

РиК подготовОчка:

1) Дополнительная лекция для ИУ2-72 (Поцелуев)

$M = B J \omega 2 r_p l_p = B J \omega S_a$; $B = B(\alpha; \beta; t; t')$
 $B = \frac{\Phi}{S_a} = \frac{H C_0 (1 - \beta \Delta t')}{S_a (R_m + R_s)} = B_0 (1 - \beta \Delta t')$
 $\beta \sim 0,02 \dots 0,2 \frac{\%}{\text{град C}}$

1. Термоууныи.
 $H C = H C_0 (1 - \beta \Delta t)$; $\Phi_w = B_w \cdot n \cdot S_w (1 - \beta_w \Delta t)$
 $B = \frac{H C_0 (1 - \beta \Delta t) - B_w n S_w (1 - \beta_w \Delta t)}{(R_m + R_s) S_a} = B_0 \left\{ \left[1 - \frac{B_w n R_m S_w}{B_0 (R_m + R_s) S_a} \right] - \left[\beta - \beta_w \frac{B_w n R_m S_w}{B_0 (R_m + R_s) S_a} \right] \Delta t \right\}$
 $B = B_0' (1 + \gamma_1 \Delta t')$
 $\gamma_1 < 0$ - недокомпенсация
 $\gamma_1 = 0$ - полная компенсация
 $\gamma_1 > 0$ - перекомпенсация
 $m l a = B \omega S_a J_{2m}$; $U_{\text{вн}} = J_{2m} Z_{2T} = \frac{m l a Z_{2T}}{B_0' (1 + \gamma_1 \Delta t')} \omega S_a$
 $U_{20} = J_{2m} Z_{2m} (1 + \alpha_c \Delta t')$; $J_{20} = \frac{U_{20}}{Z_{2m}}$; $J_{2m} = J_{20} + J_{2\omega} = J_{20} \left(1 + \frac{Z_{2m} \alpha_c}{Z_{20}} \Delta t' \right) = \frac{m l a (1 + \frac{Z_{2m} \alpha_c}{Z_{20}} \Delta t')}{B_0' (1 + \gamma_1 \Delta t')} \omega S_a$
 $\gamma_1 = \gamma_2$ $U_{\text{вн}} = J_{2m} Z_{2T} = \frac{m l a Z_{2T}}{B_0' \omega S_a} (1 + \frac{Z_{2m} \alpha_c}{Z_{20}} \Delta t')$
 $\gamma_1 \sim 2 \cdot 10^{-4}$ $\frac{Z_{2m} \alpha_c}{Z_{20}} = 0,004 = 2 \cdot 10^{-4} \rightarrow Z_{2m} \sim 20 Z_{20}$

Лист 1

Методы: находим индукцию и омегу

Момент в этом датчике равняется:

B - индукция, омега - число витков, 2 радиуса средних

Sa - активная рабочая площадь рамки, чем больше тем лучше

ДМ определяют точность компенсационных приборов : ДУСьІ и акселерометры - основные приборы нави систем

Лучше иметь автономную навигационную систему, так как производит управление полётом по собственным данным, и чтобы её создать, нужна высокая точность компенсационных приборов, которая должна доходить до величины 1ppm .

Индукция (уравнение в левом верхнем углу) зависит от параметров:

1) Альфа - угловое положение точки в зазоре, индукция меняется в разных точках зазора из-за неоднородности магнита, от этого недостатка можно избавиться, выровняв индукцию по зазору, если на поверхность полюса магнита сделать накладки из пермаллоя (этот материал обладает хорошей проводимостью, поэтому выравнивает магн. поле по зазору). Имеется ещё одна зависимость индукции от угла альфа - характер распределения магнитной индукции (косинус альфа).

Чтобы обеспечить стабильность индукции в пределах 1ppm приходится заставлять моментный датчик работать строго в одной точке. Для этого, в компенсационном контуре должен быть выбран очень большой коэф. Усиления, а лучше сделать астатический контур обратной связи, для этого в него вставляется интегратор.

2) J - ток в обмотке

3) t - время, магнит должен сохранять свою намагниченность в течении долго промежутка времени - 15-20 лет, задача эта очень сложна, реальные магниты начинают деградировать.

Не сильно, но это влияет на точность.

4) - температура, магнитный материал меняет свою намагничиваемую силу при изменении температуры - чем больше темпа, тем ниже намагничиваемость, но это процесс обратимый

Бетта (температурный коэффициент) - равен 0.02 для сплавов ЮНДК, 0.2 для редкоземельных материалов.

С этим коэффициентом можно бороться несколькими способами:

1 способ

Термошунты - полосочки из магнитомягких материалов (термоаллой), которые наклеивают на магнит. Выставление шунтирующего потока восстанавливает индукции до изменения температуры. Недостаток: регуляция индукции изменяется ступенчато, завися от количества полосочек. Поэтому обычно наклеивают больше полос, чем нужно (перекомпенсация).

Затем температурную погрешность убирают, портя прибор, ставя параллельно обмотке ДМ в цепь обратной связи добавочное шунтирующее сопротивление. В нижней части листа расписано, как меняются токи. На рисунке справа от изображена схема прибора без шунтирующего сопротивления.

А на рисунке слева снизу с шунтирующим сопр. Происходит следующий процесс: катушка ДМ выполняется из медного провода, медь имеет сильную зависимость сопротивления от температуры, ток через обмотку датчика моментов определяется инерционным моментом, поэтому на обмотки ДМ падает напряжение, а это напряжение создаёт шунтирующий ток. Этот ток создаёт дополнительную погрешность акселерометра.

Если подобрать шунтирующее напряжение таким, чтобы из-за перекompенсации и из-за введённого шунта были одинаковыми, то выходной сигнал прибора не будет зависеть от температуры.

Величины шунтирующего сопротивления большие.

2. Изменение зазора

3. Смещение центра давления

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ш0}} (1 - d_{\text{ш}} \Delta t)$$

$$M = mla + m_{\text{ш}} (1 - d_{\text{ш}} \Delta t) la = (ml + m_{\text{ш}} l) a \left[1 - \frac{m_{\text{ш}} b}{ml + m_{\text{ш}} b} \cdot d_{\text{ш}} \Delta t \right] = K_{\text{ш}} (1 - \beta \Delta t) J_{\text{ш}}$$

$$\beta = \frac{m_{\text{ш}} b}{ml + m_{\text{ш}} b} d_{\text{ш}} \approx \frac{b}{l} d_{\text{ш}}; \quad J_{\text{ш}} = \frac{ml + m_{\text{ш}} b}{K_{\text{ш}}}$$

$\beta \sim 0,02 \frac{\%}{\text{град}}; \quad d_{\text{ш}} \sim 0,1 \frac{\%}{\text{град}}; \quad b \sim 0,2 l.$

Расчет магнитной индукции.

Анализ:

- $J \rightarrow \Phi$ [Вб]
- $J_{\text{с}} \rightarrow B$ [Тл]
- $R \rightarrow R_{\text{м}}$ [1/Гн]
- $K \rightarrow G$ [Гн]
- $F \rightarrow -$
- $\frac{1}{\mu} \rightarrow \mu$ [%]
- ЭДС $\rightarrow J_{\text{в}}$ [А]
- $\rightarrow H_i R_{\text{м}}$ [А]
- $U = IR \rightarrow \Phi R_{\text{м}}$ [А]
- $\rightarrow H l$

Характеристики магнетов в цепи магнетов:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - w_s \frac{d\Phi}{dt} = w_s S_m \frac{dB}{dt}$$

$$Q = \int e dt = K \Delta B$$

$H_p = \frac{J_{\text{в}}}{l_m}$

2 способ

Изменение зазора - используется крепление магнита с помощью вкладыша (справа от магнита изображён), а вкладыш делается из алюминия. Кольцо магнитопровода из магнитомягкий материалов, у них температурный коэф линейного расширения 15ппм на градус, у алюминия - 24ппм на градус. Этот

вкладыш по посадке насаживается на кольцо, из-за чего оно деформируется. При нагреве ухудшается магнитное поле в зазоре, но вкладыш начинает распирать магнитопровод в стороны, из-за чего зазор уменьшается, из-за чего уменьшается магнитное сопротивление воздушного зазора, что помогает восстановить прежнее значение магнитной индукции. Этот способ тоже не даёт точной компенсации. Поэтому здесь тоже делают перекомпенсацию, т.е. деформируют кольцо сильнее чем нужно, а затем используя шунтирующее сопротивление в обмотке дм обеспечивают точную компенсацию.

3 СПОСОБ

Смещение центра давления

На рисунке показан случай компенсации в поплавковом акселерометре. Маятниковость создаётся за счёт смещения центра масс, а компенсацию получают за счёт смещения точки центра давления (точки приложения Архимедовой силы, она зависит от температуры, она связана с температурным коэффициентом изменения объёма жидкости и эта зависимость может компенсировать температурную зависимость намагничивающей силы). Получается взаимная компенсация, но тоже точной компенсации добиться нельзя, поэтому делают перекомпенсацию.

Ещё есть метод термостатирования прибора. он даёт высокую точность, но для этого способа требуется большое время 15-20 мин, что плохо.

Применяется редко

52:21

Расчёт магнитной индукции

Параметры магнитного поля приводятся по аналогии с параметрами электрического поля:

Ток - магнитный поток

Плотность тока - магнитная индукция

Электрическое сопротивление - магнитное сопротивление

Проводимость эл цепи - проводимость магнитопровода

Удельное сопротивление - аналогии нет в магнитном поле понятие не используется

Электрическая проницаемость - магнитная проницаемость

ЭДС - тут две аналогии: если используется соленоид, то МДС, если постоянный магнит, то МДС определяется по-другому

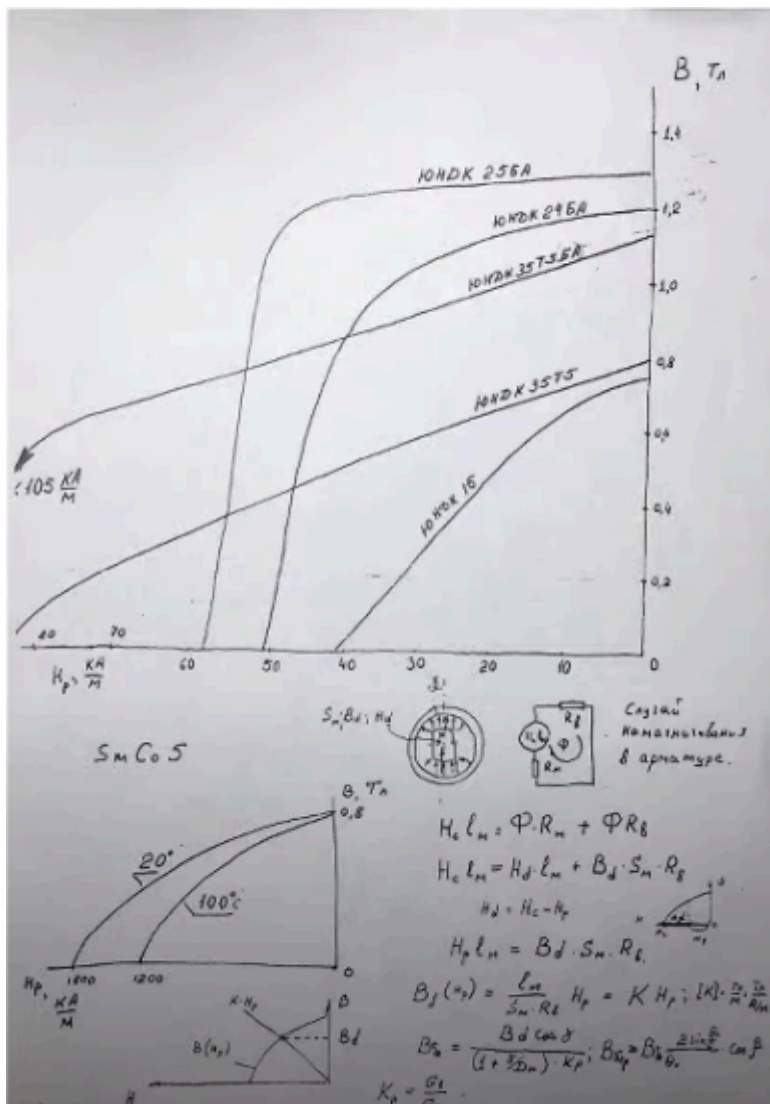
Падение электрического напряжение - падение магнитного напряжение, или напряжённость магнитного поля

Итак, чтобы рассчитать магнитную индукцию, надо знать свойства магнитного материала.

Для определения свойств берут образец и замыкают его магнитомягким материалом, на этот образец наматывают две катушки: намагничивающую и сигнальную. Намагничивающая связывается с программным устройством, которое обеспечивает формирование, величину и направление тока в катушке, во вторичной обмотке она включена в интегратор, который определяет величину заряда импульса тока в ней.

Начинают регулировать ток, следят за появлением ЭДС, меняется поток, растёт индукция до тех пор, пока не произойдёт насыщение. Потом через управление меняется направление тока, появляется размагничивающая напряжённость, приходим к гистерезису до точки А, при этом изменяется поток, но не скачкообразно. При переходе к точке А мы получаем изменение дельта В, которое вызовет импульс изменения ЭДС, который интегрируется, и можно рассчитать зависимость k на дельта В.

Далее мы вводим режим насыщения, и переключателем устанавливаем ещё большее размагничивание до точки Б, которая будет ниже точки А, дельта В будет ещё больше, мы ещё подсчитываем и получаем кривую размагничивания.



ЛИСТ 3 01:09:55

Вид кривых размагничивания получаем, чем выше по графику кривая материала, тем он лучше. Чуть ниже график для самария-кобальт5, этот материал вообще топовый

Под большим графиком нарисована магнитная система, а правее его аналог в виде электрической схемы

Расчёт магнитного материала связан с технологией намагничивания магнита, РАССМАТРИВАЕТСЯ НЕСКОЛЬКО СЛУЧАЕВ

1 случай - когда магнит намагничивается арматурой

Магнитная система помещается между полюсов электромагнита, электромагнит имеет свою обмотку, которая на магните создаёт большое магнитное поле, оно промагничивает наружное кольцо магнита и вводит его в состояние магнитного насыщения и у него сопротивление становится очень большое, магнитопровод не забирает на себя остатки потока, создаваемого электромагнитом, тогда э.м. поток проникает внутрь, проходит через воздушный зазор и до насыщения намагничивает магнит, а потом наружное магнитное поле убирают.

Слева в первом уравнении это МДС. Далее считаем по формулам.

В итоге мы получаем значение индукции в точке насыщения, которое равно значению индукции в магнитной нейтрали.

Но нам необходимо сделать перерасчёт индукции в магнитной нейтрали на индукцию в зазоре. Самая нижняя формула на листе - это эта формула перерасчёта.

Опасное сечение магнитопровода

$B_{\text{раск}} = 0,9 B_{\text{ср}}$
размагничивание 10%

$B_d = \frac{\Phi + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 + 2\Phi_4}{S_{\text{нестр. сечения}}}$

$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\text{средн. сток зазора}}}$

$K_{\text{раск}} = \frac{\Phi + 2\Phi_2 + 2\Phi_3 + 2\Phi_4}{\Phi}$

$K_{\text{раск}} = \frac{l_m}{S_m \cdot R_e} = \frac{l_m}{S_m} G_s$

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

$G_m = \mu_0 \left[\frac{ab}{\delta} + 0,52(1 + \frac{a}{b})l + 0,3085 \right]$

$G_m \approx \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ (точность 10%)

$G_m = \mu_0 l \frac{\Phi}{l_m R_e}$

Ю.М. Пятин Справочник «Постоянные магниты» Электрон.

ЛИСТ 4 01:31:45

Нашли индукцию в точке зазора, а надо найти в точке, отклонённой от средней линии на угол бетта.

Синус тетта катушки - это угловая ширина катушки

В итоге мы нашли индукцию, которая имеет место, после того как мы вытащили магнитную систему из намагничивающего устройства, то есть В дельта ср.

Чтобы найти B_d (суммарный магнитный поток, который проходит через опасное сечение магнита), магнитный материал должен быть соответствующего уровня, чтобы иметь возможность пропускать этот

магнитный поток, надо взять магнитное кольцо достаточной толщины, чтобы выдержать поток. Но и слишком толстое кольцо брать нельзя.

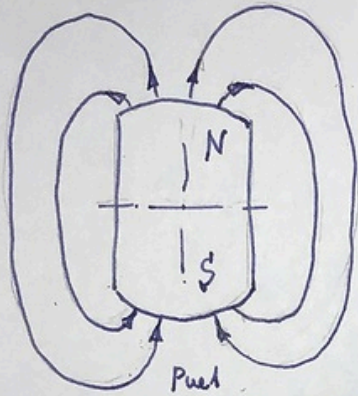
Магнит обладает болячкой - спонтанным размагничиванием. Чтобы этого избежать, магнит после намагничивания размагничивают, то есть помещают в переменное магнитное поле и уменьшают его намагниченность на 10 процентов. Тогда все домены-уроды потеряют своё состояние и не будут создавать магнитного потока. Поэтому мы ΔH умножаем на 0,9.

G - проводимость, и сведения для каждого отдельного участка можно взять из справочных материалов.

Феодосьич конкретно тут объясняет вывод G для двух участков

Случай намагничивания магнита без арматуры.

1) Отдельный магнит



G_{M1} - малая величина
(большой воздушный зазор,
нет магнитопровода)

$$K_{разм1} = \frac{l_M}{S_M} G_{M1} \quad (\text{рис. 2})$$

2) Установка магнита в магнитопровод

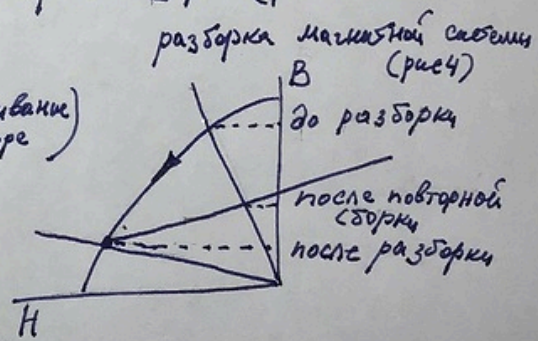
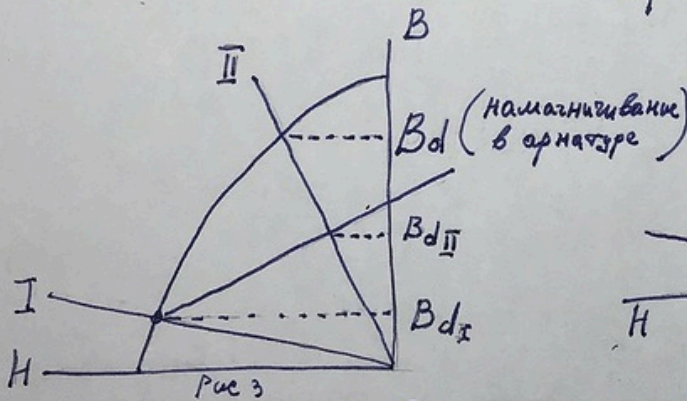
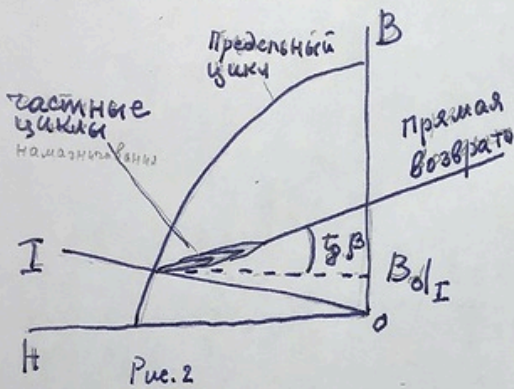
$\xi \beta = M_r$ (или M_r) - реверсивная
магнитная проницаемость
(Ю.М. Лягин, Справочник)

ТУТ БУДЕТ ЗНАК

УМНОЖЕНИЯ!!!!

$$K_{разм2} = \frac{l_M}{S_M} \bullet G_M$$

G_M - из варианта намагничивания в
арматуре (рис 3)



Магнит из $SmCo_5$ можно намагничивать отдельно от
арматуры (для этого материала прямая возврата практически
совпадает с предельным циклом).

2 случай технологии намагничивания магнита - случай намагничивания без арматуры

В этом случае берётся магнит, запикивается меж полюсов электромагнита, даётся большой магнитный поток, насыщают материал магнита (намагничивают). Затем магнит вытаскивают наружу и вставляют в магнитопровод.

Рассмотрим этот случай по этапам:

1 этап (смотрим магнитную индукцию в отдельно взятом магните, т.е. когда вытаскивали магнит из электромагнита)

Тогда магнитное поле будет замыкаться по воздуху, проводимость этого пути будет маленькая, поэтому коэффициент размагничивания будет небольшим.

Надо графическим путём найти значение индукции в магнитной нейтрали.

2 этап (вставляем магнит в магнитопровод)

Тут проводимость резко увеличивается

Тут мы ищем коэффициент размагничивания (ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ НА ФОРМУЛУ, ТАМ У НЕГО БЫЛА ОШИБКА)

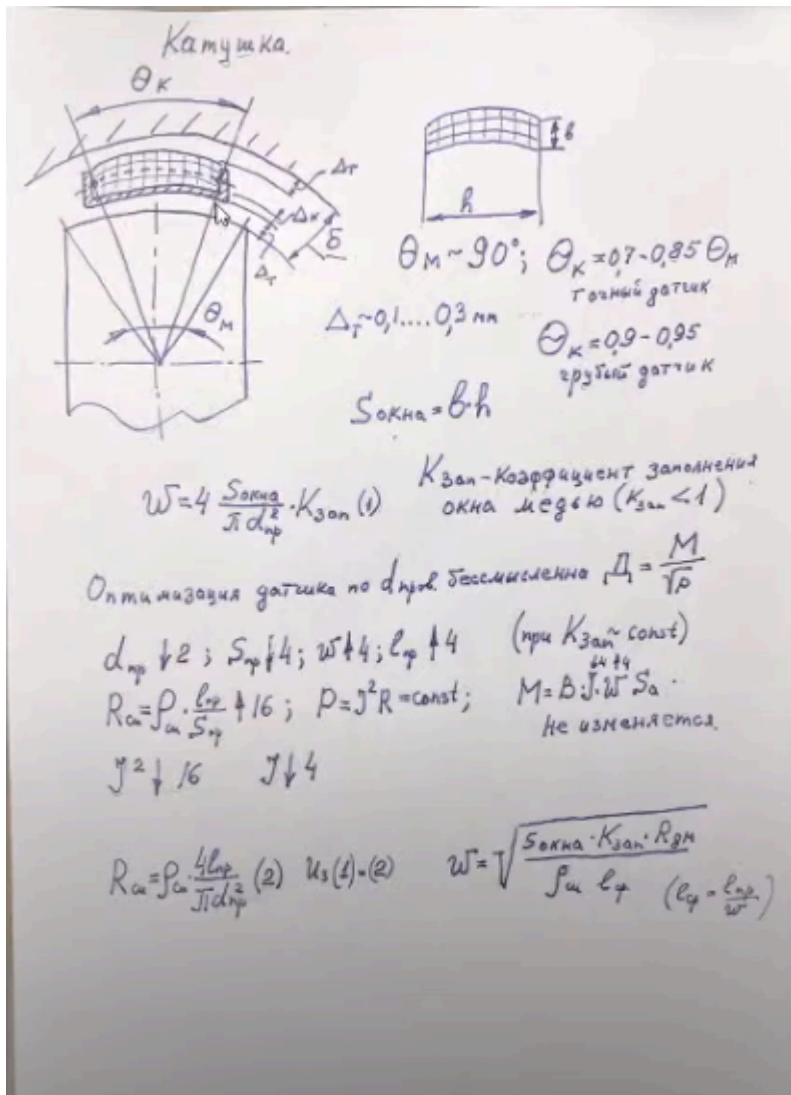
B_m будет таким же, как на прошлом этапе

Потом мы строим прямую размагничивания, такую же как и при расчёте с арматурой, но теперь находим точку пересечения не с предельным циклом, а с прямой возврата, т.е. при намагничивании магнита без арматуры получаем индукцию B_d2 , она меньше, чем при намагничивании в арматуре. Эта рекомендация применима для материала ЮНДК, но не для самарий-кобальт5 - это материал с большой корцетивной силой, и поэтому чтобы его намагнитить необходимо создать очень большой магнитный поток, настолько большой, что его просто нельзя намагнитить в магнитопроводе. Поэтому такой магнит намагничивается отдельно прямо на заводе. Ещё у

самарий-кобальт5 график идёт почти горизонтально и заканчивается очень далеко, если смотреть прямую возврата и предельный цикл намагничивания, то они практически совпадают, поэтому смысла в намагничивании в арматуре нет.

Иногда приходится разбирать магнитные системы. Когда магниты намагничены в арматуре, после разборки и повторной сборки величина индукции значительно падает, и индукция начинает меняться не по предельному циклу, а по частному.

Магнитные системы вынуждены разбирать во время сборки гироскопических стабилизаторов. Там на осях карданова подвеса ставятся двигатели постоянного тока бескорпусные. Сборка идёт следующим образом: берётся ротор этого двигателя, ставят одну раму, привинчивают, проводят эл цепи, потом берут статор, крепят его в другую раму или в корпус прибора, тоже привинчивают, проводят эл цепи. Но рама лежит у одного сборщика, а корпус у другого, а потом начинают собирать ГС: вставляют раму на место, при этой операции ротор попадает в статор. Когда мы это делаем, мы меняем индукцию по прямой возврата, величины которой может не хватить и это плохо. Чтобы этого избежать, на заводе после намагничивания статора, не вынимая его из намагничивающего устройства, сбоку к этим магнитам прикладывают технологическое кольцо, которое идёт от северного полюса к южному и замыкает на себя магнитные цепи, а после сборки его снимают и получают такой же магнит, как после намагничивания в арматуре.



ЛИСТ 6 02:26:24

Тут описывается, как проводить расчёт W

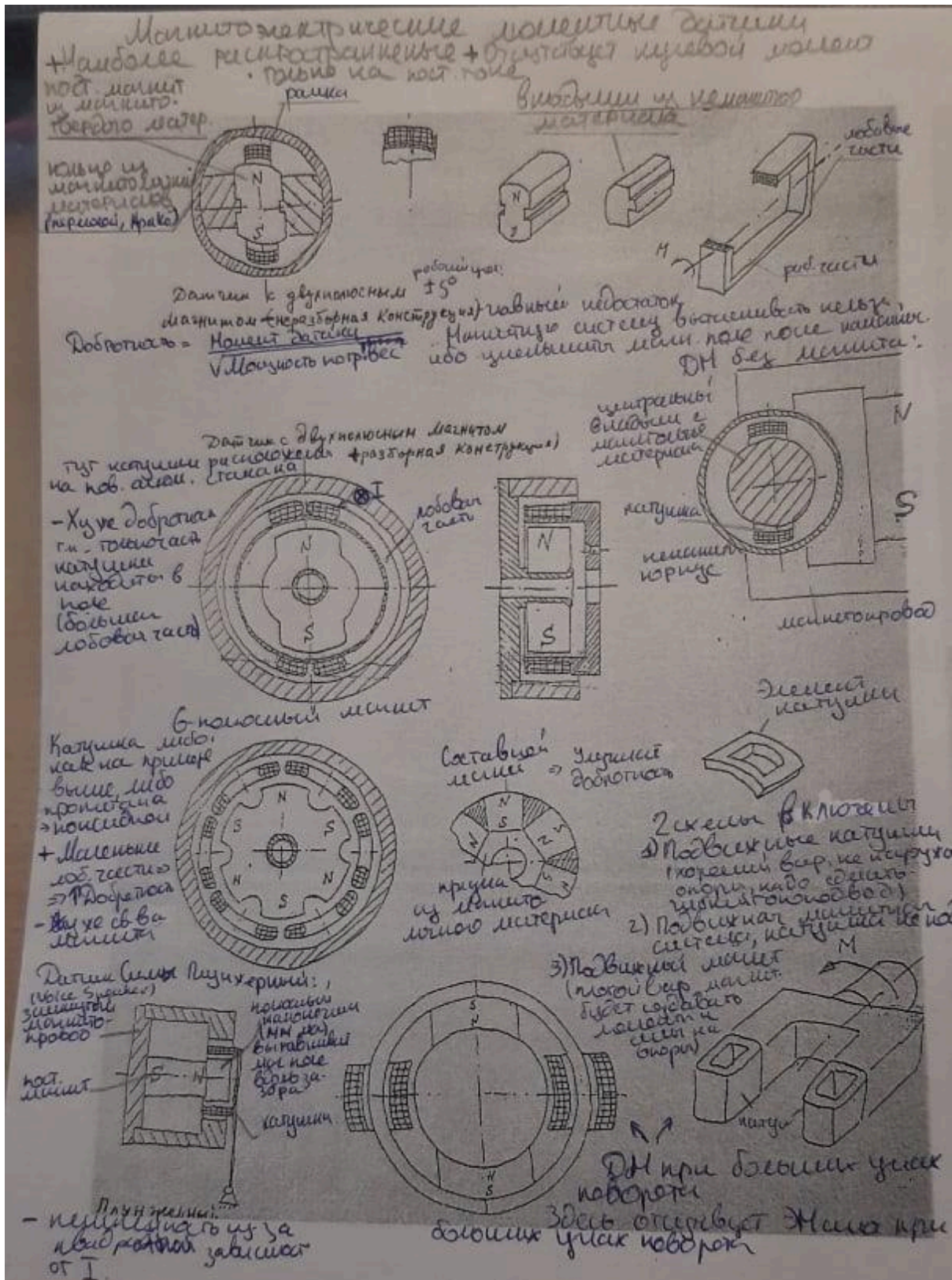
Катушка может быть каркасная и некаркасная (катушка проклеенная лаком)

Надо сперва найти тетакатушки, она зависит от того, какой прибор делается, если прибор средней точности, то есть грубый датчик, то тетакатушки=0,9...0,95тетамангита. Если прибор прецизионный, то есть точный датчик, то тетакатушки=0,7...0,85тетамангита.

Чтобы катушка спокойно перемещалась в зазоре, необходимо избежать её касания стенок магнита и магнитопровода. Поэтому катушка, магнит и магнитопровод делаются с допуском.

Дельтатехнологический - это тот зазор, который при условии всех—всех ошибках выставки рамки обеспечивает гарантированное свободное движение рамки в зазоре

2) Датчики момента навигационных гироскопических систем (Мильевич, Поцелуев)



Магнитоэлектрические ДМ

Особенность: отсутствует нулевой момент, т.е. если нет управляющего тока, то момент, создаваемый датчиком =0. Используется в измерительных электромеханических приборах.

Включает в себя:

- постоянный магнит из магнитотвердого материала, это материал с широкой петлей гистерезиса, он сохраняет свое магнитное поле. Для получения максимальной магнитной индукции (В) по оси намагничивания магнит подвергается термомагнитной обработке (нагревают и остужают в сильном магнитном поле)
- кольцо из магнитомягкого материала (пермаллой, Fe)
- обмотка (катушка)
- вкладыш из немагнитного материала (чтобы магнитное поле не замкнулось)
- рамка. Большая часть рамки находится под магнитом, т.е. в магнитном поле (рабочая часть рамки) Лобовые части там где всё выходит из магнитного поля, чем они короче, тем лучше датчик

Магнитное поле вытекает из магнита через воздушный зазор и попадает в наружное кольцо
Добротность датчика - отношение момента, создаваемого датчиком к потребляемой мощности и весу датчика

Данный датчик обладает наивысшей добротностью, т.к. у него короткие лобовые части.

Датчик с двухполюсным магнитом

Магнит такой же, наружное кольцо такое же, катушка расположена на поверхности алюминиевого стакана, она может быть легко вынута без разборки магнитной системы.
Добротность будет плохая, т.к. лобовая часть очень длинная

Датчик момента с 6-полюсным магнитом

Конструкция та же, только магнит 6-полюсный

Лобовая часть меньше, рабочая больше, следует увеличение добротности

Магнит не текстурированный, => свойства магнита хуже, чем в 1 и 2 случае

Можно использовать составной магнит, добротность улучшится в 1.5..2 раза

Два последних датчика могут работать в 3х схемах включения:

- 1) Катушка подвижна, магнит и кольцевой магнитопровод неподвижны
хороший вариант, не нагружает опоры, но надо делать гибкий токоподвод
- 2) Катушка неподвижна, магнит и кольцевой магнитопровод подвижны
+ не нужны токоподводы
- тяжелая подвижная часть, влияние внешних магнитных полей, создающие ошибки
- 3) подвижный магнит, магнитопровод и катушка неподвижны

плохой вариант, могут быть притягивания к магнитопроводу, что приводит к появлению вредных сил

3 вариант пригоден для приборов с высокой радиальной жесткостью (грубых приборов)

Плунжерный датчик силы

Включает в себя:

- постоянный магнит
- магнитопровод из магнитомягкого материала
- полюсный наконечник из магнитомягкого материала. Он нужен для выравнивания магнитного поля вдоль зазора.
- цилиндрическая катушка (находится в зазоре)

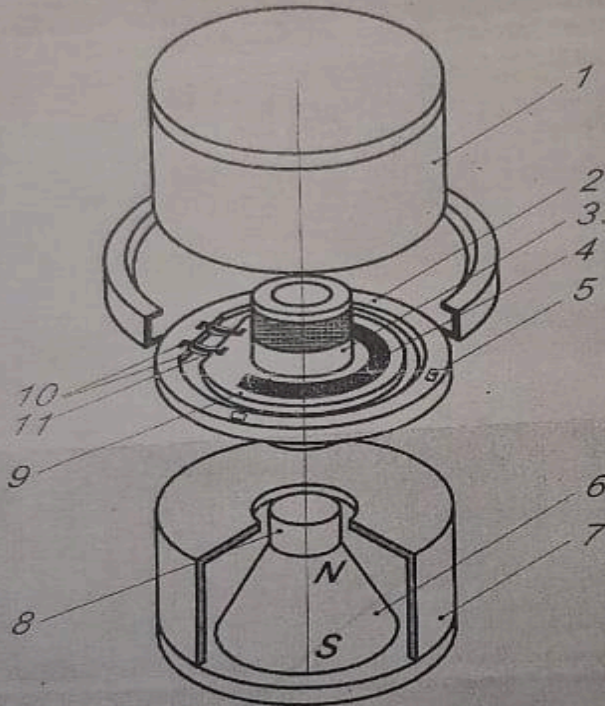
ПД: при протекании постоянного тока по катушке сверху, допустим, от нас, а внизу к нам, то возникает магнито-электрическая сила, которая выталкивает катушку из зазора

Недостаток - катушка с током втягивает железо (магнитомягкий материал) в себя, отсюда возникает электромагнитная сила, которая втягивает катушку в магнитопровод. Эта сила, независимо от направления тока, всегда втягивает катушку, т.к. сила пропорциональна квадрату тока

6.1020

1

Здесь сила взаимной индукции электромагнитов
 (оде катушки) втягивает в противоположные стороны



- | | |
|---|-------------------------|
| 1, 7 - Корпус пьезоэричного
моментного датчика | 6 - Магнит |
| 2 - Опорное кольцо иварное | 7 - Крышка |
| 3 - Катушка моментного датчика | 8 - Полюсный наконечник |
| 4 - Подвижный электрод | 9 - Подвижная пластина |
| 5 - Установочные пластики | 10 - Токоподвод |
| | 11 - Упругая балка |

Акселерометр "Q-flex"

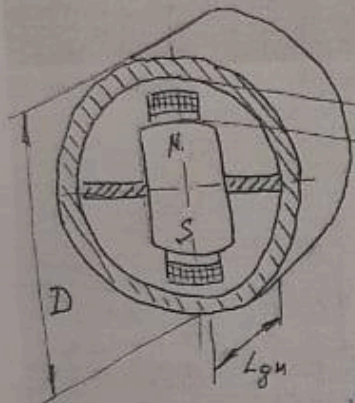
с дифференциальным пьезоэричным датчиком

Когда по катушкам течёт ток, верхняя и нижняя катушка создают магнитоэлектрические силы, направленные в одну сторону, подключение катушек должно выходить из этого требования. Но электромагнитная сила катушки стремится втянуть нижнюю катушку в зазор нижнего магнитопровода, а эи силы в верхней катушке стремятся втянуть верхнюю катушку вверх магнитопровода. в результате возникают две одинаковые силы и эти силы взаимно компенсируются, и остаётся только влияние МЭ силы, которая линейно зависит от тока

Оптимизация моментного датчика.

$$B \leq 1,8 \text{ Тл}$$

тип не превышает ток в 20А



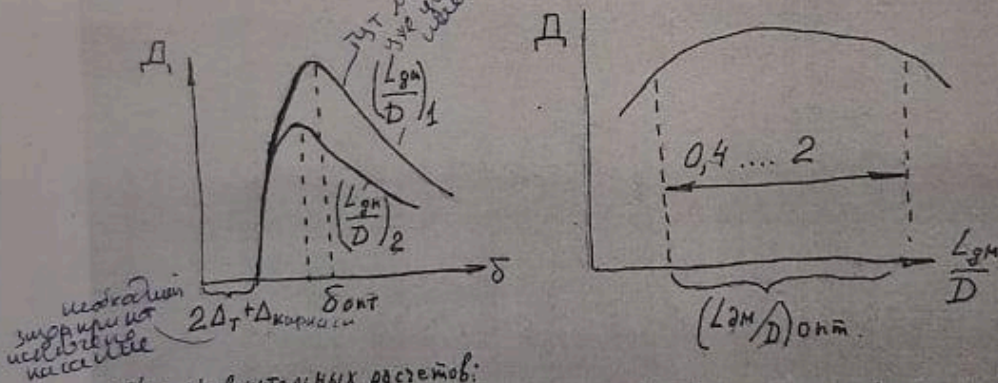
Величина зазора

Критерий для оптимизации

доброты

$$D = \frac{M}{G_{зм} \cdot \sqrt{P}} \rightarrow \max$$

Необходима оптимизация по δ .



Для предварительных расчетов:

$$P = \lambda \cdot S_{зм} \cdot (t_{\text{отж}}^{\circ} - t_{\text{окр}}^{\circ}) ; \text{охл. свб. конв. воздуха при давлении 1 атм.}$$

$$\lambda = 7 \dots 9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$$

Коэффициент заполнения объема железом = 0,7 ... 0,8

Для датчика с двухполюсным магнитом неразборной конструкции с магнитом ЮНДК 24БА, $\Delta_{\text{каркаса}} = 0$ и $\Delta_{\text{технологическом}} = 0,3 \text{ мм}$ при оптимальном зазоре

$$D \approx 0,8 \frac{\text{см}}{\sqrt{\text{Вт}}} \text{ для диапазона } G_{зм}^1 \text{ от } 0,5 \text{ н до } 10 \text{ н}$$

здесь рассчитывается дм с двухполюсным магнитом неразборной конструкции

мы в дз определяли момент, создаваемый этим датчиком при заданных габаритах (наружного диаметра и воздушного зазора) исходя из этих параметров мы должны получить остальные, а именно размеры магнита, размеры наружного кольца магнитопровода (оно должно быть спроектировано таким образом, чтобы магнитная индукция в теле этого магнитопровода не

превышала индукцию насыщения, потому что тогда у него сразу вырастет магнитное сопротивление)

наша задача, чтобы мощность, выделяемая в приборе, была как можно меньше, это повысит добротность

надо после того, как мы рассчитаем первый попавшийся зазор, поварьировать параметры датчика (отношение диаметра к длине и величина зазора) и посмотреть, как меняется добротность, в зависимости от изменения этих параметров

рассмотрим график зависимости добротности от зазора:
начальная точка этого графика соответствует зазору, который равняется $2 \cdot \delta_{\text{техн}} + \delta_{\text{каркаса}}$.

$\delta_{\text{техн}}$ - это необходимый зазор между поверхностью катушки и поверхностью магнита, при котором исключено касание этих элементов друг с другом.

$\delta_{\text{каркаса}}$ - толщина каркаса.

с повышением зазора мы можем вставить большее число витков, но магнит по размерам будет становиться меньше, и после критической точки на графике добротность начнёт падать. надо найти экстремум и по нему определить оптимальный зазор

теперь рассмотрим зависимость добротности от отношения длины к диаметру датчика момента

сразу можно сказать, что здесь, в отличие от первого случая очень слабая зависимость, на достаточно широком диапазоне добротность остаётся неизменной

Электродинамические (ферродинамические) моментные датчики

нет постоянного магнита

напряжения и токи в обмотках электромагнита

капюшон

сердечник

корпус

работы на пост тока

Гидравлическая система

$M = B \cdot J_p \cdot S_a \cdot \omega_p$

$B = \frac{J_{эм} \cdot \omega_{эм} \cdot G \cdot \Phi}{S_{зав}} \quad S_a = 2r_p \cdot l$

Управление постоянным током

$F = \frac{W_p \cdot \omega_{эм} \cdot J_{эм} \cdot J_p}{S_{зав}} \cdot G$

$G \approx \mu_0 \frac{S_{зав}}{2\delta}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$

При управлении переменным током $i_p = J_{pA} \sin \omega t; \quad i_{эм} = J_{эмA} \sin(\omega t + \varphi)$

$f = K i_p i_{эм} = \frac{J_{pA} J_{эмA}}{2} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} J_{pA} J_{эмA} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$

$F_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f dt = K \frac{J_{pA} J_{эмA}}{2} \cos \varphi = K J_p J_{эм} \cos \varphi$

$J_p = \frac{I_{pA}}{\sqrt{2}}; \quad J_{эм} = \frac{I_{эмA}}{\sqrt{2}}$ - эффективные значения токов - эквивалент постоянного тока

Для переменных токов переменный ток не используется, т.к. надо следить за $\cos \varphi$, что невозможно, т.к. есть индуктивный характер J_p - это сложно

переходит в более высокую температуру, не выдерживает нагрузки

Можно работать со своим устройством J_p и $J_{эм}$

Присутствие от стояния ток $J_{эм}$

Мало инерционность при работе

Зона работы датчика

В прецизионных приборах чаще всего используют магнитоэлектрические датчики, электродинамические датчики отличаются от магнитоэлектрических тем, что у них нет постоянного магнита, а есть электромагнитные моментные датчики, ёмкостные ДМ.

Электродинамические датчики не так сильно распространены, они хуже, чем магнитоэлектрические датчики, потому что в состав датчика входит электромагнит,

который потребляет мощность. Если в магнитоэлектрических датчиках мощность не потребляется, тот тут нет.

Вообще, в этих приборах используется момент, создаваемый при взаимодействии двух катушек с током, без железа.

Если одна из катушек сопряжена с магнитопроводом, то такие датчики называют ферродинамическими.

