \cdot b_m \cdot \frac{\Theta_m}{\ln \frac{D_m + 2\delta}{D_m}} = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{J/2}{\ln \frac{26,4+8}{26,4}} \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} = 1,45 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

Затем подсчитываются по формулам для проводимости (см. справочник по реч. Ю. М. Пятину «Постоянные магниты» изд. Энергия)  $G_2, G_3, G_4$ . Проводимостью  $G_5$  пренебрегаем. При усреднении  $G_3$  производим аппроксимацию цилиндрической поверхности «эквивалентной» плоскостью (см. пунктир на рис. 2). \*)

Расчёт приведён только для одного зазора  $G_1$  по Пятину.

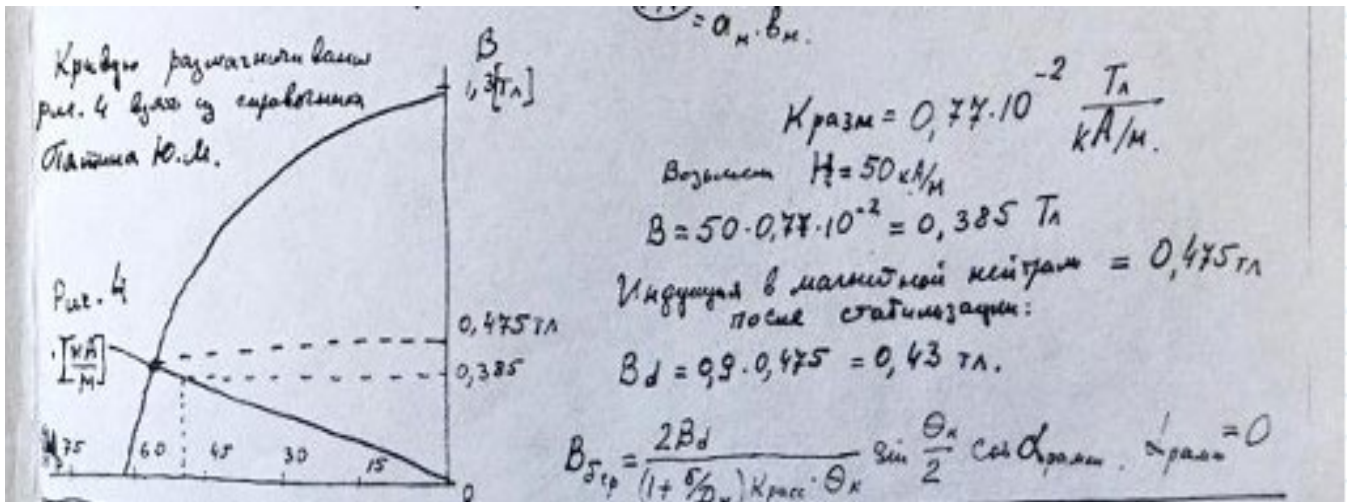
После того, как будут найдены все проводимости, необходимо преобразовать схему магнитной цепи. Параллельно соединённые просто складываются и получаются



А потом последовательно соединённые тоже складываются.

Затем подсчитывается коэффициент размагничивания — это наклон кривой размагничивания.

## Кривая размагничивания.



Берём первое попавшееся значение индукции к напряжённости электромагнитного поля, ну скажем 50 кА/м и домножаем на 0,77 и получаем вторую точку. А первая точка в 0. Получаем прямую и ищем точку пересечения с кривой размагничивания. Это будет значение индукции магнитного поля после того, как мы довели до насыщения и вышли из насыщения, то в зазоре осталась вот такая вот величина. После этого необходимо произвести размагничивание магнита. 10% магнита нужно размагнитить, чтобы обеспечить его стабильность. Нужно домножить на 0,9 и получить тем самым  $B_d$ . Это индукция магнитной нейтрали, но нас интересует среднее значение индукции, приходящееся на катушку ДМ. После расчёта мы получаем, что коэф. рассеивания  $K_{расс}$ , которое рассчитывается по формуле ниже:

Коэффициент рассеивания  $K_{расс} = \frac{G_M}{G_{1/2}} = \frac{1,085 \cdot 10^{-4} \cdot 2}{1,45 \cdot 10^{-2}} = 1,5$

проводимость  
рабочей части зазора

Он показывает на сколько меньше остаётся, чем в сечении через серединку магнита.

Теперь производится проверка, а что же делается в магнитопроводе:

$$B_{\delta \varphi} = \frac{2 \cdot 0,43 \cdot \sin \frac{71^\circ}{2}}{\left(1 + \frac{4}{26,4}\right) \cdot 1,5 \cdot \frac{71^\circ}{57^\circ}} = \underline{0,23 \text{ Тл.}}$$

$$\begin{aligned} \text{Индукция в магнитопроводе (максимальная)} - B_m &= B_d \cdot \frac{S_{\text{магнит}}}{S_{\text{магнитопровод}}} = \\ &= 0,43 \cdot \frac{19 \cdot 19,5}{2 \cdot 27 \cdot 2,8} = \underline{0,95 \text{ Тл.}} \quad B_m < B_{\text{насыщения}} \quad (\checkmark) \end{aligned}$$

$B_m$  значительно меньше  $1,8 \dots 1,9 \text{ Тл}$ , следовательно магнитопровод выбран слишком толстым. Необходимо уменьшая толщину кольца в и наоборот расчёт методом последовательных приближений добиться выполнения условия  $\underline{1,8 < B_m < 1,9 \text{ Тл}}$ .

Если вышло много меньше, то нужно уменьшить толщину кольца и произвести расчёт повторно, чтобы попасть в допустимый диапазон.



29 сентября. Семинар. Продолжение разбора ДЗ.

Теперь можно перейти к расчёту катушки.

Расчёт обмотки.

Этап 3. Расчёт обмотки

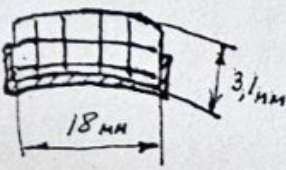


рис. 5

$$l_{\text{дуги}} = 19 \text{ мм.} \quad S_{\text{окна}} = 3,1 \cdot 19 = 58,9 \text{ мм}^2$$

$$W = \frac{S_{\text{окна}}}{S_{\text{проб.}}} K_{\text{зап.}}; \quad R_{\text{дуги}} = \rho \frac{l_{\text{выс.}} \cdot W}{S_{\text{проб.}}}, \text{ а с другой стороны } S_{\text{проб.}}$$

$$W = \sqrt{\frac{S_{\text{окна}} \cdot K_{\text{зап.}} \cdot R_{\text{дуги}}}{l_{\text{выс.}} \cdot \rho}}; \quad \rho = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$K_{\text{зап.}}$  (коэффициент заполнения) неизвестен. Для начала берём  $\sim 0,5$

$$l_{\text{выс. ср.}} = 2 \cdot 19,5 + 4 \left( 0,25 + 0,4 + \frac{3,1}{2} \right) + 2 \cdot 26,4 + 4 \left( 0,25 + 0,4 + \frac{3,1}{2} \right) = 109,4 \text{ мм} = 0,1094 \text{ м}$$

$$W = \sqrt{\frac{58,9 \cdot 0,5 \cdot 200}{0,1094 \cdot 0,017}} = 1770 \text{ витков.} \quad S_{\text{проб.}} = \frac{S_{\text{окна}} \cdot K_{\text{зап.}}}{W} = \frac{58,9 \cdot 0,5}{1770} = 0,017 \text{ мм}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{проб.}}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,017}{\pi}} = 0,146 \text{ мм.} \approx 0,14 \text{ мм.}$$

{Округлить до ближайшего стандартного значения  $d$  в меньшую сторону!}

Для провода  $0,14$   $K_{\text{зап.}}^* = 0,55$  — близко к выбранному значению. Число витков можно расчёт не повторять.

Если  $K_{\text{зап.}}^*$  сильно отличается от  $K_{\text{зап.}}$  или  $K_{\text{зап.}}^* < K_{\text{зап.}}$ , то расчёт повторить взяв  $K_{\text{зап.}} = K_{\text{зап.}}^*$

Представляет из себя обмотку, каркасик, который имеет толщину по заданию 0,4 мм. Все зазоры мы знаем. Поэтому мы знаем, что толщина катушки это 3,1 мм. А если вычесть 0,4 мм из этих 3,1 мм, то мы получим площадь обмотки (вот это я не поняла). Площадь окна = длина дуги на толщину катушки. Площадь провода — это  $S_{\text{пров.}}$   $W$  — это число витков.

$\rho$  — удельное сопротивление меди. Всё мы знаем кроме коэффициента заполнения  $K_{\text{зап.}}$ . С ним мы имеем только график. Для начала возьмём 0,5 (серединочка). Считаем число витков по формуле и получаем 1770 витков. Теперь можно найти  $S_{\text{пров.}}$ . Дальше считаем диаметр провода и смотрим на стандартные значения, округляем в меньшую сторону, иначе столько числа витков не влезет в окошко. Отсюда получаем близкий  $K_{\text{зап.}}$  к тому, что мы

выбрали, даже чуть больше, поэтому расчёт можно и не повторять, а можно и повторить. Но вообще нужно повторять, только если сильно различается.

Вот фактически рассчитали ДМ.

Теперь нужно рассчитать момент, который развивает моментный датчик и определить критерий качества. При свободной конвекции при давлении 1 атм. Мощность, выделяемая с поверхности, может быть подсчитана по формуле  $P$  приблизительно равно, дальше смотри на рисунок. Величина альфа не совсем точная для расчёта (примерно 0,7-0,8 берётся). С каждого см поверхности на 1 градус нагрев даёт такое количество Вт. Считаем площадь поверхности ДМ ( $\pi \cdot 4 \cdot 2,7$  — это цилиндрическая поверхность). Температура перегрева нам дана. Теперь можно рассчитать мощность. Подсчёт даёт, что с поверхности магнита моментного датчика при нагреве на 20 градусов может быть рассеяно 0,95 Вт. Но на самом деле это температура 20 градусов в середине с поверхности, а внутри может быть больше, если внутри прибора стоят электронные компоненты, а сейчас часто размещают усилители, датчики температуры. Дальше определяем при каком токе такая мощность выделяется. Зная ток, зная индукцию, зная число витков и зная активную площадь рамки (длина магнита на двойной средний радиус обмотки), получаем момент.

*«На заводах до сих пор пользуются системами ЦЖСЦ (честно, так и было), не смотря на предупреждение о несоблюдении преследуется по закону, но чтобы не пугать народ, продолжают пользоваться килограммами и динами, и прочими чудесами, не системами СИ. Я записываю в системе СИ, потому что сН на см разрешено, это примерно грамм»*

Дальше идёт подсчёт критерия качества.

$$P \cong \lambda \cdot S_{\text{пов}} \cdot \Delta t \quad \text{для сваб. конвекции при давл. 1 атм.} \quad \lambda \sim 0,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ 0,1-0,8 \end{array} \right\}$$

$$S_{\text{пов}} = \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2 + \pi \cdot d \cdot 2,7 \right) \text{см}^2; \quad \Delta t \text{ (среднее)} = 20^\circ$$

$$P = 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (\dots) \cdot 20^\circ = 0,95 \text{ Вт}; \quad T_{\text{ток}} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0,95}{200}} = 0,069 \text{ А} = 69 \text{ мА}.$$

$$\text{Момент} \quad M = B_{\text{ср}} \cdot I \cdot W \cdot S_{\text{актив}}; \quad S_{\text{актив}} = 19,5 \cdot \left[ 26,4 + 2 \left( 0,25 + 0,4 + \frac{3,1}{2} \right) \right] 10^{-6} \text{ м}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$M = 0,23 \cdot 0,069 \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot 1770 = 1,48 \cdot 10^{-2} \text{ Нм} = \underline{148 \text{ сНсм}}$$

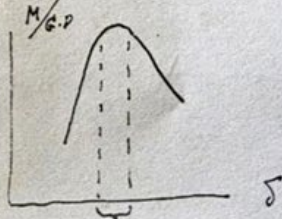
$$\text{Критерий качества} \quad \frac{M}{\sqrt{P} \cdot G_{\text{ж}}}; \quad G_{\text{ж}} (\text{век Д.М.}) = \gamma_{\text{ср}} \cdot \frac{\pi D_{\text{нар}}^2}{4} L_{\text{нар}}.$$

$$\gamma_{\text{ср}} = \gamma_{\text{Fe}} \cdot K_{\text{зап Fe}} = 0,78 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2} \cdot (0,75 \dots 0,85) = 0,615 \text{ Н/см}^2$$

$$G_{\text{ж.м}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2,7 \cdot 0,615 = 2,1 \text{ Н}$$

$$\frac{M}{\sqrt{P} \cdot G} = 0,725 \frac{\text{Нсм}}{\text{Н} \cdot \sqrt{\text{Вт}}}$$

Дальше нужно размер  $\delta$  и повторный расчет определить размеры Д.М., соответствующие максимальному значению  $\frac{M}{\sqrt{P} \cdot G}$ . Оптимизацию провести с помощью ЭВМ. В итоге представить программу, результаты оптимизации, график зависимости  $\frac{M}{(G \cdot \sqrt{P})}$  от  $\delta$ . Эскиз Д.М.



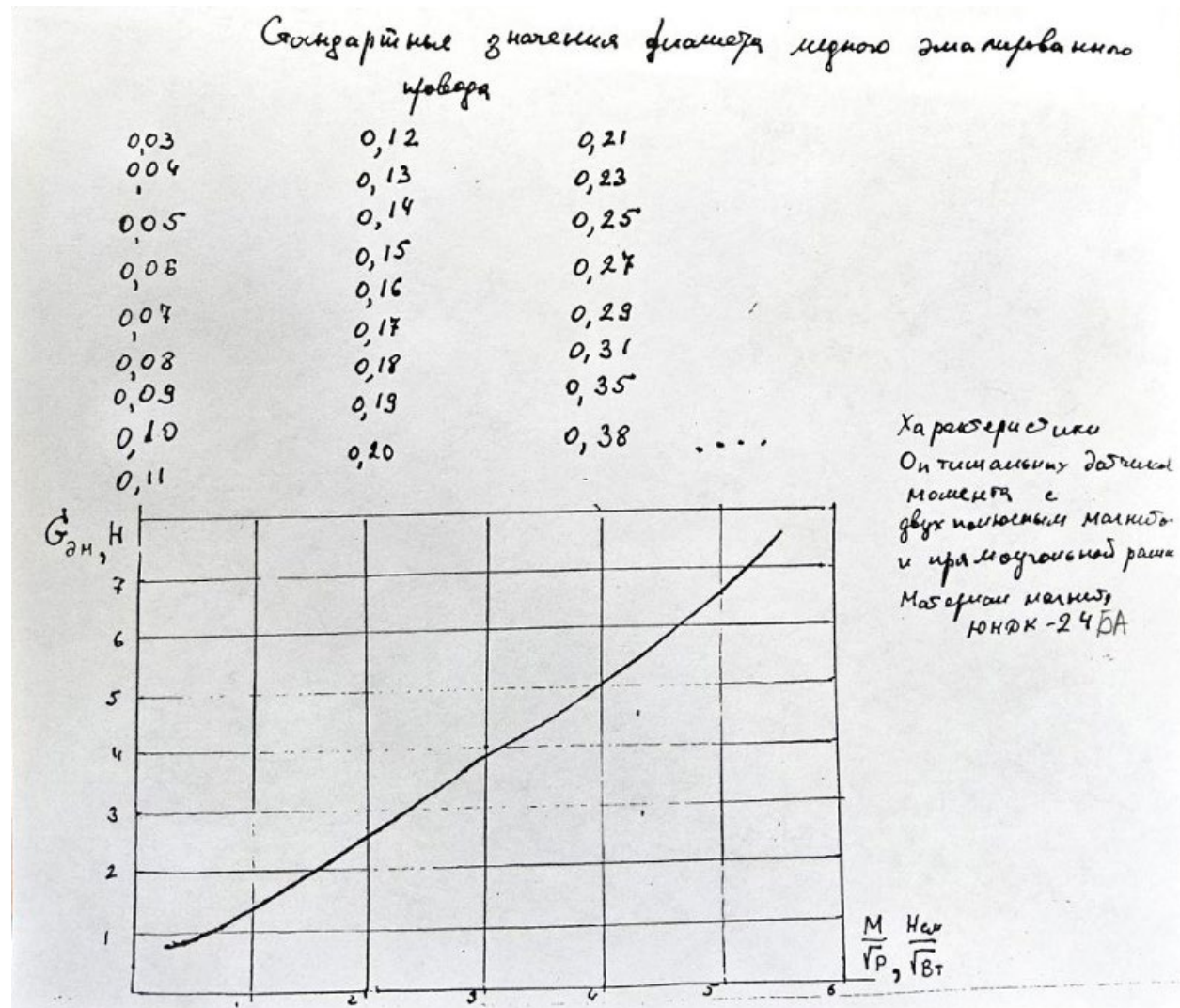
выполнить на миллиметровой бумаге в масштабе и приложить к отчету.

Формула для критерия качества – это отношение момента к корню квадратному из мощности. Иногда критерий качества включает в себя и вес этого датчика. ДМ имеют какую-то среднюю плотность, удельный вес, который определяется как удельный вес железа, умноженный на  $K_{\text{зап}}$ .



датчика железом. Так прикидывая эти соотношения, у всех датчиков этих примерно одна и та же величина получается.  $G$  – это вес. В добротность включаем вес.

А теперь мы берём график и смотрим на оптимизационный график, который похож на прямую.



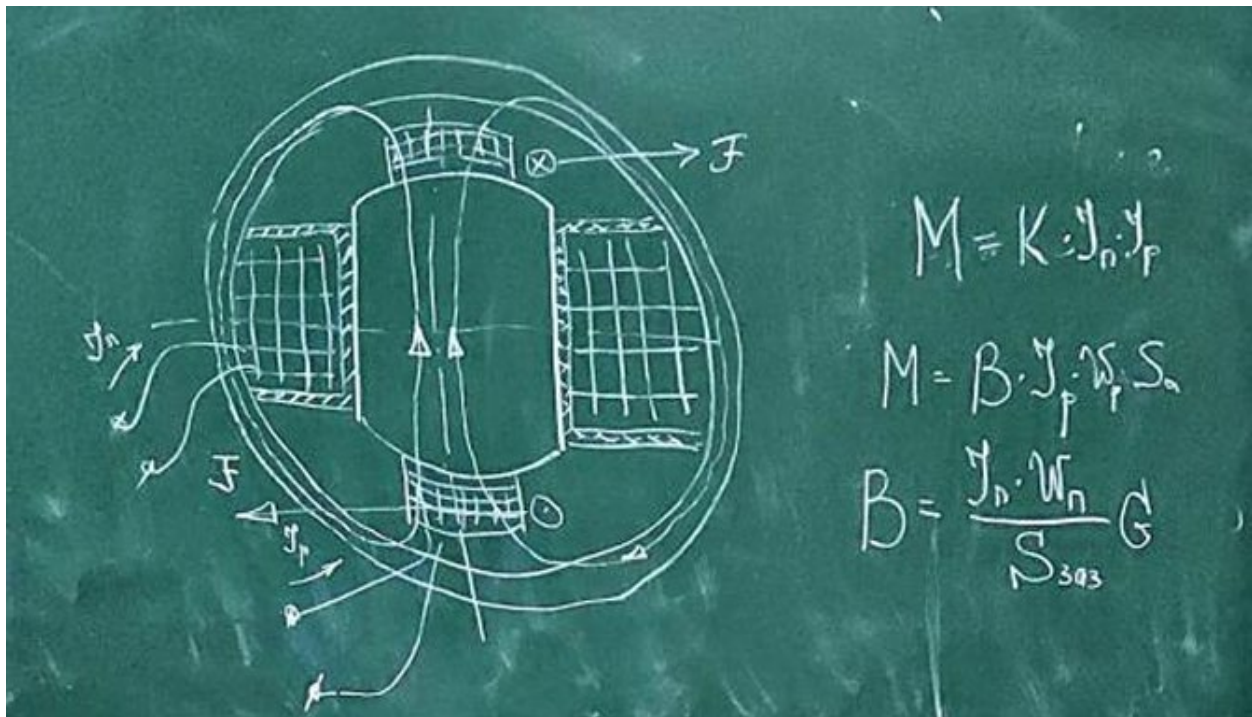
Если возьмём, например, 4 Н, то момент к корню из мощности примерно 3, тогда получается примерно 0,8. Глядя на цифру, полученную по формуле, и на цифру из графика видим, что по формуле получается значение ниже оптимального. Значит, когда расчётчики вели расчёт добротности параметров максимальной добротности, они не меняли параметры веса и наружного диаметра, а только меняли зазор. Они нашли оптимальный зазор и для него делали.

Дальше задача состоит в том, чтобы оптимизировать датчик. Мы знаем как делается расчёт. Он делается в рукопашном виде, чтобы быстрее выявить ошибки. А дальше мы должны взять оптимальный зазор и для него рассчитать по новой и получить новое значение добротности и сравнить с оптимальным значением. Если меньше, то считать по новой. В какой-то момент получим экстремум. С десятков нужно рассчитать, но в рукопашку сложно, поэтому эти расчёты проводятся через программу.

На этом наше задание будет закончено. Задание соответствует тому, что приходится делать на заводе. Расчёт мы сделали очень приближённый. В-первых, пользовались методом проводимостей путём возможных путей тока, где были серьёзные допущения. Считали, что магнитопровод выполнен из стали АРМКО, он обладает нулевой проводимостью, точнее бесконечной, т.е. мы считали, что сопротивлением магнита обладают лишь зазоры, а через магнитный материал течёт магнитное поле без потерь. Когда начинают считать магнитные цепи, то желательно производить расчёт с учётом потерь магнитного поля в магнитопроводе. Мы смотрим, что какая по объёму в каждой точке индукция, где-то получается больше, поэтому не всё так просто. Существуют машинные методы расчёта. Есть программа Максвелл. Весь объём там разбивается на элементарные кусочки.

6 октября. Лекция.

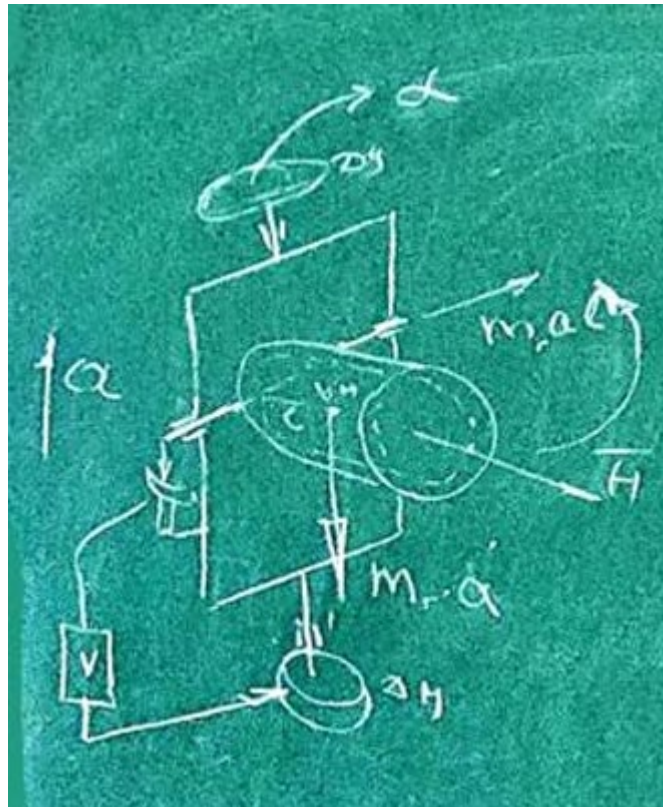
Сегодня я бы хотел дать ещё одну информацию по ДМ. Есть отдельно магнитоэлектрические датчики, а те, про которые я сейчас буду рассказывать, они носят название электродинамические ДМ. Название они получили в ?электротехнике?. Динамическим моментом называется момент под действием магнитного поля двух катушек. Это две катушки, которые взаимодействуют друг с другом. Момент пропорционален квадрату тока. Есть ферродинамические датчики, они более мощные. Фактически это электромагнитные, т.е. два электромагнита, взаимодействующие друг с другом. В части приборов гироскопических используются эти ферродинамические датчики. Листочков не нашлось, поэтому будет рисунки от руки.



Они содержат сердечник, который по внешнему виду напоминает постоянный магнит, но здесь этот сердечник из магнитомягкого материала. Имеется кольцо магнитопровода, оно такое же, как и в магнитоэлектрических ДМ. Также здесь имеется каркасик, но может быть и без него. На него намотана обмотка. И имеется рамочка, она имеет такой же вид, как и в магнитоэлектрическом моментном датчике. Фактически это тот же самый магнитоэлектрический ДМ просто вместо магнита установлен электромагнит.

Одна катушка, через неё пропускается  $J_{\Pi}$  ток подмагничивание. Она создаёт поток, замыкается как поток постоянного магнита (как показано на рисунке). А в магнитном поле находится вторая катушка. В эту катушку тоже подаётся ток. Работает также как магнитоэлектрический ДМ. По правилу левой руки определяем силу Ампера. Магнитные линии в ладонь, 4 пальца вдоль направления тока, большой палец покажет направление силы Ампера. Формула момента приведена на рисунке, он равен произведению индукции  $B$  в зазоре на ток в рамке  $J_p$  на число витков  $W_p$  на  $S$  активная рамки. Индукция  $B$  находится без всяких кривых размагничивания, просто находится как намагничивающая сила, создаваемая обмоткой электромагнита тока подмагничивания  $J_{\Pi}$  на  $W_{\Pi}$  умножить на проводимость воздушного зазора и поделить на площадь зазора  $S_{\text{зав.}}$  через который течёт магнитный поток. Индукция зависит от токов подмагничивания, поэтому момент можно записать через произведение тока рамки на ток подмагничивания. Это работа ДМ на постоянном токе. Он имеет ряд преимуществ перед магнитоэлектрическим, поскольку если мы обеспечим постоянство токов, то эти свойства датчика не будут зависеть от времени. Нет размагничивания от времени самопроизвольного. Определяется стабильностью токов. Она может быть достаточно хорошей, хотя для этого нужны стабилизаторы тока, в которые входят опорные элементы такие как стабилитрон кремниевый и др. Они способны долгое время стабильно держать опорное напряжение, но они не всегда хорошо работают при радиациях. Там они уже работают не стабильно.

Дальше перешли к рассказу о гироинтеграторах.



Гироскоп. Так за хвостик гироскопа, не за ц.м., элемент крепления. Дальше пошла наружная рамочка гироскопа. Здесь стоит ДУ, ДМ. Ведёт как одноосный ГС. Снимается сигнал, который поступает на усилитель, а дальше идёт на ДМ. Удерживаясь за счёт создаваемого двигателем момента, ГП остаётся в положении перпендикулярном к наружной рамке – принцип одноосного ГС. Как работает этот датчик? Если есть ускорение  $a$  ЛА, то в ц.м. будет приложена сила равная массе гиromотора, умноженная на величину плеча  $l$ . Вернее сила  $m_r \cdot a$ , а эта сила создаёт момент  $m_r \cdot a \cdot l$ . Под действием этого момента ГП прецессирует, стремясь совместить вектор кин момента с вектором момента создаваемого маятником ГП.

Причём скорость прецессии  $\omega_{\text{пр}}$  будет равняться отношению момента гироскопа  $m_{\text{г}} \cdot a \cdot l$  деленная на Н.

$$W_{np} = \frac{m \cdot l \cdot a}{H}$$



А угол альфа этой прецессии будет равняться интегралу от скорости прецессии  $\omega_{пр}$  по  $dt$  (время наблюдения), и он будет равняться масса гироскопа на  $l$ , делённая на  $H$ , умножить на интеграл от ускорения  $a$  по  $dt$ .

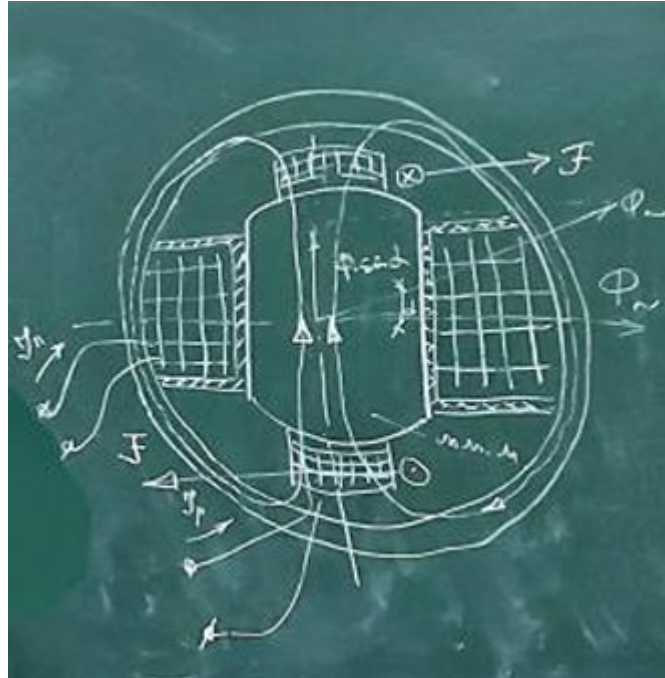
$$\omega_{пр} = \frac{m \cdot l}{H} \cdot V_{acc}$$

$$\alpha = \int_0^T \omega_{пр} dt = \frac{m \cdot l}{H} \int_0^T a dt$$

А это ничто иное как скорость  $V$  объекта. Находимое вследствие действия инерционной силы, вызванное ускорением. Т.е. с помощью этого прибора можно определять интеграл от ускорения, что требуется в инерциальной системе. А если ещё раз проинтегрируем, то получим перемещение. Распространены, но очень сложные приборы эти. Лет 20 назад делался синхронный ГП. Делалось это всё с газовой опорой у ротора с широким использованием бериллия в качестве подвижных элементов. Был поплавковым гироскопом. Были магнитные подвесы. И т.д. Примерно такого габарита был прибор. Очень дорогой. Доходило до 500 тыс долларов. Но эти ГП стояли в прецизионных навигационных системах. Акселерометры в то время были. Появились гироинтеграторы линейных ускорений в немецких системах управления ракетой ФАУ 2. Она использовала гироскопы для наведения. С появлением электронных систем, появились аналого-цифровые преобразователи. Стали использовать акселерометры. По точности в конце концов они достигли почти тех параметров, как гироинтеграторы. Они очень точные, но цена очень большая. Если акселерометр входит в размер диаметр сферы 30 мм, то гироинтеграторы лин. ускорений имели вес порядка нескольких кг. Это достаточно тяжёлое крупногабаритное изделие, которое не могло конкурировать с маятниковыми акселерометрами, хотя тоже тонкостей полно. И сложностей тоже полно. Но тем не менее маятниковые акселерометры вытеснили гироинтегратор линейных ускорений из разрабатываемой техники. В России и многих других странах уже не занимаются кроме Китая. А Китай построил под Пекином новый завод по производству их. Набрал очень квалифицированных людей и колоссальные

деньги в это вкладывает. Лет 20 у нас уже не занимаются этими приборами. Люди, которые этим занимались, уже ушли. Кто на кладбище, кто на пенсию. Почему китайцы ими занимаются? Он же неперспективный, страшно дорогой, габаритный, сложный. Одна особенность – это механический прибор. Все акселерометры для перевода сигнала в цифру требуют аналоговый сигнал переводить, который снимается с эталонного сопротивления, включенного в цепь обратной связи. Прибор компенсационный. Они все включают в себя опорные элементы, а это источники постоянного напряжения. Чтобы стабилизировать токи, требуются опорные источники. В условиях приземной навигации такие источники можно сделать, а вот в космосе особенно при длительных полетах эти стабилитроны, опорные источники, стабильности не обеспечивают. Видимо китайцы всерьёз собираются на Марс. Собираются живьем или нет. Даст им Бог возможность долететь до Марса и не испечься по дороге от космического излучения. Им нужны приборы, которые бы выдерживали радиацию. Мне не показывают ничего китайцы из того, что они делают. Ну я и не рвусь. Но читаю лекции, мне не жалко. Как один мой родственник работал в Пензе и рассказывал, как приезжал Михалков в Пензу, отец нынешнего Михалкова, Сергей Михалков, к нему из местного издательства обратились с вопросом как он не против, что его публикуют, басни и сказки и поддерживает, говорит «пожалуйста». Его интересует гонорар за эти книжки. Когда китайцы обращаются, я говорю «». Ну посмотрим, что там будет дальше. Читать об ошибках приборов надо знать конкретные детали. Когда они интересуются магнитными подвесами желательно знать, какие они используют. В общих чертах можно читать, но толку от этого не будет. Этот прибор хорошо работает в предельных условиях, где радиация не сильно сказывается на источниках опорных напряжений. Но, вообще говоря, такие приборы с ДМ они имеют и достоинства, и недостатки. Главный недостаток – мощность, магнитное поле и поток мы получаем бесплатно. Намагничивающая сила есть (в магнтоэлектрических). Если используем электромагнит, нужно обеспечивать ток, который будет нагревать прибор. Да хорошо работают приборы, но не стабильные магниты имеют неприятный эффект – спонтанное размагничивание. Влияние температуры, скачкообразное изменение магнита при эксплуатации, поэтому сначала приходится сначала намагничивать, а потом размагничивать. Здесь эта стабильность

обеспечивается за счёт хороших опорных эл. Это достоинство. А недостаток – большое использование мощности. Эти устройства можно использовать и как ДМ, и как ДУ. Каким образом этот прибор заставить использовать как Ду?

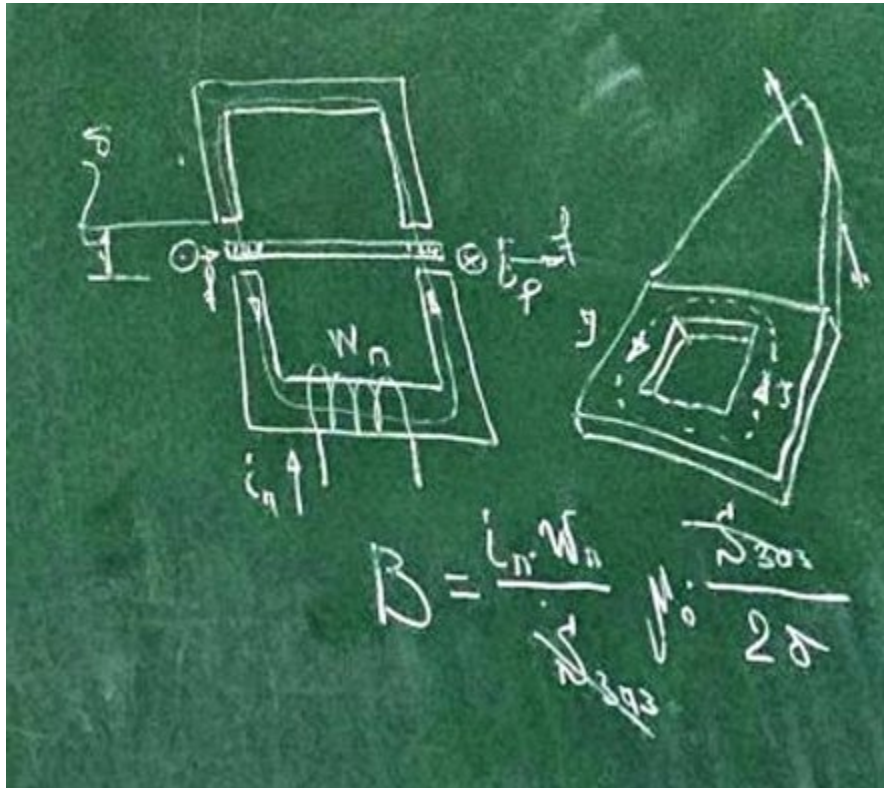


Если пропустим через рамку переменный ток, то в рамке создается магнитный  $\Phi$  переменный поток, который направлен к оси магнитомягкого вкладыша, а это магнитомягкий материал ммм. Это ноль ДУ. Магнитный поток по стержню. Не течет, только перпендикулярен. А если эту рамочку отклонить, то появится проекция  $\Phi$  переменного на ось рамки –  $\Phi$  умножить на синус альфа. Тогда в катушке электромагнита будет наводиться ЭДС, пропорциональное углу поворота рамки. Т.е мы можем это железо заставить работать как ДУ и мерить угол поворота рамки. А с другой стороны, можем использовать как ДМ, а можем одновременно использовать как ДУ и ДМ. Получится совмещенный датчик момента, что позволяет сильно упростить конструкцию прибора. Можно использовать на растяжках. Для подачи тока и подачи напряжения. К совмещенным приборам ещё будем возвращаться.

Это рассказ о режиме работы датчика на постоянном токе. Этот датчик может также работать на переменном токе. Эти датчики хорошо работают на двух этих токах. Если завести переменный ток в рамку, то переменное поле магнита будет взаимодействовать с переменным током рамки.

Удобнее рассмотреть другой вид этого датчика.

В течения создается магнитный поток, который протекает таким образом по магнитопроводу, и имеется рамочка.



Вот в таком она виде, как на рисунке. Вот так вот течет по ней ток  $I$ . Если мы посмотрим, как течет ток, справа от нас, слева на нас. На нас течёт ток рамки  $i_p$ , а здесь от вас будет течь ток подмагничивания  $i_n$ . Ну как находить силы мы тоже легко сориентируемся. Почему ток обозначается маленькой буквой? Потому что токи и силы будут относиться к переменным. Давайте напишем, чему равняется индукция  $B$ . Она определяется током подмагничивания рамки. Она равняется току подмагничивания  $i_n$  на  $W$  подмагничивания, делить на площадь  $S$  зазора. Можно записать как проводимость. Модуль  $W$  умножить на площадь зазора деленная на два дельта, где дельта это расстояние. Почему такая формула? Проводимость двух полюсов, ориентированных друг против друга, можно приблизительно посчитать как  $\mu_0$  нулевое умножить на площадь зазора, делённое на сам зазор. Это формула не очень точная, но дает процентов 5 ошибки. Удобно для расчетов. Можно связаться с логарифмами натуральными и иными сложностями. Это мы нашли магнитный поток. Делим на площадь зазора и

получаем индукцию. Площадь ушла и получаем силу  $f$  маленькое, будет равняться некоторому... Давайте предположим, что токи рамки и токи подмагничивания запишем сначала.

$$\begin{aligned}
 i_p &= \sqrt{2} I_p \sin \omega t \\
 i_n &= \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \varphi) \\
 &\frac{1}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \\
 f &= i_p B W_p = k 2 I_p I_n \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) = k I_p I_n \cos \varphi
 \end{aligned}$$

Ток рамки будет равняться корень квадратный из двух на амплитуду тока рамки  $i_p$  на синус  $\omega t$ .  $\omega$  — это частота. А ток подмагничивания запишем как корень из двух. Почему корень из двух? Потому что  $i_p$  это эффективное значение тока рамки. А амплитуда в корень из двух раз больше для синусоиды. Ток подмагничивания и на синус  $\omega t$ , частота та же самая. Фаза может немного отличаться. Плюс некоторое  $\varphi$  запишем. Сила будет равна току рамки умножить на индукцию  $B$ , на число витков рамки  $N$  или учитывать то, что  $B$  это  $\mu_0 \mu_r W$  на два дельта можем записать как  $K$  умножить на ток рамки и  $I$  подмагничивания, т.е. умножить на корень из 2 ток рамки на ток  $I$  подмагничивания на синус  $\omega t$  и на синус  $\omega t + \varphi$ . Произведение этих синусов будет одна вторая на косинус разности косинус  $\varphi$  минус косинус  $2\omega t + \varphi$ . Вторая составляющая — это гармоника двойной частоты. Т.е. возникает переменная сила на двойной частоте питающего напряжения. Она постоянной не содержит, поэтому не волнует, а косинус  $\varphi$  это постоянная составляющая, постоянная сила. Поэтому, подставляя, получим вместо двух здесь одна вторая получается а на ток  $I_p$  ток подмагничивания эффективного значения и на косинус  $\varphi$ . Любительский эффект. Мы получили силу, которая зависит от амплитуд токов, и какой-то ещё косинус  $\varphi$  влез. Фазовая составляющая она не очень хороша. Это причина неточности датчика. Мы рассматривали идеальный гармонический сигнал синус  $\omega t$  и синус  $\omega t + \varphi$ , мы не учитывали высокие гармоники, а они



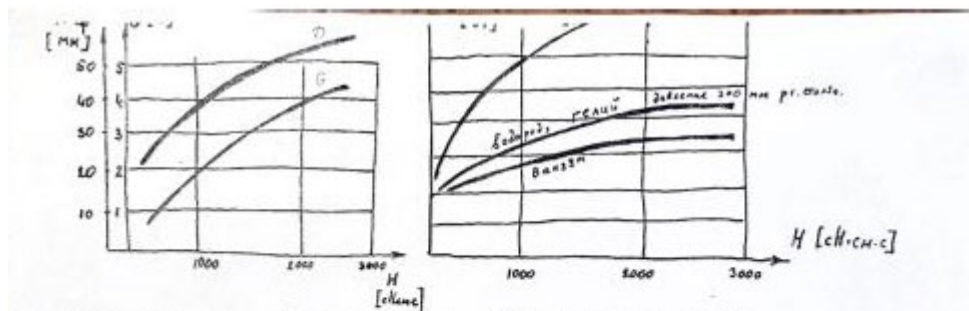
приведут к фазовым составляющим более высокочастотных гармоник помимо косинуса  $\phi$ . Поэтому как точный прибор использовать нецелесообразно и его никто таким не использует. Можно заставить использовать на переменном токе, но не совсем точно будет. Если есть необходимость, то используют на переменном токе.

Используются в приборах, где не требуется измерять большие моменты и находят применение в цифровых приборах, где полезно точно мерить.

Табл. №2

Наименование	Марка	Вместимость (3/100%)	Вместимость на расчет (3/100%)	Продолжительность (1/100%)	Классификация по классу точности	Температура (1/100%)	Время (1/100%)	Коррекция	Материал	Средство	Примечание
Материал	МЛ-2	1,8 <sup>+</sup>	12 <sup>-</sup>	3,5 <sup>-</sup>	2,6 <sup>-</sup>	0,33	0,435		МЛ-2	3/100	Система, измерительная
Бериллий	АКП-1	1,85 <sup>+</sup>	5,4 <sup>+</sup>	2,8 <sup>+</sup>	11,0 <sup>+</sup>	1,46 <sup>+</sup>	2,9	0,04	МЛ-2	3/100	Точность - "
АКП-1	АКП-1	2,6 <sup>-</sup>	2,45 <sup>-</sup>	-	18...15 <sup>+</sup>	-	-	-	МЛ-2	3/100	
АКП-1	АКП-1	2,8 <sup>+</sup>	60 <sup>+</sup>	5,5 <sup>+</sup>	23,2 <sup>-</sup>	1,14 <sup>+</sup>	0,74	0,33	МЛ-2	3/100	
АКП-1	АКП-1	2,8 <sup>+</sup>	48 <sup>+</sup>	3,3	2,2 <sup>-</sup>	1,14 <sup>+</sup>	0,72	0,33	МЛ-2	3/100	Система, измерительная
Титановый сплав	ВТ-5	4,5 <sup>+</sup>	75-95 <sup>+</sup>	70-85 <sup>+</sup>	8 <sup>-</sup>	0,075 <sup>-</sup>	1,04	0,33	МЛ-2	3/100	Система, измерительная
С. М. О. М. И.	18Х18В8	7,95	130	30	14,5	0,238	2,04	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
	4Х13	7,68	114	31	12,6	0,276	2,0	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
	4Х15	7,7	68	40	14	0,9	2,1	0,2	МЛ-2	3/100	Хар.
	18Х18В8	7,9	58	24	16,5	0,163	2,0	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
	3Х13В8	8,1	88	50	15,1	0,1	2,1	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
	3Х13В8	7,8	125	30	13-16	0,135	2,0	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
Ковар	Н23К18	8,2	51	40	4,5-5,5 <sup>+</sup>	0,132	1,48		МЛ-2	3/100	Хар.
Ковар	Н 36	8,1	50	35	1,1 <sup>+</sup>	0,103	1,51	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
Ковар	32-Н20	8,2	50	35	0,55 <sup>+</sup>	0,1	0,5	0,3	МЛ-2	3/100	Хар.
Ковар	АК-39-1	8,5	65	45	2,1	1,05	1,5		МЛ-2	3/100	Хар.
Вспомогательный материал	ВКМ-5-3	17 <sup>+</sup>	64	60	5,6 <sup>-</sup>	1,0	0,33		МЛ-2	3/100	Хар.
Вспомогательный материал	ВКМ-7-3	17 <sup>+</sup>	70	63	5,3 <sup>-</sup>	0,88	0,34		МЛ-2	3/100	Хар.
Вспомогательный материал	ВКМ	17 <sup>+</sup>	70	65	5,3 <sup>-</sup>	0,8	0,33		МЛ-2	3/100	Хар.

Хочу я вас познакомить с материалом, который широко используется в гироскопии. Мы уже прослушали широкий курс материаловедения. Это очень полезно. Гироскопист должен разбираться в структуре материалов и количественном составе. Вообще он должен знать всё.



G - вес гироскопа,  $\Phi_{ср}$  - диаметр сферы, P - выделяемая мощность.

Основные характеристики гироскопов.

(стальной ротор,  $\Omega = 24000$  об/мин, конструкция орбитальная симметричная, подвеска ротора на шарикоподшипниках. Нитяг растянут на нагрузку  $\sim 10 \dots 20 \text{ кг}$ )

Таблица добротностей D и весов G указанных гироскопов.

H км/с	200	400	500	1000	2000	4000	6000	10000	25000
D см·с	3,2	3,4	4	5,3	6,2	9	9,3	12,2	12,5
G Н	0,62	1,17	1,22	1,9	3,2	4,5	6,19	8,2	20

Конструкционные материалы, применяемые в точном приборостроении.

Табл. №2

Наименование	Предел теч.	Твердость по Куперу	Модул Юнга	Плотность	Теплопроводность	Кристалл. $10^6 \left[ \frac{\text{л}}{\text{г·с}} \right]$
	$\sigma_{тек} \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right]$	$H_{Куп} \left[ \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right]$	$E_{Юнг} \left[ \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \right]$	$\rho \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$	$\lambda \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{см·град}} \right]$	
Борид	154	21000	5,3	4,0	0,5	5,4 (констр. мат.)
Алмаз	530	70000	10,35	3,5	20	1,0 (покрытия)
Карбиды (волокно)	84	8200	0,73	2,5	0,014	0,55 (констр. мат.)
Резиний	40	8500	1,9	2,3	1,57	2,33 (---) при 20°C -70°C - 1,42 +130°C - 2,05 +170°C - 2,39

Посмотрим на материалы, которые используются в гироскопии. Вообще используется всё. Вся таблица Менделеева. Все детали, какие сплавы, всё у нас есть. Надо свойства этих материалов хорошо представлять. Материаловедение я вам читать не могу и в достаточной мере его не знаю, но некоторые материалы и свойства мы должны знать. Вот есть список материалов: магний, бериллий, материал АКП – это алюминий с кремнием, титаны, стали, сплавы

КОВА, ЯНВАР, СУПЕР ЯНВАР, вольфрамовые сплавы и дальше кристаллические материалы. Давайте посмотрим сначала по металлам.

Ну магний – это материал, который является наиболее лёгким, плотность у него 1,8 г на см в кубе. Он обозначен двумя крестиками ++. Плотность – это особенность, которую надо знать. А вот прочностные условия хуже не придумаешь. 12 Н на см квадратный. Это в мили ньютонах. Предел текучести 3 с половиной. Коэффициент линейного перемещения поставим минус К расшир 10 на 10 -6 степени. На самом деле 26 миллионных на градус. Стоит минус почему? Очень большой коэф темп расширения в сравнении с другими. Если говорить о том, хороший он или нет, то тут не только величиной надо увлекаться, но ещё надо говорить о том на сколько он отличается от основных материалов. Основным материалом является железо, сталь, без них нельзя сделать ни подшипников, ни магнитов, ни прочных деталей. Желательно, чтобы другие детали в приборе обладали таким же К расшир как у стали. Про величину 10 в -6 степени можно говорить, что коэф лин расшир составляет 26 ppm на градус цельсия. Это довольно широкое распространение имеет. Теплопроводность в Вт и на см на градус. Не очень много и не очень мало, поэтому никаких значков писать не надо. Модуль Юнга упругие свойства. У хороших сталей это 2. Здесь так себе 0,455. Коэф Пуассона для магниевых сплавов не знаю. Показывает насколько поперечное сечение у образца меняется при растяжении. Немагнитный это плюс. Обрабатываемость удовл. Т.е хорошо подвергается точению, фрезерной и токарной обработкой. Но он огнеопасен, поэтому не дай Бог искра проскочит, то произойдёт взрыв, вспыхивает по объему. Раньше порошок магния использовался в коротко временном освещении в фотоделе. На блюдечке поджигался его порошок. Достаточно мощное освещение. Часто обрабатывают под слоем сала. Тогда он менее опасен чем огнеопасный материал, но и то.. Вот второе свойство в примечании это не коррозионностойкий. Здесь требуется более подробное объяснение. Вот принесли мне с одной фирмы заключение на заключении акселерометр у которого балансировочные грузики были выполнены из магния. Прибор поплавкового типа. Поплавковая жидкость насыщена фтором, маслами минеральными разные фторорганические жидкости. Они тяжелые. Плотность около 2 грамм на куб см, поэтому в них поплавков хорошо плавают. Архимедова сила компенсирует силу веса. Перед этим буквально за месяц



читал статью написанную доктором Чарльзом Дрейпером который занимался поплавковыми приборами. Изобретателем является профессор Ткачев, выпускник нашей кафедры, он подал заявку на изобретении двухступ поплавк ГП. Он получил свидетельство и всё. А Дрейпер занимался практикой приборов. В частности делал сам поплавк ГП, а дальше на базе них делались ГС платформы и инерц системы. В советском технологическом институте существует лаборатория Дрейпера создающая первые поплавк приборы и инерц системы. Ткачев молодец, что получил патент, но не более. Дрейпер пишет, что в качестве рабочего материала он использовал магний как самый легкий материал, но он через некоторое время убедился, что он не коррозионностойкий для поплавковых жидкостей. Я посмотрел и сказал, что магний по заявлениям Дрейпера не коррозионностойкий в жидкостях. Я получил много возмущений, что магний коррозионностойкий, я решил разобраться поэтому и обратился на фирму НаучноИсследовательскийИнститут автоматики и приборостроения. Нужно знать как ведет себя провод, как ведет себя эмаль, разные сплавы, не корродируют ли, как ведут себя пластмассы, не растворяются ли, как ведут себя резины при контакте с жидкостью. А резина на самом деле приводит к расслаиванию жидкости на несколько слоев которые хорошо смещаются друг относительно друга. Жидкости вязкие, а когда резина долгое время там находится, то сама жидкости расслаивается и один слой относит другого перемещается и не создаётся демпфирования. Для этого на фирме были химические исследования. Груев Игорь Дмитрич был. Вы исследовали взаимодействие магния с жидкостью. Ну что там? А в журнале написано, что коррозионностойкий. Вы знаете, странно, ведь у Дрейпера написано иначе. Щас подожди, у меня в шкафу лежат образцы. Под слоем пыли достал ампулы, в которых лежат деталюшки бериллия. А там как грибы выросла коррозия. То действительно Дрейпер был прав. Но рассказываю я это не только потому что магний опасен, а ещё об одной вещи. Как исследуют материалы на коррозионную стойкость. Ведь его образцы 10 лет пролежали. А материалы же новые. Надо быстро давать ответы как ведут себя материалы. Поэтому исходят из известного закона по которому скорость хим реакций удваивается на каждые 10 градусов нагрева. Поэтому надо посмотреть как материал ведет себя с жидкостью или газом. Нагревают предположим до 80 градусов по отношению

к 20 градусам. 2 в степени этих скольких раз нагрева это дает увеличение скорости реакции. Вот месяц выдержки жидкости эквивалентен 5 годам или 10 годам под действием этой жидкости. Т.е получают ускоренную информацию. Но ускоренные проверки не всегда дают положительный результат. Вот ускоренные проверки показали, что магний коррозионностойкий. А вот в натуре показало обратное. Не всегда можно этому доверять.

Следующий материал бериллий. Это вообще идеальный материал гироскописта. Лучше материала не существует. Плотность 1,85 г на см в кубе. Т.е этот материал плавает в поплавковой жидкости. Т.е поплавков не надо делать. Он итак в ней хорошо плавает. Поэтому поставили ++. Насколько он более прочный в сравнении с магнием. У него 57. Если будем сравнивать по отношению предел прочности к плотности, то нет материала равного бериллию. Лёгкий и в тоже время прочный. Предел текучести тоже хороший. Механические свойства идеальные. Коэф лин расшир ++. Почему? Потому что 11 очень близко к темп коэф стали. 12-13. Бериллий очень хорошо сочетается со сталями как конструкционный материал. Крышки ГМ из бериллия. Ротор двигателя приходится делать из стали потому что это ферромагнитный материал. А крышки и прочие элементы из бериллия. Подшипники стальные, а вот оси можно сделать из бериллия. Но поскольку темп коэф одинаковый то при термоциклах одна деталь относительно другой мало сползает. Температурная проводность 1,46 тоже ++. С латунью и медью можно сравнить, у бериллия лучше. Греющиеся детали очень хорошо расходятся по объёму конструкции. Модуль Юнга тоже хороший упругий материал. Коэф Пуассона особо не волнует. Материал не магнитный. Никаких моментов тяжения нет. Обрабатывается прилично. В Примечании написано токсичен и стоят три черточки минуса ---. Он очень токсичен. Газовый подшипник состоит из полусферы. Когда вращается ротор то по канавкам газ закачивается в зазор около 2 мкм образуется и газовая опора. Золотистый цвет у поверхности бериллия это нитрид титана. Хорошо используется в промышленности благодаря своей коррозионной стойкости а ещё он красивый. Используется вместо золота. Зубы, купола церквей. Конечно золото лучше смотрится, но тоже хороший. Прекрасные механические свойства и легкость. Что такое черненькое покрытие? Это графитоподобный алмаз. Алмазное покрытие, нанесенное на поверхность бериллия. Сначала бериллий покрыт нитридом

титана. Обладает очень большой твердостью и износостойкостью. В алмазе протравлены канавки, они защищены от напыления алмаза. Глубиной около нескольких мкм. Они служат как насос. Это работа технологов. Он химически пассивирован этот бериллий, поэтому можно брать в руки. Николая Алексеевич Пилюгин был фанатом бериллия. На столе стояла ручка, она имела корпус из бериллия. Когда к нему приходили какие-нибудь специалисты, он хвастался. Чем неприятен? Во-первых, это обработка в специальных цехах на обычных станках где стоят насосы. Спец одежда должна быть. Пылесборники специальные. Когда человек вдыхает пыль, порошок бериллия входит в хим реакцию с биологическими лёгкими. Процесс называется бериллезом легких, от чего человек умирает. С бериллием работают только на Селегире. На острове нет котельных. В поселке батареи не от котельных работают а электрически нагревается вода. Чтоб не было загрязнений. Фильтры заливали бетоном и погружали в шахты. А капроновые костюмы закопали в землю. Весной вода размывала овраг и костюмы оказались у соседей. Это всё чревато.

Бериллий отвратительный материал с точки зрения ядовитости, поэтому у нас на фирмах разрабатывались специальные сплавы которые бы были легкими а во вторых чтобы они были по темп коэф расшир близки к остальным сплавам близкими к 12. Был разработан материал АКП 1 = Алюминий + Кремний. Как делается? Берется алюминий, расплавляется и туда кидаются кусочки чистого кремния. Этот кремний растворяется в сплаве. Кремний коэф темп расшир разный но в диапазоне рабочих температур в районе 0,3-0,5. А у алюминия 23 гм на градус. Когда их друг с другом замешают, то темп коэф у алюминиевого сплава понижается. Надо, чтобы кремний примерно 40% состава составлял. Эксперимент: кусочек сахара кидать в воду и на седьмом где-то кусочке не растворяется. Тоже самое с кремнием. При каком-то содержании кремния эти кусочки перестают растворяться. Недоведенный до 40% имеет больший темп. Коэф, чем нужно.

## 6 октября. Семинар

Фотки все те же самые, что и на лекции. Было много деталюшек, но фоток нет, к сожалению.

На сколько важным является получение нового материала для гироскопических приборов? Пришлось один раз столкнуться с этим на фирме в Перми, там делались детали – маятник акселерометра, который должен был иметь большую плотность, делались из вольфрама. Деталюшка маленькая. Механики фрезеровали, точили, возни было очень много. В процессе изготовления на самой последней стадии вдруг открывался пузырь, язва в материале. Вся работа недельная, которая была потрачена при изготовлении, вся в брак получилась. Я привозил своего друга, он был директором института сверхпластичности материалов, он все эти процессы знал. Забрал эти деталюшки. Обрабатывались они на газостате. Все включения были выдавлены и никаких проблем с обработкой больше не возникало. Специальные обработки такие имеют важное значение. Дальше алюминиевые сплавы. В95 и Д16 Т дюр алюминий. Свойства: плотность 2,8 лёгкий материал, хотя и плавает в жидкости, но тем не менее это хорошо; прочность у бериллия 1,8, а у алюминия 2,8, а прочностные характеристики примерно те же самые 57 и 60. По отношению к прочности бериллий как хочешь бьёт алюминий в 2 раза почти. В95 более плотный и прочный. Температурный коэффициент расширения 57 ppm на градус больше, чем у стали. В сочетании со сталью не очень. Теплопроводность у алюминия хорошая. Сковородки, кастрюльки из него делают. Модуль упругости не очень, т.е. не упругий. Не магнитный материал. Предварительно обрабатывается. Материал стареет после обработки при выдержке форма и размеры могут меняться. Термообработки, конечно, позволяют несколько успокоить, но процессы старения имеются.

Теперь титановые сплавы. У нас их множество разработано. На западе есть просто титан, никаких сплавов специальных не делают. Плотность 4,5. Очень прочный – 95. Похуже, чем у Бериллия, но всё равно хороший. Коэффициент температурного расширения 8. Поменьше, чем у стали, это плохо. Значит, соединения получаются не очень хорошие и стабильные. Упругие свойства не очень хорошие. Не упругий материал. Теплопроводность 0,075. Очень маленькая. Кое-где это хорошо, кое-где плохо. Когда делают

термокамеры, где надо очень точно установить детали, то вводятся детали внутрь камеры и по ним тепло медленно вытекает, а вот конструктивные детали, по которым тепло может отводиться это хорошо. Малая теплопроводность – это плохо. Материал плохо проводит тепло. Упругие свойства не очень хорошие. Не магнитный материал. Плохо обрабатывается, потому что вязкий. Точение плохо производится. У титана есть особенность – сверхтекучесть. Это вообще свойство многих материалов, но у титана особенно хорошо проявляется. Заготовка исследование титана на растяжение. Тянут такую заготовку. Образуется шейка, которая рвётся. Удлинение при такой обработке процентов 8-10. Если удлинение порядка 20 – это замечательно. Тем лучше материал будет меньше подвержен внешним воздействиям. Будет меньше трескаться. Теперь если эту заготовку иметь в состоянии сверхтекучести, шейка будет другая. Это образец, который тянули растяжением одновременно крутили. Было сделано 24 полных оборотов. В состоянии сверхтекучести он обладает удивительными свойствами. Было 4 листа, которые были наложены друг на друга. Два листа были друг с другом сварены роликом. Он давал сварку потом, когда язва приходила на сварку, была не проваренная часть. Была пунктирная сварка. Проваривались по краю. Была диффузионная сварка. Через сосочек все эти листы помещались в печку между двух ограничителей при температуре 954 градуса внутрь листов подавался газообразный огонь. Огонь раздувал внутреннюю часть двух листов. Образовывались пузырьки титана. Он начинал течь. Причём эти пузырьки просто рассасывал. Крайние листы ложились на упоры, пузырьки продолжали раздуваться. Сначала овальной формы, потом превращались в прямоугольники, потому что стенка одного пузырька прижималась к стенке другого. Когда они соприкасались, образовывалась сварка. Следы этой сварки вертикальные. Видны дырочки, которые образовывались при сварке роликом. Дырочки в перегородочке от ролика. А наружная часть пузырька прижимается к стенке нижнего и верхнего листа и сваривается. Как бы мы не пытались найти место сварки травлением, не найдём. Это сплошной материал. Получаются громадные панели с внутренними перегородками. Прекрасные изоляторы звука, прочностные свойства. В сверхпроводящем состоянии необычные свойства такие.

Вообще некоторые свойства металлов после обработок специальных, они становятся совершенно неожиданными и непредсказуемыми. Вроде тоненькая проволочка. На самом деле тоненькая трубочка, внутри отверстие. Материал медь. Медь пластичный материал, можно на палец намотать. Ведёт себя как резина. Это не просто медь. Берут два листа титана, накладывают друг на друга, проваривают, через сосок подводят огонь. Раздувается шарик. Тот материал, который сварен, растекается. Найти место, где сварка была, невозможно. Это монокристаллическая медь. Были у меня очки из никерида титана. Это материал с упругими свойствами. Это титановая резина. Я был на фирме в Перми. Там они разбирали какой-то ГП из США. Безгистерезисно восстанавливается этот материал. Сломались эти очки там на третий раз. Пытались сварить, но не получилось. С другими очками не стал экспериментировать.

Стали бывают магнитные, немагнитные, ржавеющие и нет. Хорошо обрабатываемые и нет. ШХ-15. Делают шарики в подшипниках, кольца и т.д.

Теперь материалы КОВАР. Это материал, имеющий след.особенность. Уд.вес как у железа. Прочность ничего такая. Коэф.лин.тепл.расшир 4,5-5,5. Это вещь, которая обозначена +, потому что точно такой же имеет бор силикатное стекло. Все гермовыводы в приборах в них делается стерженек из КОВАРА, к которому подводится ток. Он залит стеклом. Дальше температуры меняются, размеры меняются как и у стекла, поэтому стекло не трещит. Раньше да и сейчас кое-где делают стеклянный корпус и штырьки из КОВАРА, не нарушающий герметичность. Хорошие магнитные свойства. Используют также часто в качестве магнитопровода. В КОВАР входит никель 22,9% и кобальт 18%, остальное железо.

Дальше ИНВАР с малым темп. Коэф. Лин. Расшир. Р36. Никель-железо. Никель 36%. Плотность как у железа, чуть тяжелее. Коэф.темпл.лин.расшир. 1,1 ppm на градус. В 10 раз меньше, чем у стали и у Бериллия. Это особенное свойство и очень хорошее, которое широко используется. Например, камины. Кварцевая трубка, внутри спираль раскалённая. Эту кварцевую трубку необходимо удерживать деталями из Инвара, которые не расширяется особо. Делается для всевозможных инструментов и деталей прецизионных, где требуется высокая стабильность деталей. Правда есть материал получше.

Называется супер инвар 32-НКД, 1032-НКУ и т.д. В Америке 32-5. 32% Никеля, 5 % кобальта. У этого материала ещё меньше темп.коэф.расшир. 0,55ppm на градус. Это такой же самый темп. Коэф. как и у Кварца. Кварц плавленный и у него точно такой же. У акселерометра куфлекс делался маятник из плавленного кварца методом травления, а затем он зажимался между двух магнитопроводов, которые делались из супер инвара, потому что температура меняется, а взаимных смещений двух деталей почти не образует. Высокая стабильность нулевого сигнала. Материал сложный. Сочетается с кварцем по темп.коэф.

