

Владимирский государственный университет

Н. В. ХРУСТАЛЕВА Л. Н. ШАРЫГИН

**ПРИМЕНЕНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ**

Учебное пособие

Владимир 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Н. В. ХРУСТАЛЕВА Л. Н. ШАРЫГИН

ПРИМЕНЕНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2022

ISBN 978-5-9984-1702-3

© Хрусталева Н. В.,
Шарыгин Л. Н., 2022

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.3я73

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
профессор кафедры электроники, приборостроения и биотехнических
систем Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Е. А. Оленев

Кандидат педагогических наук, доцент
директор МАОУ «Промышленно-коммерческий лицей» (г. Владимир)
В. Е. Емельянов

Хрусталева, Н. В. Применение упругих элементов в средствах измерения [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Н. В. Хрусталева, Л. Н. Шарыгин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Из-во ВлГУ, 2022. – 162 с. – ISBN 978-5-9984-1702-3. – Электрон. дан. (6,03 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; диск-код CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Систематизированы варианты применения основных видов упругих элементов в составе измерительных преобразователей. Показаны особенности работы упругих элементов в случаях проектирования апериодических и автоколебательных измерительных систем. Приведены многочисленные примеры новейших конструкций.

Предназначено студентам вузов, изучающим дисциплины «Прикладная механика», «Электрорадиоизмерения», направления подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 1. Ил. 112. Библиогр.: 29 назв.

ISBN 978-5-9984-1702-3

© Хрусталева Н. В.,
Шарыгин Л. Н., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	5
1.1. Метод моделей	5
1.1.1. Математические модели систем с колебательными звеньями	10
1.1.2. Автоколебательный режим	21
1.1.3. Применение метода моделей для многочастотных систем	29
1.2. Метод Фурье	35
Глава 2. МЕМБРАНЫ	40
2.1. Измерение давления	40
2.2. Измерение ускорений	46
2.3. Измерение перепада давления	55
Глава 3. РАСТЯЖКИ, ПОДВЕСЫ	64
3.1. Измерение перемещений	64
3.2. Измерение крутильных колебаний валов	68
3.3. Измерение расхода	75
3.4. Измерение ускорений	81
Глава 4. СТРУНЫ	105
4.1. Виды струн и способы крепления	105
4.2. Режим свободных колебаний	107
4.3. Режим автоколебаний	115
Глава 5. ДРУГИЕ УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ	128
5.1. Торсионы	128
5.2. Плоские пружины	130
5.3. Винтовые пружины	133
5.4. Спиральные пружины	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	159

ВВЕДЕНИЕ

Средства измерения различных физических величин занимают важное место в разработке технологических процессов. Появление новых материалов приводит к разработке новых технологий изготовления изделий, что предусматривает особые методы контроля, соответственно новые средства измерения.

Разработчик измерительной техники должен уметь не только вычислять прочностные свойства деталей, но и рассматривать влияние конкретного элемента на метрологические характеристики изделия. В структуре средств измерений широко используются упругие элементы. Функционально упругие элементы применяются как первичные измерительные преобразователи, так и в составе колебательных звеньев, работающих в режиме свободных колебаний с ударным возбуждением или в режиме автоколебаний. Автоколебательный режим в большинстве случаев является предпочтительным, так как позволяет расширить диапазон измерения и повысить точность. Кроме того, частотный сигнал надежно квантуется и удобно стыкуется с вычислительной техникой.

В пособии рассмотрено применение всех основных упругих элементов в составе измерительных преобразователей. Использованы разработки кафедры технологического и экономического образования Педагогического института Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Глава 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. Метод моделей