Слева наверху показана конструкция ферродинамического датчика

В неё входят:

центральный сердечник (из магнитомягкого материала) - это проводник для магнитного поля

наружное кольцо (магнитопровод) такое же как в магнитоэлектрическом датчике вокруг сердечника намотана обмотка электромагнита

сверху и снизу сердечника надеты корытца, по цилиндрической части сердечник центрируется в наружном кольцевом магнитопроводе. Материал корытца должен быть немагнитным, иначе поле будет замыкаться по неправильному пути, а надо, чтобы оно проходило через воздушный зазор, поэтому это алюминий или бронза обычно.

дальше рамка катушки, такая же как в магнитоэлектрическом дм, она охватывает сердечник с катушками. дубльвр - число витков, дубльвэм - число витков электромагнита, ток эм и рамки.

M - момент, создаваемый в таком датчике, индукция создаётся электромагнитом. Активная площадь рамки - длина зазора (длина магнитного поля, в котором находится рамка умнож. на 2 средних радиуса обмоток.

Индукция B определяется как намагничивающая сила электромагнита (ток и число витков эм) умноженная на сопротивление воздушного зазора (проводимость зазора) делённая на площадь зазора.

Этот датчик момента работает на постоянном токе, но может и на переменном (особенность ферродинамических датчиков)

Ниже изображена другая конструкции ферродинамич датчика

тут два магнитопровода п-образных, в зазоре находится плоская катушка. здесь имеется обмотка эм, она создаёт постоянное или переменное магнитное поле, поле замыкается через зазор и пронизывает обмотку датчика.

если по обмотке течёт ток, то по правилу левой руки находим силу.

при управлении переменным током i - ток

для прецизионных приборов переменным током не пользуются

Достоинства таких датчиков:

электромагнитные дм

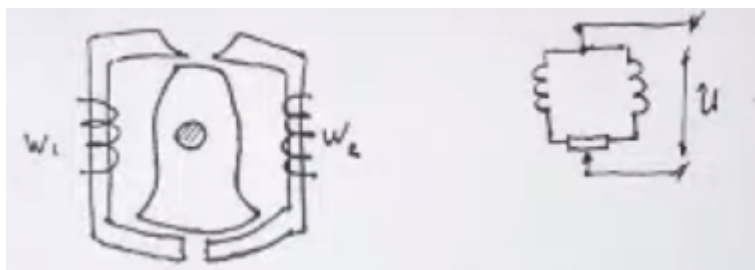
широко распространены в сша, у нас не прижились у нас хуже материалы

принцип действия заключается в том, что кусок железа втягивается под полюс, где большой магнитный поток.

основной недостаток: наличие остаточного момента, он связан с наличием остаточной намагниченностью у материала ротора, свойства материала меняются при протекании по нему переменного магнитного потока

Достоинства:

тут нет магнита, нечему терять магнитные свойства, раз так то этот датчик имеет более стабильный масштабный коэфф передачи, нет скачкообразного размагничивания, нет зависимости от температуры и статор и ротор должен быть сделан из магнитомягкого материала (из железа или из пермаллоя).

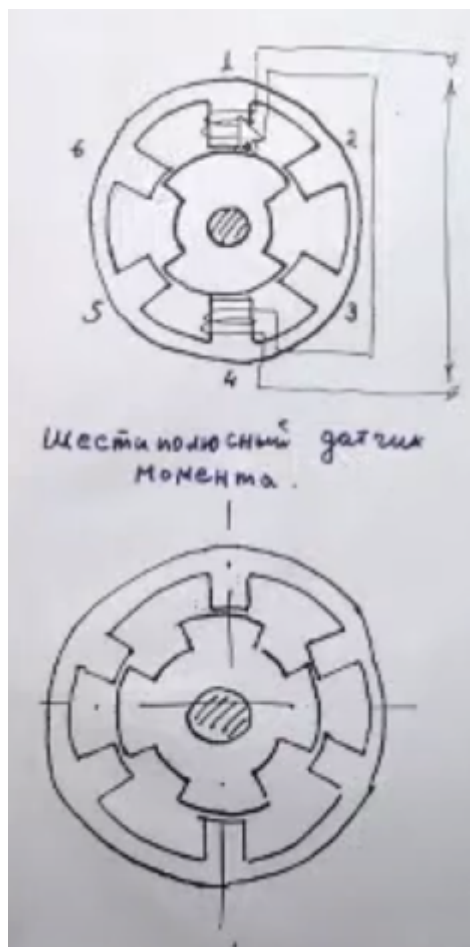


состоит из двух п-образных сердечников, в центре ротор, имеет широкую низкую часть, а верхнюю - узкую. широкая часть перекрывается расширенной частью стержней сердечников.

так как здесь длинный зазор, образованный магнитными материалами, то магнитный поток распределён вдоль этого зазора, а индукция внутри зазора - маленькая, потому что поток делим на полную площадь зазора. в верхней узенькой части ротора концы полюсов п-образных сердечников узкие и находятся на краях участка проводимости (поэтому тут имеется интенсивное магнитное поле, которое будет сильно тянуть ротор в ту или иную сторону, в зависимости от того, где поле

больше) нижняя никуда не тянется, поэтому всё определяется верхней частью катушки.

Две катушки включаются параллельно друг другу, ставится общее сопротивление и запитывается током. Этот датчик используется для азимутальной коррекции гироскопа, когда надо компенсировать вращение Земли: потенциометр (прямоугольная хуйня снизу правого верхнего рисунка) он оцифрован в значении широты, ставим стрелочку, при этом левый ток становится больше, правый меньше и появляется момент, действующий против часовой стрелки, который вызывает дрейф гироскопа со скоростью ухода Земли.

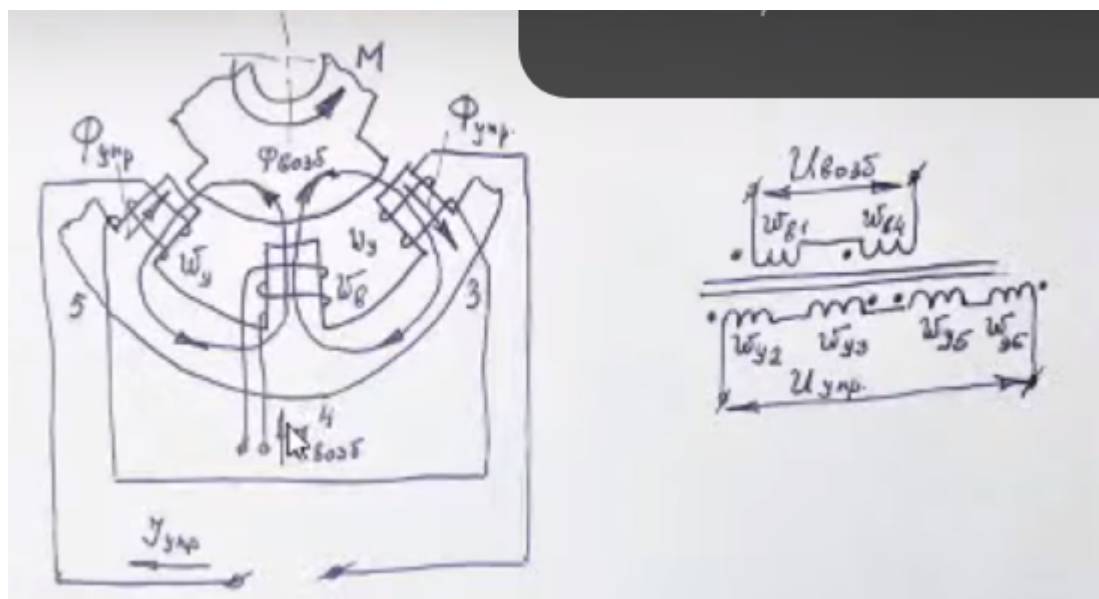


это шестиполюсные датчики момента:

на верхнем 6 полюсов на статоре, ротор имеет два полюса, на нижнем у ротора 4 полюса

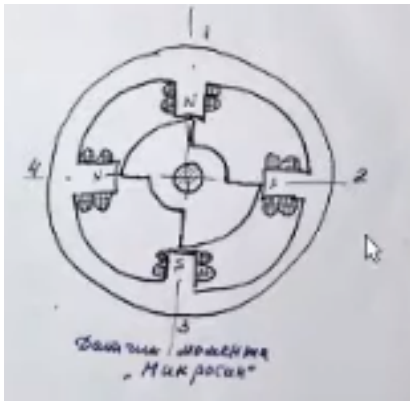
имеется электромагнит с сердечником, который притягивает к себе кусок железа (он выполняется несимметричным, в виде ротора, который находится на валу, у ротора есть выступающие и заглаблённые части. если в полюсе 4 и полюсе 3 дать большой ток, то железо втянется под эти полюса, создастся момент против часовой стрелки. если дать ток в полюса 2 и 5, то создастся момент по часовой стрелке.

итога: принцип действия заключается в том, что кусок железа втягивается под полюс, где большой магнитный поток.

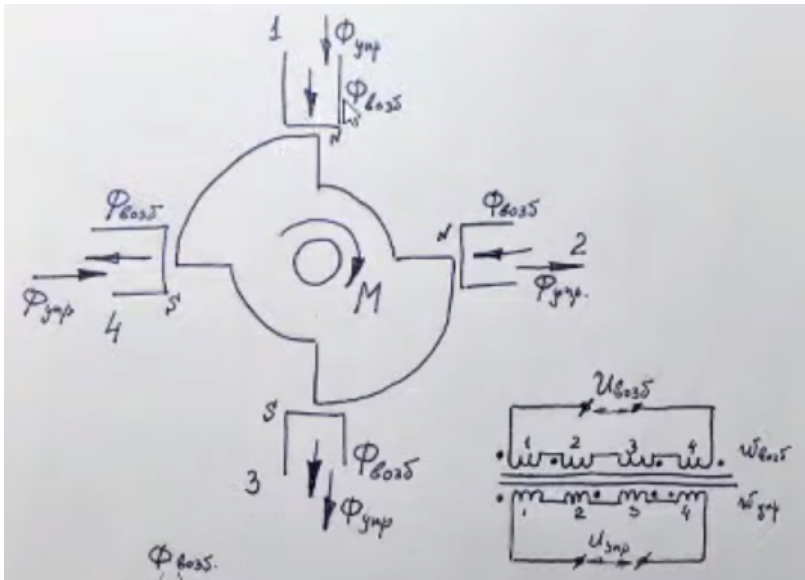


на 4 полюсе расположена обмотка возбуждения, она запитана током возбуждения - это большой ток, который создаёт магнитный поток, который выходит из полюса, протекает по магнитопроводу ротора и замыкается через боковые полюса, поэтому магнитный поток всегда замкнут. если тока управления нет, то положение ротора будет безразличным, т.е. может поворачиваться как угодно в пределах полюса. край выступа ротора находится посередине полюса. когда запитываем встречные друг другу катушки управления, то при одном направлении в левом сердечнике управляющий магнитный поток будет направлен к ротору, а в правом полюсе - от ротора, а раз так, то справа потоки возбуждения и управления складываются, интенсивность магнитного поля становится большой, а слева - потоки вычитаются, интенсивность потока становится маленькой. в итоге появляется момент, который втягивает левый выступ ротора под правый полюс. так же поступают и с верхними полюсами, чтобы они создавали момент против часовой стрелки.

правее на рисунке показана электрическая схема включения обмоток: катушки возбуждения включены в одну сторону, точкой показывается начало обмотки.



это датчик момента "Микросин" - здесь на каждом из полюсов расположено по две обмотки (возбуждения и управления). ротор имеет вытянутую форму и два выступа

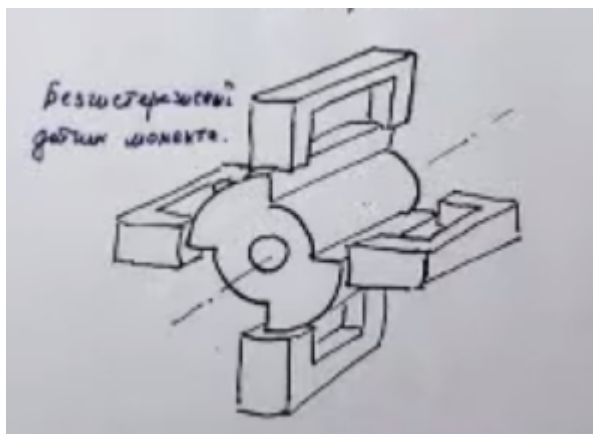


здесь очень важно соблюдать чередование полюсов при токе возбуждения, полюса должны чередоваться через один (NNSS), таким образом положение ротора может меняться в пределах ширины полюса, а момент будет равен нулю. если нет тока управления, то момент равен нулю при угле ± 5 градусов поворота ротора.

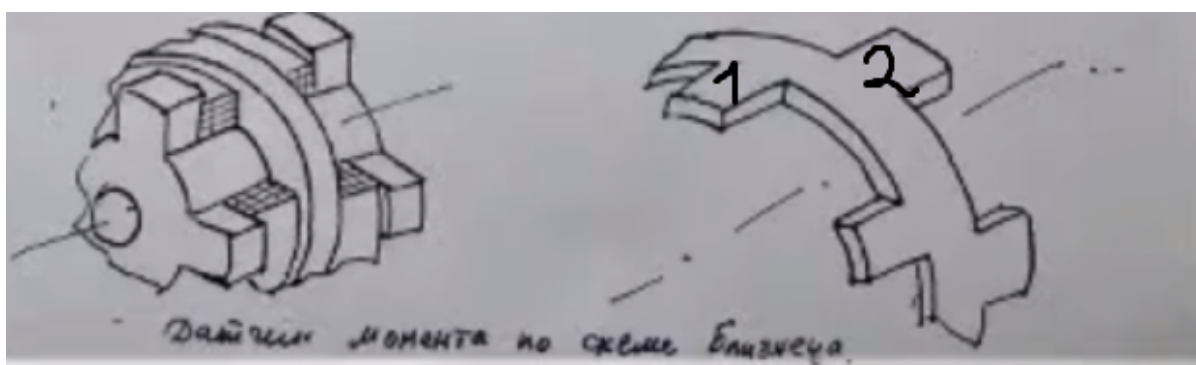
из 1 и 2 полюса поток втекает, из 3 и 4 вытекает, замыкание происходит между 1 и 4, и 2 и 3.

на каждом полюсе имеется катушка управления, они включены таким образом, чтобы они создавали поле в каждом полюсе. при таком включении катушек мы получаем в полюсах суммирование потоков. в 1 и 3 полюсе интенсивность потока большая, в 2 и 4 маленькая, соответственно ротор электромагнитными силами будет втягиваться в 1 и 3 полюса, появится момент по часовой стрелке. если изменить направление управляющего потока, то всё будет наоборот и изменится направления управляющего момента.

в правом нижнем углу изображена электрическая схема этого датчика. в 1 и 2 точки стоят одинаково слева, так как они должны создавать северный полюс, 3 и 4 точки стоят справа, так как создают поток противоположный.
а обмотки управления стоят не попарно, а встречно.



этот дм похож на Микросин, но тут нет общего кольца, тут п-образные сердечники, которые дают возможность протекать магнитному потоку не по окружности, а аксиально (вдоль ротора). спереди сердечников мы делаем полярности N (на всех четырёх), а сзади сердечников S (на всех четырёх), поэтому здесь будут только аксиальные потоки, это позволяет избавиться от гистерезисных моментов.

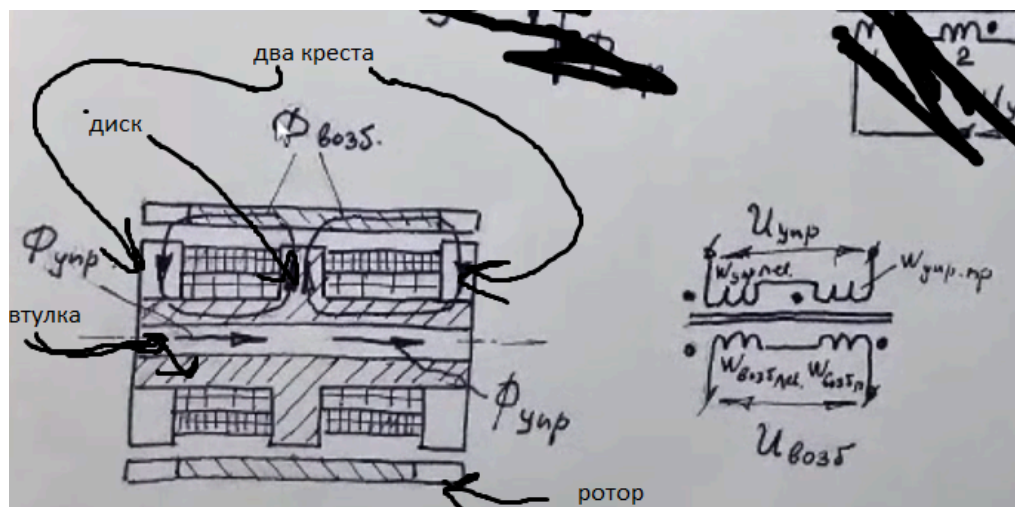


Слева статор датчика, справа ротор.

Ротор представляет собой тонкий цилиндр с выступами, правая боковая поверхность выступа, направленного к нам является продолжением боковой поверхностью выступа, направленной от нас.

Статор представляет собой магнитопровод, у которого имеется центральный диск, цилиндрическая втулка и крестовидные полюсные наконечники. Когда ротор надвигается на статор, то грань 1 ротора оказывается расположенной в середине

переднего стержня креста, а грань 2 оказывается расположенной в середине заднего стержня креста



здесь изображена схема дм, который был выше.

между крестами и центральным диском намотаны две обмотки (возбуждения (внутри) и управления (поверх)). включают обмотку возбуждения и запитывают обмотку управления. С левой стороны рисунка поток будет большой, а справа маленький. поэтому слева грань выступа ротора будет втягиваться на полюс магнитной системы. если сменить направление управляющего потока, то на картинке всё будет наоборот

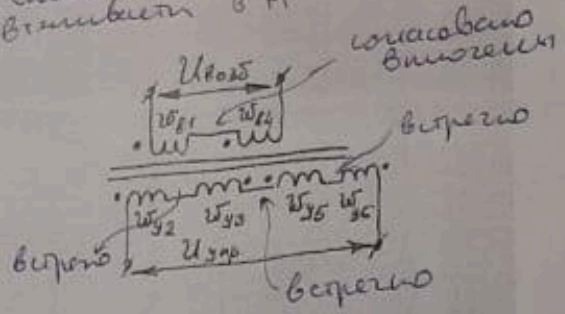
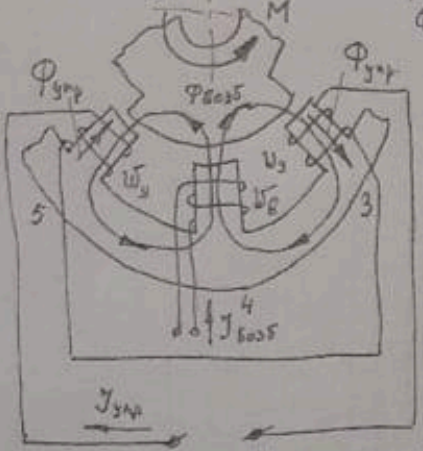
ач. ротора

съх. машини.

6.10.20.

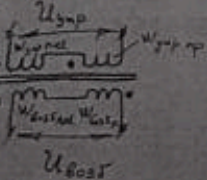
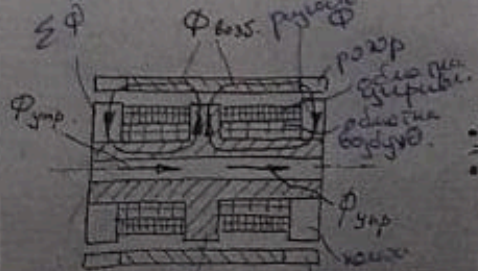
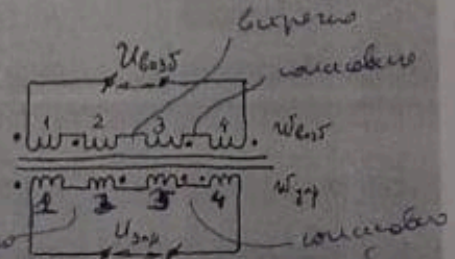
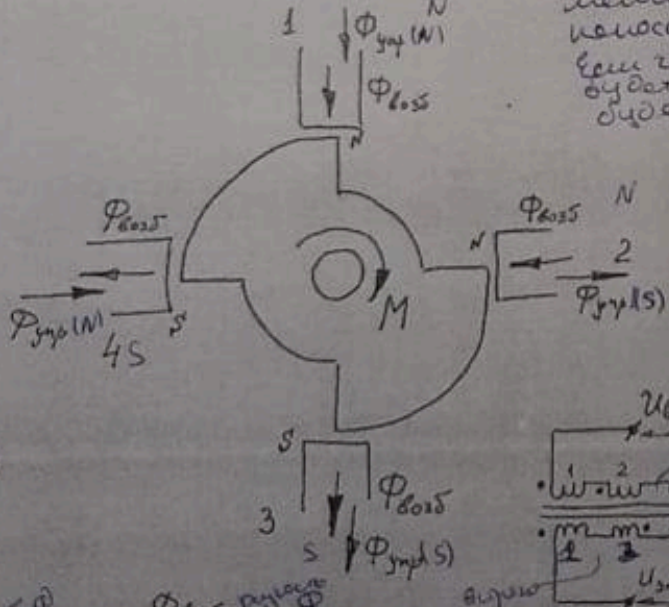
3

Работа в напосо ΦM
 Ели $\Phi_{гпр}$, то положенне Φ_2 шадывонот Φ_2 вилителот а ротор
 вилителот в М



Напосо $\Phi_{гпр}$ иредовато
 зред $\Phi_{гпр}$ - $\Phi_{бозс}$ которе
 иедит в предел илрине
 напосо, а $\Phi_{бозс} = 0$
 Ели иредовато, то $\Phi_{бозс}$
 будат средне иредителот и
 будат редителот и иредителот
 де Σ , то $\Phi_{бозс}$

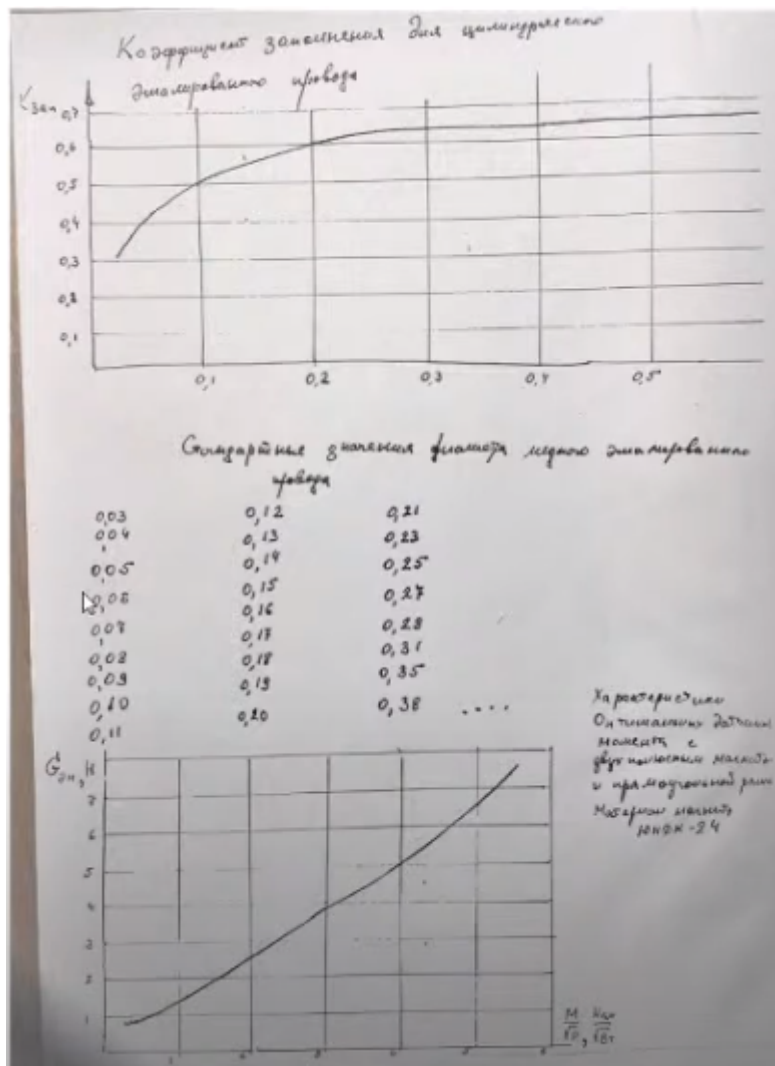
Микроини ПД



Область вилителот, т.е.
 там вилителот, т.е.
 илрине илрине, т.е.
 илрине илрине, т.е.
 илрине илрине, т.е.

бути $\Phi_{гпр}$ $\Phi_{бозс}$ $\Phi_{гпр}$ $\Phi_{бозс}$
 Тут илрине илрине илрине илрине

3) Электромагнитные датчики момента (расчёт, импульсный режим работы) продолжение (Варданян)



На одной из фирм проводилась оптимизация целого ряда моментных датчиков (двухполюсных неразборных), в которых использовался материал ЮНДК-24(ЮНДК-24БА). В этом датчике положен зазор между подвижной рамкой и поверхностью наружного кольцевого магнитопровода равный 0,3 мм. Для каждого из весов датчика, который выбирался в пределах весов от 0,5 Н (50 г) до 7 Н (700 г), и определялся зазор, при котором был максимальный момент. оптимальное значение отношения момента к корню из мощности для различных размеров датчика приведены на графике. График близок к прямой линии и коэффициент наклона равен примерно 0,8. Удобно

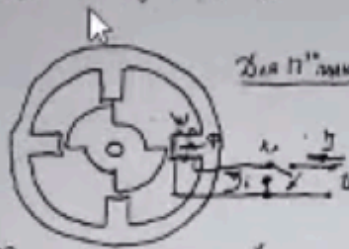
пользоваться на первом этапе проектирования, когда знаем лишь габариты прибора или допустимый вес, так как для каждого типа приборов можно назвать коэффициент заполнения объемом железа или средний удельный вес для каждого прибора. Для ДУС коэффициент равен 0,5. Для приборов существует оптимальное соотношение длины и диаметра. У ДУСа с жидкостным заполнением и с обратной связью комбинационного типа у него соотношение длины к диаметру 2-2,5. Если знаем объем, то знаем длину и диаметр. Дальнейшая задача вписать в объем гироскоп, гиromотор и датчик момента. Гиromотор вписываем исходя из имеющегося диаметра датчика. Прикидываем размер ротора, который может быть вписан в объем, отступая на зазоры, толщину корпуса. Дальше берем сведения из книги Делиторский, Мостеев, Орлов "Гироскопические электродвигатели". Там приводятся графики, которые дают зависимость диаметра гироскопа от кинетического момента от диаметра сферы, в которую вписан ротор. И даются цифры по потребляемой гиromотором гироскопа для разных диаметров, для разных воздушных сред (воздух, вакуум, смесь азота с гелием при пониженном давлении). Выбрав размер мотора мы выбрали кинетический момент и мощность, которая выделяется в гиromоторе. Теперь по графикам можно посчитать какую мощность может рассеивать прибор при нагреве относительно окружающей среды. Используем коэффициент для свободной конвекции при атмосферном давлении. Можно посчитать сколько можно рассеять с поверхности прибора мощности при перегреве наружной поверхности прибора, относительно окружающей среды на 20 градусов. предположим 4 Вт. А гиromотор выделяет 3 Вт. Следовательно для датчика момента можно оставить 1 Вт. Теперь по графикам мы знаем кинетический момент, максимальную скорость, которую должен измерять гироскоп. Перемножаем их и получаем максимальный момент, который может развивать прибор. Теперь посчитаем отношение момента к корню из мощности. Например 4. Для 4 вес датчика момента 2,5 Н. Коэффициент

заполнения железом датчика момента 0,7, то есть знаем плотность. Знаем оптимальное отношение длины к диаметру. Знаем диаметр и вписываем длину в объем. В таком случае получится длинный датчик и он не влезет в прибор, поскольку уже часть этого прибора занята гиromотором. Следующий шаг уменьшить диаметр гиromотора раза в 1,5. По новому значению диаметра нашли кинетический момент и мощность. По кинетическому моменту нашли максимальный момент. По разности мощности рассеиваемой прибором с поверхности при перегреве 20 градусов и мощности, выделяемой в уменьшенном гиromоторе находим ту мощность, которую можем дать на датчик момента. Она вырастет. Отношение момента к корню из мощности уменьшится. Определяем объем датчика и смотрим влезает он в габариты. Если влез и много места, то делаем третью итерацию до баланса. ЮНДК-24 не лучший магнитный материал, лучше ЮНДК-25БА или -35Т5БА. Тогда отношение момента к корню из мощности увеличиваем в 1,4-1,5 раза для двухполюсного датчика. Для шестиполюсного в 2,5-3 раза. График полезен на начальной стадии проектирования прибора.

Энергетический метод расчета электромагнитного момента

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

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



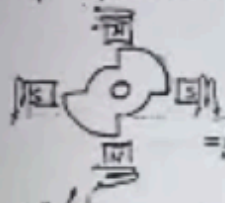
Для n-полюсов: $E_m = \int_{t_{i0}}^{t_{i10}} i e dt$; $e = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt}$

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

$$E_{m_n} = - \int_{t_{i0}}^{t_{i10}} i \frac{W^2}{R_m} \frac{di}{dt} dt = \frac{W^2}{R_m} \int_0^I i di = \frac{W^2 I^2}{2 R_m} = \frac{1}{2} (W I)^2 G_n \text{ или } \frac{1}{2} (W I)^2 \Phi$$

Неверный подход: $E_m = \sum_{n=1}^k E_{m_n} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^k (W I)^2 G_n$; $M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^k \frac{d}{d\beta} (W I)^2 G_n$

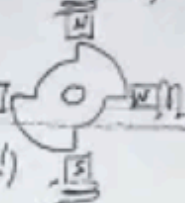
Пример: 1) Матричная крутизна



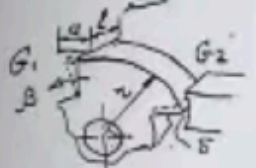
$$M = \frac{1}{2} (W I)^2 \frac{dG_n}{d\beta} =$$

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

2) Микросин (при отсутствии тока управления)



$$M = 0 \text{ (ошибка)}$$

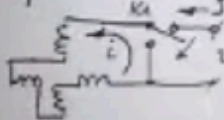


$$G_1 = \frac{\mu_0 l}{\delta} \left(\frac{a}{2} + z\beta \right)$$

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

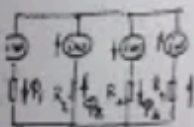
$$G_1 + G_2 = \frac{\mu_0 a l}{\delta}; \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} = \frac{\mu_0 l}{\delta} \frac{a^2 - z^2 \beta^2}{a}$$

Правильный подход:



$$E_m = \int_{t_{i0}}^{t_{i10}} i e dt$$

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



$$\Phi_1 = \Phi_2; \Phi_2 = \Phi_1$$

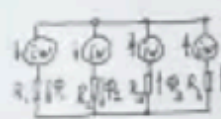
$$R_1 = R_3; R_2 = R_4$$

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

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{2iW}{R_1 + R_2}; E_m = \int_{t_{i0}}^{t_{i10}} i W \frac{d}{dt} 4 \left(\frac{2iW}{R_1 + R_2} \right) dt =$$

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

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



$$\Phi_1 = \Phi_2; \Phi_2 = \Phi_1$$

$$R_1 = R_2; R_2 = R_4$$

$$\begin{cases} \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = 2iW \\ \Phi_2 R_2 + \Phi_1 R_1 = 2iW \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \frac{iW}{R_1}; \Phi_2 = \frac{iW}{R_2}$$

$$E_m = - \int_{t_{i0}}^{t_{i10}} i W \frac{d}{dt} 2 \left(\frac{iW}{R_1} + \frac{iW}{R_2} \right) dt = (W I)^2 (G_1 + G_2)$$

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

Формулы для расчета M:

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

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

Расчет моментов электро-магнитных датчиков. Проводим расчет для датчиков типа "микросин" - это датчики, у которых по 2 обмотки

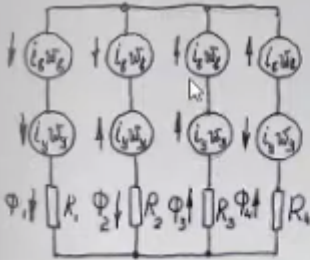
(обмотка возбуждения и обмотка управления). И чередование полюсов намагничивания NNSS. Если мы даем ток только в обмотку возбуждения, то положение датчика (ротора датчика) должно быть безразличным, никакого момента быть не должно. При появлении управляющего тока появляется управляющий момент электро-магнитный. Для расчета электро-магнитного момента надо рассчитать магнитную систему, определить распределение магнитного поля в зазоре, потом проинтегрировать тангенсальную составляющую магнитного поля по поверхности ротора и тогда бы мы нашли момент, создаваемый датчиком. Это сложно, есть решение легче. Решение таких задач основывается на законе сохранения энергии, который для задачи звучит следующим образом: механическая работа (элементарная), совершаемая датчиком момента - момент, развиваемый датчиком умноженный на элементарный угол $d\beta$. Она равна элементарному изменению магнитной энергии, запасенной датчиком. Обратимся к верхней формуле: момент, развиваемый датчиком есть производная от электромагнитной энергии по углу поворота датчика. Нужно найти энергию. Возьмем четырехполюсный от "микросина" ротор, статор и на одном из полюсов расположим обмотку w и запитаем током I . Через магнитопровод течет магнитный поток и какая-то магнитная энергия магнитной системы будет запасена. Найдем эту энергию. Поставим переключатель, которым разорвем цепь питания обмотки током I и закоротим ее накоротко. В этом случае ток не прервется, поскольку запасена магнитная энергия, был магнитный поток. Как только поток начнет уменьшаться, в обмотке w появится ЭДС, который поддерживает ток в цепи. Будет ток i в цепи. В начале он равен I , а потом станет равным 0 , магнитная энергия уйдет на нагрев обмотки. Значит магнитная энергия может быть определена, как интеграл от момента времени, когда $i=I$ до $i=0$ от мощности, равной произведению тока на ЭДС. ($i \cdot e \cdot dt$). ЭДС определяется, как $e = -d\psi/dt$, где ψ - потокосцепление магнитного потока с катушкой. Вынесем

w -число витков, оно постоянное. Величина потока, текущего в полюсе равняется отношению намагничивающей силы к сопротивлению магнитопровода (полное включая все зазоры). Величина R_m определяется только зазором и не зависит от состояния магнитопровода, то есть рассматриваем случай когда токи не чрезмерно большие и магнитопровод не в режиме насыщения. $R_m = \text{const}$. E_m равно интегралу во всю строку. Нашли энергия, запасенную обмоткой w . Таких обмоток 4. Полная энергия равна сумме для всех полюсов E_m (где неверный подход формулы, в них использован принцип суперпозиции). Посмотрим неверные формулы, если полярность не NNSS, а NSNS. Смотрим формулу, где магнитная пружина. 4 обмотки, запитанные током I . Чему равно G_m . Рассмотрим верхний полюс: a -длина, l - глубина, δ -зазор, край ротора. Ротор перекрывает зазор при неотклоненном роторе прикрывается полюс наполовину. Так как зазор меньше a и l , то G_1 и G_2 по формулам рядом с картинкой, но это неверно, это магнитная пружина. Посмотрим случай, если ротор повернуть на 45 градусов. Поворот ротора будет приводить к появлению момента, который будет возвращать ротор в положение, при котором перекрыты все полюса наполовину, то есть магнитная пружина. Посмотрим правую картинку, где микросин. NNSS, результат тот же, момент $M=0$. Есть ротор, его поворачиваем. Поток, текущий через горизонтальные полюса уменьшается, поскольку уходим от перекрытия полюсов и совсем прерывается, зато вертикальный магнитный поток увеличивается в 2 раза. У нас по полному потоку сверху и снизу момент=0.

Переход к расчету моментного датчика. Берем полный микросин, у которого на каждом полюсе по обмотке. Они соединены последовательно. Даем большой ток I во все обмотки, поставили ключ, разомкнули наружную цепь накоротко и тогда ЭДС, наводимый на 4 обмотках будет поддерживать ток в обмотках до тех пор, пока он не затухнет, пока запасенная энергия не уйдет на нагрев катушек.

Записываем уравнение Кирхгофа. Найдем Φ_1 и Φ_2 . Находим момент. Если даем отклонение против часовой стрелки ротору, то возникает момент, пропорциональный углу бетта, который возвращает ротор в нулевое положение, то есть это соответствует магнитной пружине. Посмотрим правую часть $M=0$. Составим уравнения Кирхгофа. Если микросин запитан только током возбуждения, то ротор может быть расположен как угодно относительно полюсов, никакого момента не возникает, только в том случае, если есть управляющий ток. Формулы в нижнем правом квадрате для верного ответа

Расчет момента микросина.



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

$$\begin{cases} 2(i_1 w_1 + i_3 w_3) = \Phi_1 R_1 + \Phi_3 R_3 \\ 2(i_2 w_2 - i_4 w_4) = \Phi_2 R_2 + \Phi_4 R_4 \end{cases}$$

$$\Phi_1 = \Phi_3 = \frac{i_1 w_1 + i_3 w_3}{R_1}; \quad \Phi_2 = \Phi_4 = \frac{i_2 w_2 - i_4 w_4}{R_2}$$

$$M = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 \left(\frac{\Phi_n}{G_n} \right)^2 \frac{dG_n}{d\beta} = \frac{1}{2} \left[(i_1 w_1 + i_3 w_3)^2 \frac{dG_1}{d\beta} + (i_2 w_2 - i_4 w_4)^2 \frac{dG_2}{d\beta} \right]$$

$\frac{dG_1}{d\beta} = \frac{\mu_0 l}{\delta} z$; $\frac{dG_2}{d\beta} = -\frac{\mu_0 l}{\delta} z$ (При том же β ось вращения потоков пересаживается)

$$G_1 = \frac{\mu_0 l}{\delta} \left(\frac{\alpha}{2} + z\beta + q\beta^2 \right)$$

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

$$M = +4 i_1 i_3 w_1 w_3 \frac{\mu_0 l}{\delta} z; \quad (1)$$

Вариант - микросин с одной обмоткой \bar{w} на каждом полюсе.
 Ток J либо в обмотках полюсов 1,3, либо в обмотках полюсов 2,4.
 Положим $w_1 = w_3 = \frac{\bar{w}}{2}$; $i_1 = i_3 = J$ ($HC_{1,3} = J\bar{w}$; $HC_{2,4} = 0$)

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

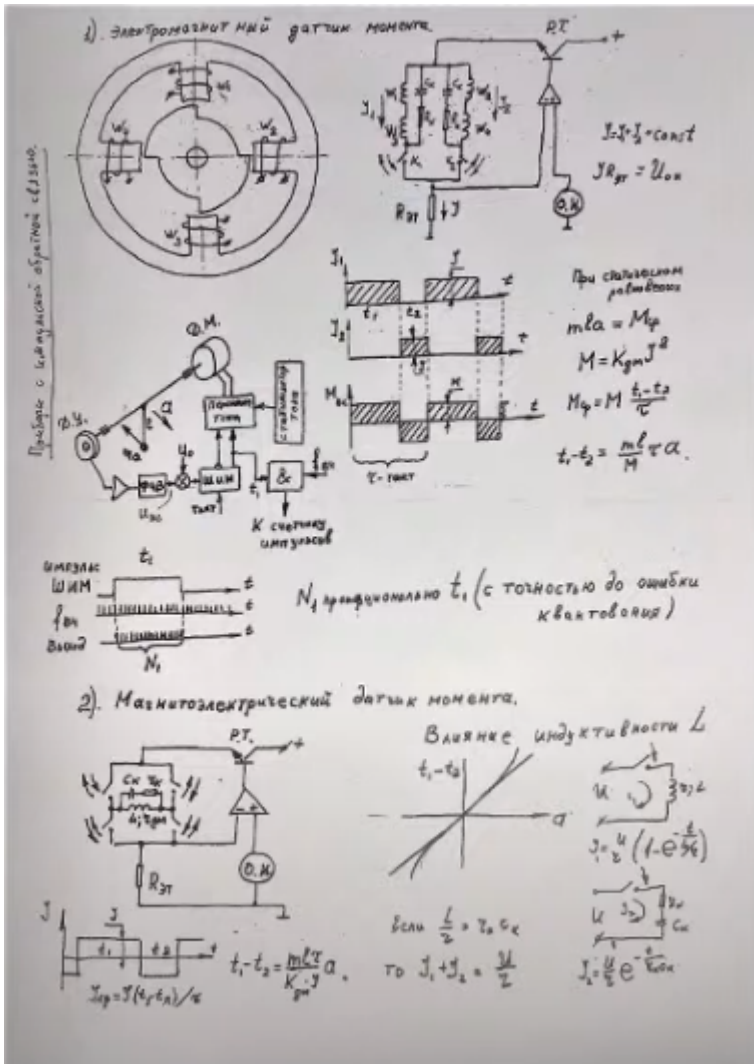
Если сделать $J = const$ и обеспечить его протекание в обмотках полюсов 1,3 в течение времени t_1 , а затем подать тот же ток в обмотки полюсов 2,4 на время t_2 , то средний за время $t_1 + t_2$ момент

$$M_{cp} = \frac{\mu_0 l}{\delta} J^2 \bar{w}^2 \left(\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \right) - пропорционален $(t_1 - t_2)$ - линейная зависимость.

Можно сделать в компенсационном приборе импульсную обратную связь.$$

На каждом полюсе по две обмотки NN- направленные вниз и SS- направленные вверх. Первая обмотка создает магнитный поток такой же как и обмотка возбуждения, а вторая обмотка создает магнитный поток

обратный потоку возбуждения. В 3 совпадает с потоком возбуждения, а в 4 обратный потоку вытекающему из ротора. Запишем уравнения Кирхгофа. Момент не зависит от бетта. Момент пропорционален квадрату тока, то есть не зависит от направления. использовать такой режим при точных измерениях нельзя, так как мы получаем нелинейную характеристику зависимости момента от управляющего тока. То есть получаем нелинейный датчик. Есть любопытная возможность. Сделаем ток I постоянным. Вариант управления такой же. мы даем ток либо в вертикальной обмотке, либо в горизонтальной, но ток постоянный и будем регулировать время протекания тока через вертикальные и горизонтальные обмотки. То есть пусть ток протекает в вертикальные обмотки в течение времени t_1 . Эти обмотки выключаем, а затем подаем тот же ток в обмотки 2 и 4 полюсов на время t_2 и посчитаем чему равен средний момент за время t_1+t_2 . Когда подаем на обмотки 1 и 3, то момент по часовой стрелки, если 2 и 4 - против часовой стрелки. Средний момент по формуле.