Латунь. Свинец. Медь. Очень хороший конструкционный материал. Хорошая плотность и прочность. Темп.коэф.лин.расшир как у меди большой 21. Теплопроводность хорошая 1,05. Медь хорошо проводит тепло. Если сравнить с бериллием у него 1,46, поэтому медь уступает бериллию. Не магнитный материал. Отлично обрабатывается.

Вольфрамовые сплавы. Тяжёлый материал. Из него делаются роторы ГП. ВНЖ вольфрам никель железо. Уд.вес 17. В 2,5 раза тяжелее железа. Темп.лин.коэф.расшир. 5,3-5,6. Теплопроводность 50/50. Модуль Юнга маленький. Сплавы ВНЖ всё-таки обладают хоть и не большой, но магнитностью. Намагниченность есть небольшой. А есть материал ВНМ, где железо заменили на марганец, делают грузики, потому что вообще не магнитный материал. Образован методом из порошка короче, порошковой металлургией.

Теперь посмотрим на конструктивные материалы. Не очень хорошо отпечаталось. Там, где рунд – это корунд. Рубин, хорошо используется для камневых подшипников и др деталей. Твёрдые материалы. У корунда 5,4 коэф.темп.лин.расшир. Масса – это алмаз. Предел текучести очень высокий 530 в сравнении с металлами. У сталей 130, а тут 530. Твёрдость, он самый твёрдый, правда там есть ещё всякие боровские соединения. Упругий материал, у него 10. Плотность 3,5 гр на см в кубе, очень лёгкий. Теплопроводность 20. У бериллия 1,46, а здесь аж 20. Через алмаз тепло очень хорошо уходит. Из алмаза делаются инструменты для обработки и в качестве покрытия.



Кварц плавленный – это кварцевое стекло. Никаких кварцевых соединений нет. Предел текучести хороший. Твёрдость тоже достаточно хорошая, хотя в 10 раз меньше алмаза. Модуль Юнга 0,73 не очень хорошо, вернее не очень большой. Из него делаются маятники акселерометры. Из кварца сделаны 20 мкм балочки, на которые крепится язычок. Хороший модуль упругости? Вы знаете, хорошо, потому что эти балки обладают малой упругостью, когда деформируется, но не очень сильно сопротивляются изгибу

У кремния 1,9 модуль Юнга, в 4 раза больше. Это хорошо, но для используется в кварцевом акселерометре не очень хорошо. Мягкие материалы деформируется. Момент от этой деформации маленький. Сопротивление гораздо больше. Плотность 2,5-2,3. Теплопроводность у кремния 1,57 такая же как у бериллия лучше, чем у меди. У плавленного кварца никакая, 0,014. Это хорошо или плохо? Нельзя так сказать. Надо знать свойства. В тех же каминах спираль раскалённая до красна заделана в тумбочку из плавленного кварца и через неё тепло не уходит. Нагрев на конструкцию не подаётся, а тепло идёт. Кремний, наоборот, хороший, тепло хорошо отводится из элементов конструкции. Коэф.лин.расшир у плавленного кварца 0,55, очень низкий, который хорошо сочетается с супер инваром. То, что кварц мало расширяется – это хорошее свойство. Детали нагреваются, а детали из кварца не меняют размеры. У Кремния 2,33 при 20 градусов Цельсия. При -70 градусов 1,43. При 130 градусах составляет 3,05. При 400 – 6. Может очень сильно зависеть от температуры.

Вкратце рассказал о свойствах металлах. О всех не могу, потому что их очень много. Но у нас идут след. конструкционные материалы: золото. Например, проволочные потенциометры, каркасик, на него намотано чистое золото. Часть эмали счищена и получается потенциометр из золота, потому что оно не ржавеет и не окисляется. Он может безотказно работать десятилетиями. Для ракет СКАТ которая Россия продавала в Иран и Сирию в 50-е годы. Ко мне эти изделия попадали в 90-ых годах. Золотые потенциометры прекрасно сохраняли свои свойства. Щёточки были сделаны из платины, либо из платины в смеси с иридием. Кое-где были и дурные применения. Например, фирма НИИ прикладной механики Кузнецова, она использует платину для изготовления пост магнитов, потому что это магнитотвёрдый материал,

рассчитывали на стабильность этого материала. Чего только не делают и из чего только не делают самые неожиданные вещи.

Мы должны перейти к новому виду ДМ. Эти ДМ носят название электромагнитные датчики. Это кусок железа, дальше электромагниты на своих сердечниках находятся. Когда через электромагниты пропускают ток, начинает тянуть ротор или другие детали, которые сделаны из железа. Вот эти электромагнитные датчики были очень распространены в США. Американцы любили их и у них в гироскопии очень широко используются эти датчики. У нас эти датчики менее в ходу, потому что материал для датчиков су-пермаллой хуже, поэтому и свойства хуже. Но со временем американцы были вынуждены перейти тоже на магнитоэлектрические, потому что у них отсутствуют: особенность поддержания катушки, гистерезисные моменты, хорошая пропорциональность токов у них. В электромагнитных ДМ нелинейная характеристика и у них есть остаточный момент. Если гистерезисные не имеют остаточного момента, то электромагнитные имеют и с ними приходится считаться. Но однозначности нет. Как говорил Маудзидун 100 цветов пусть цветёт. В отношении электромагнитных датчиков вроде бы отказались от них. Сказали, что отжили они своё. У нас на кафедре учился студент по фамилии Близнец. Он пошёл на фирму МЦПАП, там изобрёл электромагнитный датчик, который не имел гистерезисных свойств. Датчик Близнеца. Есть разные конструктивные решения, технологические, которые иногда заставляют взглянуть на датчик под другим углом.

Американцы, когда увидели то, что сделали из титана, рты пораскрывали. В Уфе был очень хороший НИИ. Такие интересные там вещи были. Например, сваривали алюминий с керамикой. Поршни для двигателей танковых. Верхняя часть поршня из керамики, а нижняя из алюминия. Материал из керамики плавно переходит в алюминий. Мне удалось довольно много поехать с ним по разным выставкам. Я посмотрелся таких вещей интересных особенно иностранных. В России за 30 лет перестройки и после так упал технологический уровень, так упала технология. Совершенно не развивалось материаловедение. Я с такими большими глазами смотрел. Вот алюминиевые сплавы, обработка их давлением. После обработки давлением прочностные свойства спец обработанного раза в 1,5 больше, чем мы берём слиток алюминиевый, чем мы берём просто заготовку.

Технологов кошмар как мало. Хороших мало, потому что готовить их трудно. Нужны специалисты, которые умеют готовить. Всерьёз технологи такие возможности открывают, детали, узлы, процессы. Например, плавленый кварц для акселерометров. Был я в Германии в городе Хемлеце. В этом месте институт Фраунгофер. В нём обрабатывают кварц. Как? Делают его покрытие от травителя, опускают в травитель. Там он растворяется, а что-то остаётся. Берётся плавиковая кислота. Туда набирают молоденьких девушек, у которых мало что остаётся от зубов. Гадость ужасная наравне с бериллием. Взяли фемтосекундный (10: в минус 15 степени) лазер, у которого короткие импульсы среза. Они дают короткую вспышку и помещают внутрь кварца. Получается внутри точка. Видали, наверное, в продаже всякий кусок стекла а внутри красная площадь из точек или какой-нибудь спутник летает. Если в плавленном стекле формировать такие точки. Причём точки идут с перекрытием и формировать поверхность. Т.е. получается поверхность из точек микро точек кварца. В них кварц из плавленного состояния переходит в кристаллическое. Травится он не обыкновенной кислотой, а щёлочью. Заготовку с точками опускают в щелочь и он травит только кристаллическую часть, но не трогает плавленную часть. Травление идёт по щелям и вытаскивают деталь готовую. Какую форму умудрились засветить, такой формы и получается деталь. Пытаемся получить из этих деталей упругие элементы. Это хорошо для маятников, для рюмок, рюмочных ГП. Всё это требует специальных навыков и обработки. Требуется больших затрат времени. Узнать и время, и мощность, как перемещать. Помучавшись полгода, научимся.

## ЛЕКЦИЯ 13

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ МОМЕНТА

Датчик момента – проще говоря кусок железа и электромагнит, один притягивает другого. Происходит это за счёт появления момента, который втягивает кусочек железа в одну либо другую сторону.

Плюс таких ДМ:

Нет постоянного момента, то есть нет опасности потери намагниченности. Крутизна ДМ остается независимой и стабильной. За это свойство ДМ очень любили американцы :::))))).

Но имеется и недостаток: такие ДМ не обеспечивают линейную зависимость между управляющим моментом, который они создают и управляющим током. То есть сила взаимодействия пропорциональна квадрату тока. Но с этим можно бороться.

Так же, у нас имеется подвижный кусок железа. Он может притягиваться внешними магнитными полями, это недостаток.

Материал из которого сделан ротор датчика обладает гистерезисом, петля гистерезиса у него узкая, но есть. Поэтому будет остаточная намагниченность у ротора, которая будет взаимодействовать со статором и будет возникать момент тяжения. Маленький, но будет! И он будет возникать не только на постоянном токе, но и на переменном.

То есть электромагнитные датчики момента имеют остаточный момент, который зависит от истории эксплуатации этого ДМ...

В этом преимущество у магнито-электрических ДМ перед электромагнитными, у них нет этой остаточной намагниченности.

Америкосам нравятся эти ДМ тем, что у них стабильный масштабный коэффициент :D. Они не зависят от времени и от температуры. Они у них были распространены, потому что у них материалы лучше, и у них этот остаточный момент получался очень маленьким.

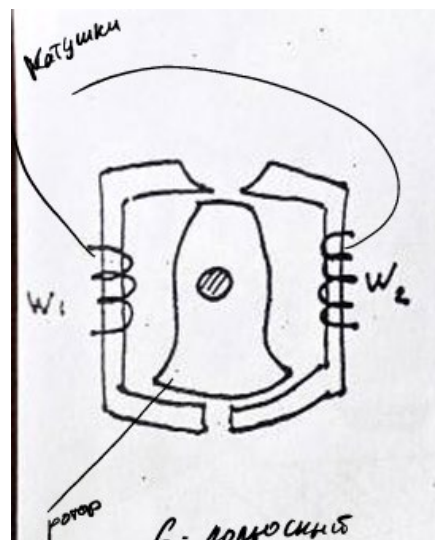
На листочке представлены разные конструкции ДМ, рассмотрим их:

Первый ДМ:

На кафедре у нас есть ЛР, в установке (в узлах стабилизатора) используются вот такие ДМ.

Ротор выполнен из магнитомягкого Материала (в целом там постоянные магниты не используются)

ДМ работает на переменном токе (так Обеспечивается меньший остаточный момент).



Используем шихтованные материалы для избегания токов Фуко (не нагревался).

Такой ДМ стоит на оси двухстепенного гироскопа и используется для коррекции, точной выставки гироплатформы и компенсации скорости вращения земли (маленький момент создают).

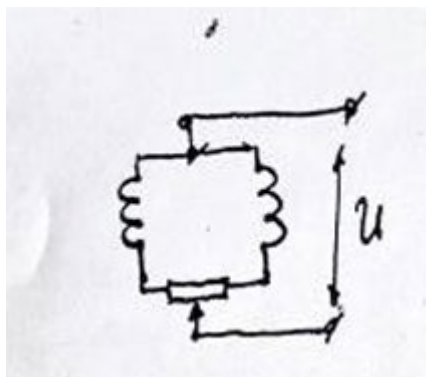
Также тут имеется два статора магнитомягких, тоже сделаны из пластиночек. На них размещены две обмотки. Форма ротора узенькая и расширяется внизу, там где имеется маленький зазор между двумя магнитными системами.

### Как управляется?

Дается ток либо в катушку  $W_1$ , тогда магнитный поток появляется и протекает по левому ротору, на широкой части ротора создает не очень интенсивное магнитное поле (поток делится на большую площадь, индукция в зазоре получается маленькая). А наверху имеется узенький подвод магнитного поля, но оно там достаточно сильное. Верхняя часть ротора втягивается в интенсивное магнитное поле и появляется момент, который разворачивает ротор против часовой стрелки.

Если ту же самую операцию мы проведем с правым статором, то магнитное поле тоже будет формироваться с маленькой индукцией внизу, и интенсивное магнитное поле сформируется в верхней части.

Тогда верхняя часть будет втягиваться в правый магнитопровод статора, и появится момент, который направлен по часовой стрелке.



Тут изображена мостовая схема обмоток  $W1$  и  $W2$ . Внизу потенциометр с подвижной щеточкой. Если щетка находится в середине с переменным сопротивлением, то ток протекающий по правой катушке и по левой катушке будет одинаковым, появится два электромагнитных момента, которые будут взаимно уравновешены. Если мы двигаем щеточку, то например ток левого сердечника станет больше правого и появится момент, тянущий

против часовой стрелки, в левую сторону. И соответственно наоборот.

Это устройство служит для задания на гироскопе момента, который компенсирует уход гироскопа и ГС при вращении Земли, например.

Довольно грубый датчик, нам его рассказали только потому, что он входит в состав прибора, входящего в конструкцию установки для ЛР.

Кроме как в этом автопилоте эти ДМ больше нигде не используются.

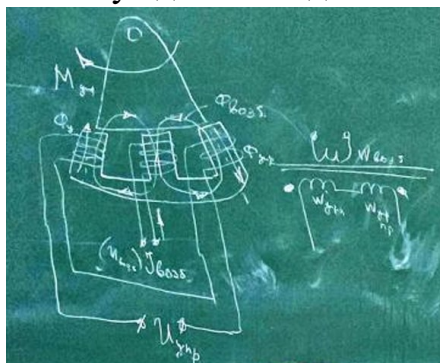
Теперь переходим к 6-полюсному ДМ.

Статор шихтованный из магнитомягкого материала, на каждый из полюсов надето по катушечке. Ротор нарисован: показано два широких полюса которые перекрывают три полюса у статора. На центральный полюс намотана обмотка.

Если бы мы использовали ток, протекающий только по боковым поверхностям, то получили бы полную аналогию верхнего (предыдущего ДМ).

Там момент зависит от квадрата тока. Значит чтобы сделать зависимость линейной используют два тока: ток возбуждения и ток управления.

Ток возбуждения создает магнитное поле и замыкается по вот такому пути:

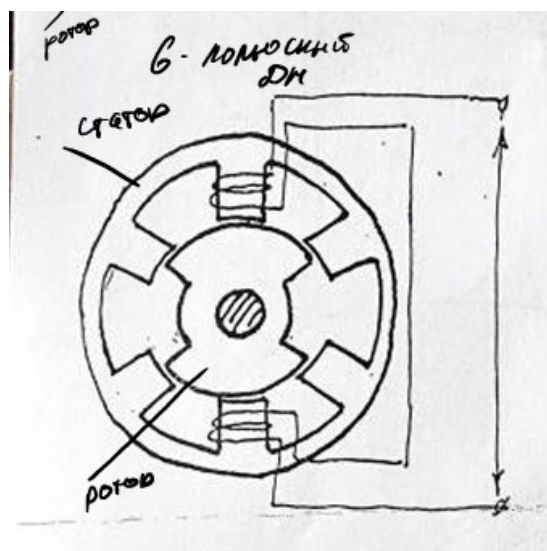


(см.картинку).

Поток возбуждения не создает момент!!!

Поскольку слева и справа одинаковая интенсивность и ротор тянется с одинаковой силой.

Суммарный момент равный нулю.



Чтобы управлять там расположены ещё две обмоточки.

То есть например левый поток суммарный будет большой, а правый суммарный будет маленький. Появляется момент, который будет тянуть по часовой стрелке.

Это если ДМ работает на постоянном токе!

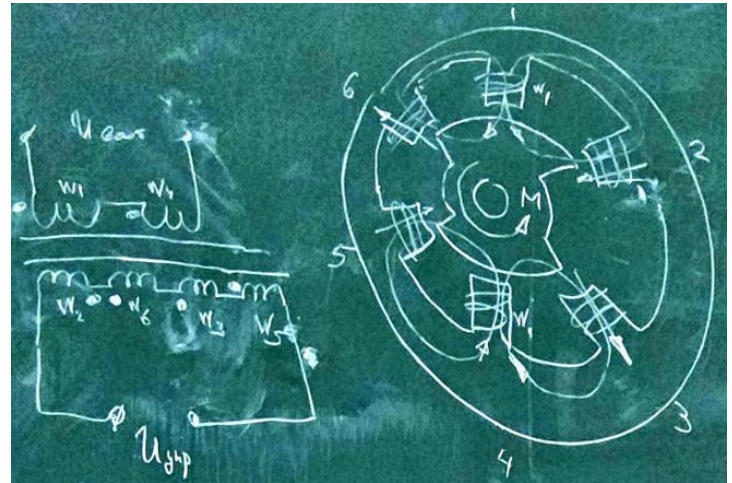
Если он работает на переменном, то там уже нужно думать о фазе. Когда потоки ( и упр. и возб.) совпадают по фазе, то картина та же самая.

Если фаза сдвинута на 180 градусов то момент появляется тот же самый, но в другую сторону.

Хороший и простой датчик, но у него есть недостатки:

Во-первых электромагнит будет тянуть ротор к себе, то есть создавать реакцию в опоре.

Во-вторых, этот датчик не делает различия между угловым и поступательным движением ротора.



То есть появился большой магнитный поток у левого полюса статора – он будет стремиться повернуть ротор и стянуть его в правую сторону, возникнет реакция в опоре.

Как этого избежать? Сделать дифференциальный датчик. Если делать два статора независимыми друг от друга, то это сложно...их надо точно крепить и выставить. Проще отштамповать сразу вот такой с 6-ю полюсами.

В этом случае и верхний и нижний полюса будут создавать моменты только для поворота, силы притяжения будут взаимно компенсироваться. Ну а боковое смещение будет компенсироваться за счёт того, что правильно включены обмотки. (лучше уточнить на консультации).

См.картинку

(начало катушек обозначается точкой).

W1 и W4 – катушки возбуждения. Все остальные – 4 катушечки управления.

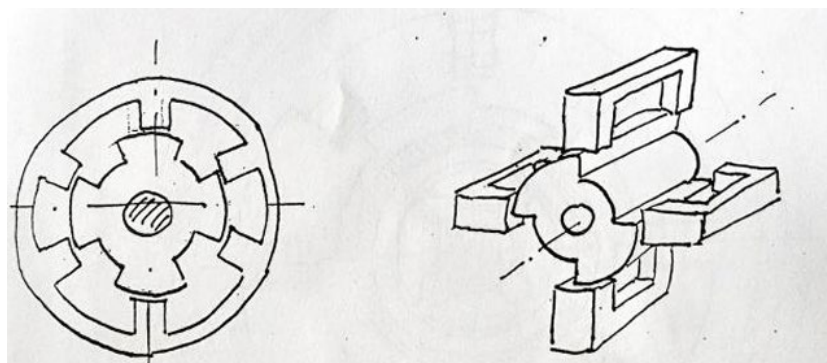
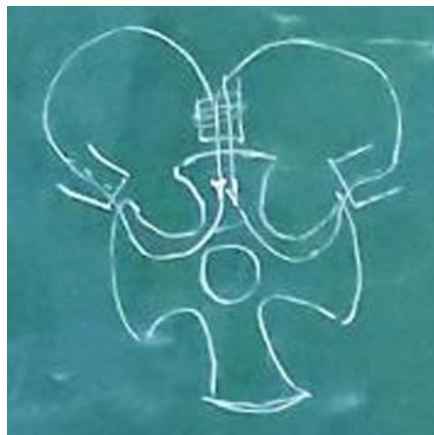
У 2 и 5 полюса потоки в разные стороны.

В 3 и в 6 полюсе – направлены в одну сторону. То есть они складываются.

(лучше уточнить на консультации).



Недостаток этого ДМ – вытянутый ротор. Если есть внешнее магнитное поле что этот кусочек будет стремиться установиться по силовым линиям внешнего магнитного поля. Это нехорошо, будет погрешность прибора. Избавиться от этого можно, если мы сделаем ротор не вытянутым, а в виде крестика....



Тут будет меньший момент тяжения. Делают 6-ти полюсные и 12-ти полюсные датчики.

6-ти полюсный – это два шарообразных датчика. А 12-ти полюсный – 4 шарообразных датчика. Чем больше полюсов – тем больше момент создается :D

Зазор между статором и ротором делается порядка 0.1 миллиметра... очень маленький зазор. Материал статора – пермаллой с узкой петлей гистерезиса.

Справа – микросин. (ДМ с 4 полюсами). Название плохое... В электротехнике микросины – это магнитные системы, у которых общее кольцо с торчащими полюсами. С точки зрения 6-полюсный ДМ это тоже микросин. Название просто «присохло» в гироскопии.

Что он собой представляет? Тоже магнитопровод из магнитномягкого материала, пластинки шихтованные, работают чаще всего на переменном токе.

Технология изготовления пластиночек достаточно сложная – берется тонкий прокатанный лист железа (пермаллой) 79% никеля и остальное железо. Толщина бывает разная... до 10 микрон делают.

Пластиночки вырубаются довольно точно. Во время вырубки край пластин получается слегка оторванным (заусенцы). Такие заусенцы допустимы, пластинки допускаются дополнительной обработке, например травлением. За счёт этого пластинка получается гладенькая. Если заусенцы не убрать, пластинки получатся замкнутые и там будут появляться токи Фуко.

Пермаллой обладает хорошими магнитными свойствами только после отжига.

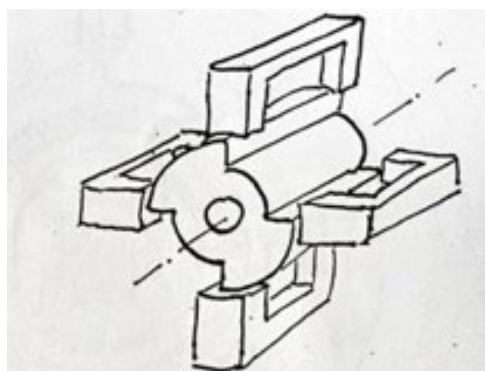
Если отжечь пермаллой 79 (тот что выше), то будет магнитная проницаемость доходит до сотен тысяч  $\mu$ . Но при механическом воздействии происходит резкий спад магнитных свойств. Это главная его особенность (пермаллой такой марки).

На каждый полюс в микросине наматываются 2 обмотки. Возбуждения и управления соответственно. Если в 6-ти полюсном была 1 полюс с обмоткой управления и 2 полюса с обмоткой возбуждения – то тут катушки на каждом полюсе и такие и такие. Через катушки возбуждения пропускают ток и катушки включены таким образом чтобы они создавали магнитное поле соответствующее как показано на рисунке. Полярность полюсов идет не N-S N-S, а N-N S-S, это принципиально важный момент. Только так можно получить хорошую управляемость.

Если нет управляющего тока, то момент даже при наличии тока возбуждения (магнитного поля) – момент будет равен нулю.

Почему вот такое подключение катушек возбуждения при котором полярности одинаковые не создает момента? **Момент появляется в том случае если меняется магнитная энергия у сердечника!!!**

Если поворот ротора приводит к изменению магнитной энергии запасенной сердечником, то обязательно появляется момент. Надо сделать такой ток возбуждения, при котором магнитное состояние статора не будет меняться.



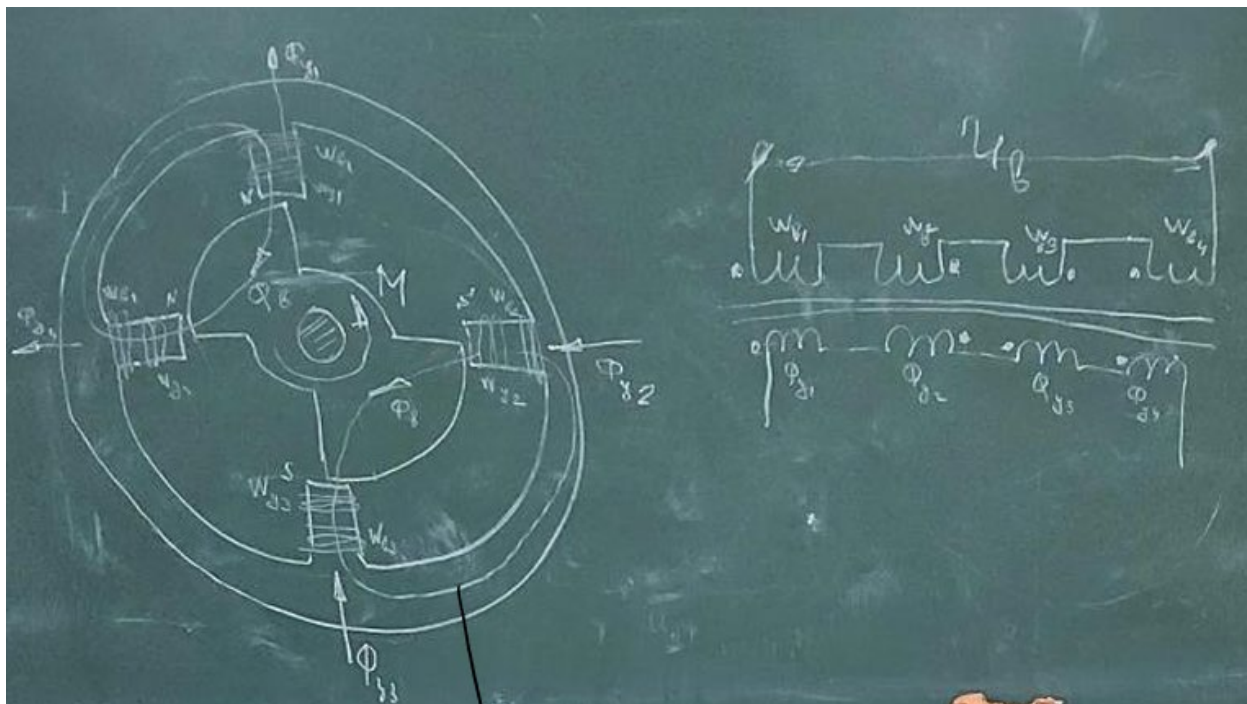
Допустим вот такое нулевое положение. Ротор по половиночке перекрывает полюса статора. Потоки во всех полюсах получаются одинаковые. Один поток в верхнем первом полюсе, справа второй, снизу третий и слева четвертый.

Н верхнего идет в правую сторону в S первый поток. И от N левого вниз идет второй поток. Поскольку все симметрично и все обмотки

возбуждения включены последовательно, то естественно потоки одинаковые. Начинаем поворачивать ротор, допустим на 90 градусов. Тогда левые и правые полюса не будут перекрыты вообще, а вот у верхних и нижних полюсов поток удвоится **(он наверное на 45 градусов имел ввиду)**.

Значит ротор поворачивается, а суммарные потоки остаются неизменными. Если бы мы взяли последовательности намагничивания N-S N-S, то при повороте ротора по часовой стрелке полюса статора установились бы напротив N-S. Поток сможет втекать, а вытекать ему некуда, то есть он будет меняться при повороте ротора (это основано на законе сохранения энергии). То есть магнитное поле будет меняться – появляется момент который будет взаимодействовать с ротором, система будет работать как магнитная пружинка. И это все без управляющего тока!!!

Для микросина чередование намагниченности полюсов должно идти N-N S-S, это очень важная особенность таких ДМ. Во всех других случаях будет появляться вредный момент даже без подачи управляющего тока.



4 катушки возбуждения и 4 катушки управления ( $W_{1234}$ ).

Мы подключаем так катушки именно для создания момента изображенного на картинке.

## Лекция 14

Двойной компланарный микросин получается не очень компактный.... но большой ДМ это не плохо, он создает большой момент при хороших условиях сборки.

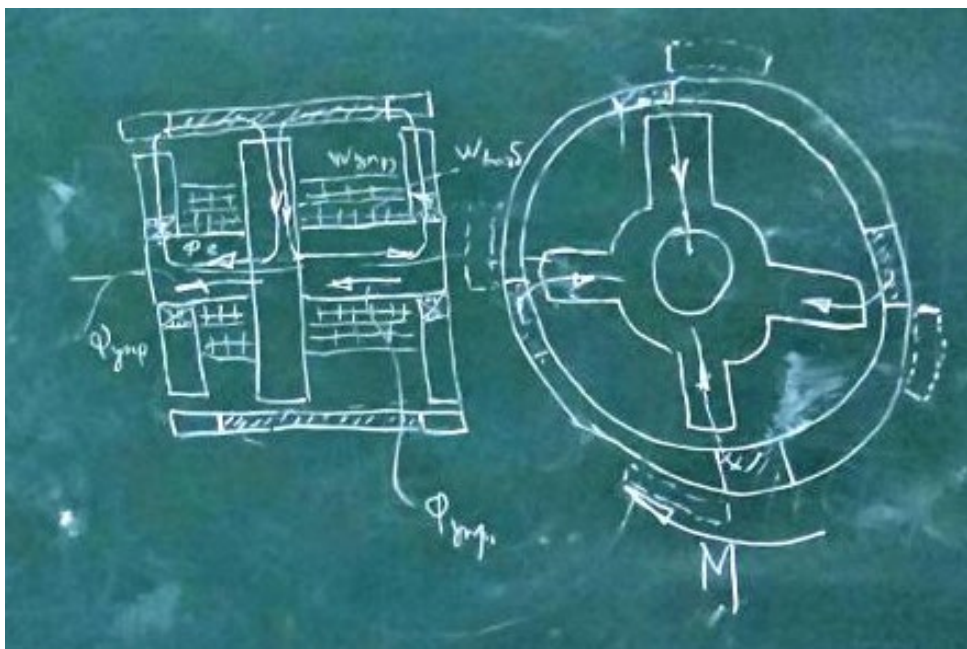
В целом нам рассказали уже про многополюсные датчики. Можно взять 3-ю часть Пельпора, там можно найти описание ДМ многополюсных у которых составляющие выполнены из феррита (или феррина, не услышала. это тяжелый материал) и магнитных подвесов. Большой момент в таких ДМ создает большой момент потому что через него протекает большой поток, это одно из его свойств.

Последние приборы с ЭМ датчками делали из апполония, а потом американцы перешли на М-Э датчики, им сейчас отдается большее предпочтение.

Один из выпускников нашей кафедры предложил свою схему ДМ, идея схемы показана на рисуночке, в изометрии нарисовано, прибор похож на микросин. Вместо статора кругового сделаны П-образные магнитопроводы, у которых южные полюса находятся сзади. Магнитный поток течет не по кругу, а проникает. Если нет кольцевых потоков - нет гистерезисных моментов.

Потом разработали ДМ, который нарисован внизу листочка, ротор показан с правой стороны - это тонкостенный цилиндр. Грань переднего полюса совпадает с такой же плоскостью заднего полюса. Верхние полюса - плоскость общей является, с правой стороны плоскость тоже общая, то есть 4 таких плоскости. И имеется статор - он содержит кольцо центральное и два стержня, на которое на концах надеты магнитопроводы, между ними намотаны обмотки две. Одна управления и другая возбуждения (справа и слева). При запитывании катушки возбуждения магнитный поток течет по центральному стержню, дальше он втекает в магнитопровод ротора и течет от переднего выступа к заднему, дальше переходит на крест задний, стекает по центральному стержню снова к центральному диску, входящему в состав прибора.





Штриховкой показано, что это шихтованный материал.

В основном выполнен из целого магнитомягкого материала. Ротор надевается на статор (тоже сплошным делается). Выступы ротора тоже важно изобразить, вторая его часть смещена. Как говорили уже, тут имеется две обмотки. Не очень ровно получилось нарисовать, но он симметричный.

Обмотка возбуждения запитана переменным током. Магнитный поток течет в одну сторону, потом по кресту и замыкается на центральном диске (изображено стрелочками).

Дальше собрался, течет по стержню центральному и на центральный диск.

Помимо этого имеется еще и вторая обмотка - управления. Если мы хотим управлять этим ротором (создать момент), то нужно чтобы выступы попали под полюс - то есть нужно усилить магнитный поток. Это передняя сторона картиночки, сзади эти выступы показаны пунктиром.

Значит если мы усилим поток с правой стороны, то он будет стремиться втянуть выступы расположенные сзади. Мы хотим получить "левый" момент, поэтому поток управления направляем как показано на картинке.

Поток с передней стороны магнитопровода становится большой, он втягивает 4 эти выступа под полюса, а стоящие сзади выступы находятся в слабом магнитном поле, и их уже не втягивает.

Конструкция не очень понятная, но в целом интересная. Тут например почти нет гистерезисного момента. Картиночка эта общая - типовая для гироскопии. Вначале появились ЭМ ДМ, а потом у них обнаружили эти остаточные моменты, поэтому от них отказались - стали делать М-Э ДМ. Надо очень аккуратно относиться к таким инженерным решениям....(рассказывали про то, что их вообще хотели запретить и убрать, но опять же повлияло то, что у них стабильный масштабный коэффициент).

Ну, теперь нам нужно научиться их рассчитывать.

Энергетический метод расчета электромагнитного момента

Механическая работа  $M d\beta = dE_M$  - изменение энергии магнитного поля.

$M = \frac{dE_M}{d\beta}$

Для П-образной:  $E_M = \int_{t_{i0}}^{t_{i0}} i e dt$ ;  $e = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\phi}{dt}$

$\phi = \frac{HC}{R_M}$ ;  $R_M = \text{const}$ ;  $e = -\frac{W^2}{R_M} \frac{di}{dt}$

$E_{Mn} = - \int_{t_{i0}}^{t_{i0}} i \frac{W^2}{R_M} \frac{di}{dt} dt = \frac{W^2}{R_M} \int_0^J i di = \frac{W^2 J^2}{2 R_M} = \frac{1}{2} (JW)^2 G_n$  или  $\frac{1}{2} (JW) \phi$

неверный подход:  $E_M = \sum_{n=1}^4 E_{Mn} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 (HC)^2 G_n$ ;  $M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 (HC)^2 \frac{dG_n}{d\beta}$

Пример: 1) Магнитная пружина

$M = \frac{1}{2} (JW)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (JW)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} + \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0$  (неверно!)

2) Микросип (при отсутствии тока управления)

$M = 0$  (верно!)

$G_1 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{\alpha}{2} + \tau \beta \right)$   
 $G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{\alpha}{2} - \tau \beta \right)$

$G_1 + G_2 = \frac{\mu_0 \ell \alpha}{\delta}$ ;  $\frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \cdot \frac{\alpha^2 - \tau^2 \beta^2}{\alpha}$

$\phi_1 = \phi_2 = \phi$

Как можно рассчитать ЭМ датчик? Надо найти поле магнитное, которое протекает в зазоре датчика вокруг ротора. Если поле нашли - значит нашли распределение магнитных линий магнитного поле. Если мы его



проинтегрируем по поверхности ротора - то найдем величину момента на него действующего. Задача непростая, тут задействованы урматы, этой математики нам практически не давали, ну или давали в самом сокращенном виде.

Но, есть метод расчета, который позволяет значительно упростить эти расчеты - энергетический метод. В чем его смысл: закон сохранения энергии. Механическая работа (элементарная) которая совершается моментом равна моменту на приращение угла (малое). Работа берется из изменения магнитного поля запасенного магнитной системой. То есть ЗСЭ будет иметь вид: момент \* элементарный угол = дифференциал от энергии магнитного поля. В этом случае, если мы найдем энергию магнитного поля, то момент это будет просто производная магнитного поля по углу бета.

## ВНИМАНИЕ НА КАРТИНКУ

Берем один из полюсов, наматываем на него обмотку  $W$  и рассматриваем электрическую схему. Обмотка подключена к источнику напряжения  $U$  и запитана током  $I$ , поток протекает по сердечнику, то есть была накоплена какая то магнитная энергия. Поставим в эту цепь переключатель, которая отключит обмотку от источника  $U$ . Когда мы это сделаем магнитное поле начнет уменьшаться - создастся ЭДС и она будет в течение некоторого времени будет поддерживать ток  $i$ , он будет понемногу затухать.

Энергия магнитного поля равна интегралу по времени от мощности этого процесса. Мощность это ток  $i$  умножить на ЭДС  $E$ . ЭДС будет наводиться в катушке при изменении магнитного потока, а ток  $i$  будет меняться. Интеграл будем брать от момента когда ток равнялся  $I$  до момента когда ток превращается в 0.

Чему равняется ЭДС наведенного в катушке? Мы знаем что ЭДС равняется минус производной от потокосцепления по времени. Обозначается как  $\psi$ .  $E = -d\psi / dt$ . Поскольку поток полностью протекает внутри катушки, весь поток сцеплен с витками, поэтому он постоянный и мы его можем вынести за скобки. Чему равняется поток? Равняется намагничивающей силе созд. катушкой деленной на сопротивление магнитной цепи. Сопротивление магнитной цепи будем считать постоянным.

Раз сопротивление постоянное можно ЭДС записать как  $W \cdot i$ .  $R$  - постоянная величина и остается  $di$  по  $dt$ .

Теперь будем считать энергию магнитного поля - это минус интеграл по времени. Интегрируем, получаем

$$E_{m_n} = - \int_{t_{in}}^{t_{out}} i \frac{W^2}{R_n} \frac{di}{dt} dt = \frac{W^2}{R_n} \int_0^I i di = \frac{W^2 I^2}{2 R_n} = \frac{1}{2} (W I)^2 G_n \text{ или } \frac{1}{2} (W I) \Phi$$

Дальше - мы нашли магнитную энергию, которая была запасена одним полюсом - а у нас их 4. Поэтому мы их суммируем все магнитные энергии всех 4 полюсов.

неверный подход:

$$E_m = \sum_{n=1}^4 E_{m_n} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 (H C)_n^2 G_n; \quad M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 (H C)_n^2 \frac{dG_n}{d\beta}$$

Но принцип суперпозиции тут использовать нельзя!!! поэтому мы можем получить только неверный результат.

Надо считать правильным образом. На картинке есть два примера: правильный и неправильный.

Первый пример: неправильный

Берем магнитную систему просто с одним током возбуждения, но включаем ее так, чтобы полюса чередовались N-S. Мы знаем что так нельзя, он будет работать как магнитная пружинка. У второго микросина возьмем чередование N-N S-S. И применим к ним одинаковые формулы.

Пример: 1) Магнитная пружина

$$M = \frac{1}{2} (W I)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (W I)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} + \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0 \text{ (неверно!)}$$

2) Микросин (при отсутствии тока управления)

$$M = 0 \text{ (верно!)}$$

$G_1 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} + z\beta \right)$   
 $G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} - z\beta \right)$   
 $G_1 + G_2 = \frac{\mu_0 a \ell}{\delta}$   
 $G_1 G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \cdot \frac{a^2 - z^2 \beta^2}{4}$   
 $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2$

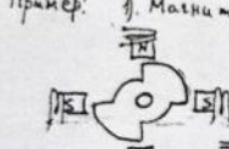
И в итоге получаем 0, но физически так не будет получаться. Почему мы уверены что это неверно?

Рассмотрим два примера. Сначала с правым. Повернем ротор на 90 градусов. Он установился напротив полюсов N и S. К нижнему полюсу течет двойной поток, а у горизонтальных полюсов потока вообще не будет. То есть мы повернули ротор, и магнитная энергия не изменилась. Поэтому производная будет равна 0 и момента действительно не будет.

А теперь то же самое с левым. Ротор при повороте на 90 градусов поток от одного северного полюса к другому северному не потечет, поэтому получается сильное изменение магнитного потока, 0 точно получиться не сможет.

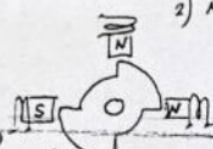
В общем, надо рассчитывать правильно магнитные цепи. Внизу написан правильный подход.

Пример: 1) Магнитная цепь



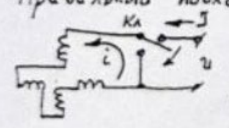
$$M = \frac{1}{2} (i\omega)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (i\omega)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} + \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0 \quad (\text{неверно!})$$

2) Микросип (при отсутствии тока управления)



$$M = 0 \quad (\text{верно!})$$

Правильный подход:



$$E_m = \int_{t=0}^{t=i\omega} i \omega dt$$

$$e = \sum_{n=1}^4 e_n = -\omega \sum_{n=1}^4 \frac{d\Phi_n}{dt}$$

Формулы для расчета M:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta} \quad \text{или}$$

$$M = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \Phi_n^2 \frac{dR_n}{d\beta}$$

Детальные расчеты для левого примера:

$$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$$

$$R_1 = R_3; R_2 = R_4$$

$$\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 = 2i\omega \\ \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 = 2i\omega \\ \Phi_1 - \Phi_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{2i\omega}{R_1 + R_2}; E_m = \int_{t=0}^{t=i\omega} i\omega \frac{d}{dt} \left( \frac{2i\omega}{R_1 + R_2} \right) dt = \frac{8\omega^2}{R_1 + R_2} \int_0^{\omega} i di = \frac{4\omega^2}{R_1 + R_2} = 4(\omega)^2 \frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right)$$

$$\frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) = -\mu_0 \frac{\ell}{\delta} \frac{2\tau^2}{\alpha^2} \beta; M = -8(\omega)^2 \frac{\mu_0 \ell}{\delta \alpha} \beta$$

Для левой системы: записываем уравнение Кирхгофа. В силу симметрии поток  $\Phi_1 = \Phi_3$ ,  $\Phi_2 = \Phi_4$ . Обходим один из контуров, получится удвоенная магнитная сила, и сила потоков в узле получится равная 0.

Дальше считаем чему равняется  $E$  магнитная - это интеграл от мощности. После интегрирования получили, что момент равен:

$$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$$

$$R_1 = R_3; R_2 = R_4$$

$$\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = 2i\omega \\ \Phi_1 - \Phi_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{2i\omega}{R_1 + R_2}; E_M = - \int_{-j}^{j} i\omega \frac{d}{d\beta} \left( \frac{2i\omega}{R_1 + R_2} \right) d\beta =$$

$$= \frac{8\omega^2}{R_1 + R_2} \int_{-j}^j i di = \frac{4j^2 \omega^2}{R_1 + R_2} = 4(j\omega)^2 \frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 + G_2}{\beta} \right)$$

$$\frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 + G_2}{\beta} \right) = -j\omega \cdot \frac{l}{\delta} \cdot 2 \frac{z^2}{a} \beta; M = -8(j\omega)^2 \frac{\mu_0 l z^2}{\delta a} \beta$$

Момент получился просто как минус К на угол бета (как будто пружинка).

Теперь то же самое делаем для правой:

Ну вот и в целом все.

$$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$$

$$R_1 = R_3; R_2 = R_4$$

$$\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 = 2i\omega \\ \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 = 2i\omega \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \frac{i\omega}{R_1}; \Phi_2 = \frac{i\omega}{R_2}$$

$$E_M = - \int_{-j}^{j} i\omega \frac{d}{d\beta} 2 \left( \frac{i\omega}{R_1} + \frac{i\omega}{R_2} \right) d\beta = (j\omega)^2 (G_1 + G_2)$$

$$M = (j\omega)^2 \frac{d}{d\beta} (G_1 + G_2) = 0$$


---

Формулы для расчета  $M$ :

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n^2}{G_n} \right) \frac{dG_n}{d\beta} \quad \text{или}$$

$$M = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \Phi_n^2 \frac{dR_n}{d\beta}$$

## Лекция 15

На прошлой лекции мы приступили к расчету ЭМ ДМ. Мы обсудили, как можно рассчитать момент, создаваемый ДМ. Надо посмотреть какое поле вокруг ротора, проинтегрировать его и получить как раз этот момент. Но такой метод с одной стороны правильный, но с другой стороны определить вот это распределение магнитного поля с учетом потоков рассеивания и всего прочего это очень сложно... *Это задача, которая не относится к нашим целям, нам надо побыстрее и попроще посчитать все это, а здесь эта задача решается методами, которые приняты в академических кругах.*

Нам это не нужно, у нас не так много времени))) Поэтому мы часто прибегаем к немного не то, что ненаучным.....непривычным методам. Это энергетический метод решения задачи по определению ДМ. Причем исходим из физического представления - засчет чего этот момент сформировался. Ясное дело что в ЭМ цепях появление сил определяется магнитной энергией, которая запаслась в магнитной системе этого датчика. Если эта энергия остается постоянной при каких-то эволюциях с ротором, то раз энергия не тратится - то и момента нет. Но если происходит поворот и энергия при этом тратится - то появляется механический момент. А работа механическая это произведение момента на элементарный угол поворота, и это изменение в мех. Работе соответствует дифференциалу от энергии магнитного поля. Довольно широко распространен и продуктивен такой принцип.

Мы в прошлый раз уже рассмотрели два метода подсчета энергии магнитного поля - правильный и неправильный.

Энергетический метод расчета электромагнитного момента

Механическая работа  $M d\beta = dE_m$  - изменение энергии магнитного поля

$M = \frac{dE_m}{d\beta}$

Элементарная работа  $E_m = \int_{t_1}^{t_2} i \Phi dt$ ;  $e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left( \frac{N^2 \mu_0}{2 R_m} i \right)$

$\Phi = \frac{N i}{R_m}$ ;  $R_m = \text{const}$ ;  $e = -\frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt}$

$E_m = - \int_{t_1}^{t_2} i \frac{N^2}{R_m} \frac{di}{dt} dt = -\frac{N^2}{R_m} \int_{t_1}^{t_2} i di = -\frac{N^2}{2 R_m} i^2$  или  $\frac{1}{2} (N i)^2 \Phi$

неверный подход:  $E_m = \sum_{n=1}^N E_{m_n} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (N i_n)^2 G_n$ ;  $M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (N i_n)^2 \frac{dG_n}{d\beta}$

Пример: 1) Матричный подход

$M = \frac{1}{2} (N i)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (N i)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} - \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0$  (неверно!)

2) Матрица (при отсутствии тока управления)

$M = 0$  (верно!)

$G_1 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} + r \beta \right)$ ;  $G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} - r \beta \right)$

$G_1 + G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} a$ ;  $G_1 - G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} 2 r \beta$

$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$



Пример: 1) Магнитная пружина

2) Микросист (при отсутствии тока управления)

$M = \frac{1}{2} (iW)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (iW)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} + \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0$  (неверно!)

$M = 0$  (верно!)

$G_1 = \frac{\mu_0 l}{\delta} \left( \frac{a}{2} + z\beta \right)$   
 $G_2 = \frac{\mu_0 l}{\delta} \left( \frac{a}{2} - z\beta \right)$

Правильный подход:  $t_{i=0}$   
 $E_M = \int i e dt$   
 $e = \sum_{n=1}^4 e_n = -W \sum_{n=1}^4 \frac{d\Phi_n}{dt}$

$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$   
 $R_1 = R_3; R_2 = R_4$   
 $\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 = 2iW \\ \Phi_1 - \Phi_2 = 0 \end{cases}$

$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{2iW}{R_1 + R_2}; E_M = \int_{t=0}^{t=iW} iW \frac{d}{dt} 4 \left( \frac{2iW}{R_1 + R_2} \right) dt = \frac{8W^2}{R_1 + R_2} \int_0^1 i di = \frac{4W^2}{R_1 + R_2} = 4(W)^2 \frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right)$

$\frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) = -\mu_0 \frac{l}{\delta} 2 \frac{z^2}{a} \beta; M = -8(W)^2 \frac{\mu_0 l}{\delta a} z^2 \beta$

$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$   
 $R_1 = R_3; R_2 = R_4$   
 $\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 = 2iW \\ \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 = 2iW \end{cases}$

$\Phi_1 = \frac{iW}{R_1}; \Phi_2 = \frac{iW}{R_2}$   
 $E_M = - \int_{t=0}^{t=iW} iW \frac{d}{dt} 2 \left( \frac{iW}{R_1} + \frac{iW}{R_2} \right) dt = (iW)^2 (G_1 + G_2)$   
 $M = (iW)^2 \frac{d}{d\beta} (G_1 + G_2) = 0$

Формулы для расчета M:  
 $M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta}$  или  
 $M = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \Phi_n^2 \frac{dR_n}{d\beta}$

Магнитная система работает примерно как конденсатор. Чему равняется энергия магнитного поля? Энергия это будет интеграл от мощности запасенной магнитной системой по времени, пока не произойдет полная разрядка. Мощность это ток текущий в обмотке умноженный на ЭДС которая навелась в этой обмотке. Момент времени от ток = I до момента времени, когда ток станет равный 0. Затем выбираем режим работы магнитной системы: какой? В магнитной системе нет насыщения, следовательно сопротивление у нас постоянно. Если мы берем производную, то с R можно обращаться как с постоянной величиной. Затем....магнитная проницаемость железа у нас очень высокая, пермаллой могут иметь в районе 100-200 тысяч, по сравнению с воздухом (равно 1), то есть в тысячи раз больше. Мы очень с очень большой степенью достоверности говорить, что вокруг этого железа магнитного поля почти нет, мы пренебрегаем потоком по воздуху, то есть весь поток течет по полюсу, то есть внутри катушки W. Потокосцепление это количество витков умноженное на ток.

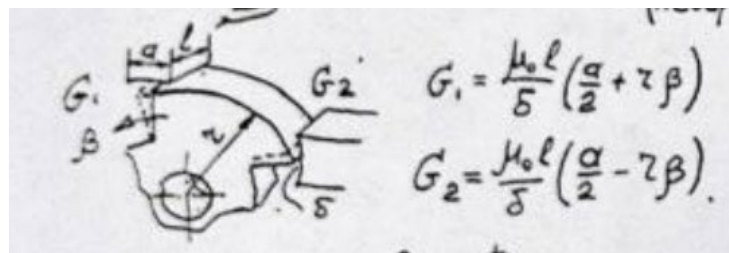
Так как потокосцепление это  $W \cdot \Phi$  мы можем W вынести за знак производной.

Ну и далее мы можем получить энергию от магнита. Мы меняем пределы интегрирования вместо  $I - 0$ , делаем  $0 - I$ , то есть знак поменялся. После интегрирования получаем  $1/2 W^2 * G_m$ . Тут все было правильно, а дальше начались ФОКУСЫ. Решили просуммировать результат для 4 полюсов, но тут применяется метод суперпозиции, то есть просуммировали энергии не обращая внимания на то, что энергии полюсов друг с другом связаны. ТАК ДЕЛАТЬ НЕЛЬЗЯ.

*Вот такой подход много где встречался, там энергия определялась как сумма, и момент так же. Это подход неверный, но чудеса заключались в том, что иногда этот подход давал верный результат!*

Первый вариант это микросин, у которого чередование полюсов N-S. Тут мы будем пользоваться формулами для расчета проводимостей самыми простыми, не будем усложнять. Мы уже рассматривали как надо рассчитывать магнитные проводимости. При малых случаях можно считать проводимости как отношение площади зазора перекрытой магнитопроводом к величине зазора.

На это дает хороший результат при малых величинах зазора, при больших толщинах зазора там будут заумные длинные формулы. Но мы будем обращаться к



самому простому случаю. Мы берем  $G_1$ , он перекрывает половину зазора, тогда у него будет проводимость (см. картинку)

Но если ротор поворачивается, например против часовой стрелки, то величина перекрытия увеличивается на величину  $r\beta$ . Вот значит, мы когда учтем это, то получим сразу и вторую формулу для другого полюса. Подставляем значение

Вот тут ошибка:

Перед скобкой не хватает значка суммы от  $n=1$  до 4.

$$M = \frac{1}{2} (I\omega)^2 \frac{dG_n}{d\beta} =$$

$G$  подставляем в эту формулу.

И получаем 0, что не является верным.

Мы обсудили только что, что энергия при повороте ротора не должна меняться, если мы не имеем момента, то значит и энергия не меняется.

$$M = \frac{1}{2} (I\omega)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} (I\omega)^2 \left( \frac{dG_1}{d\beta} + \frac{dG_2}{d\beta} \right) = 0 \quad (\text{неверно!})$$



Если мы условно повернем ротор на 45 градусов против часовой стрелки, то получим ситуацию, в которой будут перекрыты верхний и нижний полюс полностью, а с правой и с левой стороны магнитный поток просто не пойдет из-за большого воздушного зазора. Значит ротор выставился вертикально, снизу и сверху магнитный поток в него может втекать, а вытекать ему некуда..... следовательно магнитный поток у нас прервался. Ну и ясное дело, что магнитная энергия в этой системе изменилась....а расчет показал ноль.

Теперь то же самое: мы берем классический микросин, когда полярности чередуются N-N S-S. Первое состояние такое же, какое и было. И мы разместили ротор вертикально, тогда у нас два горизонтальных полюса не перекрыты, но с вертикального полюса: он был наполовину перекрыт, а теперь стал перекрыт полностью. Значит протекает двойной магнитный поток, и двойной вытекает через нижний полюс. То есть был суммарный магнитный поток до поворота ротора....и он точно таким же и остался после поворота ротора, то есть производная равна нулю.

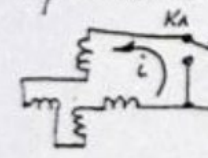
В общем, главная рекомендация: правильно определять магнитную энергию. У каждой катушки будет своя энергия.

И в прошлый раз мы говорили, что вот эта система будет себя вести как магнитная пружинка:

Ротор отклоняется и система его сразу пытается вернуть обратно в нулевое положение.

Не всегда надо возвращаться к этим расчетам...на самом деле точные расчеты..они всегда требуют определения истинных значений потоков.

Правильный подход:  $t_{i=0}$



$$E_M = \int i e dt$$

$$e = \sum_{n=1}^4 e_n = -\omega \sum_{n=1}^4 \frac{d\Phi_n}{dt}$$

$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$   
 $R_1 = R_3; R_2 = R_4$   
 $\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = 2i\omega \\ \Phi_1 - \Phi_2 = 0 \end{cases}$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{2i\omega}{R_1 + R_2}; E_M = -\int_{t_{i=0}}^{t_{i=\pi}} i \omega \frac{d}{dt} 4 \left( \frac{2i\omega}{R_1 + R_2} \right) dt =$$

$$= \frac{8\omega^2}{R_1 + R_2} \int_0^\pi i di = \frac{4i^2\omega^2}{R_1 + R_2} = 4(\beta\omega)^2 \frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right)$$

$$\frac{d}{d\beta} \left( \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) = -M \cdot \frac{\ell}{\delta} \cdot 2 \frac{\gamma^2}{\alpha} \beta; M = -8(i\omega)^2 \frac{\mu_0 \ell \gamma^2}{\delta \alpha} \beta$$

Формулы для расчета M:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta} \quad \text{или}$$

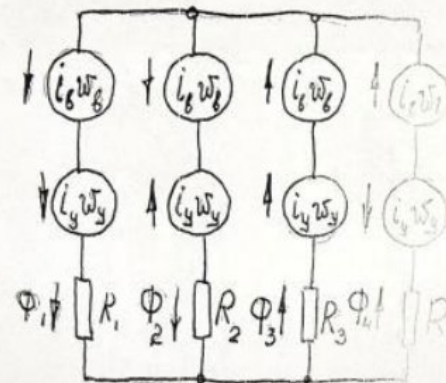
$$M = -\frac{i}{2} \sum_{n=1}^4 \Phi_n^2 \frac{dR_n}{d\beta}$$

Можно пользоваться этими формулами, не опасаясь получить неверный результат.

## Микросин

На каждом полюсе микросина имеется по две обмотки...одна обмотка возбуждения и вторая обмотка управления. Мы когда рассматривали принцип действия микросина, предположили что у нас имеется такой ток возбуждения, который создает магнитные потоки, чередующиеся через полюс. В первом полюсе у намагничивающей силы стрелочка направлена вниз, и у второй ветви стрелочка магнитного поля тоже направлена вниз. Это N-N. Для других стрелочки вверх - это S-полюса.

*Расчет момента микросина.*



*Условие симметрии*  
 $\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$   
 $R_1 = R_3; R_2 = R_4$

$$\begin{cases} 2(i_g w_g + i_y w_y) = \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 \\ 2(i_g w_g - i_y w_y) = \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \Phi_3 = \frac{i_g w_g + i_y w_y}{R_1}; \quad \Phi_2 = \Phi_4 = \frac{i_g w_g - i_y w_y}{R_2}$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} \left[ (i_g w_g + i_y w_y)^2 \frac{d}{d\beta} G_1 + (i_g w_g - i_y w_y)^2 \frac{d}{d\beta} G_2 \right]$$

$\frac{d\beta}{d\beta} \cdot \frac{d}{d\beta} G_1 = \frac{M_0 l}{\delta} z; \quad \frac{d}{d\beta} G_2 = -\frac{M_0 l}{\delta} z. \quad \left( \text{При больших } \beta \text{ есть влияние потоков рассеяния} \right)$

$$G_1 = \frac{M_0 l}{\delta} \left( \frac{a}{2} + z\beta + q\beta^2 \right)$$

$$G_2 = \frac{M_0 l}{\delta} \left( \frac{a}{2} - z\beta + q\beta^2 \right)$$

$$M = +4 i_g i_y w_g w_y \frac{M_0 l}{\delta} z; \quad (1)$$

*Вариант - микросин с...*

То есть первым делом мы определили направление магнитных сил от тока возбуждения

Теперь мы хотим, чтобы эта магнитная система создавала момент. Мы создаем управляющий ток таким образом, чтобы намагничивающая сила первого полюса совпадала с намагничивающей силой возбуждения, то есть большой поток будет под первым полюсом.

А во втором полюсе мы вычитаем из возбуждения управление, поэтому там поток получается маленький.

В третьем полюсе они опять будут совпадать (в нижнем), а в четвертом направлены в разные стороны.

То есть физически мы знаем, что у нас будет появляться момент, который будет поворачивать ротор в вертикальное положение между 1 и 3 полюсом (там большой поток). А у 2 и 4 потоки маленькие.

Ну и дальше, в каждой цепи имеется по сопротивлению, причем с этими сопротивлениями тоже в разных учебниках имеются разные неприятности.

Дальше составляем уравнения Кирхгофа. Поток первого и третьего полюсов в силу симметрии одинаков, второго и четвертого тоже одинаков.

В первой цепи вниз идет поток, и потом второй полюс мы пропускаем, берем дорожку 3 полюса. Тут стрелочки в одну сторону направлены, то есть намагничивающие силы будут удвоены, и они равны падению магнитных напряжений.

У четных полюсов будет разница намагничивающих сил, здесь токи возбуждения одинаково направлены, а токи возбуждения отрицательно.

Условие симметрии

$$\Phi_1 = \Phi_3; \Phi_2 = \Phi_4$$

$$R_1 = R_3; R_2 = R_4$$

$$\begin{cases} 2(i_r w_r + i_y w_y) = \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 \\ 2(i_r w_r - i_y w_y) = \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \Phi_3 = \frac{i_r w_r + i_y w_y}{R_1}; \Phi_2 = \Phi_4 = \frac{i_r w_r - i_y w_y}{R_2}$$

Решаем систему и получаем:

Теперь можно посчитать момент, мы будем пользоваться формулами из уголка предыдущего листочка.

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left( \frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} \left[ (i_r w_r + i_y w_y)^2 \frac{d}{d\beta} G_1 + (i_r w_r - i_y w_y)^2 \frac{d}{d\beta} G_2 \right]$$

Примечание:  $1/R_1 = G_1$

Угол бета мал, поэтому будем считать, что проводимость это будет площадь перекрытого полюса деленая на зазор и умноженная на мю нулевое. Но это только для малых значений угла бета!!

При больших углах мы такой подход использовать не сможем, там будет сказываться рассеивание магнитного поля, все эти кучи нелинейностей нужно было бы раскладывать в ряд тейлора по степеням бета.

Handwritten notes showing the derivation of magnetic conductance  $G$  and torque  $M$  for a small angle  $\beta$ .

For small  $\beta$ ,  $\frac{d}{d\beta} G_1 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} z$ ;  $\frac{d}{d\beta} G_2 = -\frac{\mu_0 \ell}{\delta} z$ . (При больших  $\beta$  есть влияние потоков рассеяния)

$G_1 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} + z\beta + q\beta^2 \right)$   
 $G_2 = \frac{\mu_0 \ell}{\delta} \left( \frac{a}{2} - z\beta + q\beta^2 \right)$

$M = +4 i_x i_y w_z \cdot w_y \frac{\mu_0 \ell}{\delta} z$  (1)

Вариант - микро...

Обратить внимание: момент получился с плюсом, тк у нас большой поток под первым полюсом, значит ротор будет втягиваться против часовой стрелки под первый полюс.

Запомнить: ток возбуждения дают для того, чтобы у нас появилась линейная зависимость момента от тока управления.

И теперь рассмотрим случай, когда у нас на каждом полюсе не две катушки, а одна катушка. Его очень просто получить этот случай из предыдущего:

Вариант - микро синхронный двигатель с одной обмоткой  $w$  на каждом полюсе.

Ток  $J$  либо в обмотках полюсов 1, 3, либо в обмотках полюсов 2, 4.

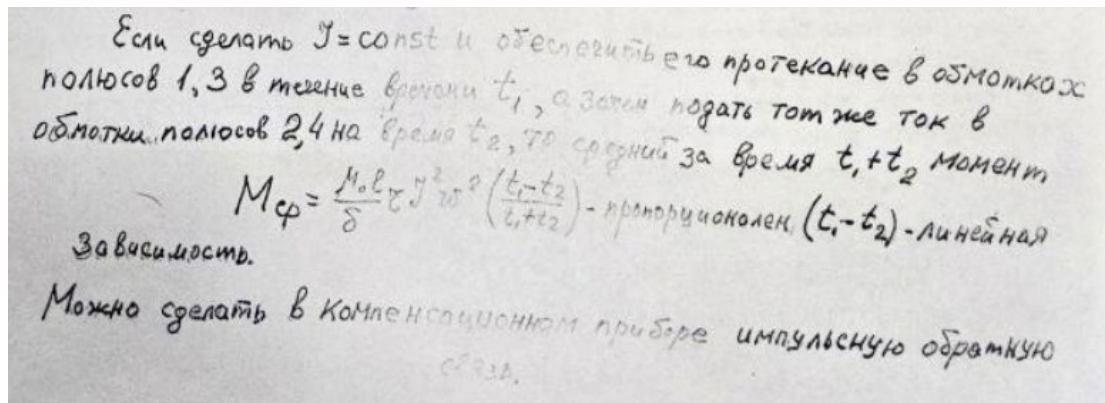
Положим  $w_3 = w_1 = \frac{w}{2}$ ;  $i_3 = i_1 = J$  ( $HC_{1,3} = Jw$ ;  $HC_{2,4} = 0$ )

Мы подставим в формулу и получим:

из (1):  $M = J^2 w^2 \frac{\mu_0 \ell}{\delta} z$  - нелинейная зависимость  $M$  от тока  $J$ .

То есть мы получили НЕЛИНЕЙНУЮ зависимость момента от тока. Зачем такой вариант рассчитывать? Ради интереса) Можно ли избавиться от нелинейной зависимости от тока, когда у нас на каждом полюсе по одной катушке?





Ну...если ток меняется, то нельзя. А вот если сделать ток постоянным...то можно)

Для этого мы должны этот ток сделать постоянным и пропускать его через катушки либо на вертикальных полюсах, либо на горизонтальных полюсах, то есть когда мы дадим ток в вертикальные полюса, то возникнет момент постоянный, и этот момент будет стремиться повернуть ротор вертикально между 1 и 3 полюсом, а затем если дать ток только в горизонтальные обмотки, то появиться отрицательный момент, он будет втягивать ротор в горизонтальное положение. Значит если мы будем регулировать время подключения одной пары обмоток и время включения другой (то есть одновременно на секунду включим и те и те), то момент средний будет равен 0. А если мы подольше подержим в 1 и 3 полюсах и покороче у 2 и 4 то появится М, который будет пропорционален разности времен протекания тока через обмотки. Средний момент будет равен (см.картинку).