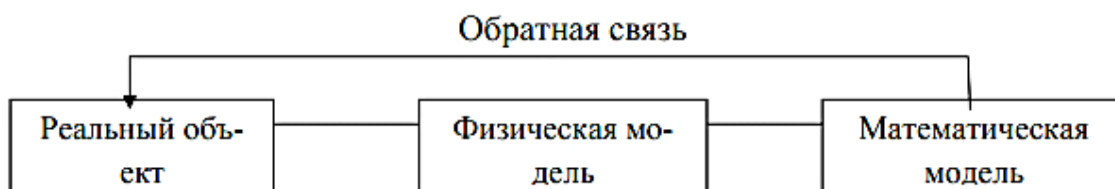


Рис. 1.1. Структура метода моделей

Даже при современном уровне развития механики машин и вычислительной техники полное описание всех аспектов динамического поведения элементов машин и происхождения в ней динамических процессов не представляется возможным и необходимым. Поэтому прибегают к разумному упрощению исходного объекта, т.е. заменой его некоторой схемой – физической моделью, в которой стремятся отобразить наиболее существенные факторы рассматриваемой задачи. Любая физическая модель предполагает абстрагирование от некоторых частных особенностей, поэтому оказывается ограниченной и пригодной лишь для рассмотрения определённого круга вопросов. Отсюда следует, что при исследованиях одному и тому же устройству может соответствовать целый ряд физических моделей.

Каждой физической модели соответствует своя математическая модель, т.е. система дифференциальных, интегральных, интегро-дифференциальных или иных уравнений, с помощью которых осуществляется математическое описание исследуемого объекта. При построении математической модели в ряде случаев приходится привлекать на помощь некоторые гипотезы и допущения для компенсации недостатка знаний или с целью упрощения самой процедуры математического описания системы и её дальнейшего анализа (см. рис. 1.1.)

Следующим этапом проектировочного расчёта является решение уравнений математической модели. При этом используют как аналитические методы, дающие чёткую картину и достоверные инженерные оценки, так и численные методы, опирающиеся на большие возможности современной вычислительной техники.

При выборе метода решения задачи нельзя абстрагироваться от круга допущений, заложенных в процесс идеализации исследуемого объекта на этапе составления физической модели.

Поясним применение метода моделей на примере расходомера прозрачных сред [26].

Конструктивно шариковых расходомер прозрачных сред (далее расходомер) выполнен из двух блоков – гидравлического блока и электронного блока, которые соединены между собой электрическим кабелем, имеющем двойной разъём со стороны гидравлического блока и одинарный со стороны электронного блока.

Корпус гидравлического блока составлен из двух полукорпусов – нижнего 1 и верхнего 2 (ориентация чертежа), которые соединены винтами 3 и имеют базирующие штифты 4. По плоскости стыка в корпусе образован закрытый кольцевой канал 5 постоянного круглого сечения диаметром D . В кольцевой канал помещён шарик 6 с возможностью свободного движения, т.е. с малым зазором. Каналы подвода измеряемой среды 7 имеют цилиндрическую форму сечением равным сечению кольцевого канала и расположены тангенциально по отношению к последнему. Под действием измеряемой среды шарик будет перемещаться по кольцевому каналу, совершая хаотичное вращательное вращение относительно собственной оси. Это вращение зависит от турбулентности потока измеряемой среды и влияет на частоту касания шариком стенок кольцевого канала. Данный эффект влияет на износ шарика и кольцевого канала. Для снижения турбулентности потока измеряемой среды во входных каналах по их осевым линиям установлены струевыпрямляющие лопатки 8, которые фиксируются штифтами 9. Соединение входных каналов гидравлического блока с магистралями подвода и отвода измеряемой среды осуществляется с помощью монтажных патрубков 10.

В гидравлическом блоке установлены элементы оптоэлектронного узла съёма параметров движения шарика. Имеются две оптические пары светоизлучатель-фотоприёмник.

На рис. 1.2 и рис. 1.3 светоизлучатели 11,12 и фотоприёмники 13,14 показаны условно в виде однотипных корпусных деталей.