Рассмотрим импульсные следящие системы - электромагнитный и магнитоэлектрический. В 80-е годы Дрейпер, Ригли "Управление, наведение и стабилизация в космосе", где рассматривалась система управления КА "Аполлон". В книге описана работа магнитного акселерометра. В нем использовался датчик типа микросин. Конструкция: маятниковый узел- стержень длиной l с массой m и ускорение a , ДУ, ДМ с подвижным ротором, две параллельные полосы на стержне, где ДУ и ДМ- прецизионные подшипники, треугольник - усилитель, ФЧВ-фазочувствительный выпрямитель, ШИМ-широтно-импульсный модулятор, переключатель тока, фильтр, который сглаживает от пульсаций.

ШИМ-устройство, в котором входное напряжение идет на заряд емкости и дальше идет разряд этой емкости постоянным током. Получаются пилообразные напряжения, спадающая емкость разряжается по линейному закону. Когда это напряжение доходит до 0, то вырабатывается импульс в начале тактового периода и прекращается этот импульс в конце тактового периода. Тактовый период определяется запускающим такт импульсом, то есть когда приходит импульс такта, то входное напряжение заряжает емкость, потом идет разряд емкости и на выходе ШИМа получается импульс, длительность которого пропорциональна управляющему напряжению. На вход подается постоянное напряжение и вырабатывается длительность, которая пропорциональна управляющему напряжению и так до следующего такта ШИМ молчит, пришел следующий тактовый импульс пропорциональный управляющему напряжению на момент начала следующего такта и так далее. Длительность импульсов всегда меньше, чем длительность тактового периода, а в ШИМ тактовый период $T_{\text{ш}} = \tau$ строго постоянен. На входе ШИМ показан сумматор и показано напряжение U_0 - регулировочное напряжение. Оно нужно нам для того, чтобы при отсутствии управляющего сигнала с ДУ при нахождении маятника в нулевом положении, сигнал равен 0, ШИМ вырабатывает импульс, равный половине тактового периода, то есть U_0 дает смещение на входе ШИМа, при котором ШИМ вырабатывает импульс равный половине тактового периода.

Когда появляется ускорение, появляется момент, появляется поворот ротора, поворот маятника, появляется управляющий сигнал. Он добавляется к напряжению U_0 и увеличивает длительность временного интервала, формируемого сигналом. Если же знак ускорения другой, то и момент соответственно другой, тогда меняется знак угла отклонения маятника, знак управляющего сигнала и он уже будет вычитаться из напряжения U_0 . Суммарное напряжение на входе ШИМа становится меньше и длительность импульса становится меньше половины

тактового периода. Далее сигнал с выхода ШИМ управляет переключателем тока, который создает ток либо в вертикальных, либо в горизонтальных обмотках датчика. Вот этот переключатель показан на схеме сверху справа. Обмотки w_1 и w_3 - вертикальные, включены последовательно. Обмотки w_2 и w_4 тоже включены последовательно. Переключатель тока выполняется в данном случае в виде двух электронных ключей k_1 и k_2 . Они показаны как механические ключи (они чаще на полевых транзисторах). Они дают включение и выключение за очень маленькие отрезки времени, то есть фронт импульса ничтожно мал. Когда дали ток (имеется источник тока). Ток при включенном ключе k_1 протекает через w_1, w_3 , а при включенном k_2 через обмотку w_2, w_4 . Далее эти токи протекают через сопротивление R эталонное, причем здесь оба тока текут вниз. Поскольку параметры обмоток одинаковые, то и токи одинаковые, то есть на R эталонном какое-то постоянное падение напряжения τu поддерживается по кварцевому генератору. При первом токе момент по часовой стрелке, при втором против часовой стрелки. Акселерометр в статическом состоянии, когда маятник остановился, должно быть равенство моментов. Инерциальный момент больше момента обратной связи до тех пор, пока средний момент не уравнивает маятниковый момент. Это обязательное условие статической работы компенсационного прибора. Величина момента нужна постоянная. Для того, чтобы момент был постоянным, нужно поддерживать постоянной амплитуду тока I . Нужно стабилизировать ток через обмотки ДМ. По формуле в конце: чтобы знать a достаточно знать t_1 . Импульс пропорционален τu_1 поступает на схему совпадения, на второй вход которой поступает высокочастотные импульсы стабильной частоты $f_{вч}$. Но как работает схема совпадения: если на оба входа подается импульс, если на первом и втором входах есть сигнал 1, то есть сигнал 1 и на выходе, то есть импульс t_1 разрешает прохождение высокочастотных импульсов через схему совпадения. Мы подали этот импульс, потом пустили $f_{вч}$. N1- пачка

импульсов, которые соответствуют импульсам, попавшим во временной интервал t_1 . Число этих импульсов N_1 пропорционально t_1 , значит можно вычислить t_1 и можно посчитать a , то есть это цифровой выход акселерометра, дальше можно суммировать $N_1+N_2+\dots$, сумма импульсов пропорциональна накопленной скорости ракетой за время измерения. Здесь упрощенная схема, так как N_1 определяет t_1 неточно. Расстояние между высокочастотными импульсами хоть и маленькое расстояние, но оно есть и если передний или задний фронт попадает на эти расстояния, то мы можем недосчитаться одного импульса, либо добавить лишний импульс, это ошибка квантования. Мы можем вычислить t_1 только с величиной шага с точностью до шага высокочастотных импульсов. Поэтому надо делать высокочастотные импульсы очень высокими, чтобы точнее измерять t_1 . Но существуют более совершенные системы, где другие схемы подсчета импульсов, где выдерживается условие ток поступающий в цепь обратной связи, он пропорционален числу импульсов на выходе схемы. В этом случае ошибка квантования определяется за счет автоколебаний внутри кванта и не появляется большая ошибка, получается точная система, не зависящая от отношения частоты высокочастотных импульсов к частоте тактовых импульсов. тактовые импульсы идут с достаточно большой частотой, например 1 КГц или выше. Эти импульсы, которые поступают в обмотку датчика они должны немного покачивать маятник, это импульсное возмущение, но за счет того, что маятник обладает определенным моментом инерции + к тому есть демпфирование колебаний этого маятника. Эти импульсы не проявляются в работе датчика, а датчик реагирует только на средний момент, как на постоянную величину. Момент зависит от квадрата тока, поэтому ток надо поддерживать постоянным. Кроме переключателя тока есть стабилизатор тока (схема справа наверху, где провода от R эталонного с О.И.- источник опорного напряжения, усилителем, RT- регулирующий транзистор). Как он работает: обмотки, расположенные на полюсах

выполнены из меди. Прибор работает в условиях переменной наружной температуры (-60 градусов до +80). медная обмотка имеет температурный коэффициент изменения сопротивления 0,004 ед/градус, то есть 40% изменение сопротивления от номинала. Значит если мы будем питать переключатель от стабилизатора напряжения прецизионного, то ток, протекающий по обмотке будет меняться с температурой, потому что сопротивление медной обмотки будет на 40% меняться, значит нужно каким-то образом избежать влияния изменения сопротивления обмотки. Работа схемы: пусть прибор нагрелся, был установлен ток (10 мА). Прибор нагрелся и вместо 10 мА получаем 6 мА. За счет того, что сопротивление выросло, ток протекающий по левой и правой ветвях переключателя тока падает, протекает через эталонное сопротивление независимо включена левая или правая сторона и вызывает падение напряжения на эталонном сопротивлении. В начале падение напряжения соответствовало $10 \text{ мА} \cdot R$ эталонное. И это падение напряжения равнялось падению напряжения прецизионного источника опорного напряжения - это специальный кремниевый стабилитрон (диод Зенера) или специальная электронная схема, которая вырабатывает постоянное напряжение малой мощности, о с очень высокой точностью до 0,0001%. Предположим падает напряжение на R эталонном 3 В, тогда $300 \text{ Ом} \cdot 10 \text{ мА} = 3 \text{ В}$ и опорный источник тоже 3 В. Тогда на обоих выходах усилителя одинаковое и небольшое напряжение, которое поддерживает регулирующий транзистор во включенном состоянии для сохранения тока 10 мА. Теперь катушка нагрелась, вместо 10 мА пошел ток 6 мА, значит падение уменьшилось не 3 В, а 2 В. А опорный источник сохранил 3 В. Тогда на базах входных каскадов операционного усилителя появился разный сигнал (напряжение). Коэффициент усиления ОУ громадный, порядка 1 млн, даже самая маленькая разность превращается в громадное управляющее напряжение, которое поступает на базу регулирующего транзистора и его приоткрывает. Значит падение

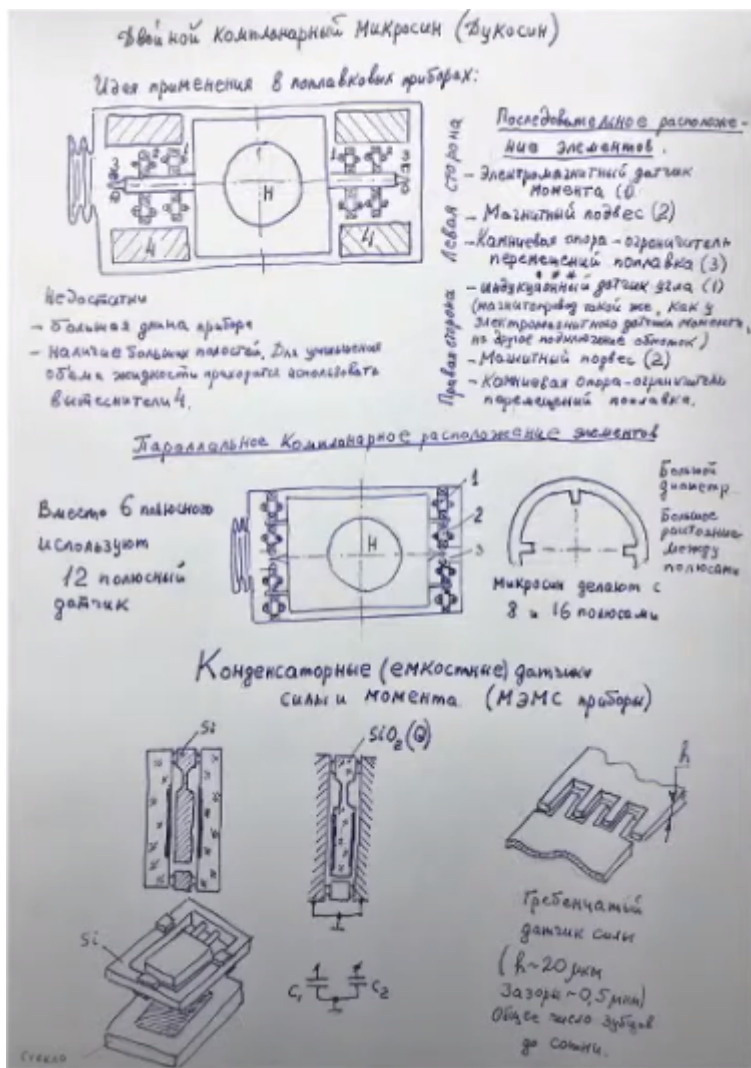
источника питания уменьшается и на ключах появляется большое напряжение, которое восстанавливает прежнее значение тока. То есть самые маленькие отклонения тока, текущего по обмоткам вызывает изменение падения напряжения на эталонном сопротивлении, разбалансирует входы ОУ и создает управляющий ток в базу, который восстанавливает утраченное значение тока. Стабилизатор тока может обеспечивать ток со стабильностью на уровне единиц ppm, то есть на уровне миллионных долей от номинала или 10 в -4 % от номинала. Ток I можем поддерживать точно. Эта схема позволяет получить точный цифровой эквивалент измеряемому ускорению, а дальше подсчитывая число импульсов, эти импульсы поступают в вычислительную машину и дальше подсчитывается число импульсов и тд. Не нужны преобразователи напряжения в цифровой код, это схема с импульсным током датчика момента. Она особенно хорошо работает с использованием поплавковых приборов (в американской схеме Аполлона).

В России больше магнитоэлектрических ДМ. ДМ с неразборной магнитной системой и с рамкой, которая находится в воздушном зазоре. Там одна обмотка и если хотим тот же принцип работы, то есть хотим получить либо положительный, либо отрицательный момент и регулировать время создания момента положительного и отрицательного и вычислять разницу времени, которая будет пропорциональна измеряемому ускорению, то для того, чтобы создать положительный или отрицательный момент в обмотке рамки должен иметь либо положительное направление тока, либо отрицательное. То есть обмотка ДМ переключатель. Схема одна и та же, что для одного, что для другого ДМ, разница в переключателе тока. Для магнитоэлектрического датчика требуется переключатель с четырьмя ключами, так называемый мостовой переключатель. правая часть схемы- тот же стабилизатор, что и в верхней схеме, только ток от регулирующего транзистора в зависимости какие ключи включены

течет через обмотку рамки либо: если 1 и 3 включены, то ток течет слева направо, а ключи 2 и 4 выключены. Когда кончится период t_1 , (время включения k_1 и k_3) ключи t_1 и t_3 выключились, а включились ключи k_2 и k_4 , тогда ток от регулирующего транзистора через k_2 налево, то есть по обмотке справа налево через ключ 4 и опять на R эталонное. Положительные импульсы текут слева направо, а отрицательные справа налево во время t_2 . Тот же самый постоянный тактовый период τ_{au} , также поддерживается постоянство амплитуды тока. Ток через R эталонное течет сверху вниз. Постоянный ток, постоянное падение напряжения. Это падение напряжения сравнивается с напряжением опорного источника. И с помощью усилителя и регулирующего транзистора поддерживается постоянным. Поэтому когда сопротивление в этой обмотке с температурой изменится, то амплитуда токов останется строго постоянной $K_{дм} \cdot J$ - амплитуда момента, который развивается в датчике. Дальше все как в предыдущем случае. Этим занимаются на предприятии Пилюгина. Разработка относится к 60-м годам. Ошибка в магнитоэлектрическом ДМ в мостовом переключателе и стабилизаторе тока. Рамка ДМ- это обмотка, намотанная на каркасик (катушка). Катушка обладает индуктивностью. Если через эту катушку с помощью переключателей будем включать импульсный ток, то сохранится ли пропорциональность между $J_{ср}$ и разностью времен t_1 и t_2 или индуктивность катушки будет влиять на эту пропорциональность. В электротехнике такие вопросы были исследованы и знают, что если есть такой переключатель тока, который создает ток через нагрузку (нагрузка индуктивная), то средний ток строго сохраняет пропорциональность своего значения разности времен $t_1 - t_2$. Но здесь не совсем обычная система: значит если бы питали ключ от стабилизатора напряжения (от источника через аккумулятор запитывали), то так бы оно и было. А здесь имеется стабилизатор тока. И этот стабилизатор тока вызывает нарушение закона средний ток теряет пропорциональную зависимость от разности времен

t_1-t_2 . Пусть в схеме только индуктивность, отношение t_1 к t_2 называется скважностью импульсов. Ее будем менять. Пусть $t_1=\tau_{au}$ и тогда будет течь постоянный ток через катушку. переменный ток в хвостике, но влияние он не имеет. Фактически катушка будет запитана постоянным током. Если мы имеем здесь постоянный ток, постоянное напряжение на катушке, то индуктивное сопротивление не имеет никакого значения для величины тока. Все определяется только активным сопротивлением катушки. Ток постоянный, потому что индуктивность никакого сопротивления не оказывает. Теперь второй вариант: рассмотрим скважность равную $\frac{1}{2} t_1=t_2$. Это чисто переменный ток, индуктивность будет обладать большим сопротивлением, индуктивное сопротивление будет ограничивать значение тока. Значит в зависимости от скважности импульса, у нас то есть индуктивное сопротивление, то нет. Значит если равная скважность, то большое индуктивное сопротивление. Оно уменьшает значение тока, падение напряжение на эталонном сопротивлении. А если скважность близка к 1, то есть почти постоянный ток, то индуктивное сопротивление равно 0 и ток здесь текущий через эталонное сопротивление возрастает. Если бы стабилизатор тока не вмешивался в работу схемы, то накопленная индуктивная энергия при положительном импульсе и при отрицательном импульсе она бы успевала отдаваться в схему и пропорциональность тока от разности времен t_1 и t_2 не нарушалось бы. Однако в нашей схеме имеется стабилизатор тока. Он не знает о том, что здесь есть индуктивность, он просто видит: скважность изменилась, стал импульс равный $t_1=t_2$ ток через эталонное сопротивление уменьшился из-за индуктивным. Это падение напряжения уменьшилось. Это падение напряжения подано на вход усилителя. Усилитель открыл регулирующий транзистор и скомпенсировал влияние индуктивности. Он восстановил прежнее значение тока. Теперь скважность стала близка к 1. Индуктивное сопротивление тока никакого влияния уже не будет оказывать. Ток увеличился, падение напряжения

увеличилось, стабилизатор тока воспринял это увеличение напряжения как сигнал к тому, что надо призакрыть транзистор и восстановить прежнее значение тока, которое было до изменения скважности. Это вмешательство стабилизатора тока в работу мостового переключателя приводит к тому, что разность времен t_1-t_2 от ускорения уже становится не линейной, как она должна быть, а появляется на краях довольно заметная нелинейность на графике то, что загибается. Доходит до 10%. А у нас точность должна составлять 0,0001%, то есть нужно устранить нелинейность. Надо убрать индуктивность, то есть если бы катушка была чисто активная и индуктивное сопротивление равнялось 0, то нелинейность не появилась бы. Рассмотрим 2 схемы: первая схема, когда замыкается ключ, то возникает переходной процесс: ток в первый момент равен 0, потому что индуктивность имеет большое сопротивление, а потом по мере того, как ток нарастает, индуктивное сопротивление перестает влиять. Переходной процесс закончился и установился постоянный ток: $I=U/r$ и дальше по формуле после первой схемы. Когда $t=0$, то $I=0$, когда t растёт, e в степени становится 0 и остаётся U/r . Теперь 2 схема. Сопротивление и ёмкость. Замыкаем ключ и смотрим, как меняется ток через ёмкость. Когда ёмкость незаряжена, то сразу большой ток, а потом по мере заряда ёмкости ток уменьшается и ток становится равным 0, потому что постоянный ток через ёмкость не течёт. Но во время переходного процесса во время замыкания ключа течёт ток, который равняется $I=U/r$ и дальше по формуле после 2 схемы. В начале момент, когда $t=0$, e в степени равно 1, то есть ток начальный U/r , а по мере нарастания времени e в степени равно 0, $I=0$. А что если объединить обе цепочки, включив параллельно, то есть ключ работает и на индуктивность, и на ёмкость сопротивления r_k . Если выберем постоянную времени $l/r=r_k \cdot c_k$, то $I_1+I_2=U/r$. Во всех цифровых схемах есть $c_k \cdot r_k$, которое служит для устранения нелинейности.



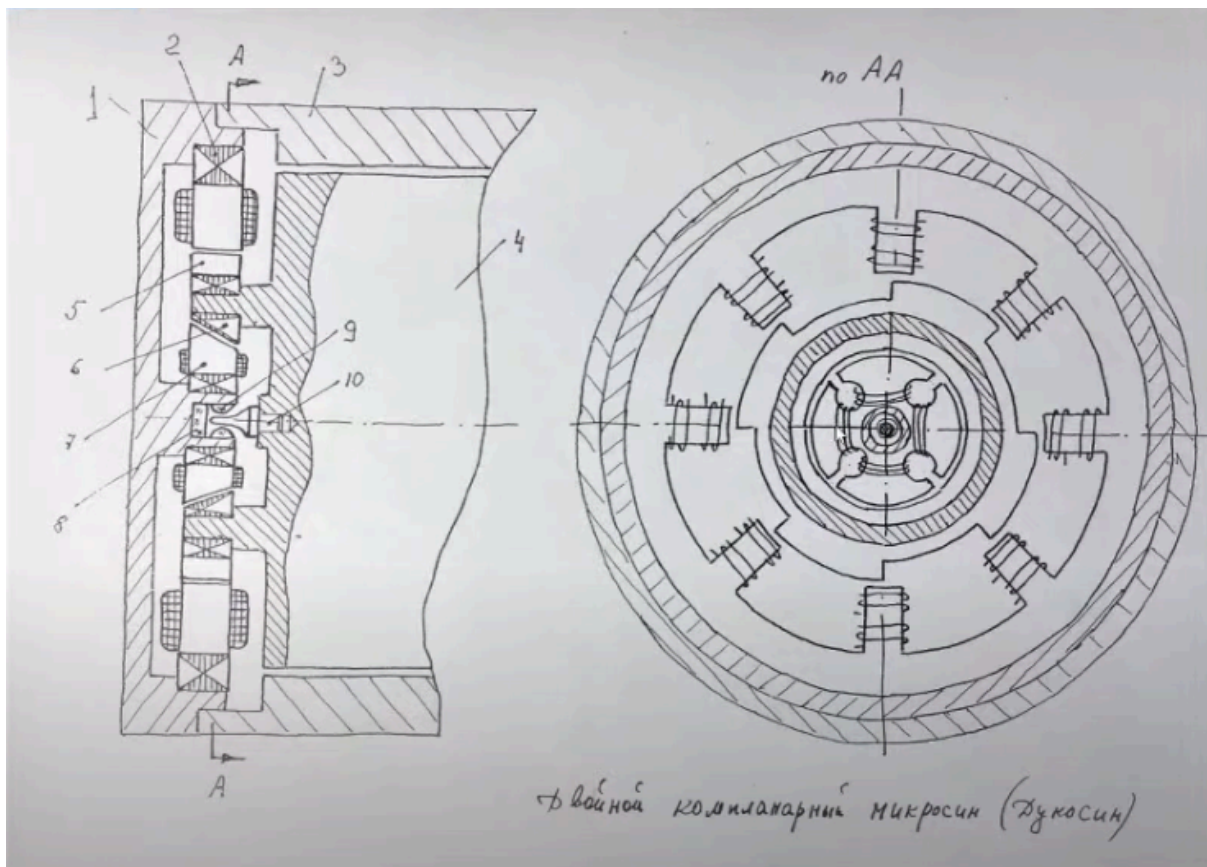
Двойной компланарный микросин (дукосин)

Первые магнитные подвесы в поплавковых приборах были сделаны Дреппером. Магнитные подвесы разрабатывала и наша кафедра. Конструкция: поплавок с нулевой плавучестью с гироскопом внутри. Полуоси вправо и влево. На эти полуоси навешивались последовательно электромагнитные датчики момента. Они имели небольшие наружные диаметры, поскольку требовался небольшой момент от моментного датчика. С правой стороны использовался индукционный датчик угла (индукционные датчики угла имеют магнитную систему такую же, как в электромагнитном датчике момента, по другому только включены обмотки, а конструктивно они не отличаются). Нужны были центрирующие элементы. Использовались магнитные подвесы. Ставился ротор магнитного подвеса, который магнитными силами удерживался в центре магнитопровода статора магнитного

подвеса. Еще как дополнение для того, чтобы ограничить смещение поплавка, чтобы оно не было очень большим, чтобы поплавок не опускался на полюса магнитного подвеса, а лишь на 10-20 микрон уходил от центра, делался еще дополнительный камниевый подшипник, который ограничивал перемещение поплавка. Трения в подшипнике нет, цапфа не касается камня (касалась только при выключенном магнитном подвесе). Когда был включен магнитный подвес поплавок быстро приходил в центральное положение, потому что путь перемещения поплавка был небольшой, так как стояли ограничители.

Конфигурация: длинный корпус, диаметр определялся гиромотором, длинами полуосей, на которые поочередно навешивались элементы. Причем элементы имели небольшой по сравнению с поплавком диаметр. В результате в конфигурации прибора образовывались полости: большой поплавок, маленькие элементы, подвес и ДМ, а в пустотах только жидкость, которая заполняла весь объем прибора. То есть в приборе большой объем жидкости с двух сторон. Жидкость меняет свой объем с температурой. У нее большой коэффициент объемного расширения, поэтому чтобы жидкость не разорвала герметичный корпус прибора приходится делать большой сильфон, который является компенсатором изменения объема жидкости. То есть когда нагревался прибор, то сильфон удлиняется и лишняя жидкость уходит в сильфон. Получается здоровый сильфон, поскольку много жидкости надо убрать. Но большой сильфон никому не нужен. Поэтому в первых образцах использовались специальные вытеснители лишней жидкости. Они имели хитрую конструкцию, сложные детали. Чем меньше жидкости в приборе, тем лучше прибор. Создатели поплавковых приборов в США пришли к мысли: а нельзя ли улучшить конструкцию прибора, не испортив его. Они пришли к выводу, что не надо последовательно размещать элементы прибора ДМ, подвес и камниевую опору. А лучше совместить эти элементы в одну плоскость, расположив рядом с поплавком, то есть расположить компланарно друг в друге элементы прибора. Получилась такая конфигурация: поплавок остался, а элементы были размещены друг в друге (в центр поместили камниевую опору, ограничитель, на поплавке сделаны кольцевые выступы справа и слева. В эти выступы были всунуты внутрь ротор магнитного подвеса, а снаружи ротор электромагнитного ДМ. Дальше между камниевой опорой и ротором поместили статор магнитного подвеса, только он обращенного типа (снаружи ротор, внутри статор), но для магнитного подвеса это безразлично: может так и так работать. А электромагнитный ДМ он такой же, как и был раньше, только теперь его диаметр равен диаметру поплавка, поэтому расстояние от одного полюса до второго полюса стало

гигантским и стало большим пустое место. Рационально использовать дополнительные полюса, размещать доп. обмотки и улучшать характеристики ДМ. Его момент при этом вырастет. Поэтому используют не четырехполюсные ДМ, а восьмиполюсные (тоже по схеме микросина построены, то есть на каждом полюсе по обмотке возбуждения и по обмотке управления) или шестнадцатиполюсный ДМ, который тоже построен по схеме микросин, у которого полюса идут NNSS..., более рационально исполуется место. В результате, поскольку все оси вместились в одну плоскость и имеют диаметр, равный поплавку, то корпус получается коротким. Нет пазух 4, которые раньше заполнялись жидкостью. Мало жидкости и короткий сильфон. Такие конструкции описаны в книге Дреппера.



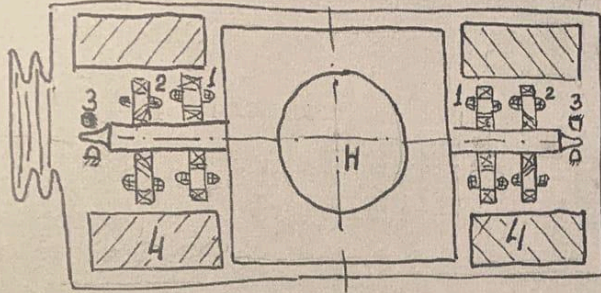
Двойной компланарный микросин (дукосин):

4-поплавок, кольцевой выступ, на внутреннюю часть одет конический ротор магнитного подвеса для того, чтобы была не только осевая центрирующая сила, но и радиальная. 5- ротор электромагнитного ДМ. 2-статор, шифтованный, управление по переменному току, чтобы не было токов Фуко. 7-статор магнитного подвеса. В центре поплавок цапфа-10. Каменная втулка-9, подпятник-8 закреплены в крышке. Весь прибор представляет собой 3 узла: первый узел - поплавок с расположенным внутри гироскопом с навешанными ротором ДМ, ротором магнитного подвеса, причем выступы поверхности идеально соответствуют друг другу (одинаково коаксиальные). Второй узел - крышка прибора-1, на посадочной поверхности крышки (поверхность под ДМ, поверхность под магнитный подвес и поверхности под камниевую опору - они обрабатываются за один установ крышки в патроне токарного станка - поверхности идеально коаксиальные. Третий узел - корпус. Для того, чтобы собрать надо засунуть в корпус поплавок и закрыть прибор двумя крышками. Мечта гироскопистов: обеспечить автоматическую сборку без участия человека, потому что человек является главным источником грязи в поплавковых приборах. В США делали такой дукозин, а в России схема дукозин делалась с использованием электромагнитного датчика, построенного по схеме "Близнеца".

4) Электростатические датчики силы, двухфазный индукционный двигатель, шарикоподшипниковые опоры (Голубев)

Двойной Компланарный Микросин (Дукосин)

Идея применения в поплавковых приборах:



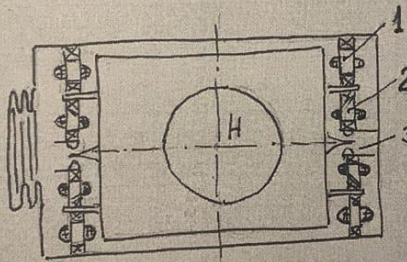
Недостатки

- Большая длина прибора
- Наличие больших полостей. Для уменьшения объема жидкости приходится использовать вытеснители 4.

- Последовательное расположение элементов.
- Левая сторона
- Электромагнитный датчик момента (1)
 - Магнитный подвес (2)
 - Камневая опора - ограничитель перемещений поплавок (3)
- Правая сторона
- индукционный датчик угла (1) (магнитопровод такой же, как у электромагнитного датчика момента, но другое подмагнивающее обмоток)
 - Магнитный подвес (2)
 - Камневая опора - ограничитель перемещений поплавок.

Параллельное Компланарное расположение элементов

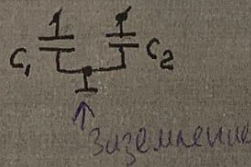
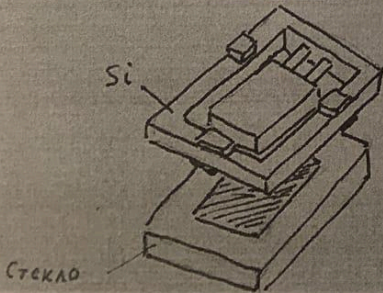
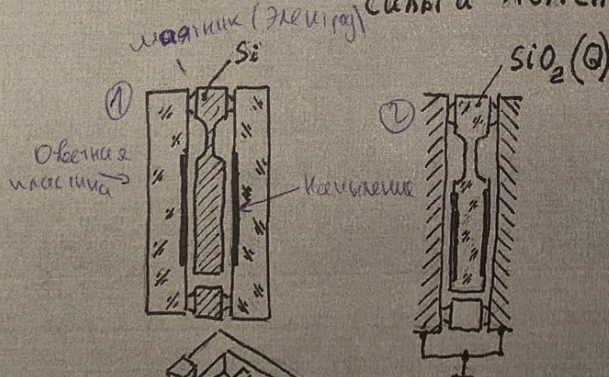
Вместо 6 полюсов используют 12 полюсный датчик



Большой диаметр
Большое расстояние между полюсами

Микросин делают с 8 и 16 полюсами

Конденсаторные (емкостные) датчики силы и момента. (МЭМС приборы)



Гребенчатый датчик силы
($h \sim 20 \mu\text{м}$
Зазоры $\sim 0,5 \mu\text{м}$)
Общее число зубцов до сотни.

плавниковая часть (электрод)

h (15-50 мкм)

Камнище

Принцип работы электростатического датчика

Имеется подвижный электрод, имеются неподвижные электроды. Два варианта маятника на картинке. Могут быть разные схемы включения:

- 1) Либо проводящий подвижный узел выполнен из кремния - электропроводящий материал. По выступам рамки маятник зажат между двумя ответными пластинами из диэлектрика с металлическим напылением (алюминий, золото, медь). Кремний - эл проводник, поэтому его заземляют. У нас образуются две емкости. Между заземленным подвижным электродом и левой (и правой) обкладкой.
- 2) Подвижный узел выполнен из диэлектрика (например SiO_2). Ответные пластины выполнены из металла. Между ними по пластикам зажат маятник. На пов-ть маятника напылено два электрода. Образуются две емкости - между заземленным металлическим корпусом и левым (правым) электродом. В данном случае на маятник напыляются токоподводы к емкостям.

Подавая напряжение на правую или левую обкладку появившегося конденсатора, мы создаем электростатическую силу, которая притягивает подвижный узел прибора к неподвижному электроду. Проблема этих датчиков заключается в малости электростатических сил, поэтому подвижный узел делается очень легким. Поэтому, к слову, инерционные силы также очень малы. Электростатические датчики силы или момента очень часто используются для возбуждения колебаний в вибрационных гироскопах. Также есть целый ряд МЭМС приборов, где вызываются поступательные или колебательные движения

Гребенчатый датчик силы

Имеет две части(электрода). Одна подвижная, другая - нет. Подвижный электрод заземлен. Неподвижный электрод выполнен в виде гребенки. При подаче туда переменного напряжения, возникает «пульсирующая» сила, втягивающая палец подвижной гребенки в зазоры между пальцами неподвижной гребенки. Особенностью этих датчиков являются очень маленькие зазоры. Чем они меньше, тем выше электростатическая сила.

Формирование силы путем поддержания на электроде управляющего напряжения U

Закон сохранения энергии

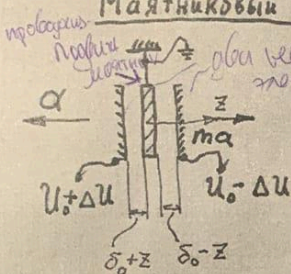
$$F_{эс} \cdot dz + dA_{\text{подзаряда}} = dW_{эс}; \quad dW_{эс} = d \frac{U^2 C}{2}; \quad dA_{\text{подзаряда}} = U^2 dC.$$

$dA_{\text{подзаряда}}$ Изменяющиеся емкости без подзаряда приводят к изменению U .
 При $U = \text{const}$ необходимо потребление тока из цепи питания

$$F_{эс} \cdot dz + U^2 dC = \frac{U^2 dC}{2}; \quad F_{эс} = -\frac{U^2 dC}{2 dz}; \quad C = \epsilon \frac{S}{\delta_0 - z}$$

- $F_{эс} = \frac{1}{2} \epsilon S \frac{U^2}{(\delta_0 - z)^2} \rightarrow$ Недостатки: 1) $F_{эс}$ нелинейно зависит от управляющего напряжения
 2) $F_{эс}$ изменяется при изменении зазора

Маятниковый акселерометр



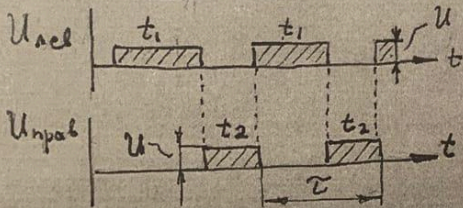
$$F_{\text{лев}} = \epsilon S \frac{(U_0 + \Delta U)^2}{2(\delta_0 + z)^2}; \quad F_{\text{прав}} = \epsilon S \frac{(U_0 - \Delta U)^2}{2(\delta_0 - z)^2}$$

$$F_z = F_{\text{прав}} - F_{\text{лев}} = \frac{\epsilon S}{2} \left[\frac{U_0^2 - 2U_0 \Delta U + \Delta U^2}{(\delta_0 - z)^2} - \frac{U_0^2 + 2U_0 \Delta U + \Delta U^2}{(\delta_0 + z)^2} \right]$$

Для устранения зависимости F_z от z систему обратной связи делают астатической. ($z=0$). Тогда

$$F_z = -2\epsilon S U_0 \Delta U \quad - \text{линейная зависимость!} \quad m a = 2\epsilon S U_0 \Delta U \quad \Delta U = \frac{m}{2\epsilon S U_0} a$$

Маятниковый акселерометр с импульсным управлением.



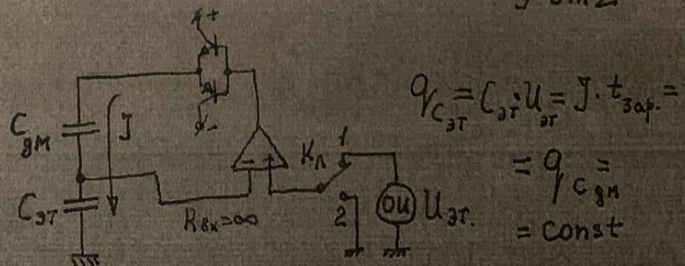
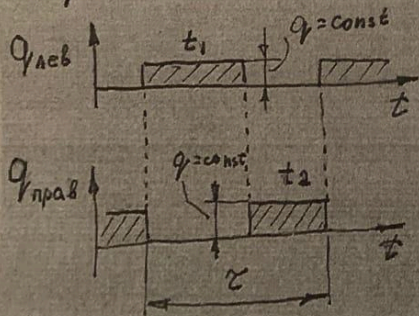
$$F_{\text{ср}} = \frac{\epsilon S U^2}{2 \tau} \left[\frac{t_1}{(\delta_0 + z)^2} - \frac{t_2}{(\delta_0 - z)^2} \right]$$

$$\tau = t_1 + t_2 = \text{const.}$$

Зависимость $F_{\text{ср}}$ от z создает погрешность.

Схема со стабилизацией заряда.

$$q = C U = \text{const}; \quad U = \frac{q}{C} = q \frac{\delta_0 + z}{\epsilon S}; \quad W_{эс} = \frac{q^2 (\delta_0 + z)}{2 \epsilon S}; \quad F_{эс} = \frac{q^2}{2 \epsilon S} \quad - \text{нет зависимости!}$$



$$q_{\text{ст}} = C_{\text{ст}} U_{\text{ст}} = J \cdot t_{\text{зар}} = q = C_{\text{ст}} U_{\text{ст}} = \text{const}$$

$$F_{\text{ср}} = \frac{q^2}{2 \epsilon S} \cdot \frac{t_1 - t_2}{\tau} = m a; \quad |t_1 - t_2| = 2 \epsilon S \frac{m \tau}{q} a$$

Формирование силы путем поддержания на электроде управляющего напряжения (График слева в углу)

Нужно определить силу. Есть зазор, перемещение, напряжение на подвижном электроде
Исходим из закона сохранения энергии.

Механическая работа которая совершается при перемещении подвижного электрода равна изменению запасенной энергии электростатического поля конденсатора.

При перемещении электрода меняет и емкость. Изменение емкости приводит к изменению напряжения. Но мы исходим из того, что наше управляющее напряжение $U = \text{const}$. Мы хотим найти силу для $U = \text{const}$. Если напряжение на электроде константа независимо от перемещения, то из сети потребляется некоторый ток на подзаряд конденсатора, то есть электроды. Из-за этого появляется «элементарная работа подзаряда». Она тоже учитывается в уравнении. Далее идут выражения и преобразования на листке.

Есть недостатки:

Сила зависит от квадратичного напряжения, следовательно характеристика нелинейная. В датчиках мы стремимся к линейности, так как в таком случае меньше ошибок. В знаменателе у нас Z (перемещение электрода). Сила зависит от положения подвижного электрода относительно неподвижного. Из-за этого, например в акселерометрах, крутизна меняется. Следовательно меняется и коэффициент передачи, и масштабный коэффициент. Таким образом нарушается требование к постоянности этих коэффициентов. В гироскопии такие недостатки стараются убирать.

Аналоговые приборы (с аналоговым выходом)

Маятниковый акселерометр

На картинке показан МА сделанный из подвижного маятника (он заземлен), проводящего электричество, и из двух неподвижных электродов. На левый подается $U_0 + \Delta U$, а на правый $U_0 - \Delta U$. U_0 должно быть постоянным. Сделать можно такое с помощью рп-транзистора, на базу которого подается от внешнего стабильного источника напряжение U_0 через сопротивление, а с выхода основного усилителя подается управляющее напряжение, которое мы будем обозначать ΔU . Эти напряжения складываются. Далее выражения для сил правой и левой стороны датчика. Далее по листку. Устраняем зависимость суммарной силы от z . Для этого обеспечивают для всех измеряемых ускорений a неподвижное положение подвижного электрода относительно ответных электродов.

Как работает:

Появилось ускорение a , появилась инерционная сила ma , маятник начинает смещаться вправо, имеется какой-то датчик угла, который формирует сигнал, пропорциональный отклонению датчика. Этот сигнал поступает на усилитель, усилитель формирует ΔU ,

которые и помогают удерживать маятник от дальнейшего отклонения. Это все называется статической схемой обратной связи.

Систему надо сделать астатической. Если в эту схему включить интегратор, то управляющее напряжение снимаемое с ДУ будет накапливаться на интеграторе, выход интегратора создаст управляющее напряжение ΔU , причем интеграл будет расти, как и напряжение, а сам маятник вернуться в нулевое положение. Это астатическая система и в ней нет статической ошибки. В астатической системе при постоянном ускорении $a \neq 0$. Если a неравно нулю, то это условие не выполняется. Далее выражения для суммарной силы и ΔU . В выражении для суммарной силы в знаменателе должно быть ΔU нулевое в квадрате. Получаем итоговую линейную зависимость. Такую схему используют в точных МЭМС

Маятниковый акселерометр с импульсным управлением

Вся суть в управлении временем подачи тока. На время t_1 запитаем левый электрод, а на t_2 запитаем правый электрод. Общий период работы схемы $T_{\text{au}} = t_1 + t_2 = \text{константа}$ (она еще оч мала, чтобы колебания были маленькими). К слову, система, где меняется длительность импульсов называется схемой с широтно-импульсной модуляцией. Далее смотрим выражения. Опять есть зависимость средней силы от Z .

Применяем схему со стабилизацией заряда.

Далее смотрим выражения на листке.