Случай очень интересный, момент получается пропорциональный времени. Нам это дает возможность сделать импульсную обратную связь в приборе. Зачем? Эта ОС позволяет преобразовать аналоговый сигнал в аналоговое напряжение. Мы обычно снимаем напряжение с эталонного сопротивления, это напряжение пропорционально входному воздействию.

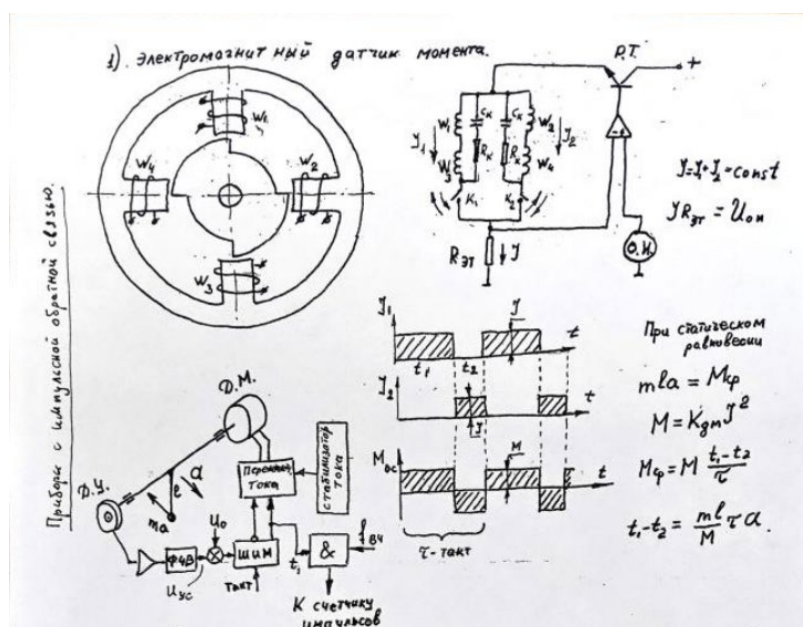
Но сейчас все управление осуществляется в цифровом виде, поэтому нам надо бы получить вот этот выходной сигнал прибора в виде цифры. Вообще говоря для этого существуют специальные цифровые акселерометры, которые вырабатывают цифру, но они не очень точные. Простые маленькие, но неточные. А вот компенсационные приборы - особо точные  $10^{-4}$  % точность (ого). Хорошо бы мерить управление этим прибором...но в то же время хорошо бы выходной сигнал снимать не аналоговый, а цифровой. Что для этого можно сделать? Можно поставить преобразователь напряжения.

Есть преобразователь напряжения, довольно точный. Но тоже точность ограничена: например мы подключили к эталонному сопротивлению провода медные, то есть два медных провода припаяли к точкам, где сопротивление эталонное. В этих точках образуется контактная ЭДС. Они будут создавать ошибки, небольшие, но они будут влиять. Гораздо точнее ведут себя приборы, в которых ток измеряется. Не падение напряжения с эталонного сопротивления, а именно ток! Тогда можно получить цифры гораздо точнее.

Так вот....как можно сделать цифровой выход прибора, если мы будем использовать датчик момента типа микросин и в этом микросине будем использовать две катушки.

Катушки W1 и W3 соединим последовательно, на наличие сопротивления пока что внимания не обращаем. Дальше

электронный ключ K1, который включается на время  $t_1$  и формирует протекание тока через катушки 1 и 3. Это так называемый ток  $i_1$ . А потом этот ключ выключается и включается ключ K2, тогда ток  $i_2$  потечет через катушки 2 и 4. Схема изменения тока дана временной диаграммой.



То есть мы получаем момент, пропорциональный квадрату тока. А ток  $i_1$  и  $i_2$  делаются одинаковыми, тогда получается момент обратной связи пропорциональный квадрату тока остается постоянным и этот момент ОС на ротор действует время  $t_1$  в одну сторону, а время  $t_2$  в другую сторону.

Нужно обратить внимание: такой способ управления носит название широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Очень распространенный метод управления в различных системах. Мы формируем 2 момента, первый момент положительный, он протекает в течение времени  $t_1$ , второй момент точно такой же, он приложен к ротору в течение времени  $t_2$ . А в сумме  $t_1 + t_2$  выдерживается постоянной величиной. Время называется такт. И этот такт равен этой сумме.

Ну и дальше идет повтор. К чему это приведет? Внизу нарисована схемка прибора (на примере маятниково акселерометра рассматриваем).

Масса груза  $m$ , плечо  $l$ . Сила пропорциональна измеряемому ускорению  $a$ .

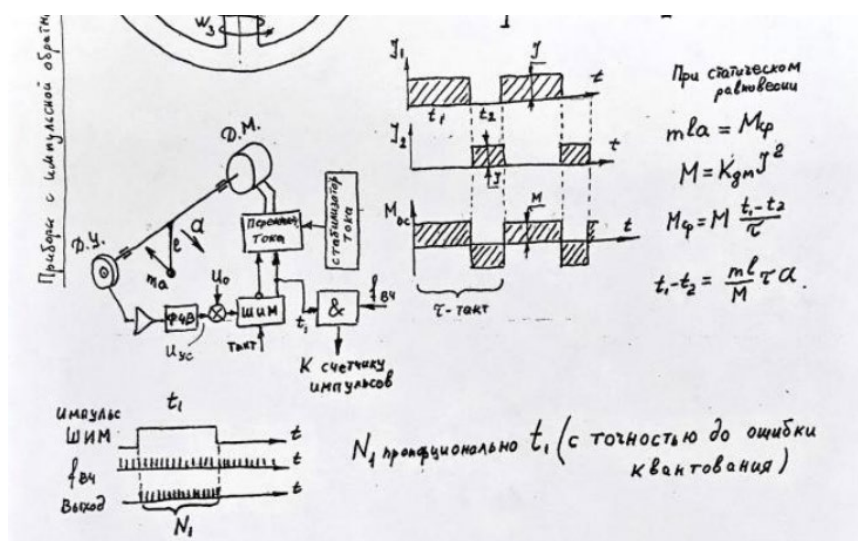
Сила  $ma \cdot l$  даст

момент  $Mla$  - это момент на входе компенсационного датчика. Он на то и называется компенсационным, что он должен развить момент, который в точности равен входному моменту. Если маятник неподвижен, то оба момента одинаковые. Если один из моментов получится не равный другому, то маятник начнет отклоняться, до тех пор, пока моменты не уравновесят друг друга.

Величина момента постоянна, тк это произведение крутизны на ток, а ток нужно держать постоянным (это отдельный разговор). А средний момент равен моменту  $M \cdot (t_1 - t_2) / (t_1 + t_2)$ . (см. картинку).

Приравниваем их и получаем, что разность времен  $t_1 - t_2$  строго пропорциональна ускорению. То есть для того, чтобы превратить выходной сигнал акселерометра в цифру достаточно померить  $t_1$  или  $t_2$ . (не имеет значения, тк их сумма постоянная). Как это измерение осуществляется? Смотрим на временную диаграмму, импульс  $t_1$  подается на схему совпадения. Схема совпадения это схема &. Схема & имеет два входа, если на обоих входах имеется 1, то появляется 1 на выходе. Если хотя бы на один вход подается 0 (не подается импульс) - на выходе 0.

Делают эту схему совпадения. На один из входов подается импульс  $t_1$ , который пропорционален ускорению, а на другой вход подаются высокочастотные импульсы (кварцевые генераторы). Тогда те высокочастотные импульсы, которые попали во временную область  $t_1$  (а  $t_1$  это разрешающий сигнал для прохождения высокочастотных импульсов.) Значит пройдут только те импульсы, которые попадут во временную область  $t_1$ . Получилась пачка  $N_1$ . Число импульсов в

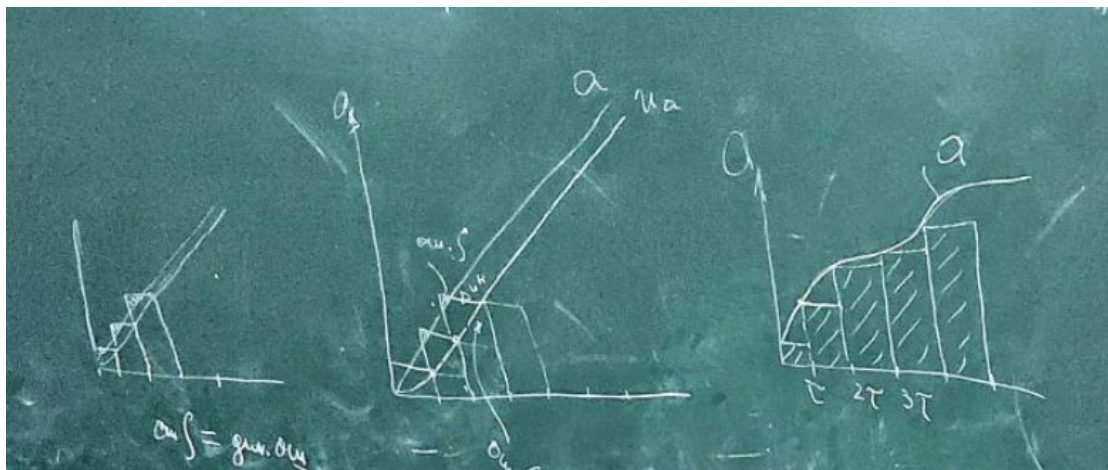




этой пачке - пропорционально измеряемому ускорению (ну или приращению скорости за период  $\tau$ ).

Считаем что ускорение было постоянным за короткий промежуток времени (самый большой промежуток времени это 0,001 с). И тогда если это постоянное ускорение, то  $N$  будет пропорциональна интегралу этого ускорения.

Суммируя  $N_1$  мы осуществляем интегрирование входного сигнала по методу прямоугольников.



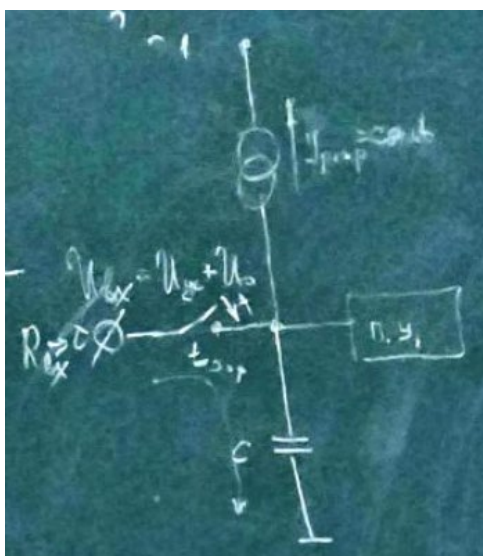
Динамическая ошибка зависит от параметров прибора, в частности от коэффициента усиления.

Вот здесь мы считали, что ускорение постоянно на все участке полёта, но это просто нам так хочется (хотя это не совсем верно). Попробуем отнестись к графику по другому, теперь это будет ускорение постоянное, которое соответствует предыдущему такту (мы имеем право предположить что угодно). Мы будем получать дополнительную ошибку интегрирования (дин. Ошибка Отрицательная, а ошибка инт. Положительная.). см. картинку слева

Ошибка интегрирования будет при определенном коэффициенте равна динамической ошибке. То есть надо просто выбрать коэффициент усиления правильно, тогда ошибка интегрирования и динамическая будут друг друга компенсировать. Это вот небольшая особенность импульсных систем.

Дальше по схеме посмотрим, что входит в схему. Сигнал с датчика угла поступает на усилитель, дальше фазочувствительный выпрямитель, дальше берется некоторое нулевое напряжение, которое подается на вход ШИМ.

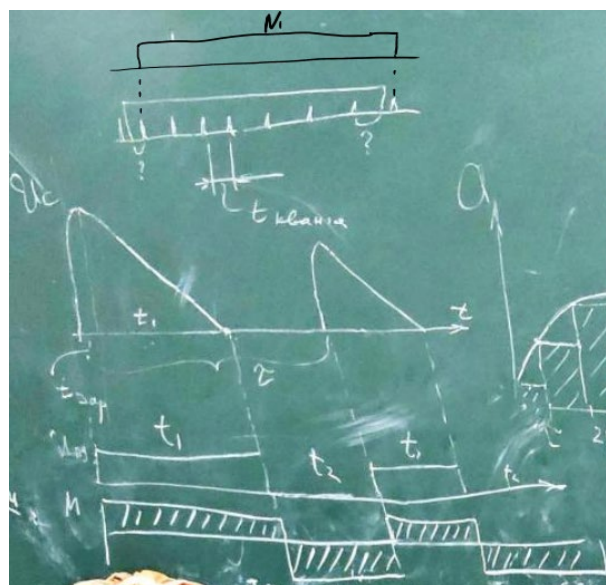
Дальше напряжение поступает на пороговое устройство. ПУ может быть например триггером Шмитта. Ну, то есть мы имеем тактовый период. Вначале мы замыкаем вот этот ключ на  $t$  заряда, а потом мы его выключаем. Тогда ёмкость заряжается, причём  $R_{вх}$  маленькое (заряжаться будет быстро, по экспоненте).



А потом она выключилась. Ёмкость начинает разряжаться постоянным током  $I_{разр}$ .

Вот он дошёл до порога срабатывания и мы получили участок  $t_1$ .  
Дальше снова заряжается.

Когда начинается участок  $t_2$ , значит появился обратный ток. А потом снова заряд, снова разряд. Интервал стал гораздо короче  $t_1$ . То есть средний ток меняется и он управляет маятничком. (удерживает его в среднем положении).  
*Нам это особо знать и не надо, это просто ради интереса нам показали.*



*Важно знать: мы измеряем длительность  $t_1$  неточно.*

*Если мы хотим получить высокую точность, то частота заполняющих импульсов должна быть в сотни и тысячи раз больше, с такими частотами работать тяжело.*

*Было создано много патентов для разработки изделий, в которых пытались избавиться вот от этой ошибки. Это оказалось возможным: надо сделать так, чтобы средний ток в точности соответствовал числу импульсов на выходе системы.*

*То есть если мы время  $t_1$  преобразуем так, что мы будем включать ток обратной связи по первому импульсу попавшему во временной интервал, а выключать по первому импульсу НЕ попавшему в интервал, то у нас получится  $N_1$ .*

Из-за ошибки длины интервала  $t_1$  (он получается короче или длиннее) маятник начинает избыточно отклоняться, из-за этого в цепь ОС поступает сигнал больше или меньше чем нужно, появляются автоколебания у тока маятника, и эти колебания за несколько периодов позволяют измерить часть времени кванта с очень высокой точностью. Поэтому оказалось не надо использовать высокочастотные импульсы.  
Вот как то так.

И небольшое дополнение: в МЭ ДМ нет необходимости избавляться от квадратичной зависимости, там все пропорционально получается току, поэтому разница вот этих моментов будет пропорциональна разности времен  $t_1 - t_2$  и она будет равна

$$t_1 - t_2 = \frac{m l \tau}{K_{gm} \gamma} a.$$

И опять начинаются фокусы. Как получить ток? Подключать к источнику постоянного напряжения нельзя, будет погрешность. Нужно включать обязательно по схеме стабилизатора тока. Она будет сравнивать падение напряжения на  $R$  эталонном с величиной опорного напряжения.

И если сопротивление обмоток увеличилось, они нагрелись, тогда ток уменьшается, падение напряжения на  $R$  эталонном уменьшается и падение становится меньше чем опорное, и вот этой разницей открывается усилитель и регулирующий транзистор, он добавляет ток в катушку ДМ.

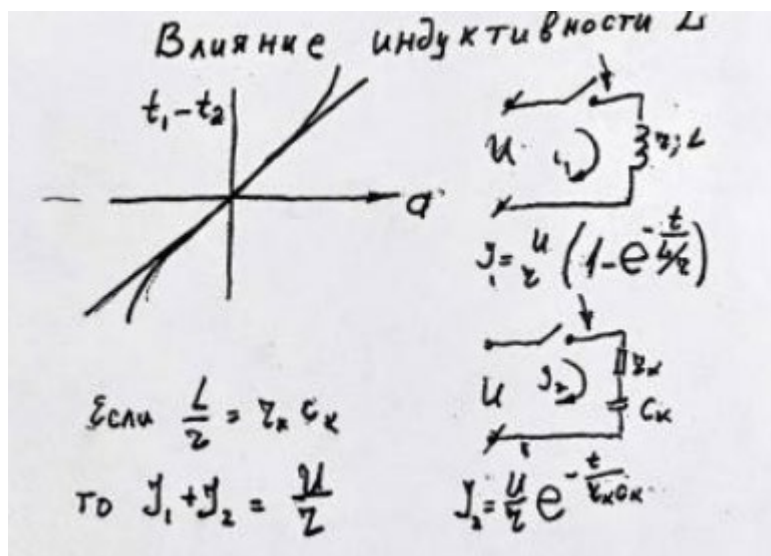
И все будет хорошо за одним исключением. Если мы работаем со стабилизатором напряжения, то там получается все чисто, там заряд и разряд индуктивности могут взаимно компенсироваться, а если у нас стабилизатор тока, то он следит только за падением напряжения на эталонном сопротивлении.

Посмотрим случай, когда у нас в мостовой схеме имеется только индуктивность.

Если мы дадим ток управления предположим  $t_1 = t_2$ , переменный ток будет. При переменном токе индуктивность будет иметь большое сопротивление индуктивное, и это будет уменьшать ток текущий через эталонное сопротивление.

А теперь подаем управляющий сигнал, мы берем  $t_1 = \max$ ,  $t_2 = 0$ . Тогда это просто постоянный ток, не создающий индуктивного сопротивления. Значит ток текущий через обмотку становится больше и вот у нас получается либо рост падения напряжения на эталонном сопротивлении, либо его уменьшение.

То есть наличие индуктивности в схеме очень сильно вредит, оно создает большую нелинейность. Как ее убрать? Включается емкость и сопротивление в цепь.



Допустим при замыкании ключа появляется ток  $i_1$ . Чему он равняется? См.картинку.

Теперь если выкинем индуктивность и вместо нее поставим емкость (ниже) тогда ток будет иметь уже другую формулу.

То есть если подобрать сопротивление  $R_k$  и  $C_k$  такими, чтобы постоянная времени заряда конденсатора была такая же, как у индуктивности, то тогда мы получим сумму  $i_1 + i_2$  и они компенсируют отрицательный член выражения. То есть нагрузка, содержащая емкость и сопротивление получается чисто активной, она не создает нелинейности в работе ключа.



27 октября. Лекция.

Рассмотрим кинематическую схему ДУСа. Кинематические схемы ДУСа и поплавкового интегрирующего гироскопа похожи. В центре прибора находится гиروزел, его ещё называют поплавком. Поскольку обычно для ПИГа делают поплавковый подвес, где центральный узел помещен в жидкость, чтобы он плавал. У поплавка должна быть нулевая плавучесть. То есть он должен и не тонуть, и не всплывать, а полностью находиться в жидкости. Это обеспечивается при помощи системы термостатирования.

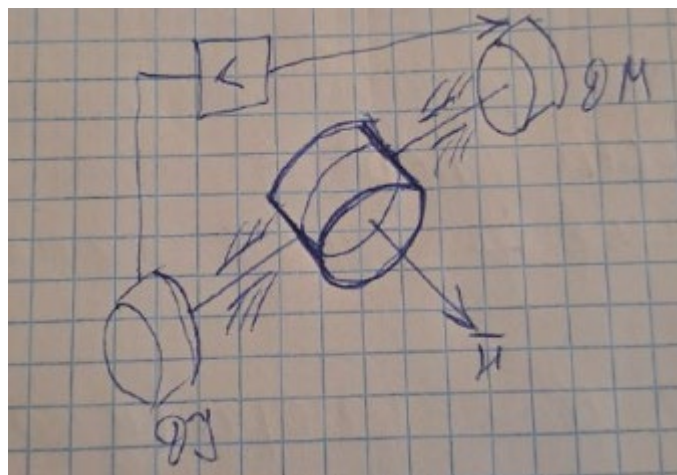


Рисунок 1. Кинематическая схема ДУСа

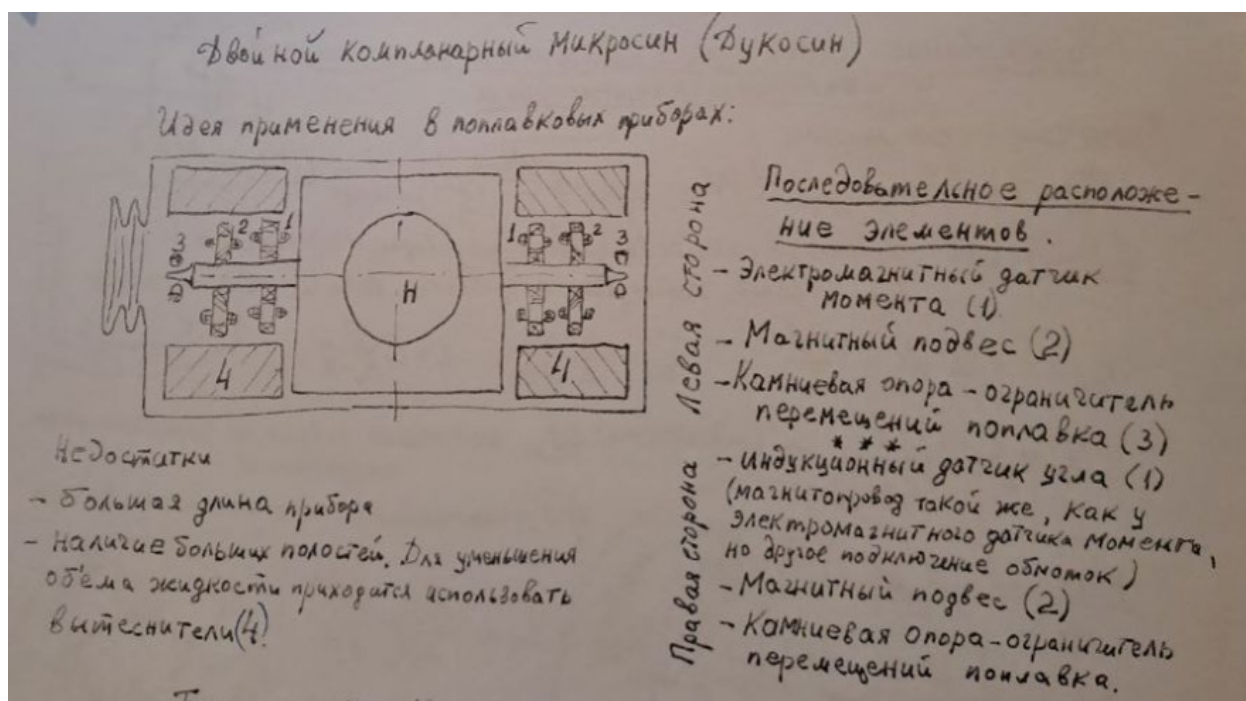


Рисунок 2. Конструкция поплавкового гиросприбора

Суть конструкции в том, что внутри объема гиروزел занимает много места, а датчики угла и момента имеют достаточно малые размеры образуется много

пустого объема, в который может попадать жидкость. Из-за чего температурные зависимости становятся большими. Из-за этого возникает избыточное давление. Для его компенсации необходим сильфон. Он представляет из себя гофрированную трубу. Представлена на рисунке слева. С одной стороны сильфона его торец герметично присоединен к прибору, а другая сторона сообщается с наружным давлением. Таким образом, если увеличивается объем жидкости, то увеличивается и длина сильфона. И тем самым происходит компенсация теплового расширения жидкости. Стараются сделать сильфон поменьше в размере, чтобы он не занимал так много места. Поэтому объем. Который может занимать жидкость. Стараются чем-нибудь заполнить. На рисунке эти элементы подписаны цифрой 4. Это грузы, которые занимают объем жидкости. Поэтому они и называются вытеснителями жидкости. Под цифрой 2 обозначен магнитный подвес. По сути, это то же самое, что и микросин. Магнитный подвес имеет статор и круговой ротор, обмотки. Элементы датчиков угла и момента похожи.

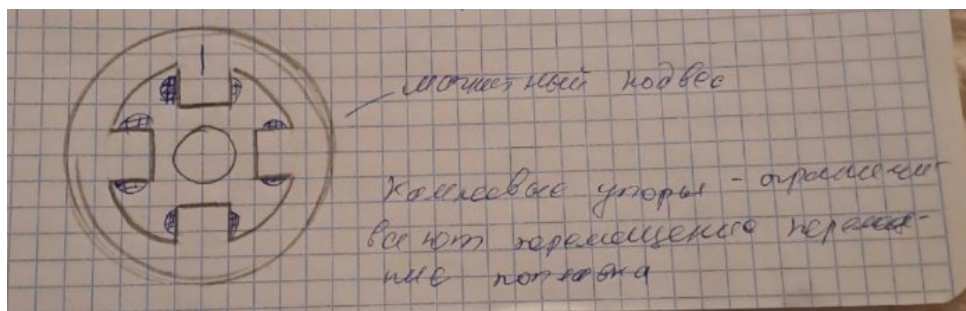


Рисунок 3. Магнитный подвес

Поскольку данные приборы располагаются на ЛА, то стараются уменьшать массу прибора. Так же стремятся уменьшать габаритные размеры и объем, который занимает прибор. Поскольку вытеснители жидкости выполняют единственную функцию, а именно заполняют объем, который должна занимать жидкость, от этого стараются уходить.



Рисунок 4. Конструкция поплавкового гиросприбора без вытеснителей



Чтобы не использовать вытеснители жидкости, придумали другую конструкцию гироприбора. Такой прибор называется двойной компланарный дукосин (рис. 4). Суть этой конструкции в том, что датчики угла и датчики момента опоры совмещены.

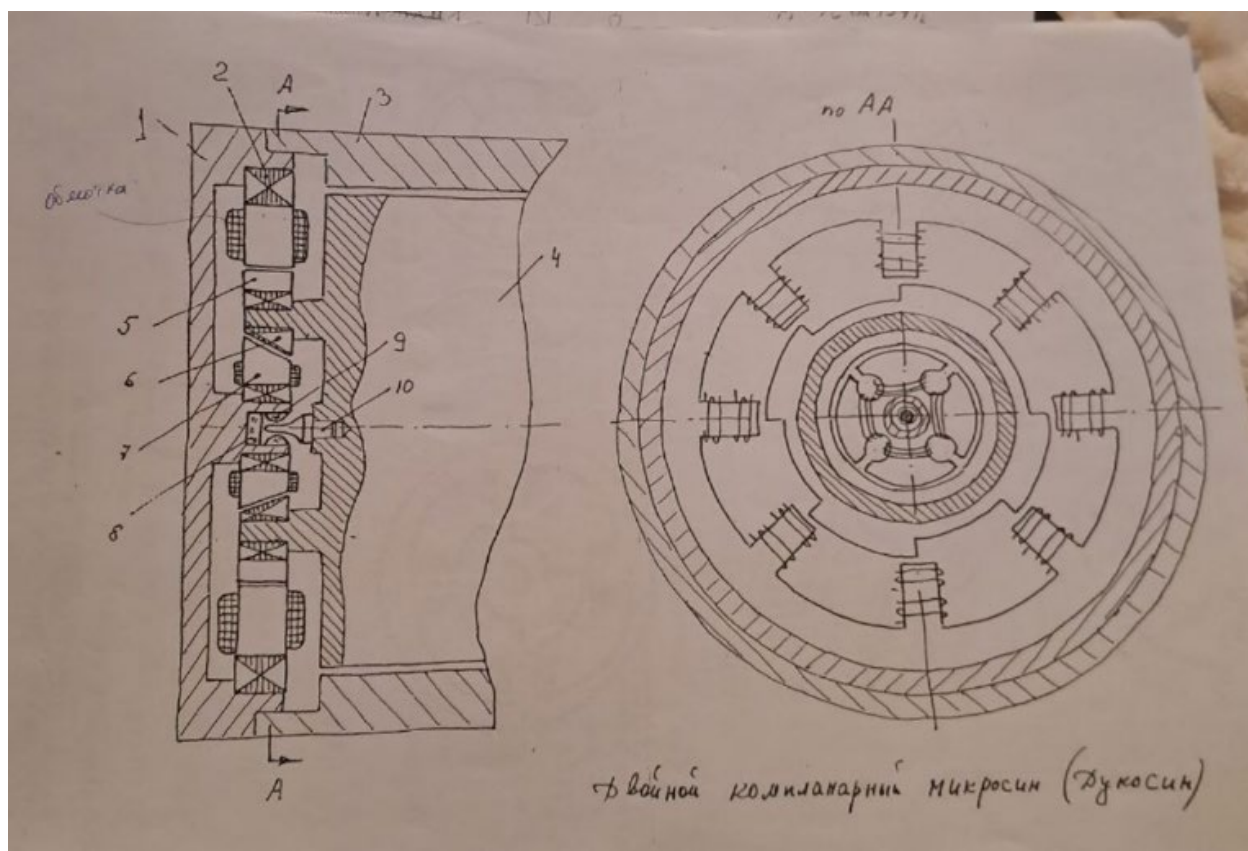


Рисунок 5. Двойной компланарный дукосин

Суть этой схемы в том, что элементы датчиков угла и момента совмещены в плоскости (от этого и компланарный) с элементами подвеса. Это сделано, чтобы занять пустой объем, ранее который занимала жидкость.

- 1 – крышка поплавковой камеры;
- 2 – статорная часть ДУ или ДМ (На элементе обозначено шифтование, по ЕСКД полюса не заштриховываются);
- 3 – корпус поплавковой камеры (сюда наматываются обмотки термодатчика и т д);
- 4 – поплавок (эта часть находится в жидкости);
- 5 – роторная часть ДУ или ДМ, он находится на выступе поплавка;
- 6 – роторная часть магнитного подвеса;
- 7 – статорная часть магнитного подвеса;

8 – осевой камниевый упор поплавок;

9 – радиальный упор камниевой опоры (ограничивает радиальное перемещение поплавок);

10 – полуоська (мимимишная потому, что маленькая, ещё ее называют цапфой);

Все эти элементы находятся в одной плоскости. Здесь 8 полюсов. В схеме рассмотренной ранее было 4 полюса. Этим мы повышаем крутизну прибора. Так же эта конструкция лучше тем, что она занимает меньше места. Опоры называются камниевые, поскольку используются драгоценные камни. Конструкция двойного компланарного дукоина лучше тем, что она имеет меньше лишнего объема, который заполняла бы жидкость и меньшие габариты. Также такая конструкция является более технологичной. Все посадочные элементы располагаются на поплавке и все посадки можно изготовить за один установ.

### **Конденсаторные (емкостные) датчики силы и момента.**

Являются самыми массовыми. Поскольку используются в микромеханических приборах.

Существуют разные схемы изготовления датчиков момента. Они отличаются тем, что используется разный материал для изготовления этих датчиков. На рис. 7 сверху справа можно увидеть 2 типа конструкций. Если используют кремний, то поскольку он сам по себе проводит электричество, то на него не надо напылять ничего, нужно только обеспечить перекрывание статорной части с центральной обкладкой. Это реализуется при помощи корпуса, который сделан из изолятора (стекло, керамика). На корпус напыляют 2 обкладки и тем самым образуя датчик момента.

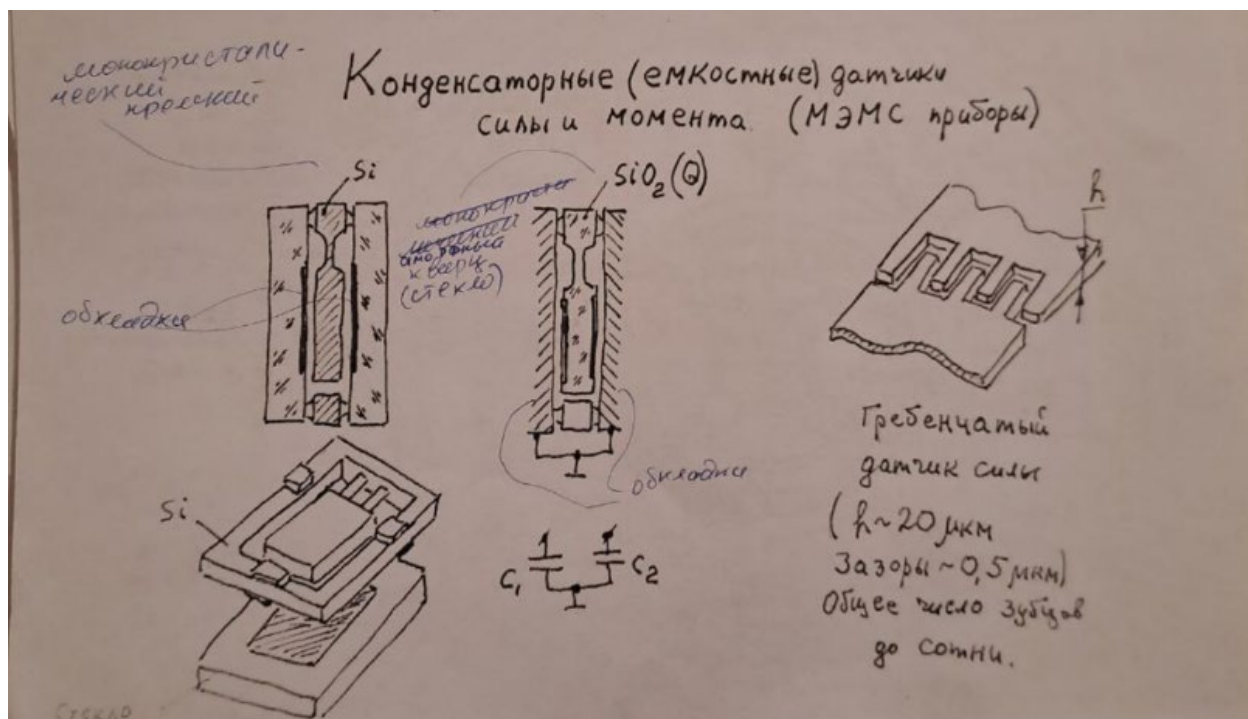
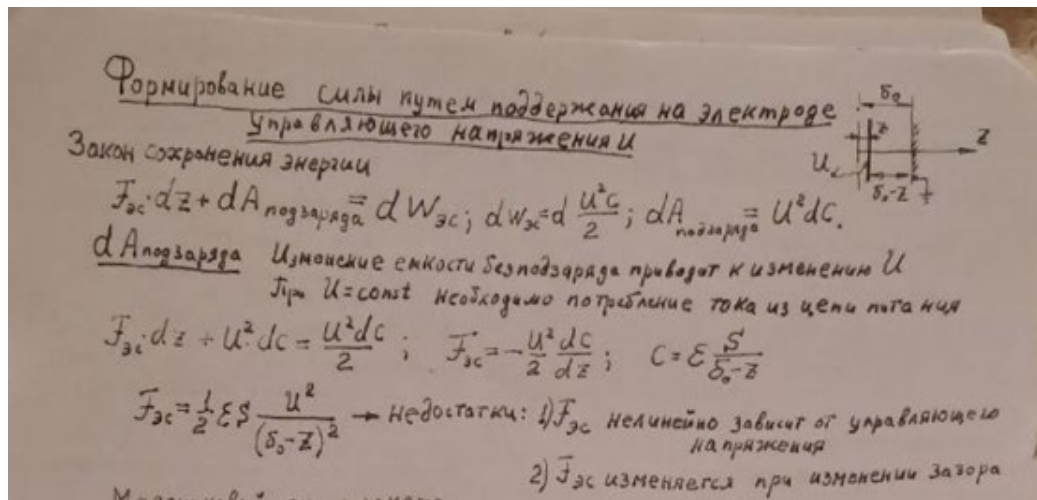


Рисунок 7. Типы конструкций датчиков момента

Вторая схема выполнена с использованием аморфного кварца. То есть, стекло. Он не проводит ток. Поэтому на маятник напыляют обкладки. Неподвижная корпусная часть сделана из металла. Таким образом имеются обкладка слева, маятник, обкладка справа. Они образуют 2 конденсатора. Схема питания этих датчиков рассмотрена на рисунке. В микромеханике используются гребенчатые датчики силы. Они имеют зубцы, которые перекрывают друг друга. На этих зубцах образуются 2 конденсатора. Зубцов делают много, чтобы увеличить силы, которые могут создавать эти датчики силы.

## Расчет электростатического датчика момента

Расчет происходит на принципе перехода запасенной энергии электростатического поля в работу перемещению пластинки конденсатора. Рассмотрим самый простой случай. Одна пластинка подвижна. А вторая нет.



Формирование силы путем подзарядки на электроде  
Управляющего напряжения  $U$

Закон сохранения энергии

$$F_{эс} \cdot dz + dA_{\text{подзаряда}} = dW_{эс}; \quad dW_{эс} = d \frac{U^2 C}{2}; \quad dA_{\text{подзаряда}} = U^2 dC.$$

$dA_{\text{подзаряда}}$  Умножение емкости без подзаряда приводит к изменению  $U$   
При  $U = \text{const}$  необходимо потребление тока из цепи питания

$$F_{эс} \cdot dz + U^2 dC = \frac{U^2 dC}{2}; \quad F_{эс} = -\frac{U^2}{2} \frac{dC}{dz}; \quad C = \epsilon \frac{S}{\delta_0 - z}$$

$$F_{эс} = \frac{1}{2} \epsilon S \frac{U^2}{(\delta_0 - z)^2} \rightarrow \text{Недостатки: 1) } F_{эс} \text{ нелинейно зависит от управляющего напряжения}$$

2)  $F_{эс}$  изменяется при изменении зазора

Изменение энергии поля между двумя обкладками должно быть равно работе, которое совершило это поле, то есть силе умноженное на перемещение. В реальности  $dA_{\text{подзаряда}}$  не требуется. При изменении расстояния изменится емкость или напряжение. Но мы это не учитываем, мы учитываем только изменение перемещения либо сил притяжения. Чтобы поддержать неизменной величину напряжения обкладок и емкость надо оговорить этот случай. Это как раз и оговаривается при помощи компоненты  $dA_{\text{подзаряда}}$ . По сути, в электрическую цепь добавляется напряжение пропорциональное изменению емкости обкладок. Это происходит из-за изменения расстояния между обкладок. То есть,  $dA_{\text{подзаряда}}$  компенсирует изменение напряжения.

Таким образом, по этим формулам можно определить силу. Недостатками такого датчика силы являются: нелинейная зависимость силы от управляющего напряжения и так же сила зависит от изменения зазора.

## Маятниковый акселерометр

Центральная обкладка смещена вправо. Чтобы применить датчик момента, надо скомпенсировать это напряжение, то есть подать большее напряжение на левую обкладку, а на правую меньшее напряжение. Оба конденсатора тянут центральную обкладку на себя.

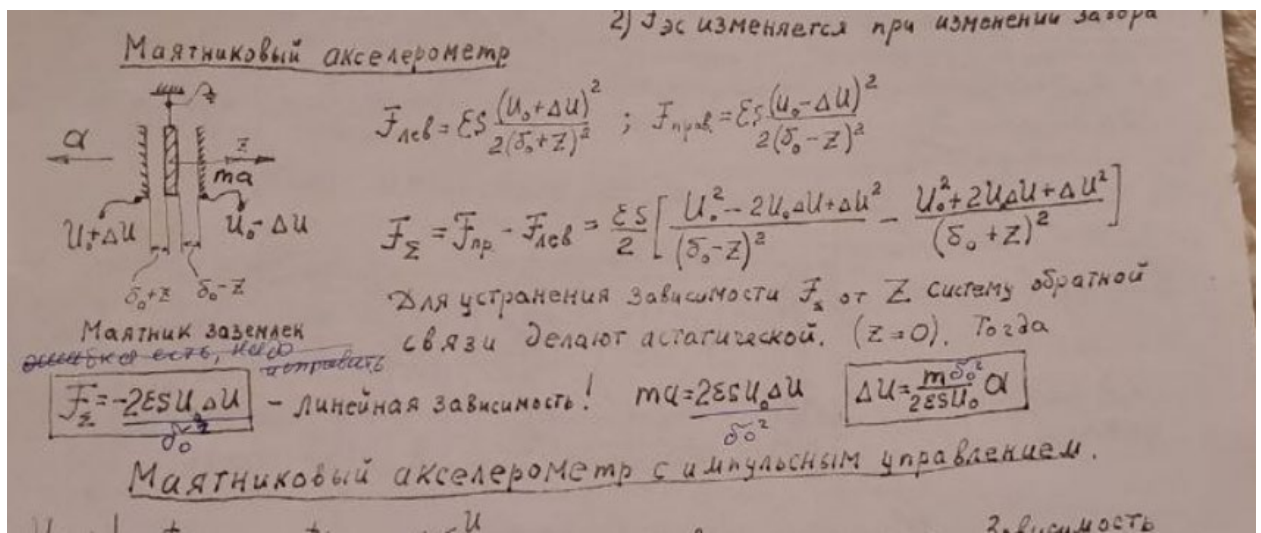


Рисунок 9. Маятниковый акселерометр

Чтобы сила не зависела от  $z$  систему делают астатической. То есть специально делают обратную связь, которая убирает установившуюся ошибку. Для этого добавляют интегрирующее звено. Такая аналоговая схема работает только тогда, когда система является астатической. Это позволяет обнулить  $z$ .

Тогда суммарная сила — это сумма двух сил. Тогда если раскрыть скобки, то получится следующее выражение:

$$F_{\Sigma} = \frac{-2\epsilon S u_0 \Delta u}{\delta_0^2}$$

Получили линейную зависимость. На листочке ошибка в формуле!

## Маятниковый акселерометр с импульсным управлением

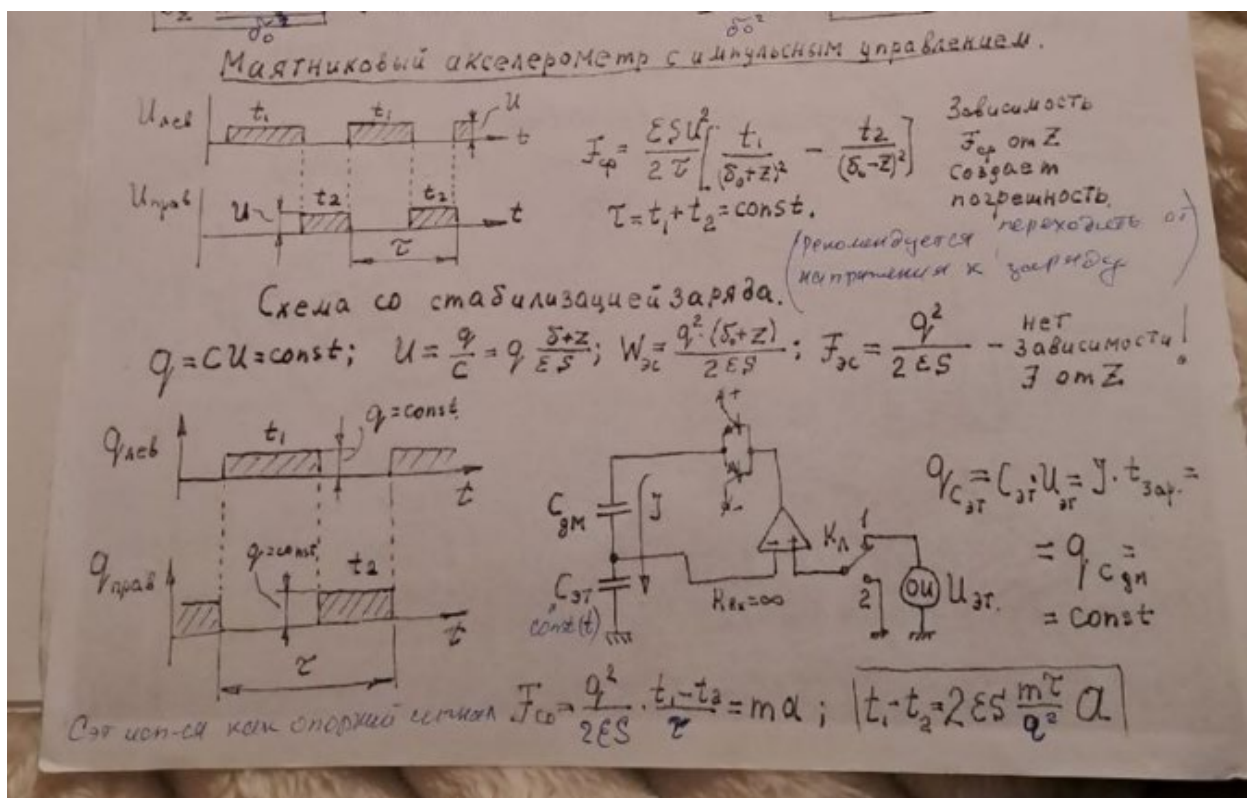


Рисунок 10. Маятниковый акселерометр с импульсным управлением и схема со стабилизацией заряда

Эта схема является переходом к цифровым системам. Она преобразует аналоговый сигнал в цифровой. Суть этой схемы заключается в том, что на каждую из обкладок подается заряд. Этот заряд заряжает обкладки. Поскольку заряды на обкладках чередуются то, будет возникать переменная сила. Силы будут не линейные. На левый конденсатор по времени подается дольше заряд, чем на правом.  $\tau$  – сглаженность импульса, он всегда одинаковый. Если не нужно создавать управляющее воздействие, то  $\frac{t_1}{\tau} = \frac{t_2}{\tau} = 0,5$ . Если нужно создавать управляющее воздействие, то силы будут не равны. Таким образом получается зависимость силы от времени действия управляющего воздействия.

### Схема со стабилизацией заряда

Для стабилизации заряда строится отдельная электрическая цепь. Заряд который стабилизируется, подключается к эталонному высокостабильному конденсатору, его параметры не изменяются со временем. Сигнал это



конденсатора используется как опорный. В начальный момент времени нулевой провод подключен к опорному источнику напряжения. После того как был заряжен впервые опорный конденсатор, то ключ замыкается в положение 2.

Выражение, которое описывает данную систему представлено на листочке.

*По итогу получается стабильное значение заряда на обкладках конденсатора.*

*Выражение для силы не пропечаталось на листочке. Должно быть так:*

$$F_{co} = \frac{q^2}{2\epsilon S} \frac{t_1 - t_2}{\tau} = ma$$

Во время объяснения этой темы, Чулкова было плохо слышно, поэтому лучше уточнить у Коновалова на консультации.

10 ноября. Лекция.

## Опоры

Шарикоподшипниковые опоры:

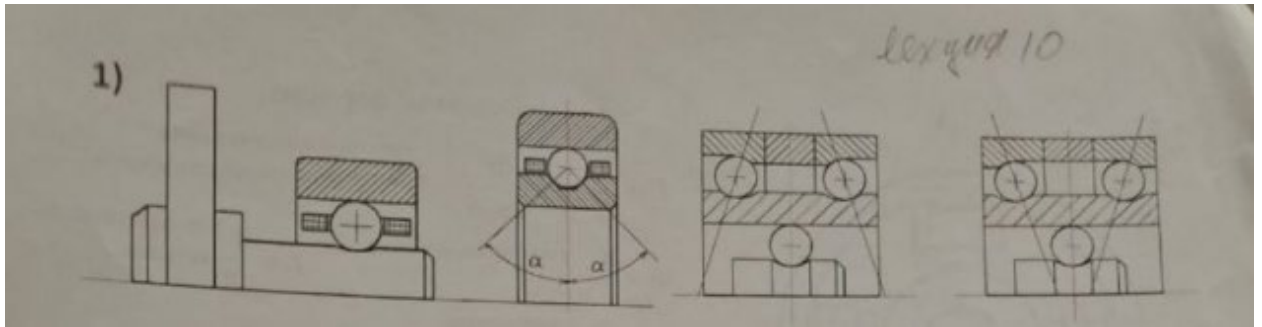


Рисунок 1. Шарикоподшипниковые опоры

Две правые опоры – это трехколенные шарикоподшипниковые опоры. Трехколенные опоры бывают с оживлением, то есть кольцо движется каким-либо образом.

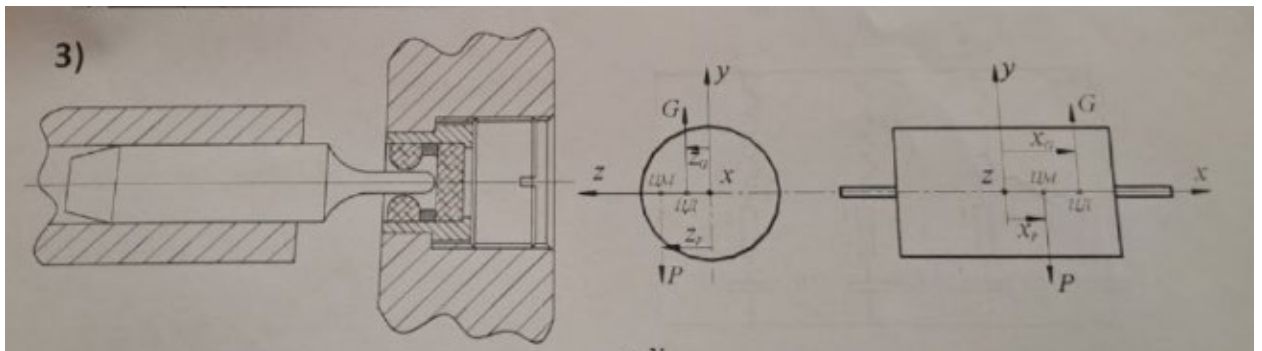


Рисунок 2. Камневые опоры

Под цифрой 3 обозначены камневые опоры. Сейчас камневые опоры используют довольно редко. Обычно используются в гидростатическом подвесе. Она играет роль ограничителя перемещений поплавка, то есть является упором, а не опорой. У упора есть зазор, в отличие от опор. На рисунке видно, как валик касается. Так же камневые опоры применяются в электромагнитном подвесе. На обратной странице показан электромагнитный подвес и его схема. На схеме опущены ДУ и ДМ.

Под цифрой 5 указана газодинамическая опора

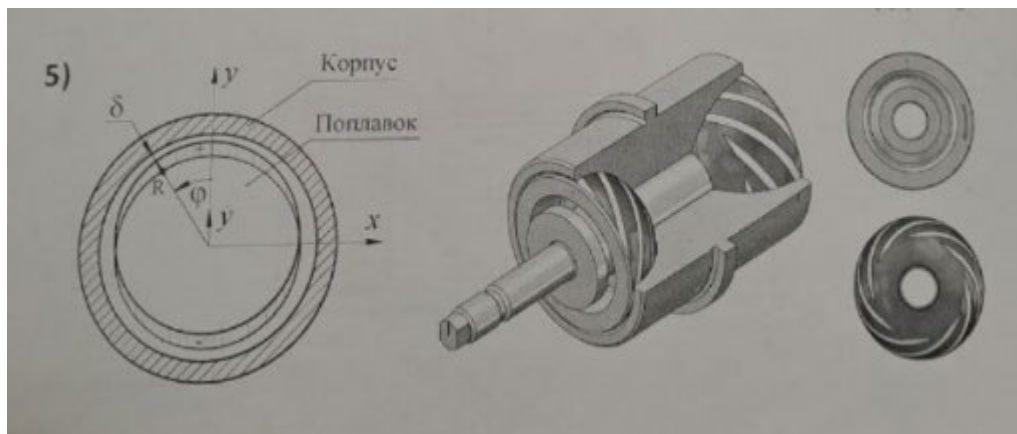


Рисунок 3. Газодинамические опоры

### Шарикоподшипниковые опоры

Представляют из себя 2 кольца: внутреннее и наружное. Между кольцами размещены шарики. Шарики могут просто находиться между кольцами или они могут быть как-то поджаты кольцами. Если шарики поджаты, то они не могут вылететь из ШП. Канавки могут быть не симметричными. Форма канавок определяет тип шарикоподшипника. Выделяют 3 основных типа шарикоподшипника. Они бывают:

- Радиальными
- Упорными
- Радиально-упорными

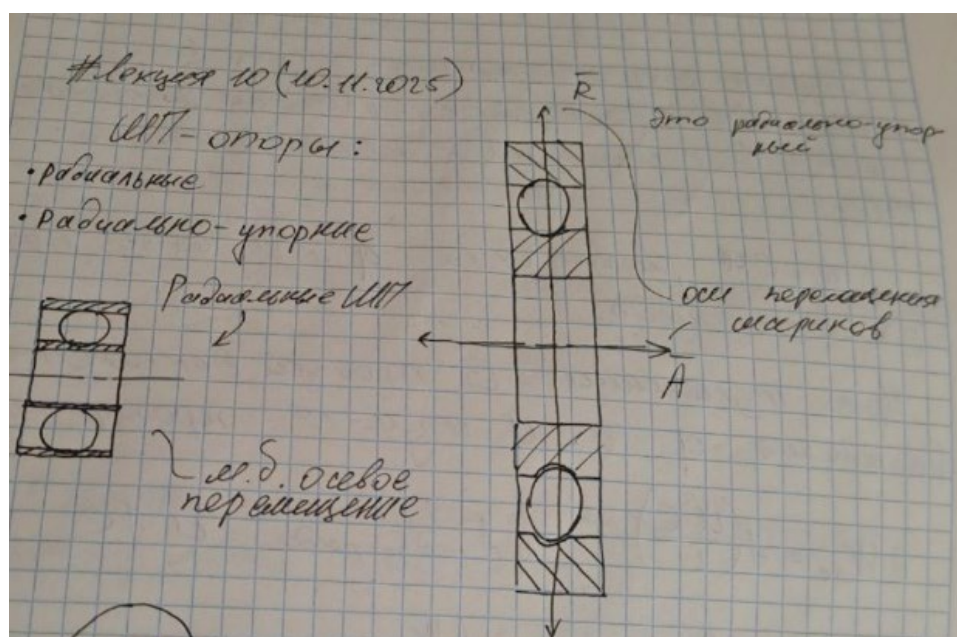


Рисунок 4. Пояснительный рисунок

На рис. 4 можно увидеть направления радиальных и осевых нагрузок.  $R$  – радиальные нагрузки.  $A$  – осевые нагрузки.

Радиальный шарикоподшипник воспринимает только радиальные нагрузки.

Подшипник, который ограничивает радиальное перемещение, называется подшипник с гладкой втулкой. Особенностью подшипников с гладкой втулкой является маленькое трение за счет того, что шарик имеет малую площадь контакта.

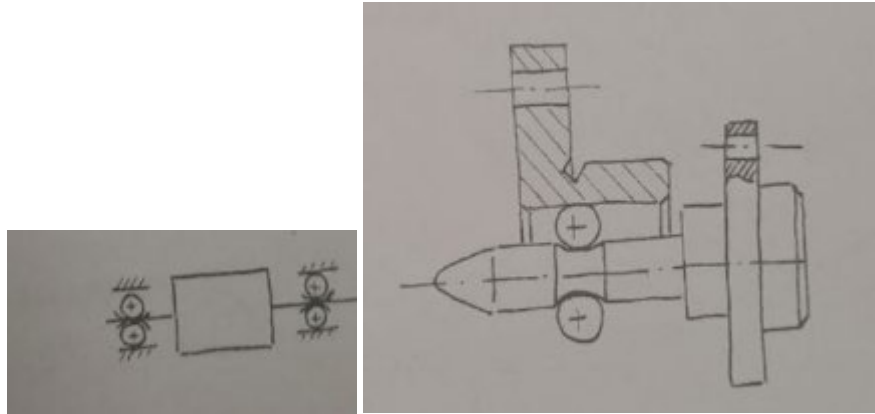


Рисунок 5. Схема подшипника с гладкой втулкой (Про второй рисунок спросить у Коновалова, является ли подшипника с гладкой втулкой)

Радиально-упорный шарикоподшипник ограничивает перемещение радиальное и осевое перемещение.

Соотношение между силами, которые принимаются в радиальных и радиально-упорных подшипниках. Радиальные ШП воспринимают только радиальные нагрузки, осевые нагрузки не воспринимают. Радиально-упорный ШП выдерживает осевую нагрузку  $R=1 \dots 1,25A$ . Упорный ШП выдерживает осевую нагрузку существенно большую, чем радиальную  $A > 1,5R$ .

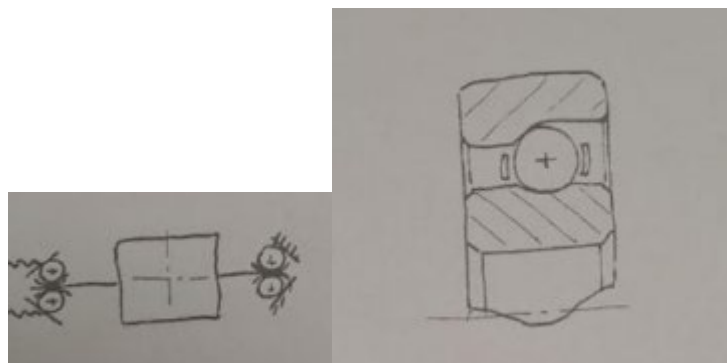


Рисунок 6. Радиально-упорный ШП (без пружин)

ШП на рис. 6 может воспринимать осевую нагрузку, направленную вправо. Если нагрузка будет приложена к наружному кольцу в левую сторону, то наружное кольцо слетит. Помимо канавок у ШП делают предварительный осевой натяг, чтобы выбрать люфт и ограничить перемещение шарика в осевом направлении. Это делают за счет приложения пар сил к наружному и внутреннему кольцам направленных в разные стороны.

ШП опоры с канавкой на валу, являются радиальными ШП опорами.

Рассмотрим возможные комбинации опор.

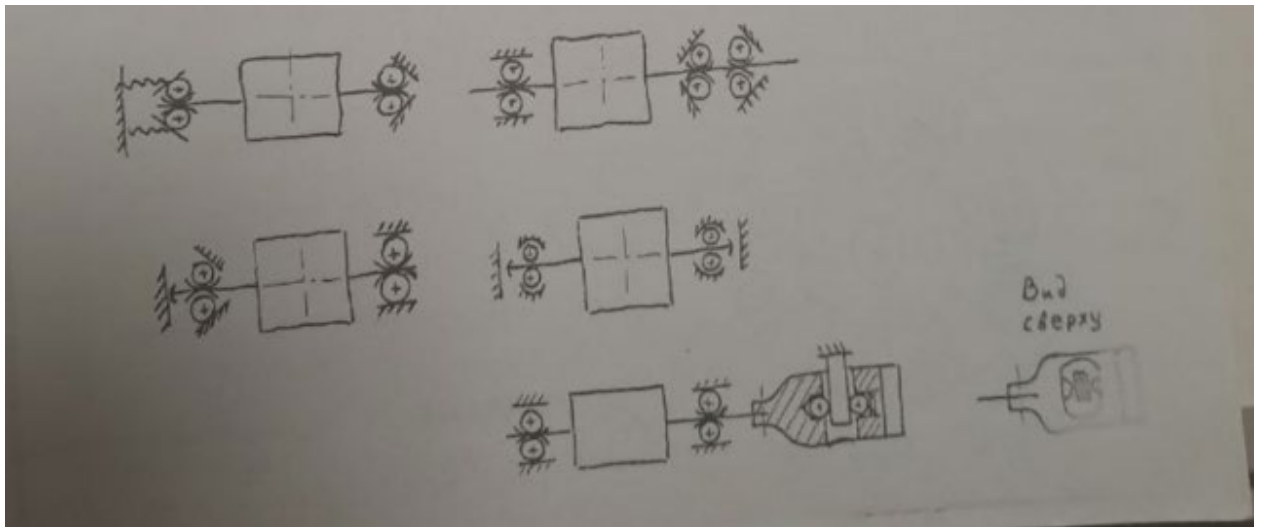


Рисунок 7. Возможные комбинации применения ШП опор

ШП опора должна обеспечивать минимальное трение. Минимальным трением обладает ШП опора с гладкой втулкой. Минусом такой опоры является то, что при температурном расширении произойдет увеличение нагрузки, из-за чего начнет расти трение. Такой минус характерен и для радиально-упорной схемы, и для ШП с гладкой втулкой. У радиально-упорной схемы если был предварительный натяг, и произошло тепловое расширение, то балка может потерять устойчивость, (это из сопромата) и вал будет деформироваться (это происходит из-за смещения центра масс). Также может сместиться ось чувствительности прибора. Поэтому обычно не принимают 2 упорно-радиальных подшипника. Чтобы уменьшить линейное расширение применяют металлы, которые имеют малый коэффициент теплового расширения, например бериллий, однако, бериллий токсичен, и он не пригоден для приборов с открытым корпусом.

Для того, чтобы избежать этих неприятностей, добавляют к одной опоре упругий элемент (на рис. 7 верхний левый элемент).

Помимо применения упругого элемента можно использовать другие схемы.

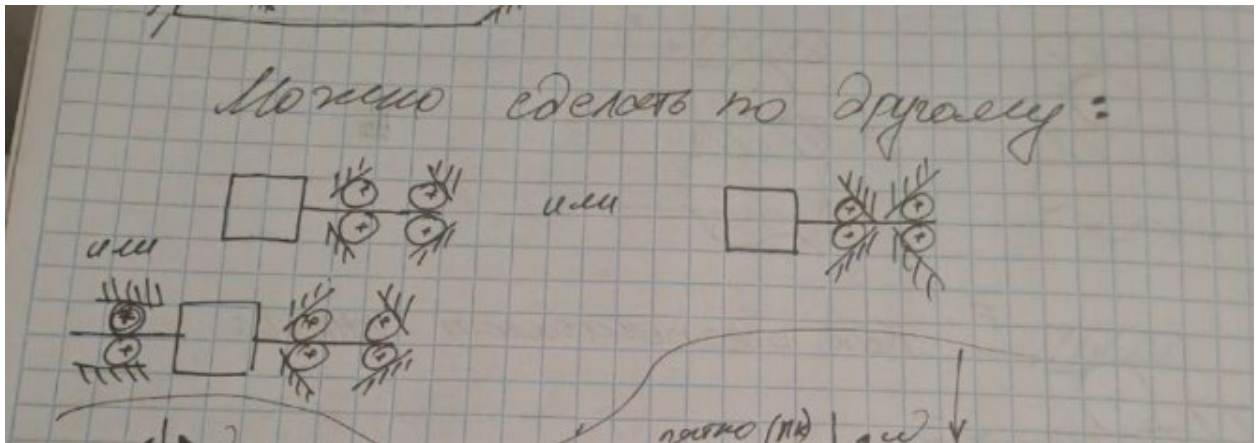


Рисунок 8. Альтернативные варианты конструкций опор

Данные способы закрепления опор называются консольными. Консольные подвесы чувствительны к поперечным нагрузкам. При действии поперечных нагрузок может появиться прогиб (на рис. 8 это две верхние схемы). Чтобы избежать этого к консольному подвесу добавляют подпятник с гладкой втулкой, чтобы ограничить радиальное перемещение.

Существует трение верчения. Это трение, когда тело вращается в одном положении и точка контакта не изменяется. Трение верчения отличается от остального вида трения и принимает малые значения, по сравнению с другим типом трения.