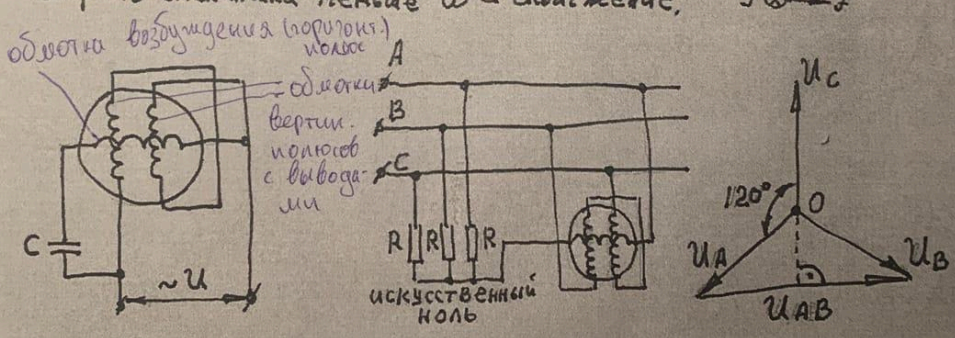
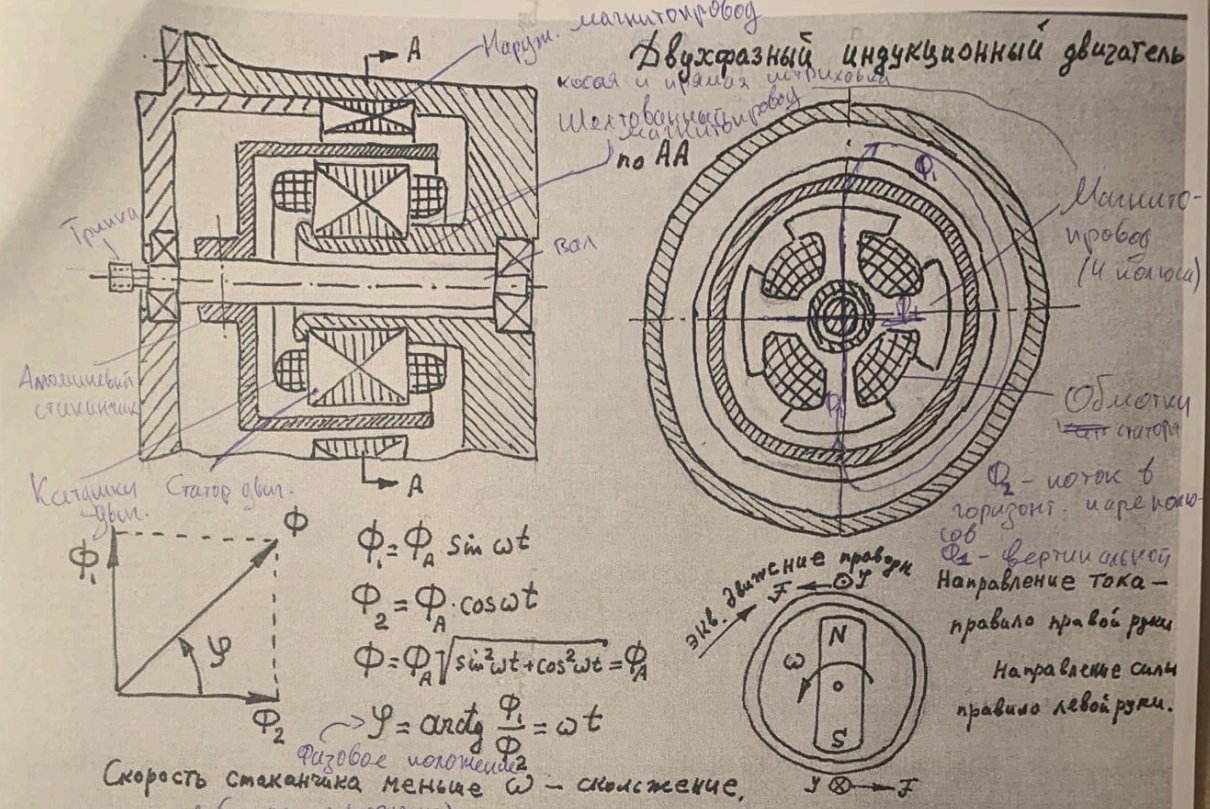
В данной схеме нет подзаряда конденсатора. Мы получаем силу, указанную в выражении на листке, получается, что в ней нет зависимости от Z . Это из-за того, что берется производная от (ΔU нулевой плюс Z). Z дает единичку, а ΔU дает 0.

Подаем напряжение на левую, потом правую сторону, получаем силу среднюю внизу. Далее силу приравниваем к $m \cdot a$ и получаем выражение для разности времен, пропорциональной ускорению. Получается цифровой акселерометр. Но для условия $q = \text{const}$ требуется специально стабилизатора.

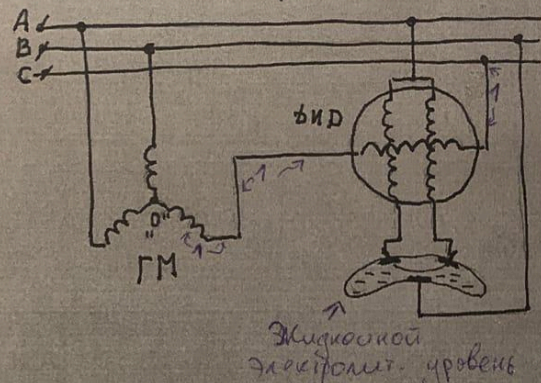
На листке нарисована схема для такого стабилизатора. Имеется двоярный эмитерный повторитель (np и pn транзистор), включенный в цепь \pm , из этой цепи имеется цепь, в которую включен датчика момента, как раз тот самый конденсатор на первом рисунке (контакт двух электродов), последовательно с ним включен высокостабильный эталонный конденсатор. Также имеется усилитель связанный через ключ с опорный источник, либо с «землей». В начале ключ включен на землю, тогда система должна поддерживать напряжение на $C_{\text{эт}} = 0$. Подается минус и схема с транзисторами разряжает конденсаторы. В начале тактового периода, ключ перебрасывается в положение 1 на короткое время, происходит заряд конденсатора $C_{\text{эт}}$ током I . Этот заряд создает $U_{\text{эт}}$. Тогда q на $C_{\text{эт}}$ равна выражению на фотке. Так как ток I протекает через оба конденсатора, то и заряд $Q_{\text{дм}}$ будет равен заряду $C_{\text{эт}}$. Величина емкости ДМ оч маленькая, поэтому $C_{\text{эт}}$ быстро заряжается. Далее на всем t_1 заряд поддерживается неизменным. Когда импульс кончился,

ключ перебрасывается в положение 2 и стабилизатор заряда переводит Сэт в разряженной состоянии и Сдм тоже. В этой схеме входное R усилителя должно быть бесконечно большим. Данную схему тяжело отлучать в МЭМС.

Двухфазный индукционный двигатель



Электрическая схема гирвертикали



1. Малое время готовности (малый Н и большой ток в обмотке возбуждения - пусковой ток ГМ)
2. В полете - малая скорость, коррекция, малые баллистические и виражные погрешности. (большой Н, малый ток в обмотке возбуждения - рабочий ток ГМ)

Плоские индукционные двигатели. $\frac{D}{R} \sim 10$; Без корпуса.

Двухфазный индукционный двигатель

Шехтованный магнитопровод - магнитопровод набранный из пластин электротехнической стали (пермалоя)

Обмотки статора запитываются переменным током, создается магнитный поток. Обе эти обмотки запитываются от двух источников напряжения, сдвинутых относительно друг друга на 90 градусов (как раз двухфазный). Он требует и двухфазного питания, которое нужно специально получать. Вертикальные катушки питаются синусным напряжением, а горизонтальные (+90 градусов). Φ_1 и Φ_2 соответственно. Суммарный поток равен амплитудному значению потоков 1 и 2. Вектор Φ - фазовое положение. Он вращается с указанной на листе скоростью ω против часовой стрелки.

Принцип действия такого двигателя

Мы имеем магнитный поток Φ , вращающийся со скоростью ω . На лекциях мы его "заменяли" постоянным магнитом (рисунок с магнитом), вращающемся с ω . При вращении магнитное поле пересекает участки проводника-стаканчика. В этом проводнике будет наводиться ток. Определяем по правилу правой руки. (далее слово в слово - не удивляйтесь) Силовые линии входят в ладонь. Мы ставим ладонь над северным полюсом, ладонью вниз. Движение проводника относительно магнитного поля всегда связано с большим пальцем, а вытянутые пальцы указывают направление тока. У нас есть движение магнитного поля относительно проводника против часовой стрелки, следовательно движение проводника будет наоборот. Для данного случая: длинные пальцы на себя, большой палец вправо. Ток направлен на нас. В нижней части стакана ток будет от нас. Теперь появляется ток в стакане, следовательно возникает сила взаимодействия этого тока с вращающимся магнитным полем. Направление силы определяем с помощью правила левой руки.

Эта сила закручивает стаканчик, следовательно и ротор, в ту же сторону, куда вращается магнитное поле. Можно вместо правил рук

воспользоваться правилом Лоренца. При внесении проводника в магнитное поле он выталкивается. Магнит вращается против часовой стрелки и выталкивает стаканчик в направлении вращения. Но при таком объяснении теряется физика. Ведь сначала магнитное поле создает ток в стаканчике, а потом уже этот ток создает силу взаимодействия с полем. По правилу Лоренца непонятно до какой скорости будет раскручиваться ротор. Если мы будем крутить поле с той же скоростью, что и ротор, то пропадет наведенный ток I , следовательно пропадет и сила взаимодействия. То есть в асинхронном (двухфазный индукционный двигатель - разновидность асинхронного) двигателе ротор не может вращаться со скоростью вращения поля.

Имеется скольжение ротора относительно вращения поля.

Такие двигатели малогабаритные, легкие. Ротор тоже легкий, имеющий малый момент инерции. В России эти двигатели называются ДИД. Двухфазный Индукционный Двигатель.

Недостаток состоит в том, что нужно сформировать двухфазное напряжение. Смотрим электр. схему. Есть обмотка горизонтальной пары полюсов (обмотка возбуждения), и есть обмотки вертикальных пар полюсов. Они имеют выводы, чтобы можно было включать двигатель либо в режиме суммирования двух моментов (формируемые правой и левой катушками), либо в режиме вычитания моментов (зависит от того, как все включено). В нашем случае конец первой обмотки соединен с началом второй и подсоединен к источнику переменного напряжения. Это схема суммирования. Ток в обмотке возбуждения должен получиться сдвинутым на 90 градусов относительно тока в двух других обмотках. Это мы обеспечиваем установкой емкости C в цепь питания обмотки. У нас есть емкость и индуктивное сопротивление, это дает последовательный резонансный контур. У этого резонансного контура фазовый сдвиг тока на резонансе отстает на 90 градусов от фазового сдвига питающего напряжения. Получили что надо.

Этот метод не очень хороший. Лучше трехфазное напряжение.

Смотрим рисунок справа от эл. схемы, где есть A , B , C и векторную диаграмму, оба рисунка над схемой гировертикали.

Идея трехфазного напряжения:

Есть три вектора, сдвинутые на 120 градусов друг от друга

U_c - фазное напряжение

U_a - фазное напряжение

U_b - фазное напряжение

U_{ab} - межфазное напряжение. Оно перпендикулярно фазному. Т.е. фазовый сдвиг - 90 градусов.

Если мы возьмем нулевую точку в трехфазной цепи и возьмем межфазное напряжение, то запитавши фазным напряжением одну обмотку, а межфазным другую, то мы получим как раз то напряжение, которое нужно для работы двухфазного индукционного двигателя. Но в бортовой сети все источники питания делают без нулевого провода. Тогда возникает идея. Нужно сделать нулевую точку из трехфазного напряжения. Она одинаково отстоит от каждого из фазных напряжений.

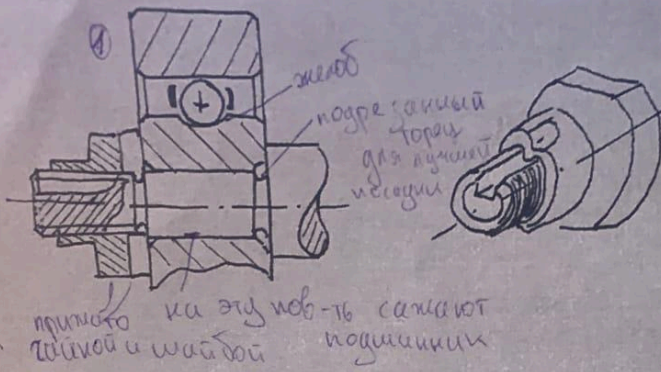
Рисунок, где есть A , B , C и три сопротивления R :

Если мы возьмем каждую из фаз, включу одинаковые сопротивления R , то общая точка будет нулевой по отношению к каждой из фаз. Если я в этом случае обмотки управления включу на межфазное напряжение (на рисунке это U_{bc}), обмотку возбуждения на фазное напряжение (на рисунке это A), то мы тоже получаем из трехфазного напряжения двухфазное. Сопротивления R должны быть достаточно мелкими, чтобы потенциал нулевой точки удерживался нулевым с появлением нагрузки от обмоток. Эти резисторы тратят лишнюю мощность. Данная схема иллюстрирует идею того, что если есть симметричная нагрузка в приборе, то центр этой симметричной нагрузки будет нулевой точкой. У нас в приборе имеется симметричная нагрузка (рисунок электрической гировертикали). Это трехфазная обмотка гиromотора. Центральная точка там имеет потенциал 0 .

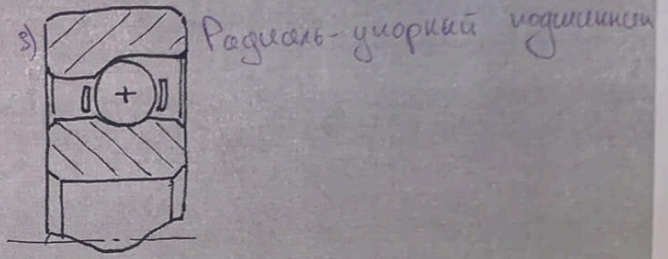
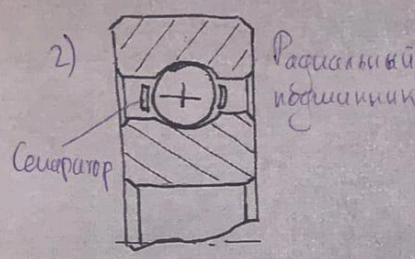
Схема включения такой гировертикали:

В одну из обмоток гиросмотора включили последовательно обмотку возбуждения двигателя и подсоединили к фазе С (пометка 1). Обмотки управления включили встречно, подсоединили к фазе А, поставили жидкостной электролитический уровень. Это капсула с электролитом и двумя электродами сверху, одним электродом снизу посередине. Жидкость проводит электричество, но она не полностью заполняет капсулу. Размер пузырька воздуха выбран так, чтобы в горизонтальном положении пузырек одинаково перекрывал по половине верхних электродов. Тогда в этом положении сопротивление столба жидкости между верхним электродом и нижним электродом слева будет равно сопротивлению столба жидкости между правым электродом и нижним электродом справа. Если подаем напряжение в эту цепь и уровень будет находиться в горизонтальном положении, ток в правой и левой обмотке будет одинаковый. Следовательно и моменты от правой и левой обмотки будут равны и друг друга компенсируют. Если гиросмотор отклонена от горизонтального положения, то один пузырек переходит правее или левее, появляется разность сопротивлений, ток в одной из обмоток становится больше, следовательно появляется момент коррекции. Вообще таких систем коррекции две, но нам нужна одна для примера. Поскольку мы включили обмотки управления между фазой А и В, а обмотку возбуждения включили на фазное напряжение С, то фазовый сдвиг равен 90 градусов и обеспечивается условие двухфазного питания.

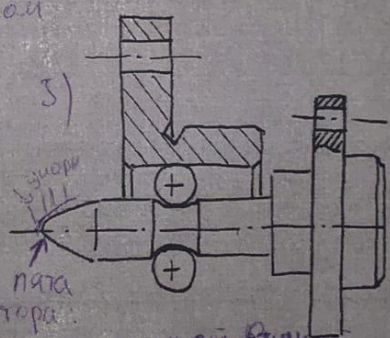
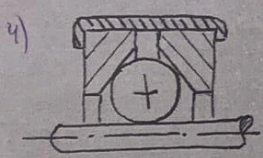
Шарикоподшипниковые опоры



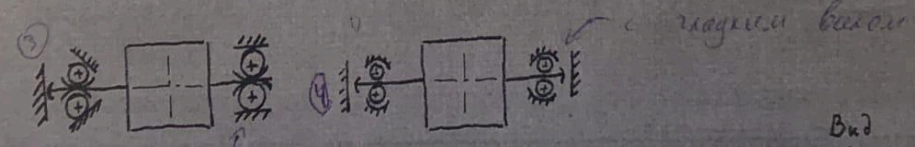
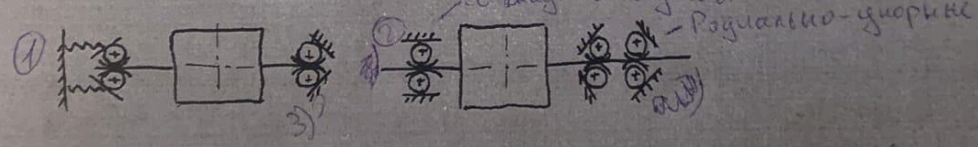
- 1) Доступность (Пошел - класс)
- 2) Малый МТР
- 3) Не нужно электричество
- 4) Цена (Копеечный сигнал, что цены могут быть этого)



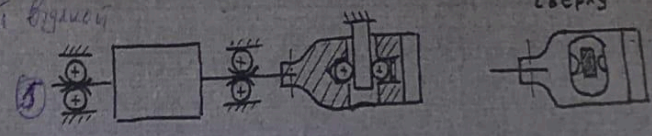
Подшипник с гладким валом



Схемы подвеса проволоки



с гладкой втулкой



Шарикоподшипниковые опоры

Рассматриваем 1 подшипник (Подшипник с гладкой втулкой)

Внутреннее кольцо имеет желобок для шарика, а внешнее - нет. Там гладкая втулка. Наружнее кольцо, таким образом, можно размещать как угодно относительно внутреннего. Такой подшипник дает радиальное центрирование, аксиального нет.

2 подшипник - радиальный. Его не относят к прецизионным. У него два желоба, которые обеспечивают радиальное и аксиальное центрирование. Шарик удерживаются сепаратором.

3 подшипник - радиально-упорный. В нем может осевая нагрузка в два раза превышать радиальную (в радиальном - в 1.25). Там симметричный желоб справа, а слева - нет. Обеспечивает радиальное центрирование, аксиальное обеспечивает только в одном направлении.

4 - подшипник с гладким валом. Его ось центрируется только в радиальном направлении.

Наименьшим моментом трения обладают подшипники с гладким валом и с гладкой втулкой

5 - специальный подшипник с гладкой втулкой. Наружное кольцо в нем сделано с фланцем. Если вы будете сажать обычное кольцо, то в месте посадки можно чуть перекосить кольцо из-за низких допусков, к примеру. Ось будет чуть перекошена относительно вала и точка контакта будет перемещаться по эллипсу, а не по окружности. А в специальном подшипнике прижим идет по фланцу, таким образом обеспечивается соосность. Внутренняя ось делается с фланцем по той же причине. В этом подшипнике нет внутреннего кольца. Это хорошо тем, что получается меньший $M_{тр}$, так как радиус вала меньше, чем радиус вала и кольца в обычном подшипнике. Этот подшипник, в отличие от простого подшипника с гладкой втулкой, обеспечивает и аксиальное, благодаря упорам и пяте на валу.

Далее идут схемы подвеса гиromотора

1 схема - два радиальных упорных подшипника. В такой схеме нельзя получить условие нелюфта ненатягом.

2 схема - с двумя радиально-упорными подшипниками и подшипником гладкой втулкой. Такая схема используется на высокоманевренных объектах, где направление возмущающей инерционной силы часто меняется. Но три подшипника имеют больший $M_{тр}$, чем два. Зато обе полуоси свободны, можно на них вешать разные приборы, вроде ДУ.

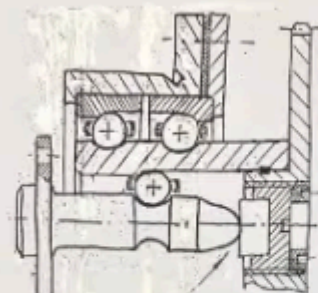
3 схема - радиально-упорный подшипник с подпятником, подшипник с гладкой втулкой. Часто используется в том случае, когда имеется однонаправленная нагрузка. У него маленький $M_{тр}$, потому что меньше площади контакта. Свободна только одна полуось.

4 схема - два подшипника с гладкой втулкой и два подпятника. В этой схеме между пятой и подпятником есть зазор. Такая схема используется для приборов с жидкостным заполнением. Применяется в достаточно грубых приборах.

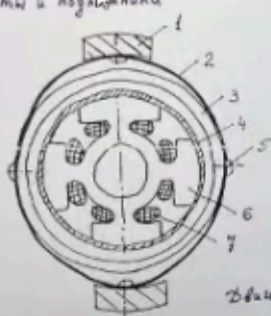
5 схема - два подшипника с гладкой втулкой и с двумя подпятниками. Обеспечивает минимальный момент трения. Подшипники обеспечивают радиальное центрирование. Для осевого (аксиального) центрирования используется специальная деталь. У нее есть отверстие, куда вложен шарик. Также имеется овальная проточка, куда засунут гладкими поверхностями сухарь. Он закреплен в корпусе. С другой стороны во втулку вложен шарик, прижатый выступом крышки. Таким образом, два шарика прижаты к двум сторонам сухаря, которые относительно корпуса не двигаются. Получается две пяты (шарики) и два подпятника (сухарь). Недостаток - размер одной из полуосей, нужный для детали.

5) Трёхколесные шарикоподшипники "Роторейс" (Павлов)

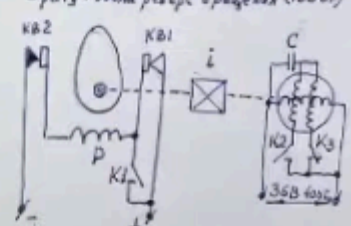
3^x колесные шариковые подшипники
 А.С. Павлов, А/С от 1941г.



Срок службы превышает износ вала и подшипника

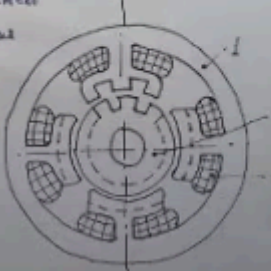


Двигатель с контактами ротора



$\Omega_A = \Omega_{\text{ш}} > \Omega_{\text{вращ}}.$
 Одинаковые в одинакой нагрузке по диаметру - Момент равен нулю. Независимо от $\Omega_{\text{вращ}}$ переоси.
 Реально из-за разности подшипников и их износа $M_2 = M_1 - M_{\text{тр}} = 0$, для 2 Мтр $S_{\text{тр}} \rightarrow$ Мела реверс вращения (1956г)

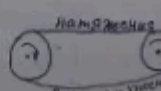
Шестой движатель
 Скорость нет
 Вал не нужен (два зубца)



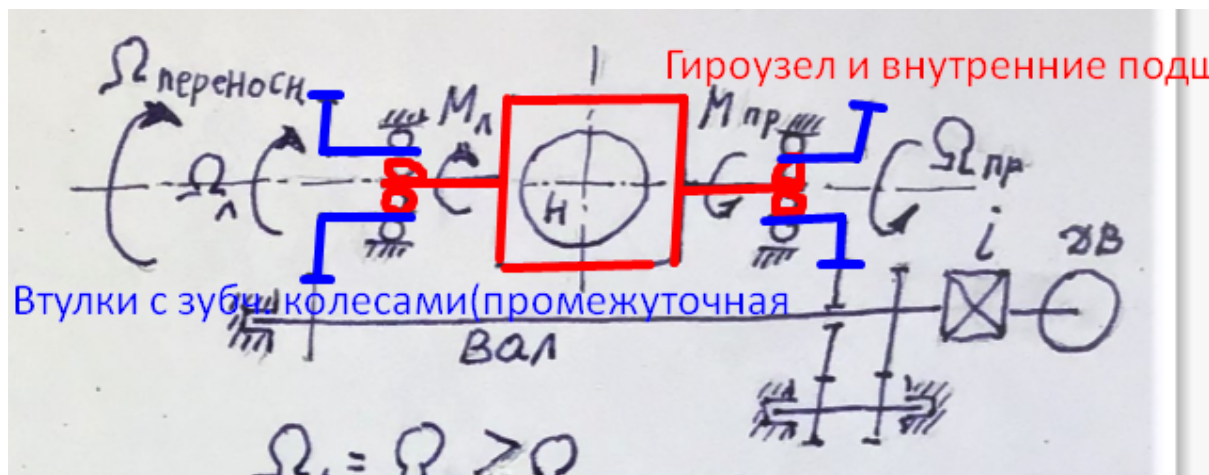
Пусть толк контакта 34
 период вращения контактного ротора $T_{\text{р}}$
 Он меньше радиуса окружности $2r_2$
 За короткий промежуток тогда контакты во время по полному обороту по расстоянию $\pi(r_2 - r_1)$, следовательно 40.
 Нужно колесо по диаметру $2r_2$
 где $\beta = \frac{2r_2(r_2 - r_1)}{r_2}$

Коэффициент нагрузки $i = \frac{2r_2}{\beta} = \frac{2r_2}{2r_2 - r_1}$

Можно быть соединены
 Используют один движатель и вал.



Трехколечный шарикоподшипники придумал Д.С. Пельпор как только окончил Бомонку в 41м. Суть следующая: мы вставляем в один шарикоподшипник второй шарикоподшипник (чтоб ты мог вращаться на подшипнике, пока вращаешься на подшипнике).



На валах гироузла находятся малые внутренние подшипники, которые через промежуточные втулки с зубчатыми колесами крепятся на внутренние кольца внешних (больших) подшипников.

Промежуточные кольца (втулки) можно вращать от двигателя через редуктор. Так левому подшипнику задаем вращение со скоростью $\Omega_{МЕГА л}$, из-за этого имеем момент уводящий $M_{л}$ (стремится утянуть вал вслед за подшипником). Правому задаем такую же скорость, но в другую сторону $\Omega_{МЕГА п}$, приводит к появлению $M_{п}$, опять же в противоположную скорость.

Если правый и левый подшипник одинаковы и равнонагружены то $M_{п}$ уравнивает $M_{л}$ и на гироузел **НЕ ДЕЙСТВУЕТ ТРЕНИЕ (ЧТО КОНЕЧНО ОХУЕННО)**

Кроме того трение не зависит от угловой скорости основания, или переносной скорости, так что для нас все ОК

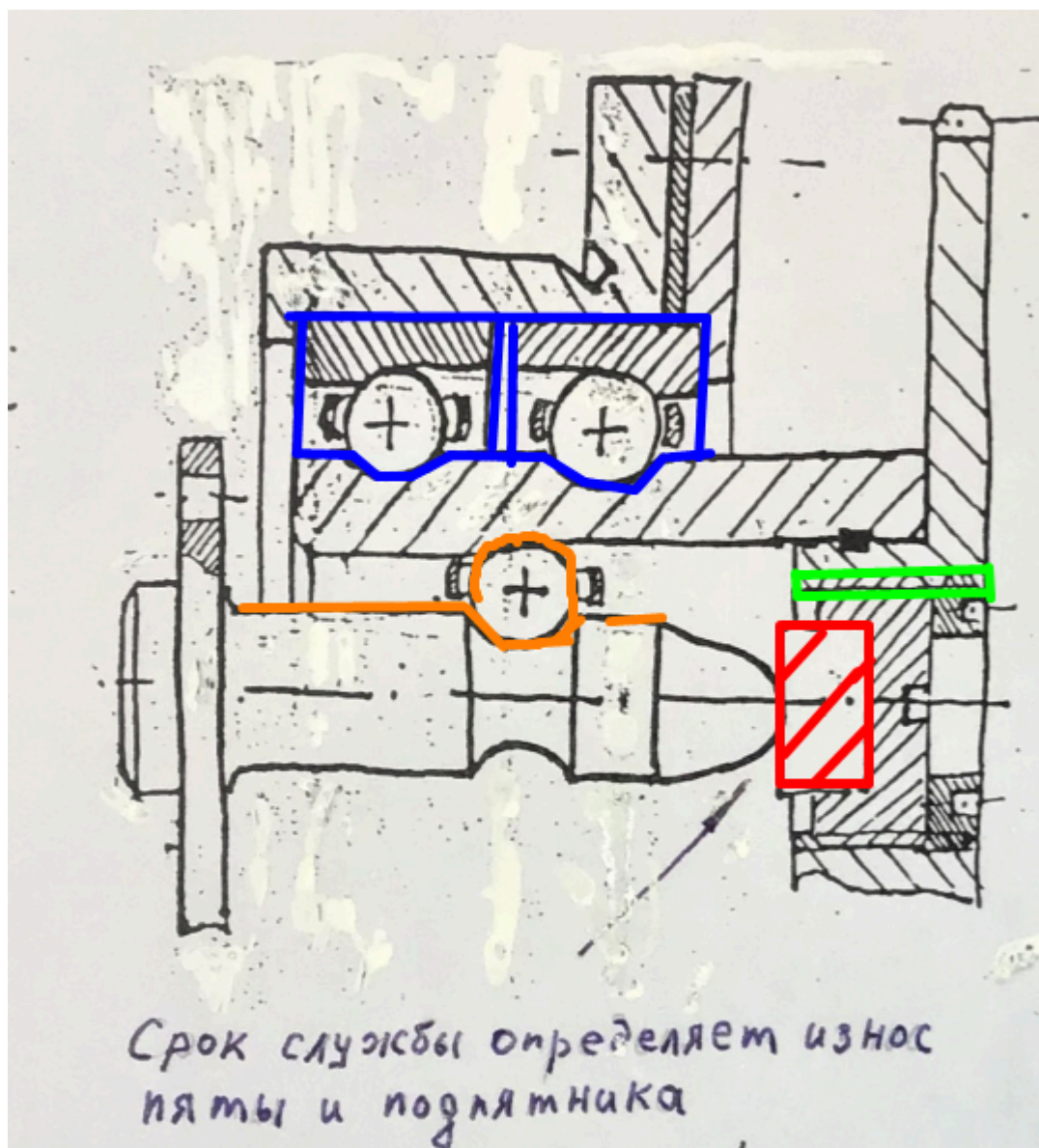
ВАЖНО! Это конечно идеальный случай (сферического коня в вакууме).

На самом деле нет двух одинаковых подшипников, так же трение чутка разное, небаланс и тд...

В реальной жизни: т.к. моменты $M_{п}$ и $M_{л}$ не равны, то на гироузел будет действовать некоторый момент $M_1 = M_{л} - M_{п}$ (разностный момент),

который тем не менее в 5-10 раз меньше удвоенного момента трения (т.к. две опоры). Эффект существенный!

Но момент все еще весьма большой, что приводит к появлению и гироскопа дрейфа порядка 5-10 град/час. Это естественно фиаско, братан.



Устройство одного из 3хколчных шп. Данный (правый) является радиально упорным. Другой должен быть с гладкой втулкой.

Основные элты: **Вал и внутренний подшипник**. Вал упирается пятой в **ПОДПЯТНИК**. Подпятник должен быть очень твердым, т.к. постоянно испытывает трение скольжения, его разрушение выведет всю систему

из строя. Положение подпятника регулируется с помощью **резьбы** что позволяет отрегулировать положение внутреннего подшипника (должен упираться в жолоб).

Пара внешних радиально - упорный подшипников упираются друг в друг, сажаются с натягом. Их затягиваю винтом и следят за соосностью.

(Он читает непоследовательно, и если ты не знаешь что такое реверс, то смотри пояснения к след листу и затем возвращается к этому вопросу)

Двигатель с катящимся ротором

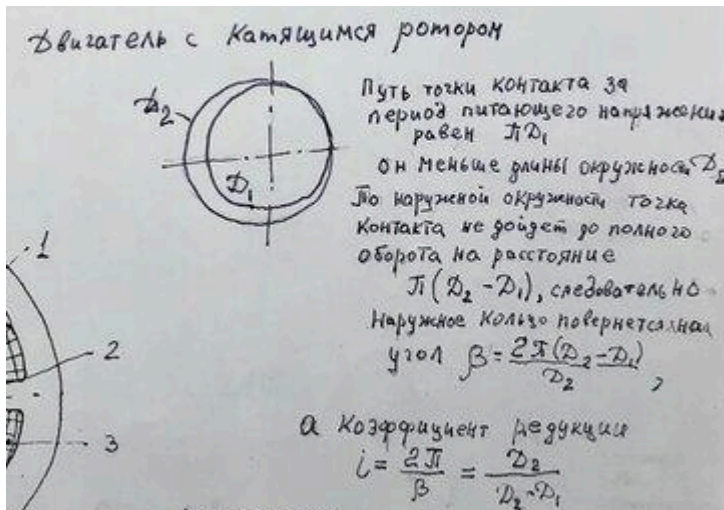
1-водило

2-тонкая пружина

3-наружное кольцо двигателя (ротор из магнитомягкого материала)

4-промежуточное кольцо (немагнитная сталь)

Вектор Φ направлен вертикально вверх, ротор 3 опускается вниз и притягивается к промежуточному кольцу 4. Потом Φ поворачивается ко второму полюсу, следом перемещается точка притяжения кольца 3 к поверхности колечка 4, т.е. наружное кольцо перекачивается по поверхности кольца 4 без скольжения. И так пока точка контакта не пройдёт полную окружность по поверхности 4. Но т.к. длина кольца 4 и внутренняя окружность кольца 3 имеют разную длину - точка контакта немного не дойдет до полного оборота. В итоге наружное кольцо оказалось повернуто по часовой стрелке на угол недоката, деленного на радиус.



Если D_1 мало отличается от D_2 , то кф редукции получится большим. Мтр удерживает кольцо 3 относительно кольца 4, т.е. если дать нагрузку большую $M_{тр}$, то будет проскальзывание двигателя. Кольца 3 и 4 -упругие, при контакте появляется скольжение - это нарушает баланс угла поворота левого промежуточного кольца ш/п и правого.

Шаговый двигатель

- 1- статор (наружный магнитопровод из магнитомягкого материала, с зубчиками)
- 2-ротор (с зубчиками из магнитомягкого материала)
- 3-катушка

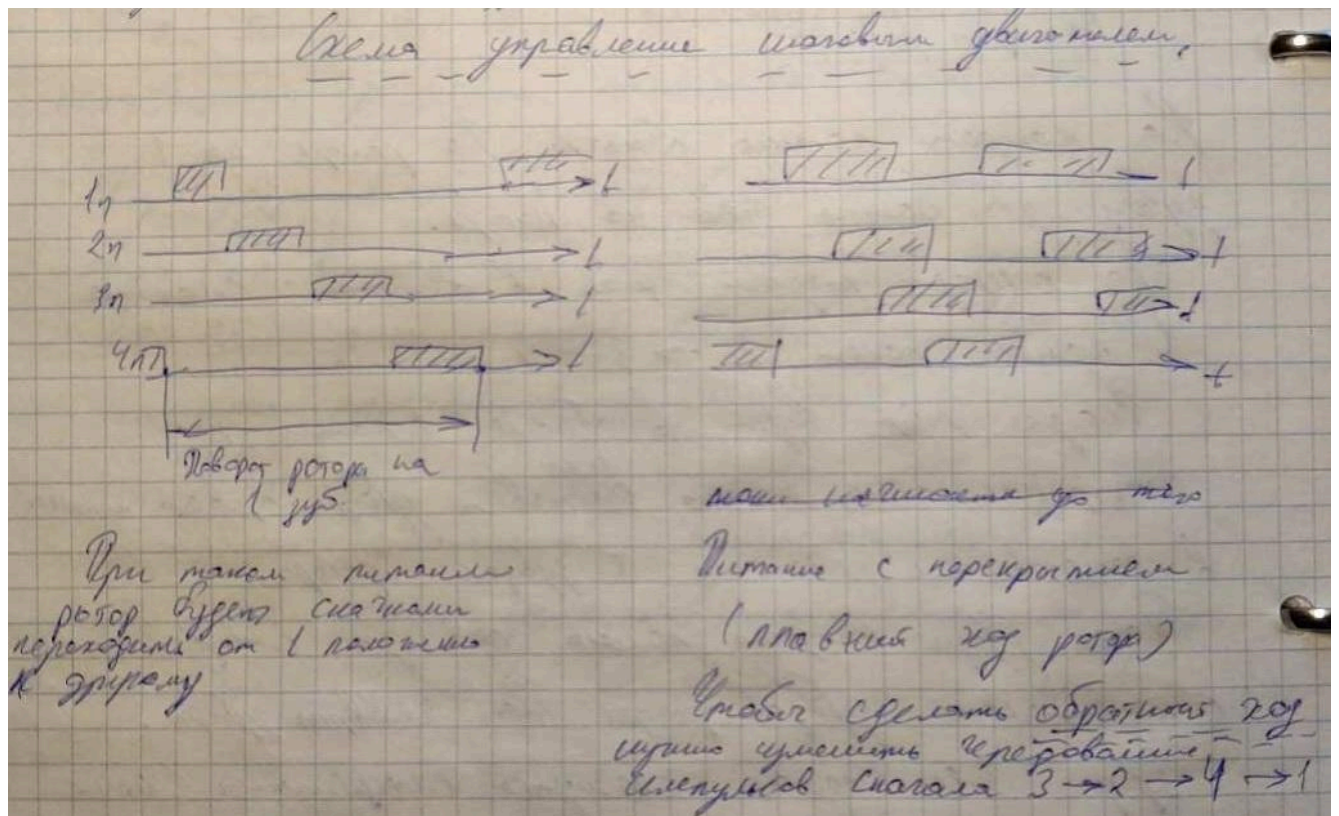
Принцип работы

На каждом полюсе обмотка. На роторе 1 зубцы дб больше, чем на статоре. Поочередно подаем ток в обмотки, сначала в 1, потом 2,3,4. Когда ток будет в обмотке 1 полюса, то ЭМ момент выставит зубцы 1го полюса в согласованное положение с зубцами ротора. Тогда зубцы 2го полюса окажутся смещенными относительно зубцов ротора на $\frac{1}{4}$ зубца, зубцы 3го полюса на $\frac{1}{2}$, 4го - на $\frac{3}{4}$ зубца.

Теперь подаем ток на 2ю катушку, ротор повернется в ту сторону, где рассогласование в $\frac{1}{4}$ зубца. Тогда зубцы ротора выставятся в

согласованное положение с зубцами 2го полюса и смещение будет аналогичным. Когда пройдет полный цикл, тогда ротор повернется на 1 зубец. Сколько циклов, настолько зубцев повернется ротор.

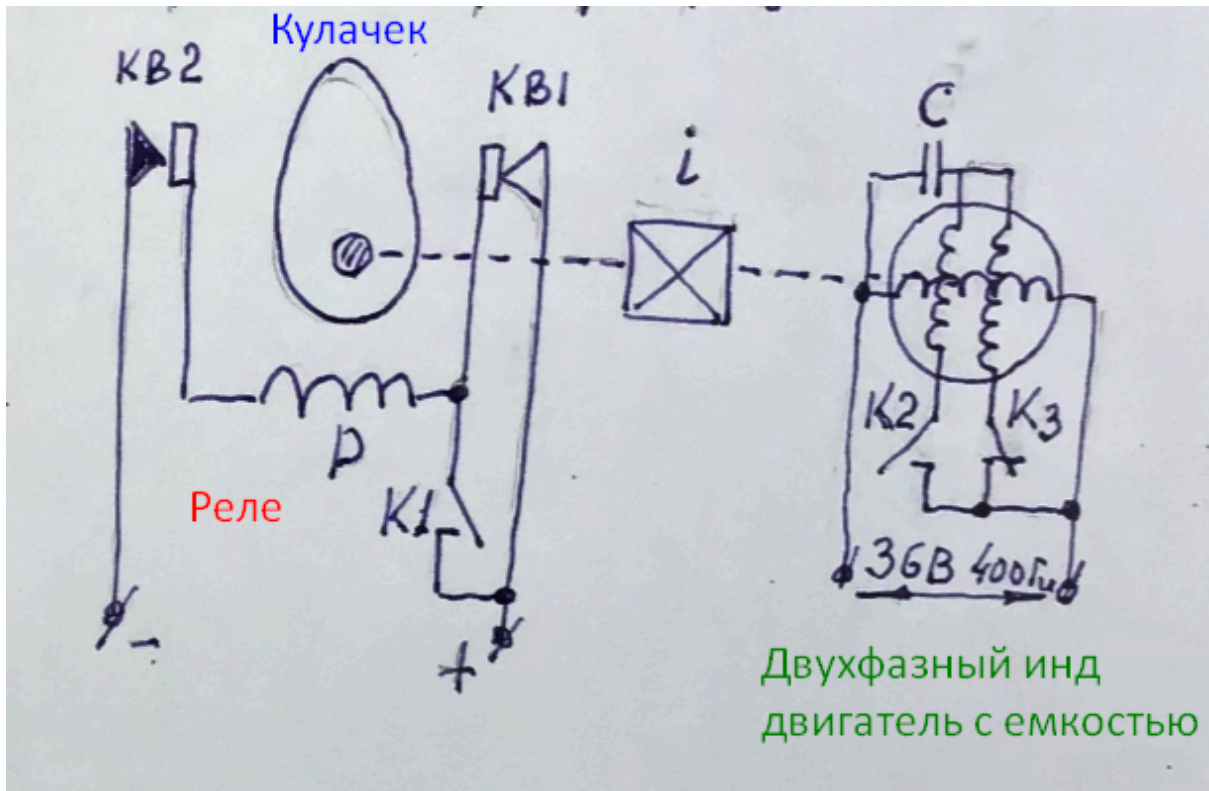
Вывод: закон поворота промежуточного кольца, ротора будет идеально повторяться и для левого и для правого промежуточных колец в ш/п, тогда вал с редуктором не нужны.



(на случай если спросит про схему управления)

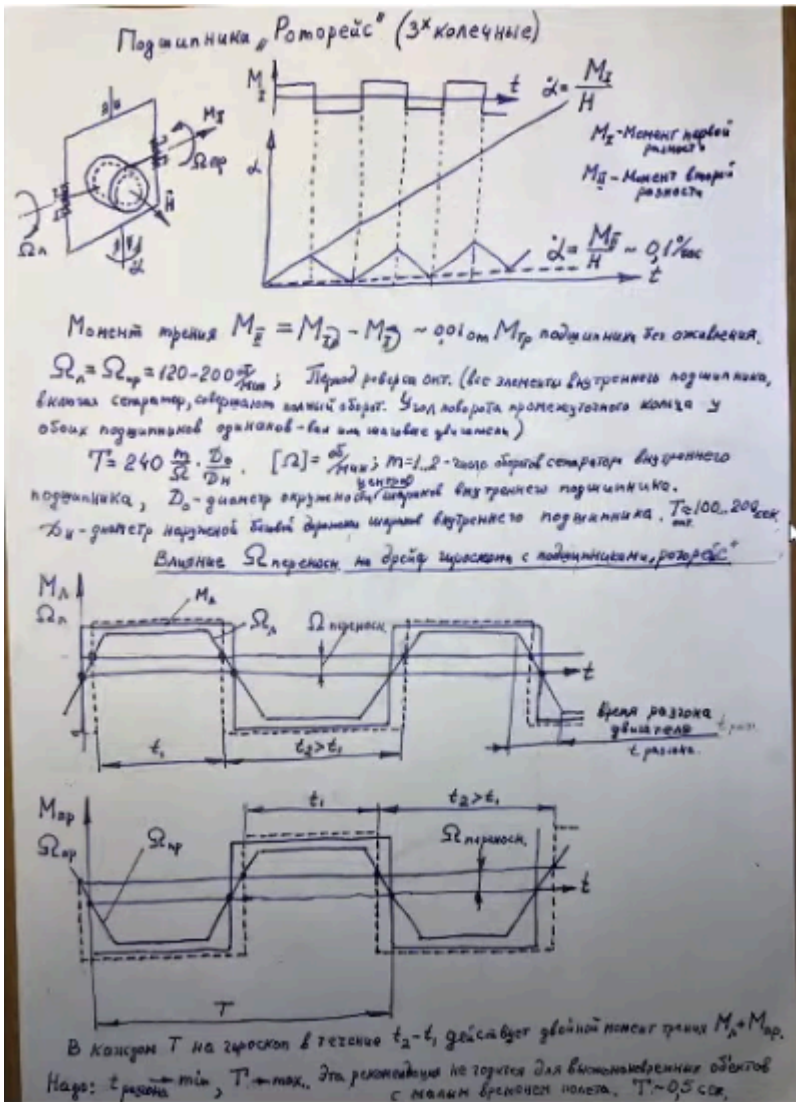
Приводы.