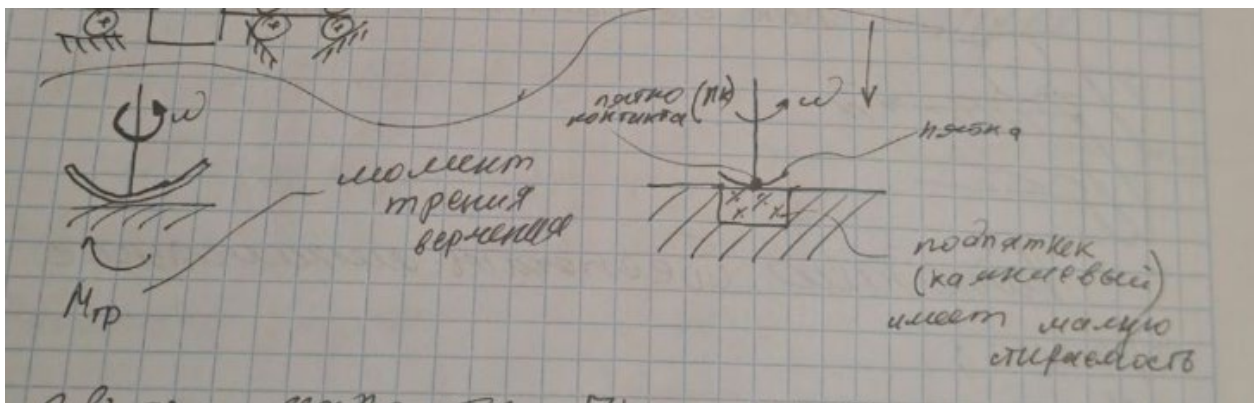


Рисунок 9. Трение верчения

На рис. 10 можно заметить камневую опору. Полуось имеет маленькую площадь контакта с подпятником. Материал для подпятника берется специальным, чтобы материал имел малую стираемость. Подпятник состоит из подложки (она сделана из металла и имеет малый коэффициент теплового расширения) и камневый подпятник (имеет малую стираемость и является



хрупким, как стекло). Пятно контакта делается максимально малым. Может быть небольшой зазор. Но при нагреве появляется небольшое пятно контакта.

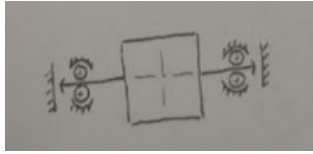


Рисунок 10. Камневая опора

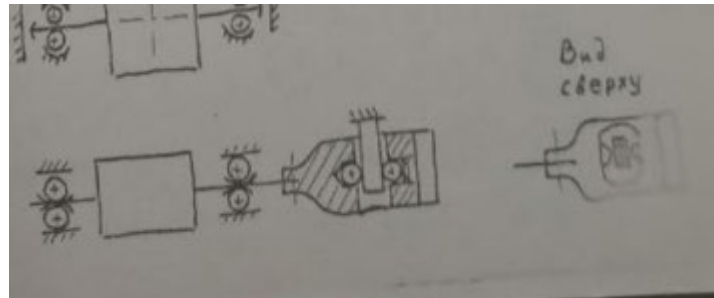


Рисунок 11. Пятый тип конструкции опор

Вместе с ШП с гладкими втулками используется дополнительное приспособление. Оно имеет палец, который добавляет осевое ограничение. Имеется зазор между пальцем и упорами, но при нагреве зазор может пропасть.

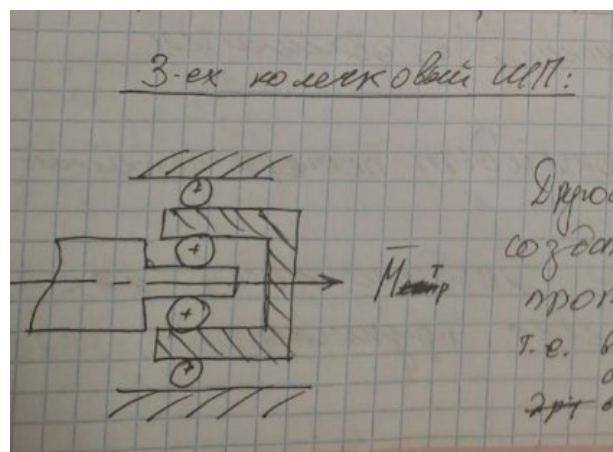


Рисунок 13. Пояснительный рисунок

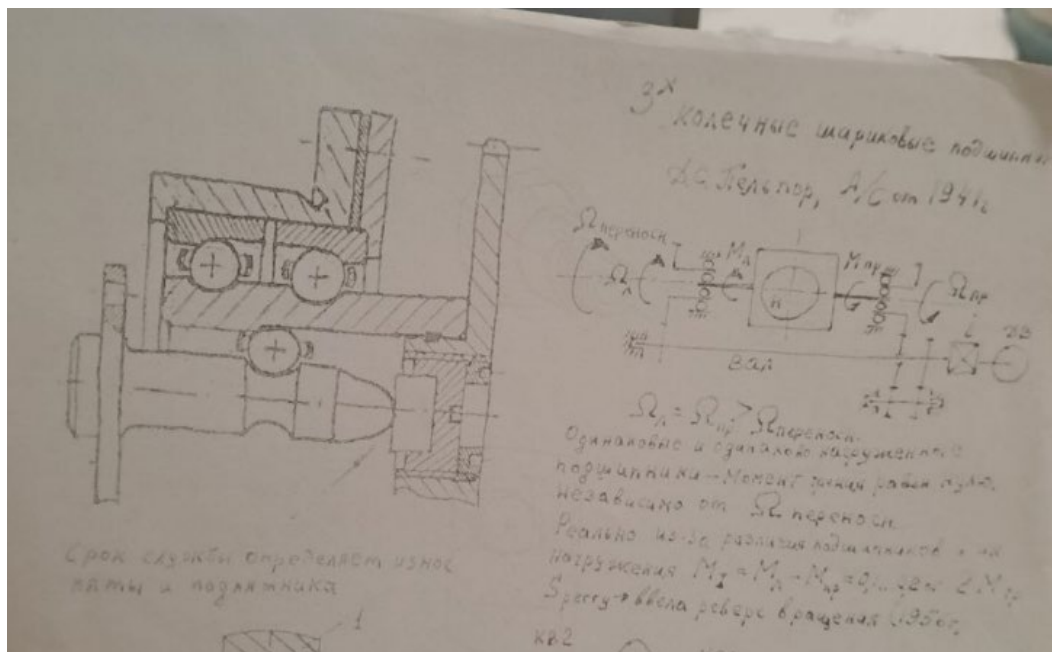
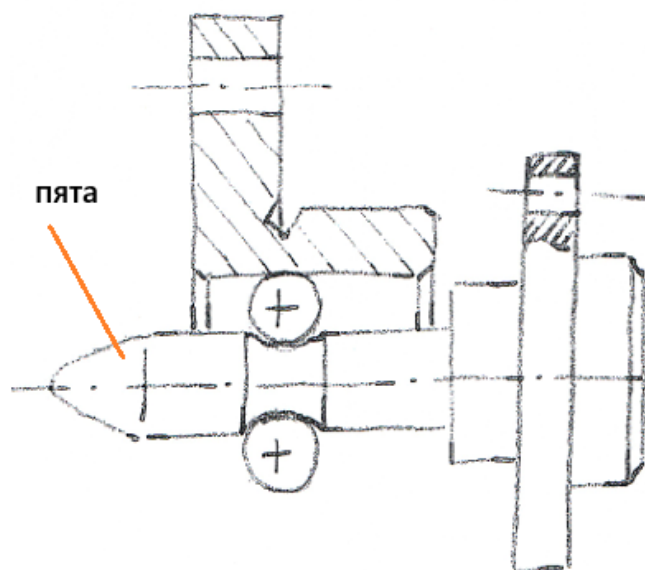


Рисунок 12. Трех колечные шарикоподшипниковые опоры

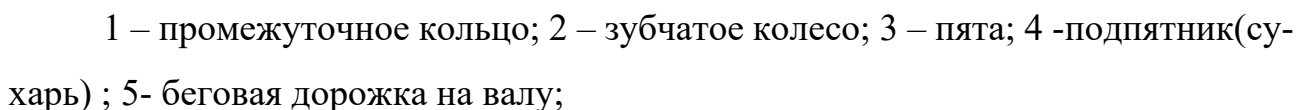
Если сравнивать все виды трения между собой, то самым большим трением является трение покоя. То есть сложнее всего начать движение, а не продолжать движение. Можно ли сделать так, чтобы подшипники работали не на преодоление трения покоя, а на трение качения. Это возможно. На рис. 12 представлен Трех колечная шарикоподшипниковая опора. Вал опирается на шарики, которые установлены в стакане. Сам стакан же установлен в корпусе (Рассказывается принцип действия такой опоры. См. рис 13). Оживить подшипник, значит заставить двигаться стакан. В секциях будет возникать 2 момента трения, один будет направлен в одну сторону, другой в другую. На гирузел действует момент трения. Тогда другая опора должна создавать момент трения, направленный противоположно первому. То есть они должны друг друга компенсировать. Это делается за счет разностей вращения. То есть шарики вращаются в разные стороны. Пусть левое кольцо вращается в одну сторону, а правое кольцо вращается в другую сторону. Тогда промежуточное кольцо создает трение, которое тянет за собой гирузел.

## Лекция 18

Момент трения самый главный враг. Дмитрий Сергеевич Пельпор пытался решить эту проблему и в итоге он изобрёл следующую схему. Он взял гиروزел, внутренний рамки гироскопа, он повесил его в одном шарикоподшипнике (с наружным диаметром 20 миллиметров). Потом взял 2 ШП, у которого внутренний диаметр был 20 миллиметров, надел сверху на 1 ШП. И наружный диаметр получился 40 миллиметров. Подшипник в подшипнике. Он вывел цилиндрическую втулку (между двумя ШП) и присоединил через зубчатое колесо к моторчику. 1 моторчик крутил промежуточное колесо в одну сторону, а другой моторчик крутил в другую сторону. В результате к гироскопу подвешенному было приложено 2 момента трения. Один тянул в одну сторону, а второй в другую сторону. Так как подшипники одинаковые, то и моменты трения были одинаковые, следовательно они взаимно компенсировались. В итоге идея была такая 2 момента друг друга скомпенсировали и момента трения не осталось. К этой идее вернулись американцы после войны, в конце Сороковых. Годов. Они повторили этот эксперимент, когда вращается в разные стороны два промежуточных кольца, соединённых вместе. Скорость не важна, так как момент трения не зависит от скорости движения трущихся тел, а определяется только 2 параметрами (это силой нормального давления и коэффициентом трения). Следовательно, если разные скорости будут вращения, то моменты компенсируются полностью.



И так вот такой же элемент используем и в трехколечном подшипнике.

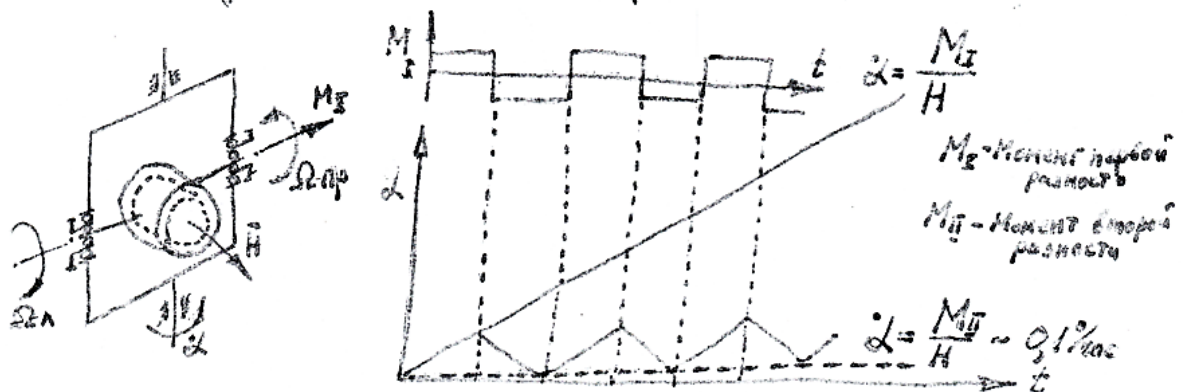


2

первой разности, разность момента трения первого подшипника, минус момент трения второго подшипника. А скорость дрейфа будет равняться моменту первой разности, делённой на кинетический момент.

Американцы, как только сделали эту систему, убедились, что плохо будет работать такой гороскоп, и пришли к выводу, что надо менять направление вращения промежуточных колец. То есть часть периода общей работы (период реверса промежуточного кольца трехконечных подшипников), схемы, с одной стороны подшипники крутятся по часовой стрелке, а с другой против часовой стрелки, а потом через какой-то промежуток времени дают движение в другую сторону. Значит, момент 1 разности, он от скорости, от направления вращения слабо зависит, просто будет меняться его знак. Тогда дрейф на 1 этапе идёт с такой же скоростью, как если бы мы вращали, не реверсируя, а потом вот в этот момент времени меняется направление вращения и гироскоп дрейфует в другую сторону, с той же самой скоростью. Уход к концу периода реверса будет раз в 100 меньше, чем уход такого же гироскопа при вращении в одну сторону. Уход при реверсе будет выглядеть как пила, но она не будет полностью компенсирована.

## Подшипники „Роторейс“ (3-колесные)



Момент трения  $M_{II} = M_{II} - M_{II} \sim 0,01$  от  $M_{тр}$  подшипника без отклонения.

$\Omega_A = \Omega_{пр} = 120-200^\circ/\text{мин}$ ; Период реверса снт. (все элементы внутреннего подшипника, включая сепаратор, совершают полный оборот. Угол поворота промежуточного кольца и у обеих подшипников одинаков - был или наоборот достигли)

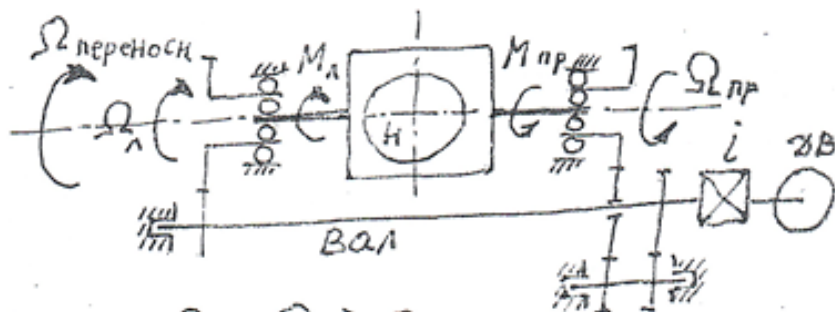
$T = 240 \frac{m}{\Omega} \cdot \frac{D_o}{D_H}$ .  $[\Omega] = \frac{об}{мин}$ ;  $m = 1,2$  - число оборотов сепаратора внутреннего подшипника,  $D_o$  - диаметр окружности шлицов внутреннего подшипника,  $D_H$  - диаметр наружной зубчатой окружности шлицов внутреннего подшипника.  $T \sim 100...200$  сек.

При вращении промежуточных колец в одну сторону, в другую сторону он получается моменты чуть разный, поэтому внизу на графике есть пунктирная линия, которая показывает наличие все-таки остаточного дрейфа гироскопа. Этот остаточный дрейф приводят к так называемому моменту второй разности. То есть момент первой разности, подшипники вращаются без реверса с постоянной скоростью. А момент второй разности это когда меняется все время направление вращения, то есть реверсирует. Момент второй разности равен именно величине этого дрейфа остаточного, умноженное на кинетический момент (или как на картинке) То есть момент 2 разности раз в 100 меньше, чем момент 1 разности. Получается очень сильное уменьшение момента трения. При 2 колесных подшипниках Можно добиться скорости дрейфа гироскопа порядка там, скажем, 5, 7, 10 градусов в час. Хорошие цифры, то при использовании трехколесных подшипников эта же скорость дрейфа гироскопа. Она будет равна примерно 1/10 градуса в час. Если подобрать подшипники хорошие, то трение будет практически нулевым.



### 3<sup>х</sup> колечные шариковые подшипники

А.С. Тельпор, А/С от 1941г.



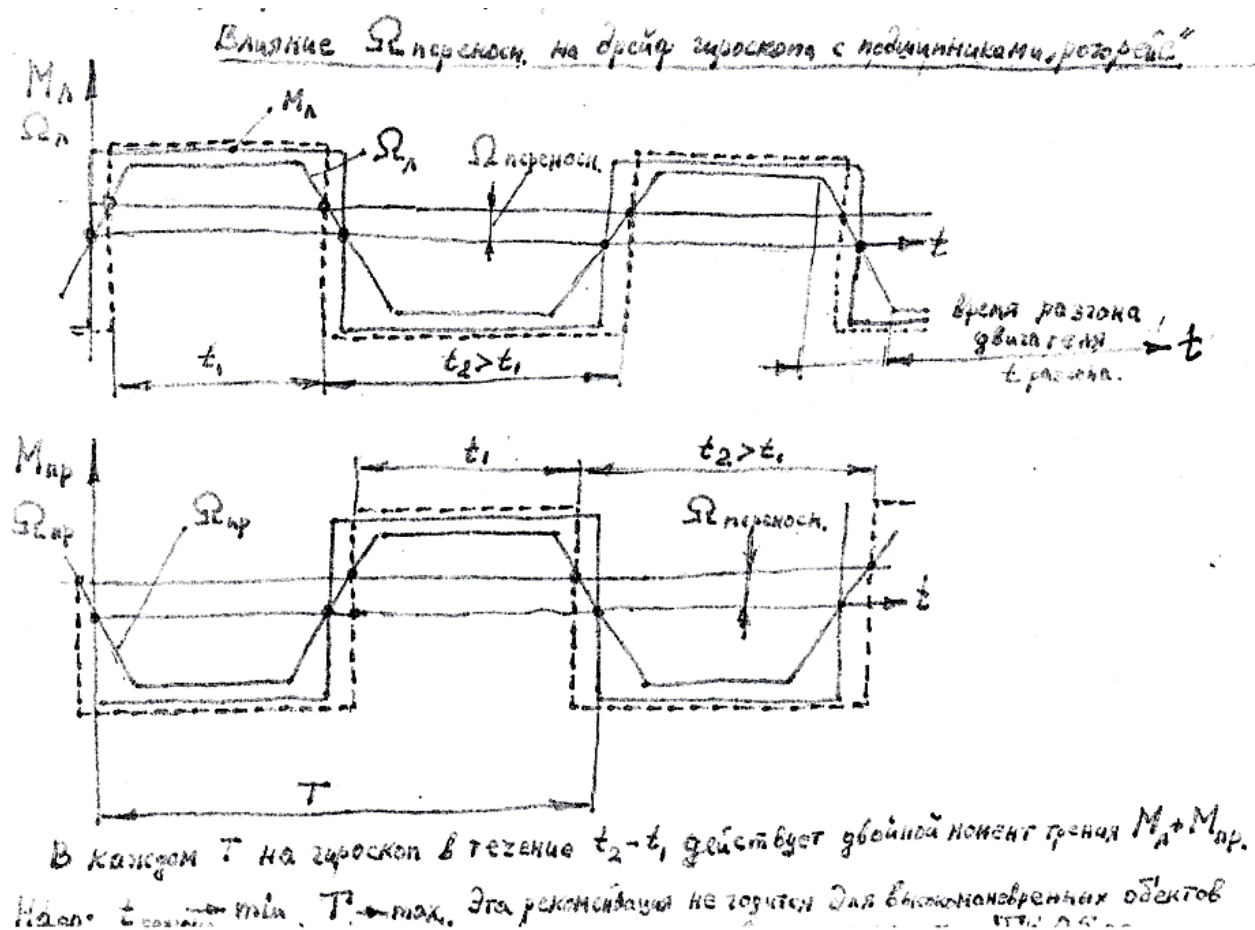
$$\Omega_{\Lambda} = \Omega_{пр} > \Omega_{перенос}$$

Одинаковые и одинаково нагруженные подшипники — Момент трения равен нулю.  
Независимо от  $\Omega_{перенос}$ .

Реально из-за различия подшипников и их  
нагрузки  $M_{\Lambda} = M_{\Lambda} - M_{пр} = 0,1...0,2$  от  $2 M_{тр}$   
 $S_{реггу} \rightarrow$  ввела реверс вращения (1956г)

Построение опоры на трехколесном подшипнике. Здесь имеется двигатель с редуктором, чтобы была небольшая скорость движения промежуточного кольца. Обычно в районе 180-200 градусов в минуту. От двигателя идёт вал. Вал проходит через всю длину прибора, и дальше имеется редукторы, которые обеспечивают вращение промежуточного кольца в разные стороны.

Момент трения не будет зависеть от переносной скорости без реверса. Но если есть реверс, то у нас получается пилообразный уход. Расплата за этот уход является зависимостью Дрейфа гироскопа от переносной угловой скорости.

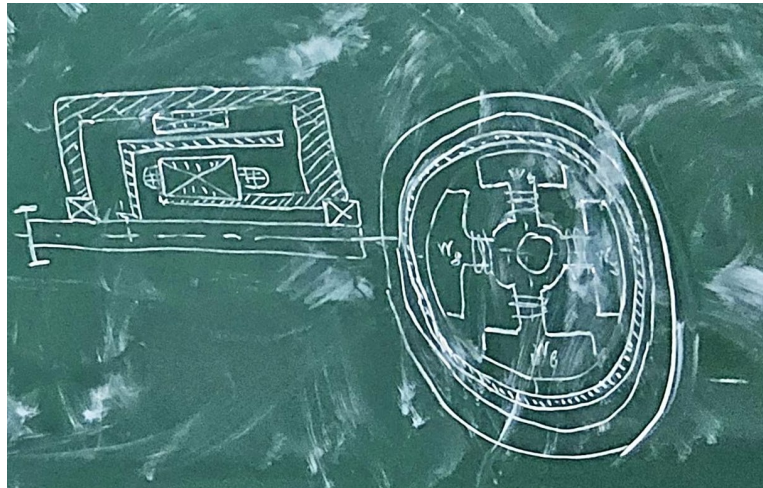


Если подшипники работают без реверса, то момент трения, действующий на гироскоп, будет независимым от переносной скорости. А если введён реверс промежуточного кольца, то при наличии переносной скорости появляется отрезок времени (внутри тактового периода реверса), в течение которого на гироскоп будет действовать полный момент трения двух подшипников, вращающихся в одну сторону. Этот удвоенный момент трения вызывает дрейф гироскопа, зависящий от переносной скорости. Эта зависимость появляется, потому что промежуточное кольцо не мгновенно изменяет свою скорость при реверсе. Нужно время для того, чтобы затормозить ротор двигателя и колеса редуктора и набрать противоположную скорость, поэтому есть переходное время от вращения промежуточного кольца в 1 сторону и во 2 сторону.

По графикам видны моменты изменения скорости, движения промежуточного кольца относительно гироскопа. Когда меняется скорость, то меняется направление момента трения. Временные отрезки  $t_1$ ,  $t_2$  не одинаковые. Поэтому

в течение времени  $t_1$ ,  $t_2$  будет на гироскоп действовать двойной момент трения, значит, он вызовет дрейф гироскопа.

Для уменьшения дрейфа нужно сделать хороший привод промежуточному кольцу, то есть поставить мощный двигатель, который практически мгновенно будет раскручивать это промежуточное кольцо в 1 сторону и в другую. Тогда это будет момент обращаться в 0.

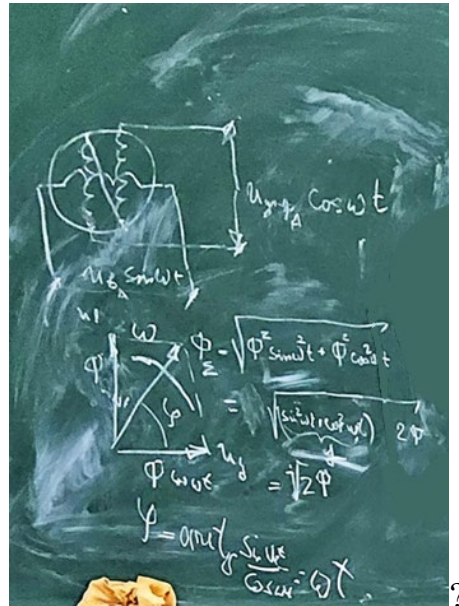


Двухфазный индукционный двигатель или Двухфазный двигатель с проводящим ротором в виде стаканчика (Асинхронный двигатель)

Есть статор двигателя, который за вальцован, стаканчик сделан из алюминия или меди, и опоры.



### Согласованное включение(1 вариант включения)



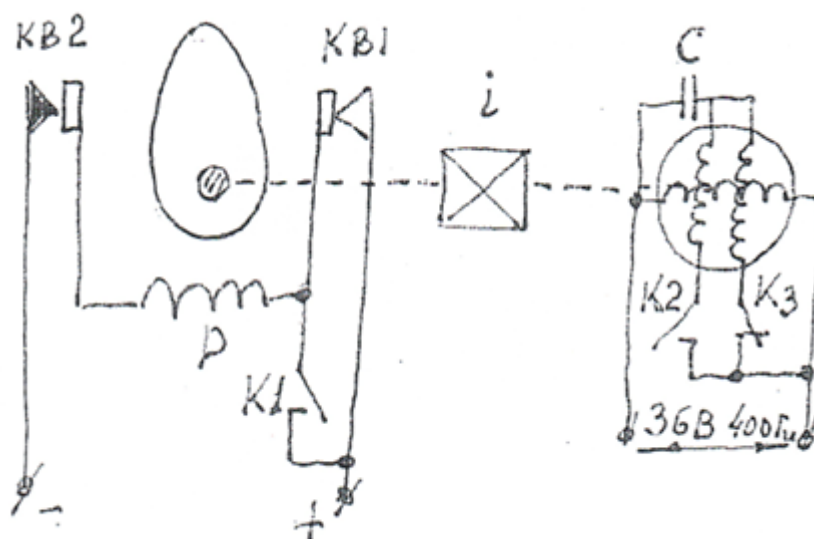
Обмотки возбуждения и обмотки управления расположены под 90 градусом

### Дифференциальное включение(2 вариант включения)



В этом включении используются жидкостные уровни. На картинке видна ампулка, который налит спирт с растворённым в нём йодистым калий. Концы от обмоток управления подключаются таким образом, как показано на картинке. Когда ампулка находится в горизонтальном положении, то пузырёк воздуха находится наверху, и жидкость одинаковым образом перекрывает половину правого и левого электрода. Нижний электрод погружён весь. Если пузырёк симметрично перекрывает оба электрода, то сопротивление столбцов электролита будет одинаковым. Если мы отклоняемся от горизонта, то у одного электрода будет

увеличиваться зона перекрытия жидкостью, а у второго уменьшаться. Тогда сопротивление одного столбца электролита будет увеличиваться, а другого уменьшаться. Тогда ток, протекающий в левой части, и в правой части они будут разные, то создается момент, чтобы вернуть в горизонтальное положение (направление момента зависит от того, какой ток преобладает, в правой или в левой катушке)

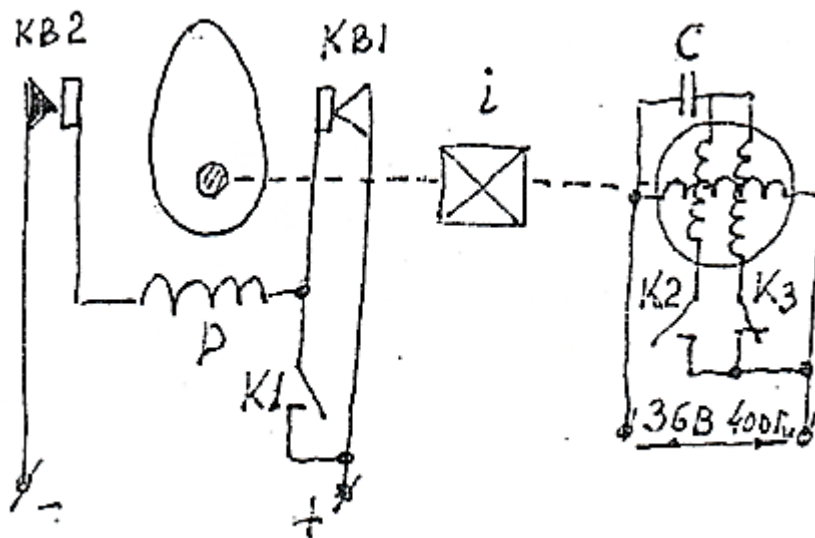


Обмотка управление напрямую включена к источнику. В цепь включена ёмкость и индуктивность это последовательный резонансный. Когда резонансный контур настроен на резонанс, то есть фазовый сдвиг. Тока получается равный 90 градусов. Не очень хороший вариант, так как в гироскоп установлен довольно большой конденсатор.



## Лекция 19

Вот стаканчик, алюминиевая ось, вот это — статор внутренний. Колечко, оно сделано в корпусе вот так. Выходит зубчатое колёсико, оно выполнено вместе с осью. И это такое колёсико, которое выполнено вместе с осью, оно называется трибка. Технологически, в общем-то, проще сделать такое колёсико, чем делать его отдельной деталью и насаживать на ось как-то заодно. Оно выходит наружу, в отверстие попадает и дальше идёт уже на колёсики редуктора. Редуктор своеобразный, называется приставной. Он монтируется не на детали, окружающие корпус двигателя, а прямо на сам корпус.



Вот смотрите, это привод коренного подшипника от двигателя. Двигатель запитан напряжением 36 вольт 400 Герц, и скорость вращения стаканчика — она высокая, она порядка 20 000 оборотов в минуту, может быть, даже чуть-чуть поменьше, 18 000 оборотов в минуту. Для этого нужен редуктор, чтобы снизить эту скорость от 20 000 оборотов в минуту до 200–240 оборотов в минуту, чтобы вращать вот эти трехколесные подшипники. Поэтому нужен мощный редуктор, большой редуктор. Кстати сказать, это один из недостатков вот этой схемы — наличие такого большого редуктора, потому что входные колеса этого редуктора должны крутиться с большой скоростью, из-за этого трибка довольно быстро изнашивает латунные и бронзовые колёсики редуктора, приводя их в негодное состояние.



На верхнем приводе трехкольцевого подшипника установлен кулачок. Этот кулачок со смещением укреплен на валу и может двигаться. Концевой выключатель — это выключатель с кнопкой. Вот на эту кнопку нажимают, и он из включенного состояния переходит в невключенное. Бывает два типа концевых выключателей: нормально замкнутые (два конца у него замкнуты, когда на него не нажимают, а когда нажимают — размыкаются) и нормально разомкнутые (когда нет нажатия, контакта нет, когда нажимают — контакты замыкаются). Эти концевые выключатели обозначаются в соответствии с тем, нормально замкнутые они или нормально разомкнутые. Если треугольничек зачернен — это нормально замкнутый выключатель, а правый KB1 — он беленький, треугольничек пустой, значит, это нормально разомкнутый выключатель.

Теперь в схеме есть реле. Обмотка управления реле обозначена как спираль и буквой Р. Когда по этой спирали протекает ток, реле замыкается, включается. У реле имеется тоже два типа контактов. Один из этих контактов нарисован замкнутым, тогда это нормально замкнутые контакты (когда реле не включено, контакт замкнут). А если нарисовано как на картинке K1, подвижный элемент не пересекает линию, то это нормально разомкнутый контакт (он не замкнут, если реле не запитано).

Двигатель питается через конденсатор. Конденсатор даёт фазовый сдвиг 90 градусов для того, чтобы этот двухфазный двигатель мог крутиться. А обмотки управления подключены либо через контакт K2, либо через контакт K1, K3. Но K2 — нормально разомкнутый контакт, а контакт K3 — нормально замкнутый. И ещё один стоит нормально разомкнутый концевой выключатель KB1. Реле питается от постоянного напряжения (плюс-минус показано).

В начале работы, когда только включаем этот прибор, кулачок стоит в промежуточном состоянии, ни вправо, ни влево не взаимодействует. Значит, нормально разомкнутые контакты разомкнуты. Поэтому по обмотке реле ток не течёт. Ток от минуса через замкнутый концевой выключатель KB2 поступает к обмотке и дальше он разрывается, потому что контакт KB1 разомкнут, и реле разо-

мкнуто. Значит, и контакты К1 разомкнуты, реле не запитано. Остаётся включённым только контакт К3 двигателя. И двигатель крутится в одну сторону, крутит через редуктор промежуточное кольцо и одновременно крутит кулачок. Кулачок в этом случае движется в сторону выключенного концевого выключателя КВ1.

В начале замкнут концевой выключатель, замкнут контакт К3 (он нормально замкнут при не запитанном реле), и кулачок движется в сторону концевого выключателя КВ1. Естественно, промежуточные кольца обоих подшипников имеют своё движение (правый по часовой стрелке, а левый против). Теперь кулачок наехал на концевой выключатель КВ1, нажал на него. Тогда у нас потёк ток по обмотке реле: от минуса через концевой выключатель КВ2, по обмотке реле, дальше через концевой выключатель КВ1 (потому что на него уже кулачок наехал, он включился) и на плюс. Значит, обмотка реле оказалась запитанной. Реле сработало, выключило контакт К3, а включило контакт К2 и контакт К1.

Когда контакт К2 включился, двигатель стал крутиться в другую сторону (другая обмотка управления подключилась). Кулачок поехал в сторону концевого выключателя КВ2 и сошёл с КВ1. Но цепь питания реле при этом не разорвалась. Почему? Потому что концевой выключатель КВ1 зашунтирован контактом реле К1. То есть реле включилось, замкнуло контакт К1, и теперь безразлично, включён КВ1 или нет. У двигателя идёт движение в противоположную сторону, и кулачок движется к КВ2. Вот он добрался до этого концевого выключателя и нажал на него. При этом концевой выключатель КВ2 разомкнулся, и разомкнулась цепь питания реле. Реле выключилось, контакт К1 выключился, контакт К2 выключился, снова включился контакт К3. Значит, опять кулачок пошёл в сторону концевого выключателя КВ1, и началось повторение движения. То есть кулачок ходит от одного выключателя к другому. В зависимости от того, куда он нажал, двигатель крутится либо в одну, либо в другую сторону и меняет направление движения промежуточных колец подшипника, то есть обеспечивает реверс.

*Начальное состояние: реле обесточено. Включён только контакт КЗ. Двигатель крутится в сторону КВ1, движет кулачок, включая КВ1. Одновременно идёт вращение промежуточных колец, соответствующее началу периода реверса.*

*Теперь кулачок добрался до концевого выключателя КВ1 и нажал на него. Замкнул КВ1. При этом появилась цепь питания реле через КВ1. Когда включилось реле, включились его контакты К1 и К2, а контакт КЗ разомкнулся. Началось вращение двигателя в противоположную сторону. Кулачок отойдёт от концевого выключателя КВ1, то есть КВ1 разомкнётся. Но цепь питания реле сохранится, поскольку концевой выключатель КВ1 зашунтирован контактом реле К1. Будет продолжаться вращение двигателя в противоположном направлении. Это соответствует участку  $T_2$  периода реверса. Период реверса — это  $T_1 + T_2$ .*

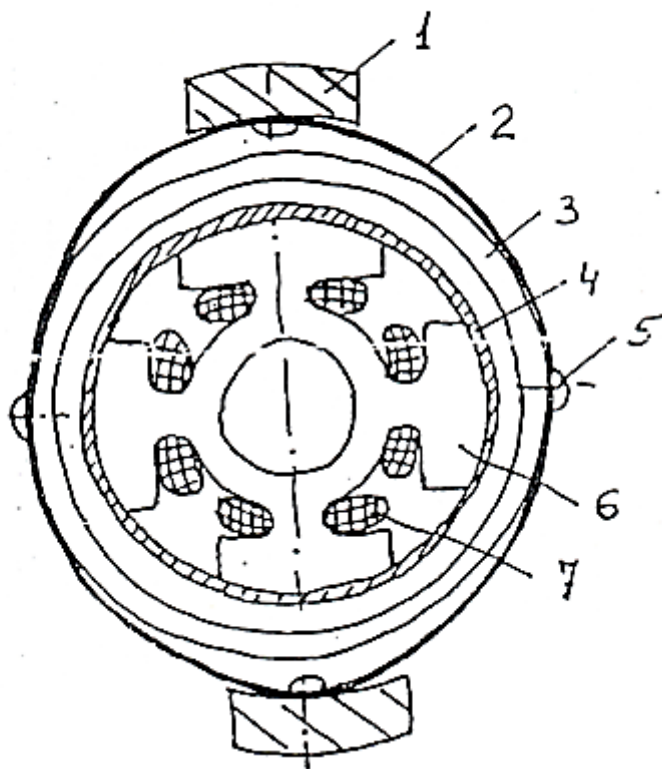
*Дальше кулачок движется к концевому выключателю КВ2 и нажимает на него. При этом разрывается цепь реле, и схема переходит в начальное состояние. Идут повторы.*

Недостаток этой схемы: большая скорость вращения ротора двигателя, сильный износ зубчатых колёсиков редуктора. Выключатель может переключаться раз в минуту или раз в две минуты. Пока самолёт летает, гироскопы всё время испытывают это переключение. Редуктор то в одну сторону крутится, то в другую, и это должно продолжаться много тысяч часов. Обычно через 500 часов редуктор изнашивается. Колёсики теряют форму, зубчики ещё не отваливаются, но эвольвенты уже не будет. То есть срок службы такого привода ограничен.

Хорошо бы поставить два двигателя с одной и с другой стороны. Но это асинхронные двигатели, у них есть скольжение. Если есть скольжение, то угол поворота двух двигателей может быть разным, а для точной работы трехколёсных подшипников желательно, чтобы всё время шло по одной и той же траектории. Поэтому, чтобы обеспечить эту траекторию, делается один двигатель, а через всю конструкцию гироскопа надо пропустить вал, от которого будет крутиться второе промежуточное кольцо. Это ещё один недостаток.

От одного из этих недостатков, а именно от износа подшипников (редуктора), свободен двигатель, изображённый на рисуночке — двигатель с катящимся ротором.

*Двигатель с катящимся ротором*

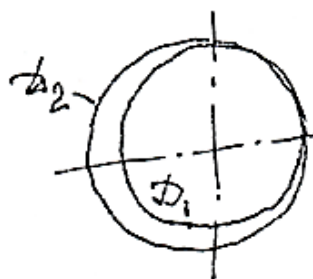


Что в него входит? Входит статор внутри. Статор имеет колечко, по которому скользит ротор. Ротор (3) из магнитомягкого материала имеет диаметр больше, чем диаметр колечка (4), между ними имеется воздушный зазор. Ротор укреплен в системе, связанной с промежуточным кольцом, с помощью двух плоских пружинок (2). Эти пружинки позволяют ротору смещаться относительно статора. Пружинки деформируются, и в процессе этого смещения ротор приходит в соприкосновение со скользящим кольцом (4). У статора, как и у двухфазного индукционного двигателя, имеется вектор магнитного поля, который крутится со скоростью 24 000 оборотов в минуту. К этому магнитному полю притягивается ротор (к кончику вектора). Он притянулся, соприкоснулся с кольцом (4), прижался к нему электромагнитной силой. Магнитное поле перемещается по кругу, следовательно, точка, к которой прижался ротор, всё время смещается по кругу следом за вектором. Вращения (самого ротора как целого) нет, потому что

он всегда прижат к кольцу, и момент трения удерживает его от поворота, но происходит обкатывание.

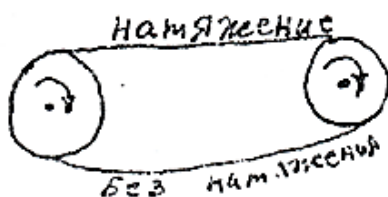
Обратите внимание, что полная длина окружности у колечка (4) и полная длина внутренней окружности у ротора (3) разные. Если магнитное поле совершает полный круг, то точка контакта смещается на угол  $2\pi$ . Но поскольку движение ротора идёт без проскальзывания по поверхности кольца (4), путь точки соприкосновения будет равен длине окружности кольца. А у ротора длина внутренней окружности больше. В результате ротор вынужден повернуться на уголок  $\beta$ , который равен  $2\pi \cdot (D_2 - D_1) / D_2$ . Этот уголок маленький. Цикл поворота магнитного поля — полный оборот, а ротор повернулся, ну, на 1 градус. За счёт того, что здесь имеется скольжение (качение) двух поверхностей друг по дружке, получается очень большой коэффициент редукции без всяких зубчатых колёс, просто за счёт разницы двух диаметров.

Коэффициент редукции определяется как  $2\pi / \beta = D_2 / (D_2 - D_1)$ .



Путь точки контакта за период питающего напряжения равен  $\pi D_1$   
он меньше длины окружности  $\pi D_2$   
По наружной окружности точка контакта не дойдёт до полного оборота на расстояние  $\pi(D_2 - D_1)$ , следовательно наружное кольцо повернется на угол  $\beta = \frac{2\pi(D_2 - D_1)}{D_2}$ ,

а коэффициент редукции  $i = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{D_2}{D_2 - D_1}$



Может быть скольжение используется один двигатель и вал.

Поскольку коэффициент редукции получается без зубчатых колёс, здесь нет и износа. Поэтому не засоряет прибор.

Справа и слева от giroузла этот вал всё-таки приходится сохранить.

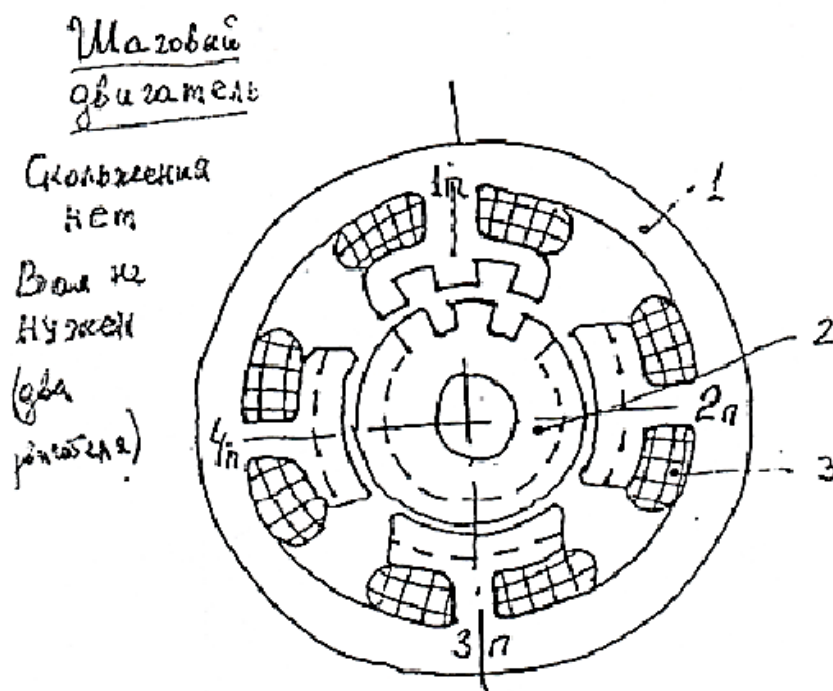
*В состав входит статор с двухфазным питанием. На полюса статора надето немагнитное колечко (4). С поверхностью этого колечка соприкасается ротор. Между внутренней поверхностью ротора и наружной поверхностью кольца имеется воздушный зазор. Крепление ротора осуществляется с помощью плоской пружинки (2). С одной стороны пружинка прикреплена к ротору (точка 5), с другой — к водилу (1), которое связано с промежуточным кольцом трехкольцевого подшипника.*

*Магнитное поле статора притягивает ротор до соприкосновения с кольцом. Так как вектор магнитного поля крутится, следом за ним будет перемещаться точка притяжения. За цикл питающего напряжения точка соприкосновения опишет полную окружность (угол  $2\pi$ ). Но так как длина внутренней окружности у ротора больше, чем окружность кольца, ротор вынужден будет повернуться на угол  $\beta$ . Скорость вращения ротора получается маленькой.*

*Поскольку при работе этого двигателя ротор может проскальзывать по кольцу (4), это называется упругое проскальзывание. Пример с ременной передачей: ведущий шкив вращается, ведомый сопротивляется, верхняя часть ремня натянута и удлинилась, нижняя нет. Удлинение пропадает на поверхности шкива — это упругое проскальзывание. Также и здесь. Этот двигатель лучше первого варианта, так как нет износа, хотя вал всё равно нужен. Ещё одна особенность — он очень противно визжит при работе.*

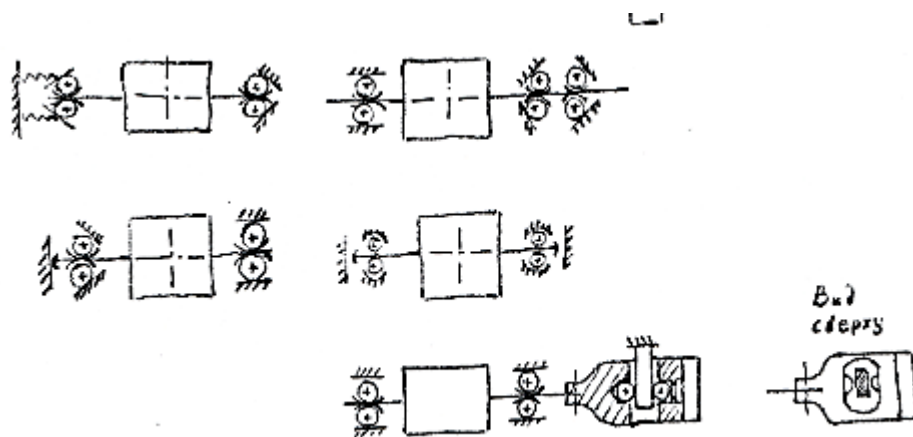
Теперь третий тип двигателя — шаговый двигатель. У него имеется наружный статор с зубчиками и ротор с зубчиками. Число зубчиков у ротора на 1 (или больше, или меньше) отличается от числа зубчиков статора.





В этом двигателе электронной схемой осуществляется переключение обмоток: 1, 2, 3, 4. Когда включается первая обмотка, зубчики ротора устанавливаются напротив зубчиков первого полюса статора. Центральный зубчик стоит точно посередине, а правый и левый чуть смещены. При этом положение зубчиков ротора относительно зубчиков 2-го полюса статора будет смещено на  $1/4$  ширины зуба, у 3-го — на  $1/2$ , у 4-го — на  $3/4$ .

Когда переключаем ток на вторую обмотку, возникает сила, поворачивающая ротор в согласованное положение со вторым полюсом — ротор поворачивается на  $1/4$  зуба. Потом 3-й, потом 4-й. За цикл переключения (1-2-3-4) ротор поворачивается на 1 зубчик. Здесь жёсткое соответствие между импульсами и углом поворота, никакого скольжения нет. Значит, нет необходимости делать этот вал через весь прибор — можно поставить шаговые двигатели с двух сторон. Редукторы не нужны, он сам медленно крутится. Это хороший привод для трехкольцевого подшипника.



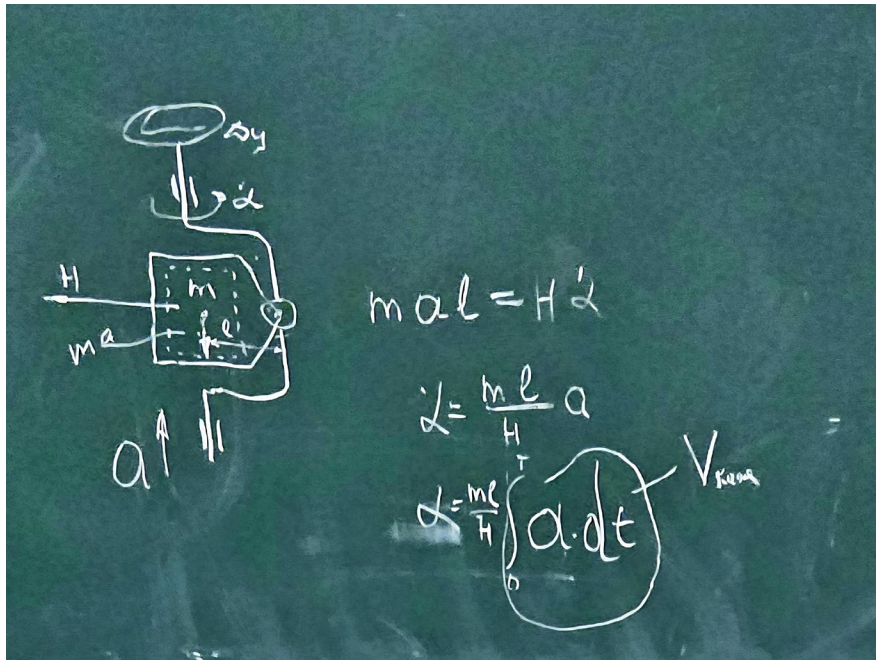
А вот двухкольцевой радиально-упорный подшипник. Тут вал, пята (уже не шариком), и подшипник взаимодействует с валом, внутреннего кольца нет.

По конструкциям подшипников:

1. Верхний подшипник с гладкой втулкой (маленький момент трения, но не держит осевой нагрузки).
2. Радиальный подшипник.
3. Радиально-упорный подшипник.
4. Подшипниковая пара с двумя гладкими втулками и бобышкой на конце вала, в которую входит сухарь.

Вопрос: чем плоха схема с двумя радиально-упорными подшипниками в упор? Из-за теплового расширения. Ось вытягивается и может заклинить подшипники. Схема с тремя подшипниками (где один с гладкой втулкой) допускает смещения при тепловом расширении.

Теперь о применении. Я вам роздал листочки. Там изображен Гироинтегратор линейных ускорений (ГИЛУ).



Гироскоп подвешен с помощью подшипников так, что у него есть маятниковый момент. Центр масс смещён относительно точки подвеса на расстояние  $L$ . При ускорении  $a$  возникает инерционная  $ma$ , момент  $maL$ . Он уравнивается гироскопическим моментом  $H \cdot \dot{\alpha}$ . Отсюда угол поворота  $\alpha$  будет равен интегралу от  $(mL/H) \cdot a \cdot dt$ . Этот интеграл есть кажущаяся скорость. Этот прибор измеряет скорость ракеты. Немцы (Фау-2) использовали такой прибор.



Теперь о подшипниках. Можно ли сделать трехкольцевой подвес на обычных двухкольцевых подшипниках? Можно (схема под интегратором).

Нужно знать допустимую статическую нагрузку. Теория сложная (профессор Матвеев занимался), но для практики используются эмпирические формулы (так как разброс параметров реальных подшипников настолько велик):

Радиальная нагрузка:  $P = 12.5 \cdot Z \cdot D^2$  (где  $Z$  — число шариков,  $D$  — диаметр шарика).

Осевая нагрузка:  $A = 15 \cdot Z \cdot D^2$  (для радиального) или с коэффициентами для радиально-упорных (зависит от угла контакта  $\beta$ ).

Допустимая статическая нагрузка.

<u>Радиальный</u>	<u>Радиально-упорный</u>
$R_{\text{стат}} = 12.5 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \text{ [Н]}$	$R_{\text{ст}} = 12.5 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \cos \beta$
$A_{\text{стат}} = 15 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \text{ [Н]}$	$A_{\text{ст}} = 16 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \text{ при } \beta = 12^\circ; A_{\text{ст}} = 20 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \text{ при } \beta = 26^\circ$
$[d_{\text{ш}}] \text{ мм}$	$A_{\text{ст}} = 23 Z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \text{ при } \beta = 36^\circ$

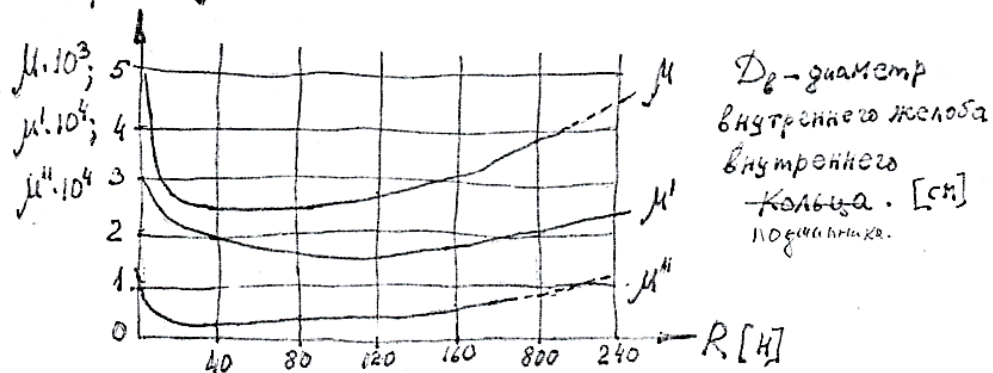
Записки по расчету  $R, A$  смотреть:

- 1) Сидянский Я.А. и др. «Металлы и узлы гидроскопических приборов», глава 1 изд. Машиностроение
- 2) «Гидроскопические системы» под ред. Гельперс Э.С. часть III § 10.3

Аналогичный подход применяется и к расчету момента трения. Момент трения. Точный расчёт бессмысленен из-за разброса параметров (до 500% в одной партии). Пользуемся эмпирическими формулами. Полный момент трения складывается из момента холостого хода (ненагруженного подшипника) и составляющей, зависящей от нагрузки и коэффициента трения  $\mu$ . Величина этого коэффициента зависит от класса точности подшипника (нормальный, высокий или прецизионный) и обычно составляет величину порядка  $10^{-3}$ .

### Трехколенные подшипники.

из сдвига  $M_{\text{тр}} = 0,5 \mu \cdot D_e \cdot R$ ;  $M_{\text{тр. I}} = 0,5 \mu' D_e R$ ;  $M_{\text{тр. II}} = 0,5 \mu'' D_e R$



При наличии осевой нагрузки  $A$  на шарик радиально упорного подшипника и на лату:

(с 306095; с 300095)

$$M_{\text{тр. I}} \approx (2,5 + 0,36A) \cdot 10^{-3} \text{ [сНсм]}$$

(на упорн. подшип)

$$M_{\text{тр. II}} \approx (3,6 + 0,29A) \cdot 10^{-3} \text{ [сНсм]}$$

(на лату)

Большой разброс  $M_{\text{тр}}$  (~500%)

Момент трения ненагруженного подшипника  $M_0$ .

Момент трения с нагрузкой:  $M = M_0 + \mu(R, A)$ .

Коэффициент трения  $\mu$  зависит от нагрузки.

Момент трения первой разности (при вращении колец в разные стороны) значительно меньше.

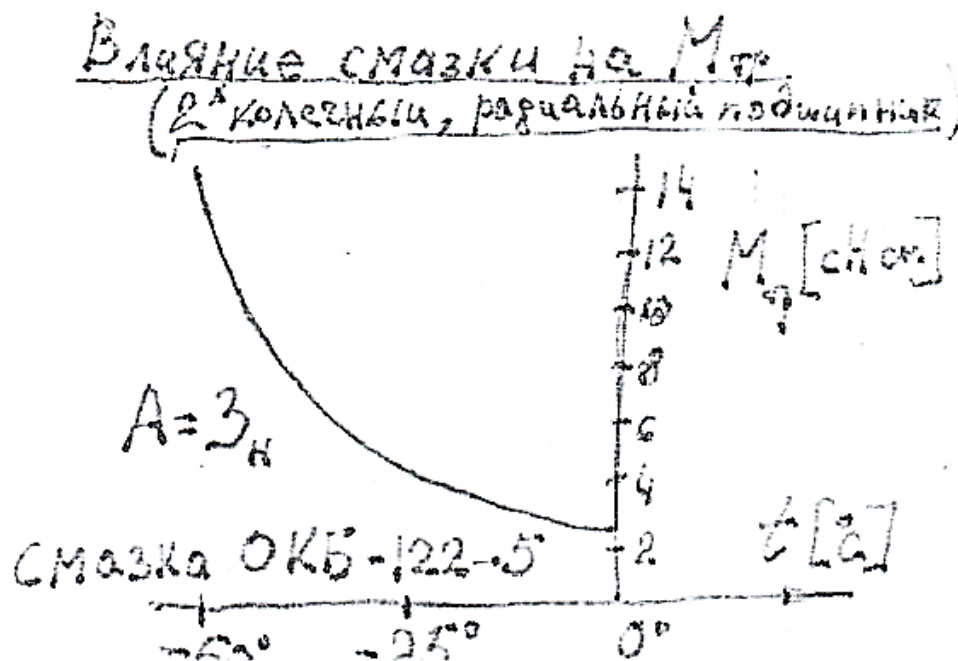
При наличии реверса (момент второй разности) коэффициент трения еще меньше (на порядок).

Главное преимущество трехколевых схем раскрывается при анализе моментов так называемых первой и второй разности. Если промежуточное кольцо не вращается, момент трения определяется стандартным коэффициентом  $\mu$ . Однако при вращении колец в разные стороны (момент первой разности) или при организации реверса (момент второй разности) используются коэффициенты  $\mu'$  и  $\mu''$ . Эти коэффициенты имеют порядок  $10^{-4}$ , то есть они в 10 раз меньше обычного коэффициента трения. В результате применения реверса реальный коэффи-



коэффициент трения в узле может снизиться примерно в 100 раз по сравнению с обычным подшипником без оживления, что критически важно для точности гироскопических приборов.

Смазка также сильно влияет на момент трения (график зависимости от температуры для смазки ОКБ-122-5).

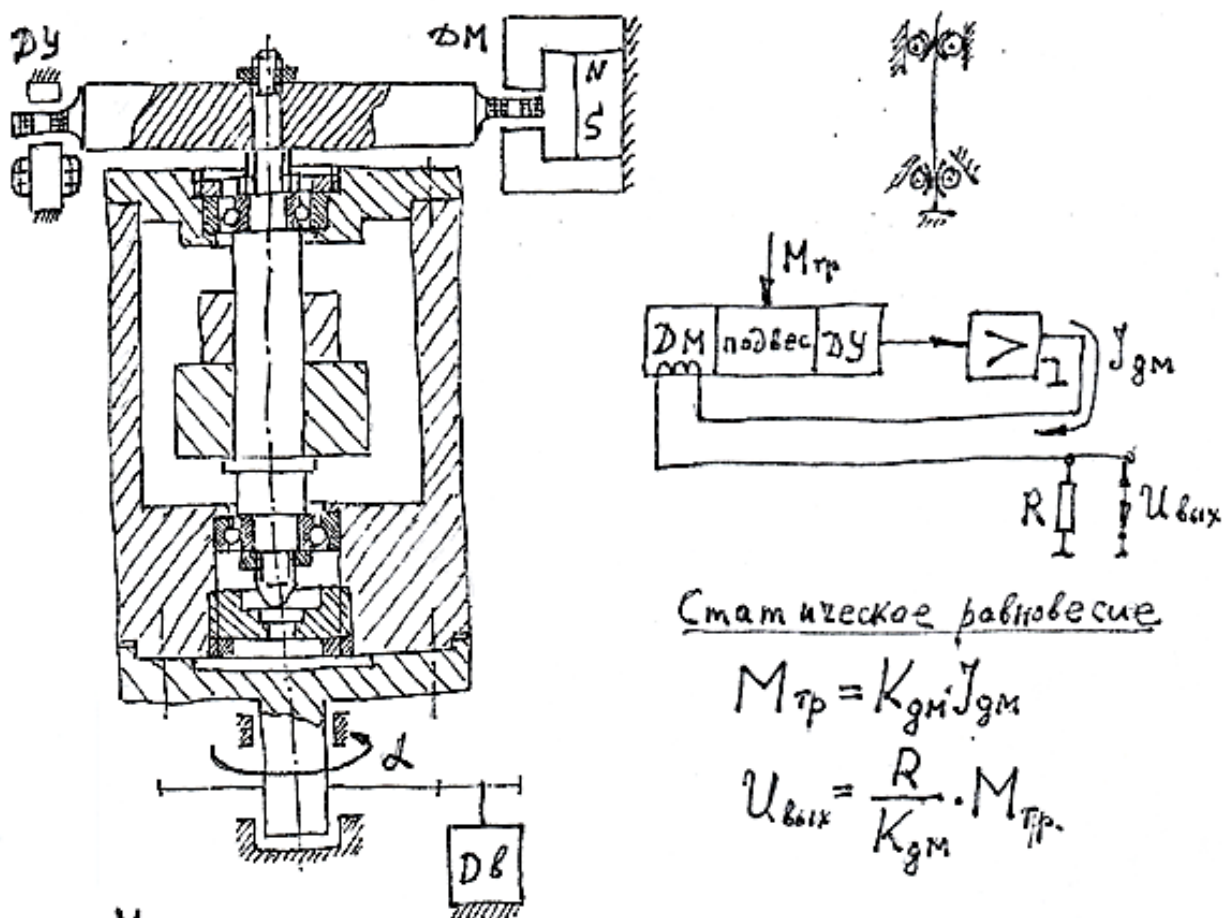


Экспериментальная проверка момента трения для инженера-разработчика является обязательной процедурой, поскольку полагаться исключительно на паспортные данные подшипников нельзя. Дело в том, что приводимые заводами сведения о моменте трения, как правило, существенно завышены. Производителю невыгодно указывать характеристики самых точных образцов, так как в партии может оказаться значительный процент изделий, не дотягивающих до идеала. Заводу проще заявить в паспорте значение момента трения, которое в несколько раз превышает реальный средний показатель; в этом случае вся поставленная партия гарантированно уложится в нормативы, и претензий по качеству не возникнет. Именно поэтому для получения достоверных данных о сопротивлении в опорах необходимо проводить собственные измерения на стенде.

Для таких исследований используется специальная установка, работающая по принципу обратной связи. Конструктивно она представляет собой вращающийся наружный корпус, приводимый в движение двигателем, внутри которого

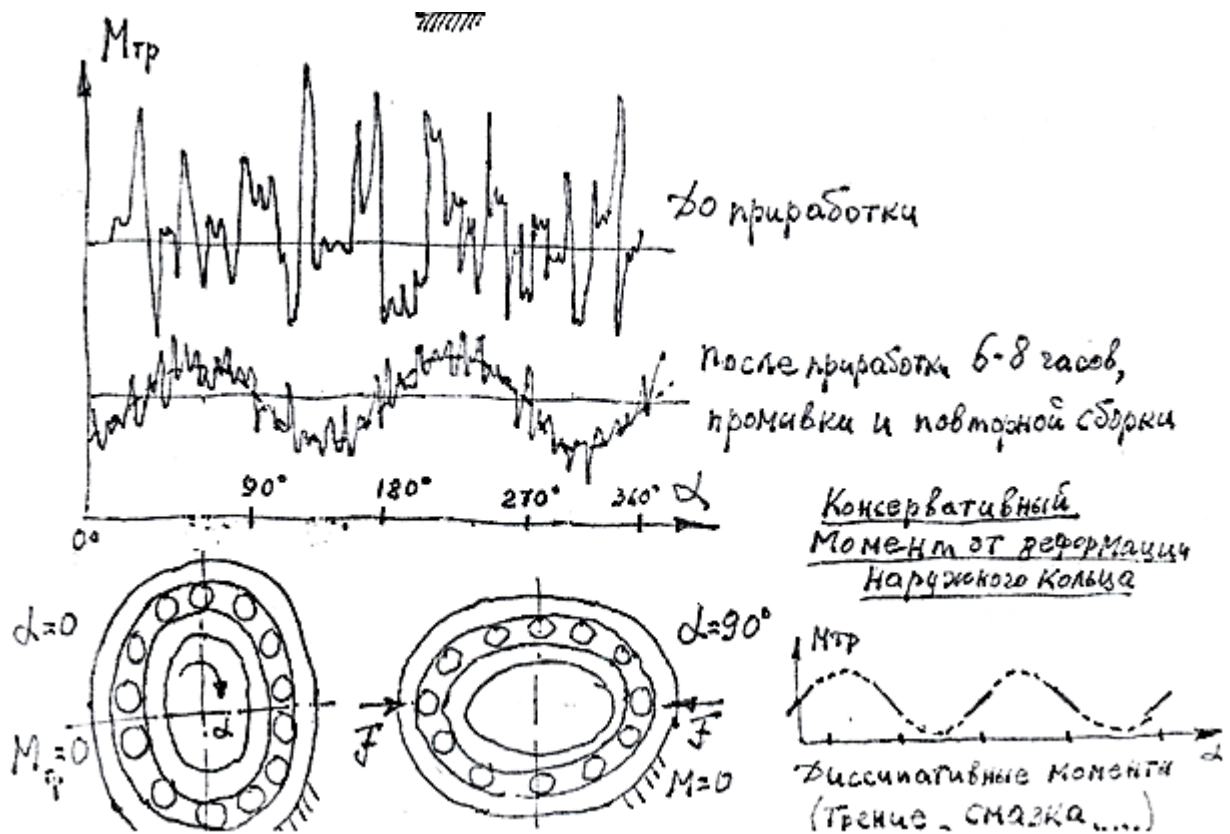
размещены испытуемые подшипники, а на вал навешиваются грузы, имитирующие реальную осевую или радиальную нагрузку. На самом валу установлены датчик угла и датчик момента. Работает схема следующим образом: когда внешний корпус начинает вращаться, возникающий в подшипниках момент трения пытается увлечь за собой внутренний вал. Как только вал срагивается с места, датчик угла фиксирует это микроперемещение и через усилитель подает сигнал на датчик момента. Тот, в свою очередь, создает встречное усилие, которое останавливает вращение вала и удерживает его в равновесии. Поскольку компенсирующий момент равен моменту трения, величина тока, протекающего через датчик момента, становится прямой мерой измеряемого трения, которую можно записать в виде графика.

### Экспериментальное исследование Мтр.



Получаемый график момента трения изначально выглядит хаотичным, со множеством резких всплесков, обусловленных неприработанными поверхно-

стями и микрозагрязнениями. Однако после процедуры приработки, которая может длиться 6–8 часов, график сглаживается, и на нем отчетливо выделяются две составляющие: консервативная и диссипативная. Консервативный момент проявляется в виде синусоиды и имеет упругую природу, связанную с геометрическим несовершенством — овальностью колец подшипника. Когда оси эллипсов внутреннего и наружного колец совпадают, момент равен нулю, но при повороте на 90 градусов длинная ось внутреннего кольца начинает распиравать наружное, деформируя его. Наружное кольцо, работая как пружина, стремится сжаться обратно, создавая возвращающий момент. Этот процесс обратим и формирует волну на графике.



Поверх этой синусоиды накладываются случайные всплески — это диссипативный момент, представляющий собой необратимые потери энергии на нагрев. Эти пики вызваны трением скольжения, микронеровностями и, что особенно важно, вязким сопротивлением смазки.



У нас есть электрическая пружина либо механическая пружина (если рассматривать другую схему), которая не даёт гироскопу повернуться под действием гироскопического момента.

Уравнение движения:  $J\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + K\beta = M_{\Sigma}$ .

дуссэп:

$$\overline{M}^{\Sigma} = \overline{M}^{\text{гир}} + \overline{M}^{\text{сопр}} \rightarrow \ddot{\beta} = \frac{M^{\Sigma}}{J} \rightarrow \dot{\beta}, \beta$$

$$\overline{M}^{\Sigma} = \overline{M}^{\text{гир}} + \overline{M}^{\text{сопр (трение)}}$$

$$M_{\Sigma} = M_{\text{гир}} \leftarrow J, DM \leftarrow R\dot{\beta}$$

У нас есть датчик угла и датчик момента — та самая электрическая пружина, которая работает. Как только появляется угол, датчик угла начинает его измерять. После датчика угла через обратную связь работает датчик момента, который в статическом равновесии по величине должен равняться суммарному моменту.

Я не зря здесь разделил гироскопический момент и суммарный момент. Особенность механической системы, связанная с этим подвижным узлом, заключённым в какой-то пока неизвестный нам подвес, заключается в том, что суммарно действующий момент складывается как гироскопический плюс момент сопротивления. То есть гироскопический момент не является единственным моментом, который здесь действует, а есть ещё некоторый момент сопротивления (момент трения), который тоже входит в этот суммарный момент. И который датчик момента тоже компенсирует.

Проблема этого измерительного устройства состоит в том, что полезная информация у выхода берётся из цепи датчика момента. Соответственно, датчик момента вместо того, чтобы нам говорить про гироскопический момент (который равен  $H\omega$ , где  $H$  известно, а  $\omega$  определяется), в равенство даёт ещё и какой-то неизвестный момент сопротивления, который нам не нужен и который является прямой ошибкой. Соответственно, этот момент сопротивления, момент трения, по сути, нужно каким-то образом убрать.

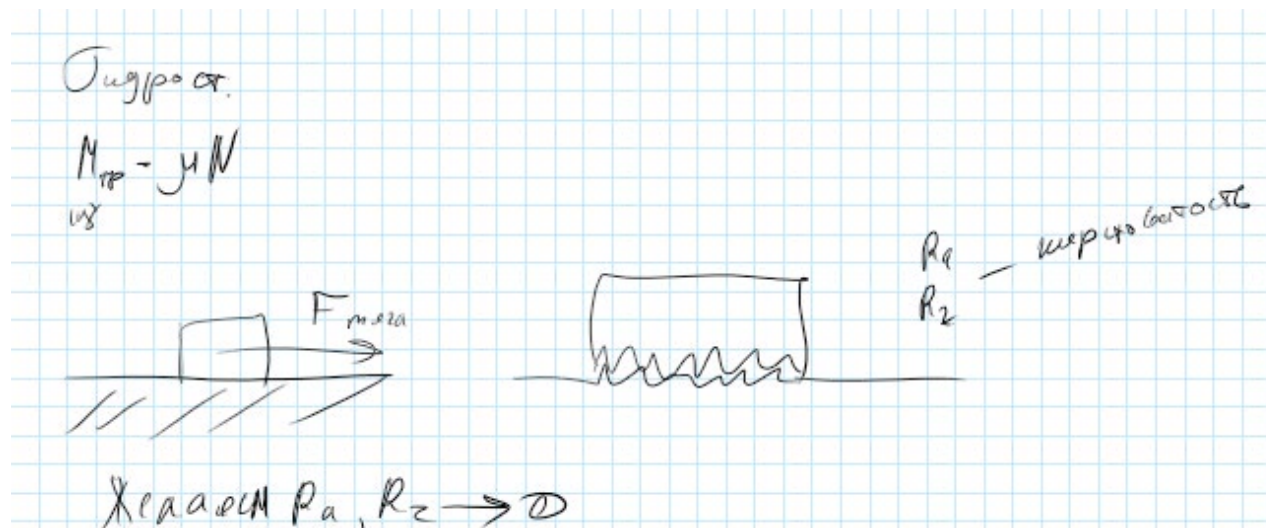


Мы рассмотрели шарикоподшипники. Можно ставить шарикоподшипники более высокого качества. Можно применять другую схему шарикоподшипников, то есть использовать трехкольцевой подшипник. Допустим, когда у вас момент трения компенсируется в так называемые периоды реверса: алгоритмически за один период эта компонента обнуляется. А можно применять другие всевозможные схемы, одной из которых является та схема, которую я вам сейчас покажу.

Это так называемый поплавковый подвес или гидростатический подвес.

. Мы сейчас с вами вот в этой схеме пришли к проблеме, связанной с подвесом. Подвес создаёт ненужные моменты, которые нужно уменьшать. Можно шарикоподшипник улучшать, а можно применять другие типы подвесов, например, гидростатический.

Момент трения в общем смысле определяется как коэффициент трения, умноженный на нормальную силу реакции. Соответственно, чтобы убрать момент трения (считаем, что здесь момент сухого трения, есть еще вязкое трение), нам нужно либо уменьшить коэффициент трения, либо убрать нормальную силу  $N$ .



Давайте последовательно: что такое коэффициент трения и как можно его уменьшить? Уменьшить можно, если поверхности более гладкие. Любая поверхность кажется гладкой, но по факту такой не является.



Мы нарисовали поверхности гладкими, но в реальности они имеют шероховатость. Кажется, что они должны скользить, но по факту происходят зацепления между поверхностями. Эта величина называется шероховатостью поверхности ( $R_a$  или  $R_z$ ). Чем ниже шероховатость, тем качественнее деталь.

Хотелось бы иметь маленькие шероховатости. В реальности, забегая вперёд, это не приведёт к полному результату, но можно уменьшить коэффициент трения за счёт уменьшения шероховатости.

Другой момент: коэффициент трения зависит от так называемого пятна контакта. В подшипниках это наиболее явно можно проследить. Если шарик контактирует с поверхностью по некоторой площади, либо только одной точкой. Чем больше пятно контакта, тем больше момент трения. В идеале хотелось бы иметь контакт в точке, но, вспоминая шарикоподшипники, предварительный натяг приводит к деформации шариков и колец (в пределах упругой зоны). Изменяется геометрия, увеличивается пятно контакта.

Можно уменьшить предварительный натяг (у некоторых из вас в курсовом проекте есть ДУС-05, где натяг уменьшен для снижения трения).

Как ещё бороться? Можно добавить смазку. Сделать прослойку, чтобы гребни шероховатостей не заходили друг в друга. Материал будет находиться между двумя соприкасающимися поверхностями, «приподнимая» одну над другой. Коэффициент трения можно чуть-чуть уменьшить, но нельзя свести в ноль. При этом смазку нужно добавлять дозированно: если добавить слишком много, мы от сухого трения перейдём к вязкому трению (пропорциональному скорости), а это уже другой силовой фактор.

И последний момент касательно шероховатости. Если сделать поверхность идеально гладкой (шероховатость стремится к нулю), мы достигнем обратного эффекта. Атомарные связи между атомами основания и движущегося элемента вступят во взаимодействие — произойдет оптическое склеивание (или холодная сварка). Это используется, например, в лазерных гироскопах для стыковки стекол. Поэтому просто уменьшать коэффициент трения до нуля нельзя.

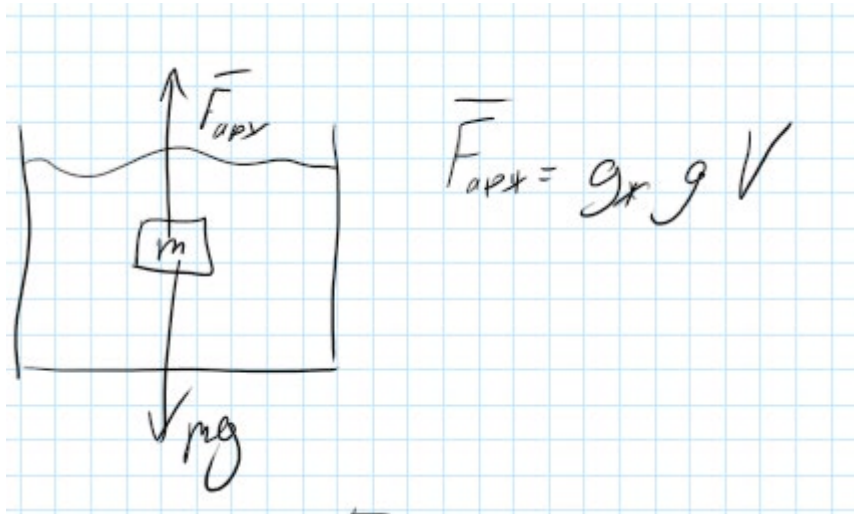
Значит, нужно бороться с нормальной силой реакции ( $N$ ).

В статике сила нормального давления равна массе на ускорение ( $N = m \cdot g$ ).

Если мы будем уменьшать массу  $m$ , то снизятся параметры гироскопа (кинетический момент), и мы потеряем в качестве датчика. Поэтому нужно, не трогая массу, попытаться занулить  $N$ .

Любая масса, погруженная в объём жидкости, будет испытывать действие силы Архимеда (силы гидростатического взвешивания).

Сила Архимеда:



В статике возможно три условия:

1.  $mg > F_A$  — тело тонет.
2.  $mg < F_A$  — тело всплывает.
3.  $mg = F_A$  — нулевая плавучесть.

Понятие нулевой плавучести означает, что под действием силы тяжести тело не всплывает и не тонет.

Предположим, что мы массу заменили на весь гиروزел (поплавок с роторными частями датчиков углов и момента). Сам поплавок погружён в жидкость. У него есть опоры (камни), но мы сделаем так, чтобы он мог касаться их или быть с небольшим зазором (единицы микрометров).

Если мы добьёмся условия, чтобы сила Архимеда, действующая на поплавок (цилиндрическая часть), компенсировала вес, то нормальная реакция в опорах ( $N$ ) будет равна нулю.

То есть плотность жидкости должна равняться усреднённой плотности самого тела (поплавка).

В этом случае мы обнуляем (или почти обнуляем) силу реакции  $N$ , а значит, и момент сухого трения становится практически равным нулю. Датчик момента компенсирует только гироскопический момент. Ошибка уменьшается.

Особенности конструирования:

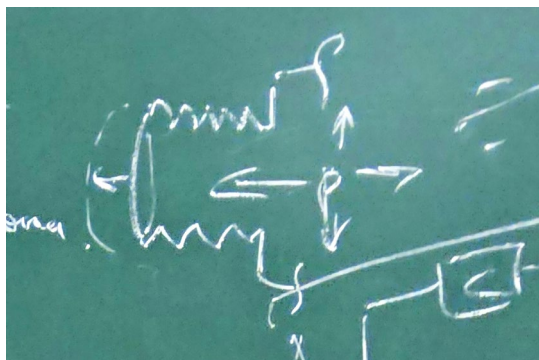
1. Температура. Плотность жидкости ( $\rho$ ) сильно зависит от температуры. Приборы с гидростатическим взвешиванием обязательно имеют систему термостатирования. Без неё плотность изменится, и равенство сил нарушится.

2. Демпфирование. Жидкость создаёт вязкое сопротивление (диссипативную силу, пропорциональную скорости). Это увеличивает коэффициент демпфирования ( $D$ ).

Следствие: в системах с большим демпфированием можно построить интегрирующий гироскоп. Если  $D$  велико, то в уравнении движения преобладает член  $D\dot{\beta}$ . Тогда  $D\dot{\beta} \approx H\omega$ . Если проинтегрировать обе части, то угол поворота гироскопа  $\beta$  будет пропорционален интегралу от угловой скорости (углу поворота основания).

3. Коррозия. Жидкость — агрессивная среда. Элементы конструкции не должны окисляться. Срок эксплуатации — десятки лет.

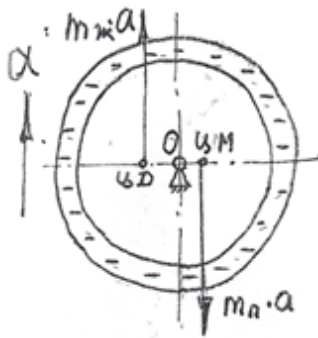
4. Тепловое расширение. При нагреве жидкость расширяется. Если объём замкнут жестко, давление разорвёт корпус. Для компенсации расширения используют специальный элемент — сильфон (гофрированная трубка, «гармошка»). Сильфон сжимается, предоставляя дополнительный объём для жидкости, и предотвращает разрыв корпуса.



### Точность:

Поплавковые (гидростатические) гироскопы на текущий момент являются самыми точными. Их дрейф (случайная составляющая погрешности) составляет порядка  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  градуса в час. Для сравнения, лазерные гироскопы имеют точность порядка  $10^{-2}$  градуса в час. Поэтому, несмотря на сложности, эта технология позволяет достичь высочайшей точности.

## Гидростатический подвод поплавковых приборов



Зазор между поплавком и стенками поплавок-вой камеры заполнен вязкой жидкостью с большой плотностью  $\rho_{ж} \approx 1,8 \dots 2 \text{ г/см}^3$  (Ньютоновская жидкость)

При равенстве средней плотности поплавка  $\rho_{пф} = \frac{m_{пф}}{V_{пф}}$  и  $\rho_{ж}$  поплавок обладает нулевой плавучестью.

Т.к.  $V_{пф} = V_{ж}$ , то  $m_{пф} = m_{ж}$  и действующие на поплавок при ускорении  $a$  инерционные силы  $m_{пф}a$  и  $m_{ж}a$  (Архимедова сила) равны. Если точки приложения сил (ЦМ и ЦД) совпадают, то при любой ориентации  $a$  поплавок будет невозмущаемым, а реакции в опорах поплавка равны нулю. Следовательно равным нулю будет и момент трения в опорах. Эта ситуация нарушится при изменении температуры  $\Delta t^\circ$ . Объем поплавка  $V_{пф}$  очень мало изменится при  $\Delta t^\circ$  (следовательно  $\rho_{пф} \approx \text{const}$ ), а плотность жидкости

$$\rho_{ж} = \rho_{ж0} (1 - \alpha_{ж} \Delta t^\circ), \text{ где } \rho_{ж0} \text{ — плотность при регулировке}$$

Нулевой плавучести поплавка, а температурный коэффициент объемного расширения жидкости  $\alpha_{ж} \approx 0,1 \frac{\%}{^\circ\text{C}}$ . Таким образом при  $\Delta t^\circ$  нарушается нулевая плавучесть поплавка и появляются реакции в его опорах, вызывающие появление момента трения.

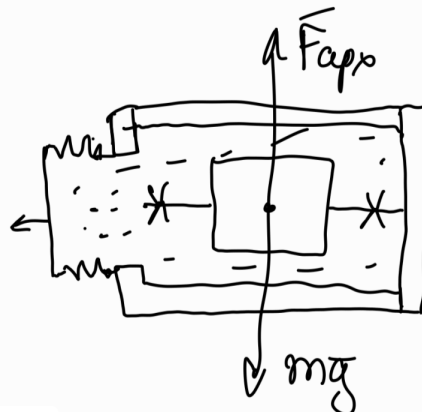
Температурное изменение объема жидкости требует введения в конструкцию корпуса поплавок-вого прибора упругого компенсатора (Сильфона или мембраны). Без них давление жидкости в поплавок-вой камере при нагреве может стать недопустимо большим и может вызвать как разгерметизацию корпуса прибора, так и деформацию поплавка.

Сильфон должен быть достаточно податлив, чтобы не создавать в полости прибора недопустимого давления при нагреве. В то же время он должен обладать достаточной жесткостью, чтобы обеспечивать срабатывание жидкости в поплавок-вой камере во всем диапазоне рабочих температур прибора ( $-55^\circ\text{C} \dots +80^\circ\text{C}$ ), для чего в процессе заполнения прибора жидкостью сильфон растянывается. При подрабатывании жидкости исключается образование в ней пузырьков паров, взаимодействующих с поплавком и создающих возмущающие моменты

# Лекция №20 1 декабря

Пришли к тому, что в классической физике трение может быть сухое, а может быть вязкое, мы поговорим про контактное трение, т.е. когда есть контакт одной поверхности с другой, и оно равняется произведению коэффициента трения на нормальную силу реакции  $F_{тр} = kN$ . Поплавковый подвес в данном случае не может изменить коэффициент трения, но может поработать с силой реакции, обеспечивая компенсацию силы  $m_{поплавка}g$ . Сила гидростатического вывешивания, в физике называемая силой Архимеда. Т.о. если достигаются искомые условия для поплавоквого подвеса – нулевая плавучесть, то  $mg = \rho_{ж}gV_{ж}$ , если рассматриваем приобретенное ускорение, то  $m_{па} = \rho_{жа}V_{ж}$ . Т.е. гидростатическое вывешивание компенсирует вес/реакцию опоры и тем самым в статике  $mg - F_a = N \rightarrow 0$ . Недостатком с точки зрения физики является зависимость силы Архимеда от плотности жидкости, необходимо использовать системы термостатирования для стабилизации в поплавоквом приборе величины плотности жидкости. Второй момент – сильфон: существуют разного вида термодинамические процессы. Рассмотрим закрытый объем,  $t_{окр} = 25^\circ$   $t_{раб} = 75-80^\circ$   $\Delta t = 50^\circ$ . Относительное удлинение объема составит  $(1/100 - 1/10)$ -ые доли процента при нагреве на  $1^\circ$ , что приведет к расширению на  $(0.5-5)\%$ , что в размерах поплавка достаточно много. Даже  $1\%$  изменение объема может привести к крайне негативным сценариям. Этот объем по самому слабому месту соединения вероятнее всего будет разрушен: образуется либо течь, либо будет планетообразный процесс, когда будет как шарик крышка просто вылетит из своего посадочного места (гироприбор разрушится) из-за сил гидростатического давления внутри. Для предотвращения этого в конструкции предусматривают объемную пружину, обычно ставят с торцов, который внутренней полостью касается жидкости.

цз (1):



$t_{раб} = 75^\circ C$   
 $t_{окр} = 25^\circ C$



Рис. 1.

Той же самой жидкостью, что находится в поплавковой камере, а снаружи обычное давление окр. среды или внутренний объем гироскопической системы, которая использует этот поплавковый прибор, обычно нормальное давление, можно осушение использовать, для осушения газы применяют водорода или азота осушенного, гелия. Если произойдет нагрев давление внутри прибора увеличится, давление снаружи останется тем же самым, соответственно сильфон расширится, т.е. стенки как у пружины растянутся и внутри объема станет чуть больше, давление выровняется. Будем считать давление во всех объеме прибора одинаковое и оно стабилизируется, оно станет чуть больше из-за того, что сильфон добавляет упругость, но это не приведет к разрушению прибора.

Тут про важность термостабилизации в поплавковом подвесе. ТКЛР = 1/10 %/°. В хороших случаях 1/100, поэтому у нас при 100 градусном изменении температуры будет 10% изменение объема, что очень даже плохо для поплавка. Это прочитайте очень даже понятно и по порядку расписано.

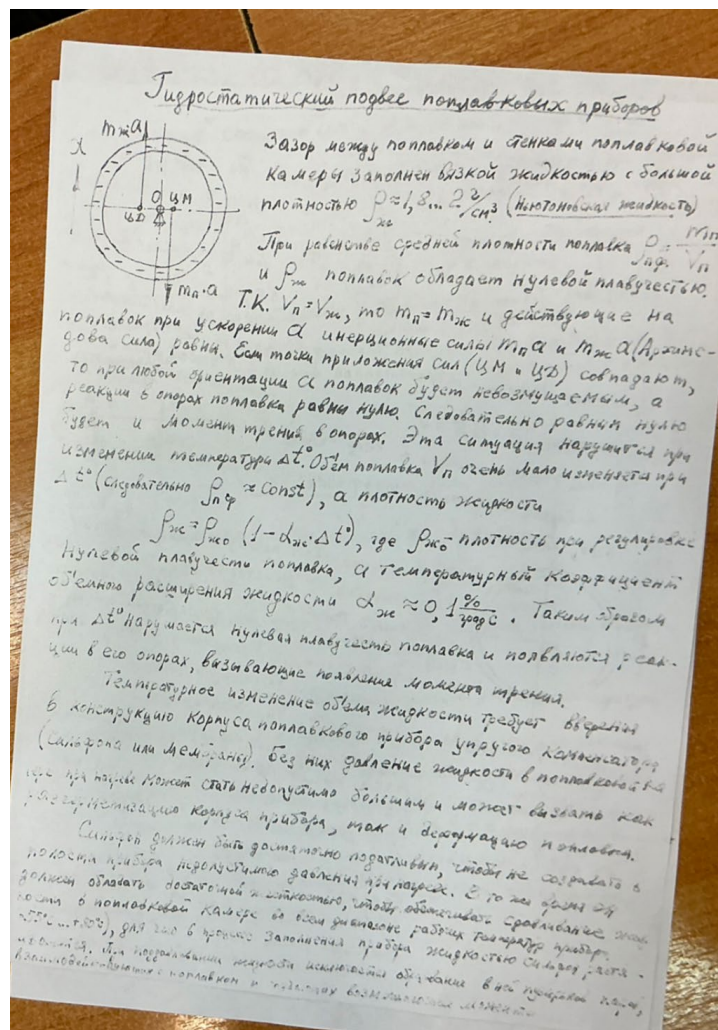


Рис. 2.

Прежде чем говорить про все силы, которые здесь действуют поговорим про вопросы балансировки поплавка. Здесь вопрос балансировки тоже подсвечен, здесь тоже стоят силы чуть в разных местах – этот вопрос и обсудим. Мы обозначали поплавок таким простым образом (цилиндром) с полуосями, цапфами за которые он крепится. В реальности мы рассматривали конструкцию дукошина: цилиндр, в котором стоит гиروزел остается, а на полуосях могут быть какие-нибудь навески с двух сторон. Т.е. объем или форма достаточно непростая может быть не цилиндрическая, это важно, потому что сила гидростатического взвешивания прикладывается не просто так, а строго в определенной точке, которая называется центром давлений. Это точка, где приложена равнодействующая сил давления, которая приложена, по сути, суммарно на поплавок исходя из его геометрической формы.

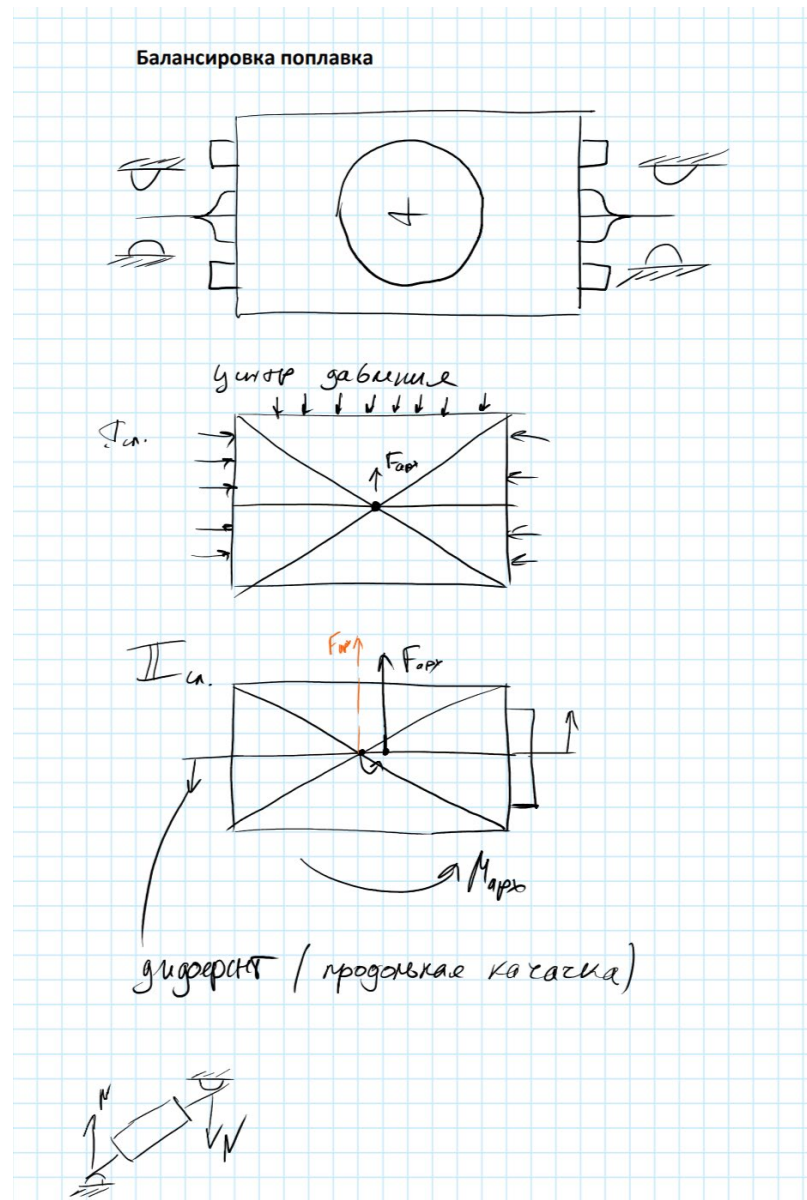


Рис. 3.

В идеальном случае в сечении цилиндра (прямоугольник) это будет геом. центр цилиндра на оси вращения и именно в этой точке будет приложена реакция силы Архимеда. П сл. с элементами ДУ и ДМ, тогда как можно догадаться центр давления на небольшое значение уплывет. Правило переноса сил в теормех: если ту силу пытаться обратно привести в исходное положение ЦД для поплавка, то эту силу я могу просто перенести туда, но относительно той точки должны компенсировать момент силы, который будет создаваться. В данном случае перенос вектора силы допустим, но необходимо компенсировать момент, который возникает из-за этого. Если нужно по каким-то причинам неизвестно пока каким эту силу смещенного центра давления теперь вернуть обратно в геометрический центр поплавка – мы можем это сделать, но с учетом некоторого момента соответственно.  $F_N = F_{арх}$  та же самая сила, исходная сила относительно новой точки создавала момент, когда силу переместили необходимо компенсировать этот момент. Левая опора, цапфа пойдет вниз, правая – вверх и называется это дифферент или продольная качка (обычно говорят так для судов). Что приведет (последний рисунок) нижняя опора перекошена вниз, верхняя – вверх будут касаться цапфами поплавкового узла камниевых опор. По факту это камниевые упоры, они ограничители смещения. Этот зазор под действием этого момента перекроется, и мы вернемся к первоначальному случаю, когда будет контакт, а значит и будут силы нормальной реакции опоры и вернемся к трению, это нежелательный эффект, поэтому этот дестабилизирующий момент (от дифферента) нужно исключать. Каким образом исключать, в идеальном случае – делать симметричную конструкцию, если выступ есть с одной стороны, то пусть будет и с другой, в некотором пределе это можно использовать. Вспоминая дукошины, где вместо большего объема использовались вытеснители нужно помнить про рациональность, если эти объемы становятся совсем большими нужно искать другие пути. Другие пути – усовершенствованные конструкции – более рациональное использование внутреннего объема, внесение внутрь поплавка ДУ ДМ (?не пойми чо сказал?), либо дифференциальная схема ДУ ДМ нужно искусственно создать равный по величине момент в обратную сторону. Противодействие этого момента может выступать Ц.М. и момент небаланса, который в конструкции небольшой, но тоже есть.

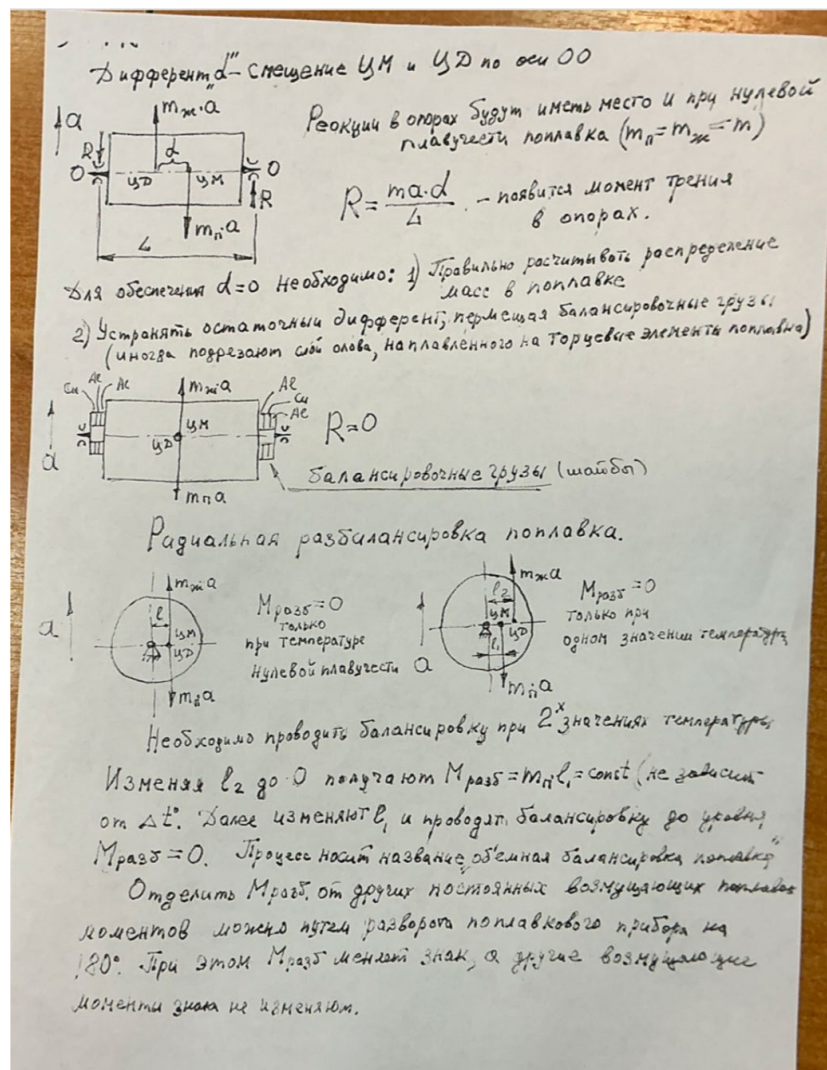


Рис. 4.

Это был центр давления, второй точкой, которая нас интересует является ЦМ, что нам больше знакомо, чем ЦД. ЦМ — это точка от которой до других точек объекта примерно равное расстояние, т.е. где произведение масс на расстояние в квадрате всегда не больше какой-то величины. С точки зрения динамики — точка куда можно приложить все равнодействующие силы приложенные к телу и внешних сил и не потерять кинемат свойств. Движение тела представленной в виде точки будет повторять движение как объема для которого поставлена данная точка ЦМ. ЦМ в идеальной конструкции из идеального материала, который изготовлен идеальными технологическими операциями будет совпадать с геом центром. ЦМ относительно геом центра будет сдвинут как вдоль оси цилиндра, так и вдоль оси.



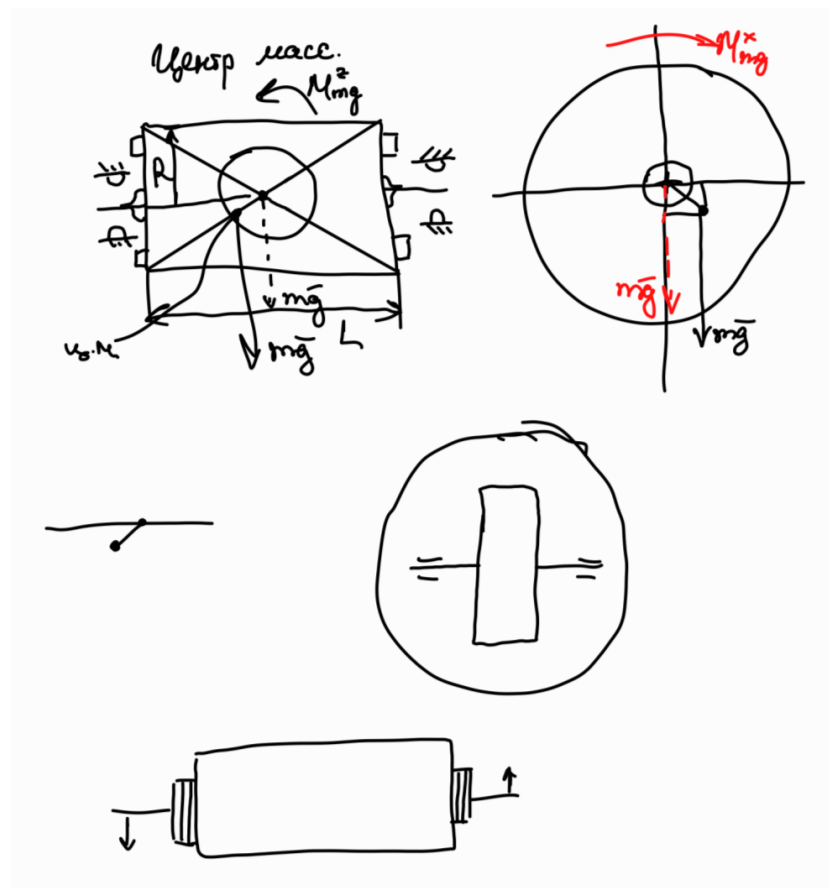


Рис. 5.

Может быть смещен в пространстве даже по всем трем координатам. В данном случае ЦМ – та точка, в которой приложена равнодействующая в том числе вес тела, которая будет для идеального случая закрепления создавать вес. Если мы оперируем неким понятием центра у этого подвеса у цапф и камней есть понятие центра относительно которого этот подвес сбалансирован, предположим что он в месте геом центра расположен, то тогда перенос силы тяжести к центру подвеса в эту же точку нужно добавить момент от убранной силы т.к. эта сила перенесена (на рисунке сверху есть). То же самое по другим осям:  $mg$  в геом центр и момент от перенесенной силы. В данном случае для ЦМ легко это представить даже опираясь на определение о равновесии всех сил приложенных к телу. У нас есть ось относительно которой ЦМ смещен. На примере качели: при смещенном ЦМ по трем осям качель будет смещена по двум направлениям. В данном случае будет действовать 2 момента и суммарно гиروزел будет поворачиваться по двум осям. Три момента (два от смещения ЦМ и один от смещения ЦД) будут дестабилизирующими для поплавкового узла и это приведет к силе реакция, т.е. поплавковой подвес будет не справляться взвешиванием гиروزла. Если не справляется значит есть доп. трение и этот прибор хуже чем нужно, а хотелось бы сделать лучше. Самый простой способ это если мы ЦД и моменты передвинем к геометрическому центру и моменты несбалансированности от положения ЦМ попытаемся скомпенсировать

между собой. На рис. 4. как раз это и нарисовано как по углу дифферента так и по рабочему углу бета, который в гироприборе возникает эти случаи рассмотрены. Главный способ – делать качественно прибор, делать симметрическую конструкцию и не предусматривает лишних изделий извне. Это возможно, но это достаточно сложно, нужно иметь некоторый опыт мастерство предвидеть некоторые операции которые будут в дальнейшем делаться. Размещение ДУ ДМ нужные операции для функционирования прибора, а не просто закинуть гироскоп внутрь поплавка. С точки зрения ЦМ внутри гироузла это ротор который опирается на опоры этой гироскопы, ротор как сам должен быть сбалансирован, так и вся его обвеска опоры накопитель смазки, токоподводы. Все это должно быть распределено в объеме примерно одинаково, особенно если говорим про поплавковый прибор, то есть задача привести ЦМ поплавка к геометрическому центру тоже. Это тоже грамотное конструирование показывает уровень инженеров. Первый самый очевидный и сложный подход. В реальности если учитывать физические эффекты температурный нагрев, расширение как жидкости так и материалов, а материалы распределены не равномерно. Физические процессы обуславливают возникновение небаланса в процессе нагрева, это тоже нужно учитывать, основной упор по балансировке как и по плавучести ведется с учетом рабочей температуры  $t_{\text{раб}} = 70-80^\circ$ , т.е. все процедуры балансировки обычно проводятся с учетом расширения материалов как поплавка так и внутренних элементов дабы не при комнатной температуре была сбалансированность, а при рабочей, так как нас не интересует сбалансирован ли он будучи выключенным. Все процедуры дополнительные будут проводиться при рабочей температуре.

1 способ грамотное конструирование и исключения небаланса

2 способ использовать взаимный небаланс ЦД и ЦМ. Компенсировать за счет момента от взвешивающей силы момент небаланса

3 способ также как и в балансировке гиросtabilизатора мы предусматриваем юстировочные элементы, а в самой конструкции могут быть предусмотрены балансировочные грузы, т.е. те винты которые сдвигают ЦМ на доли мм, чтобы точно совпали ЦМ и ЦД или ЦМ и центр подвеса, а большой сдвиг который необходимо обеспечить по трем осям с помощью грузиков рис. 4. размещаемых с торца. Грузики по форме однотипны – шайбы сажаются на полуоси и клеятся по центру и они выполняются из различным материалов. У нас указаны 2: Медь и алюминий, у них разная плотность соответственно разная масса. Добавляя или убирая груз мы можем смещать ЦД относительно начальной точки, если рассматривать ЦМ, то та же картина. Это балансировка дифферента в поплавке. Также важно не забывать что материалы должны быть коррозионно-стойкими т.к. там жидкость. Это



балансировка вдоль продольной оси, а по перпендикулярной оси можно конечно изогнутой формы кольца сделать, но это еще более трудоемкая задача.

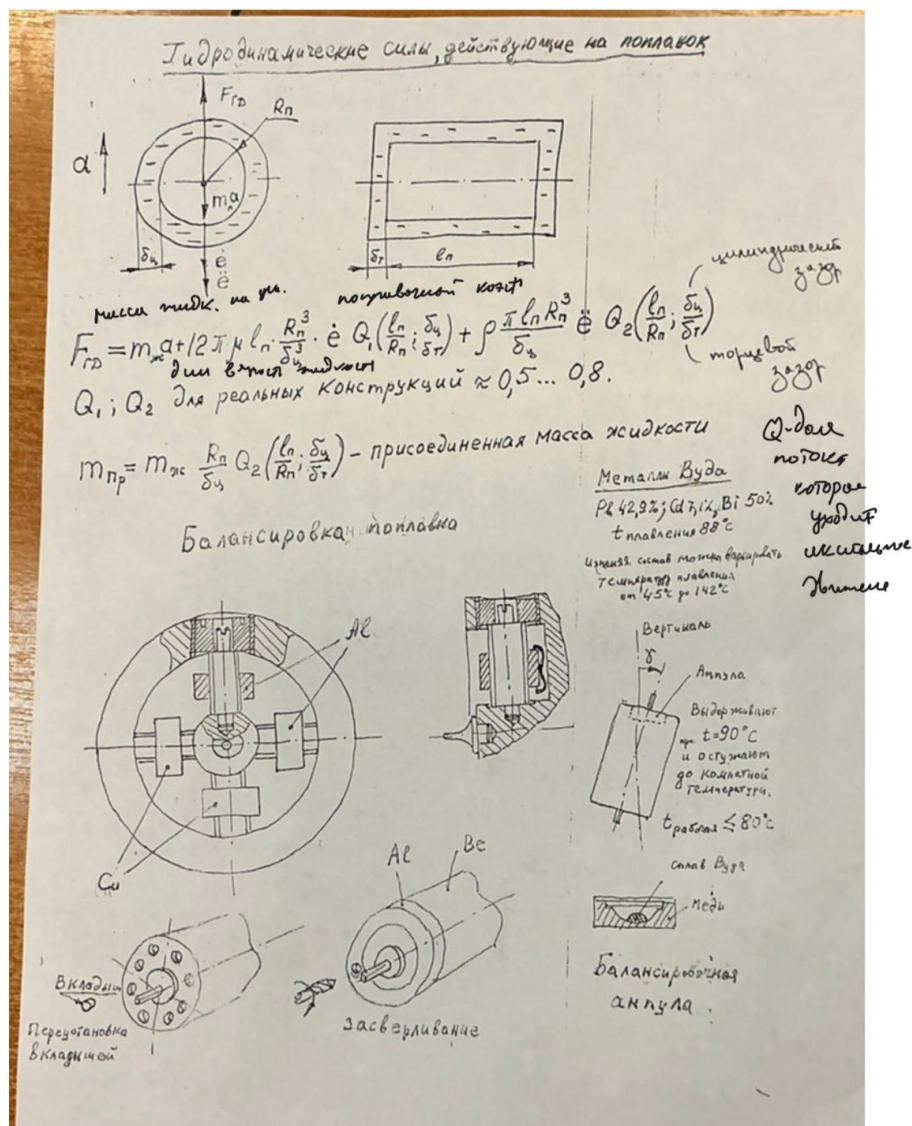


Рис. 6.

С торцов поплавок-ового узла и он предусматривает крестообразный элемент на который насаживаются шайбы и их может быть 4 шт. Это уже вопрос балансировки ротора гироскопа, он может совместить ЦМ главную ось инерции с осью вращения. Момент инерции всей конструкции привести к этой оси за счет грузов, если будем расширять грузы пропорционально, то скорее всего придется играть массами грузов, либо попарное смещение по одной из осей и соответственно смена радиусов, либо смена материалов Al, Си. Что позволит привести центр к другой оси. Мы получили небольшую маятниковость. Мы приведем по двум осям ЦМ поплавок. Если гироскоп нужно полное совпадение ЦМ с центром подвеса, если акселерометр, то маятниковость можно искусственно учесть несбалансированную массу к основной массе маятникового узла и алгоритмически считать, что

маятниковость расчетная и из-за технологической несбалансированности у нас у нас появится небольшая добавка скорректируются параметры прибора, но небольшая и сильно от номинальных значений не уйдем. В паспорте прибора это указывается.

Следующий подход применение ампул похожих на ЖМП, только ЖМП полностью заполнены жидкостью с пузырьком воздуха, а здесь обратная ситуация. Просто камера изолированная газовая, а внутри капля сплава Вуда. Это сплав 3-х металлов олово кадмий висмут 17.9, 2.1 и 80% при данном процентном соотношении плавление при 88°. В зависимости от процентного содержания меняется температуры плавления. Как используются для балансировки: если в гироузле по какой-то оси есть небаланс небольшой, большой не получится, нужны будут шайбы. Сплав Вуда это юстировочный элемент который позволяет на чуть-чуть подвинуть ЦМ. Как работает сплав. Ампула располагается на корпусе поплавка, либо внутри поплавок она каким-то образом укреплена, известно как располагается. Поплавки располагают таким образом, чтобы ампула могла бы скомпенсировать небаланс который есть в геом форме поплавка, но это делается при температуре плавления материала Вуда, т.е. гироузел нагревают до 88, сплав Вуда расплавляется его ставят пространственно по одной, по другой оси. Задача сделать так чтобы смещения не было. Необходимо чтобы гироузел в положении был сбалансирован. Рассчитывается положение при котором перетекание капли позволяет скомпенсировать небалансы и на приспособлении при температуре плавления или чуть выше нее на несколько градусов, затем гироузел в таком положении остывает до рабочей температуры и потом устанавливается обратно в приспособление для балансировки и проверяется балансировка, т.е. за счет перетекания материала внутри ампулы Вуда происходит балансировка поплавкового узла. На объемную балансировку капсула Вуда не влияет, располагается внутри поплавок, а мы работаем только с балансировкой ЦМ. Иногда в приборах средней точности используют более простые операции, допустим, в ДНГ материал не добавляют, высверливают материалы в специальных технологических кольцах и оправках, но для высокоточных приборах такое недостаточно. Например вот бериллиевый поплавок и на него приклеено алюминиевое кольцо, которое подвергается высверливанию с другой стороны от небаланса в данном случае. Делают углубление чтобы компенсировать небаланс (засверливание), есть обратная операция, когда в алюминиевом кольце есть отверстие и туда можно вставить некий грузик и компенсировать небаланс таким образом грузик может быть из разных материалов. Но главным недостатком этих вкладышей, шунтов является дискретность массы заготовки вставляемой в эти пазы и шажками будем массу изменять и сможем на крайне малую величину уменьшить, т.е. все

равно нужно будет использовать комбинаторику, вкладыш добавили чуть-чуть высверлили, в любом случае будут комбинации, одним способом не получится отбалансировать. Это весь перечень ТО, который используется для балансировки поплавка. Некоторые операции подходят также и для сухих гироскопов, где нет вопроса связанного с центром давления все эти вкладыши или высверливания пригодны и для сухих. У ДНГ специальные канавки делают или выпирающие элементы, которые убирают лазерной резкой, либо механически, если грубые какие-то приборы, просто испаряют материал и убирают излишки для балансировки это в общем роде общие ТО для всех быстровращающихся элементов и прецессионных приборов, где важна совпадение ЦМ с центром подвеса ну или ЦМ с ЦД и центром подвеса для поплавковых приборов. Величины небаланса - это сотые, тысячные доли от всей массы.  $\Delta mL = 0.001 \dots 0.01 \text{ mR}$ ,  $L$  - длина гироузла. И это довольно грубо, если говорить про высокоскоростные подвесы, магнитные подвесы, так соответственно еще меньше  $10^{-4} - 10^{-5}$  относительных единиц. Это радиус значений с учетом того, что точность прибора должна соответствовать миллионной доли. Конструктивные решения – компенсация несбалансированности ЦМ может компенсироваться ЦД, соответственно эти степени в разности более высоких порядков, здесь можно вспомнить трехколенные подшипники и подшипники роторейс, момент первой разности, момент второй разности похожи на взаимную компенсацию. Одно компенсирует другое ну или простая дифференциальная схема. Обуславливает хорошее качество поплавкового подвеса как крайне высокую выносливость к перегрузкам.

Гидродинамические силы действующие на поплавок и присоединенная масса жидкости

Гидродинамические силы действующие на поплавок записаны на рис. 6. как уравнение. Суммарная сила действующая с жидкости на поплавок. Первая сила  $m_{жа}$  – сила взвешивания, выталкивающая сила, она статическая в динамике не зависит от времени.  $m_{ж}$  – масса жидкости в объеме поплавка. Вторая компонента зависит от кинематических параметров поплавка.  $\dot{e}$ ,  $\ddot{e}$  – кинематические параметры самого поплавка (скорость и линейное ускорение с которым поплавок пытается сместиться) под действием силы инерции, вторая компонента это по сути демпфирующая компонента, диссипативная, которая оказывает демпфирующее действие на узел при его смещении. От куба зазора при движении поплавка в некоем объеме зависит демпфирующая сила.  $\delta_{ц}$  - цилиндрический зазор,  $\delta_{т}$  - торцевой зазор. Если рассматривать аналогию уравнения движения, только у нас нет упругих связей, динамику рассматриваем при разомкнутой пружине есть диссипативный и инерционный член здесь есть некоторые коэфф-ты, которые в данном случае будут проводить аналогию между движением самого тела и движением

жидкости. Гидродинамическая сила она записана для жидкости в первую очередь которая охватывает поплавок. Поплавок важен чаще своей геометрией, своим зазором в котором он плавает и гирокамерой которая ограничивает весь этот зазор. Взвешивающая сила, астатическая, и динамические силы записаны для жидкости для сил которые действуют со стороны жидкости на поплавок и в данном случае при движении поплавка в жидкости жидкость оказывает пропорционально скорости диссипативную демпфирующую силу против движения поплавка, то же самое для инерционного члена. Поплавок с ускорением пытается переместиться, жидкость несжимаемая не может никуда деться она должна вытекать по цилиндрическому зазору в обход поплавка освобождая место для самого поплавка и перетекая. Инерционный член сформулирован для жидкости. Перенос сил с поплавка на жидкость называют присоединенной массой жидкости к поплавку это достаточно интересный вопрос и в некотором роде простой, в некотором роде сложный.

Присоединенная масса жидкости

21

Перемещение тела в жидкой среде

При перемещении тела  $m$  из положения А в положение В мы одновременно перемещаем второе тело такой же формы как  $m$  из положения В в положение А. Второе тело имеет плотность, равную плотности жидкости.

Уравнение движения тела

$$(m + K m_{ж}) \ddot{x} + B \dot{x} = F$$

$K m_{ж}$  — присоединенная к телу масса жидкости.

В свободной жидкости коэффициент  $K$ , зависящий от формы тела, близок к 1 ( $K \approx 1$ ).

Уравнение движения поплавка при ускорении  $\alpha$

$$(m_{пл} + m_{ж} \frac{\pi R^2}{\pi R_0^2}) \ddot{x} + B \alpha \dot{x} = (m_{пл} - m_{ж}) \cdot \alpha$$

В поплавковом приборе при смещении поплавка в жидкость та же жидкость не может протекать только вокруг поплавка по длинной и узкой кольцевой щели (если торцевые области закрыты). При этом жидкости должно быть сообщено очень большое ускорение  $\ddot{x}_{ж} = \ddot{x} \frac{R}{R_0}$ . Физически при движении поплавка на расстояние  $x$  перемещается масса вытесненной поплавком жидкости  $m_{ж}$ . Но из-за того, что течение происходит через длинную тонкую щель с ускорением  $\ddot{x}_{ж}$  требуется приложить к поплавку очень большую силу. При этом происходит резкий скачок, а не плавный. Но в работе отбрасывают этот эффект на счет уменьшения присоединенной массы, полагая, что для

Рис. 7.

### 13.12 . 21 лекция

#### *Поплавковые приборы*

Что собой представляет поплавок? Я вам принес показать модель этого прибора. Она разрезанная. Видно, что здесь внутри имеется стаканчик замкнутый идет за поплавком, внутри поплавок укреплен ротор, Не ротор, а весь гиромотор и обмоткой возбуждения двигателя . Здесь имеется еще ДУ и датчик момента на наружных осях с подвижными магнитами, с неподвижной катушкой , И каменные подшипники. Полость между стенками камеры поплавковой. В этой камере установлен медный стаканчик чтобы уравнивать температура по окружности. Зазор между поплавком и центрами поплавковой камеры составляет 0,1 мм. Как ни странно, у всех приборов примерно 0,1 мм. Полость заполнена жидкостью. Жидкость специальная используется, тяжелая. Ее удельный вес равен 2 грамм на кубический сантиметр. Чем тяжелее жидкость, тем меньше могут быть размеры у поплавок, для того, чтобы он полностью был извешен этой жидкостью, чтобы реакции в опорах были равны. Но всякая жидкость меняет свой объем при изменении температуры. Температурный коэффициент объемного расширения жидкости составляет одну десятую. Это, в общем-то, свойство всех жидкостей маслянистых таких, вязких. У них у всех одна десятая. Выделяется из этого ряда только лишь Ацетон у него 0,15 коэффициент и вода. А вода сильно выделяется, поскольку мы имеем возможность посмотреть ее свойства при приближении к состоянию заморозки. Вода имеет температурный коэффициент примерно 1,1 при нормальных температурах А вот когда приближается к нулю, то плотность жидкости становится меньше. При охлаждении до градусов до 3 она становится более тяжелой, а при большем охлаждении она становится более легкой. Поэтому когда в бассейнах, озёрах, реках, замерзает вода, то она при приближении к нулю тёплая вода имеющая малый вес, она опускается к дну, а холодная вода всплывает, она более лёгкая. Холодная

вода, тяжёлая внизу, лёгкая, всплывает, ну и дальше лёд сам тоже, лёгкий, он тоже всплывает, поэтому рыбкам везде порезвиться зимой. Но нам надо помнить о том, что здесь мы имеем дело с жидкостью, меняющей свой объем. А температурный ряд, в котором мы работаем, он довольно большой. Он +60 для поплавков обычно больше не делается. Минусовая область очень большая, но поплавковые жидкости имеют ограниченный температурный диапазон работы. Они меняют свою вязкость очень сильно с жидкостью. Почти на 7% меняется на градус эта вязкость. Поэтому для высоких температур, скажем, порядка 50-70 градусов, это не очень вязкая, хотя вязкая жидкость. А потом она к градусам к 5 становится просто воскообразной. В ней уже поплавки разворачиваться может, но это потребует колоссальных затрат времени и больше такая вязкость не может обеспечить работоспособность наших приборов. Поэтому чаще всего поплавковые приборы используются при повышенных температурах и чаще всего с термостатированием хотя появились сейчас полиметилоксановые(?) жидкости которые имеют более низкую вязкость и могут работать при отрицательных температурах . Поскольку объем меняется жидкости при воде и нагреве то Жесткий корпус использовать ни в коем случае нельзя, его разорвет. Чтобы корпус сохранял свои размеры при увеличении объема жидкости, поставлен сильфон. Сильфон этот виден здесь на конструкции. Его можно потрогать и ощутить. Здесь речь идет о поплавковом приборе, о поплавковом подвесе. Он применяется широко и в акселерометрах, и в поплавковых приборах, в самых точных приборах, из которых имеются на сегодняшний день. На них делаются и компасы прецизионные, на них делаются и гиросtabilизаторы прецизионные.



$$F_{rp} = m_{\pi} a + 12 \pi \mu l_n \cdot \frac{R_n^3}{\delta_n^3} \cdot \left( Q_1 \left( \frac{l_n}{R_n}; \frac{\delta_n}{\delta r} \right) + \rho \frac{\pi l_n R_n^3}{\delta} \cdot Q_2 \left( \frac{l_n}{R_n}; \frac{\delta_n}{\delta r} \right) \right)$$

$Q_1, Q_2$  для реальных конструкций  $\approx 0,5 \dots 0,8$ .

$$m_{np} = m_{гic} \frac{R_p}{\delta_{гic}} Q_2 \left( \frac{l_0}{R_p}; \frac{\delta_{гic}}{\delta_r} \right) - \text{присоединенная масса жидкости}$$

Металли Вуда  
Dr 69.9%, Cd 7.1%, Bi 50%.

Здесь вот есть формула. Формула соответствует радиальному движению поплавок. Это движение сильно затруднено жидкостью, потому что жидкость вязкая. И выдавить эту вязкую жидкость из зазора 0,1 мм чрезвычайно сложно. Поэтому появляется большая гидродинамическая сила, которая зависит от вязкости жидкости и которая пропорциональна радиальной скорости смещения поплавок относительно центра поплавковой камеры. Уравнение движения жидкости. Вообще жидкость очень сложный элемент для исследования. Математически движение жидкости описывается уравнениями на Навье-Стокса. Это система дифференциальных уравнений частных производных, нелинейных, И которые могут описать все- волнение на море, и движение поплавок, и так далее, и так далее, и так далее. Поэтому решаются эти уравнения с помощью сильных упрощений. И эти упрощения для нашей техники, они сводятся к тонким щелям, по которым перемещается жидкость. Вот если радиус поплавок много больше, чем зазор, то такие упрощения дают достаточно точные результаты. Первое составляющее  **$mg$  на  $a$** . Что это такое? Масса вытесненной поплавком жидкости умножить на ускорение. Это архимедова сила. Масса вытесненной жидкости умножить на

ускорение. Дальше второй член-  $12 \pi \mu l \frac{R^3}{\delta^3} \dot{e}Q$ . Мю- Динамическая вязкость жидкости. Она измеряется в пуазах. Я пока не буду вам вопрос снять, потому что там была старая система единиц, которые широко использовала, и которые единицы до сих пор бродят по таблицам.

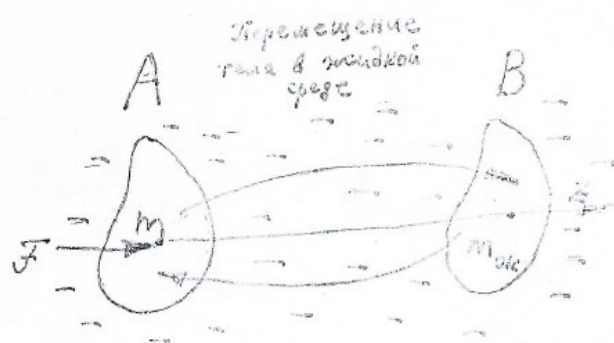
Правильно измерять в пуазах. l- это длина поплавка. Дальше умножить на радиус поплавка в кубе, деленный на цилиндрический зазор в кубе. Ну и на e с точкой. e с точкой – это скорость радиального движения поплавка.. Да, теперь Q. Q – это поправочный коэффициент. Я его не стал приводить.

Если хотите посмотреть, как он выводится и как он выглядит, то есть такая книжечка, которая называется «Теория виброустойчивости», автор Коновалов. Можете посмотреть, там все подробно расписано, решение подробно дано в разных случаях. Но оно очень сложное, не для белого человека. Это Q показывает, какая доля потока в поплавках перемещается. Естественно, он выдавливает жидкость. Часть жидкости течет вокруг поплавка, на другую сторону, а часть вдоль поплавка течет через торцевые области. Переходят сюда и переходят вниз по второму пути. Второй путь обычно им пренебрегают при расчетах. Тогда остаются только первые эти коэффициенты. А коэффициент Q учитывает часть жидкости, которая уходит на асиальное течение. Расчеты тоже не делаются. Потому что для поплавковых приборов с нормальными размерами этот Q лежит в пределах 0,5-0,8. То есть вы можете для себя так прикинуть. Даже если 0,5, то все равно эта сила получится очень большим. И третья сила. Третья сила это  $\rho \frac{\pi l R^3}{\delta} \ddot{e}Q_2$ . Ро-плотность жидкости, e с двумя точками, то есть это ускорение, радиальное ускорение поплавка, вектор Q2, смысл которого тот же самый, что и Q1, но просто другие выражения. Значит, если сила Фактически, вот это вот  $\rho$  умножить на  $\pi l R^3$  в кубе, деленное на дельта, это может быть представлено как масса, как объем жидкости умножить на плотность  $\rho$ . Получается масса, вытесненная поплавком жидкости. Вот

дальше дроби остается  $R\rho$ , деленное на дельта  $C$ , а дальше появляется ускорение. Значит, это масса, умноженное на ускорение. Это инерционная сила. Что за инерционная сила? Инерционная сила в жидкости.

§§

### Присоединенная масса жидкости



При перемещении тела  $m$  из положения А в положение В мы одновременно перемещаем второе тело такой же формы как  $m$  из положения В в положение А. Второе тело имеет плотность, равную плотности жидкости.

Уравнение движения тела

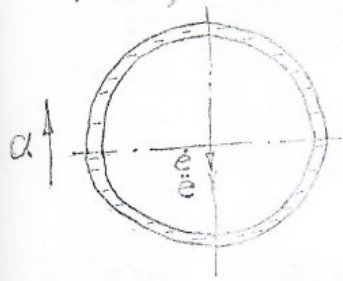
$$(m + K m_{жс}) \ddot{z} + B \dot{z} = F$$

коэф.  $K m_{жс}$  — присоединенная к телу масса жидкости.

в свободной жидкости Коэффициент  $K$ , зависящий от формы тела, близок к 1 ( $K \sim 1,1$ )

Вот здесь вы должны немножечко вернуться к физике. Это даже картиночка должна быть, которую вам Пономарев должен был раздавать. Вот на этой картинке показано тело в положении А. Это первое исходное положение. Кругом жидкость. Вот я это тело А перемещаю в точку В. Ускоренно перемещаю. Получается инерционная сила. Масса умноженная на ускорение противодействия. Оказывается, что сил гораздо больше, чем просто перемещения потому что Тело перенеслось в точку В, но жидкость, которая заполняла объем В, она переместилась в точку А. Это масса Здесь тоже получается сила пропорциональная ускорению. Она ведет себя как добавочная масса. И очень большая масса. Если говорить о полете самолетов, подводных лодок, в свободной жидкости, то этот коэффициент  $k$  который связывает массу действительной жидкости с присоединенной

массой, он получается небольшим, порядка 1-1, 1-2, в лучшем случае. И в принципе, особенно его можно и ???, но особенно не замораживаются на вычислениях. А вот когда речь идет о движении поплавка в тонкой щели, в камере с тонкими щелями, то эта сила, от ускорения поплавка, она становится гигантски большой. Посмотрим, почему она такая большая.



Уравнение движения поплавка при ускорении  $a$

$$\left(m_n + m_{ж} \frac{R_n}{R} Q_2\right) \ddot{e} + B Q_1 \dot{e} = (m_n - m_{ж}) \cdot a$$

В поплавковом приборе при смещении поплавка  $e$  жидкость так может перетекать только вокруг поплавка по длинной и узкой кольцевой щели (если торцевые области закрыты). При этом жидкости должно быть сообщено очень большое ускорение  $\ddot{e}_{ж} = \ddot{e}_n \frac{R}{\delta}$ . Физически при движении поплавка на расстояние  $e$  перемещается масса вытесненной поплавком жидкости  $m_{ж}$ . Но из-за того, что течение происходит через длинную тонкую щель с ускорением  $\ddot{e}_{ж}$  требуется приложить к поплавку очень большую силу. При этом происходит разделение масс, а не массы, но удобнее относить этот эффект на счёт увеличения приложенной массы, полагая, что оба тела (поплавок, жидкость) имеют одинаковое ускорение  $\ddot{e}$ .

Ускорение жидкости в 300-400 раз больше, чем у поплавка. Вывести полевой диаметр. Воз-мн. ускорение равновесие (ударное воз-е) практически невозможно - исп-се внев. снес. диаметр. обвесках.