Первый тип

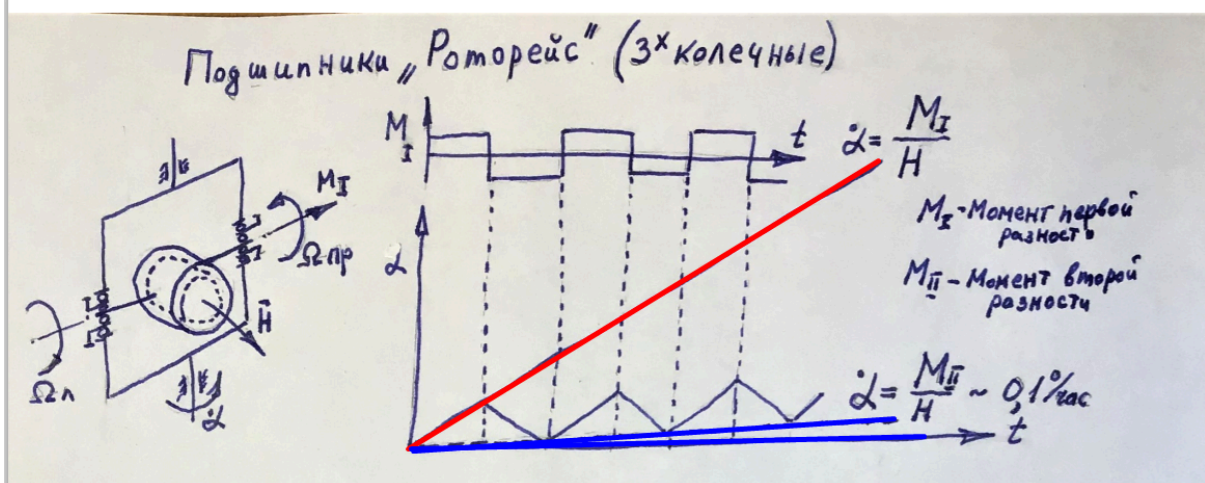


имеем двухфазный индукционный двигатель с сдвигающей емкостью. С двигателя через редуктор с передаточным числом i передаем вращение на вал, на конце которого установлено реле, два концевых переключателя и кулачек. Кулачок поворачивается и активирует переключатели, которые через реле изменяют направление вращения двигателя, вала и кулачка, активируют реверс.

Существенный недостаток данного типа - редуктор, трение, изнашивание эвольвент колес - появление пыли, стружки и тд.



Рассмотрим кинематическую схему с трехколесными шп



Как говорили выше имеем M_1 , который создает альфа с точкой - дрейф гироскопа

Дабы избежать этого американцы параллельно (но спустя 20 лет) создают подшипники с реверсом "Роторейс". Смысл в том что раз в час мы переходим на обратное направление вращения втулок, что изменяет направление момента трения и соответственно дрейфа (видим ступенчатый график момента и его влияние на скорость дрейфа (график пилы)).

В идеале это привело бы к полному решению проблемы, но трение в подшипнике зависит от направления вращения (явление волнистости) что мало, но влияет на то какую величину момента трения мы имеем в зависимости от направления вращения. (Т.е. вращаем втулки в одну сторону - момент один M_1 , в другую немного другой) Их разностный момент M_2 дает нам небольшую итоговую скорость дрейфа (синий уголок). Она в 100 раз меньше аналогичной без реверса 0.1-0.2 град/час. Далее немного формул из этого объяснения и формула для расчета идеального периода реверса:

Момент трения $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} - M_{\text{ш}} \sim 0,01$ от $M_{\text{тр}}$ подшипника без оживления.

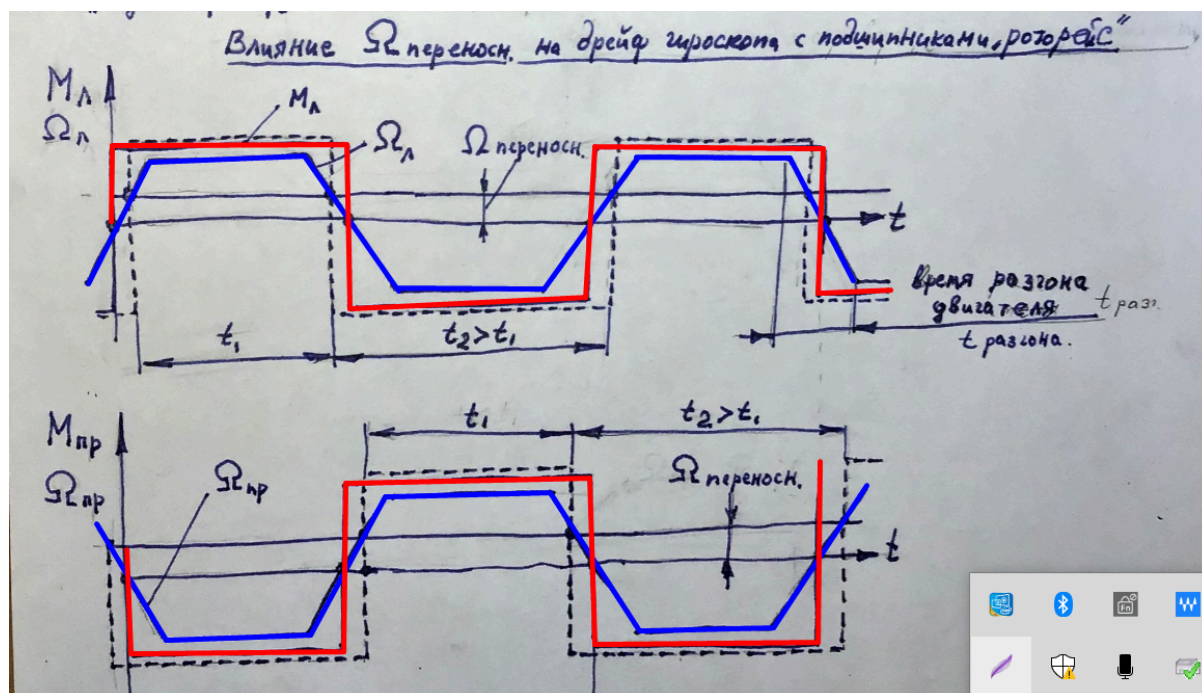
$\Omega_{\text{л}} = \Omega_{\text{пр}} = 120-200 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; Период реверса опт. (все элементы внутреннего подшипника, включая сепаратор, совершают полный оборот. Угол поворота промежуточного кольца у обоих подшипников одинаков - вал или шаговое движение)

$T = 240 \frac{m}{\Omega} \cdot \frac{D_0}{D_{\text{н}}}$, $[\Omega] = \frac{\text{об}}{\text{мин}}$; $m=1..2$ - число оборотов сепаратора внутреннего подшипника, D_0 - диаметр окружности шариков внутреннего подшипника, $D_{\text{н}}$ - диаметр наружной беговой дорожки шариков внутреннего подшипника. $T \approx 100..200$ сек. опт.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНОСНОЙ СКОРОСТИ НА ТРЕНИЕ В "РОТОРЕЙС"

Если в исходной (православной) версии подшипников переносная скорость не несла влияние на момент трения, то при введение реверса оно имеется. Рассмотрим два графика на них видим зависимость

моментов и угловых скоростей от времени.



Синие - то как изменяются угловые скорости. Горизонтальные участки - установившиеся значения. Наклонные линии - упрощенные переходные процессы.

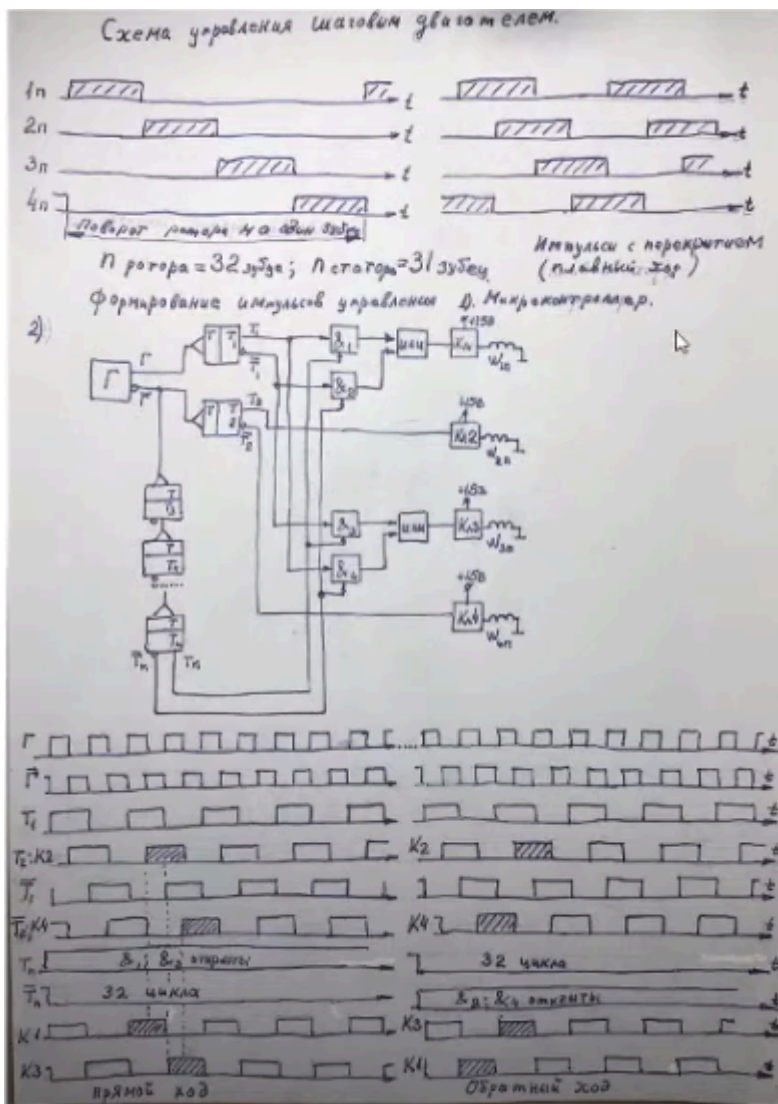
Красное - то как изменяются моменты трения (без переносной скорости) Видим что изменяются без переходного процесса. изменяют направление при изменении знака скорости. Находятся на двух графиках в противофазе, что обеспечивает малые разностные моменты.

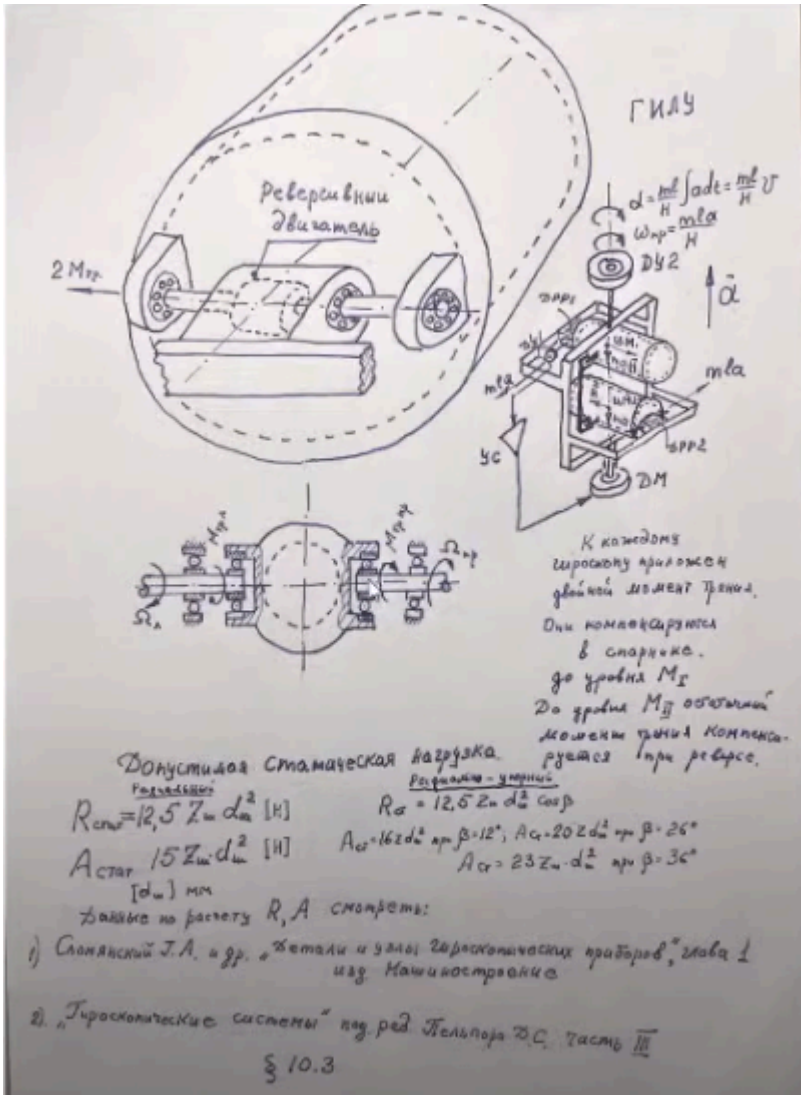
При появлении переносной скорости ОМЕГА переносная точка смены знака момента смещается на обоих графиках - результат новые зависимости для моментов (пунктирная линия).

Из-за переносной скорости нарушится равенство промежутков времени действия моментов в разные стороны t_1 t_2 , что приведет к сбиению противофазы - в течении некоторых промежутков времени моменты не гасят друг друга, а действуют в одном направлении, что серьезно влияет на гироскоп. (Значительный уход).

Как спастись

1. Делать хороший привод - чем он лучше, тем быстрее переходный процесс - тем меньше данная погрешность.
2. Увеличивать период T . (не подходит для высокоманевренных ЛА с малым временем полета, т.к. реверс перестанет успевать обрабатывать уход)





Момент трения шарикоподшипниковых опор Карданова подвеса ($M_{тр}$).

$M_{тр}$ подшипника содержит следующие составляющие:

- $M_{тр}$ качения шариков по контактным поверхностям;
- $M_{тр}$ скольжения и качения шариков о контактные поверхности желобов;
- $M_{тр}$ скольжения шариков по поверхностям сепаратора;
- $M_{тр}$ качения пяты при контакте с подпятником;
- $M_{тр}$, связанный с вязким сопротивлением движению шариков при контакте со смазкой.

Теория момента трения сложна, точные расчеты громоздки и требуют знания реальной геометрии беговых дорожек желобов, шариков и целого ряда дополнительных параметров, таких как величина посадочного натяга колец подшипника на вал и в посадочное отверстие, погрешности формы посадочных поверхностей вала и отверстий, свойств смазочных жидкостей и т.д. *) Как правило комплексом указанных сведений инженер, проектирующий навигационный прибор, не обладает. Учитывая, что геометрия у каждого экземпляра поставленного заводом-изготовителем партии шарикоподшипников отличается друг от друга и что $M_{тр}$ подшипники даже в одной поставленной партии шарикоподшипников могут иметь существенные различия, выполнение точных расчетов $M_{тр}$ шарикоподшипников для инженера-конструктора приборов становится бессмысленным. Эти расчеты представляют интерес в основном для специалистов, имеющих отношение к проектированию и производству шарикоподшипников.

Приборостроители же при выборе подшипников для приборов, как правило, пользуются данными, приведенными в паспортных документах **) и проводят прикидочные расчеты $M_{тр}$ с помощью простых эмпирических формул.

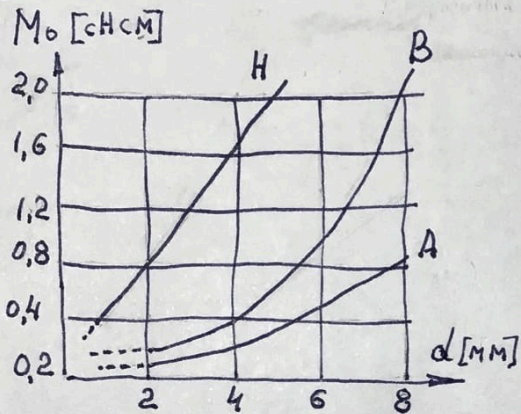
Примечания *) С теорией расчета $M_{тр}$ можно ознакомиться по учебнику "Турбокомпрессорные системы" т. III под ред. Л.С. Пельпора §§ 5.1; 7.3 (§10.4 изд 1972г).

**) Приведенные в паспортах подшипников данные о $M_{тр}$ обычно являются завышенными, поэтому особое значение имеет экспериментальная проверка $M_{тр}$.

Двухколенные подшипники

$$M_{тр} \approx M_0 + (1,5A + 1,25R) \cdot \mu \frac{D_0}{d_{ш}}; \quad M_{тр \text{ трогания}} = 1,2-1,4 M_{тр \text{ движения}}$$

M_0 - момент трения ненагруженного подшипника.
 μ - коэффициент трения = 0,0005...0,001 [с.м].

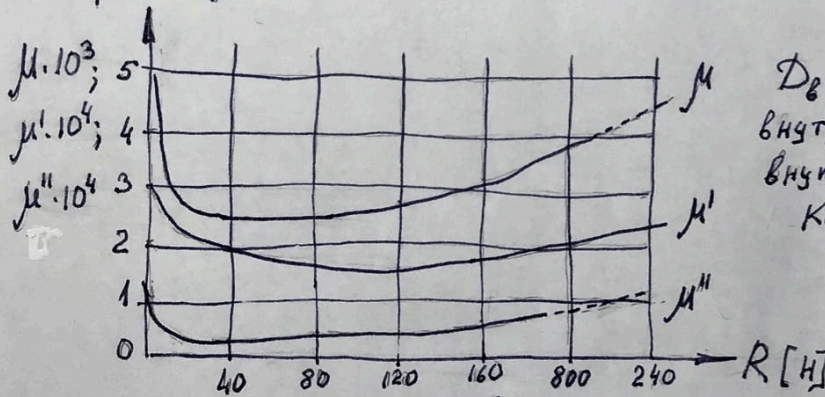


Классы точности подшипников
 Н - нормальный → 0
 П - повышенный
 ВП - Особо повышенный } 6
 В - высокие
 АВ - Особо высокие } 5
 А - прецизионный
 СА - Особо прецизионный
 С - сверх прецизионный - 4

d - диаметр внутреннего отверстия подшипника

Трехколенные подшипники

Без окисления $M_{тр} = 0,5 \mu \cdot D_v \cdot R$; $M_{тр.I} = 0,5 \mu' D_v R$; $M_{тр.II} = 0,5 \mu'' D_v R$



D_v - диаметр внутреннего жёлоба внутреннего кольца. [см]

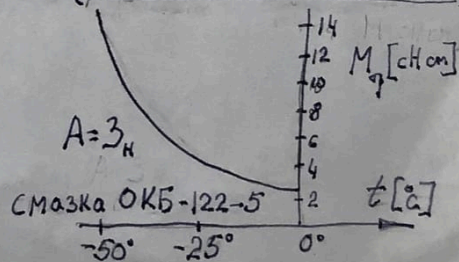
При наличии осевой нагрузки A на шарики радиально-упорного подшипника и на пятю:

(С 306095; С 300095)
 $M_{тр.II} \approx (2,5 + 0,36A) \cdot 10^{-3}$ [сНсм]
 (на упорн. подш.)

$M_{тр.II} \approx (3,6 + 0,29A^{1/2}) \cdot 10^{-3}$ [сНсм]
 (на пятю)

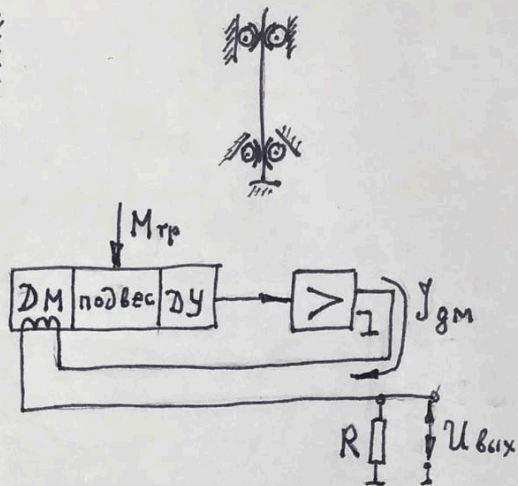
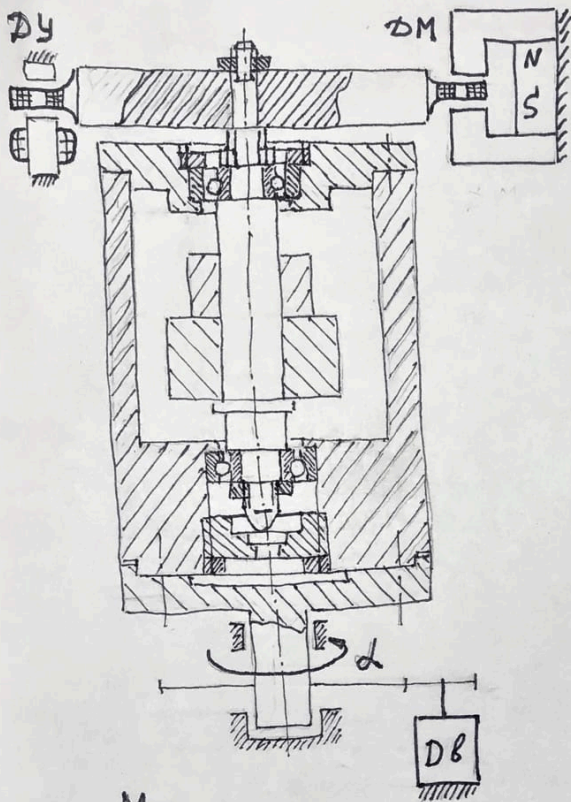
Большой разброс $M_{тр}$ (~500%)

Влияние смазки на $M_{тр}$
 (Р¹ - колесный, радиальный подшипник)



смазка ОКБ-122-5

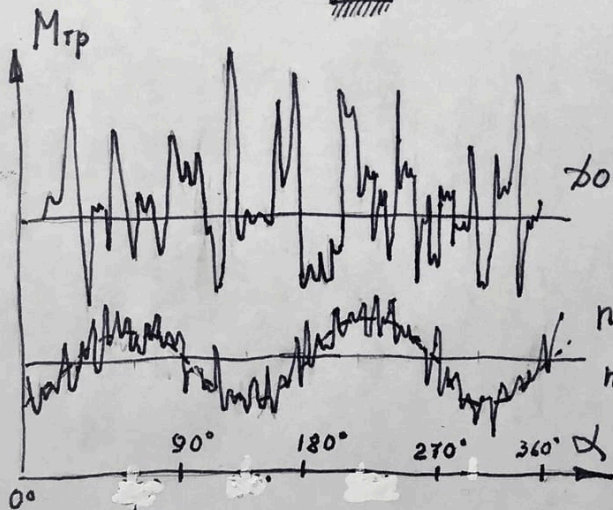
Экспериментальное исследование Мтр.



Статическое равновесие

$$M_{тр} = K_{дм} \gamma_{дм}$$

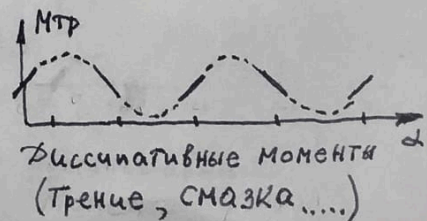
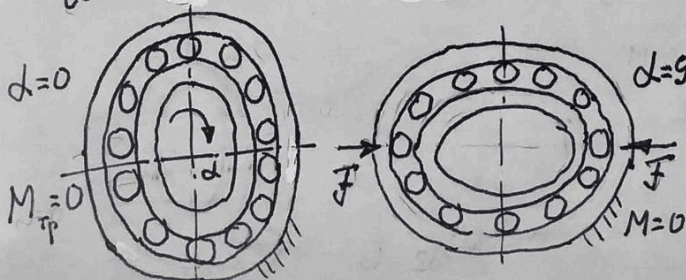
$$U_{вых} = \frac{R}{K_{дм}} \cdot M_{тр.}$$



до приработки

после приработки 6-8 часов,
промывки и повторной сборки

Консервативный
Момент от деформации
Наружного кольца



7) Гидростатический подвес; опоры поплавковых приборов (Попова)

Гидродинамические силы, действующие на поплавок

$$F_{гд} = m_{жс} a + 12\pi \mu l_n \frac{R_n^3}{\delta_u^3} \cdot \dot{\epsilon} Q_1 \left(\frac{l_n}{R_n}; \frac{\delta_u}{\delta_r} \right) + \rho \frac{\pi l_n R_n^3}{\delta} \ddot{\epsilon} Q_2 \left(\frac{l_n}{R_n}; \frac{\delta_u}{\delta_r} \right)$$

$Q_1; Q_2$ для реальных конструкций $\approx 0,5 \dots 0,8$.

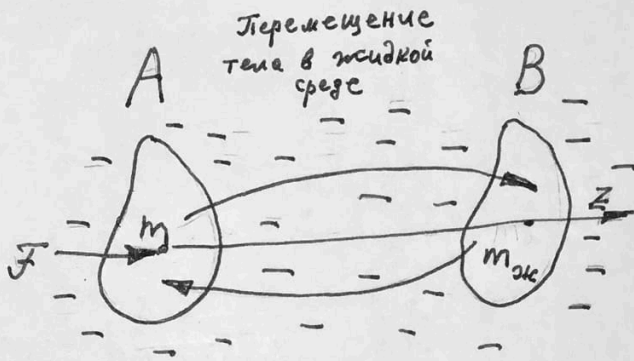
$m_{пр} = m_{жс} \frac{R_n}{\delta_u} Q_2 \left(\frac{l_n}{R_n}; \frac{\delta_u}{\delta_r} \right)$ - присоединенная масса жидкости

Металлы Вуда
Do 100% • Cr 21% • Ni 50%

Особенность в том, что поплавок полностью взвешен из-за силы Архимеда. Формула состоит из силы Архимеда (1-ое слагаемое), некоего коэф демпфирования и инерционного противодействия присоединенной массы жидкости. Коэффициенты Q_1 и Q_2 учитывают аксиальное течение жидкости (вдоль поплавка).

Присоединительная масса примерно 300 раз больше массы поплавка (объяснение на след странице).

Присоединенная масса жидкости

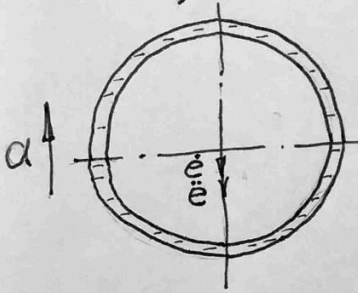


При перемещении тела m из положения A в положение B мы одновременно перемещаем второе тело такой же формы как m из положения B в положение A . Второе тело имеет плотность, равную плотности жидкости.

Уравнение движения тела

$$(m + K \cdot m_{жс}) \ddot{z} + B \dot{z} = F$$

$K \cdot m_{жс}$ - присоединенная к телу масса жидкости. В свободной жидкости коэффициент K , зависящий от формы тела, близок к 1 ($K \sim 1,1$)



Уравнение движения поплавка при ускорении α

$$\left(m_{п} + m_{жс} \frac{R_{п}}{\delta_{ж}} Q_2 \right) \ddot{e} + B Q_1 \dot{e} = (m_{п} - m_{жс}) \cdot \alpha$$

В поплавковом приборе при смещении поплавка e жидкость $m_{жс}$ может перетекать только вокруг поплавка по длинной и узкой кольцевой щели (если торцевые области закрыты). При этом жидкости должно быть сообщено очень большое ускорение

$$\ddot{e}_{жс} = \ddot{e}_{п} \frac{R}{\delta_{ж}}$$

Физически при движении поплавка на расстояние e перемещается масса вытесненной поплавком жидкости $m_{жс}$. Но из-за того, что течение происходит

через длинную тонкую щель с ускорением $\ddot{e}_{жс}$

Требуется приложить к поплавку очень большую силу. При этом происходит редуция ускорения, а не массы, но удобнее

относить этот эффект на счёт увеличения присоединенной массы, полагая, что оба тела (поплавок и жидкость) имеют одинаковое ускорение \ddot{e}

Сила должна перемещать не только тело, но и жидкость.

В рамке написано уравнение движение, и в нем коэф демпфирования оч большой, значит макс. перемещение очень мало.

Значит что при большом ускорении а воздействия будет =0 при рабочей температуре. Если будем смотреть на границе рабочей температуры, то тут разность масс на ускорение создаст всего 5% от силы такого же прибора, но с сухим трением.

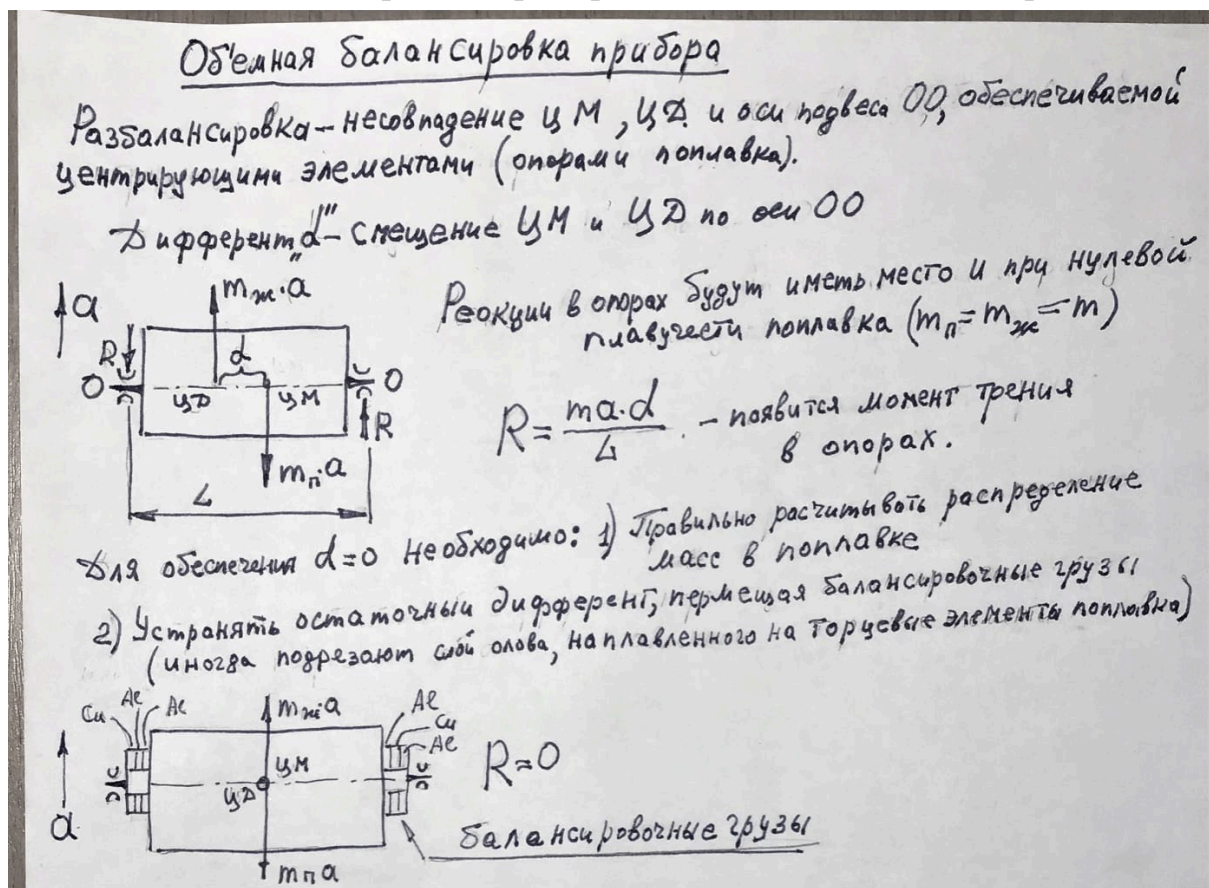
Поэтому поплавков не касается стенок и на цапфу почти нет нагрузки, значит её можно сделать меньше и уже (десятые доли мкм), а значит трения почти нет.

Преимущества:

Высокая надежность - такие опоры наиболее устойчивы к динамическим возмущениям (например, к ударам),

Точность высокая - из-за малого дрейфа.

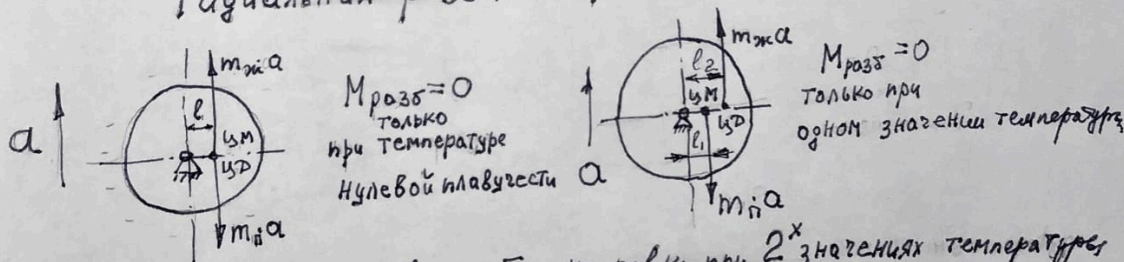
Очень важно отбалансировать прибор, т.к. это очень влияет на трение в опорах.



Для устранения на торцы вешают шайбы (алюминиевые и медные). Меняя их местами, можно регулировать Центр Давления и Центр Масс. Иногда наплавляется слой олова и потом подрезается в нужных местах.

При балансировки жидкость заменяют на балансировочную, т.к. процессы очень медленные из-за высокого демпфирования.

Радиальная разбалансировка поплавка.

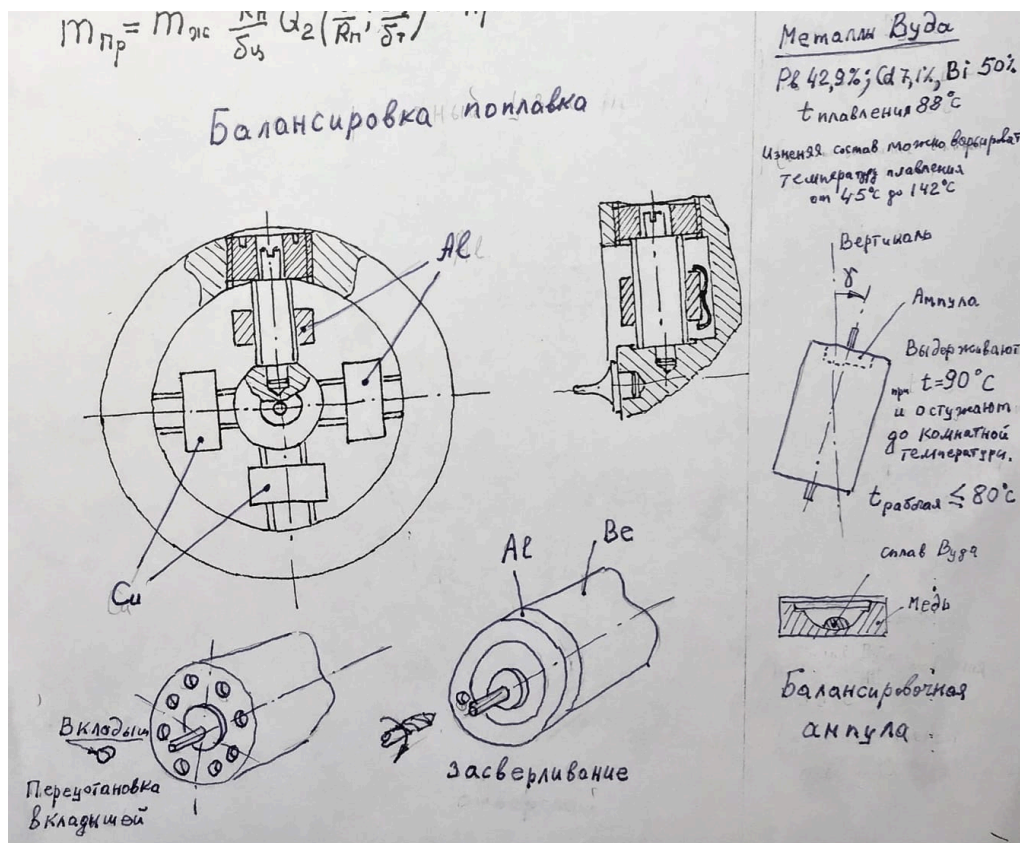


Необходимо проводить балансировку при 2^х значениях температуры,

Изменяя l_2 до 0 получают $M_{разб} = m_{п} l_1 = const$ (не зависит от Δt). Далее изменяют l_1 и проводят балансировку до уровня $M_{разб} = 0$. Процесс носит название "объемная балансировка поплавка".

Отделить $M_{разб}$ от других постоянных возмущающих моментов можно путем разворота поплавкового прибора на 180° . При этом $M_{разб}$ меняет знак, а другие возмущающие моменты знака не изменяют.

Радиальная балансировка более важна, тк напрямую вызывает дрейф гироскопа. Поплавок поворачивается не будет. Как определить совпадения ЦД и ЦМ и их совпадение с осью? Изменив плотность жидкости, нагрев прибор подвеса. Есть несколько методов балансировки, они расписаны ниже. Возвращаемся к первому рисунку.



Большой рисунок: устройство для плавной регулировки поплавков.

Это сборка (изображена справа) позволяет вращать винт вперед назад, но радиальное смещение невозможно. Справа нарисована пружинка (похожа на червяка), нужна чтобы не царапала поверхность.

Надо вращать винты таким образом, чтобы ЦМ и ЦД совместились.

Слева внизу представлен метод, в котором балансируют прибор вкладышами, которые вклеиваются. Он подходит и для дифферента тоже.

Снизу по центру метод просверливание, который подходит, если не сверлить бериллий, тк он очень токсичен. Для этого делают алюминиевое кольцо.

Чтобы понять, сбалансирован ЦМ и ЦД, нужно сцепить ДУ и ДМ через усилитель, и они покажут сигнал.

После балансировки прибор герметизируют одним из 2-х способов:

- 1) Лазерная сварка (С штенгелями, впаянными). Штенгели подключаются к прибору уловителя утечки гелия для проверки (тк гелий проникает вообще везде). Потом прибор заполняется жидкостью методом сообщающихся сосудов под вакуумом. Затем штенгель пережимается и запаивается.
- 2) Иногда крышку крепят винтами, а под ними кладут кольцо из индия, который очень сильно расплющивается и герметизирует все.

После герметизации все равно могут остаться некоторые моменты небаланса. Для этого есть балансировочная ампула. Прибор отклоняют на высчитанный угол гамма

и нагревают до 90 (должна быть больше рабочей температуры и чуть больше температуры плавления капли). Капля, сделанная из металла Вуда (Свинец, Кадмий и Висмут), расплавляется и перетекает на нужное место и затем всю конструкцию остужают до комнатной температуры.

Какие бывают опоры поплавковых приборов:

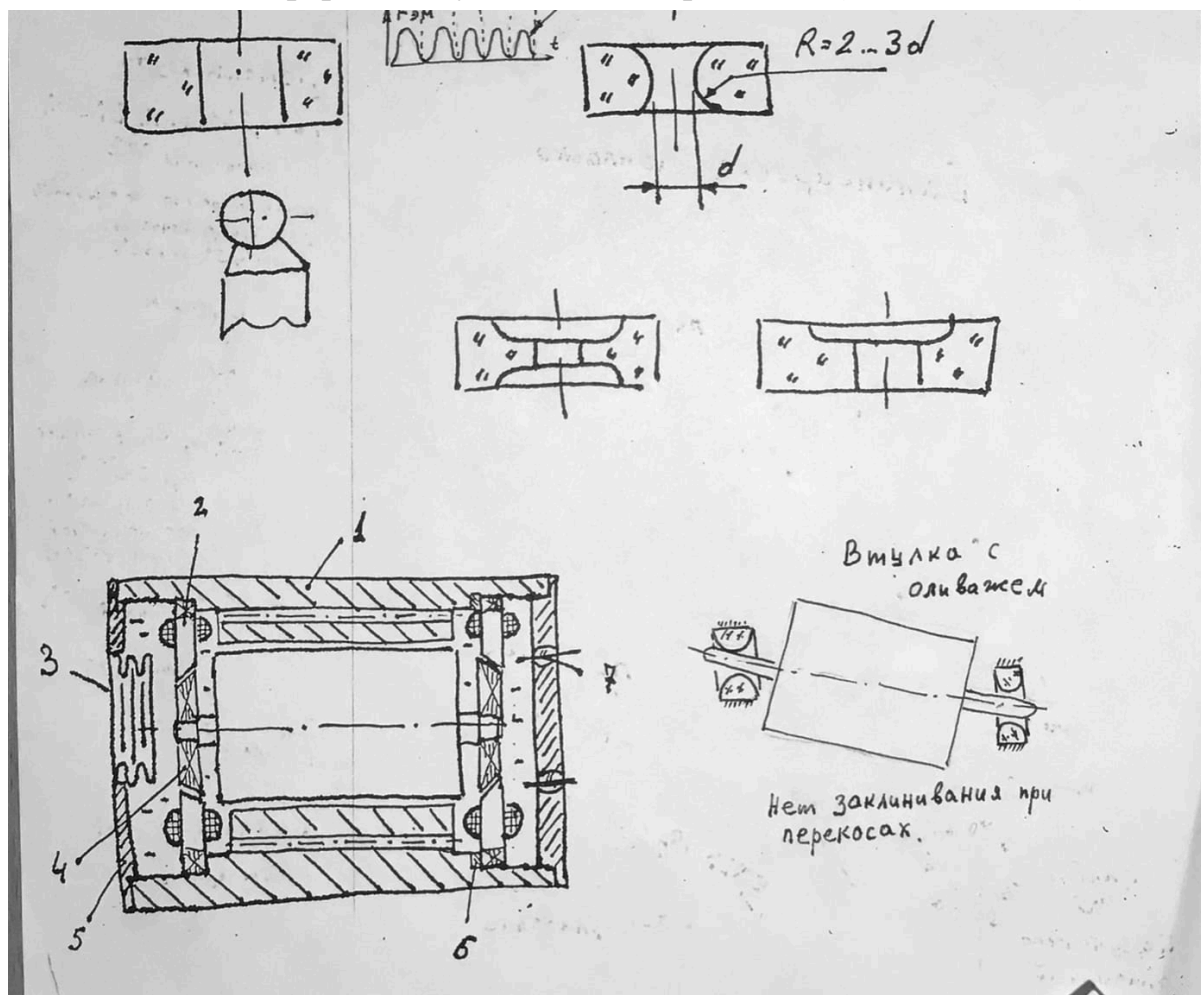
Изначально, маленькие опоры и втулки использовались в часах, и выполнялись из рубина. (они по центру две чуть правее)

Эти ванночки = масленки, но они в гиросприборах не нужны.