Внизу нарисована картиночка поплавков внутри поплавковой камеры, в круге. Внутренний поплавок смещается вниз со скоростью  $\dot{e}$  и ускорением  $\ddot{e}$ .  $\dot{e}$  дает вязкую силу, а вот  $e$  с двумя точками дает инерционную силу. Почему она получается гигантски большой? Она равна внизу уравнение, обведенное. Значит, в уравнении записано движение поплавка. Масса поплавка плюс какая-то вторая масса  $M$  жидкости, умноженная на  $R$  поплавок, деленная на дельта цилиндрического зазора и

на Q2. Дальше коэффициент демпфирования на Q1 на  $\epsilon$ . И все это равняется возмущающей силе. Возмущающая сила для поплавка это будет масса поплавка минус масса жидкости. То есть сила инерционная, действующая на поплавок, и сила инерционная Архимедова, они взаимно вычитаются, вообще говорят, в правой стороне может быть и ноль. Тогда возмущения вообще никакого нет, которое вызывает движение поплавка. Так вот, в первую скобку вошло две массы. Первая масса поплавок, здесь все понятно. Вторая масса вытесненной поплавком жидкости. И, в общем-то, глядя на то, что внизу написано, масса поплавка должна быть примерно равна массе жидкости. Поэтому можно было бы просто сказать, две массы поплавок. Но здесь есть коэффициент отношения  $R_p$  и дельты цилиндрической. А мы только что с вами рассчитали, какой величины этот коэффициент. Для маленького поплавка, 37-мм, этот коэффициент равняется 300. Ну а побольше поплавков пойдет, там вообще в районе тысячи. Откуда внутри поплавок появляется такая дикая масса, которая создает такую большую инерционную силу. Давайте посмотрим, как течет жидкость. Поплавок опускается вниз, ну, предположим, опустился вниз на 1 микрон. Объем жидкости под поплавком уменьшился. А наверху появляется зона разрежения, появляется пустота. И жидкость снизу поплавок должна перетечь вверх. Но путь у этой жидкости только вокруг поплавка по тоненькой щели. Поплавок на один микрон переместился, а жидкость, которая внизу была, на 30 миллиметров на гигантский путь. жидкость должна получить гигантское ускорение, потому что ей надо пройти громадный путь, не один микроном. На самом деле количество жидкости там ничтожно. Если говорить о жидкости внутри поплавкового прибора, то в этих щелочках с наперсток жидкость наливается, Больше туда не войдет. Вот эта наперсток жидкости создает такую силу, с которой просто невозможно справиться, которая не дает возможности сместить поплавок относительно центра. Хотя масса маленькая, вот написано, что

масса Ж перемещается, но она домножается на коэффициент  $R_p$  на дельта Ц, который, вообще говоря, надо было бы отнести к ускорению  $e$  с двумя точками. Потому что этой массе придается ускорение, чтобы обойти вокруг поплавка. Но и там, и там  $e$  с двумя точками входит как переменная в ту и другую составляющую силы. Поэтому гораздо удобнее вот эту добавку к ускорению отнести просто как добавку к массе. условный ход, но он дает возможность получить простейшее уравнение второго порядка с суммой двух масс. Первая масса поплавка А масса вторая, ну это тоже фактически масса поплавка, но умноженная на отношение радиуса поплавка к величине зазора. Ну вот в технике этот прием, чисто математический, но этот прием, в общем-то, признается как физический параметр. И говорят о том, что есть присоединенная масса жидкости. В результате получается такое большое сопротивление смещению жидкости, что его не может дать. Надо колоссальное усилие приложить для того, обеспечить смещение у поплавка. Я делал эксперимент, они подробно описаны в книге по виброустойчивости. Брался поплавокый макет, Поплавок сделан намеренно был тяжелым. Зазор намеренно был увеличен до 0,5 мм, не 0,1, а 0,5 мм. Ну и движение поплавка измерялось магнитными подвесами. Так вот, подвесы они выполняли функцию и измерителей, но одновременно центрировали поплавок в начале эксперимента. Два стенда использовались. Первый стенд – это стенд круговой вибрации, когда он совершал вот такое круговое движение с радиусом примерно миллиметров двадцать и с частотой до нескольких герц есть это очень большие центробежные ускорения, которые должны были бы смещать поплавок. Так вот смещение поплавка не превышало одной сотой микрона. Невозможно такими внешними силами, как бы у быстро сместить поплавок от центра. Медленно можно сместить, конечно. Быстро сместить трудно, потому что имеется и вязкое противодействие, и противодействие инерционное связано с наличием присоединенной массы.



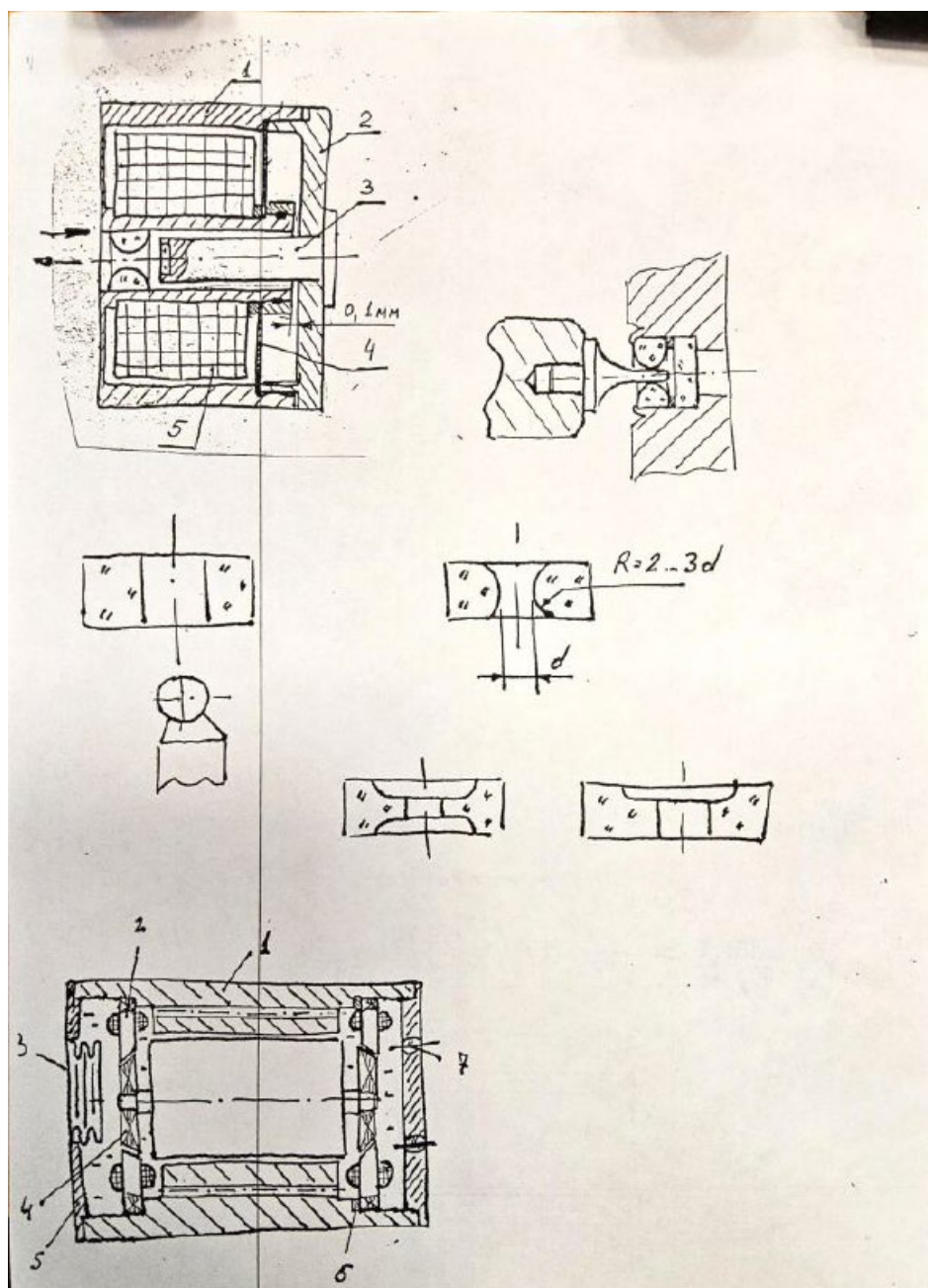
Поэтому, если вы собрали поплавков, Заполнили его жидкостью , положили на край стола, а потом он упал у вас на пол. Ну, любой гироскопический прибор, спасибо вам за это, не скажет. И подшипник у него, там ямки появятся, от шариков на беговых дорожках, и какие-то там деформации могут появиться. А здесь вы можете совершенно спокойно его поднять, поставить прибор и ничего не бояться. Он не сломается. Поэтому эти поплавковые приборы выдерживают гигантские удары на ракетах. В объектах громадную вибрацию выдерживают, не ломается. Это просто достоинство этого прибора. Те же лазерные гироскопы, они не имеют подвижных частей. Те же вибрационные гироскопы, рюмки, они тоже сейчас дают нам хорошие результаты. Они тоже не так чувствительны. Но все-таки поплавки, они особо Ну и точность получается очень высокая.

**Какую возможность дает использование поплавкового прибора?** Из-за наличия громадных гидродинамических сил, препятствующих движению поплавка, мы можем использовать в приборе поплавков с опорой на очень тоненькие цапфочки. Ну, фактически цапфочки, которые используются в часах. Камниевую опору можно сделать, и цапфочки. 0,2 миллиметра до 0,05 миллиметра. Сломать такую цапфочку ничего не стоит. Она выполняется из очень хрупкого материала. В старину их делали из углеродистой стали. А сейчас делают из карбида вольфрама. Очень хорошо полирующийся, очень интересный, хороший материал. Но хрупкий совершенно невозможно. Хотя бы чуть-чуть нагрузить. Поэтому, когда сделают поплавковый прибор, то потом его переносят на специальную установку для заполнения жидкостью. Жидкость заполняет прибор через ВНТ(?). Прибор полностью согнут, крышки на месте стоят, сифон стоит, две трубочки торчат, чтобы прямотоком запустить через него жидкость. Тащат его на вакуумный пост. Под колпаком стоит штанга. На ней висит сосуд с поплавковой жидкостью. Краник снизу. Краник ручной можно, конечно, ручной не использовать, управляемый

электрическим сигналом. Дальше трубочка, которая подходит к нижней трубочке прибора мерной. Прибор помещается ниже, чем бочок. Ну или примерно. Небольшая разница. Потом закрывается все это колпаком, откачивается газ. Довольно сильно откачивается. Дальше держат этот поплавков в газе, в вакуумной установке, примерно часов 20. Сутки фактически держится. При этом жидкость кипит. В жидкости растворен воздух. И этот воздух надо удалить из жидкости. Она должна быть обезгажена. Во-вторых, внутри прибора имеются И катушки какие-то, и изоляционные провода, и так далее. Надо выкачать весь воздух, который там в щелочках между проводами, так сказать, застрял и прочее. В общем, сутки выкачивалось тем, чтобы, когда заполнен прибор жидкостью, никаких пузырей воздуха внутри не было. После того, как его обезгазят, открывают кран, и жидкость прямоходом по закону сообщающихся сосудов, начинает поступать в нижний штенгель и снизу заполняет прибор. Ну и дальше выходит вверх. Видно, что из верхней трубочки тоже у нас, конечно, не на пол течет, не на... Прозрачная трубочка надета. Видно, что... Полностью заполнен прибор. Ну, его еще держат в заполненном состоянии под вакуум. Тоже, наверное, сутки. А потом надо осуществить герметизацию приборов. Значит, колпак снимают, и эти трубочки пережимают специальным инструментом, который представляет собой кусачки бокорезы(?). Вот эти бокорезы сжимают трубку медную и происходит сварка этой медной трубочки под местным давлением. Ну, конечно, для того, чтобы пережать, надо эти кусачки, чтобы они были тупые, потому что иначе откусить ее будет. Сильфон при заполнении жидкостью должен быть сильно оттянут. Если вы посмотрели, вы видите, что штырек с резьбой делаем. Можно оттягивать и погружать. Оттягивать для чего? Для того, чтобы объем жидкости был побольше внутри. А потом, когда прибор за полем отпустят штендерами, Большой объем жидкости, Сильфон сжимается. ???, так сказать, сжатие сильфона за счет

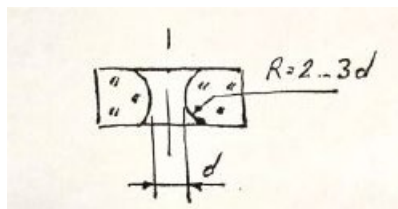
своей собственной жесткости обеспечивает поджатие жидкости в поплавковом приборе. Если, не дай бог, какая-то микро-микро капелька, так сказать, этого самого воздуха там останется, микро пузырек, то под давлением сильфона он скукожится и растворится опять в живости. То есть вот это поддавливание сильфона, оно обязательно нужно. Если этого поддавливания не будет, то прибор начинаем охлаждать. Охлаждается, жидкость уменьшается в своем объеме, а сильфон уже сжался до конца, уже распрямился до конца и дальше появится внутри прибора пузырек газа -это пар поплавковой жидкости ,значит этот поплавок будет иметь контакт с жидкостью и газом И силы поверхностного натяжения дадут такие погрешности, что они вам не снились. Поэтому давление, жидкость должна быть сжата всегда до самой низкой температуры эксплуатации прибора.

Значит, вторая особенность сильфона используется при заполнении. Ну а потом, вот этот сборщик который сделал прибор который сделал с цапфочками диаметром 0,5 мм, а поплавков тяжелый, его чуть не балетными шагами несет к насосу, к вакуумному хвосту, ставит туда аккуратненько, а потом после заполнения Ничего уже с ним не будет. Никаких неприятностей с ним не будет. Ну, конечно, могут быть неприятности в гиromоторе, потому что гиromотор внутри поплавок еще, там могут быть какие-то неприятности. Ну, вот так кратко я вам рассказал о том, что такое поплавок. Я думаю, нужно было.

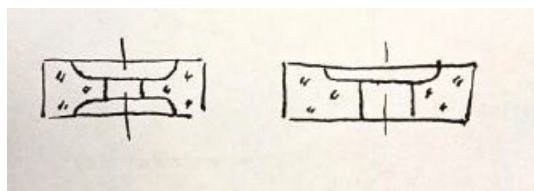
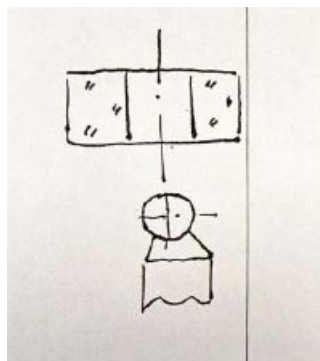


Теперь какие опоры? Значит, первыми использовались часовые опоры. В середине показана опора. Это выступ ловка. Туда вставлена цапфа. Цапфа, можно сказать, она имеет закраину, чтобы хорошо быть соосной, вклеиваться в это отверстие. И дальше переход на тонкую часть этой цапфочки, которая используется в камне. Камень представляет собой втулку из Не рубиновую, а чаще всего используется лейкосапфир. Причем это натуральный лейкосапфир, драгоценный камень. Значит, это втулка и подпятник. Конец у цапфы на сферу. Контакт здесь входит с подпятником

только в одной точке. Камень делается из лейкосапфира, цапфа делается из карбида вольфрама. Это, так сказать, подвес более древней формы. Теперь, так сказать, по поводу этой древней формы. Смотрите, втулка, втулка, она не прямая. Значит, вот есть камни просто с центральной прямой деревни, а есть камни, чуть-чуть пониже нарисована картиночка.



Скругленная цилиндрическая часть, торообразная поверхность карты. Причем радиус этого скругления составляет примерно 2-3 диаметра. Зачем это скругление делается? Это скругление позволяет компенсировать перекосы опор при установке их в корпус прибора и при установке их в поплавков. Вот здесь я внизу нарисовал запись. Втулка с оливаром. Похоже на оливу.

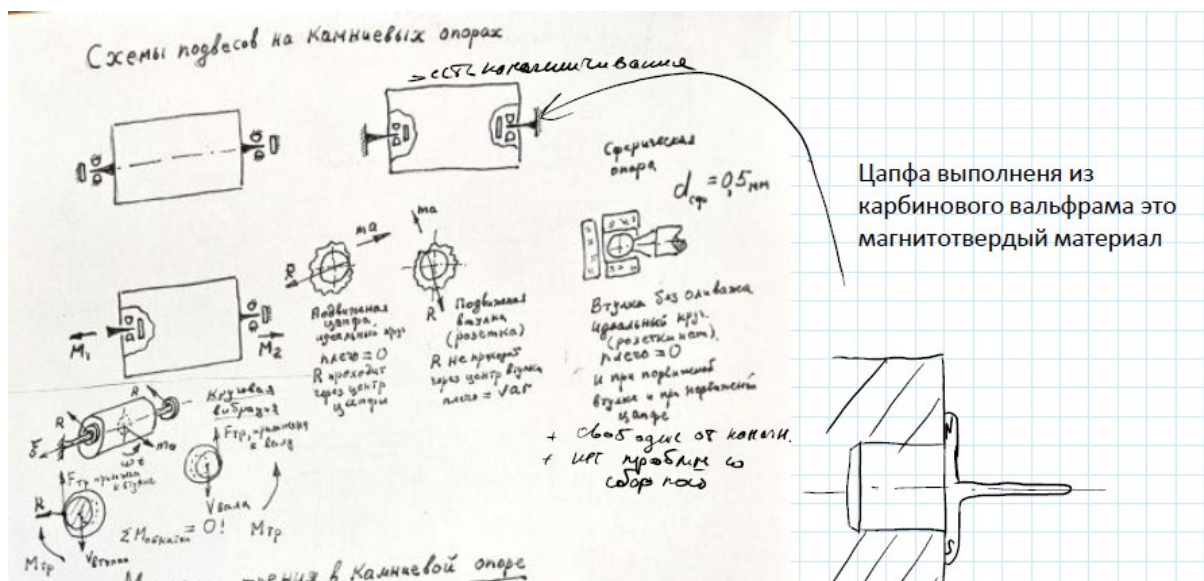


(я не понял про какой рисунок из этих двух дальше идет речь)

Вот здесь я нарисовал втулку. Довольно точно сделанные опоры, они на одной оси лежат. А камни, заделанные в крышке поплавковой камеры, они могут быть смещены одна выше другой. Поэтому в этих камнях цапфа, а зазор маленький, зазор между камнем цапфы, От трех до пяти микрон

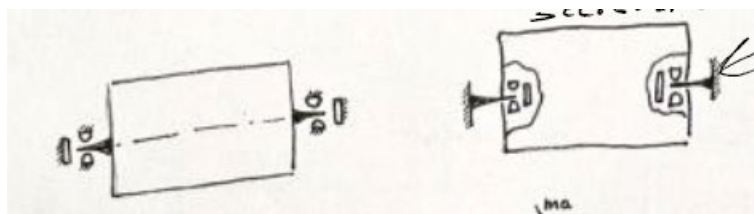
делается. Меньше не делается обычно. Они начнут краями затираться. Появится трение, от которого избавиться невозможно. И оно неизбежно, потому что как ни старайся, а допуски не позволяют точно выстрелить эти наружные опоры. Или надо обрабатывать как-то прямо в составе поплавковой камеры, что ничего никак не делают. Эти камни делаются на специальных заводах часовых. Камни бывают трех видов. Ну вот с оливатором мы используем в поплавковых приборах. А в часах используются, в часах и в редукторах у нас иногда, используются камни с прямым отверстием, без оливара. Из краев делается вот такая вот, либо две ямки, либо одна ямка. Это называется масленка. В соответствии с тем, одна масленка или две масленки, камни называются одномасленчатые и двухмасленчатые камни. Сборщик Берёт иголочку, опускает в баночку с маслом, с жидким. И дальше иголочкой касается колечко цапфы. Масло стекает в зазор. Смазки для редуктора достаточно. Для часов тоже самое делится. Вообще, сборки и все остальное, поплавки, это вообще очень тонкая вещь. Очень тонкая.

Так вот, я говорю, что это требует высочайших, так сказать, качеств механика. Ливаш, вообще говоря, плохо действует на камни.





А вот вторая сторона – это вот картиночка камня. После выполнения олива. Если при изготовлении прямого камня точность изготовления цилиндра, то есть не грубость цилиндра, составляет 0,05 микрона, то когда начинают делать олива, камень портится. И форма уже получается не цилиндра, а, как его называют, розетка. Есть специальные станки, которые называются фтолрон. Вот форма камня должна быть вот такая, круглая, а вот что получается. Вся микро-микро канавка. Причем деление... Масштаб 50 ньютонов метров на клеточку. Розетка-то розетка, но она очень мелкая. Как всегда, когда я рассказываю про опоры, то я рассказываю какие виды подвесов вот нарисованы несколько видов подвесов на камнях. Смотрим, три подвеса. Первый вот этот вот, второй вот этот, третий вот этот. Значит, первый подвес вы видите поплавков, цапфы торчат вправо и влево, а камни укреплены в корпусе поплавковой камеры. Они могут как косо становиться, а олива убирала все, что необходимо. Чем хорош и чем плох.



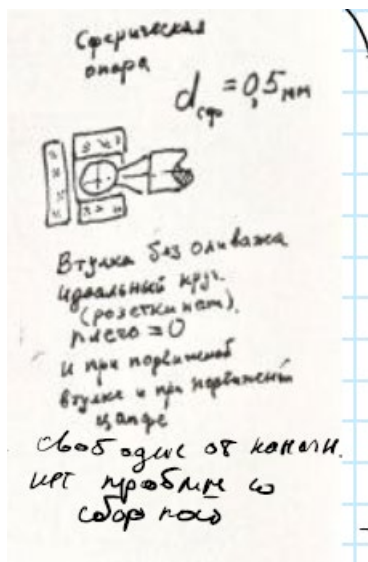
**Первая схема.** ЦАПФА выполнена из карбидовольфрама, из углеродистой стали. Это магнитотвердый материал. В случае, если сделали из магнитотвердого материала цапфу и вставили в прибор, а в приборе полно источников магнитного поля. Значит, вот ваша цапфа. Так вот эта вот цапфочка, она может намагнититься. Вот здесь образуется северный полюс, здесь южный полюс. Просто по дороге где-то нахвататься магнитного полюса. поставить на поплавок постоянный магнит, он будет реагировать и на наружные железки, и на наружные магнитные поля. Поэтому это не стоит делать. Это нехороший эффект. Нехороший, но вообще ладно. Это не совсем беда. А совсем беда состоит в том, что

цапфочка имеет диаметр 0,5 мм. И она жесткая, ломкая. Чуть-чуть вы на нее надавите, она тоньше, чем иголка. И чего хочет, что и делает. Потому что цапфочка вставлена в поплавок намертво. Но поплавок перед тем, как начинать сбоку прибора, должен быть тщательно сбалансирован. Это достаточно сложная операция.

Рассказал стихотворение:

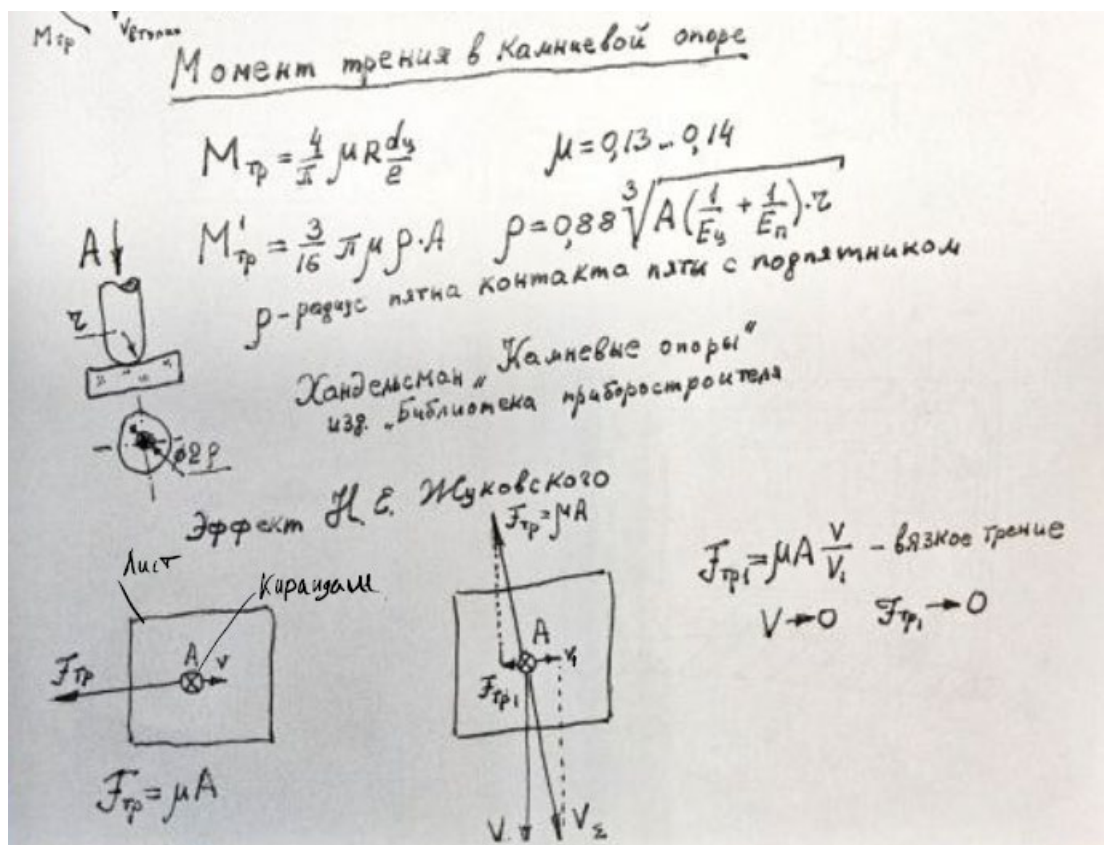
При жгучей жаждой опохмелки  
Все остальные чувства мелки

Так вот, от чего я начал вам про Роберта Будда. А, да, про Роберта Будда я начал про балансировку. Материал Роберта Будда как раз очень, так сказать, нашел для балансировки. Значит, поплавок сбалансирован, потрачено времени на его балансировку невероятно большое время, при разных температурах, в таком мере, где там центр давления, где центр массы. Центр давления с центром массы должны быть совмещены с осью цапф. А цапфа сломалась. Значит, как можно эту цапфу починить? Берется электроэрозия, выжигается дырка вокруг места крепления цапфы, потом она обрабатывается. Все это дело с бериллией, работать-то приходится еще.... жуткая история, когда ломается цапфа. Точно обработали отверстие, максимально точно, что могло обеспечить. Вставили туда цапфу чуть-чуть побольше диаметра, вклеили, закрепили, все сделали. Прибор не сбалансирован. теперь надо балансировать прибор по новой с новой цапфой то есть вот эта поломка цапфы это кошмар но эта схема она позволяет использовать Камни, втулки с оливажем. То есть оливаж не создает неприятных эффектов разбалансировки из-за того, что форма розетка.



Теперь следующий вариант. Не хотят люди заниматься этим постоянным магнитом на поплавке. Сказали, давайте мы будем делать прямые камни. Прямой камень, вот он здесь нарисован. Сбоку немножечко. Но прямые камни нельзя использовать с цилиндрической цапфой, потому что ее заклинивает. Решили делать на кончике цапфы шарик. Шарик диаметром полмиллиметра, сферный. Все из того же самого материала, из карбида вольфрама. И на тоненькой цапфе висит такой шарик. А камень подпятник и прямой камень ставятся внутрь поплавка. И балансируется. Тут уже безопасно работает. Камни эти не ломаются. Чистенькие. Что хочешь, то и делай. Если же сломается цапфа снаружи, которая стоит, то она никакого отношения к балансировке не имеет. Вы ее выковыриваете, ставите в другую цапфу и продолжаете сборку. С точки зрения сборки гораздо лучше. С точки зрения момента тяжения гораздо лучше. Вы должны сказать, левое имеет магнитное тяжение, потому что оно может намагничиваться. где проблема поломки, проблема балансировки, а вот этот второй вариант, он очищен, он свободен от намагничивания, нет цапфы на поплавке, там только немагнитные камни. И нет особенностей проблем со сборкой. Вроде хорошо, но, как говорится, хорошо, да не так, а как. когда у нас на поплавке установлен камень ... Да, значит, сначала мы начали работать с того, что цилиндрические делали с цапфой, а камень с

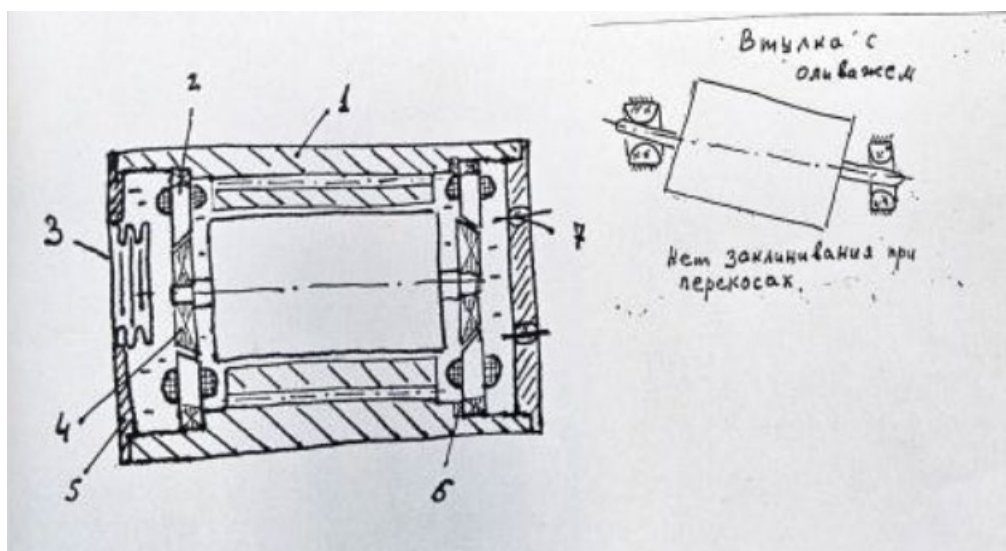
оливажем ставился на поплавков. Тогда тоже никакого объединения не получается. Но поскольку камень с оливажем имеет розетку, то какая точка будет иметь взаимодействие с цапфой, Невозможно сказать. Либо на печке(?) она будет контактировать, либо где-то будет на гладкой части и так далее. В зависимости от того, где контактировать будет цапфа с камнем будет меняться радиус подвески поплавок и появляется момент как момент от разбалансировки. Если цапфа цилиндрическая стоит на поплавке, то никакой разбалансировки нет. А если розетки стоят на поплавке, то какой стороной розетки она будет опираться предсказать невозможно. Поэтому, так сказать, возможен случай разбалансировки. Значит, чтобы его не было, вошли на изготовление сферических шариков. Когда сферический шарик есть, то все перекосы, они снимаются сферическим шариком, а цапфочки ставятся вот так. Значит, тут появляются эти моменты разбалансировки, картиночка есть. Такой вариант, вообще говоря, очень хороший. Шарик, подвижные камни, это, так сказать, вариант предпочтительный. Только ни в коем случае без оливажа, только на прямом камне. Такой вид подвеса, такие камневые опоры, они дали очень большой скачок в точности прибора. То есть там до нескольких сотых градусов в час довели точность. Но все же мешало дальнейшему увеличению точности механическое трение между цапфой и камнем. поэтому стали бороться с самим моментом и здесь использовали два приема



**Первый приём** – это эффект Николая Егоровича Жуковского, который нарисован в нижней части листочка. Хорошие духи, они имеют притёртую пробочку. Но вот когда, если вы будете просто тянуть эту пробочку вы никогда из горлышка не вытянете Поэтому вы сначала чуть-чуть поворачиваете эту пробочку, а потом она совершенно спокойно вытаскивается. Почему? А потому что вы совершаете второе движение. Вас интересующее движение – это вытащить пробку, но вы ее вращаете, и тогда трение за счет вращения уменьшается и вы легко вытаскиваете Молодые люди тоже имели опыт вытаскивания гвоздя из деревяшки, в которую вбили. Но вот если вы согнули этот гвоздь и начали туда-сюда его крутить, то вы его рукой без всяких приспособлений вытащите. Тоже при вращении этого гвоздя в дырки получается уменьшение момента трения. Засчет чего? Вот рассмотрим такой случай. Я беру карандаш и давлю на этот лист. И пытаюсь вытащить этот лист на себя. Вдоль короткой стороны. Естественно, что этот карандаш создаст трение и лист

будет вытаскиваться очень туго . А теперь, если мы этому же листу при движении, которое нас интересует для меня, создадим движение в боковом направлении, с большой скоростью, вот такой вот, как я показываю, то тогда мы будем иметь картиночку. Смотрите, начально вот этот точеч. Создаю второе движение Интересующее движение обозначено  $V$ , а второе,  $V1$  она по форме. Чему равен момент, сила трения чему равна? Она равна коэффициенту трения на нормальное давление. Сила трения не зависит от скорости контактирующих тел. Быстро вы их перемещаете друг относительно друга или медленно, сила трения остается неизменной. Значит, когда я придаю скорости  $V$  дополнительную, боковую скорость  $V1$ , то суммарное  $V$  получится повернутым относительно направления, интересующего меня движение, на очень большой уровень, почти под 90 градусам. И проекция силы трения, препятствующая движению места в том направлении, в котором мне нужно, она получается маленькой. Вернее, сила трения получается равной коэффициенту  $\mu$  умножить на силу давления  $A$  и на отношение  $V$  к  $V1$ . Значит, в поплавковом приборе у вас движение поплавок вокруг оси подвеса практически отсутствует. Если это акселерометр, то есть компенсационный датчик момента, который удерживает поплавок от поворота Если это поплавокый интегрирующий гироскоп в гиростабилизаторе, то опять же появился момент, началась процессия, появился угол, подал сигнал на двигатель, и движение процессионное остановилось. То есть скорость  $V1$  тоже равна нулю. То есть получается, что при малой скорости, вообще говоря, момент трения, сила трения вращается.... Что придумали гироскописты? Они придумали виброопору.





Я прошу вас вернуть листочек на первую сторону. Это виброопора. Она маленькая. Диаметр бывает, скажем так, миллиметров до пяти. Но бывают и вообще совсем маленькие опоры, где на мизинце пара этих опор укладывается. Что имеется здесь? Я буду говорить в элементах. **Первый** – это корпус. Он выполнен из магнитомягкого материала. **Второе** – крышка. Из магнитомягкого материала. **Третий** – стержень. Те стержни, которые держат подпятник. Его можно вообще не рассматривать, он не интересен. Дальше. Камневую опору вы видите с оливом. Она вставлена в трубочку центральную. Но трубочка центральная выполнена из того же материала, что и корпус. То есть вы видите, что и корпус. Потом слева мембрана тоненькая и цилиндрическая втулочка. То есть это всё вот магнитомягкий материал. На втулку надет, так сказать, катушка. И с другой стороны эта втулочка укреплена с помощью второй мембранки, которая обозначена **цифрой 4**. Вторая мембранка делается из бериллиевой бронзы. Она магнитное поле через себя не пропускает. И в конструкции предусмотрен зазор между торцом втулки и крышкой. Зазор маленький, примерно одна десятая миллиметра. В электромагнит выдают переменный ток. Когда ток достигает максимального значения, появляется сила, которая притягивает втулку к крышке. Потом ток уменьшается до нуля.

Тогда пружинки, мембранки, оттягивают втулку в левую сторону. Потом знак тока меняется на отрицательный. Но электромагнитные силы, как известно, не зависят от направления тока. Опять его притягивает, опять отпускает и так далее. То есть на каждый период питающего напряжения его движения втулка совершает два возврата поступательных движения с камнем. Камень имеет поступательные движения По цапфе. И движение гораздо больше, чем движение вращения. И момент трения снимается, вообще говоря, теоретически полностью снимается. и вообще говоря на практике, полностью его не снять. Но в тысячу раз снимается. Вот представьте себе, у вас прибор имеет дрейф 0,05 градуса в час, определяется это дрейф трением, и дальше в тысячу раз он стал меньше. малюсенькие устройства, потребляющие очень маленькую мощность. Мощность у него примерно 0,02 Вт. Она позволяет получать очень высокую точность у прибора.

“Как ничтожен ты, о человек! Как мерзостно твое тело. Посмотри на растения и деревья. Они порождают цветы, листья и плоды. Горе тебе, ты порождаешь вшей, червей и прочую нечисть. Они выделяют масло, вино, бальзам; ты выделяешь мочу, харкотину, кал. Они испаряют благоухание; ты смердишь.” – привел цитату из книги «Испанская баллада» Лиона Фейхтвангера

Дополнительные движения этой цапфы. То есть цапфа может чуть-чуть покачиваться. Потому что эта мембрана, эта подвеска, эта втулка, она несовершенна. Мембранка может иметь разнотолщины с разных сторон. Зазор магнитный. Вот написано 1 десятая миллиметра. Но вы можете гарантировать, что с одной стороны не одна одна десятая, одна сотая, а с другой стороны может быть 0,095. Тогда силы появятся неравные. Их качение довольно трудно избавить. Одним из главных источников погрешностей была виброопора (речь идет про его студента, который

исследовал погрешности в акселерометре), и он исследовал взаимодействие цапф, при движении она еще может стукнуться под камень, и у нас тут несколько прыжков отскакивает от нее. Все эти движения, в принципе, можно посчитать, все эти вещи можно посчитать, и видно, что действительно здесь не поступательное движение, а какое-то сложное движение. но важно было не только выяснить откуда это движение надо было отбраковывать плохие мы сделали корпус маленький, на этот корпус поставили вибродатчики и завели на осциллограф на режим фигур Лисажу, Снимался сигнал, то получали точку. Точка – это вообще поступательное движение. Потом вдруг какой-то аккорд начинает круг. Это круговое движение, наклонное движение. Иногда много движений появляется. Вот на этой установке отбирались опоры. И после того, как стали собирать с хорошими опорами, раз в 10 точность поднялась. По поводу опор мы прошли довольно большой путь.

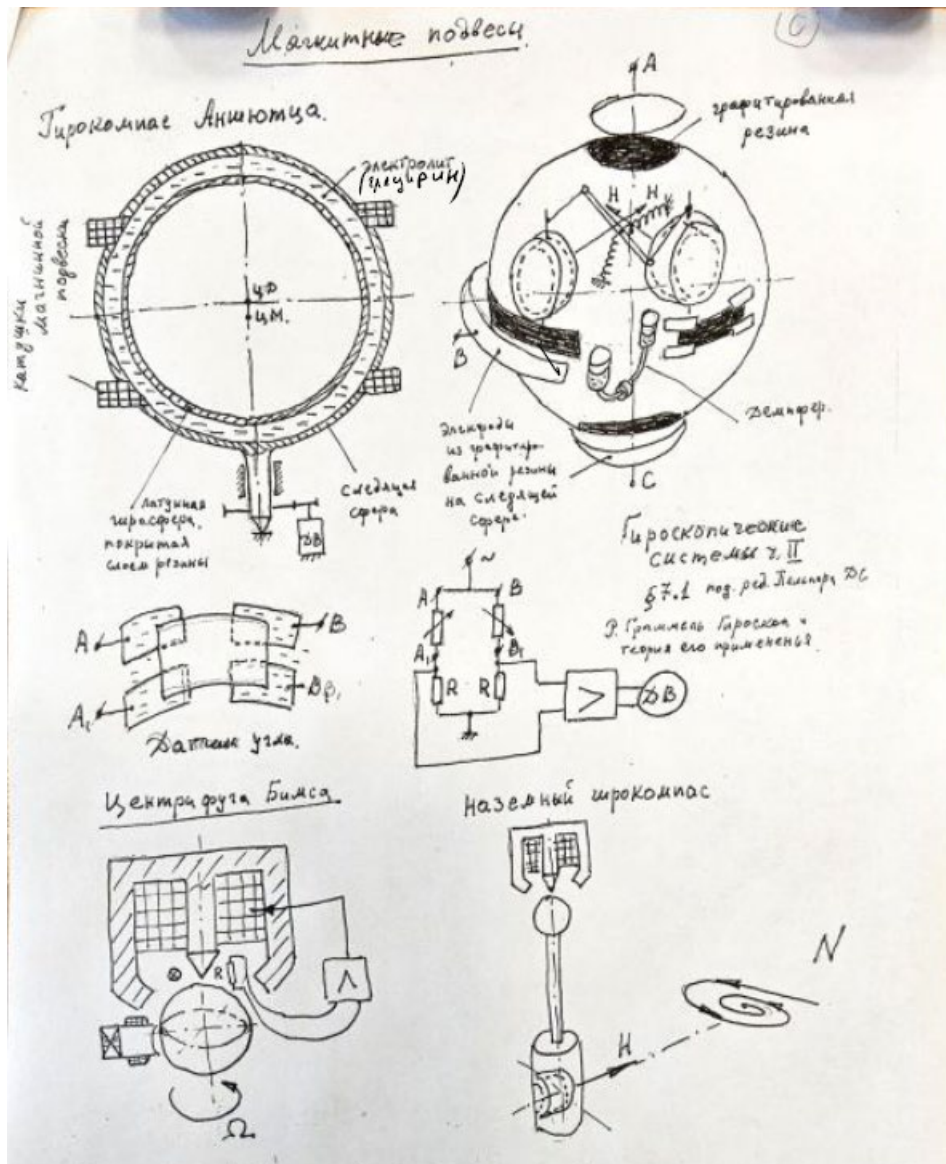
Вот на этой страничке у вас еще есть формулы, о которых я вам не сказал, они входили в камневые опоры. Это из самых учебников, в частности, циклических хундексманов, камневые опоры. Там хорошие, так сказать, даются описания этих опор. какой дает момент трения капятник и какой цилиндрическая опора. Если по камневым опорам, по виброопорам вопросов нет, то я на этом могу часть касающихся опор завершить.

**Тут дальше отступление лирическое для общего развития**

Да, кстати сказать, в вибропоре, в том же самом, в РПЦАП, в пилюгинской фирме, Есть два течения по вибропорам. Первое течение – это то, что я вам рассказал, это эффект Жуковского. А второе течение – это акселерометристы в основном использовали. А второй вид опоры – это коническая опора. Вот она показана на одной из точек. Маленькие, здесь коническая опора. Конус входит в цапфу, естественно диаметр у него непостоянный, поплавков может сместиться в сторону, он ничем не

удерживается, но цапфа начинает узкой частью входить в камень, и этого достаточно, потому что он захватывает поплавков, и дальше. Поскольку он на большую диаметру переходит цапфу в контакте, оно подбивает поплавков, подтягивает его вверх, куда-то, в центр. А потом цапфу отводится через какой-то периодически повторяющийся процесс. Так вот, когда мы воткнули цапфу в коническую дырку камня, Мы сцентрировали поплавков поплавковой камеры. А вывести поплавков из центра этой камеры, как вы уже знаете, чрезвычайно трудно. Он долго выходит из этого центрального положения, потому что есть две силы. Это сила вязкости и сила инерционная, связанная с присоединенной массой. Она не дает быстро уйти, поэтому вот его выставили, он куда-то начинает медленно, под остаточным весом уходить. Уходит, уходит, уходит. И во второй раз поддают ему, так сказать, к центру движения. Опять начинает уходить. Третий раз. Ну вот, скажем, если раз в секунду он будет к центру приводить, то вроде бы поплавков никакого контакта ни с чем не имеет. Просто, так сказать, свобода. Вот это гироскописты любят такое, вроде. такую опору. А так, конечно же, надо использовать неконтактные опоры. К таким неконтактным опорам поплавковых приборов относится магнитный подвес.

## Магнитные подвесы



Все что дальше идет про компасы он сильно спрашивать не будет с его слов

## Вступление лирическое

Когда вы прикладываете магнит друг к другу одинаковыми полюсами, то они, так сказать, отталкиваются друг от друга. То есть, в зависимости какая намагниченность. Можно обеспечить и центрирование втулки в радиальном направлении и в осевом направлении. А вот одновременно обеспечить центрирование и в радиальном, и в осевом, и в угловом

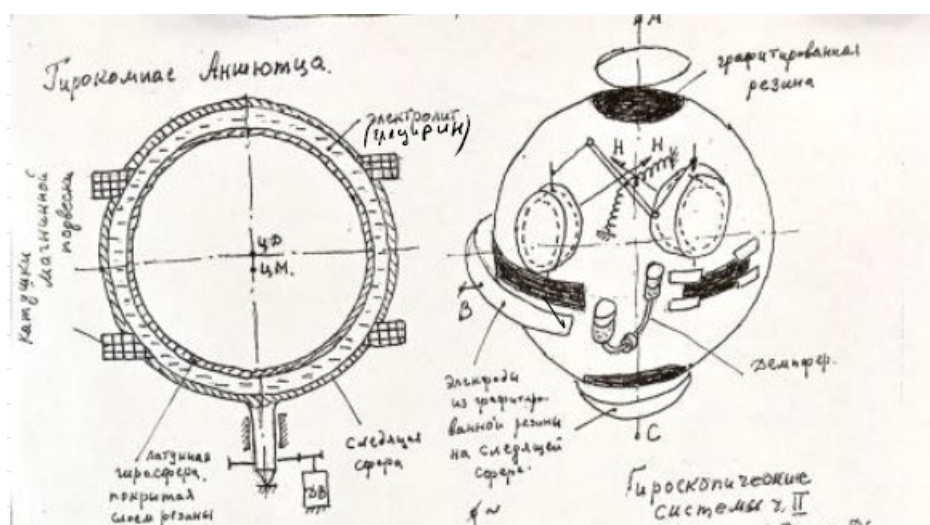
направлении еще никому не удавалось и не удастся. Потому что два крупных ученых Один немецкий Браунбек, а другой английский Эрншоу, правда, сделал свои выводы и результаты получил через 50 лет после Браунбека, но тем не менее. Они доказали теоретически, что с помощью постоянных магнитов И вообще в любых системах, где силы зависят от квадрата расстояния, невозможно создать полный подвес тела.

Обязательно одно из направлений будет неустойчивым. Практически первые результаты по использованию магнитного подвеса были получены немецким ученым (...) очень любопытной фигурой. Молодым человеком он поступил в университет и окончил курс обучения бакалавра, получил степень бакалавра искусствования. Вообще для гироскопии прошлых лет появление своеобразных личностей изобретателей было привычным. Потому что ни один нормальный инженер, когда ему предложили посчитать, сделать компас, прикинуть простейшие соображения, он получил бы, что при том уровне техники создать компас вообще невозможно. Но люди, которые были вдалеке от гироскопии, они интересовались , И поэтому делали его. Ну, например, один из первых гироскопов попытка была священника Ван дер Босс. Делал гироскоп компас. Что-то ему удалось сделать. А вот этот вот ученый, он получил степень бакалавра искусства. Он был из богатой семьи, и, в общем-то, таким Мажором был не бездельником, но задумался, чем ему заниматься после университета. В то время еще не был открыт Северный полюс, и он решил заняться путешествиями. Но ученый понял, что по поверхности по льдам добраться до полюса невозможно, поэтому он решил сделать подводную лодку и добраться . нужно было как то ориентироваться. Поэтому он задумался, а не сделать ли мне гироскоп большой, который бы хранил азимут, который позволил бы мне добраться до полюса. гироскопы большие, очень большие. Довольно быстро он увидел, что не получается ничего. Трение мешает и прочее. Балансировка там нужна. То есть ему



надо было бы учиться к нам, чтобы понять, как сделать этот компас. Но его идея создания компаса гироскопического настолько увлекла, что на путешествии к Северному курсу и занялся, серьезно занялся проектированием компаса. У него, правда, была хорошая компания вокруг него, которая ему помогала проектировать этот прибор. Первым был эйнштейн, Вторым участником был Макс Планк, Шовер был его двоюродным братом. В общем, он увлекся этим компасом.

*Конец вступления*



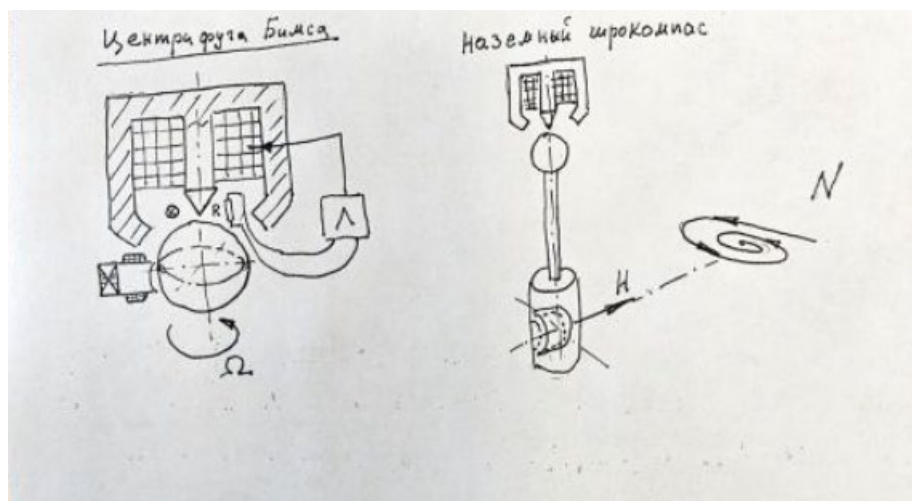
И в результате сделал компас, который показан на этом рисунке. И, в общем-то, его эксплуатировали на всех судах мира, может быть, за исключением английских, некоторых судов и американских. И он дожил до конца Второй мировой войны. Все корабли, все лодки имели его. Увидеть этот компас живьем вы можете на кафедре у нас, на выставке старинных приборов. Там внизу шарик лежит. Вот 30 сантиметровый шарик, который является внутренним корпусом этого прибора. Шарик был сделан из латуни и покрыт резиной. В районе полюсов в этот день был добавлен графит, который делал провод проводящим. И полосочка графитированной резины, две полосочки маленькие, делалась в центре экваториальной плоскости этого компаса. Шар являлся устройством,

которое должно было устанавливаться на север. Он имел маятник снизу и был сделан таким образом, что он почти плавал в жидкости то есть обеспечивался гидростатическим подвесом . шар помещался внутри корпуса , Зазор между ними не очень большой, ну и не маленький, там уже не десятые миллиметра, а что за миллиметры, один-два миллиметра. Внутренняя сфера помещалась в наружную и зазор заполнялся глицерином , то есть сфера в этом глицерине всплывала. Но она хоть и немножко разгружена гидростатическим подвесом но она либо тонула либо всплывала вверх, начинала касаться внутренней сферы, начинала касаться наружной. Так вот, Альберт Эйнштейн предложил сделать так называемое магнитное дутье. То есть в эту наружную сферу вставлялись катушки. Вот они тут показаны, как катушки вставлены вверх и вниз. О они запитывались Относительно высокочастотным напряжением . Если эта центральная сфера начинала тонуть и приближалась к нижней катушке, то в латунном корпусе наводился ток кольцевой, который создавал магнитное поле собственное и это магнитное поле сферы отталкивалась от нижней катушки. То же самое делалось и с верхней катушкой. Еще всплывал, чересчур далеко от него, эта электромагнитная сила, магнитного дутья, его возвращала к центру. То есть обеспечивалось неконтактное взвешивание этой внутренней сферы. Но нужны были только токоподводы. Внутри же в сфере стояли гиомоторы. Гиомоторы обеспечивались с помощью графитированной резины. То есть напротив этих шапок черных, которые на сумочке показывают, устанавливались такие шапочки в следящей сфере. на которые подавались фазы А, В и С. Через тонкий слой глицерина, а глицерин подкисливался, в него добавлялись еще соли, чтобы проводить электролит образовался. Через эту тонкую щелочку шел большой ток. А между фазой А и В Ток не получался большим, потому что большое расстояние. Надо пройти ток в

четверть сферы. Это не миллиметр, а десятка сантиметров. Поэтому он подвел ток к сфере без проводников, через жидкость.

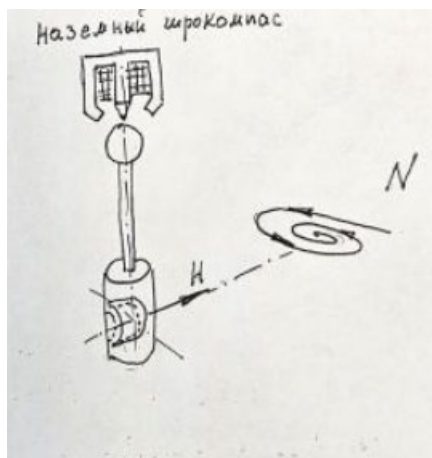
Дальше его двоюродный брат Шурев, Макс Шурев, предложил в этом же компасе сделать период Шурьева, то есть сделать период колебаний 84,4 минут. В результате, такой эквивалентный центр тяжести вот этой сферы, он находился в центре Земли. Поэтому он был по физическому маятнику, который равен радиусу Земли. А такой маятник, получается, невозмущаемый. Точка его подвес как угодно можно таскать с любым ускорением. Но Маятник все равно в центре Земли находился. Поэтому никакого момента возмущающего не появлялось. Значит, вот этот период 84,4, так сказать, минуты обеспечивал работу Компаса в условиях качающегося корабля, качающегося основания. Ну, дальше, если бы этим ограничилось, то в первом случае это магнитное дутье, оно сопровождается и моментом тяжения. Важно было сделать так, чтобы этот момент тяжения был постоянным. Поэтому было сделано наружное, следящее сфера. Ее посадили в подшипники и управляли его двигателем. А на сфере дополнительная полосочка, графитированная резина, помещалась между двух сдвоенных проводничков. Если эта сфера перекрывает электролит, находящийся между этими правыми и левыми проводниками одинаково, то получается сбалансированный мост, который дает нулевой сигнал. Если сфера внутренняя по каким-то причинам закручивать начинает, то с датчика сигнала появляется сигнал, включается следящая сфера, она разворачивает сферу наружную до полного совпадения углового с внутренней сферой. То есть мало того, что была подвеска обеспечена, еще возмущения все оставались строго постоянными, поскольку они были привязаны к этому датчику угла, находящийся на сфере.

Ну, компас я вам рассказал просто для того, чтобы вы знали. Особенно спрашивать я вас не буду, тем более я не читаю теорию самого компаса, которая очень интересна.



А вот следующий магнитный подвес, который мы будем с вами рассматривать, он носит название центрифуга Бимса. (испытание шариков ШП на разрыв) Вот он решил подвесить этот шарик в магнитном поле. Вот написано центрифуга Бимса. Такой горшкообразный магнитопровод с центральным бюстом. Обычный электромагнит. Определённым образом полюса этого магнита. Там катушка внутри с током. И шарик подносился снизу. Расстояние между шариком и кончиком конуса измерялось оптической системой. Стоит лампочка и стоит фоторезистор. Если шарик поднят вверх до конуса, то он перекрывает свет. Фотоэлемент вырабатывает меньшее ЭДС, меньшее напряжение. Это напряжение малое. Идёт в катушку. Ток в катушке уменьшается. Шарик уже не удерживается, не тянет его вверх. Он начинает опускаться вниз. Опускается вниз. до какого места он идёт, но световой поток при этом увеличивается. И увеличивается ток в электромагните. Значит, он сначала быстро начал опускаться, а потом всё медленнее и застыл. То есть шарик подвесил на таком подвесе. А потом сбоку он поднёс статор двигателя. И

закручивает его быстрее и быстрее, пока этот ротор не разрывался на части.



Значит, ну вот маятниковый гироскоп, вот здесь он нарисован, наземный гироскоп. Надо иметь центрифугу Бимса наверху, ну не центрифугу, а электромагнитный подвес с оптическими датчиками наверху, иметь шарик, большой не надо иметь, со штангой. Эта штанга к ней прикрепляется Корпус прибора. Это корпус, а внутри гироскоп. И такой прибор, реагируя на вращение Земли, отклоняется, был вертикален, Земля вращается, зависит от того, как расположен гироскоп, он отклоняется вместе с подвесом своим от вертикали. Появляется из-за того, что он маятник, появляется маятниковый момент. Под действием маятникового момента гироскоп начинает прецессировать в горизонте. И он идет к направлению на север. Доходит до северного направления. Когда он дошел до северного направления, то отклонение у него уже прекратилось. За счет маятникового момента он проходит это положение, переходит, скажем, из восточной плоскости в западную плоскость. Там скорость горизонтальная у Земли другое, вектор начинает опускаться. появляется Отрицательный момент. Отрицательный момент тащит гироскоп, заставляет прецессировать, опять же, к северу. И вот, так сказать, вектор кинетического момента около северного направления, в плоскости меридиана, он начинает совершать эллиптические движения.

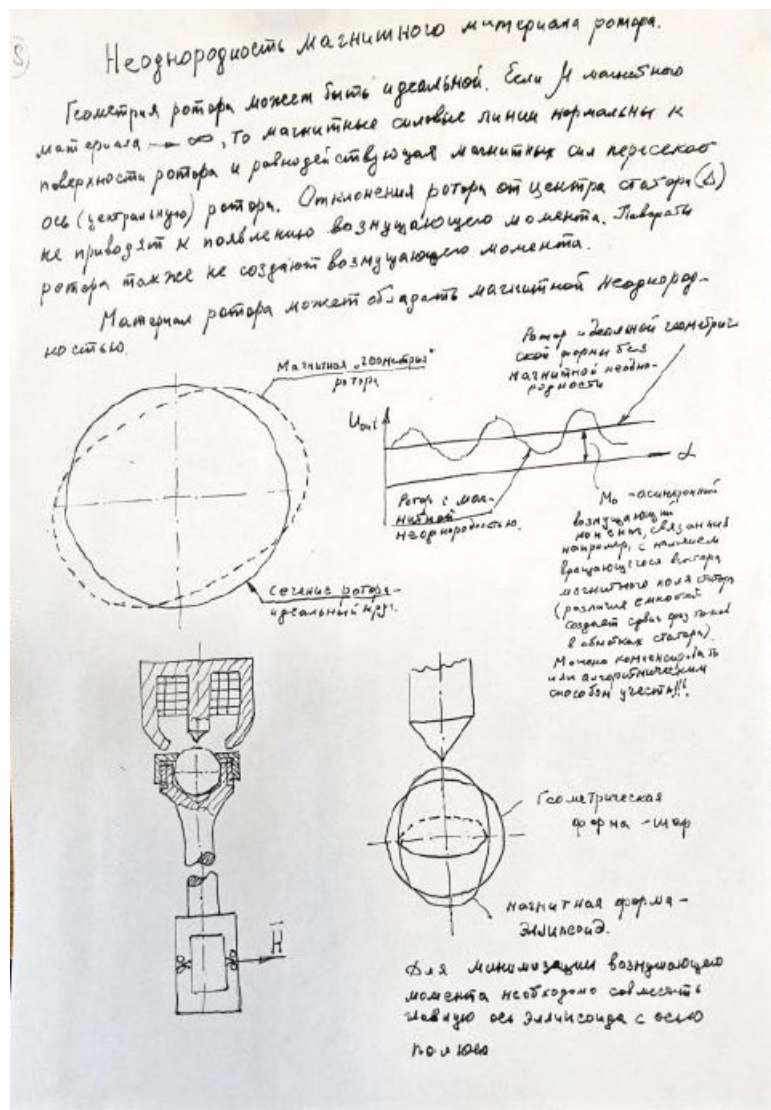
Если есть демпфирование, то это эллиптическое движение будет сходиться к северному полюсу. Гироскоп сам автоматически выставился на север.

**Кстати, про центрифугу Бимса я могу спрашивать на экзамене.**

Надо смотреть уже на несовершенство материалов и прочих элементов гироскопа. Одно дело раскрутить шарик, разорвать, а другое дело, чтобы он давал точные измерения. Значит, должна быть сфера хорошая. Если сфера не круглая, то появляются моменты, в самом подвесе появляются моменты, и появляется Уход гироскопа не на север, а на большую ошибку дает. Поэтому надо сделать идеальную сферу. Идеальную сферу умеют делать. Например, можно сделать сферу с допуском 0,05 микрона. Вот когда делают газодинамический подвес, там примерно такие точности сферических поверхностей делаются. И вроде бы момент должен быть нулевым. Но оказывается, что он не нулевой. Значит, здесь надо глубоко влезать в материаловедение. Что же там делается внутри прибора? Что же внутри вот этого шарика делается? Значит, шарик из паковки делается. Цилиндрическая паковка. Отрезают от него кусок. Обрабатывают на станке, потом шлифуют, полируют и получают идеальный (...). Но оказывается, что физические свойства металла магнитного по направлению проката. Так вот, по направлению проката и в радиальном направлении совершенно разные. Не то, что совершенно, конечно, близкие, но разные. Поэтому магнитная проницаемость материала по этим направлениям отличается и прочие свойства. Я сделал идеально круглый ротор. Показано сечение ротора, идеальный круг. А если бы я каким-то образом мог заглянуть в структуру кристалликов, зёрен материалов, посмотреть как домены повёрнутые и прочее, то я получил бы форму магнитного ротора. механически там идеальный круг а по свойствам магнит это вот это геометрия магнитного ротора получается , а магнитному ротору на геометрическую форму наплевать , потому что он



работает с геометрической ротором магнитной сферы. Значит, тогда получается погрешность, ну, момент вот этот М-Аут, как ток показал его, так сказать, он должен, должна быть постоянная величина, момент постоянный, А он получается переменной, зависящей от углового положения корпуса гирокомпа относительно этой симметрии.

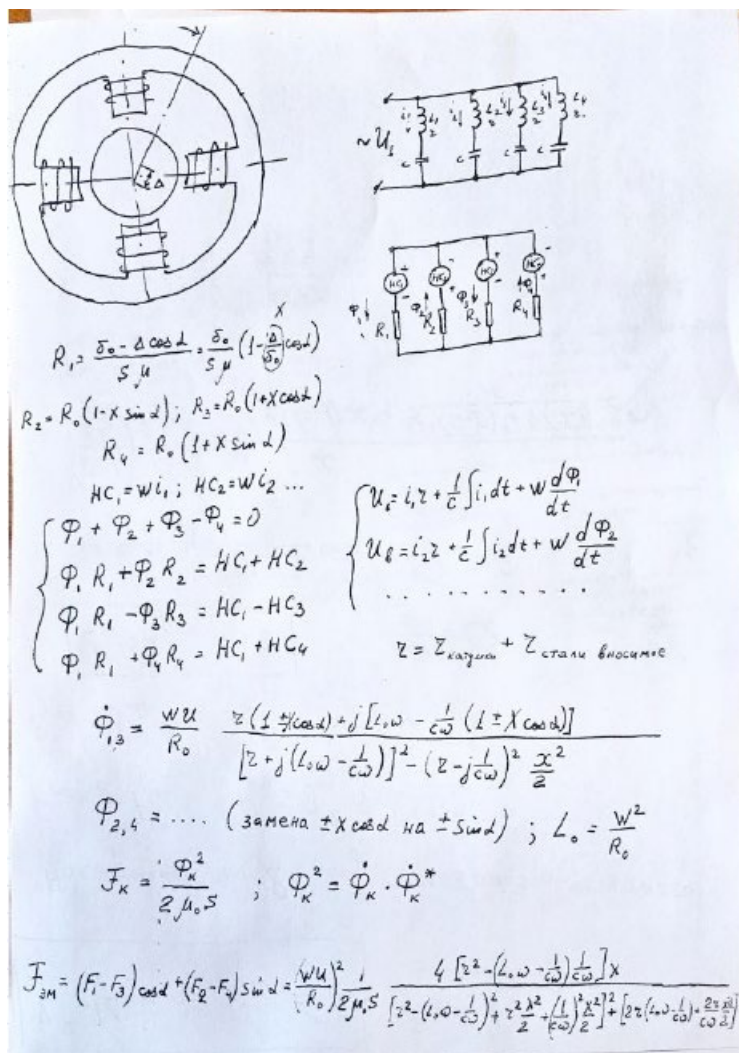


Что делать? Вот здесь нарисована картиночка. Смотрите, внизу гиromотор, который обеспечивает работу компаса. Дальше элемент крепления, стойка такая. Качается она сверху конической проточкой цилиндрический конус, в который закладывается шарик. Вот точно этот шарик, который мы обработали с наивысшей точностью. И резьба по наружу. И имеется гайка, которая закрепляет, прижимает ротор к конусу, и

роток становится неподвижным. Вот зажали, снимаем вот эту характеристику моментную. Плохая. Все надо сделать. Откусить эту гайку, повернуть ротор сначала по одному направлению, скажем, на 90 градусов, опять зажать, проверить, еще раз включить, проверить моменты. Ага, изменились. Мы видим, как изменились. Потом отпустить еще раз. Повернуть теперь во второе положение под 90 градусов к первому направлению смещения. на 90 градусов. Опять закрепить, еще раз посмотреть на эти синусоиды. Ну и дальше расчетным путем уже мы можем сказать, на какой угол надо повернуть этот ротор. Скажем, на 72 градуса в эту сторону и на 13 градусов сюда. Для того, чтобы установить напротив конуса длинную ось эллипса этого шарика. Шарик пусть он круглый, идеальный, а магнитной формой будет эллипсоид. Но если ось этого эллипсоида будет совпадать с осью электромагнитного подвеса, то момент создаваемый этим шариком будет равен ему. Вот это вот обстоятельство надо учесть, то есть вроде центрифуга пинца(?), вроде шарик, но помимо шарика надо много всяких моментов, важно сказать, оценивать.

Ну, теперь вот я вам говорил о Дрейкере, впервые создал магнитный подвес для поплавкового гироскопа.

*Что представляет собой магнитный подвес?*



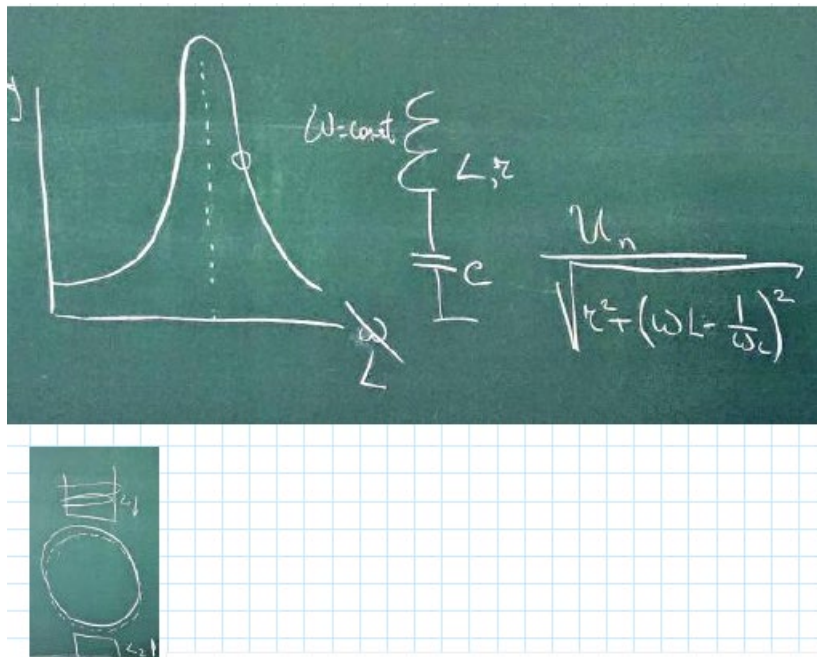
Статор с ярко выраженными полюсами и ротор в виде цилиндра чаще конуса или сферы. Пока мы остановимся на цилиндре. Цилиндр делается из магнитномягкого материала. Естественно, статор делается тоже из магнитномягкого материала. И вот эти цилиндрические детали, но они в виде колечек, я вот сплошными нарисовал, но в общем-то колечек. Они надеваются на выступы поплавок. И размещаются, статоры размещаются вокруг этих цилиндров. Так что электромагнитные силы от их полюсов, а на каждом полюсе расположена катушка, которая создаёт электромагнитные силы. В середине помещается ротор так, чтобы эти магнитные силы могли взаимодействовать с железом ротора. Ну, если мы будем так просто использовать этот магнитный подвес, ничего у нас не

получится, ротор будет притягиваться либо к одному либо ко второму и тд полюсу, Нужно делать систему управления.

Какая схема? резонансный подвес, последовательный резонансный подвес.

Резонансный подвес вот здесь нарисован. Это индуктивности и емкости.

Что делать для этого? Это динутинс.



Что то начинает неразборчиво строчить у доски

Вообще говоря, зависимость тока. Там входит форму для тока, то есть  $v$ , деленная на корень квадрата из  $L$ , активность сопротивления квадрата, плюс. Если мы избавимся от минимости, то получается вот этот значок минус. Значит, когда мы доходим до резонанса частоты, то это скобочка пропадает, остается только сопротивление. Поэтому такое резкое увеличение тока. В принципе, вы можете частоту иметь постоянную. А мы будем менять индуктивность. А индуктивность у нас меняется сама по себе. Когда ротор относительно полюсов смещается, естественно, меняется индуктивность. То есть, если я вместо этой омеги, здесь подставляю просто изменение  $L$ , при каком-то  $L$ , опять же, эта вся форма превратится в ноль.

## Лекция №22 15 декабря

Значит, на прошлой лекции я вам начал рассказывать про магнитные подвесы, рассказывать про центрифугу Бимса. Сказал о том, что существует маятниковый гироскомпас. Но, как выяснил вы, в этом гироскомпасе имеется самое никакое представление. Вот поэтому я специально для вас сделал листочки. Маятниковый гироскомпас – трехстепенной гироскоп, у которого снизу кожуха ротора подвешен груз который показан как грибок. Но может быть представлен в виде штанги, которая прикреплена на шарике удерживаемая центрифугой Бимса а снизу корпус прибора который жестко закреплен гирикомотор, три степени свободы он получает: вращение собственное может в продольном направлении поворачиваться и боковое движение. 2 варианта построения гироскомпаса

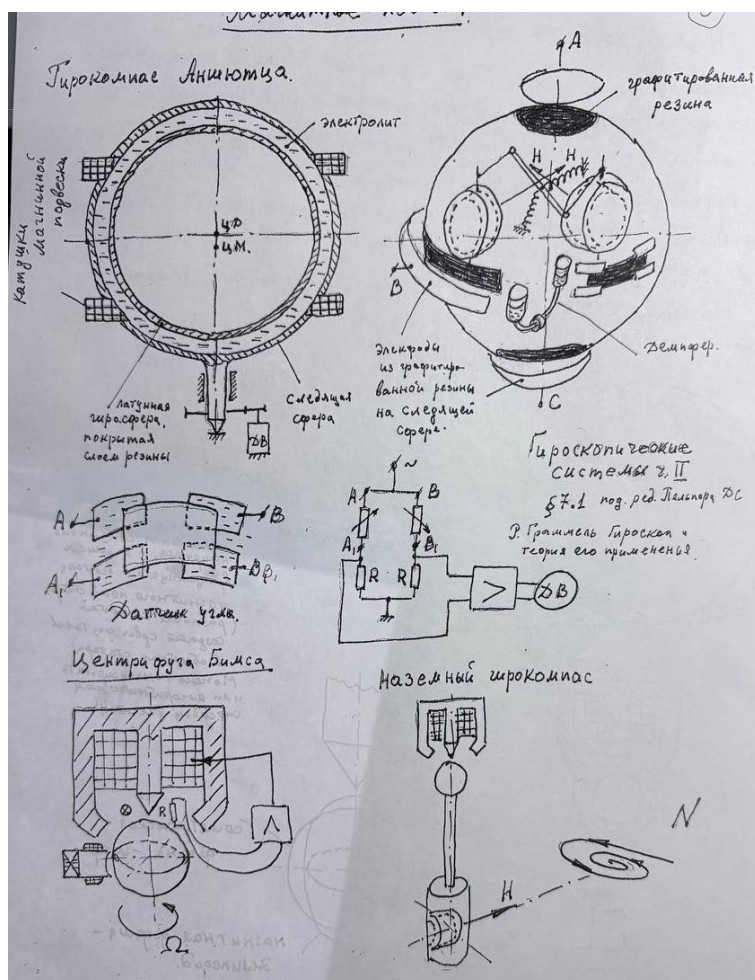


Рис. 1.

Если поставить на землю из-за вращения земли гироскоп начинает прецессировать и вектор кин момента приходит к северному направлению и относительно плоскости меридиана он описывает эллипс который плавно стягивается за счет сил демпфирования к плоскости меридиана, т.е. гироскоп устанавливается вектором кин момента к плоскости меридиана (это все на



рис.2. говорится). Это положение достаточно точно определяется, поэтому такие приборы используются в различных системах где нужна азимутальная ориентация.

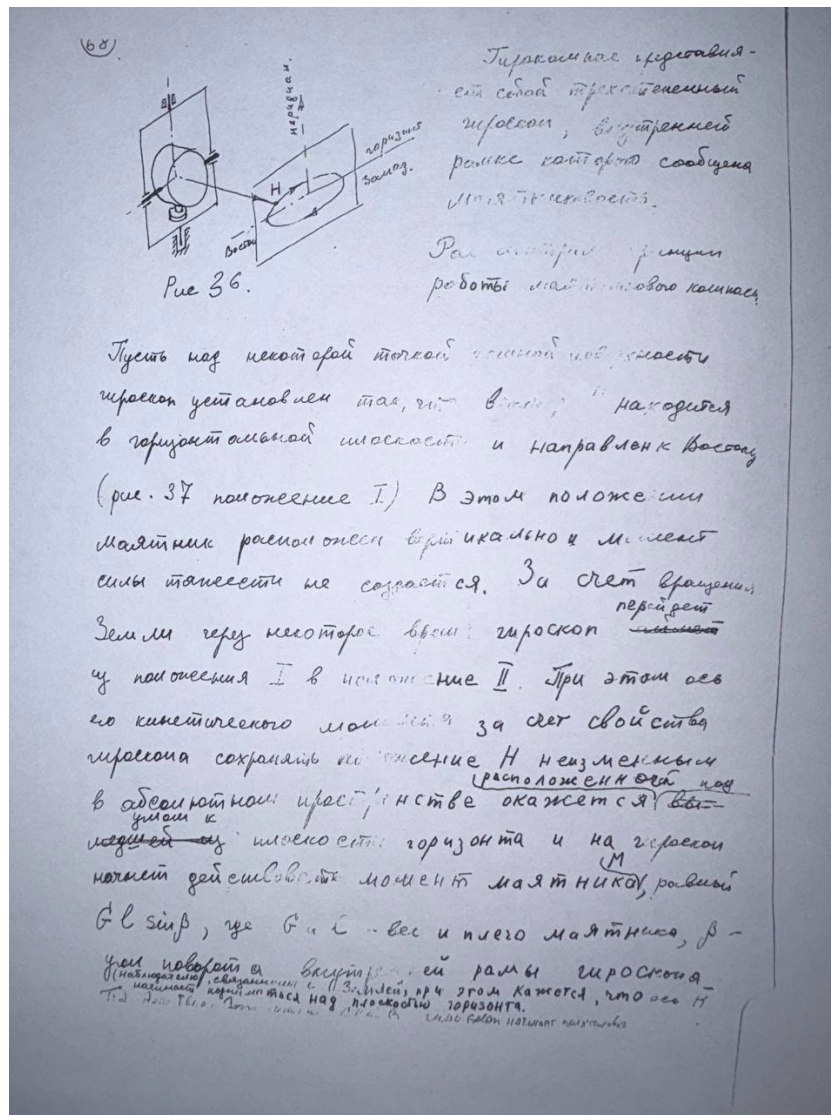


Рис. 2.

Один из основных видов гироскопов для этого. Теория компасов достаточно широко исписана, многие авторы посвящали свои труды компасам основной прибор был. В артиллерии необходим был танковое подразделение в район а надо стрелять за 30 км через гору, противника не видим, нужно точно определить куда стрелять, точное географ положение известно надо определить азимут, возвышение чтобы точно попасть в противника. Азимут определяется след образом из танка вылезает персонал, ставит треногу на треноге трехосный гироскоп с маятниковостью и имеется теодолит. Комбинация – гироскопический теодолит. 10 минут занимает у гироскопа для приведения к северному направлению и далее можно относительно этого положения с помощью теодолита передать направление на танки и далее они



производят стрельбы попадая в невидимую цель. Нам интересен процесс как он приходит к северному положению.

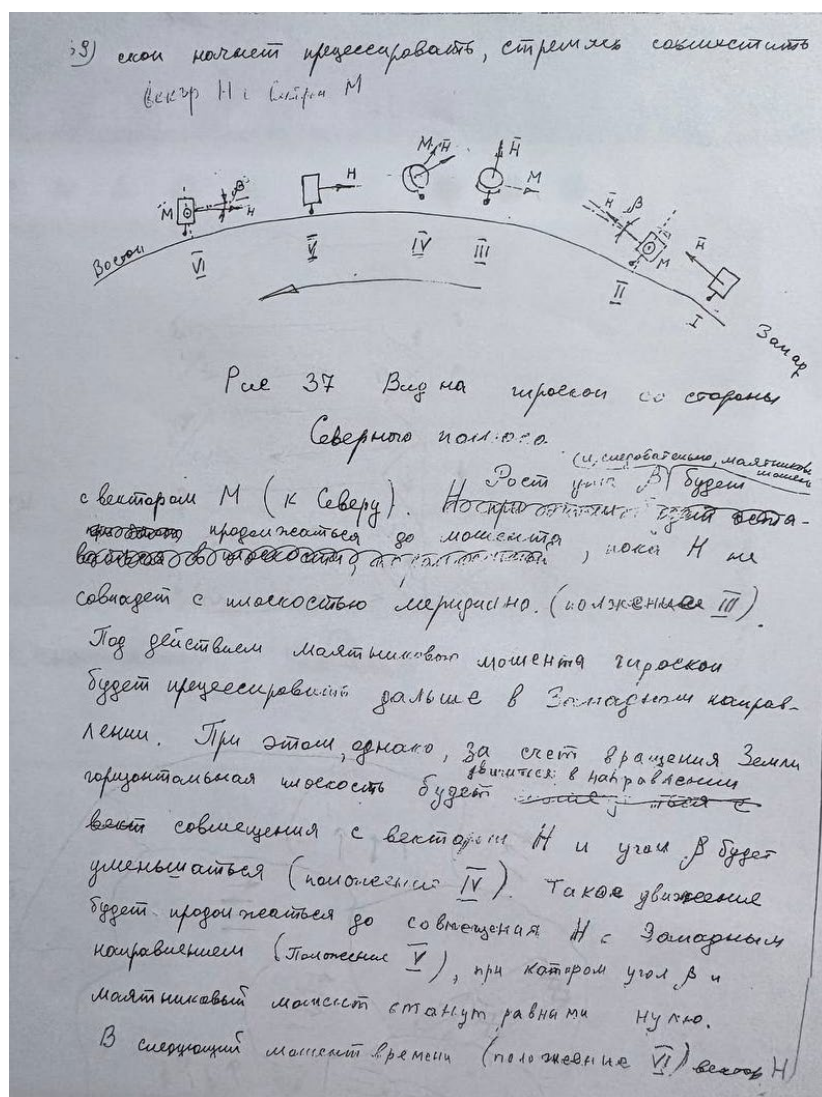


Рис. 3.

На рис. 3. большой круг зарисованный – земной шар, он вращается. Пусть гироскоп установлен в положение 1. Нарисован просто кожух гироскопа. Начальное положение поставили прибор так чтобы маятник по вертикали установлен был, а Н на восток. В таком положении когда маятник вертикален никакого момента на гироскоп не действует и гироскоп пока еще не начал работать, через некоторое время земля повернулась и перенесла гироскоп из 1 в 2. Но св-во 3-х-степенного сохранять вектор Н неподвижным в абс пространстве, поэтому при переносе гироскопа из положения 1 в 2 вектор кин момента останется ориентирован точно также как он был ориентирован в положении 1, но в этом случае кожух гироскопа повернулся относительно вертикали и маятник выйдет из вертикального положения отклонится к востоку, появится маятниковый момент. Величина обозначена стрелкой, но эта стрелка в данном случае направлена на нас. При таком моменте гироскоп прецессирует совмещая вектор Н с этим моментом маятниковости. Тогда ось

кин момента начинает уходить в сторону от запада, ну она вверх во-первых поднимается когда угол бета появился из-за переноса и в сторону севера далее продолжается перенос корпуса гироскопа вращением земли и она из положения 2 в положение 3. Положение 3 соответствует тому случаю когда величина  $H$  значительно поднялась выше и гироскоп кин моментом уже установился в плоскость меридиана, т.е. уже установился направлением на север, но над горизонтом он поднят, но маятниковый момент тоже поднят и имеется наибольшая скорость коррекции гироскопа но уже теперь он идет не на север, а пошел дальше в сторону к востоку. 4 положение это промежуточное положение, он идет показано куда направлен момент, показано куда идет гироскоп и маятниковый момент ведет его уже во втором квадранте картинка показаны на 6 плакате(что?). В этом плакате(что?) уже Земля будет уменьшать маятниковый момент, она будет приводить плечо маятника ближе к вертикальному положению и все это будет продолжаться до тех пор пока гироскоп не придет в положение 5. В этом положении маятник опять становится вертикальным, сам кин момент горизонтален и опять момент управления прецессией будет равен 0, т.е. мы прошли от точки которая показана на восток. Сначала кин момент поднимался вверх, которая потащила гироскоп на запад, потом во второй квадрант перешли, вращение земли, перемещение гироскопа вместе с землей начало уменьшать бета и дошло до положения 5 это крайне правое положение. Сначала подъем переход в другое положение за плоскость меридиана, одновременное опускание кин момента и крайняя правая точка на эллипсе, ну а дальше продолжение переноса. Если из 5 перешел в 6, то вектор кин момента уже не поднимается, а опускаться начинает, отклонение маятника вызывает прецессию в противоположном направлении, причем в верхнюю часть пошел, а после крайней точки в нижнюю часть(что?x2) пошел. Это физическая сторона работы гироскопа. Это один из основных приборов с которым мы имеем дело эти трехосные гироскопы обеспечивают точность ориентации азимутальной от нескольких минут до уровня секунд для баллистических ракет ну скажем 5-10 сек даже мб 3 сек., поэтому полезно знать об этом приборе. Обращу внимание, прибор маятниковый. Маятник может возмущаться если поставим на корабль и корабль находится в волнующемся море, особенно боковая качка корабля она будет возмущать маятник, но эта качка периодическая, в одну сторону одно влияние, в другую сторону другое влияние, вроде в среднем должно усредняться, но оказывается при интеркоординатных колебаниях когда корабль плывет на северо-восток, то колеблется он, боковая качка в этом направлении, то не получается осреднение ошибки, которая вызвана инерционными силами приложенными к маятнику. Поэтому такой прибор плохо работает в волнующемся море. В приборе Аншутца рис.1., причина почему Аншютц большое внимание уделял маятниковости своей сферы. Маятниковость

сферы рассчитывается как период колебаний 84.4 периода, т.е. это период колебаний мат маятника длина которого равна радиусу Земли, поэтому как бы точку подвеса такого подвеса маятникового мы не таскали вокруг поверхности земли с качкой, без качки, ускорено там все эти движения маятник не возмущают, потому что ЦМ находился в центре Земли, сила натяжения этого маятника не создавала момента. Это был большой шаг в создании прецессионного компаса. (БЛЯДСТВО НА ЭКЗЕ СПРАШИВАТЬ НЕ БУДЕТ ТО ЧТО ВЫШЕ) Продолжим работу с магнитными подвесами. Опоры двухосного прибора ПИГа и ДУСа, в которой важно обеспечить безмоментное центрирование поплавка также как центрировали в камневых опорах, но только опора должна быть такая которая не допускает контакт механического цапфы прибора с корпусом, в итоге нулевой момент трения. Сделал первый прибор Дрейпер, начал рассказывать принцип действия, рисовал 2 колокольчика, две зависимости тока от индуктивности при настройке на резонансную область мы получаем равные токи в центральном положении ротора магнитного подвеса ну а если смещается поплавок от центра то для верхнего полюса, предположим что вниз опускается, то для верхнего полюса ток увеличивается, а для нижнего уменьшается и возникает центрирующая сила, которая выставляет ротор в центральное положение. Теоретическая схема в этом случае магнитного подвеса будет соответственно, источник питания - напряжения  $U_b$  и к этому питанию подключены параллельно четырехполюсный магниторезонансный подвес для него как раз колокольные резонансные характеристики изображали и про них говорили

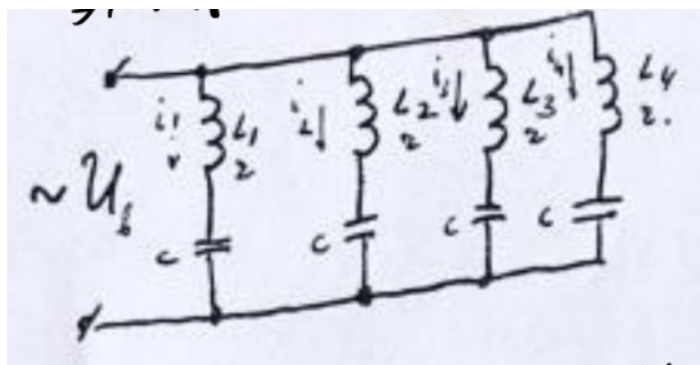


Рис. 4.

Возникает вопрос как бы себя вел подвес, если бы не было емкостей, если бы имели магнитный подвес без емкостей она бы рассматривалась след образом:  $I_1$ ,  $I_3$  2 тока которые текут по обмоткам была бы такая характеристика от величины индуктивности, если индуктивность 0 то находимся в первой точке, а далее чем больше индуктивность, характеристика пошла снижаться. Предположим мы настроили на точку и теперь смотрим, ротор находится в среднем положении  $L_1 = L_3$  и токи соответственно равны  $I_1 = I_3$  и вроде бы

силы взаимно уравниваются, теперь пусть ротор стал опускаться вниз, индуктивность нижней обмотки увеличится, ток уменьшился, а индуктивность первого полюса, вертикального стала меньше и ток возрос, вроде все то же самое что и в резонансной схеме, но что-то не так, когда мы имеем дело с ротором который находится между двух электромагнитов, то на ротор можно сказать действуют две силы, первая сила электромагнитное притяжение обмотки, она зависит от расстояния ротора от полюса чем ближе к полюсу тем больше притяжение к нему, т.е. ротор может либо в одну сторону притянуться, либо в другую, а разница токов из-за изменения индуктивности недостаточна для того чтобы обеспечить центрирование ротора. Когда ставим емкость добиваемся резонансной хар-ки, если мы настроимся на вторую точку половинной мощности за зарезонансной области, то при малом изменении индуктивности будут большие изменения токов. Емкость нужна чтобы поднять крутизну второй силы. Вторая сила зависит от величины токов катушки, не только от расстояния и при наличии емкости из-за того что резонансный контур обладает большой добротностью мы получаем большие изменения тока и получаем центрирование ротора вот это вот физика работы магнитного подвеса. Самым важным является то что сделан резонансный контур с высокой добротностью, тогда составляющие центрирующей силы зависящие от смещения становятся выше, чем составляющие силы притяжения к полюсу за счет изменения зазора, это важно чтобы одна составляющая была больше другой. На листочке записана работа подвеса в формульном математическом виде.

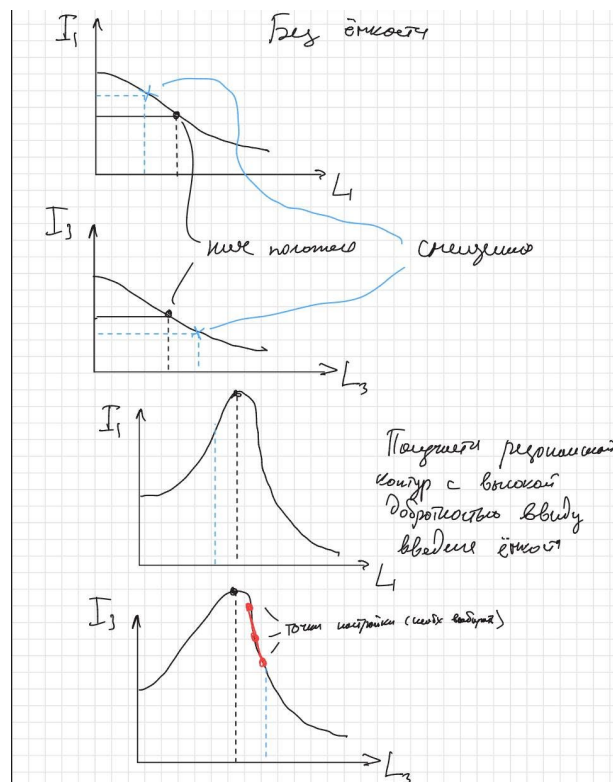


Рис.5.

В состав подвеса входит: ротор из МММ и статор с 4 полюсами тоже из МММ для того чтобы получить хорошую добротность мы должны исключить потери из-за токов Фуко, поэтому и ротор и статор должны выполнены из тонких листов ферромагнитного материала и склеены между собой (шихтованные). Далее расписаны какие магнитные сопротивления имеются в зазорах между ротором и статором. Зазор м/у ротором и статором маленький десятки миллиметров причем во всем мире шо китай шо асашай как заколдованная. Диаметр ротора более гораздо чем 1/10 мм, в случае если зазор в магнитопроводе маленький, а размеры или ширина полюса значительно больше, то магнитная проводимость может быть рассчитана просто  $\mu S/\delta$ , в сопротивлениях соответственно обратная величина  $R_0$ . Краевые эффекты истекание с углов не интересуют пока, они оказывают малое влияние, если выбрать некоторое направление смещения ротора  $\Delta$  под углом к вертикали на угол альфа. Тогда на ротор который сместился на расстояние  $\Delta$  этот зазор может для первого полюса быть вычтен  $R_1$  получится. Можно перейти к относительным координатам вынести  $\delta_0$  из дроби  $X$  относительное смещение = смещение / зазор. Тогда для второго полюса получится  $R_0(1-X\sin\alpha)$ , третий полюс  $R_0(1+X\cos\alpha)$  и четвертый полюс  $R_0(1+X\sin\alpha)$ . В каждом полюсе имеется намагничивающая сила. Помимо электрической цепи на рисунке и эквивалентная магнитная цепь с намагничивающими силами (НС) 1,2,3,4 они чередуются, в первой поток вытекает из полюса, во второй втекает, в четвертой втекает, а в третьей вытекает. Каждая НС есть ток на число витков, получаем 4 уравнения для магнитной цепи, сумма потоков во всех узлах = 0.

$$\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_4 = 0$$

Далее обходим контур по цепочке: первый полюс и второй полюс – для них НС складываются, слева записываем 2 падения магнитного напряжения, а слева 2 НС, потом обходим полюс по цепочке  $\Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = НС_1 - НС_3$  и  $\Phi_1 R_1 + \Phi_4 R_4 = НС_1 + НС_4$ . Так и получаем 4 уравнения. Далее записываем уравнения для электрической цепи: напряжение питания  $U_b$  возбуждения =  $i_1 r$  (падение на активном сопротивлении катушки) +  $w \cdot d\Phi/dt$  (ЭДС индуцируемая изменением потока) и + напряжение связанное с зарядом емкости и 4 таких ур-ий получается.  $r$  – активное сопротивление катушки состоит из двух составляющих: сопротивление провода медного, а вторая часть вносимое сопротивление из-за потерь в стали, из-за наличия токов Фуко. Решаем эти уравнения методом комплексных амплитуд. По формуле Эйлера каждую синусоиду можно представить через мнимые единицы  $(e^{jw} + e^{-jw})/2$ , где  $w$  - частота синусоиды. Сам процесс у нас строго синусоидальный поэтому можем записать выражение. Мы знаем что каждое напряжение и ток это сумма двух экспонент, то что  $U$  и  $I$  сумма двух экспонент нам все равно, а вот составляющая  $w d\Phi_1/dt$  здесь важно, что  $\Phi$  сумма двух экспонент.

Производная от  $e^x = e^x$ , только знак показательной степени должен учитываться и при этом надо домножить на коэф при показательной степени. Получится  $j e^{j\omega}$ , т.е. операция дифф просто сводится на домножение мнимой единицы и нет необходимости решать дифф ур-я. Можем так сделать с двумя частями уравнения Эйлера  $e^{j\omega}$  и  $e^{-j\omega}$ , в случае интеграла надо просто поделить на  $j$  мы получаем систему алгебраических уравнений и определяем определители этих уравнений и получаем далее значения  $\Phi_{1,3}$  куда входят мнимые единицы  $\Phi_{2,4}$ , дальше надо найти силу. Сила определяется по формуле  $F_k$ . Чтобы найти потоки можно пойти 2 путями: Можно избавиться в формуле  $\Phi_{1,3}$  мнимостью знаменателя сначала, потом найти функцию числителя, где будет мнимое число и действительное число, далее определить модуль этого числа сложив(?) квадраты коэффициентов при  $j$  и действительной части в квадрате, после этого то же самое для  $\Phi_{2,4}$  опять определить модули, потом помножить между собой и тогда получим  $\Phi_k^2$ , но операция **!!!НЕ ДЛЯ БЕЛЫХ ЛЮДЕЙ!!!** достаточно сложные формулы получатся, в ТФКП операцию можно свести просто к перемножению двух значений потока  $\Phi_k$  полюса и надо домножить на сопряженное  $\Phi_k$  полюса, тогда получается операция более простая и мы получаем ЭМ силу которая действует со стороны полюса первого сначала, потом также получаем силу действующую со 2 полюса, 3 и 4, далее считаем проекции этих сил на направление противоположное смещению ротора. Вертикальную составляющую на  $\cos\alpha$ , горизонтальную на  $\sin\alpha$  и получаем противное выражение. Нас числитель очень даже интересует, знаменатель пока не очень. Для устойчивого подвеса числитель должен быть  $< 0$ , чтобы в обратную сторону тянуло.



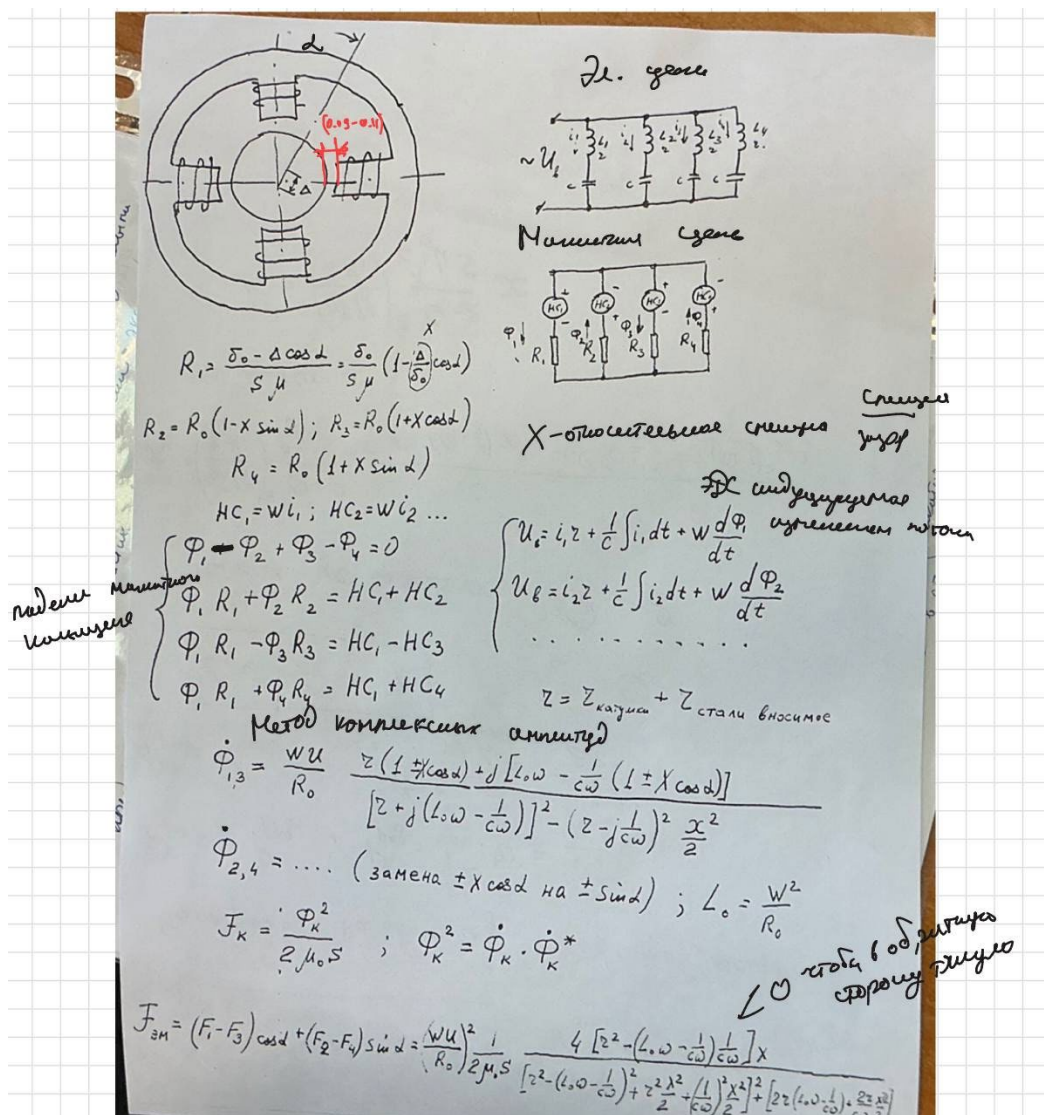


Рис. 6.

Если эта скобка будет  $>0$  подвес будет не устойчивый и подвес будет притягиваться к одному полюсу, необходимо выбрать емкость и индуктивность в таком соотношении, чтобы числитель был меньше 0. Мало того что подвес функционально способен был, надо также настроить так, чтобы он имел наибольшую крутизну, жесткость, а жесткость зависит от точки настройки на графике  $I, L$ . Если находить экстремум, то максимальная жесткость подвеса будет при среднем положении этой точки, а вернее точка называется точкой половинной мощности.  $I = U_B / \sqrt{r^2 + (L_0 \omega - 1/wC)^2}$ . Когда мы находимся на резонансе, то  $L_0 \omega = 1/wC$  и тогда  $I_{\text{рез}} = U_B / r$ , тогда мощность резонанса  $P_{\text{рез}} = U_B^2 / r$ , тогда для настройки точки на половинную мощность  $P_{\text{раб}} = P_{\text{рез}}/2 = U_B^2/2r$  и отсюда  $L_0 \omega - 1/wC = r$ . Если ввести понятие добротности, а добротность в резонансном контуре это отношение  $Lw$  к  $r$ .  $Q = Lw/r$ . Если рассматривать первую формулу которая обведена на рис. 7. это условие устойчивости и вторую формулу это условие настройки на 2 точку половинной мощности мы получаем условие устойчивости магнитного подвеса настроенного на 2 точку, это условие простое –  $Q > 2$ . Что будет если

$< 2$ , не будет работать магнитный подвес. А теперь интересуется что же за центрирующая сила на 2 точке. Если подставить через  $Q$  в  $F_{эм}$ , то увидим что сила центрирующая ....  $R_0$  – магнитное сопротивление при центральном положении. Если упрощать для центрального положения при очень малых смещениях, то остается нижняя формула  $F_{ц}$

$$\boxed{Z^2 - \left( L_0 \omega - \frac{1}{C\omega} \right) \frac{1}{C\omega} < 0} \quad \text{условие устойчивости.}$$

Местность зависит от контура шестерни (или графика  $I, L$ )  
 Настройка на 2 точку половинной мощности:

$$P_{раз} = \frac{1}{2} P_{рез.}; \quad P_{раз} = I_{раз}^2 \cdot Z = \frac{U_0^2}{Z}$$

$$P_{раз} = I_{раз}^2 \cdot Z = \frac{U_0^2 \cdot Z}{Z^2 + \left( L_0 \omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2} = \frac{U_0^2}{2Z} \quad \text{В резонансе } L_0 \omega = \frac{1}{C\omega} \Rightarrow$$

$$\boxed{L_0 \omega - \frac{1}{C\omega} = Z} \quad \frac{L\omega}{Z} = Q \quad \text{до фазового условия устойчивости } Q > 2$$

$$F_y = \left( \frac{wU}{Z R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} \cdot \frac{x}{1 + (Q-1)x^2 + \frac{Q^2(Q-2)^2 + 4(Q-1)^2}{16} x^4}$$

при центр. положении при малых  $x$

$$F_y = \left( \frac{wU}{Z R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} x \quad \text{— центрирующая сила}$$

Рис. 7.

А если смещение есть, то нелинейная зависимость с знаменателем, мы не можем пренебрегать добавкой в знаменателе и сила центрирующая начинает меняться.

На рис.8. изображена схема магнитного подвеса, эл. схема магнитного подвеса, ротор смещен по вертикали вниз, ток  $i_{1,3}$  от  $L_{1,3}$  на резонансной характеристике при центральном положении ротора  $i_0$  а далее смещение вниз растет индуктивность нижнего полюса, то ток уменьшается, а для верхнего полюса ток увеличивается. Ну и далее еще раз записана формула для центрирования, которая коэффициенту уже известному содержащему  $K_{МВ} = (wU/r \cdot R_0)^2 \cdot 1/2\mu_0 S$  и в знаменателе  $K_1 = (Q-1)$ ,  $K_2 = Q^2(Q-2)^2 + 4(Q-1)^2 / 16$ , т.е. с нелинейной зависимостью, как будет зависеть центрирующая сила от смещения ротора. Если добротность большая  $Q_1$ , то получается горб

высокий, сила большая начальная, резко вверх, а потом начинается спад, поскольку начинают сильно сказываться нелинейные члены в знаменателе, если  $Q_2$ , то горб смещается в сторону больших  $X$ , крутизна начальная падает, а смещаться подвес начинает после довольно больших смещений, если  $Q_3$ , то повышается еще больше зона работы магнитного подвеса, но жесткость маленькая, нам нужна большая жесткость, нам нужна большая добротность, наклон характеристике в нуле должен быть высоким, но появляется опасность, сила которая в добротности  $Q_1$  при  $x = 1$  – ротор лег на полюс в этом положении центрирующая сила становится меньше, чем разность сил: вес поплавок – сила Архимеда, здесь специально подобрали, что немножко меньше Архимедова сила чем нужно, тогда поплавков имеет остаточный вес и лег на полюс, подъемная сила стала маленькая, меньше, чем остаточный вес, естественно, что он так и останется лежать на полюсе, т.е. никогда не всплывет, с одной стороны  $Q_1$  хорошо, а с другой стороны плохо, потому что магнитный подвес перестает работать, что сделать можно. В ЭМ датчиках используют вариант дукозина: снаружи ДМ многополюсный, ротор ДМ, потом выступ от поплавка на который надет ротор ДМ, а на внутреннюю часть выступа установлен ротор магнитного подвеса, а внутри обращенный статор. Мы смотрим вариант обычного статора наружное кольцо, полюса внутри, но можно же сделать по другому: маленькое кольцо внутри, а полюса наружу, а ротор в виде кольца, которое будет охватывать магнитную систему статору. В обращенном магнитном подвесе используется схема дукозин, снаружи ДМ, внутри магнитного подвеса цапфа и камниевая опора. Используют это не зря, опора ограничивает максимальное смещение ротора, если не ограничивать, ротор может лечь на полюс, а если возьмем камниевую опору между цапфой и камнем зазор 25 мкм, тогда будучи центрированной цапфа не будет касаться этой опоры, но когда включаем поплавков опускается естественно, а цапфа опускается на камень, т.е. смещение от центра не может быть больше 25 мкм. На графике верт. линия, а штриховка за этой линией обозначает камень, т.е. цапфа ляжет на опоры камниевые, это ограничение смещения поплавка, которая дает опора.

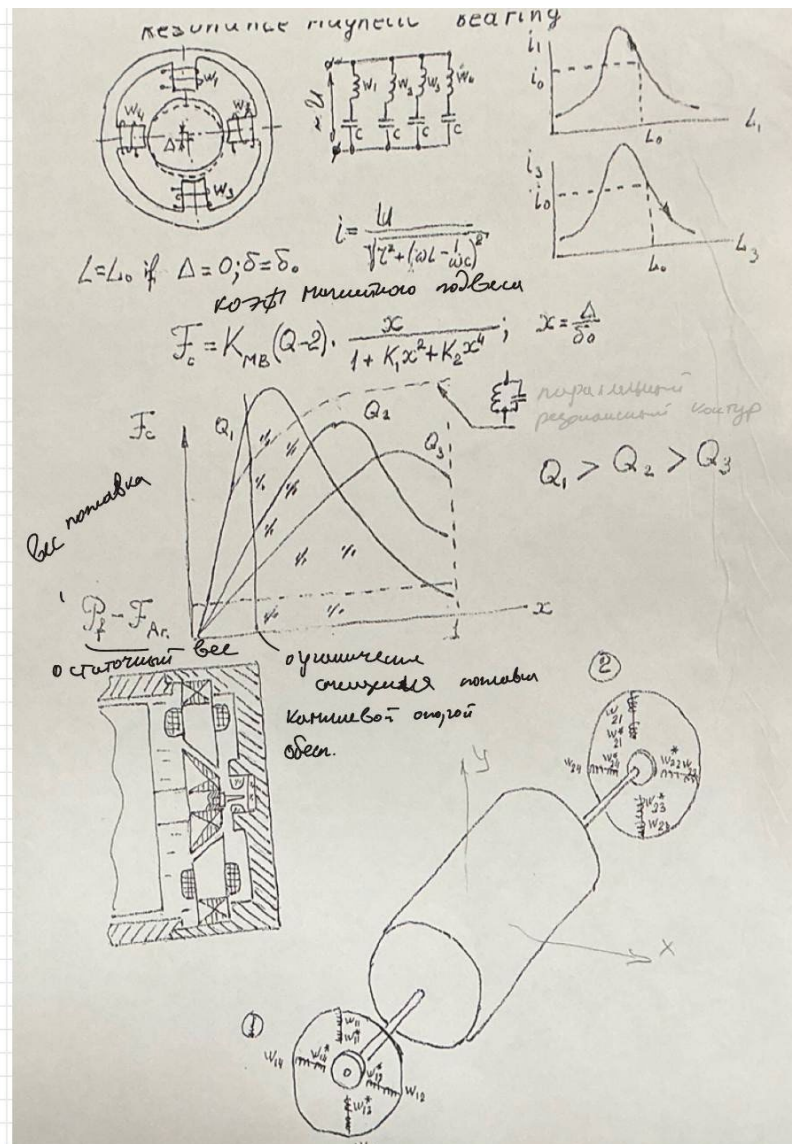


Рис.8.

Чуть назад вернемся, где виброопора внизу рис. 9 поплавковый прибор с магнитными подвесами нарисован поплавок, справа и слева по магнитному подвесу роторы этих магнитных подвесов не цилиндрические, а конические, и полюса и роторы конические, ну для того чтобы обеспечить аксиальное центрирование, если поплавок смещается вправо, то индуктивности всех правых полюсов становится большим, а ток маленький у всех 4 полюсов, а слева у всех полюсов зазор увеличивается и ток увеличивается, появилась сила осевая, которая потянула поплавок в центральное положение, при косом полюсе статора и при коническом роторе мы обеспечиваем и радиальное и осевое центрирование, на рис.8. показан магнитный подвес с коническим ротором и здесь же показана камневая опора с большим зазором, никакого контакта при работе цапфа с камнем нет, только неконтактное взвешивание, но появляется вопрос, а как собирать такой магнитный подвес, зазор в магнитном подвесе должен быть равным 1/10 мм, должны сделать деталь

корпусную, куда поставить статор магнитного подвеса, статор магнитного подвеса правого должны до упора вставляться в корпус поплавкового прибора, но расстояние м/у этими упорами нужно точно выдержать, коническая цапфа, значит сделали расстояние поменьше - зазор меньше получился, сделали побольше – зазор побольше, а необходимо точно 100 мкм, а допуски тогда очень жесткие выходят на изготовление корпуса и просто токарю трудно сделать, для сборки магнитного подвеса предусмотрена регулировочная шайба (опять на рис. 8.). С одной стороны укрепим индикатор, а с другой стороны на поплавок надавим так чтобы зазор стал равен 0, то получим отсчетное положение на индикаторе, а потом отпустим и поплавок спустится вниз на некоторую величину, так мы определили расстояние, двойной зазор в осевом направлении, увидели что получается больше чем нужно, тогда вытаскиваем верхний магнитный подвес, вытаскиваем шайбу 6 и дошлифовываем до нужной толщины, в магнитном подвесе обеспечен тот зазор который нужен, очень дорогая могла быть изготовления точного корпуса, а получилась простая операция подгонки с помощью шайбы. Проведены осевые линии в корпусе сверху и снизу. В поплавковом приборе между поплавком и поплавковой камерой имеется зазор равный 1/10 мм, а он длинный, на всю длину поплавка. При таком длинном зазоре перегнать жидкость из одного края поплавка к другому чрезвычайно сложно, нужна большая разница давлений, представим что прибор начали нагревать, система термостатирования, т.е. правая часть прибора нагрелась, жидкость расширилась и куда-то надо деться, единственное место куда может деться это сильфон, но до сильфона надо добраться, а добираться приходится через щель в 1/10 мм, при этом конечно жидкость переберется, но разница давлений между правым и левым торцем поплавка будет очень велика, поплавок будет как поршень цельный, справа громадное давление, слева маленькое, будет прижиматься поршневой силой к магнитному подвесу, а если есть подпятник, то пята будет упираться в подпятник, силы окажутся настолько большими, что цапфа проткнет камень, надо облегчить для жидкости возможность перетекания с правой полости в левую к сильфону. Делают в корпусе отверстия, через которые жидкость спокойно перетекает справа налево. Так последовательный магнитный подвес был достаточно подробно разобран.

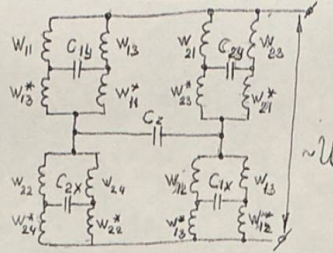






катушками центральная емкость включена  $C_{1y}$ , это емкость которая управляет магнитным подвесом по оси  $y$ , по вертикальной оси, далее идет подвес который выставляет по оси  $x$  – он расположен по диагонали к первому мосту, также по диагонали первой располагаются  $w_{12}$  и  $w_{12}^*$ , по второй  $w_{14}$  и  $w_{14}^*$  и по середине моста емкость  $C_{1x}$ , т.е. для магнитного подвеса мостовой схемы для левого подвеса для направления  $x$  и  $y$  нужно всего по 1 емкости, для заднего магнитного подвеса то же самое 21/23 и 22/24 и у них свои емкости  $C_{2y}$  и  $C_{2x}$  и еще общая емкость  $C_z$ , которая обесп. осевое центрирование поплавка. Если б делали последовательный, общее кол-во обмоток в данной схеме получалось 16, нужно было б 16 емкостей, а Станкевич пришел к варианту, когда всего 5 емкостей. Это первое достоинство, второе достоинство – при центральном положении ротора у магнитных подвесов рабочая точка (2 точка половинной мощности) при питании довольно большим напряжением, ну допустим 10 В, а добротность тоже 10, то на емкости будет высокое напряжение, а если в мостовой схеме работают емкости, то при центральном положении ротора на емкости напряжение равно 0. И вообще при смещении на емкостях напряжение пропорционально смещению. На рис. 10 указано что напряжение на емкостях пропорциональны смещениям. Мощность потребляемая виброопорой от 0.1 Вт до 0.05 Вт, очень маленький ток потребляет, мощность, которую потребляет магнитный подвес = 1 Вт, что довольно много, она и греет прибор, в наших расчетах ДМ для примера, получалось порядка 0.6-0.8 Вт при 20°. Виброопора с одной стороны какой бы грязной жидкостью не была в магнитном подвесе никакой гадости на цапфу не навешивает, при зазоре 1/10 мм, частички не ощутимы, что хорошо, а высокая мощность не есть гуд. Крутизна характеристики, которая может обеспечиваться магнитным подвесом  $K_{MB}$ . Жесткость у резонансного магнитного подвеса колеблется в пределах от 0.01...0.1 Н/мкм, приличная, но конечно не ш/п и не всегда этого достаточно. Магнитный подвес устойчив, условие простое  $Q > 2$ , но это только статическая устойчивость, а если поплавков не в жидкости, то появляется динамическая неустойчивость, т.е. он будет стучать по полюсам, по камням, нужно сделать демпфирование, в поплавковых жидкостью демпфирует, а так динамически неустойчивый, опять же Станкевич придумал как обеспечить устойчивость. В Damping by additional circuit слева магниторезонансный подвес последовательный, если нижнюю часть параллельную цепь отбросить, то самый классический. Станкевич последовательно в каждый контур вставил еще 1 резонансный контур, но только параллельный и этот резонансный контур оказалось обеспечивает опережение по фазе, и в рез-те получился магнитный подвес, который висел в воздухе, он пошел дальше. Он взял мощные усилители и через них большой ток на обмотки подавал. В итоге получилось 5-тикилограммовый ротор заставить крутиться без трения.

# Bridge resonance magnetic bearing.



Напряжения пропорциональны смещениям

$$U_{C14} = K \Delta y_1, \quad U_{C1X} = K \Delta x_1, \quad U_{C24} = K \Delta y_2, \quad U_{C2X} = K \Delta x_2$$

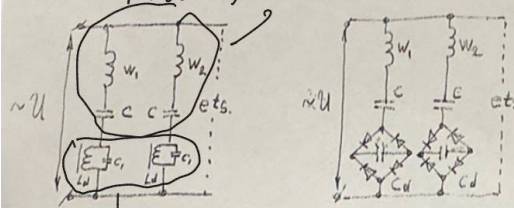
$$U_{Cz} = K \Delta z$$

В ДМ напряжение  $\sim 0.6$  В

$$P_0 \sim 1 \text{ Вт}; \quad K_{MB} = 0.01 \dots 0.1 \frac{\text{Н}}{\mu\text{м}}; \quad M_0 \neq 0$$

Damping by additional circuit

магнито резонансный подшипник с дополнительными



попарными узлы

Рис. 10

## Магнитные подвесы

Сегодняшняя лекция у нас будет посвящена несколько необычной тематике. Необычной не в том плане, что она необычна для нашей гироскопической навигационной техники, а необычна тем, то, что она вам не совсем привычна.

Я правда в предыдущих своих лекциях говорил вам о гистерезисных моментах в электромагнитных моментных датчиках. Не раскрывая сути дела, то есть не раскрывая что такое гистерезисные моменты, откуда они берутся и лишь говорил, что причиной их является наличие круговых магнитных потоков в магнитопроводе, в роторе в основном.

А панацея от этого гистерезисного момента – то, что мы можем переориентировать магнитные потоки в роторе, сделать их вместо круговых – аксиальными.

*(Аксиальные (осевые) — это термин, описывающий что-то, относящееся к оси или расположенное вдоль оси).*

В этом случае моменты резко уменьшаются.

Ну а сейчас мы приступим к изложению материалов о магнитных моментах гистерезисных в моментных датчиках приборных. И здесь нам придется как следует рассмотреть физику этих гистерезисных моментов.

Займемся с вами магнитным подвесом, и я немножечко расскажу вам о гистерезисных моментах.

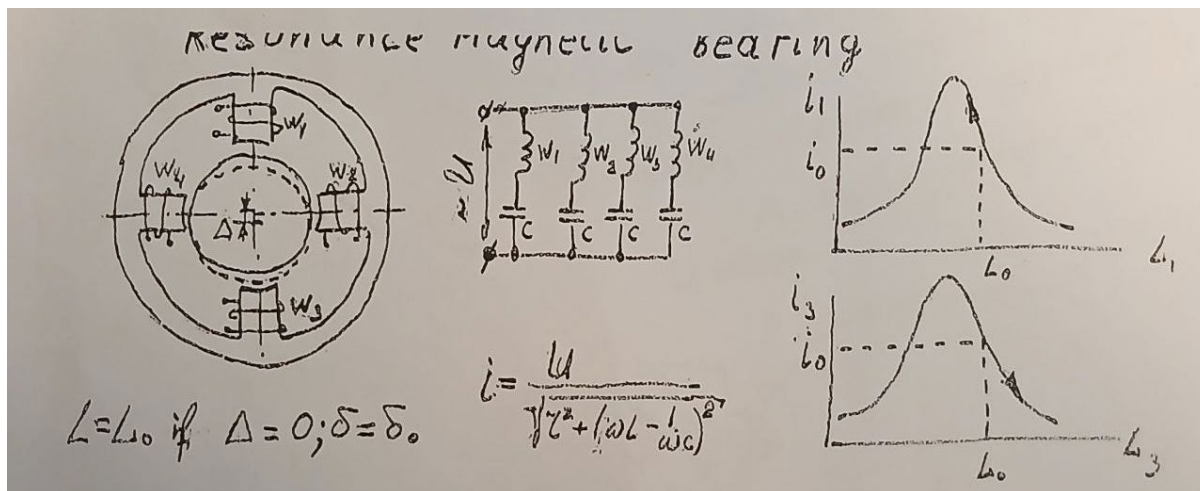
На кафедре лет 50 тому назад Сергей Алексеевич Шахов. Занимался активными магнитными подвесами. Я вам говорил об активных магнитных подвесах, рассказывал вам об импульсном управлении магнитных подвесов.

Но вот такими активными магнитными подвесами так лет 5 спустя после той истории, которую я рассказываю занимался Сорокин Александр Николаевич. Он является первым разработчиком активных магнитных подвесов с широтно-импульсной модуляцией. И его разработки как раз и пошли широко в приборы с магнитными подвесами повсеместно.

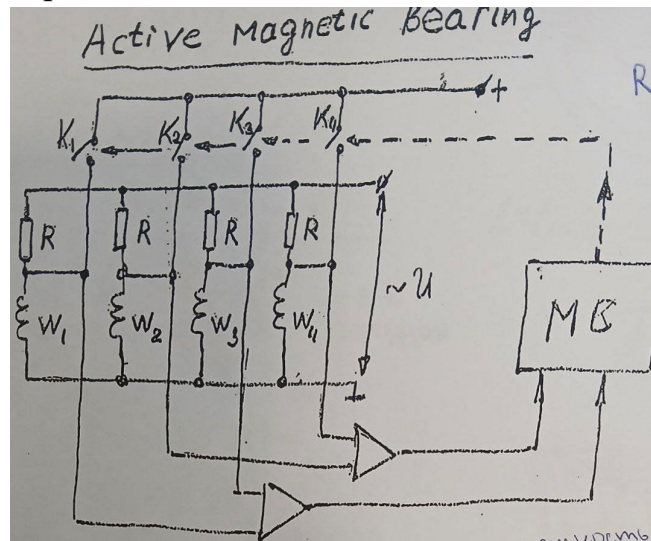
Первое внедрение было в институте автоматике и приборостроения им. академика Пилюгина. Потом эту разработку заимствовали, полностью взяли без всяких изменений, в НИИ прикладной механики им. Кузнецова.

Я вам уже говорил вчера, какие преимущества имеет этот магнитный подвес по сравнению с резонансным. Это очень малая потребляемая мощность при центральном положении ротора, поскольку в резонансном подвесе, как вы помните, довольно большие токи потребляются при

отсутствии смещения ротора. Вот этот вот нулевой ток на вторую точку половины мощности, он довольно большой, и эта мощность нагревает прибор и является предельно нежелательной для повышения высокой точности:



Так вот, в активном магнитном подвесе при центральном положении ротора, который устанавливается по равенству индуктивности катушек и который фиксируется электрически по балансу мостов R, R, W1, W3, запитанных переменным током, с диагонали которых сигнал идет на усилитель и в цепь обратной связи:



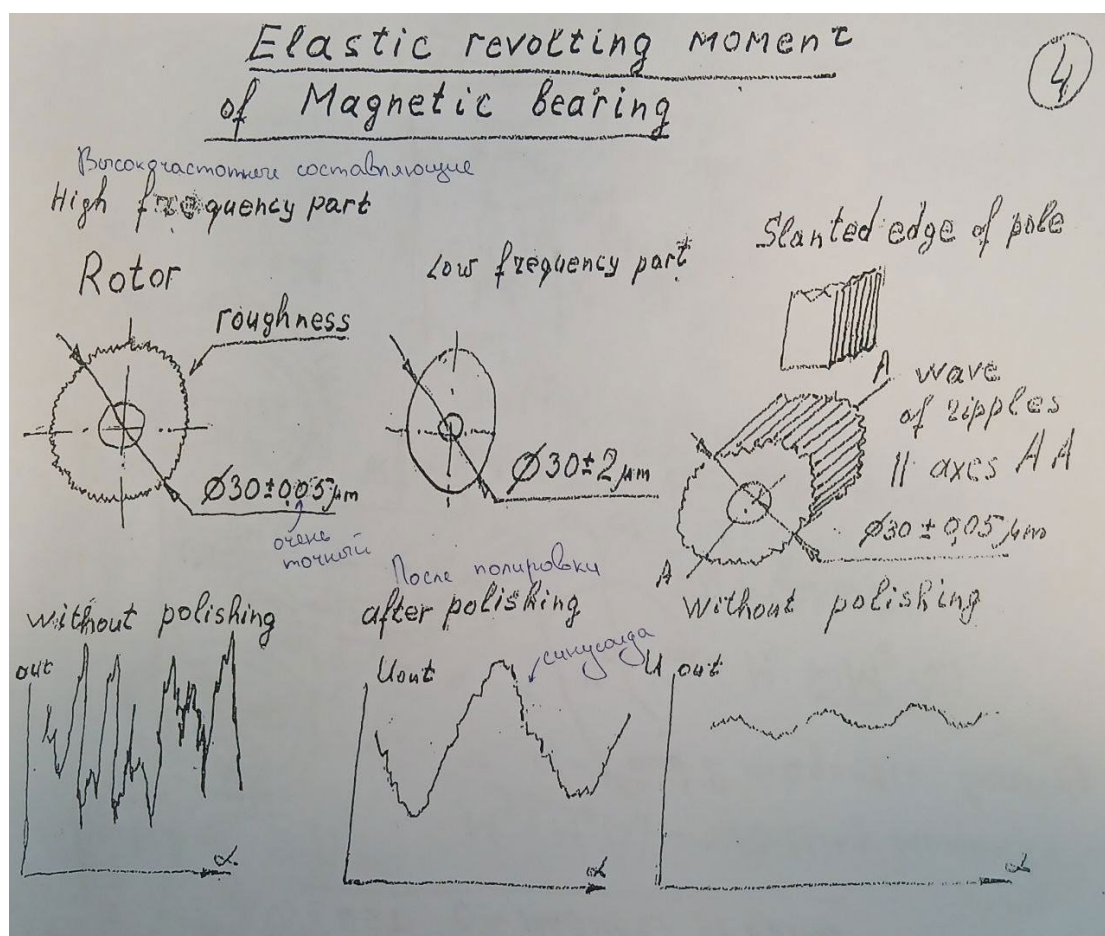
Так вот, если ротор находится в центральном положении, то сигнал разбаланса мостов равен нулю. Этот сигнал подается на микроконтроллер. И микроконтроллер практически не управляет этими ключами, то есть ключи практически остаются отключенными.

И только когда ротор отклоняется, появляется сигнал, и микроконтроллер формирует сигнал с широтно-импульсной модуляцией, включая на расчетное время 1 или 2 ключа, входящих в схему для того,

Поэтому мощность у такого магнитного подвеса, она небольшая, она равна 0,1 Ватта по сравнению с целым Ваттом у резонансного подвеса.

$$K_{MB} \sim 0.1 \dots 1 \frac{N}{\text{мм.}} \quad ; \quad P_0 \sim 0.1 \text{ Вт} \quad ; \quad M_0 \rightarrow 0$$

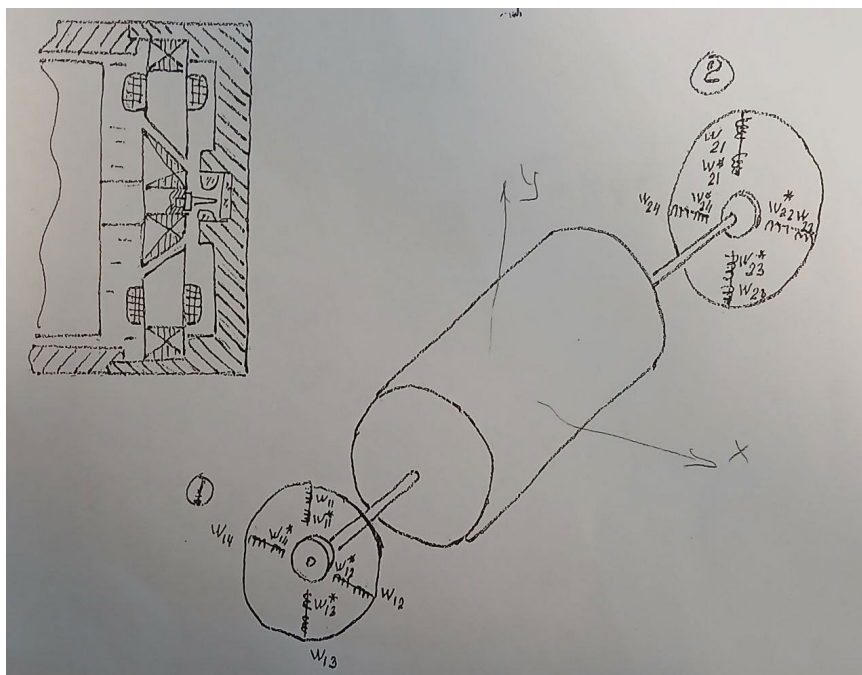
А если магнитные поля маленькие, то нет моментов взаимодействия ротора, при любой ее форме, с полем статора. Поля то нет. Поэтому и момент равен нулю и все вот эти вот синусоидальные составляющие момента, так называемый упругий момент, вызванный несовершенством формы ротора, шероховатостью и так далее, все это получается очень маленьким.



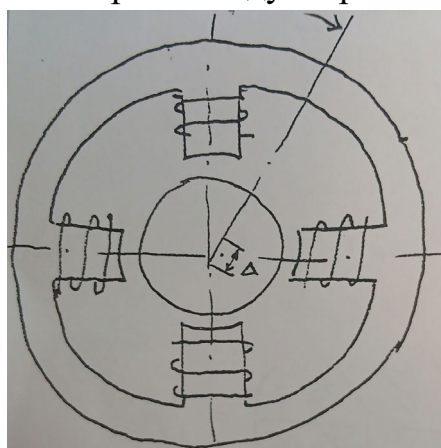


Поэтому активный магнитный подвес с точки зрения точности прибора имеет заметные преимущества.

Так вот, Сергей Алексеевич Шахов, он занимался магнитным подвесом, управляемым на постоянном токе. Но эти магнитные подвесы были не такого типа, как в центрифуге Бимса, где имеется только лишь конический уголок и постоянные магнитные поля, протекающие через шарик. А он занимался многополюсным подвесом, типа вот такого:



Здесь центрируется конус, а он брал магнитный подвес, содержащий два статора, и подвешивал магнитный шарик в этом подвесе. Со всех сторон он был окружен полюсами. В качестве датчика положения этого шарика, он использовал тоненькую металлическую фольгу, которая через слой диэлектрика наклеивалась через торцы полюсов. Через такой достаточно толстый слой, порядка 1 мм. И образовывалась емкость, рабочий зазор которой создавался рабочим зазором между шариком и косой обкладкой.