Гироскопические втулки делаются из лейкосапфира (самый чистый сапфир). Они изображены на рисунках верхних.

Оливаж = 2 или 3 диаметра отверстия. Он нужен для компенсации перекоса (рисунок правый нижний).

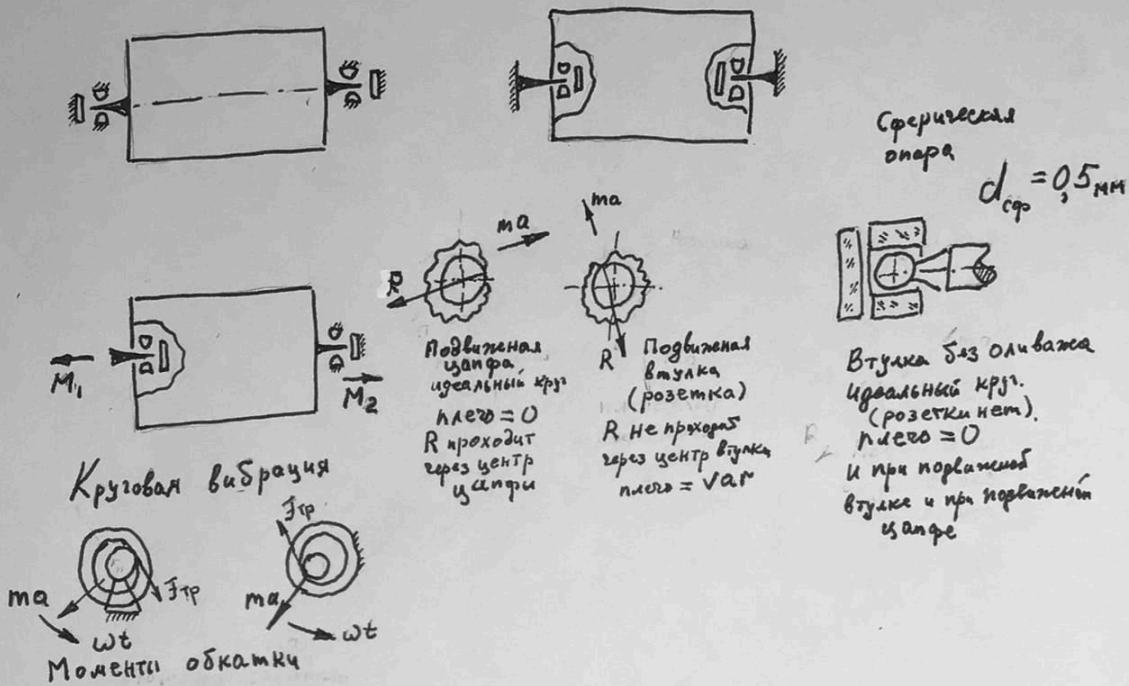
Из-за сложности формы могут возникать "розетки" (описаны далее)



Схемы подвесов бывают трех типов:

- 1) Цапфа в поплавке, втулка и подпятники в корпусе
 - : Цапфа из магнитомягкого материала, она может намагничиваться и будет ухудшаться точность, т.к. появляется дрейф.
 - : Цапфа очень хрупкая (пока нет жидкости) и очень легко может сломаться, и придется ее менять и перебаланси́ровать прибор по новой)
 - +: Момент разбаланси́ровки = 0, т.к. см рисунок по центру с подвижной цапфой.
- 2) Цапфа на корпусе, а втулка и подпятник на поплавке
 - + : решает проблемы 1)
 - реакция розетки (см рисунок в центре с подвижной втулкой). Этот недостаток решается, если использовать прямую цапфу, а не с оливо́жем (рисунок справа внизу). Пример розетки изображен еще на один рисунок ниже (где скрин с программы).
- 3) Смешанный тип
 - Очень редкий, используется при круговой вибрации, чтобы моменты обкатки компенсировались.

Схемы подвесов на камневых опорах



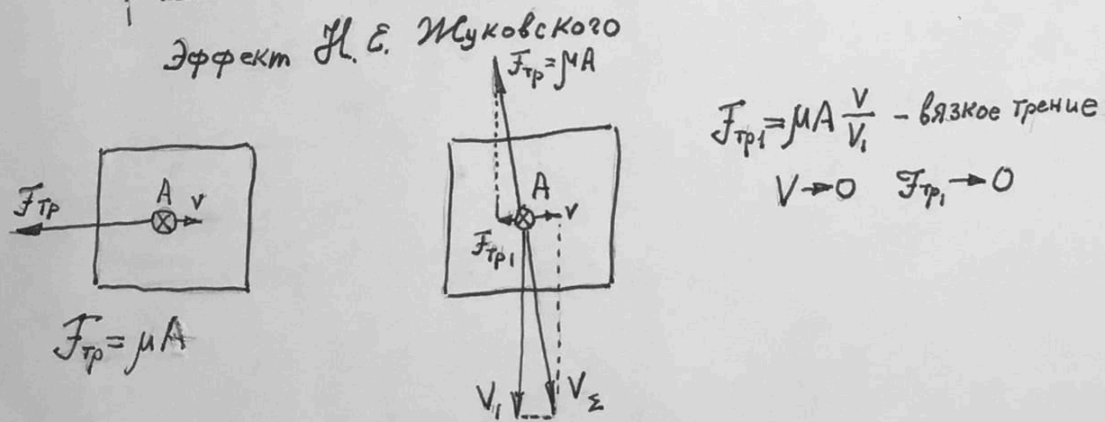
Момент трения в камневой опоре

$$M_{тр} = \frac{4}{\pi} \mu R \frac{d_y}{e} \quad \mu = 0,13 \dots 0,14$$

$$M'_{тр} = \frac{3}{16} \pi \mu r \cdot A \quad r = 0,88 \sqrt[3]{A \left(\frac{1}{E_y} + \frac{1}{E_n} \right) \cdot z}$$

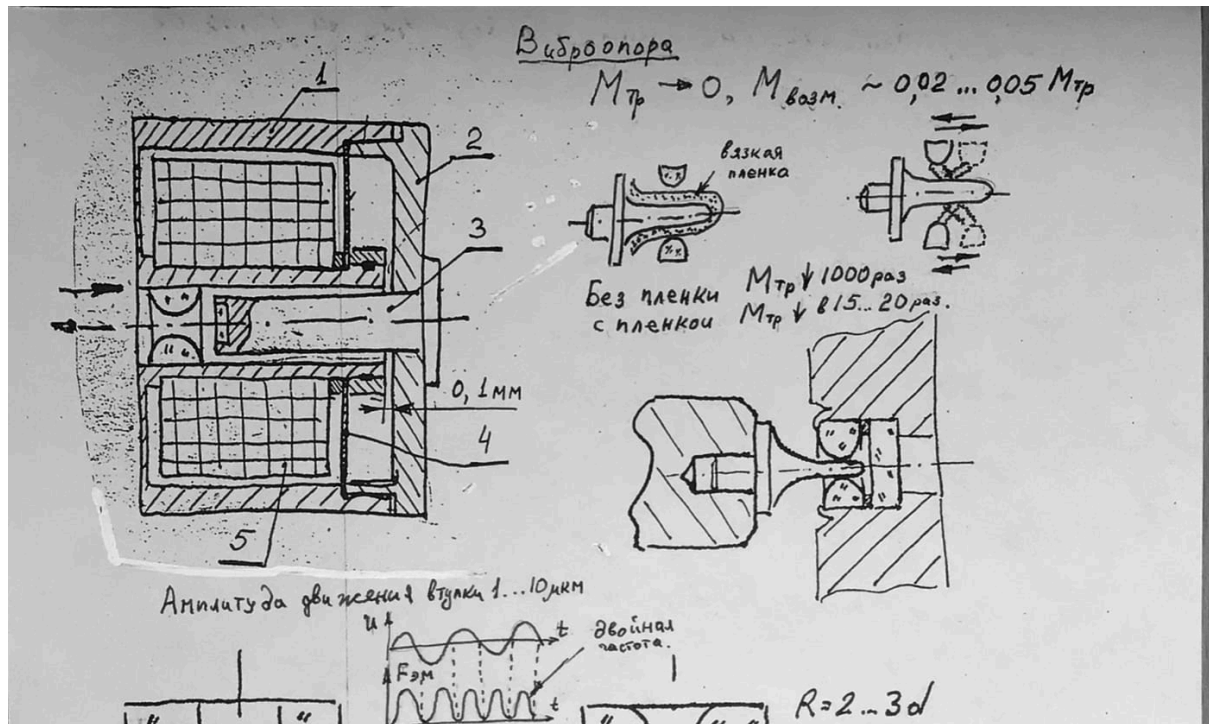
r - радиус пятна контакта пята с подпятником

Хандельсман "Камневые опоры"
 изд. "Библиотека приборостроителя"

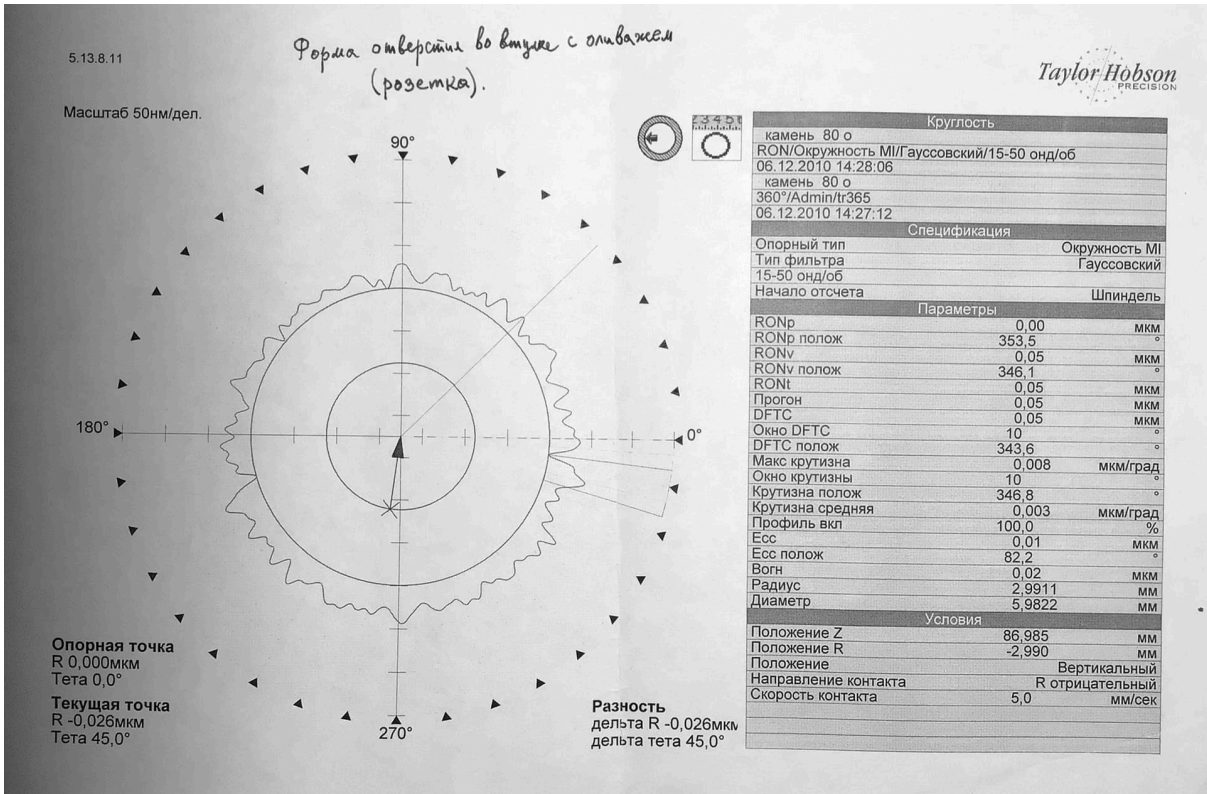


Вторая формула для момента трения от осевой нагрузки. В формуле радиуса пятна буквами E обозначены модули упругости.

Эффект Жуковского строится на том, что есть приложить скорость V_1 много большую, чем V , то трение получится из сухого в вязкое. На этом эффекте строится виброопора.



1- корпус, 2- крышка, 3-цапфа 4- мембрана из бронзы (не пропускает маг поля)
 В общем обмотка создает поток, в воздушном зазоре наводится ЭДС и втулка с катушками создает электромагнит, который втягивает их в крышку. Как только ток=0, то мембрана возвращает катушку и втулку в начальное положение. При переменном токе втулка будет колебаться с двойной частотой (ЭДС пох в какую сторону сигнал тока) и это будет выступать в роли V_1 в эффекте Жуковского. Между втулкой и цапфой всегда оставляют зазоры 3,4 мкм для снижения момента трения.



Про это он тупо прочитал эти статьи и все.

Конструкционные материалы, применяемые в точном машиностроении. Табл. N1

Наименование	Марка	Плотность [г/см³]	Прочность на разрыв $\sigma_B \cdot 10^{-3}$ [МПа]	Предел текучести $\sigma_{0.2} \cdot 10^{-3}$ [МПа]	Коэффициент линейн. темп. расширения $\alpha_{\text{расч.}} \cdot 10^6$ [1/град]	Темперопроводн. λ [Вт/см·град]	Вязк. Юнга $E \cdot 10^4$ [Н/мм²]	Корр. Пуассона ν	Магнит.	Обраб.	Примечание
Натрий	МА-8	1,8	12	3,5	26	0,37	0,455		нет	удоб.	огнеопасн, непрочность
Бериллий		1,85	57	28	11,0	1,46	2,9	0,04	нет	удоб.	токсичен
Al. сплавы	B-95	2,8	60	55	23,2	1,17	0,74	0,33	нет	удоб.	
	D-16T	2,8	47	33	22	1,17	0,72	0,33	нет	удоб.	
Титановые сп.	BT-5	4,5	75-95	70-85	8	0,075	1,04	0,33	нет	плох	
	18HXBA	7,95	130	90	14,5	0,238	2,04	0,3	да	хар.	
	4X13	7,68	114	91	12,6	0,246	2,0	0,3	да	хар.	
	ЦХ15	7,7	68	40	14	0,4	2,1	0,3	да	удоб.	
	1X18H9T	7,9	58	24	16,6	0,163	2,0	0,3	слаб	плох.	
Сп. а. л.	ЭИ335	8,1	88	50	15,1	0,1	2,1	0,3	нет	плох.	
	ЭИ402(защит)	7,8	125	90	13-16	0,135	2,0	0,3	нет	плох.	
	Ковар	H29K18	8,2	51	40	4,5-5,5	0,192	1,48		да	хар.
Инвар. сп. инвар	H 36	8,1	50	35	1,1	0,109	1,51	0,3	да	удоб.	
	32HKD	---	---	---	0,55	---	вкл. инв.	---	да	удоб.	
Латуны	ЛС-59-1	8,5	65	45	21	1,05	0,9-1,05		нет	плох.	
	Винте 5-3	17	64	60	5,6	1,0	0,33		нет	плох.	
Винте 7-3	17	70	65	5,3	0,88	0,34		слаб	плох.		
Винте 8-3	17	70	65	5,3	0,88	0,34		слаб	плох.		
АКП-1 (замена бериллия)	АКП-1	2,61-2,65	-	-	12...13	1,3	-	-	нет	удоб.	Композитный материал обработка в газовой

8) Магнитные подвесы (Радецкая)

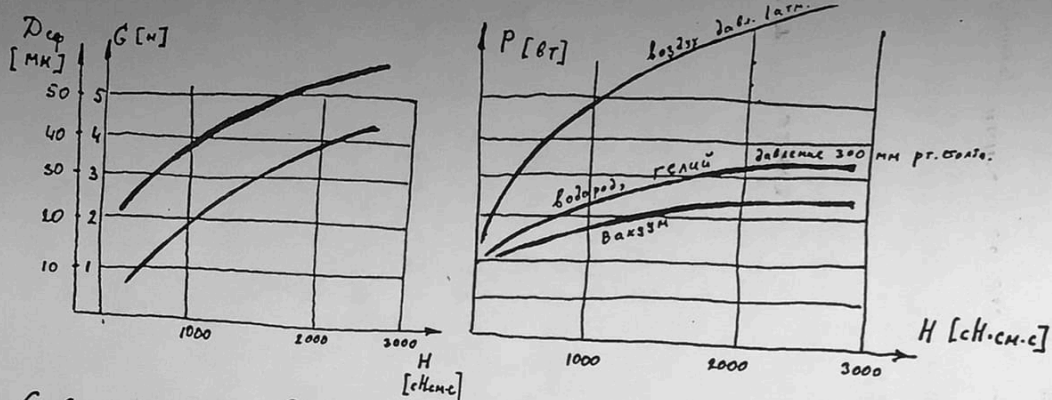
Конструкционные материалы, применяемые в точном машиностроении. Табл. N1

Наименование	Марка	Плотность [г/см ³]	Прочность на разрыв $\sigma_B \cdot 10^{-3}$ [Н/мм ²]	Предел теплоты $\sigma_{Тч} \cdot 10^{-3}$ [Н/мм ²]	Коэффициент линейн. темп. расширения Красш. $\cdot 10^{-6}$ [1/град]	Темперовдн.		Коэффич. Пуассона ν	Магнит.	Обраб.	Примечание.
						λ [Вт/см·град]	Юнг $E \cdot 10^{-2}$ [Н/мм ²]				
Магний	МА-8	1,8	12	3,5	2,6	0,37	0,455		нет	удоб.	Огнеопасн, непрочность.
Бериллий		1,85	57	28	11,0	1,46	2,9	0,04	нет	удоб.	Токсичен.
Ал. сплавы	В-95	2,8	60	55	23,2	1,17	0,74	0,33	нет	удоб.	
	Д-16Т	2,8	47	33	22	1,17	0,72	0,33	нет	удоб.	
Титановые сп.	ВТ-5	4,5	75-95	70-85	8	0,075	1,04	0,33	нет	плох	
	18НХВА	7,95	130	90	14,5	0,238	2,04	0,3	да	хар.	
Сп. а. л. и	4Х13	7,68	114	91	12,6	0,276	2,0	0,3	да	хар.	
	4Х15	7,7	68	40	14	0,4	2,1	0,3	да	удоб.	
	1Х18Н9Т	7,9	58	24	16,5	0,163	2,0	0,3	слаб	плох.	
	ЭИ395	8,1	88	50	15,1	0,1	2,1	0,3	нет	плох.	
	ЭИ402(электр)	7,8	125	90	13-16	0,135	2,0	0,3	нет	плох.	
Ковар	Н29К18	8,2	51	40	4,5-5,5	0,192	1,48		да	хар.	
Инвар. сверхинвар	И 36	8,1	50	35	1,1	0,109	1,51	0,3	да	удоб.	
	32 НКД	—	—	—	0,55	—	один ниже	—	да	удоб.	
Латуны	ЛС-59-1	8,5	65	45	21	1,05	0,9-1,05	—	нет	ома	
Вольфрамовые сплавы	ВНж-5-3	17	64	60	5,6	1,0	0,33		нет	плох.	
	ВНж-7-3	17	70	65	5,3	0,88	0,34		слаб	плох.	
АКП-1 (замена бериллия)	АКП-1	2,61-2,65	—	—	12...13	1,3	—	—	нет	удоб.	Композитный материал обработка в газовой

В таблице приведены свойства титана

Особенность - сверхпластичность металла. В начале при приложении растягивающего напряжения к образцу, он начинает деформироваться по закону Гука (обратимое пропорциональное удлинение), при достижении предела текучести образуется шейка, при превышении предела прочности материал разрывается. Удлинение, полученное в начале деформации перед разрушением и является особенным свойством конструкционного материала. Оно составляет 10-12% от начальной длины. Важно для предотвращения трещин.

При соприкосновении двух частей сверхпроводящего материала с надавливанием с малым усилием происходит сваривание контактов друг с другом.



G - вес гироскопа, $D_{сф}$ - диаметр сферы, P - выделяемая мощность.

Основные характеристики гироскопов.

(стальной ротор, $\Omega = 24000$ об/мин, конструкция орбиталярная симметричная подвеска ротора на шарикоподшипниках. Натяг расщепов на штернузку - 10...20

Таблица добротностей D и весов указанных гироскопов.

H н.см.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	12,12	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 текуч. $\sigma_{тек} \cdot 10^{-3} \left[\frac{H}{cm^2} \right]$	Твердость по Кнуппу $[H/мм^2]$	Модуль Юнга $\left[\frac{H}{cm^2} \right] \cdot 10^{-7}$	Плотность $[г/см^3]$	Темперостойкость $\left[\frac{Вт}{см.трот} \right] \lambda$	Красочность $10^6 \left[\frac{1}{град} \right]$
Корунд	154	21000	5,3	4,0	0,5	5,4
Алмаз	530	70000	10,35	3,5	20	1,0
Кварц плавл. (волокно)	84	8200	0,73	2,5	0,014	0,56
Кремний	70	8500	1,9	2,33	1,57	2,6 ($t \sim 20^\circ C$)

Верхняя часть таблицы относится к свойствам гироскопов (левый график - зависимость диаметра сферы, в которую вписывается гироскоп, от величины

кинетического момента и вес гиromотора G - это позволяет выбрать нужные параметры ДУСа; подобрав габариты ДУСа можно перейти к правому графику: он показывает, какую мощность будет выделять гиromотор на нагрев прибора). После получения графиков и нужных соотношений из них можно посчитать площадь наружной поверхности прибора (если это цилиндр), зная её и коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, можно сказать, какую мощность со своей поверхности может рассеять прибор при нагреве (допустим, где-то 20 градусов). Таким образом осуществляется расчет параметров гиromотора.

Таблица. Из корунда делаются втулки для подшипников. Алмаз используется в покрытиях быстровращающихся контактирующих деталей (сфер газодинамических подшипников гиromотора, к примеру). Плавленый кварц широко используется как конструкционный материал (детали акселерометров выполняются из кварца), он очень хрупкий (при комнатных температурах нет пластической деформации), малый момент противодействия из-за малого модуля упругости (полезно при изготовлении балок подвеса маятниковых акселерометров).

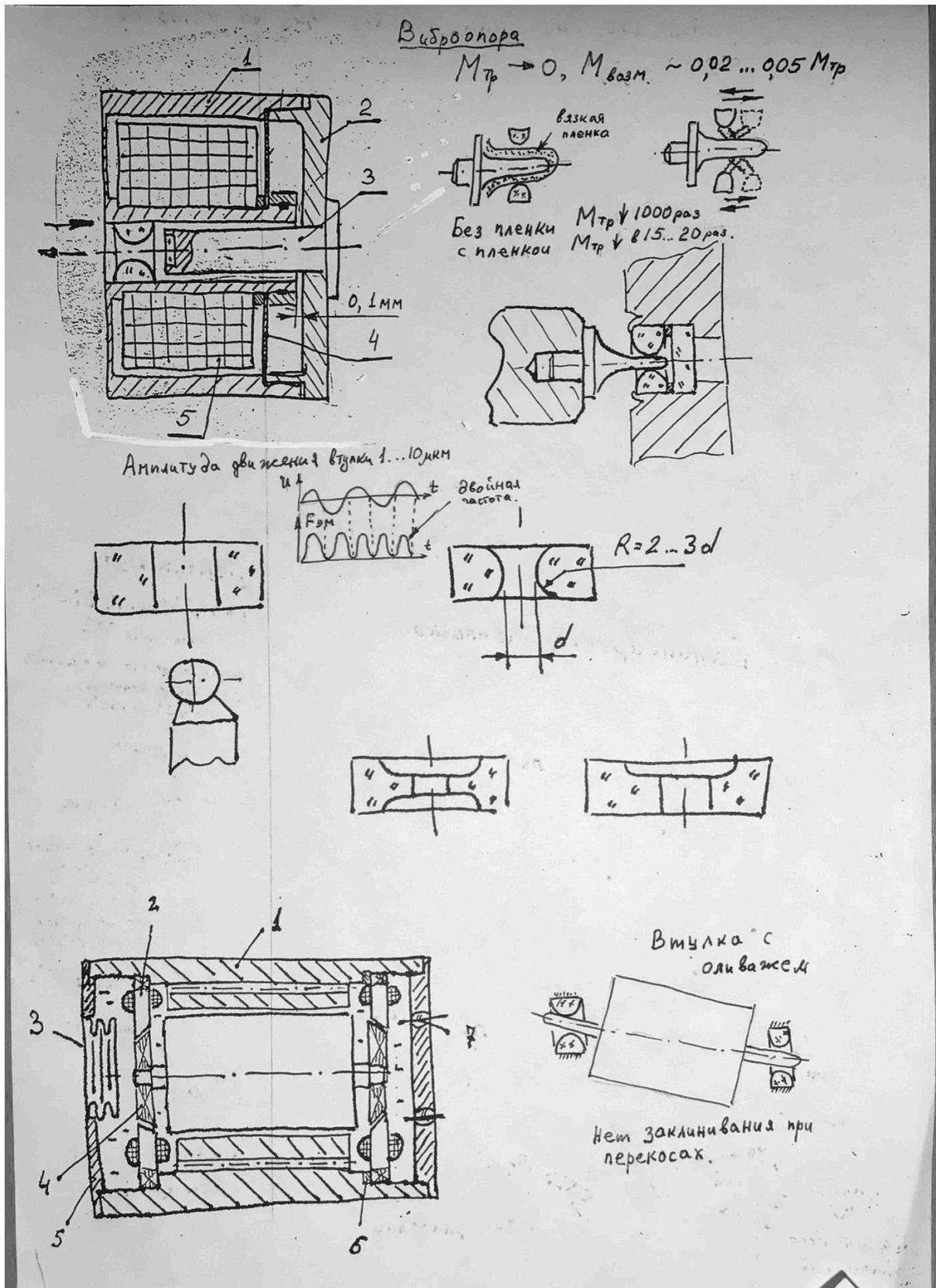


Рис. в левом верхнем углу - повторение прошлой лекции: виброопора, у которой подвижная камневая втулка, которая приводится в возвратно-поступательное движение посредством электромагнитной силы (когда поле протекает через зазор,

возникает эта сила, которая притягивает подвижную часть втулки к крышке), когда проходит ток, сила падает до нуля, и упругие свойства бронзовой и пермаллоевой мембран возвращают виброопору в исходное положение. Таким образом камень колеблется с двойной частотой, тем самым обеспечивает снятие момента трения (иногда даже в 1000 раз). В больших опорах получают размах колебаний 10 мкм, в маленьких - около 1 мкм (см. график u от t и f от t).

Если жидкость не идеально чистая (см. рис. правый верхний угол), то образуется вязкая пленка (около 1 мкм), которая связывает между собой цапфу и подвижный камень. Если пленка не рвется - получается большой остаточный момент трения.

В варианте опор с подвижной цапфой (см. рис. ниже) саму цапфу делают не цилиндрической, а конической. Подается импульсное питание на опоры, цапфа постоянно вставляется и отходит назад. При входе цапфа создает импульсное воздействие на поплавок (толкает его) в сторону, противоположную смещению (к центральному положению, соосно с цапфой).

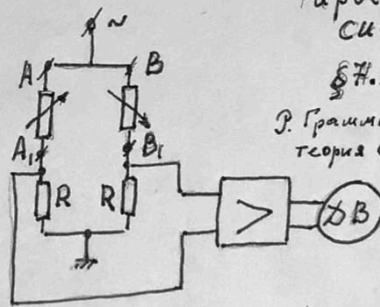
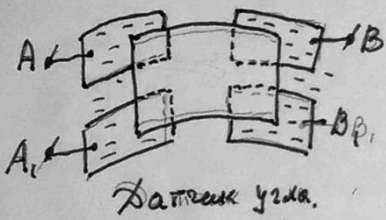
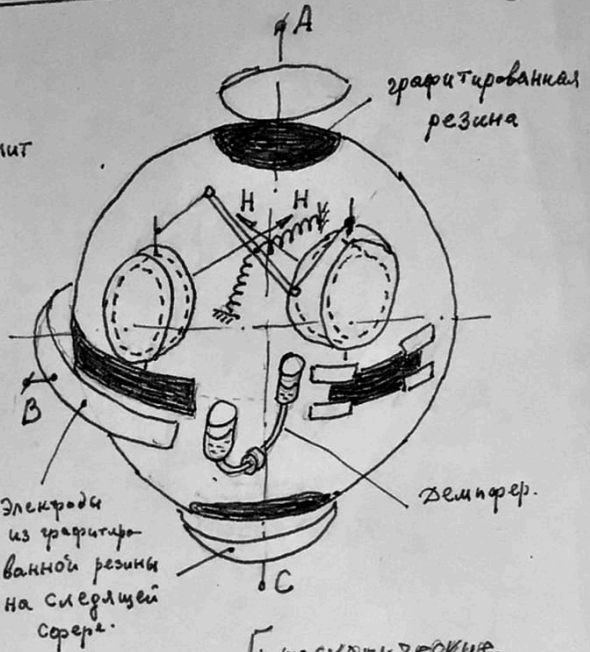
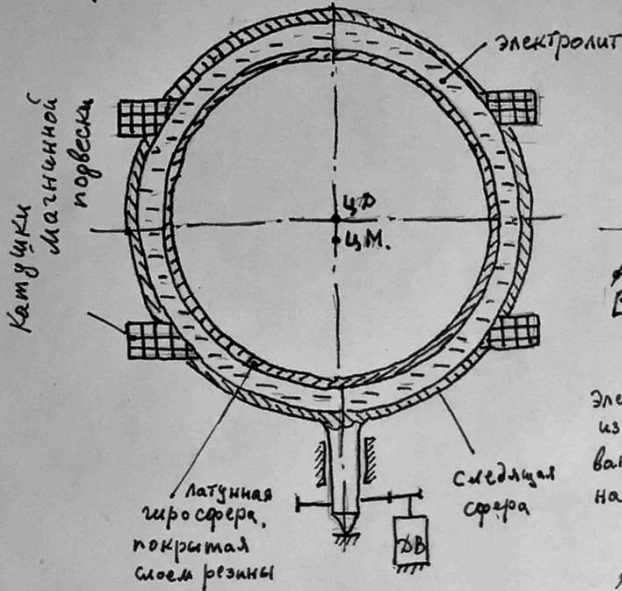
В хороших опорах либо цапфа, либо камень имеют строго возвратно-поступательное движение (другие движения обычно возникают из-за неодинаковых зазоров и толщин мембран в верхней и нижней частях или присутствует смещение центра масс относительно оси цапфы).

Важный параметр виброопоры - она потребляет очень малую мощность (не превышает 0,05 Вт, т.е. виброопоры практически не нагревают прибор и они малогабаритные). Недостаток виброопор - зазор между цапфой и камнем выбирается малым (3 - 5 мкм).

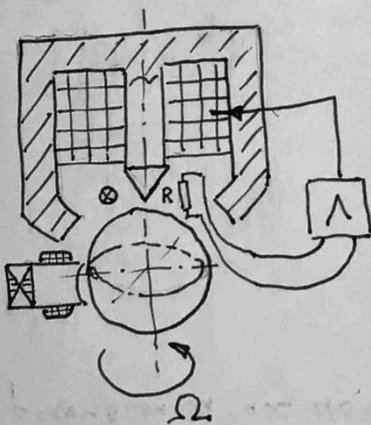
Рис. в левом нижнем углу - на поплавок надеты два магнитопровода (конические роторы 4 и статоры в виде электромагнитов 2 с катушками - коническая форма нужна для центрирования не только в радиальном, но и в осевом направлении).

Магнитные подвесы

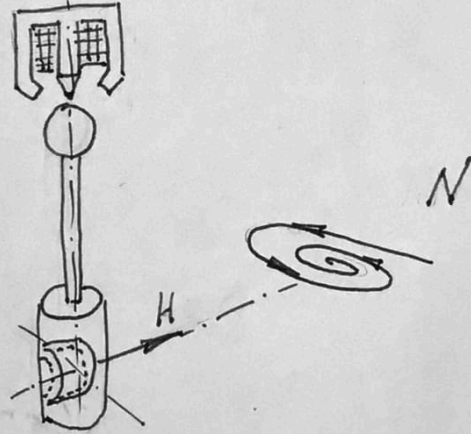
Гироскопичес Анштютца



Центрифуга Билса



Наземный ширококомпас



Есть два типа подвесов - магнитостатические (на const магнитах).

время: ~1:30:00 -2:12:00

Верхний правый рисунок: Гирокомпас Аншютца представлял собой сферу диаметром около 40 мм, внутри которой располагались 2 гиросомотора с асинхронными двигателями. 2 гиросомотра были связаны между собой антипараллелограммным механизмом, который был связан с корпусом пружинной связью. Два таких гиросомотра вели себя как единый гиросомотр с кинетическим моментом H , который всегда соответствовал строго одному общему направлению (С.Ф. показывает в этот момент направление, параллельное АС).

//см. дополнительно Пельпор “Гироскопические системы” часть II, изд. 1971 г., глава VI пар. 7 “Двухромоторный гиросомотр”//

Также внутри сферы есть демпфер, который представлял собой 2 сосуда, заполненных ртутью и соединенных тонкой трубкой с регулируемым капилляром (см рис.: небольшой цилиндрок на трубке). Капилляр перегораживал трубку и давал возможность больше или меньше перетекать жидкости из одного сосуда в другой. Перетекание ртути обеспечивало демпфирование колебаний компаса и сходящийся режим движения компаса к плоскости меридиана. (С.Ф. обводит в этот момент спираль на нижнем правом рисунке).

Верхний левый рисунок: Сфера обладала необходимыми гироскопическими свойствами для нахождения плоскости меридиана, но её надо было подвесить так, чтобы не было никаких вредных внешних моментов, действующих на эту сферу. Поэтому Аншютц поместил сферу в закрытый корпус, заполненный жидкостью. При этом объем сферы с гиросомотрами внутри выбирался так, чтобы средняя плотность сферы и плотность жидкости вокруг нее были одинаковы, т.е. обеспечивалось условие нулевой плавучести сферы. Зазор между корпусом и сферой делался маленьким и заполнялся смесью глицерина и дистиллированной воды, в которую добавлялась соль. Полученная жидкость являлась электролитом и была способна пропускать электрический ток. Делать токоподводы к центральной сфере было нельзя, т.к. она должна была поворачиваться на большие углы (была бы большая деформация токоподводов, возникали бы возмущающие моменты тяжения токоподводов). Аншютц придумал сделать сферу из латуни (хороший электропроводящий материал) и покрыть сверху поверхность тонким слоем резины (хороший изолятор). В этом резиновом покрытии (желтоватом) имеются черные области графитированной резины (резина с большим добавлением сажи, способна проводить электрический ток): полюсные шапки и поясок в экваториальном сечении (см. верхний правый рисунок). Напротив этих участков выполнены такие же участки на корпусе (поплавковой камере) гиросомотра. К этим шапкам на корпусе подведены фазы А, В, С питания гиросомотров. Т.к. зазор между шапкой на корпусе и шапкой на сфере маленький, а площадь шапки большая, то через жидкость можно передать очень большой ток. Частично ток

будет утекать через жидкость с фазы А на фазу В, но т.к. путь между фазами по жидкости длинный, щель малая, то сопротивление пути будет большим, а утечка тока незначительной. Подав фазы А, В, С на сферу, можно разгонять гиromоторы, не имея металлических изогнутых токоподводов к подвижной части прибора.

Сфера плавает в жидкости и может приплыть к любой стенке, поэтому ее надо центрировать. Для центрирования сферы были сделаны катушки магнитной подвески (С.Ф. называет их “катушками магнитного дутья”). Катушки запитывались высокочастотным (порядка 400 Гц) переменным током. Вектор переменного магнитного поля, создаваемого катушкой, направлен то вверх, то вниз. Магнитное поле, создаваемое катушкой, замыкаясь, пересекает участок латунной сферы и наводит в сфере кольцевой ток Фуко, который в свою очередь создает переменное магнитное поле. Это переменное поле взаимодействует с магнитным полем катушки возбуждения и создает силу отталкивания контура с током Фуко (латунная сфера) от возбуждающего контура. Силы отталкивания создаются обеими катушками. Если сфера находится между катушками на одинаковом расстоянии, то силы, создаваемые катушками взаимно компенсируются. Если сфера начинает тонуть, то ток Фуко в нижней части латунной сферы усиливается и отталкивающая сила нижняя возвращает поплавков в центральное положение.

Сама сфера имела нижнюю маятниковость, центр давления (точка подвеса маятника) находился чуть выше центра масс. Аншютц сделал компас невозмущаемым. При ускоренных перемещениях основания (корабля, в примере С.Ф.), особенно при качке, когда возникают большие ускорения, к центру масс прилагается инерционная сила, которая заставляет маятник качаться вокруг оси подвеса. Качается он не как твердое тело, а медленнее из-за наличия гироскопа, с большим периодом. Аншютц сделал период колебаний сферы равным $84.4'$ - период колебаний математического маятника, у которого расстояние от точки подвеса до массы, укрепленной на длинном плече, равно радиусу Земли. Тогда центр масс будет находиться в центре Земли. Если перемещать такой гироскопас вокруг Земли с любым ускорением точки подвеса, то эти ускорения не приведут к возникновению инерционных сил, возмущающих маятник.

Если корабль начинает менять свой курс, тогда корпус прибора будет разворачиваться вместе с кораблем и жидкость, находящаяся между корпусом и внутренней сферой, будет увлекаться в движение, т.к. частички жидкости прилипают к внешнему корпусу, приводят саму жидкость в движение, она будет увлекать с собой внутренний поплавок, создавая возмущающий момент. Следовательно, гироскопас работать не будет. Для решения этой проблемы, для обеспечения строго одной и той же ориентации корпуса прибора по отношению к

внутренней сфере, наружную сферу (корпус прибора) следует разворачивать следом за движением внутренней сферы (наружная сфера должна повторять только движение внутренней сферы и не менять своё движение в зависимости от разворотов по курсу корабля). Будут возникать не только гидродинамические моменты при рассогласовании наружной сферы и внутренней (моменты тяжения из-за неоднородности электрического поля под элементами передачи тока, магнитные тяжения, тепловые процессы...) Решение: корпус должен следовать за внутренней сферой и угловое положение следящей сферы относительно внутренней сферы должно быть строго постоянным. Для реализации этого нужен был датчик углового положения внутренней сферы относительно наружной сферы. Для этого на поверхности внутренней сферы была сделана полоска из графитированной резины (см. верхний правый рисунок), а на следящем корпусе также были сделаны полоски из той же графитированной резины (на рисунке - белые прямоугольники). Между полосой на внутренней сфере и полосками на корпусе есть зазор, заполненный электролитом. (Далее см. рисунок с 5 прямоугольниками слева). Если полоска, расположенная на внутренней сфере, одинаково перекрывает правую AA_1 и левую BB_1 пары электродов, то сопротивления от точки А к A_1 и от точки В к B_1 будут одинаковы. AA_1 и BB_1 включают в мостовую схему, т.н. мостик Уинстона (см. рисунок справа), запитывают переменным током. Мост сбалансирован, если полоса на внутренней сфере находится в среднем положении. Если же полоса смещается в сторону AA_1 , то увеличивается площадь перекрытия, уменьшается сопротивление, а на противоположной стороне сопротивление увеличивается. Тогда баланс моста нарушается, с его диагонали снимается сигнал, пропорциональный углу рассогласования внутренней сферы относительно наружной сферы. При добавлении усилителя и двигателя получена следящая система, которая заставляла наружную сферу двигаться за внутренней сферой.

В 1927 году немецкая промышленность начала серийный выпуск этих приборов и поставки их на все флоты мира.

Центрифуга Бимса

(см нижний левый рисунок) //появилась из модели для исследования Бимсом прочностных свойств шарика из шарикоподшипника

В зазоре между шариком и цилиндрическим электромагнитом помещалась лампочка и фотосопротивление, сопротивление которого меняется при освещении. Лампочка горела, световой луч проходил через зазор, попадал на фотосопротивление, которое принимало некоторое значение. Фотосопротивление включалось в мостовую схему. При некотором освещении мост был сбалансирован. Если шарик опускался ниже, то увеличивался зазор, увеличивался

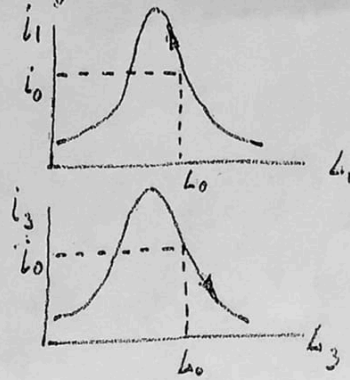
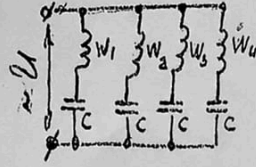
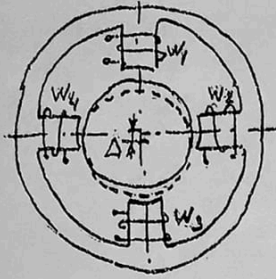
световой поток, увеличивалось освещение сопротивления, следовательно, мост разбалансировался и увеличивался ток электромагнита, увеличивалось магнитное поле и электромагнитная сила подтягивала шарик к центральному полюсу. Если шарик поднимался, то зазор уменьшался, уменьшался световой поток, уменьшалось освещение сопротивления, падал ток электромагнита, уменьшалось магнитное поле и шарик под действием силы тяжести опускался вниз. Так шарик вывешивался относительно электромагнита строго на постоянном расстоянии.

Бимс использовал статор, которым создавал вращающееся магнитное поле, которым раскручивал шарик до больших оборотов (по некоторым данным до нескольких миллионов оборот в минуту), пока при некоторой скорости шарик не разрывался от действия центробежных сил. По скорости, при которой происходил разрыв, можно было определить напряжения, при которых разрывался шарик.

На базе подвеса Бимса делаются наземные гироскопы (*нижний правый рисунок*). Гироскоп представляет собой шарик с таким же видом подвеса, какой использовал Бимс (оптика и сопротивление следящей системы могут быть реализованы иначе). К шару присоединена штанга, на конец которой вешается корпус гироскопа. Получается гироскопический маятник с точкой подвеса, совпадающей с центром шарика. Принцип действия маятникового гироскопа: кинетический момент удерживает корпус в неподвижном положении относительно Земли, которая вращается с некоторой скоростью, из-за которой наблюдается отклонение, т.к. точка контакта вместе с Землей перемещается, штанга отклоняется от вертикали, появляется маятниковый момент, под действием которого гироскоп начинает прецессировать. Эта прецессия обеспечивает круговое движение, траектория которого представляет собой спираль, которая в итоге приходит к плоскости меридиана. (для получения траектории используют зеркальце на корпусе, луч от него идет по экрану по такой траектории). О положении плоскости меридиана обычно судят по крайним точкам эллипса (*точки лежат по разным сторонам от линии вектора H*).

P.s. Аншютц сделал пассивный магнитный подвес (без О.С.), нет никаких систем автоматического регулирования, которыми управляют положением тела в магнитном поле. Бимс сделал активный магнитный подвес (с О.С.), т.е. датчик положения тела, регулирующее устройство, усилитель, формирующий ток в регулирующем устройстве.

Resonance magnetic bearing

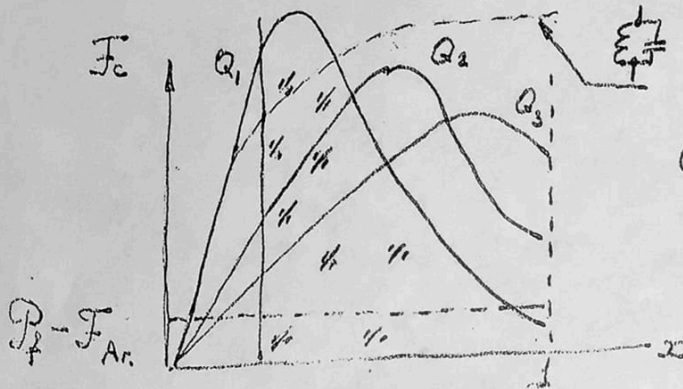


①

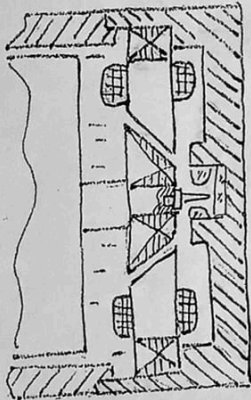
$$L = L_0 \text{ if } \Delta = 0; \delta = \delta_0$$

$$i = \frac{U}{\sqrt{L^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

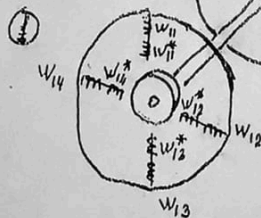
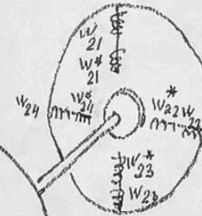
$$F_c = K_{MB} (Q-2) \cdot \frac{x}{1 + K_1 x^2 + K_2 x^4}; \quad x = \frac{\Delta}{\delta_0}$$



$$Q_1 > Q_2 > Q_3$$



②



время: ~2:17:00-2:34:42

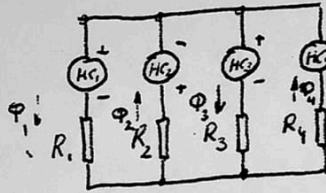
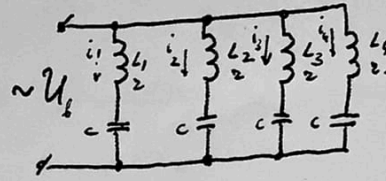
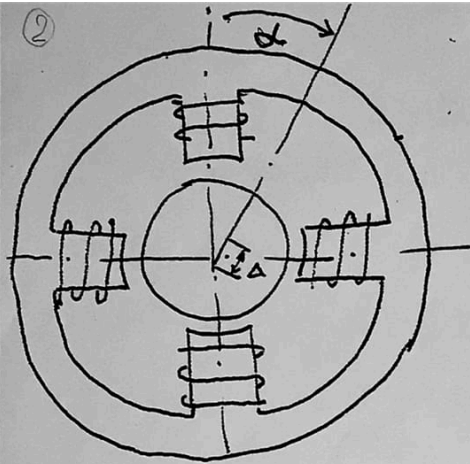
//Чарльз Дрейпер, Массачусетский технологический институт. Занимался проектированием двухступенных ПИГов. Начинал с камниевых опор, затем пришел к выводу, что это не совсем то, что нужно (на тот момент не было виброопор, его не устраивал момент трения), и создал параметрический магнито-резонансный подвес.

Верхний левый рисунок: Магнитный подвес. Ротор и статор из магнитомягкого материала. Если ротор опускается, то зазор между ним с нижним полюсом становится малым, поток легко замыкается через боковые полюса 2, 4, индуктивность внизу увеличивается. Индуктивность верхнего полюса становится малой, т.к. ротор от него удаляется. При рассмотрении вертикального движения ротора относительно статора индуктивность боковых полюсов не меняется.

Верхний правый рисунок: О настройке резонансного контура. Графики зависимости тока i_1 в верхней катушке 1 и тока i_3 в нижней катушке 3 от индуктивности. Ток в индуктивности в электрической схеме в центре определяется по формуле под ней. Обычно рассматривают зависимость тока от частоты, но можно и от индуктивности. При некотором значении наблюдается резонанс, затем ток идет на спад. Если выбрать индуктивность (при фиксированной емкости) такую, чтобы находиться на нисходящей ветви резонансной характеристики (из зарезонансной области), тогда при центральном положении ротора, когда индуктивности катушек на 1 и 3 полюсах одинаковые, токи верхней катушки 1 и нижней катушки 3 будут одинаковыми i_0 , соответственно, электромагнитные силы, притягивающие ротор вверх и вниз будут одинаковыми и будут взаимно компенсироваться. Если ротор опускается вниз, то индуктивность нижней катушки 3 увеличивается, а ток в катушке 3 уменьшается, следовательно, уменьшается магнитный поток. Индуктивность катушки на верхнем полюсе 1 уменьшается, следовательно, ток в катушке увеличивается, увеличивается магнитный поток. В результате ротор восстанавливает прежнее положение.

Q: Зачем нужна емкость в магнитном подвесе? - Если ротор опускается вниз, индуктивность нижней катушки 3 увеличивается, следовательно, возрастает индуктивное сопротивление, индуктивность верхней катушки 1 уменьшается, индуктивное сопротивление уменьшается. Т.к. в верхней катушке уменьшается индуктивное сопротивление, то увеличивается ток, в нижней катушке при увеличении индуктивного сопротивления ток уменьшается. Тогда вроде бы должна появиться сила, которая восстанавливает ротор в центральное положение. Однако это не совсем так. Если поместить металлический шарик между двух одинаковых электромагнитов, стоящих встречно друг с другом, то шарик

притянется к одному из них - положение неустойчивого равновесия, которое обусловлено тем, что электромагнитные силы зависят не только от силы тока, но и от расстояния. Изменений индуктивности, которые получаются при перемещении ротора, недостаточно для создания центрирующей силы. Тогда нужно создать резонансный контур с большой добротностью (высота резонансного подъема должна быть достаточно большой), чтобы крутизна зависимости тока от индуктивности была большой, тогда и крутизна силы в зависимости от разности индуктивностей также будет большой. **Разность крутизны изменения центрирующей силы за счет изменения токов должна превышать дестабилизирующую силу, которая притягивает ротор к полюсу за счет того, что уменьшается только расстояние между полюсом и ротором. Т.е. без емкости, при малой добротности магнитный подвес не работоспособен.** (с.ф. акцентирует на внимание этом моменте, т.к. про роль емкости забывают).



$$R_1 = \frac{\delta_0 - \Delta \cos \alpha}{S \mu} = \frac{\delta_0}{S \mu} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta_0} \cos \alpha\right)$$

$$R_2 = R_0 (1 - X \sin \alpha); \quad R_3 = R_0 (1 + X \cos \alpha)$$

$$R_4 = R_0 (1 + X \sin \alpha)$$

$$HC_1 = W i_1; \quad HC_2 = W i_2 \dots$$

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_4 = 0 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = HC_1 + HC_2 \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = HC_1 - HC_3 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_4 R_4 = HC_1 + HC_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_1 = i_1 Z + \frac{1}{C} \int i_1 dt + W \frac{d\Phi_1}{dt} \\ U_2 = i_2 Z + \frac{1}{C} \int i_2 dt + W \frac{d\Phi_2}{dt} \\ \dots \end{cases}$$

$$Z = Z_{\text{каждый}} + Z_{\text{стали вносимое}}$$

$$\dot{\Phi}_{1,3} = \frac{W U}{R_0} \frac{Z (1 \pm X \cos \alpha) + j [L_0 \omega - \frac{1}{C \omega} (1 \pm X \cos \alpha)]}{[Z + j(L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})]^2 - (Z - j \frac{1}{C \omega})^2} \frac{x^2}{2}$$

$$\Phi_{2,4} = \dots \quad (\text{замена } \pm X \cos \alpha \text{ на } \pm X \sin \alpha); \quad L_0 = \frac{W^2}{R_0}$$

$$F_K = \frac{\Phi_K^2}{2 \mu_0 S}; \quad \Phi_K^2 = \dot{\Phi}_K \cdot \dot{\Phi}_K^*$$

$$F_{\text{эм}} = (F_1 - F_3) \cos \alpha + (F_2 - F_4) \sin \alpha = \left(\frac{W U}{R_0}\right)^2 \frac{1}{2 \mu_0 S} \frac{4 [Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) \frac{1}{C \omega}] X}{[Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})^2 + \frac{2 X^2}{2} + \frac{(1}{C \omega})^2 \frac{X^2}{2}]^2 + [2 Z (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) + \frac{2 X^2}{C \omega}]^2}$$

время: 2:35:35-2:55:25

Рассмотрим расчет магнитного подвеса.

Верхний левый рисунок. Ротор и статор шихтованные, т.е. набраны из пластин магнитомягкого материала для получения большой резонансной характеристики, высокой добротности, что возможно, только если токи Фуко будут малыми.

Пусть ротор имеет некоторое смещение относительно центра между полюсами Δ , которое ориентировано относительно первого полюса под углом α .

Верхний правый рисунок. Электрические цепи. Источник питающего напряжения U_1 , есть индуктивности L_1-L_4 , одинаковые емкости C .

Определим магнитное сопротивление воздушных зазоров R_1-R_4 . (формулы под левым верхним рисунком). Номер сопротивления соответствует номеру полюса. Здесь δ_0 - зазор между полюсами и ротором при центральном положении ротора;

S - площадь полюса;

μ - относительная магнитная проницаемость среды;

$x = \frac{\Delta}{\delta_0}$ - относительное изменение зазора;

$R_0 = \frac{\delta_0}{S\mu}$ - сопротивление зазоров при центральном положении ротора.

Данные формулы для R справедливы для малых зазоров.

Для определения магнитных сил нужны магнитные поля. Для этого рассмотрим эквивалентную магнитную цепь датчика. В нее входят источники намагничивающей силы, которая равна току в катушке на число витков ($HC=wi$), и сопротивление в зазоре R .

Система уравнений слева:

Составляется уравнение Кирхгофа для магнитной цепи.

$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 = 0$ (С.Ф. поправляет свою ошибку, 2:43:10)

Включение обмоток в электрической цепи: для обмоток 1, 3 точки сверху (северные полюса), для 2, 4 - снизу (южные полюса).

Составляются уравнения для нескольких контуров.

Получают 4 уравнения с четырьмя неизвестными, решать которые проблематично, т.к. в них входят намагничивающие силы, зависящие от токов i_1-i_4 , которые неизвестны. Тогда решают доп. уравнения для определения токов. Уравнения составляют по электрической цепи (система уравнений справа). Последний член каждого уравнения - ЭДС, наводимая в самой обмотке.

Здесь: сопротивление r включает в себя сопротивление катушки и сопротивление, вызванное токами Фуко $r_{стали}$ вносимое.

Получают 8 уравнений с 8 неизвестными, для решения которых используют метод комплексных амплитуд, согласно которому операцию дифференцирования можно заменить на операцию домножения на мнимую единицу, а операцию

интегрирования операцией деления. Тогда получают комплексные выражения для потоков и токов. (громоздкая формула с Φ с точкой).

Здесь L_0 - индуктивность при нулевом положении ротора.

$\Phi_k^\#$ с точкой - комплексно сопряженное Φ_k с точкой.

В формуле для электромагнитной силы знаменатель положителен, знак силы зависит от числителя.

/Подробно этот лист рассматривается дальше у Наташи/

$$\zeta^2 - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \frac{1}{C\omega} < 0$$

условие устойчивости.

Настройка на ζ точку половинной мощности:

$$P_{\text{рад}} = \frac{1}{2} P_{\text{рез}}; \quad P_{\text{рез}} = J_{\text{рез}}^2 \cdot \zeta = \frac{U_0^2}{\zeta}$$

$$P_{\text{рад}} = J_{\text{рад}}^2 \cdot \zeta = \frac{U_0^2 \cdot \zeta}{\zeta^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2} = \frac{U_0^2}{2\zeta}$$

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = \zeta$$

$$\frac{L\omega}{\zeta} = Q$$

Условие устойчивости $Q > 2$

$$F_y = \left(\frac{\omega U}{\zeta R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} \cdot \frac{x}{1 + (Q-1)x^2 + \frac{Q^2(Q-2)^2 + 4(Q-1)^2}{16} x^4}$$

при малых x

$$F_y = \left(\frac{\omega U}{\zeta R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} x$$

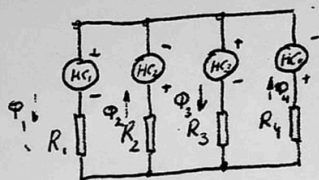
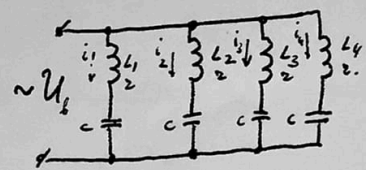
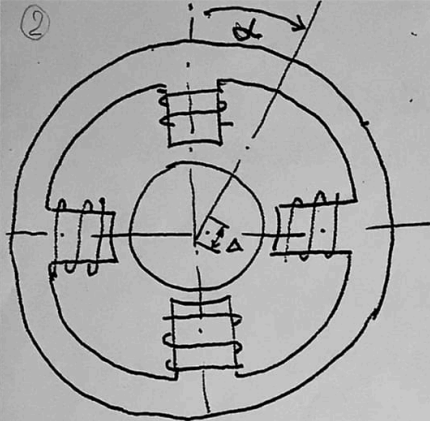
время: 2:55:25-

Условие устойчивости. Чтобы подвес работал, сила должна быть направлена противоположно смещению. Отсюда условие устойчивости. Оно выполняется,

только если индуктивное сопротивление $L_0 \omega$ больше емкостного сопротивления $c_0 \omega$, т.е. только в зарезонансной зоне.

/Подробно этот лист рассматривается дальше у Наташи/

9) Магнитные подвесы (расчёт жёсткости) (Лукьянова)



$$R_1 = \frac{\delta_0 - \Delta \cos \alpha}{S \mu} = \frac{\delta_0}{S \mu} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta_0} \cos \alpha\right)$$

$$R_2 = R_0 (1 - X \sin \alpha); \quad R_3 = R_0 (1 + X \cos \alpha)$$

$$R_4 = R_0 (1 + X \sin \alpha)$$

$$H_{C1} = W i_1; \quad H_{C2} = W i_2 \dots$$

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_4 = 0 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = H_{C1} + H_{C2} \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = H_{C1} - H_{C3} \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_4 R_4 = H_{C1} + H_{C4} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_1 = i_1 Z + \frac{1}{C} \int i_1 dt + W \frac{d\Phi_1}{dt} \\ U_2 = i_2 Z + \frac{1}{C} \int i_2 dt + W \frac{d\Phi_2}{dt} \\ \dots \end{cases}$$

$$Z = Z_{\text{катушки}} + Z_{\text{стали вносимое}}$$

$$\dot{\Phi}_{1,3} = \frac{W U}{R_0} \frac{Z (1 \pm X \cos \alpha) + j [L_0 \omega - \frac{1}{C \omega} (1 \pm X \cos \alpha)]}{[Z + j(L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})]^2 - (Z - j \frac{1}{C \omega})^2} \frac{\alpha^2}{2}$$

$$\Phi_{2,4} = \dots \quad (\text{замена } \pm X \cos \alpha \text{ на } \pm X \sin \alpha); \quad L_0 = \frac{W^2}{R_0}$$

$$F_K = \frac{\Phi_K^2}{2 \mu_0 S}; \quad \Phi_K^2 = \dot{\Phi}_K \cdot \dot{\Phi}_K^*$$

$$F_{\text{эм}} = (F_1 - F_3) \cos \alpha + (F_2 - F_4) \sin \alpha = \left(\frac{W U}{R_0}\right)^2 \frac{1}{2 \mu_0 S} \frac{4 [Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) \frac{1}{C \omega}] X}{[Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})^2 + Z^2 \frac{\alpha^2}{2} + (\frac{1}{C \omega})^2 \frac{\alpha^2}{2}]^2 + [2Z(L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) + \frac{2Z \alpha^2}{C \omega}]^2}$$

Магнитный шарик со всех сторон окружен полюсами. В качестве его датчика положения использовалась тонкая металлическая фольга, которая через слой диэлектрика наклеивалась на торцы полюсов, и образовывалась ёмкость, в которой создавался рабочий зазор между

шариком и емкостной обкладкой. Далее, разность перемещений (С.Ф. показывает на полюса по вертикальной оси) подавалась на усилитель и подавался ток на обмотки на полюсах (С.Ф. показывает на полюса по горизонтальной оси). Т.е. если, к примеру, шарик смещается вправо, то ток, вырабатываемый на левой катушке пропорционально смещению, возвращает его влево.

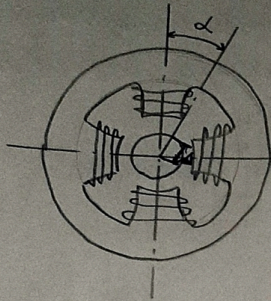
Особенность - управление на постоянном токе (на шарик действовали постоянные магнитные поля). Этот магнитный поток протекает через тело шарика и создает на нем области намагничивания. Это магнитное поле в теле шарика может взаимодействовать с управляющим магнитным полем и удерживать шарик в нейтральном положении.

Магнитное подвеса (расчет магнитности)

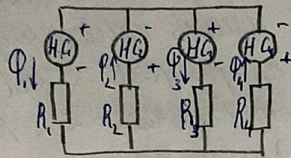
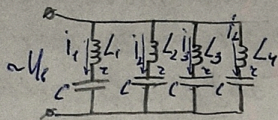
на
ту

Расчет магнитного подвеса

(ротор статора)



Ротор из магнитоматериала магн-19. Угол α между осью статора, тем же углом угол подвеса (периметр 50 мм, 79 мм). Смотрим с точки зрения магнит. проницаемости.



Ур-е Кирхгофа:

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 = 0 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = H L_1 + H L_2 \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = H L_1 - H L_3 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_4 R_4 = H L_1 + H L_4 \end{cases}$$

Ур-е для напряжения:

$$\begin{cases} U_0 = i_1 Z + \frac{1}{C} \int i_1 dt + W \frac{d\Phi_1}{dt} \\ U_0 = i_2 Z + \frac{1}{C} \int i_2 dt + W \frac{d\Phi_2}{dt} \\ \dots \end{cases}$$

8 ур-й совместно решаются методом комплексных амплитуд (?)

Комплекс. временн. для магн. потоков

$$\Phi_{1,3} = \frac{W U_0}{R_0} \frac{z(1 \pm \chi \cos \alpha) + j[L_0 \omega - \frac{1}{C\omega}(1 \pm \chi \cos \alpha)]}{[z + j(L_0 \omega - \frac{1}{C\omega})]^2 - (z - j \frac{1}{C\omega})^2 \frac{\chi^2}{2}}$$

$$\Phi_{2,4} = \dots (\text{замена } \pm \chi \cos \alpha \text{ на } \sin \alpha); \quad \frac{W U_0}{R_0} = \frac{W U_0}{R_0}$$

Сила электромагнитная орг-цы как сила притяжения

$$\begin{aligned} F_{ЭМ} &= (F_1 - F_3) \cos \alpha + (F_2 - F_4) \sin \alpha = \\ &= \left(\frac{W U_0}{R_0}\right)^2 \frac{1}{2 \mu_0 S} \frac{1}{[z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C\omega})^2 + \frac{\chi^2}{2} + (\frac{1}{C\omega})^2 \frac{\chi^2}{2}]^2 + \frac{2z \chi^2}{C\omega}} \end{aligned}$$

$$\zeta^2 - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \frac{1}{C\omega} < 0$$

условие устойчивости.

Настройка на ζ точку половинной мощности:

$$P_{\text{рад}} = \frac{1}{2} P_{\text{рез}}; \quad P_{\text{рз}} = J_{\text{рз}}^2 \cdot \zeta = \frac{U_0^2}{\zeta}$$

$$P_{\text{рад}} = J_{\text{рад}}^2 \cdot \zeta = \frac{U_0^2 \cdot \zeta}{\zeta^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2} = \frac{U_0^2}{2\zeta}$$

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = \zeta$$

$$\frac{L\omega}{\zeta} = Q$$

Условие устойчивости $Q > 2$

$$F_y = \left(\frac{\omega U}{\zeta R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} \cdot \frac{x}{1 + (Q-1)x^2 + \frac{Q^2(Q-2)^2 + 4(Q-1)^2}{16} x^4}$$

при малых x

$$F_y = \left(\frac{\omega U}{\zeta R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2\mu S} x$$

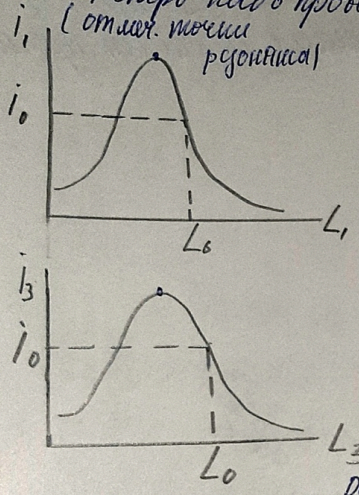
Активный маломощный ...

Максимум силы ~~тока~~ ^{магнет} идет поперек оси как и центр, так и от центра.

Для того, чтобы сила шла как-то к центру, ~~тогда~~ $\neq 0$:

Индуктивное сопротивление должно быть больше емкостного - условие устойчивости. т.е. резонансный контур должен быть настроен на ω точку полевой мощности

Теперь надо провести определенное точное построение (отмеч. точки резонанса)



Вопрос в том, когда мал. подвес будет иметь колебательную жесткость (так приращение силы $F_{эм}$ в зависимости от величины Δ). Две $F_{эм}$ исследуют на экстремум.

Максимум подвеса работает с той жесткостью только если ее погреш. мощность равна равна половине от мощности резонанса

$$P_{ред} = \frac{1}{2} P_{рез} = \frac{U_0^2}{2T}$$

$$\boxed{L_0 \omega = \frac{1}{C \omega} = Z} \quad \text{— условие настройки на } \omega \text{ — полевой мощности}$$

Коэффициент $Q = \frac{L \omega}{Z}$

Центр силы в мал. подвесе

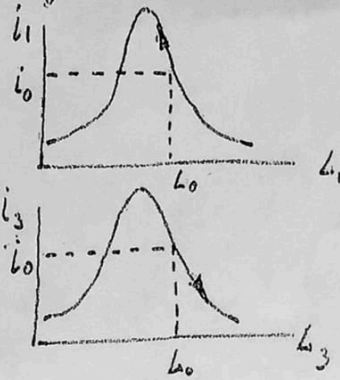
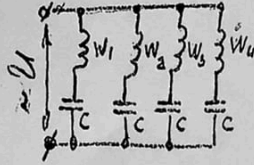
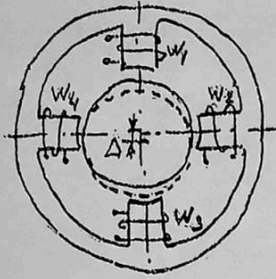
$$F_g = \left(\frac{W U}{T R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2 M_0 S} \cdot \frac{2}{1 + (Q-1)x^2 + \frac{Q^2(Q-2)^2 + 4(Q-1)^2 x^4}{16}}$$

при малых x

$$F_g = \left(\frac{W U}{T R_0} \right)^2 \frac{Q-2}{2 M_0 S} x$$

тут есть пояснение и к некоторой части следующей страницы

Resonance magnetic bearing

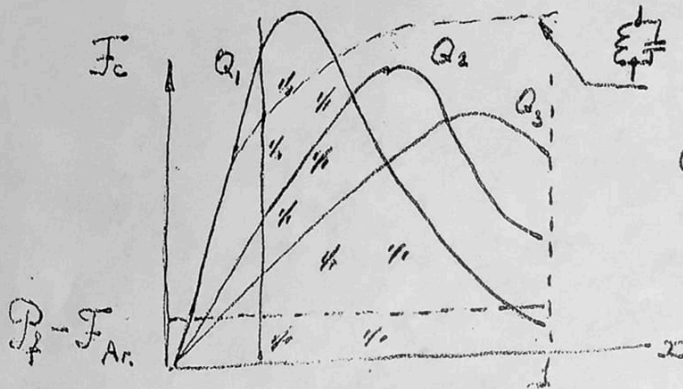


①

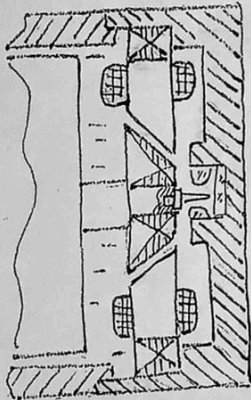
$L = L_0$ if $\Delta = 0; \delta = \delta_0$.

$$i = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

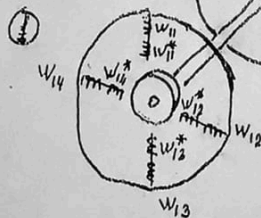
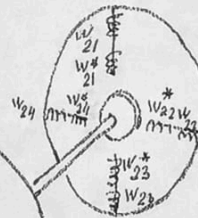
$$F_c = K_{MB} (Q-2) \cdot \frac{x}{1 + K_1 x^2 + K_2 x^4}; \quad x = \frac{\Delta}{\delta_0}$$

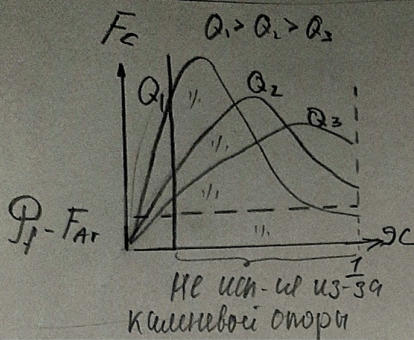


$Q_1 > Q_2 > Q_3$



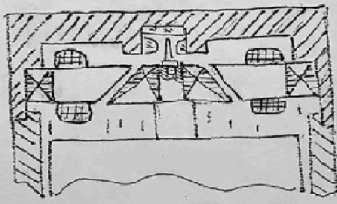
②



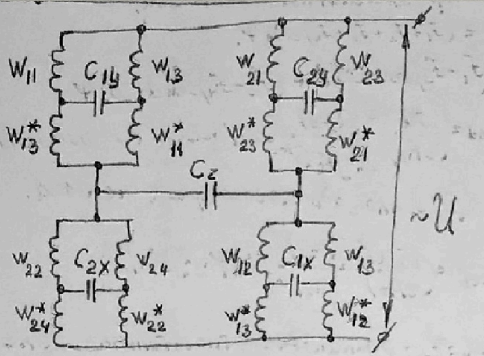


Нельзя не иметь боковой клин, тогда малое отклонение ротора вызовет большую F_c . Но при этом если поворачиваем на повороте, то от F_c почти ничего не остается \Rightarrow поковка не выскользает, так движение поковка ограничивается

Зазор 100 мкм



Может быть схема магнитного подвеса



C_z - опор-т обмотка устойчивости магнитного подвеса в аксиальном (?) направлении.
 C_{1y} - вертикал. канал I магнит. подвеса
 C_{1x} - гориз. канал I МП
 C_{2y} - вертикал. канал II МП
 C_{2x} - гориз. канал II МП

Хар-ки:

1. При центрировании подвеса, но U на электродах = 0, оно возраст.

при отклонении поковки

$$U_{C_2} = k \Delta z; U_{C_{1y}} = k \Delta y_1; U_{C_{1x}} = k \Delta x_1; U_{C_{2y}} = k \Delta y_2; U_{C_{2x}} = k \Delta x_2$$

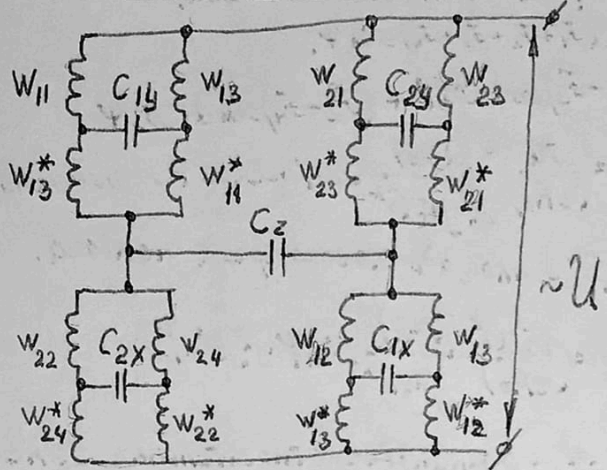
Для обеспечения боковой жесткости в аксиальном направлении изотавелиметров

Конденсатор ротор магнитного подвеса

3

тут есть пояснение и к верхней половине следующей страницы
 аксиальное = осевое

Bridge resonance magnetic bearing. ③

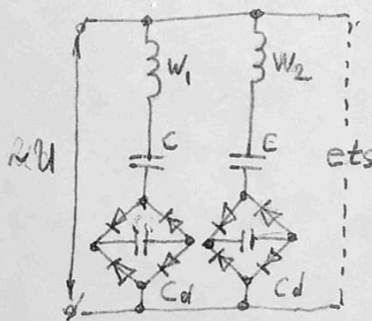
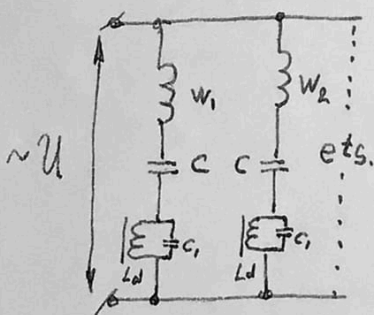


$$U_{C14} = K \Delta y_1 \quad U_{C1X} = K \Delta x_1 \quad U_{C24} = K \Delta y_2 \quad U_{C2X} = K \Delta x_2$$

$$U_{Cz} = K \Delta z$$

$$P_o \sim 1 \text{ Wt}^* ; K_{MB} = 0.01 \dots 0.1 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} ; M_o \neq 0$$

Damping by additional circuit

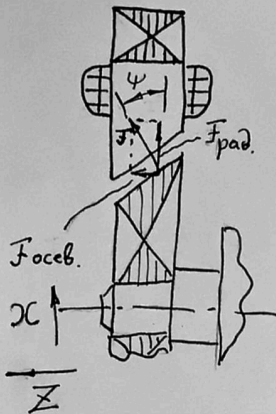


* У виброопоры ~ 0,05 Вт!

объяснение это второй половины страницы будет вместе с объяснением следующей страницы

(4)

Конусный ротор магнитного подвеса.



$$F_{осев} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \psi.$$

$$F_{рад} = (F_1 - F_3) \cos \alpha \cdot \cos \psi + (F_2 - F_4) \sin \alpha \cdot \cos \psi$$

$$F_{рад} = \left(\frac{\omega u}{2 R_0} \right)^2 \frac{(Q-2)}{2 \mu_0 S^*} \cos \psi \cdot \underbrace{X \cos \psi}_{\text{изменение зазора}}$$

S^* - площадь косога среза полюса.

$$F_{осев} = \left(\frac{\omega u}{2 R_0} \right)^2 \frac{(Q-2)}{\mu_0 S^*} \sin \psi \cdot Z \sin \psi$$

при $X=Z$ - одинаковые относительные изменения

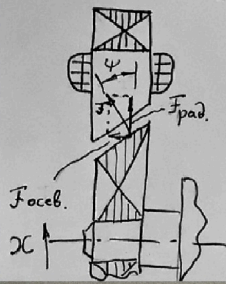
зазора $F_{рад} = F_{осев}$ при

$$\cos^2 \psi = 2 \sin \psi$$

Условие равновесности $\psi \approx 35^\circ$

$$X = \frac{\Delta_{рад}}{\delta_0_{рад}}$$

$$Z = \frac{\Delta_{осев}}{\delta_0_{осев}}$$



Мощность индукционного подвеса.

$$F_{осед} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \psi.$$

$$F_{раз} = (F_1 - F_3) \cos \psi \cdot \cos \psi + (F_2 - F_4) \sin \psi \cdot \cos \psi$$

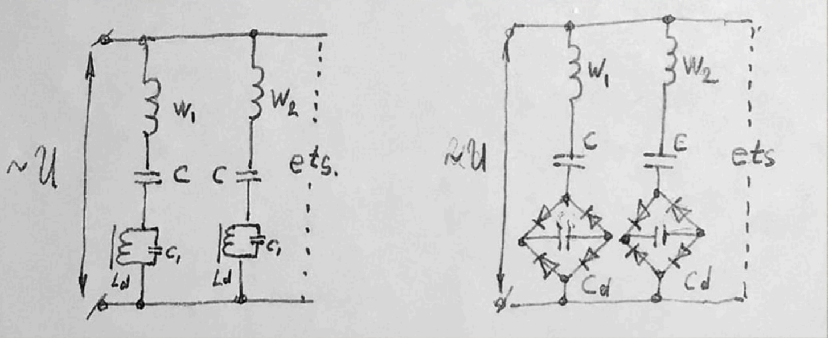
$$F_{раз} = \frac{(\omega U)^2}{2 R_0} \frac{(Q-2)}{2 \mu_0 S^*} \cos \psi \cdot X \cos \psi$$

и изменение зазора
 S^* - площадь косого среза полюса.

$$F_{осед} = \frac{(\omega U)^2}{2 R_0} \frac{(Q-2)}{\mu_0 S^*} \sin \psi \cdot X \sin \psi$$

Магнитный подвес требует большого демпфирования. МП обеспечивают стабильное вертикальное положение. Без подвеса МП ~~функционирует~~

Цель обеспечивающая чистую работу магнит. подвеса на воздухе. Для этого он включен в цепь «фильтр-продув» - ~~нужно~~ ~~направить~~ резонансный контур (в нем резонанс на телед-те итмалевого напряжения). В частот. области этот контур ведет себя так же, как демпфирующ. звено на пост. токе. Так же есть вертикал. подвес на воздухе с помощью дегререну. емкости

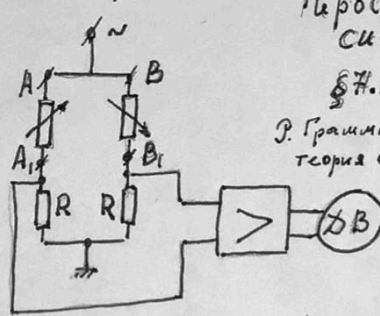
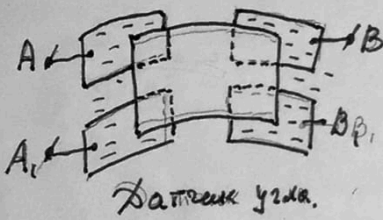
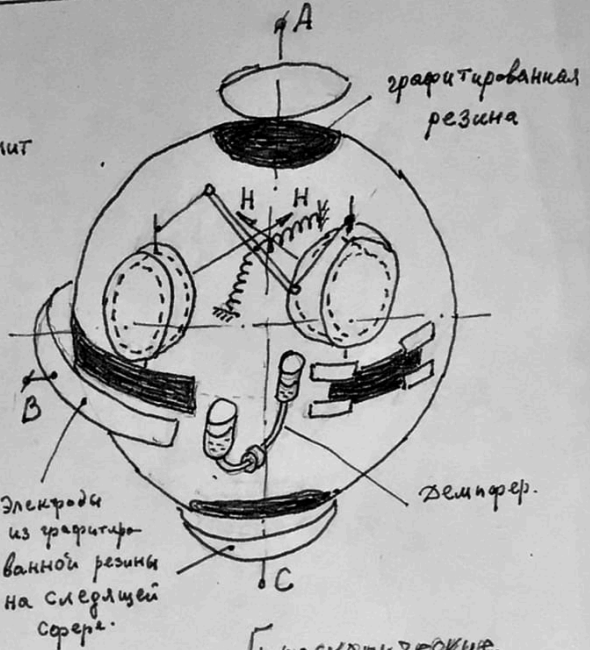
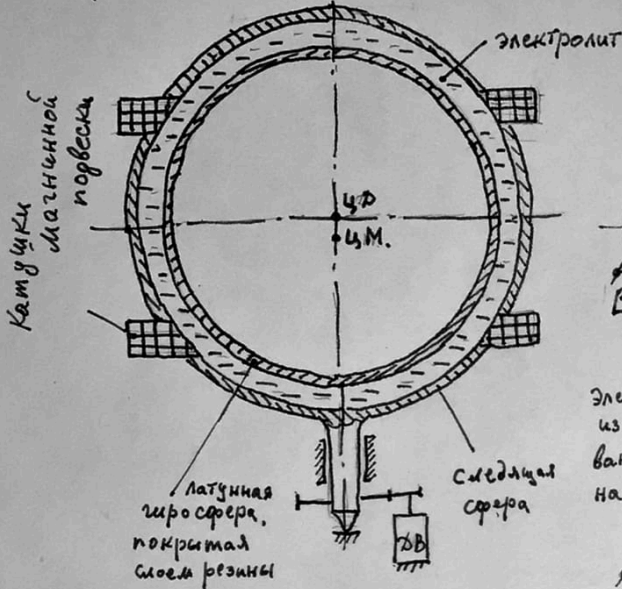


Магнит. подвес имеет 2 недостатка

1. Большая индуктивность, при нулевом сопротивлении ротора имеет большой ток (около 4 Ватт)
2. МП имеет большой момент инерции

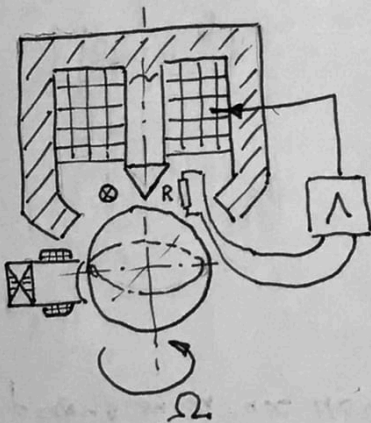
Магнитные подвесы

Гироскопичес Анштютца.

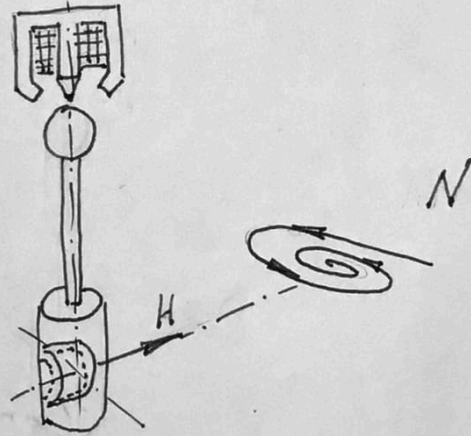


Гироскопические системы 2, II
§ 7.11 пог. ред. Лейсперг ДС
Р. Граммель Гироскоп и теория его применения.

Центрифуга Билса



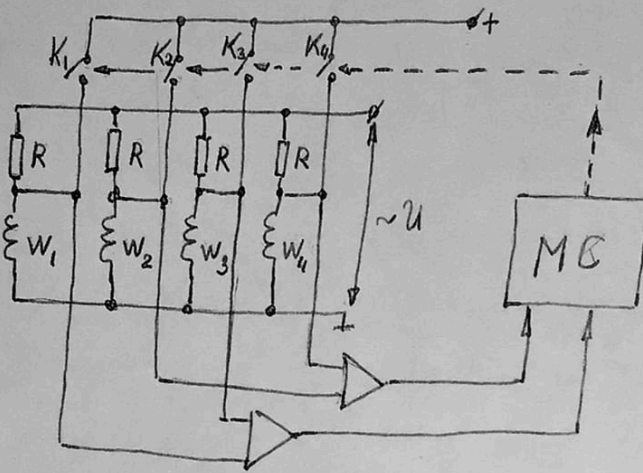
Наземный гироскоп



станция в моей лекции не рассматривалась

Active magnetic bearing

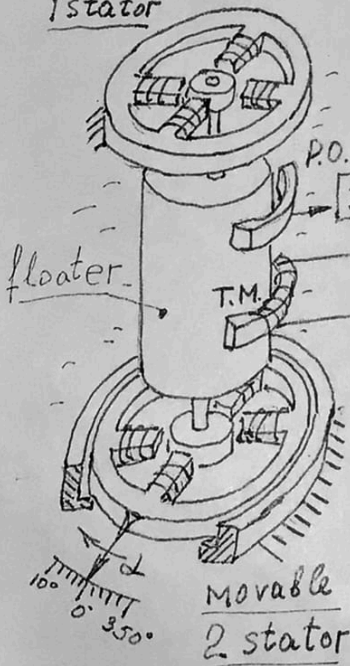
3



$$K_{MB} \sim 0.1 \dots 1 \frac{N}{\mu m} ; P_o \sim 0.1 Wt ; M_o \rightarrow 0$$

TEST OF MAGNETIC BEARING

fixed stator



$M_1, M_2(\alpha)$ - revolting moments of 1 and 2 magnetic bearing

$$J_{TM} K_{TM} = M_1 + M_2(\alpha)$$

$$M_1 = \text{const}$$

$$U_{out} = J_{TM} R = \frac{M_1 + M_2(\alpha) \cdot R}{K_{TM}}$$

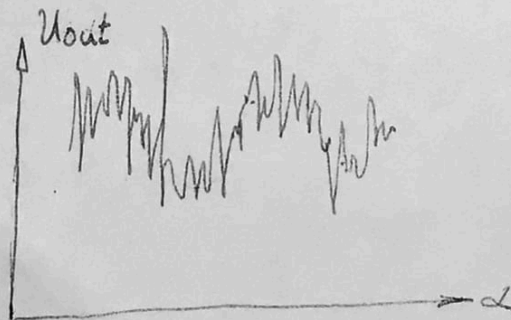
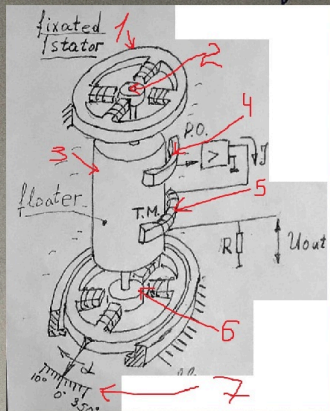


Схема относится к рисунку, вставленному в конспект. Поэтому текст справа от рисунка так же является пояснением к схеме.

Активный моментный подвес

И статор и ротор такие же, но катушки, расположенные на скалке изменили свое положение ротор, при включении катушек в шестую схему.