Получался емкостной датчик перемещения шарика. О датчиках перемещения мы с вами будем говорить более подробно в следующем семестре, поэтому я щас на их конструкции останавливаться не буду.

Дальше сигнал о разности этих перемещений подавался на усилитель, и подавался ток на обмотки, уложенные на полюсах. Ну тут тоже разные могут быть варианты, либо в обоих катушках течет ток, и когда надо управлять, то один из токов увеличивается, а другой уменьшается. Либо ток близок к нулю при центральном положении шарика, и когда шарик смещается, скажем вправо, то начинает формироваться ток в левой катушке пропорционально этому смещению. И такой, и такой вариант пробовался.

Но особенностью этого экспериментального магнитного подвеса было то, что управление шло на постоянном токе, то есть на шарик воздействовало постоянное магнитное поле.

Ну и вот, когда он начинал эксперименты с этим шариком, подвес такой работал, висел, то стало понятно и заметно, что существуют моменты, типа моментов трения, мы их называем гистерезисными моментами, которые привязывают этот шарик к положению полюсов статоров магнитного подвеса.

Достаточно прозрачно, откуда эти моменты могут появляться. Поскольку управление идет постоянным магнитным потоком, то он протекает через тело шарика и создает области намагниченности в этом шарике. А каждый магнитный материал, даже самый хороший, даже пермаллой, он имеет кривую намагничивания в виде гистерезисной петли.

У магнитотвердых материалов эта гистерезисная петля очень широкая, петля постоянных магнитов. А вот у магнитомягких материалов эта петля очень маленькая, исчезающе маленькая, особенно у пермаллоя 79НМ, в случае если вы аккуратно отожгли этот магнитный материал, подвергли его отжигу, и после этого никаких механических воздействий на этот шарик вы не оказывали. То тогда петля получается очень маленькой, но она существует.

Если есть петля, то, когда через шарик вы пропускаете магнитное поле, а потом его убираете, у вас на теле шарика остаются области намагниченные. Очень слабо намагниченные, поскольку петля узкая. И вот это вот магнитное поле, сохраненное в теле шарика, оно взаимодействовать может с управляющим магнитным полем и удерживает шарик в нейтральном положении. Ну, слабее гораздо, чем поле замагниченное в

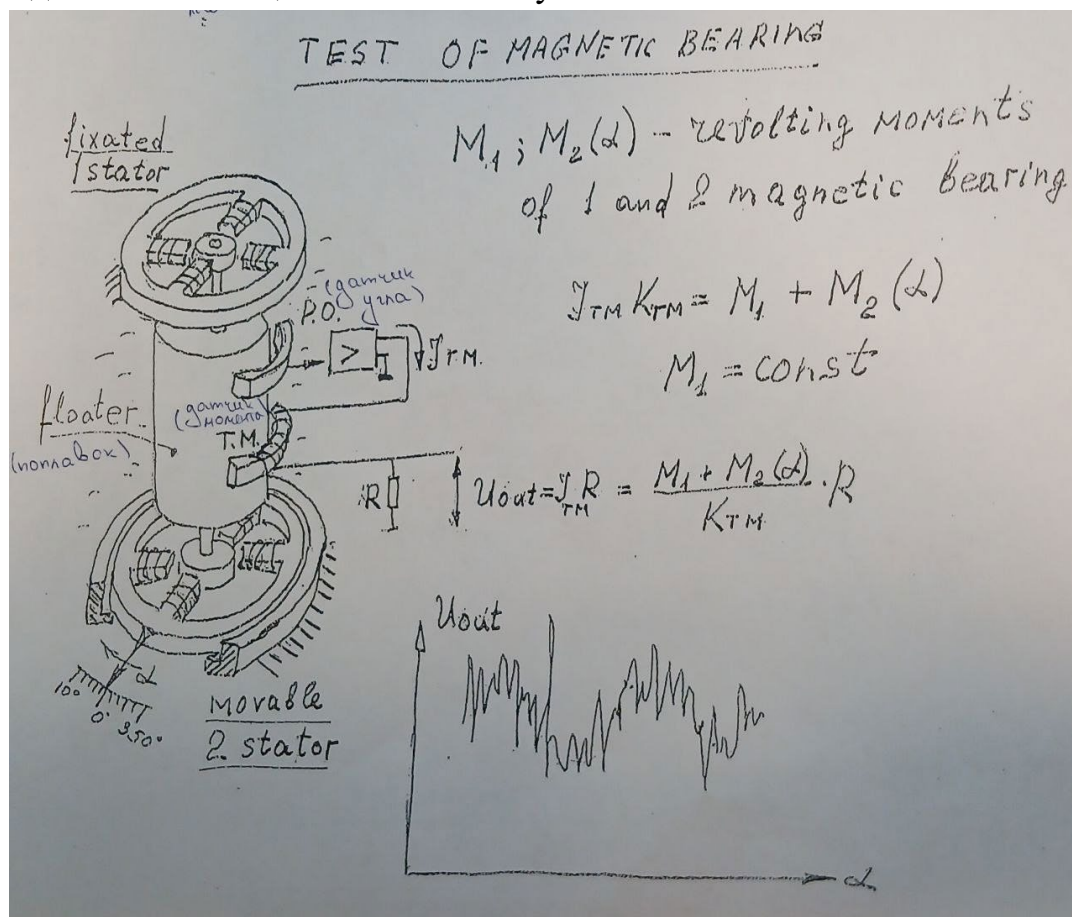
шарике, взаимодействует с внешними магнитными полями от полюсов статора, запитанных постоянным током.

Есть еще вторая составляющая. Тока нет, магнитных полей в статоре нет, но есть магнитные поля из-за намагниченности элементов шарика. Поэтому магнитное поле намагниченных участков, очень слабое, оно дает маленькие, но все-таки дает физические ошибки. Момент взаимодействия этих намагниченных областей с железом этих полюсов.

Ну вот эти моменты рассчитываются, и исследованы были им внимательно.

Но мы знали о том, что существует такие магнитные поля.

Так вот после того, как были изготовлены первые магнитные подвесы, после посещения Бауманского института академиком Пилюгиным – это первые магнитные подвесы для поплавкового гироскопа, то мы начали их исследовать с помощью вот этой вот установки:



В этой установке, напоминаю, имеется поплавок, который взвешен в жидкости.

Имеется цепь обратной связи, которая измеряет положение этого поплавка, поворот этого поплавка вокруг оси подвеса. Сигнал о повороте оси подвеса, он с датчика угла (P.O. – pick-off, датчик угла) поступает на

усилитель и дальше через датчик момента формирует управляющий момент, который удерживает поплавков в положении, при котором сигнал с датчика угла, равен нулю. Ну тоже самое, что мы использовали для исследования моментов тяжения шарикоподшипников.

Если на поплавков действует момент, то необходим постоянный ток в датчике момента (Т.М. – torque motor, датчик момента), который противодействующий этому уводящему моменту. Ток создает падение напряжения на эталонном сопротивлении, по выходному напряжению, снимаемого с него, мы можем судить о величине момента, действующего на поплавков.

Момент может иметь постоянную составляющую, как вы уже знаете, и может иметь зависимость от углового положения. Например, тот же самый упругий момент. Вот, постоянная составляющая, какими-то причинами, сейчас не будем вдаваться какими, и вот переменная составляющая, связанная с зависимости возмущающего магнитного подвеса от угла альфа.

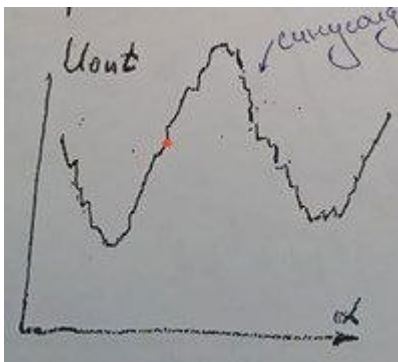
А угол  $\alpha$  – угол поворота статора, ну в данном случае, статора нижнего магнитного подвеса относительно корпуса, и естественно, неподвижного относительно корпуса поплавка. Верхний магнитный подвес просто жестко закреплен и его мы не трогаем.

Кстати сказать, верхний магнитный подвес – это одна из составляющих момента  $M_1$  в данной формуле.

Хотя, я еще разок вам напоминаю, у вас могут быть емкости в резонансном магнитном подвесе немножечко разные, тогда появляется круговой магнитный поток, который увлекает ротор. Это тоже не надо забывать. Но это постоянные магнитные моменты, которые в принципе легко компенсируются алгоритмически и на них особого внимания никто не обращает.

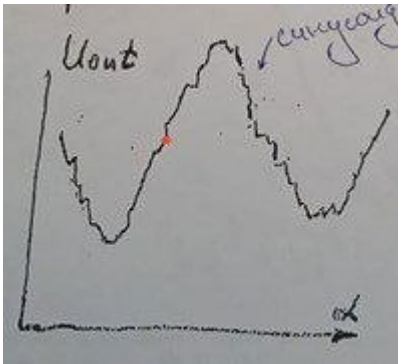
Важен переменный магнитный момент, важна его нестабильность. Причем даже переменный магнитный момент не так уж страшен.

Но, предположим, вы работаете в какой-то точке, предположим в этой:



$\alpha = 97^\circ$ . Вот это вот нулевое положение поплавка. В поплавковом гироскопе, или в акселерометре, положение поплавка относительно корпуса практически не меняется. Скажем, если в гироскопическом стабилизаторе, вы имеете внешний момент, то естественно гироскоп под действием этого внешнего момента начинает прецессировать, появляется угол. Этот угол передается на систему разгрузки, на двигатель стабилизации. (27:06) И двигатель стабилизации развивает момент, компенсирующий внешний момент...

И поплавков практически сохраняет вот это вот нулевое положение. То есть отклонения поплавка от этого нулевого положения, они очень небольшие.



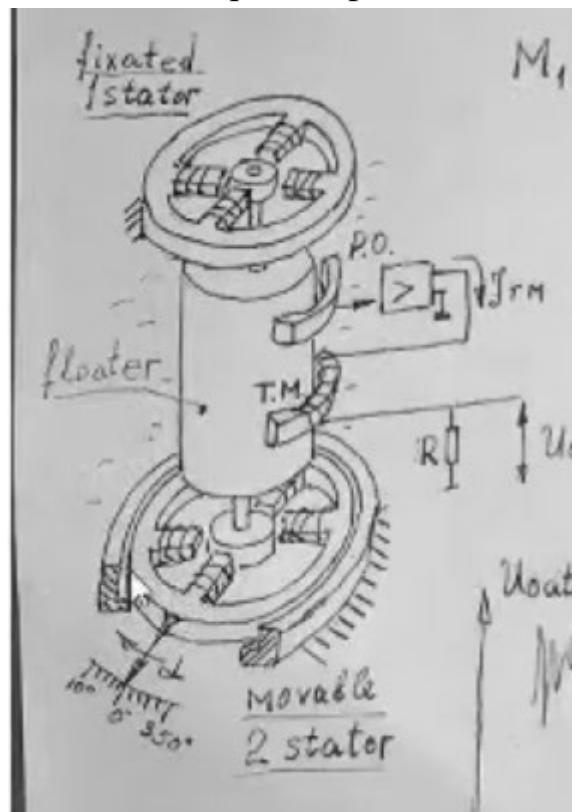
Ну и если вы знаете вот закон, наклон вот этой вот характеристики, то вы можете, так сказать, провести алгоритмическую компенсацию вот этого вот момента, зная вот эту статическую ошибку поворота ротора поплавка.

Так что прибор работает в нулевой точке, поэтому и наклон, ну, во-первых, постоянная составляющая она совсем никакого значения не имеет, а вот эта вот измеренная переменная составляющая, наклон, он может компенсироваться, но может компенсироваться только в том случае, если этот наклон является повторяющимся, если он один и тот же в течение всего времени службы вашего прибора.

А вот самое страшное для приборов – это ошибка неповторяемости. Вот если вот этот наклон меняется во времени случайным образом, или величина постоянного момента меняется каким-то случайным образом, то это создает ошибку неповторяемости, невоспроизводимости. Называют ее часто и невоспроизводимость, и неповторяемость. в американской печати называется non-repeatability, неповторяемость. Вот ошибка неповторяемости это самая страшная ошибка, которая не может быть компенсирована никакими способами, которая не может быть отфильтрована никакими фильтрами, будь то Виннера, Кальмана и кого угодно. Это Ошибка, которая ни физически, ни компьютерным способом не устранима.

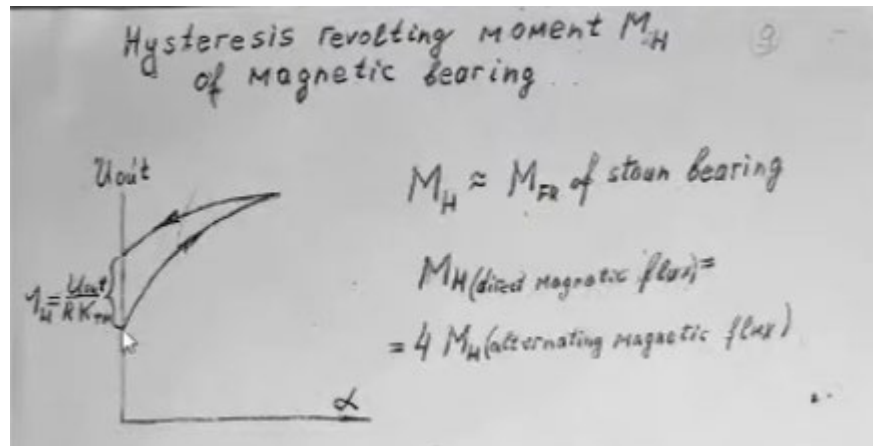
Так вот, когда получили первые магнитные подвесы и сделали вот эту установку, то начались испытания магнитных подвесов. резонансных подвесов, резонансных магнитных подвесов, работающих на переменном токе. И, так сказать, первый же эксперимент показал, ну, вот мы начинаем отклонять ротор, было какое-то начальное положение, начинаем отклонять ротор, начинает меняться выходной сигнал, то есть начинает меняться момент.

Ну, мы видим, да, есть упругий момент, связывающий ротор со статором. Ну,



это не страшно, это мы знали, что такой момент существует. Так, сейчас в какую сторону мне надо повернуть.

Так. Ну вот. А теперь вот провели такой эксперимент. Вот из этой точки мы начали менять момент. Вот он начал при измене угла альфа нарастать. А потом мы остановились и стали поворачивать статор к



прежнему положению, к нулевому положению. И с удивлением обнаружили, что в одну сторону момент меняется вот таким образом. а в другую сторону он меняется по-другому совершенно закону. И вот это вот невозврат, это вот, так сказать, то, насколько...

Был вот такой вот момент в начале, а после того, как мы отклонили статор и вернули его в прежнее положение, он стал вот таким вот. То есть вот эта вот величина, я прошу прощения, на рисуночке она не очень у меня пропечаталась, краешек срезала, Значит, МН. Это будет выходной сигнал, делённый на сопротивление и на крутизну датчика момента. То есть, поведение магнитного подвеса, работающего на переменном токе, оно оказалось подобным поведению магнитного подвеса, работающего на постоянном токе.

Но... Причина появления этого момента абсолютно... Непонятная была, откуда она взяла с этой зависимостью. Вроде переменный магнитный поток. То намагничивается, то размагничивается материал. Пробовали даже плавно менять этот включаемый ток. Но он, собственно, и плавно меняется обычно. Но всё равно есть гистерезисный момент. Причём уровень этого гистерезисного момента, когда мы его посчитали, то он оказался, что гистерезисный момент при переменном магнитном поле он только в 4 раза меньше, чем гистерезисный магнитный момент, имевший место на постоянном токе. То есть фактически что?

Магнитный подвес, в котором ротор не имеет контакта со статором, механического контакта, он обладает каким-то магнитным трением, которое ведет себя, похоже на трение чисто механическое, которое мы имеем в невиброоживленной камневой опоре.



*Вот это был, вы знаете, это был удар. То есть надо было делать быстро этот прибор, магнитный подвес, Фирма полностью была загружена на вот эту работу, поскольку раз Пелюгин приказал сделать прибор на магнитном подвесе, то его надо было сделать. Других мнений, сомнений никаких в этом случае не допускалось. Это был приказ, как в армии. Вот. Поэтому там и цеха задействованы были, и технологи, и конструкторы.*

Ну, собственно, новый прибор надо было сделать. И вот все это крутилось при большом неудовольствии инженеров, занимавшимся созданием этого прибора. Потому что в этот магнитный подвес почему-то сотрудники предприятия не очень верили. Мягко говоря, не очень верили. Ну и, конечно, когда сведения о том, что есть гистерейсный момент в магнитном подвесе, дошли до, так сказать, работников фирмы, то было такое злорадство определенное, что вот, вот это МВТУ, вот они у нас. вогнали в колоссальные траты, сколько мы потеряли времени, сколько сил потратили, и все это оказалось никому не нужным.

*Ну и действительно, разработчики магнитного подвеса, ну и профессор Никитин, и Шестов, и Осокин там в то время работал, Герди, и Станкевич, и Потапцев, и Медведева, и Ивановна. Ну, много работал. Рощенко работал. Ну, в общем, все были в растерянности. Чего только не делали. Чего только... Как только не пытались, так сказать... справиться с этим магнитным гистерейсным моментом, ничего не удавалось. И это продолжалось, вы знаете, это продолжалось примерно, ну, примерно месяц. Вот такая ситуация.*

Ну, не убирается этот гистерейсный момент, и все. В технической литературе американской, вообще говоря, так сказать, Так вскользь, очень не в явной форме, упоминалось о наличии гистерических моментов в магнитных подвесах. Но американцы, они, вообще говоря, имеют такое... Особенность. Они пишут статьи, они пишут откровенно статьи, они пишут правду. Писали, что есть действительный момент, что они используют обводки, какие-то размагничивания для того, чтобы эти моменты убрать. Но написано об этом так вскользь и между делом. Ну, а есть эти моменты. Ну, мы с ними, вроде бы, так сказать, справляемся обмотками возбуждений. Никакой конкретики нет. То есть, для того, вот надо, читая эту литературу американскую, техническую, надо особо тщательное внимание обращать на вот эти вот, вскользь промелькнувшие замечания.

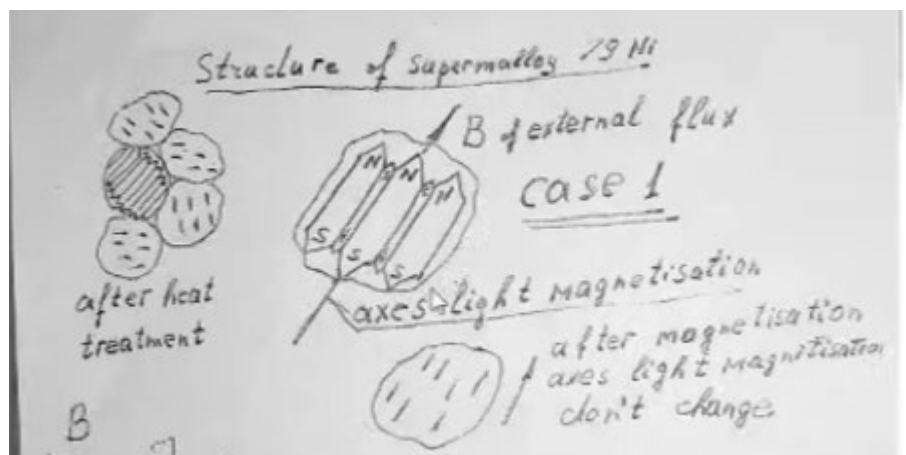
Потому что эти вскользь промелькнувшие замечания, они содержат очень глубокую информацию, которую, видно, авторы не особенно заинтересованы раскрывать. Но вот, так сказать, к таким замечаниям надо, по моему опыту уже, много-много десятилетнему, надо, так сказать, относиться очень внимательно и раздумывать над каждым таким мелким замечанием.

И вот я, так сказать, с гордостью должен сказать, что, так сказать, вопрос о гестрейсном моменте, ну, в общем-то, так сказать, был разрешен с моей помощью. Значит, надо было задуматься о том, а как же магнитное поле проходит через кусок железа?

Почему железо, внесенное в магнитное поле, вдруг уменьшает магнитное сопротивление зазора и передает это магнитное поле без потерь, без сопротивления. Вначале это была неверная модель. Мне пришлось самому придумывать эту модель. Но она была, так сказать, хорошей отправной точкой для того, чтобы начать изучать этот вопрос более глубоко. Пришлось почитать учебники по физике, пришлось почитать учебники по свойствам магнитных материалов.

Ну и вот потихонечку-потихонечку выконструировалась у меня теория передачи магнитного поля через кусок железа. Значит, тут особых открытий мировых не было. Это, в общем-то, можно было наскрести с миру по нитке. И примерно такая же картина. Ну, в общем, физики примерно представляли, как это, так сказать, идет передача магнитного поля. Значит, что собой представляет... магнитный материал. Мы уже немножечко рассказывали о структуре магнитного материала, когда я говорил вам о магнитотвердых материалах, о текстурировке магнитных твердых материалов, выдерживания при высокой температуре в постоянном магнитном поле, когда доменная структура кристалла перестраивается в единые домены, а границы этих доменов у одних доменов расширяются, а у других сужаются.

Значит, еще разок к этому механизму мы вернемся. Вот здесь показан вам кристалл, не кристалл, а зерно. Зерно в структуре магнита мягкого сплава. Вообще, материал состоит из зерен.



Эти зерна могут быть крупными, могут быть мелкими. Границы этих зерен, которые особые свойства имеют эти границы. О них сейчас мы не будем говорить.

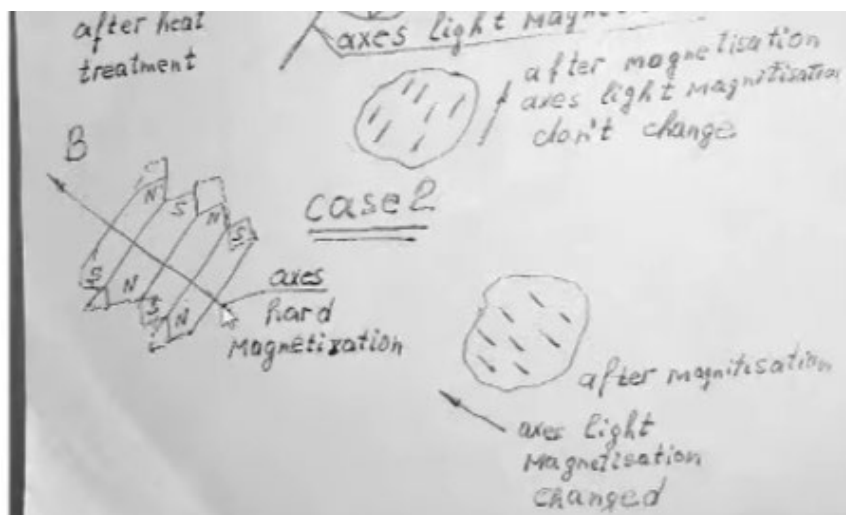
А вот внутри этого зерна имеется кристаллическая структура, которая в магнитном плане разбита на домены. Что такое домены?

Это ограниченные вот такими границами часть кристалла, у которой имеется намагниченность NS. Вот NS, соседний домен, он имеет намагниченность SN, дальше NS, SN и так далее.

То есть, в целом, вот все зерно, состоящее из этих доменов, оно является магнитно-нейтральным, оно не намагничено, так сказать. Вот. В разных зернах материала, в разных зернах сплава, ориентация, начальная ориентация доменов, она хаотична. После того, как вы отожгли материал, после отжига, после того, как вы нагрели его выше точки Кюри, у вас эти домены расположились как угодно. В этом горизонтальный, в этом вертикальный, в этом опять горизонтальный, в этом под углом и так далее.

То есть средняя ориентация по объему зерна, Детали, состоящие из этих зерен, ну скажем так же, заготовка может быть, или это ротор, кусочка ротора, она имеет вот такую структуру, которая одинакова с точки зрения расположения доменов по всем направлениям.

А вот теперь мы прикладываем к этому куску железа внешнее магнитное поле. Ну, вот как показано вот здесь. Вот оно так под уголком идет вот сюда. При этом начинается перестройка



доменов. Домены, которые... по направлению магнитного поля, так сказать, противоположные внешнему полю, вот здесь у нас N находится, а вот здесь вот S, они расширяются.

А домены, которые совпадают с этим полем, они уменьшаются. Вот здесь вот S, N. Вот. И мы увеличиваем, увеличиваем, увеличиваем это поле. В результате все вот эти вот сужающиеся домены, они вообще пропадают. И весь кристалл превращается в единый домен, у которого здесь северный полюс, а здесь южный полюс.

То есть вот у меня был северный полюс здесь, К нему добавил постоянный магнит, и северный полюс оказался перенесенным вот в эту вот точку. Вот какой механизм передачи этого магнитного поля через доменную структуру. Ну, такая картина существует по... в случае, если домены совпадают по направлению с внешним магнитным полем. Вот такое направление мы назовем ось легкого намагничивания.

Теперь, если мы прикладываем поле к тому же самому зерну, но в направлении под 90 градусов. Тогда перестройка вот этих вот длинных границ между доменами, она уже никакого эффекта не даст.

И перестройка этих доменов начинается за счет того, что перестраиваются вот эти вот узенькие краешки этих доменов. Но они перестраиваются так, что они тоже вот добавляют постоянный магнит к полю с этого магнита, к магнитному полю, которому мы воздействуем на кристалл.

Но эта перестройка требует значительно больших затрат энергии. и значительно большее воздействие магнитным полем, чем в первом случае. Значит, эта ось будет у нас легкого намагничивания, а эта ось трудного намагничивания, тяжелого намагничивания, *hard magnification*.

Но, в общем-то, если мы берем большое магнитное поле, больше, больше, больше, в конце концов, И вот такой вот, так сказать, кристалл с зерно, вот с этими вот, так сказать, доменами, расположенным поперек на намагничающего поля, он также перестроится в единый домен, который будет совпадать с внешним магнитным полем.

Просто перестройка эта потребует значительно больших усилий, если можно так выразиться, со стороны внешнего магнитного поля. А теперь, если мы будем выключать магнитное поле, уменьшать его будем до нуля, что будет в этом случае? Ну вот в этом случае, как было у нас ориентация доменов, так она и останется. То есть в общем широком домене появятся широкие домены, которые поддерживают это магнитное поле. И появятся узенькие домены, которые ориентированы по своей намагниченности в противоположном направлении.

Если мы доведем поле до нуля, то структура вернется к исходной домены NS, SN, NS, SN и так далее равной ширины. То есть была ось легкого намагничивания, она и осталась осью легкого намагничивания. То есть мы условно будем показывать вот эту ось намагничивания вот такими вот черточками.

А вот в этом случае уже весь кристалл превратился в единый домен, который совпадает с ориентацией этого внешнего намагничающего поля, которое с трудом его перевело в это состояние, но после того, как его перевело, Кристалл совпадает своей намагниченностью с этим внешним магнитным полем. Теперь мы начинаем уменьшать это магнитное поле, и появляются широкие домены, которые совпадают с этим внешним магнитным полем, и узенькие, противоположные, ему направленные.

Значит, когда мы убираем магнитного поля, то структура изначально ориентированной поперек этого, так сказать, намагничивающего поля, она превратится в структуру, которая совпадает с этим внешним намагничивающим полем. То есть, структура из... оси hard magnetization, трудного намагничивания, она превратится в ось light magnetization, легкого намагничивания. Оказывается, если мы воздействуем на кристалл магнитным полем, то происходит перестройка доменной структуры.

И, в общем-то, для кристалла, ну, а магнитные процессы происходят очень быстро. Поэтому, если бы  $B$  переменная, то, так сказать, за полпериода вот этого переменного поля происходит перестроение всех кристаллов, так сказать, и обратное направление на магнитное поле, оно не меняет, так сказать, положение оси легкого на магнитное.

То есть, если  $B$  меняет свой знак, то, ну, начинают расширяться вот эти узенькие домены, которые, так сказать, показаны здесь узенькими. То есть, домены, которые совпадают по направлению с... направлением  $S$ ,  $N$ , а вот эти вот при прежнем эксперименте широкие домены, они становятся узенькими. То есть ось легкого намагничивания сохраняется и при воздействии на кусок металла переменного магнитного поля.

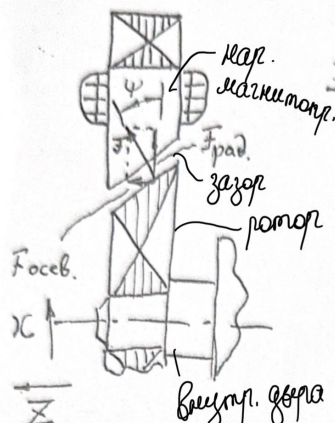
Так же самое и здесь. За первый полпериода  $B$  Происходит перестройка вот этих магнитных структур в кристалле. И если поле направлено поперёк доменной структуры, то они за полпериода успеют перестроиться в необходимое положение. И дальше вот эта ось будет осью лёгкого намагничивания. А вот та прежняя ось легкого намагничивания, она станет уже осью тяжелого, трудного намагничивания. Ну вот механизм передачи магнитного поля через кусок железа.

Ну если поле постоянное, то помимо рассмотренных причин, процессов, где меняется только положение оси легкого и трудного намагничивания, там будет оставаться еще остаточное расширение доменов, которые соответствуют этому полю, и сужение доменов, которые противоположно направлены. Вот это как раз тот магнитный гистерезис, который мы наблюдаем, когда рассматриваем кривую намагничивания магнитного материала. У магнита твердых материалов это расширение. Оно очень большое. Весь кристалл превращается в ДМН.

И он сохраняет свою намагниченность. У магнита мягких очень слабенькая разница между шириной этих ДМНов. Это остаточная намагниченность материала. Как назвать вот это вот изменение оси легкого намагничивания и твердого, и, так сказать, плохого намагничивания при воздействии переменного магнитного поля, ну, такого термина, в общем-то, в литературе и не существует, так сказать.

4

# Конусный ротор магнитного подвеса.



$$F_{осев} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \psi.$$

$$F_{рад} = (F_1 - F_3) \cos \alpha \cdot \cos \psi + (F_2 - F_4) \sin \alpha \cdot \cos \psi$$

$$F_{рад} = \left( \frac{w u}{2 R_0} \right)^2 \frac{(Q-2)}{2 \mu_0 S^*} \cos \psi \cdot X \cos \psi \quad \text{изменение зазора}$$

$S^*$  - площадь Косого среза полюса.

$$F_{осев} = \left( \frac{w u}{2 R_0} \right)^2 \frac{(Q-2)}{\mu_0 S^*} \sin \psi \cdot Z \sin \psi$$

при  $X=Z$  - одинаковые относительные изменения зазора  $F_{рад} = F_{осев}$  при

$$\cos^2 \psi = 2 \sin \psi$$

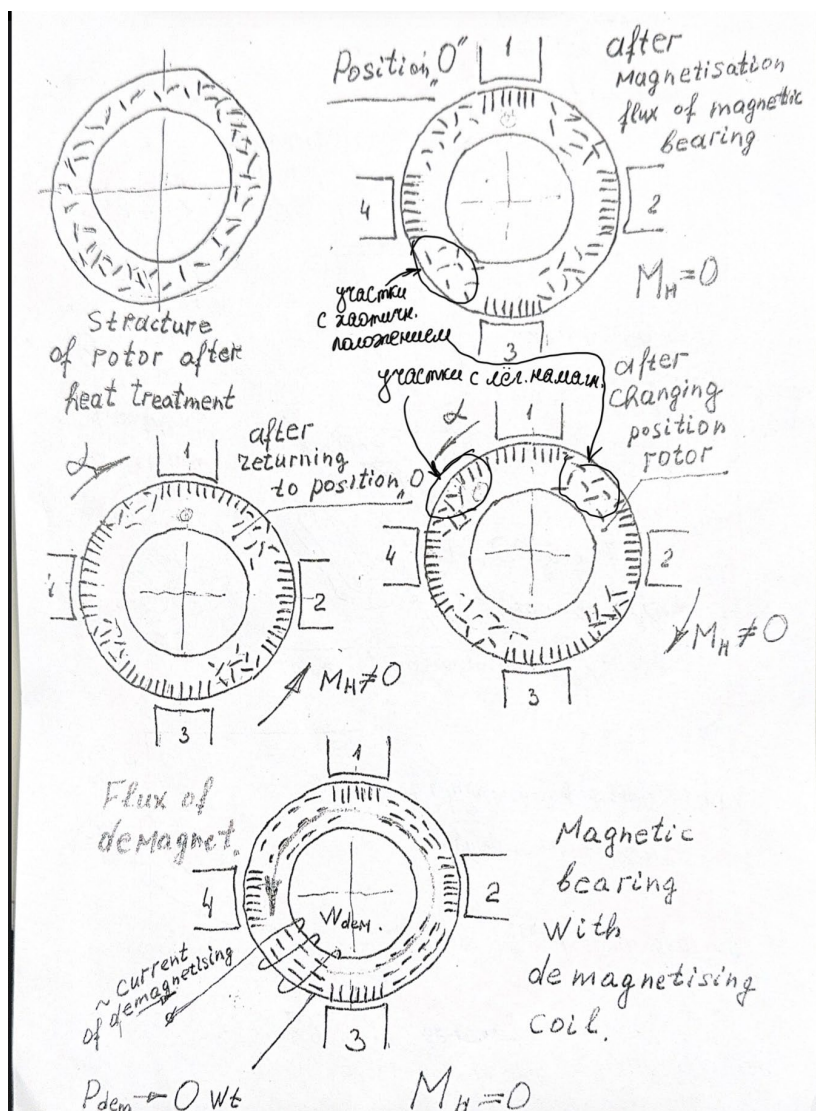
Условие равновесности  $\psi \approx 35^\circ$

$$X = \frac{\Delta_{рад}}{\delta_0 \text{ рад.}}$$

$$Z = \frac{\Delta_{осев}}{\delta_0 \text{ осев.}}$$

Так вот, теперь мы можем с вами посмотреть, а что делается в роторе. Вот в этом роторе. Вот он, ротор магнитного подвеса. Ну, конический. Вот у него внутренняя дыра. Зазор. Ну, и наружный магнитопровод. Меня интересуют магнитные процессы, которые происходят вот в этом роторе. Вот в этом вот колечке.





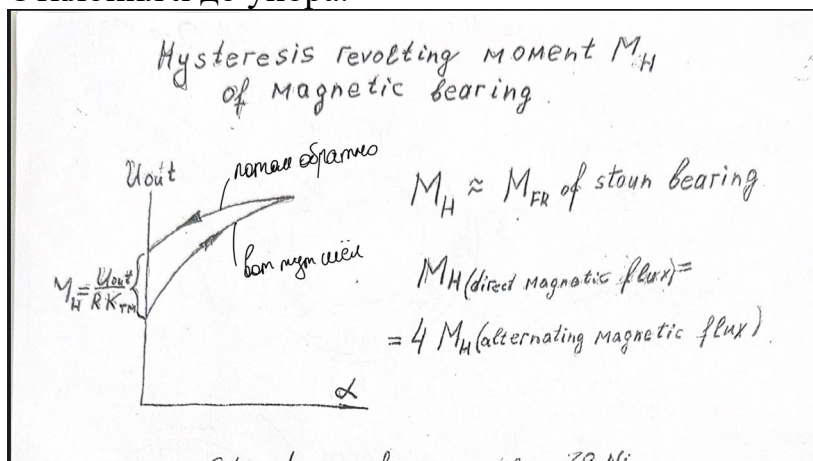
Значит, вот материал, ротор собран из листочков пермалоя, хорошо отожженных. Каждый из листочков, как вы помните, с тем, чтобы магнитная неоднородность не сказывалась на магнитной форме ротора, каждый из листочков приклеивается к предыдущему с угловым смещением, с расчетным угловым смещением, с тем, чтобы между первым и последним листочком все эти листочки заняли все возможные азимутальные положения. Тогда материал однородно будет вести себя по каждому из направлений. И как эти вырублены листочки по отношению к направлению проката ленты, это будет уже не важно.

В этом случае домены в теле ротора расположены хаотично. Все направления, они одинаковые. Heat treatment, термообработка, она дала безразличное положение этих полюсов. Теперь мы ротор поставили между полюсами статора и включили магнитный подвес (рисунок position "0"). Появляются магнитные поля, вот Северный полюс (1 и 3), боковые полюса (2 и 4)-южные полюса. Магнитное поле течет отсюда, потом течет сюда, отсюда сюда и так далее (от 1 ко 2, от 3 ко 2 и тд). Самая большая

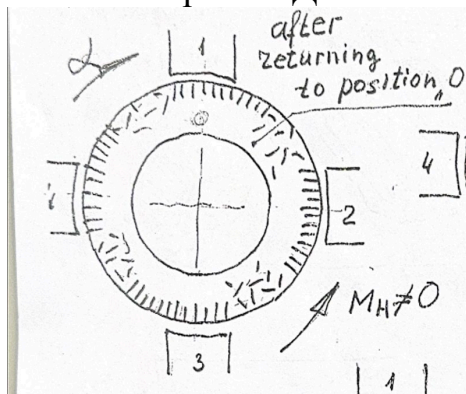
интенсивность магнитного поля под полюсом. Поэтому перестройка магнитной структуры, доменной структуры в зернах металла, она происходит в основном под полюсом.

Значит, вот здесь (полюс 3) вот домены дыбом встали в отношении магнитного поля. То есть домены дыбом встали в области под полюсом, а в остальных местах они более-менее хаотично располагаются. Если мы снимем это магнитное поле, то есть если мы выключим магнитный подвес, то вот это вот дыбом стоящие домены, Они сохраняют свое положение. То есть намагниченности никакой не будет. Но оси легкого намагничивания будут располагаться нормальной поверхности полюса. Естественно, момент равен нулю. Исходное положение. Позиция ноль. Момент равен нулю.

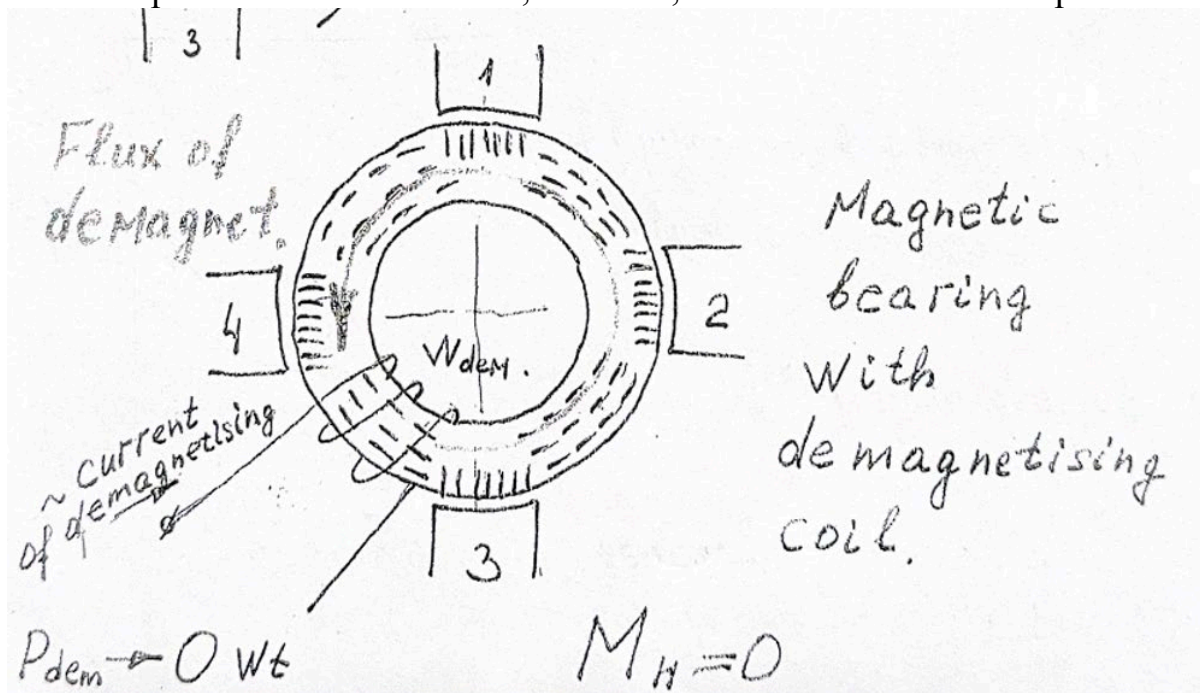
Теперь я начинаю. проводить такой мысленный эксперимент, соответствующий повороту статора нижнего. Буду рассматривать не повороты статора, мне удобнее было рисовать, если это повороты ротора, потому что что статор поворачивается, что ротор одно и то же. Так вот, я поворачиваю против часовой стрелки ротор (рисунок под position "0"). Значит, у меня стоявшие дыбом домены выходят из-под полюса. Ну, магнитный подвес работает, и он устанавливает дыбом Магнитные домены, которые раньше находились в хаотическом положении, вот эта вот часть, а теперь они тоже встали дыбом. То есть с левой стороны от каждого полюса появляется область с упорядоченным положением доменов. Ну... Это ось легкого намагничивания у каждого из домена. То есть вот этот участок, он обладает большей проводимостью для магнитного поля, чем вот ранее бывшие участки с хаотическим положением домена. То есть, вот эта часть обладает большей проводимостью, чем расположенная с правой стороны. Ну, естественно, что магнитные силы стремятся вернуть вот эту вышедшую из-под полюса упорядоченную часть (участки легкого намагничивания) в исходное положение. То есть появляется гистерезисный момент,  $M_H$ -гистерезисный, который направлен в обратную сторону, в сторону обратного отклонения. Отклонил я до упора.



То есть я вот сделал, вот как вот шел, и вот я получил момент. А теперь я пошел обратно. Давайте посмотрим, что будет, когда я обратно пойду.



Я вот пошел обратно, альфа назад. И вернулся к исходному состоянию. Вот эта область, вот эта точка (зона легкого намагничивания), она вернулась вот к этому положению. Она подошла в то же состояние, какое она была до поворота. Но смотрите-ка, после вот этого отворота и обратного поворота, с левой стороны от полиса картинка такая же самая, как исходно была. А с правой стороны у меня уже упорядоченная картинка, у меня уже домены дыбом стоят. Теперь вот эта часть (то есть правая) обладает меньшим магнитным сопротивлением, чем вот это. Появляется гистерезисный момент, который стремится повернуть ротор уже обратно. То есть вообще условия устойчивого равновесия будет, когда и с правой, и с левой стороны от ротора одинаковая структура. То есть когда мы пошли назад, то мы пришли к исходному состоянию, при котором момент не тот, что был раньше (внимание на график про гистерезисный момент). То есть момент ведет себя так же, как похоже на момент трения. Немножко не то, конечно, но похоже на момент трения.

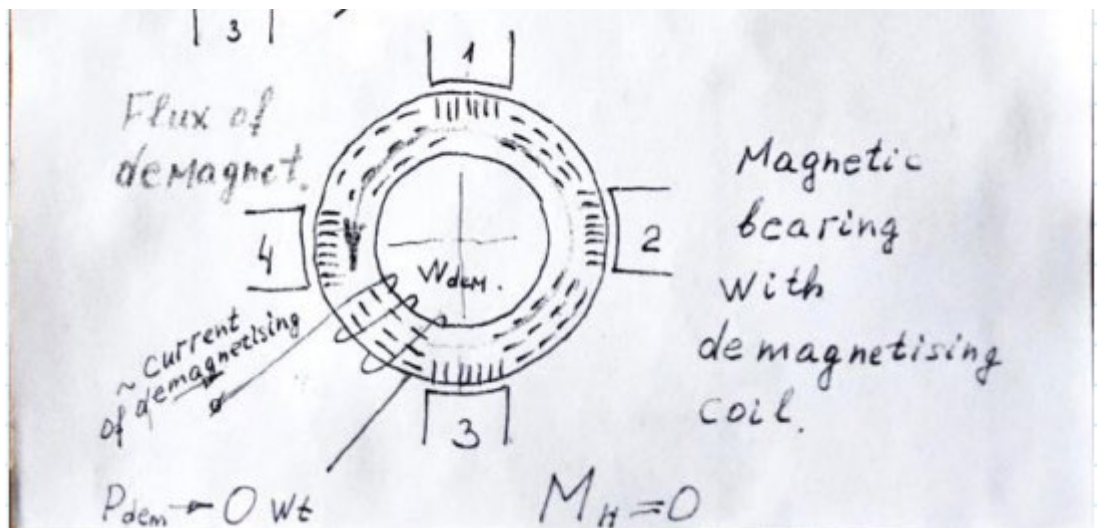


Ну вот, когда стала понятна эта физика возникновения гистерезисного момента, то стало понятно, как с ним можно бороться. И вот мое предложение было сделано. Взять тоненькую проволочку и сделать несколько виточков этого провода вокруг колечка ротора. Ну, катушечка, так сказать, не касается. Она может лежать на роторе, конечно, эта обмоточка, а может быть и просто, так сказать, с зазором относительно этого ротора. Намотана, то есть она охватывает этот ротор, но ротор вот внутри находится, он перемещается, а катушка, она укреплена на корпусе, она никак не мешает повороту этого ротора. И было предложено запитать эту катушечку либо постоянным, либо переменным током. Лучше переменным.

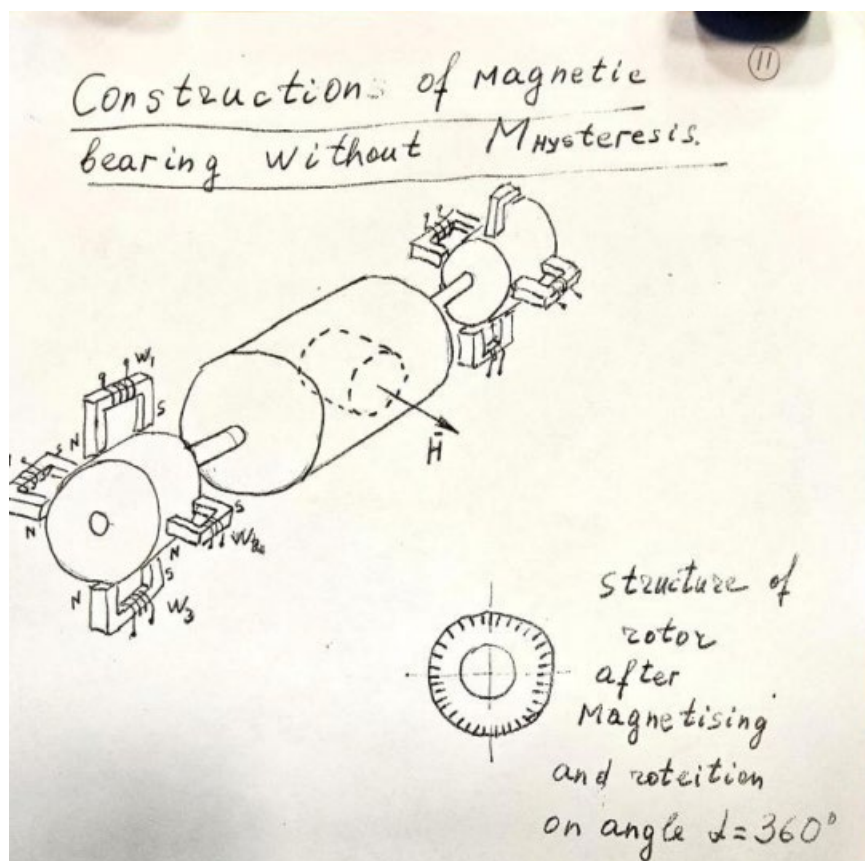
*В чем, так сказать, идея была вот этой вот катушечки?* с помощью вот этого дополнительного магнитного поля, которое охватывает ротор, мы создаем магнитное поле, которое направлено по кольцу ротора (обозначено стрелкой внутри ротора). Для этого магнитного поля мы имеем очень малое магнитное сопротивление, потому как здесь нет воздушных зазоров. Магнитное поле замыкается только по кольцевому магнитопроводу, поэтому самая маленькая намагничивающая сила создает большой магнитный поток, направленный по кольцу. *Что этот магнитный поток делает?* Вот у нас исходное состояние. Вот здесь вот у нас домены встали дыбом (position “0”). Они и сейчас встают дыбом. А вот тот весь хаос, который был между полюсами, он стал упорядочен. Он выстроился по направлению силовых магнитных линий вот этого вот размагничивающего магнитного поля. Дальше повернули ротор (возвращаемся к картинке с поворотом против часовой стрелки). Слева от полюса появились участки доменов, стоящие дыбом, сохранившие прежнее положение. Но круговое магнитное поле гораздо сильнее. И оно кладет эти стоящие дыбом домены в горизонтальное положение и убирает всю историю, всю предысторию намагничивания магнитного материала. То есть магнитная структура упорядоченная стала. Поэтому вот этот вот эффект, он позволил убрать гистерезисный момент.

1:23:00





Катушка, охватывая ротор создает кольцевое магнитное поле. Это магнитное поле упорядочивает магнитные домены по магнитному полю катушки. Тогда при повороте ротора на угол альфа теперь домены не остаются дыбом, а располагаются по полю катушки. Катушка убирает гистерезисный момент.



П-образованные магнитопроводы запитаны переменным током. Если ротор опустится вниз, то индуктивность катушки W3 увеличится, а у W1 уменьшится. Ток в W3 уменьшится, в W1 наоборот. Возникнет сила, которая притянет ротор вверх. Если прокрутить ротор на 1 оборот, то радиально

намагнитится он. При повороте на угол альфа перестроение доменов ротора не будет. Подвесы на переменном токе имеют максимальную илу в корень из 2 раз меньше, чем на постоянном токе. Это связано с тем, что мощность подвеса должна быть одинакова. Однако, амплитуда тока должна быть ограничена, чтобы не попадать в зону насыщения магнита. Подвес при постоянном токе может выходить за зону насыщения. Поэтому сила стабилизации отличается в корень из двух раз. Потому что токи отличаются в корень из 2 раз.



Ну, я вам не прочел электростатические подвесы. Это подвесы сферических гироскопов, выполненных из бериллия, как правило. Кроме бериллия ничего не делается для таких сфер. Это очень легкая сфера. Она может быть либо полная, полный шарик бериллиевый, малюсенький шарик, миллиметров 7-10, может быть, диаметром. Укрепленный, ну не укрепленный, а помещенный между, так сказать ёмкостей. Вместо полюсов ротор магнитного подвеса используются электроды, напыленные на поверхность сферического корпуса. Из диэлектрика делается этот корпус. Обычно из керамики его делают. Вот на поверхность этого корпуса по шести направлениям, вертикальное направление, одно горизонтальное направление, второе горизонтальное направление, делается два кольцевых электрода, внутренний электрод и наружный электрод, маленького диаметра эти электроды.

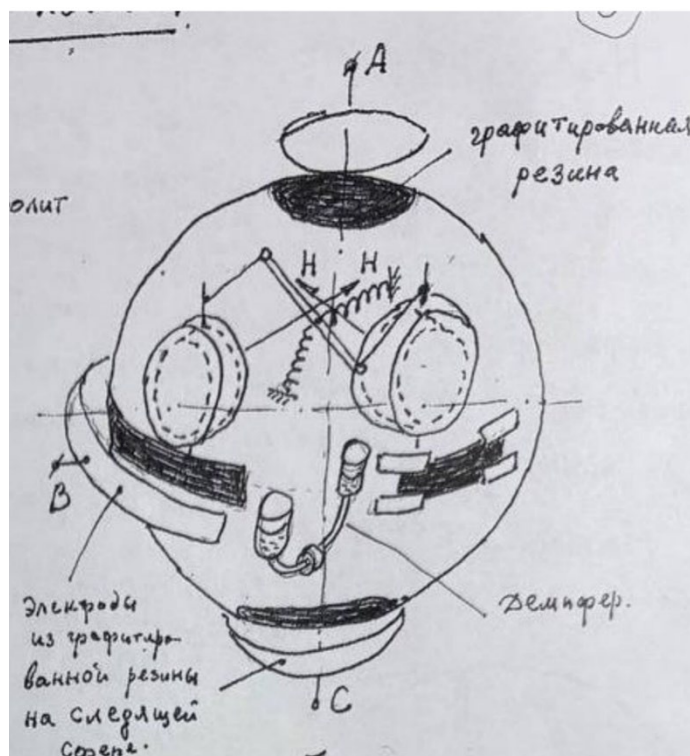


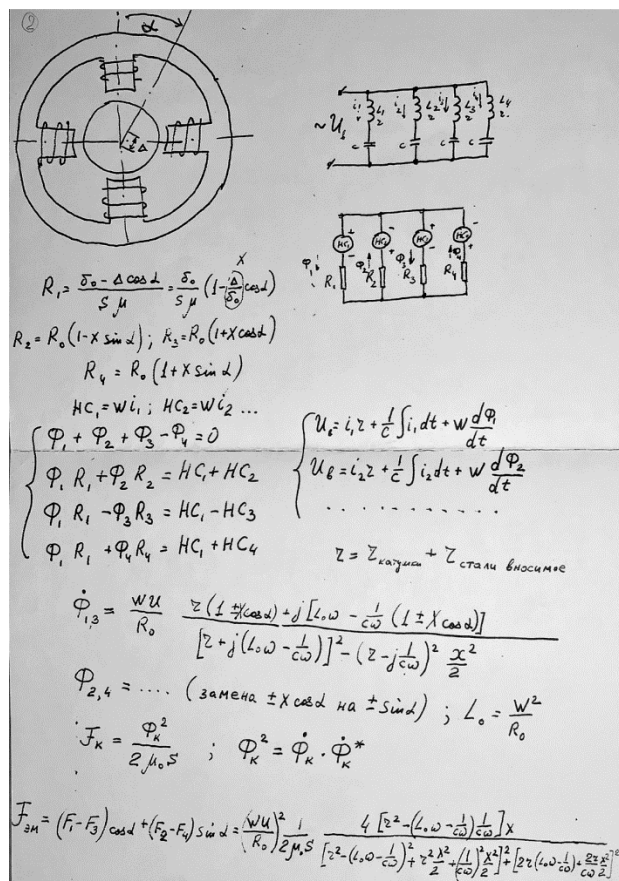
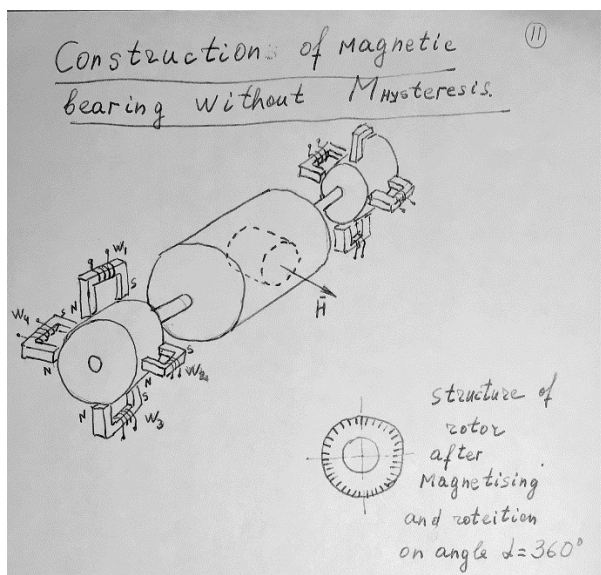
Рис. 1. Говорит про сферу с 6 электродами, но нигде кроме тут ниче подобного не нарисовано, поэтому видимо такая

Вот емкость между этими двумя электродами по каждому направлению, она зависит от того, какой зазор между шариком и этими емкостями имеют эти пыленные электроды. То есть емкость между наружным электродом, шариком, и емкость между шариком и внутренним электродом – это две последовательно-соединенные емкости. Обе эти ёмкости либо уменьшаются, либо увеличиваются при приближении шарика. Следовательно, ну и суммарная ёмкость либо уменьшается, либо увеличивается. А дальше имеется схема электростатического подшипника, в которой помимо емкостей, только вот эта же емкость - это рабочие органы подвеса, состоящие из двух последовательно соединенных емкостишек. Всего таких емкостей 6 делается для обеспечения пространственной стабилизации шарика. И добавляются индуктивности с последовательно включенными с каждой из шести ёмкостей. Причем эти резонансные контура настраиваются на вторую точку половинной мощности, как и в магнитном подвесе.

Рис. 2.

И они обеспечивают центрирование шарика. Здесь, конечно, особенности приходится работать с высоким напряжением. Это определенные сложности создает. Могут быть использованы здесь также, как и в магнитном подвесе, активные электростатические подвесы.

Рис.3.



То есть они могут быть электростатические подвесы и резонансного типа, и активные подвесы. Значит, иногда шарики, если шарик делается, так сказать, маленьким, целиком, то его делают

таким образом, что у него немножечко, в экваторальной плоскости, немножечко смещён центр масс. Он находится не в центре сферы, а чуть-чуть смещён. Тогда, когда этот шарик раскручивается, то шарик начинает вращаться вокруг центра масс. Не вокруг своей оси симметрии, а вокруг центра масс. Кстати сказать, вращение идет в безвоздушной среде, в вакууме. Поэтому форма здесь не имеет значения. Но так как форма сферы смещена относительно центра масс, то на каждый оборот происходит изменение зазоров между напыленными электродами емкости и поверхностью шарика. Значит, на каждый поворот вы имеете синусоидальные изменения вот этих вот зазоров. Ну, и если шарик неподвижное положение в абсолютном пространстве занимает, быстро вращающаяся скорость у него примерно до 60 тысяч оборотов в минуту обеспечивается. Если корпус с напыленными электронами поворачивается относительно неподвижного шарика, то появляются вот эти вот сигналы, по которым мы можем измерять углы отклонения по фазе этих синусоидов. По виду мы можем измерять, на какой угол повернулся

относительно этого быстро вращающегося шарика корпус. И использовать эту информацию в системе управления летательного аппарата. Если же делается сфера полая, тонкостенная полая сфера из бериллия. Здесь, вы знаете, на первом месте стоят технологические вопросы. Как сделать сферу полую, как ее сварить, чтобы это место сварки не оказывало влияния на электростатические силы, стык чтобы никак не сказывался на электростатических силах. Так вот, на шарик наносится рисунок в виде таких зачерненных и светлых участков, и оптическим путем снимается сигнал уже о положении корпуса относительно неподвижного шарика по вот этому сигналу оптического датчика, идущего с отражения светлых и темных полосок, нанесенных на ротор. У электростатического гироскопа очень много общего с магнитным подвесом. Поэтому я думаю, что вам особенно читать про этот электростатический подвес нет смысла. Принцип действия его отлично поймете и так. Но в электростатическом поле гораздо меньше моменты взаимодействия статора и ротора, чем в магнитном подвесе. Там нет такого явного запоминания структурного состояния материала ротора в зависимости от ориентации внешнего электростатического поля. Правда, конечно, это с некоторыми ограничениями все говорится, потому что вообще говоря, есть пленки, которые обладают диэлектрическими свойствами, если какие-то есть в составе этого ротора, но там есть электретные свойства вот этих вот пленок. частичек этой пленки. То есть там тоже существует какое-то запоминание предыстории воздействия электростатических полей на вот эти вот пленочки. Но все это гораздо меньше, чем в магнитном подвесе. Поэтому для автономных систем управления подводными лодками, например, а там это особенно важно, поскольку всплывать, если вы всплывать будете, и ориентироваться по небесным телам и вносить коррективы в работу системы навигации, вас немедленно засекут из космоса и Дальше вы можете считать, что движение вашей лодки будет отслеживаться, и в случае конфликта эта лодка будет немедленно уничтожена. Поэтому лодка идет скрытно, тихо, бесшумные сейчас делают, и никто не знает, где она находится в Мировом океане. А на борту вы должны иметь с высочайшей точностью координаты места и азимут знать с высокой точностью. Поэтому, собственно, от этого зависит начальное прицеливание инерциальных систем тех баллистических ракет или крылатых ракет, которые имеются на борту. Поэтому к точности таких навигационных систем предъявляются заумные совершенно требования. Так вот, электростатические гироскопы, они в таких системах и используются, и они обеспечивают дрейфы на уровне лучше, чем  $10^{-5}$  градусов в час. Это позволяет в течение месяцев сохранять работоспособность инерциальных навигационных систем на борту. Ну, и там существует целый ряд специальных приемов, которые позволяют и корректировать эти электростатические гироскопы. Это уже специальная

литература, так сказать, ну... трудах сотрудников Ленинградского Санкт-Петербургского института электроприбор вы можете найти все эти описания электростатических гироскопов. И еще у нас есть одна задача, которая по программе у нас имеется. Это подвесы на растяжках. На упругих растяжках. Значит, в случае подвеса на растяжках подвижный узел прибора крепится на двух растянутых тоненьких плоских проводничках, которые, для того, чтобы они были натянуты, укреплены на натяжных пружинках. И вот эти натяжные пружинки, они коротенькие довольно делаются до одного сантиметра примерно, вот длина этих растяжек. Они натянуты плоскими натяжными пружиночками с силой 1 ньютон силы натяжения. Если эта сила натяжения имеется, то при радиальном провисании поплавка подвижного узла или при угловом повороте этого поплавка возникает силы и моменты, которые возвращают этот поплавок в нейтральное положение. Растяжки обладают небольшой упругостью угловой. То есть, когда вы поплавок поворачиваете вокруг оси подвеса, то возникает момент, который стремится вернуть поплавок в исходное положение. Но эти моменты, во-первых, могут быть сделаны маленькими, потому что выбор растяжек довольно большой, и, так сказать, вы можете найти ту растяжку, которая подходит для вашего случая. Это серийно выпускаемые растяжки. А во-вторых, этот момент, который создает растяжки, он, во-первых, закономерно меняется: Он абсолютно повторяется во времени. И растяжки, хорошие растяжки, обладают очень малым гистерезисом. Как определяется гистерезис у растяжки? Есть специальная установка, в которой один конец растяжки закреплен, а другой установлен на натяжной пружиночке и замеряется нулевое положение растяжки, потом ее заворачивают на 90 градусов, выдерживают в течение двух часов, плавно отпускают назад и смотрят, на какой угол не вернулась растяжка от начального угла закручивания. Так вот, есть растяжки, у которых гистерезис этот не превышает одной сотой процента. Но обратите внимание, какой дикий эксперимент. Это 90 градусов, 2 часа выдерживать, потом плавно отпускать. В наших приборах такие повороты, в компенсационных особенных приборах, такие повороты, конечно, немыслимые. Там максимальные углы поворота подвижного узла когда выключена обратная связь, не превышает единиц, 10 минут, скажем, 20 минут, больше не бывает. Дальше упоры стоят, которые не позволяют поворачиваться подвижному узлу прибора. Ну, а при работе там углы поворота подвижной части прибора, они составляют в районе единиц секунд угловых. В современных системах в районе единиц угловых секунд. При таких поворотах гистерезиса вообще не ощущается. То есть подвес, особенно для поплавковых приборов, с помощью растяжек он обладает очень хорошими механическими свойствами. А кроме того, этот подвес может выполнять функцию токоподвода. Потому что его делают либо из бериллиевой бронзы, но это

не самый прецизионный подвес, либо из платино-серебряного сплава. 40% серебра, остальное платина. Это хорошие проводники, но платина похуже проводник, бронза, конечно, получше. Но все равно достаточная проводящая способность у этих металлов. И поэтому одновременно растяжка используется и как токоподвод, и как хорошее центрирующее устройство. Но я не буду вам читать этот материал сейчас по растяжкам, поскольку в программе следующего семестра я буду вам рассказывать о приборах с совмещенными датчиками угла и момента. И там я дам вам подробную информацию о конструкции: опоры на растяжках, о натяжных пружинках, о ГОСТе на сами растяжки, о моментах этих растяжек и так далее.