с

С I и IV катушек напряжение подается на нижний усилитель, а со II и IV на верхний. На входе усилителей подается полярное напряжение, пропорц. напр. пропорц. смещению ротора.

Сигнал поступает на микроконтроллер и обрабатывается управляющим сигналом. Он отсчитывает

за состояние 4-х каналов, которые могут выдать на положение поплавок.

Здесь обеспечивается ~~и~~ и необходимая мощность ($\approx 0,05$ Вт) и необходимой возмущающей момент.

Недостатком является, что в случае отказа усилителя или контроллера, широким перепадом работает. Поэтому делаем третью схему аппаратуры.

Установка для исследования центр-сил и моментов, которые создают МП

Установка состоит из:

- 1) Статор жестко закреплен в корпусе установки, ротор
- 2,6) Ротор $\times 2$
- 3) Поплавок
- 4) Датчик поворота конический (RO)
- 5) Моментный датчик (Т.М.)
- 7) НБ закреплен. статор.

(5)

7) Шкала отклонения статора

Принцип действия:

Если есть момент тяжения со стороны нижнего МД.

↓
Поворот поплавы

↓
Сигнал с ДУ.

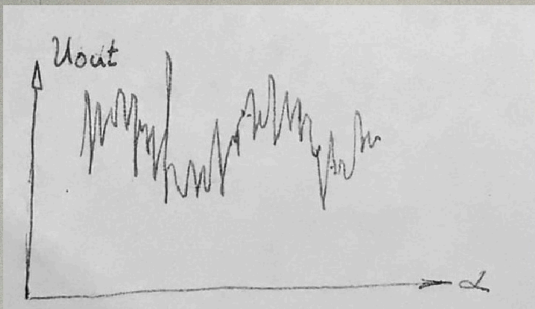
↓
Сигнал на усилитель

↓
Сигнал на ДМ

↓
Смещение с эталонного сопротивления, смещение напряжения, пропорциональное M_1 и M_2 (мощности)

$$U_{out} = I_{T.M} R = \frac{M_1 + M_2(\alpha)}{K_{T.M}} \cdot R ; M_1 = const$$

$M_2 = \text{изменяется}$



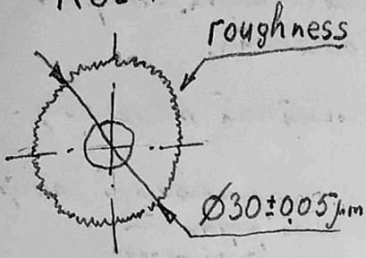
Из-за упругого поворота момента магнитного подвески, U_{out} имеет такой вид. (упр. поворот м-т возникает из-за неровностей ротора, который мот. зацепится за статор):

Elastic revolving moment of Magnetic bearing

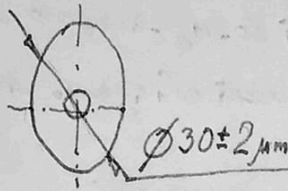


High frequency part

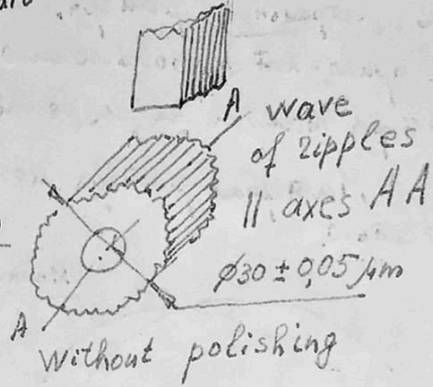
Rotor



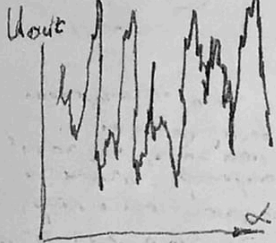
Low frequency part



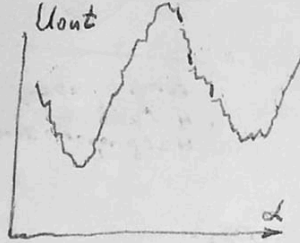
Slanted edge of pole



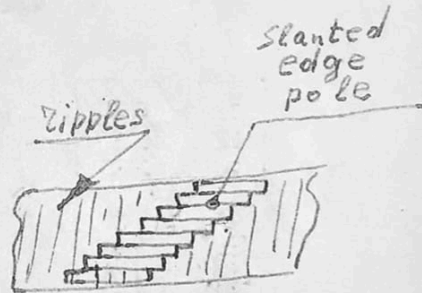
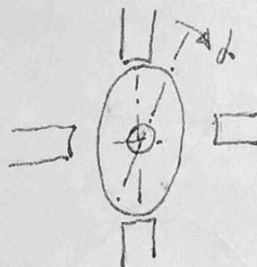
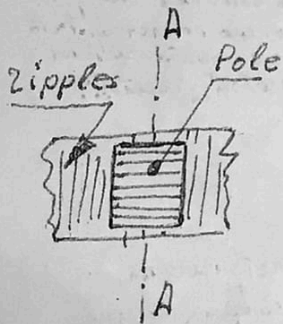
without polishing



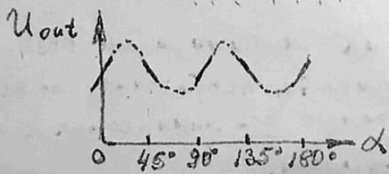
after polishing



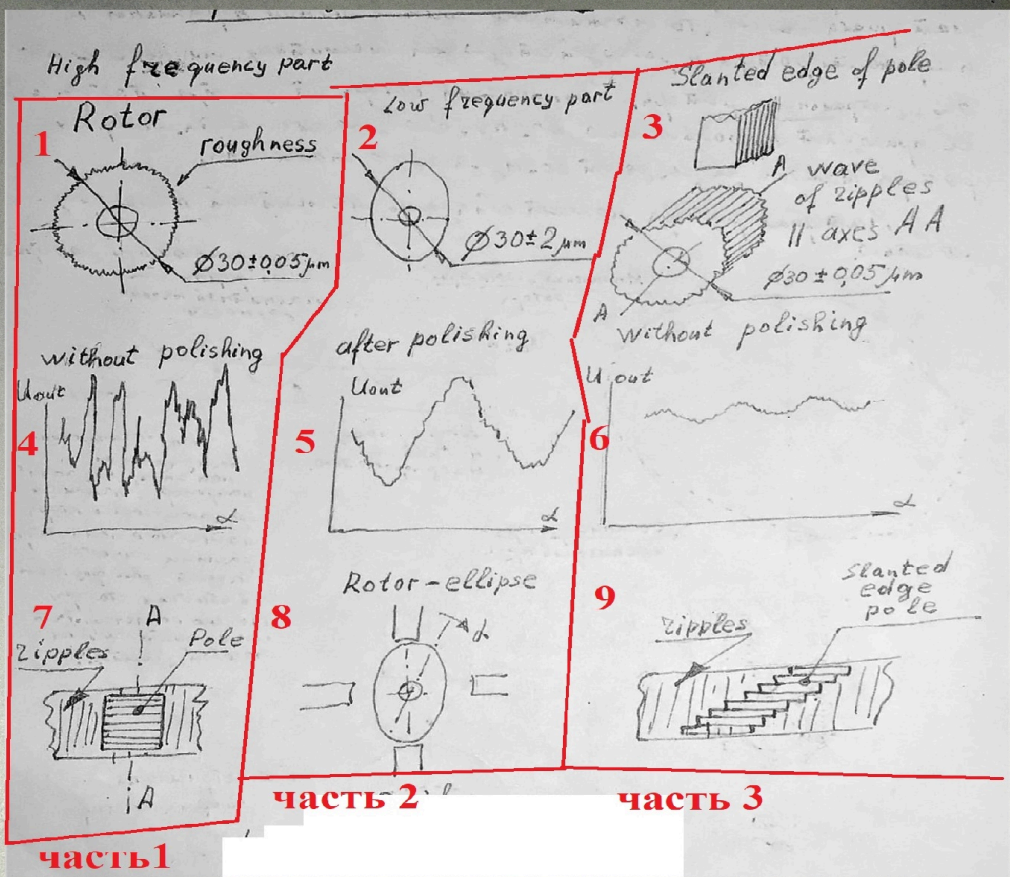
Rotor-ellipse



$M=0$ if
 $\alpha=0$ steady rotor position
 $\alpha=45^\circ$ unsteady
 $\alpha=90^\circ$ - steady



Более подробное строение рас-но на части 1.
 После шлифовки по графику 4, получаем график 5, который
 (к шлифовке относится часть 1 2)
 Поэтому предлагаем делать полюса статора скосенными
 (рисунок 9), тогда график 1 в получим (это все часть 1 3)



Трудное
 Косой край полюса обеспечивает повышение момента при
 перекрещивании край полюса неровности.
 Форма ротора.

8

Неоднородность магнитного материала ротора.

Геометрия ротора может быть идеальной. Если μ магнитного материала $\rightarrow \infty$, то магнитные силовые линии нормальны к поверхности ротора и равнодействующая магнитных сил пересекает ось (центральную) ротора. Отклонения ротора от центра статора (Δ) не приводят к появлению возмущающего момента. Повороты ротора также не создают возмущающего момента.

Материал ротора может обладать магнитной неоднородностью.

1 **Магнитная "геометрия" ротора**

2 **Ротор идеальной геометрической формы без магнитной неоднородности**

3 **Сечение ротора - идеальный круг.**

4 **Геометрическая форма - шар**
Магнитная форма - эллипсоид.

Mo - асинхронный возмущающий момент, связанный например, с наличием вращающегося вектора магнитного поля статора (различия емкостей создаст сдвиг фаз токов в обмотках статора). Можно компенсировать или алгоритмически способом учесть!!!

Для минимизации возмущающего момента необходимо совместить шатунную ось эллипсоида с осью полюса.

10) Магнитные подвесы (гистерезисные моменты) (Радецкая)

Active magnetic bearing (C) 3

$K_{MB} \sim 0,1 \dots 1 \frac{N}{\mu m}$; $P_0 \sim 0,1 Wt$; $M_0 \rightarrow 0$

TEST OF MAGNETIC BEARING

fixed stator

float

movable 2 stator

$M_1, M_2(\alpha)$ - revolving moments of 1 and 2 magnetic bearing

$J_{TM} K_{TM} = M_1 + M_2(\alpha)$

$M_1 = const$

$U_{out} = J_{TM} R = \frac{M_1 + M_2(\alpha)}{K_{TM}} \cdot R$

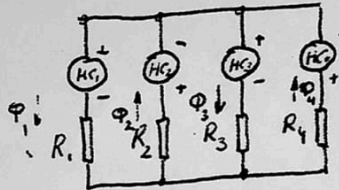
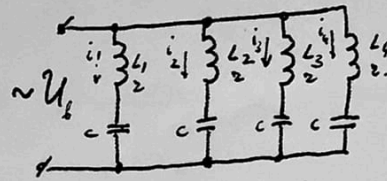
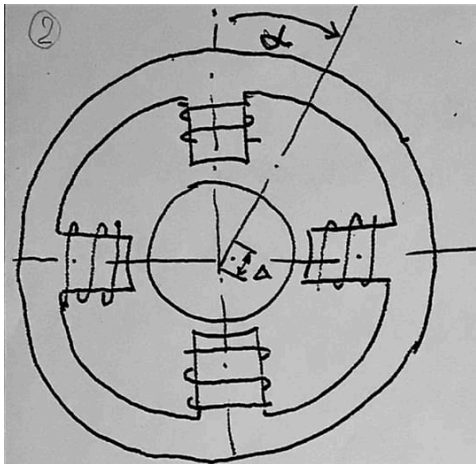
В активном магнитном подвесе при центральном положении ротора, которое устанавливается по равенству индуктивностей катушек и которое электрически фиксируется по балансу мостов R, R, w1, w3 (см верхнюю схему), запитанных переменным током по диагонали, с

которой сигнал идет на усилитель и в цепь обратной связи (т.е. с провода между резистором и катушкой на усилитель, а с него - на МС и дальше). Если ротор в центральном положении, то сигнал разбаланса по мосту равен нулю, этот сигнал подается на микроконтроллеры, при этом ключи практически остаются отключенными. Когда ротор отклоняется, появляется сигнал, микроконтроллер формирует сигнал с широтно-импульсной модуляцией, включая на расчетное время один или два ключа, входящих в схему, для возвращения ротора в вертикальном и горизонтальном положении в центральное положение. Поэтому мощность у этого магнитного подвеса небольшая (примерно 0.1 Вт).

Плюс: когда маленькая мощность, то и прибор малогабаритный; если ключи незамкнутые, то нет больших магнитных полей, а значит нет момента взаимодействия ротора (при любой его форме) с полем статора, поэтому все синусоидальные составляющие (упругий момент подвеса, вызванный несовершенством формы ротора и шероховатостью) получаются маленькими. Так что активный магнитный подвес имеет преимущество по точности.

Первые магнитные подвесы для ПИГ исследовались с помощью установки на рис. ниже ("Fixated stator"). Она состоит из поплавка (floater), взвешенного в жидкости, имеется цепь обратной связи (ну тут очевидно), которая измеряет положение поплавка и его поворот вокруг оси подвеса, этот сигнал через датчик момента формирует управляющий момент, который удерживает поплавок в нулевом положении (при котором сигнал $DU=0$). Ток обеспечивает падение напряжения на эталонном сопротивлении, зная выходное напряжение, можно определить момент, действующий на поплавок. Он может иметь постоянную составляющую и может иметь зависимость от углового положения. Угол альфа - угол поворота статора (нижнего магнитного подвеса) относительно корпуса поплавка. Верхний магнитный подвес жестко закреплен.

Позже начались испытания резонансных магнитных подвесов на переменном токе. При отклонении ротора начинал меняться выходной сигнал и упругий момент, связывающий ротор со статором. (Переходим к листку "Hysteresis revolting moment").



$$R_1 = \frac{\delta_0 - \Delta \cos \alpha}{S \mu} = \frac{\delta_0}{S \mu} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta_0} \cos \alpha\right)$$

$$R_2 = R_0 (1 - X \sin \alpha); \quad R_3 = R_0 (1 + X \cos \alpha)$$

$$R_4 = R_0 (1 + X \sin \alpha)$$

$$HC_1 = W i_1; \quad HC_2 = W i_2 \dots$$

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_4 = 0 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 = HC_1 + HC_2 \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = HC_1 - HC_3 \\ \Phi_1 R_1 + \Phi_4 R_4 = HC_1 + HC_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_1 = i_1 Z + \frac{1}{C} \int i_1 dt + W \frac{d\Phi_1}{dt} \\ U_2 = i_2 Z + \frac{1}{C} \int i_2 dt + W \frac{d\Phi_2}{dt} \\ \dots \end{cases}$$

$$Z = Z_{\text{каждый}} + Z_{\text{стали вносимое}}$$

$$\dot{\Phi}_{1,3} = \frac{W U}{R_0} \frac{Z (1 \pm X \cos \alpha) + j [L_0 \omega - \frac{1}{C \omega} (1 \pm X \cos \alpha)]}{[Z + j(L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})]^2 - (Z - j \frac{1}{C \omega})^2} \frac{X^2}{2}$$

$$\Phi_{2,4} = \dots \quad (\text{замена } \pm X \cos \alpha \text{ на } \pm X \sin \alpha); \quad L_0 = \frac{W^2}{R_0}$$

$$F_K = \frac{\Phi_K^2}{2 \mu_0 S}; \quad \Phi_K^2 = \dot{\Phi}_K \cdot \dot{\Phi}_K^*$$

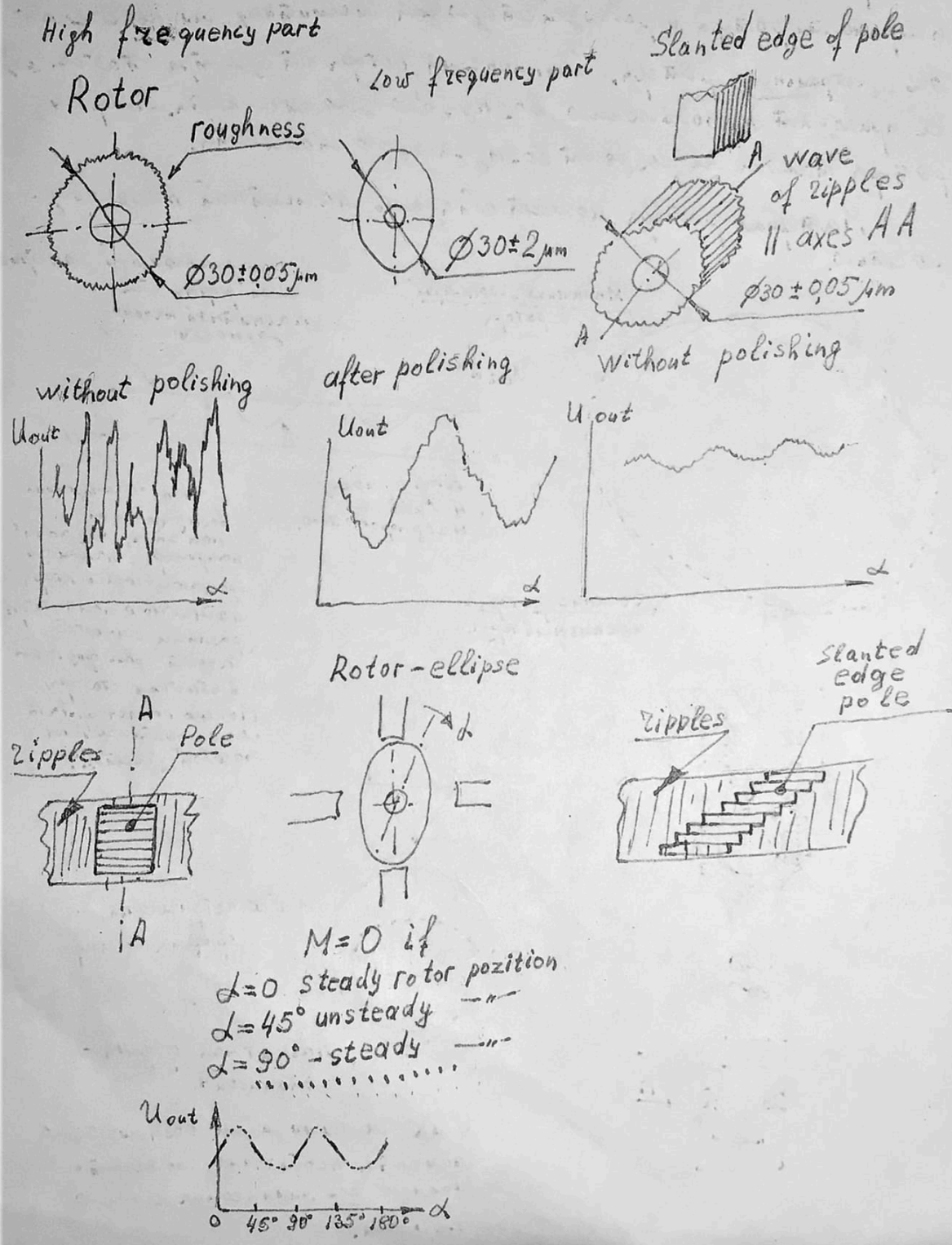
$$F_{\text{эм}} = (F_1 - F_3) \cos \alpha + (F_2 - F_4) \sin \alpha = \left(\frac{W U}{R_0}\right)^2 \frac{1}{2 \mu_0 S} \frac{4 [Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) \frac{1}{C \omega}] X}{[Z^2 - (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega})^2 + \frac{2 X^2}{2} + \frac{(1}{C \omega})^2 \frac{X^2}{2}]^2 + [2 Z (L_0 \omega - \frac{1}{C \omega}) + \frac{2 X^2}{C \omega}]^2}$$

Магнитный шарик со всех сторон окружен полюсами. В качестве его датчика положения использовалась тонкая металлическая фольга,

которая через слой диэлектрика наклеивалась на торцы полюсов, и образовывалась ёмкость, в которой создавался рабочий зазор между шариком и емкостной обкладкой. Далее, разность перемещений (С.Ф. показывает на полюса по вертикальной оси) подавалась на усилитель и подавался ток на обмотки на полюсах (С.Ф. показывает на полюса по горизонтальной оси). Т.е. если, к примеру, шарик смещается вправо, то ток, вырабатывающийся на левой катушке пропорционально смещению, возвращает его влево.

Особенность - управление на постоянном токе (на шарик действовали постоянные магнитные поля). Этот магнитный поток протекает через тело шарика и создает на нем области намагничивания. Это магнитное поле в теле шарика может взаимодействовать с управляющим магнитным полем и удерживать шарик в нейтральном положении. (повторение комментария под картинкой из вопроса Наташи).

Elastic revolting moment of Magnetic bearing

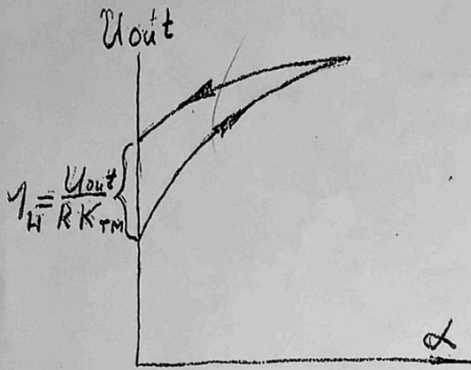


Если в ГС есть внешний момент, под его действием гироскоп начнет прецессировать, появляется угол, угол передается на двигатель

стабилизации, который создает момент, компенсирующий внешний, и поплавков сохраняет свое положение. Теперь см. график after polishing: зная наклон этой характеристики, можно провести алгоритмическую компенсацию момента, зная статическую ошибку поворота ротора поплавка. Наклон компенсируется только в том случае, если он повторяющийся. Ошибка неповторяемости изображена на графике левее. она не может быть компенсирована.

Hysteresis revolving moment M_H of magnetic bearing

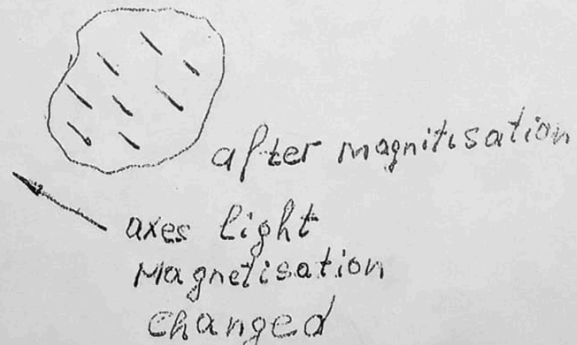
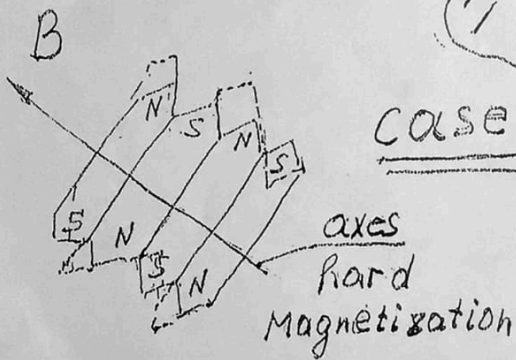
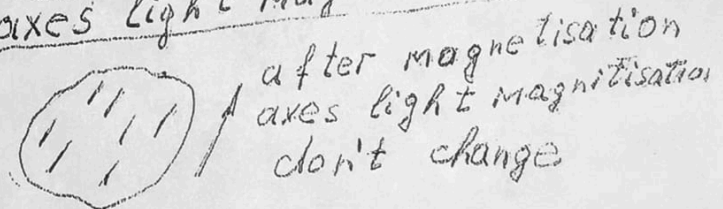
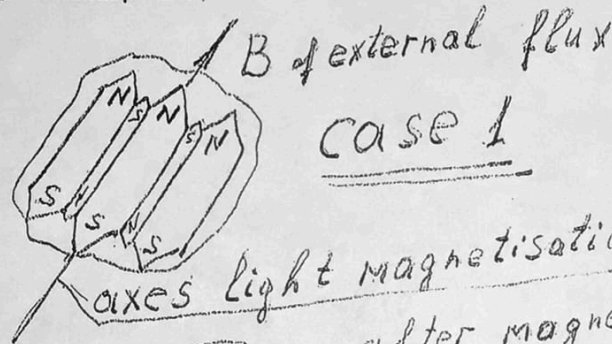
(9)



$$M_H \approx M_{FR} \text{ of stoun bearing}$$

$$M_H(\text{direct magnetic flux}) = 4 M_H(\text{alternating magnetic flux})$$

Structure of superalloy 79 Ni



Первый эксперимент с резонансными магнитными подвесами на переменном токе: в нижней точке графика по U_{out} мы начали менять

момент, он нарастает при изменении угла альфа, потом мы остановились и начали поворачивать статор к прежнему нулевому положению. Невозврат M_n (момент гистерезиса) - это выходной сигнал, деленный на сопротивление и крутизну датчика момента. Т.е. поведение этого подвеса оказалось похожим на поведение подвеса на постоянном токе. Этот гистерезисный момент только в 4 раза меньше, чем у подвеса на постоянном токе (см формулу).

Рис. рядом с надписью case 1 - это зерно в структуре магнитомягкого сплава. Внутри зерна есть кристаллическая структура, которая разбита на домены. У домена есть намагниченность N-S, у соседнего домена - S-N. На рис. слева ориентация доменов хаотична. Здесь у доменов структура одинаковая с точки зрения расположения. (Возвращаемся к предыдущему рисунку) Прикладываем внешнее магнитное поле (см. вектор, выходящий из доменов), начинается перестройка доменов: N-S - расширяются, а S-N - сужаются и в конечном итоге пропадают. Получается единый кристалл N-S. Это направление - ось легкого намагничивания. Если приложить другое поле в направлении 90 градусов от первоначального, то начинается перестройка именно узеньких краешков доменов (см. рис. ниже "case 2"), которая требует бОльших затрат энергии и воздействия магнитного поля, чем в первом случае. Это ось трудного намагничивания. Т.е. все будет так же, как и в случае выше, но с бОльшим количеством приложенных усилий со стороны внешнего магнитного поля.

Если рассмотреть рис. case 1, выключив магнитное поле, то домены вернутся к исходным размерам.

Если поле постоянное, то останется остаточное расширение доменов - магнитный гистерезис.

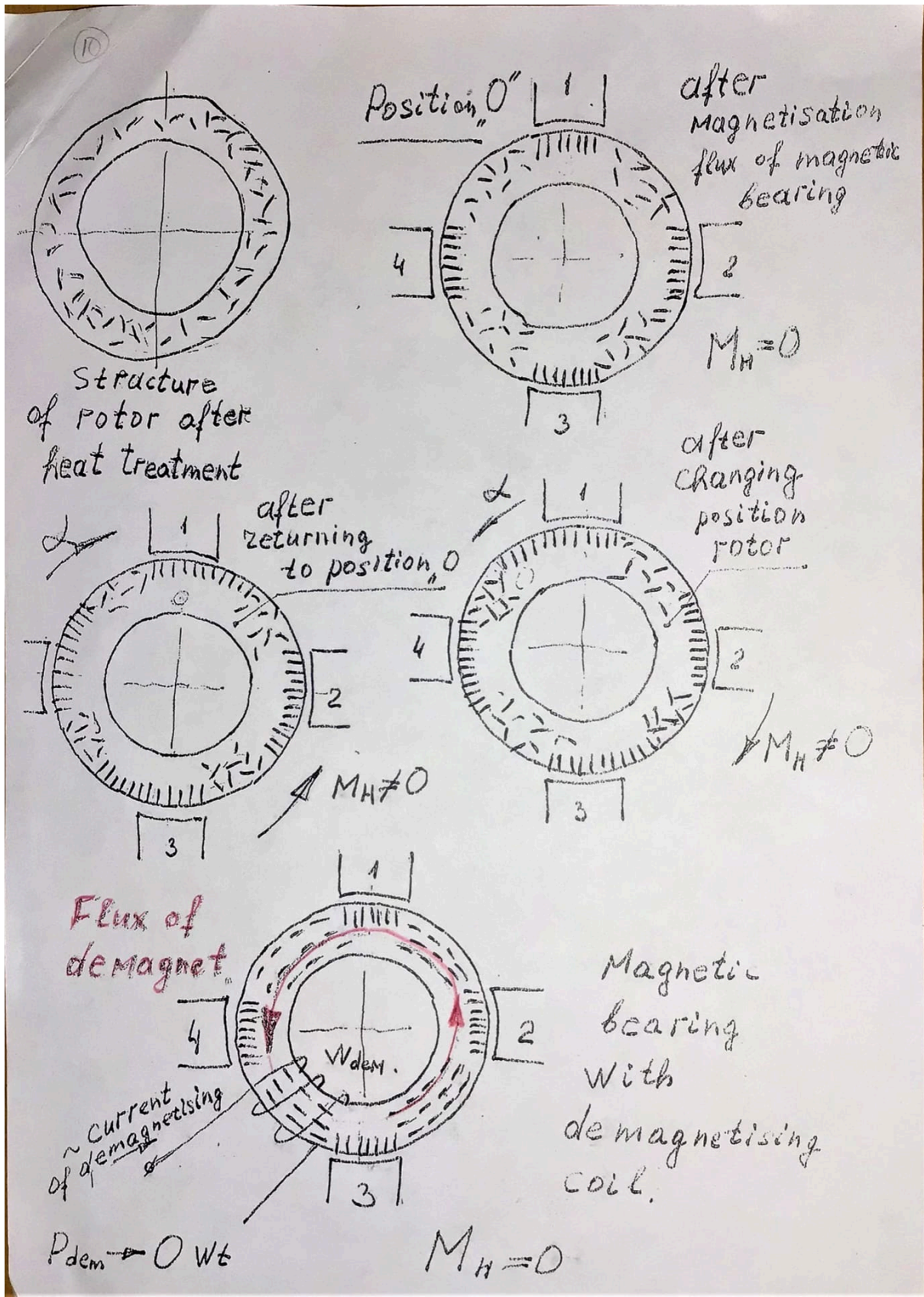


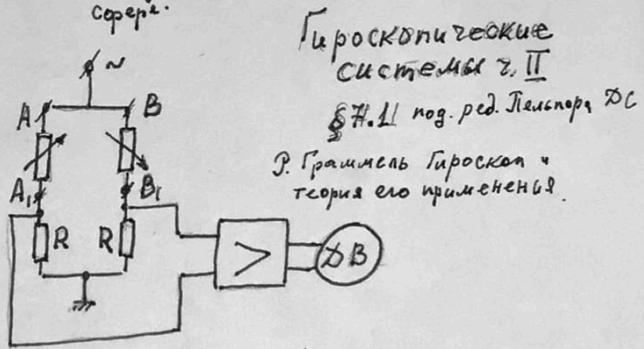
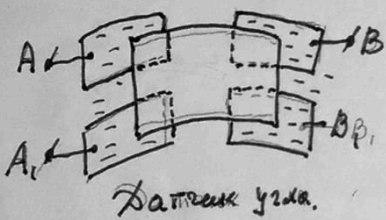
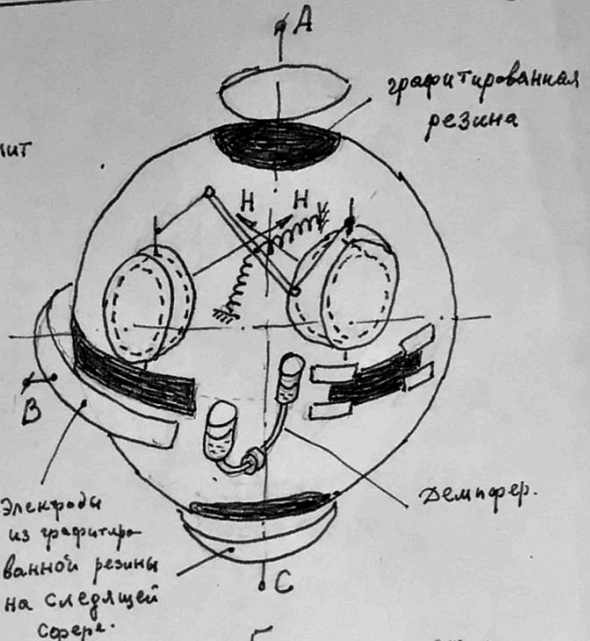
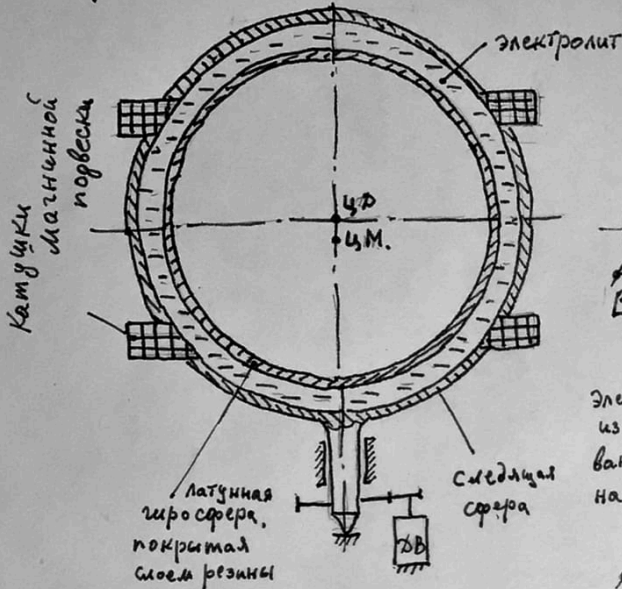
Рис. в левом верхнем углу - ротор, собранный из листочков пермаллоя, каждый из них приклеивается к предыдущему с угловым смещением

(чтобы магнитная неоднородность не сказывалась на магнитной форме ротора), чтобы все листочки заняли все возможные азимутальные положения. В этом случае домены в теле ротора расположены хаотично. Ротор между полюсами статора и включили магнитный подвес (см рис. в правом верхнем углу: С.Ф. показывает на северный полюс 1, от него магнитное поле проходит к южному 2, от северного 3 к южному 2 и 4 и т.д.). Перестройка доменов идет под полюсами. Если выключить магнитный подвес, домены сохранят свое магнитное положение (намагниченности не будет, но оси легкого намагничивания будут нормальны к поверхности полюса, момент будет =0). Если повернуть против часовой стрелки (см. рис. второй снизу слева) ротор, то стоявшие нормально к полюсу домены выходят из под полюса, и хаотично стоявшие домены начинают занимать такое же положение (появляются области с упорядоченным положением доменов). Т.е. в данном случае он обладает большей проводимостью магнитного поля, чем случае с хаотичным положением. Магнитные силы стремятся вернуть в исходное положение эти домены. Появится гистерезисный момент (см. рис. правее), который направлен в обратную сторону от отклонения до упора, и тогда, если посмотреть, к примеру на левую верхнюю часть ротора, где упорядочены домены, и перейти снова к предыдущему рисунку и взглянуть на ту же часть, то там будет то же состояние доменов, какое было до поворота, но справа сверху домены будут в таком же упорядоченном положении, т.е. не в исходном. Теперь она обладает меньшим магнитным сопротивлением, чем левая верхняя. Опять появится гистерезисный момент, который будет стремиться повернуть ротор уже обратно. Борьба с физикой гистерезисного момента можно, к примеру, взяв проволоку (см. самый нижний рис.) и намотать вокруг кольца ротора, но она не касается его, она записана током (для удобства объяснений перейдем к след. рисунку). Идея катушки в том, что с помощью доп. магнитного поля, которое охватывает ротор, мы создаем магнитное поле, направленное по

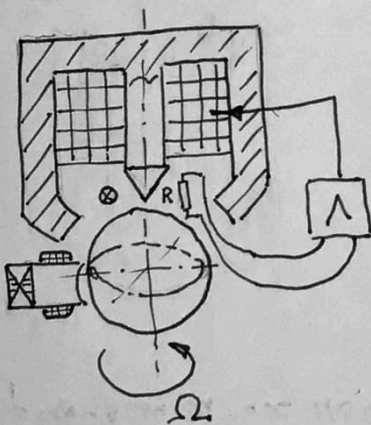
кольцу ротора с малым магнитным сопротивлением (т.к. нет воздушных зазоров). Большой магнитный поток кладет домены, "стоящие дыбом", в горизонтальное положение, тем самым упорядочивая магнитную структуру. Это позволяет убрать гистерезисный момент.

Магнитные подвесы

Гирокомпас Аншютца.



Центрифуга Билса



Наземный ширококомпас

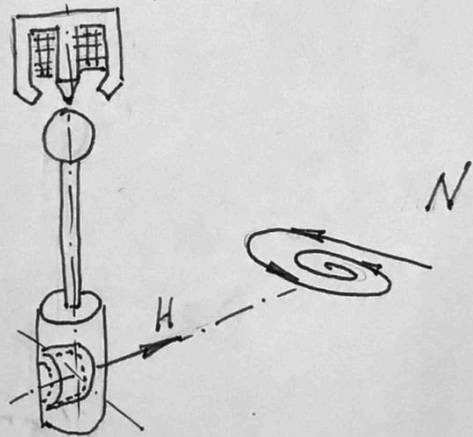
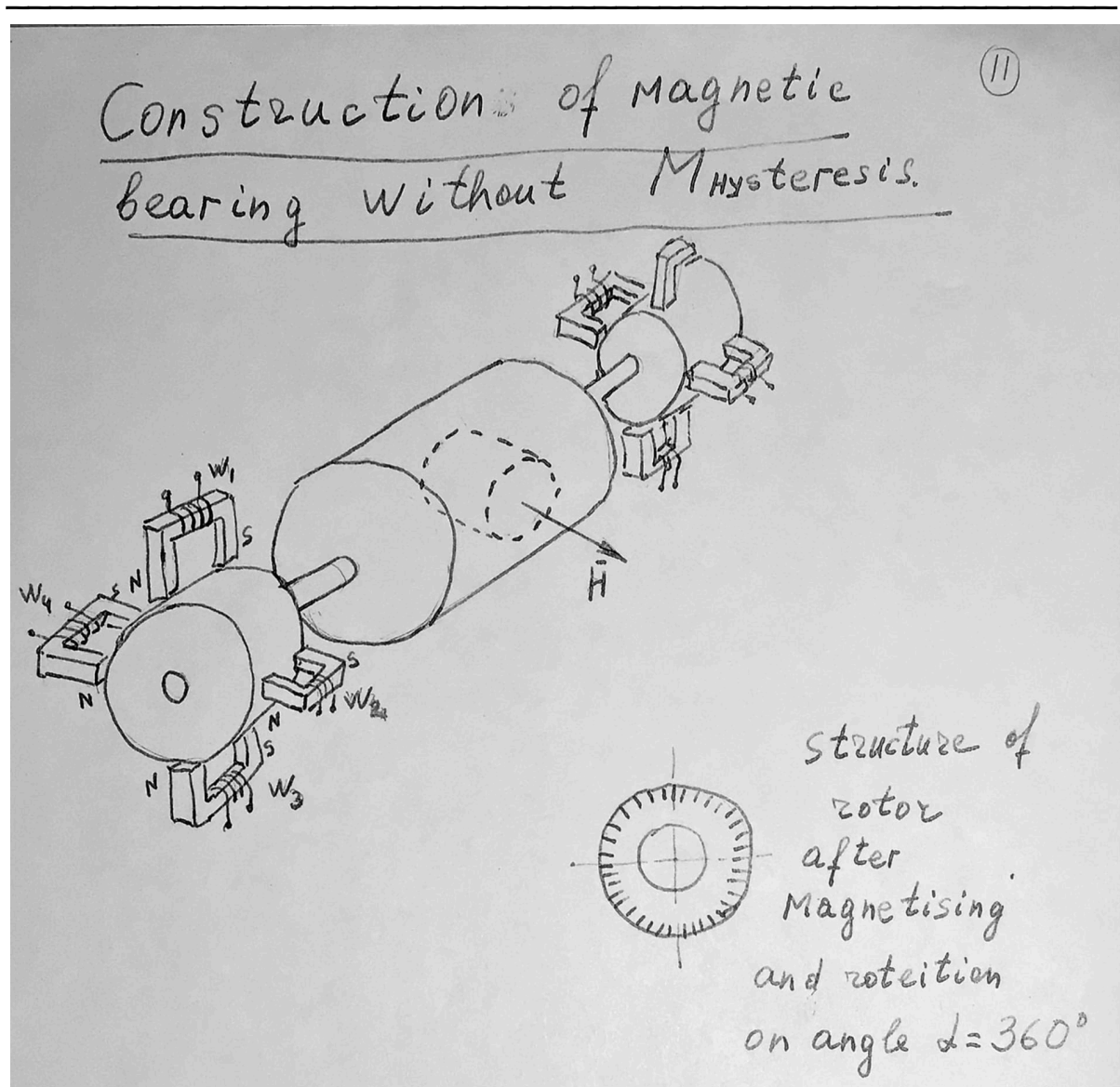


Рис. в правом нижнем углу. Здесь подвешен короткий штوك, где шарик - там гирикомотор. Сверху - многополюсный магнитный подвес.

Получается гироскоп. Радиус подвеса гироскопа относительно точки подвеса равен 30 м. На сферу навешивалось зеркальце, ротор поворачивали и плавно отпускали, отраженный луч света приходил к положению равновесия. Это обеспечивалось магнитными моментами, действовавшими на тарелку (сферу). Состояние равновесия немного отклонялось от начального положения (этот принцип был задействован на нижнем рис. на предыдущей странице).



Здесь изображен поплавок, два ротора по бокам, магнитопровод состоит из п-образных сердечников, они укреплены на внешнем корпусе и залиты эпоксидной смолой для лучшего крепления. Катушки

запитаны переменным током. Если ротор опустился вниз, то индуктивность нижнего п-образного сердечника w_3 становится больше, у w_1 - меньше, при настройке на вторую точку половинной мощности ток в катушке w_3 становится маленьким, а в w_1 - большим, возникает электромагнитная сила, которая притягивает ротор вверх, то есть поднимает ротор в нулевое положение. То же самое и в горизонтальном состоянии. Если ротор конический, то при смещении ротора (к примеру, на нас) уменьшаются зазоры во всех п-образных сердечниках (на роторе, который ближе к нам), и увеличиваются на роторе, который дальше от нас, на этом роторе индуктивности будут меньше, а токи больше, на роторе, который ближе к нам - наоборот. Возникает электромагнитная сила, которая тянет поплавки с роторами в осевом направлении, устанавливается нейтральное положение. При включении магнитного подвеса домены становятся "дыбом", на севере (см. ближайший к нам ротор) осталось хаотичное состояние, но если этот ротор прокрутить в магнитном поле на 90 градусов и вернуть назад, то по всей окружности установится доменная структура, стоящая "дыбом" к наружной поверхности ротора, а на боковой поверхности будет аксиальная намагниченность. Т.е. в данном случае не будет происходить, и, соответственно, не будет гистерезисного момента. Такая конструкция используется в поплавковом гироскопе линейных ускорений.

Недостаток: отдельные магнитопроводы - неудобно монтировать.