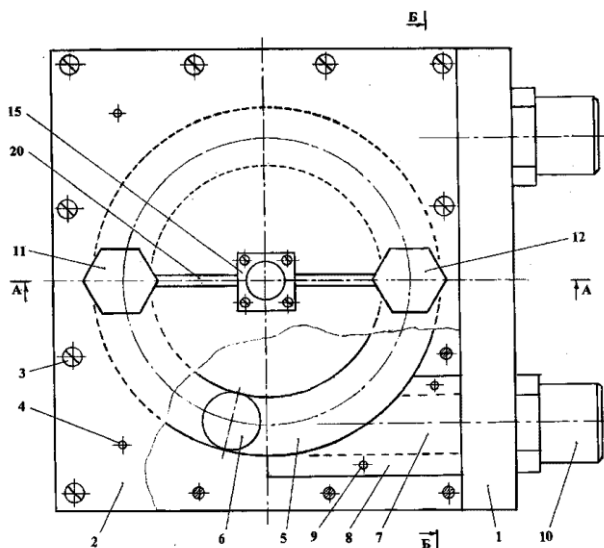


Рис. 1.2. Конструктивная схема гидравлического блока

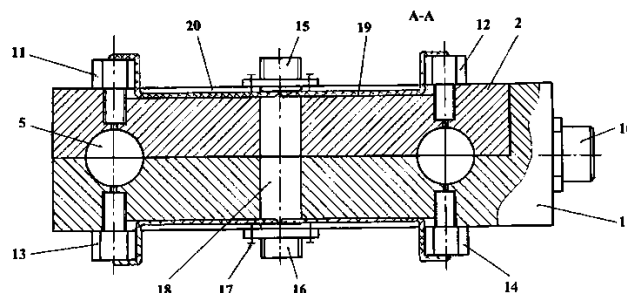


Рис. 1.3. Разрез А-А по рис. 1.2

Для присоединения соединительного кабеля предусмотрены два электрических разъёма 15,16 (например, типа ШР), которые крепятся к полукорпусам 1,2 с помощью винтов 17. Внутренние части разъёмов размещены в сквозном отверстии 18 корпуса сравнительно большего диаметра. Монтажные провода 19, соединяющие оптопары и разъёмы, уложены в пазах 20. На рис. 1.2 монтажные провода условно не показаны.

Предлагаемая конструкция позволяет отдельно изготавливать сборочные единицы светоизлучатель и фотоприёмник с подпаянными монтажными проводами. Затем эти сборочные единицы крепятся в полукорпусах, после чего концы монтажных проводов подпаиваются к электрическим разъёмам. Далее одновременно с укладкой монтажных проводов в пазы 20 осуществляют крепление винтами 17 электрических разъёмов. Операция укладки монтажных проводов в пазы упрощается за счёт того, что имеется возможность припуск длины проводов разместить в виде петли в отверстии 18 корпуса. При необходимости монтажные провода 19 могут быть закреплены в пазах 20 посредством компаунда. В зависимости от условий использования расходомера (в виде автономного прибора или в составе комплексного агрегата) внешние поверхности могут снабжаться защитными кожухами.

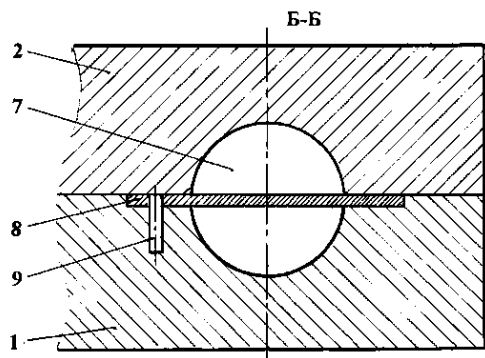


Рис. 1.4. Разрез Б-Б по рис. 1.2

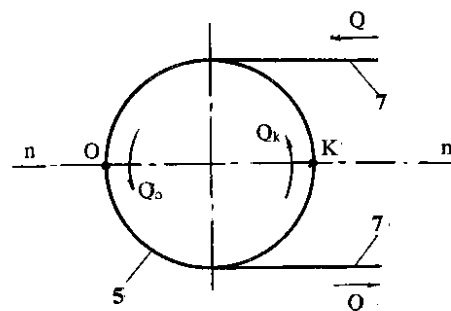


Рис. 1.5. Физическая модель

Рассмотрим принцип измерения расхода с применением изложенной конструкции гидравлического блока. Воспользуемся методом моделей.

Физическая модель гидравлической системы представлена на рис. 4.5 В эту модель входят – кольцевой канал 5, каналы подвода измеряемой среды 7. Выше было отмечено, что шарик 6 размещён в кольцевом канале с небольшим зазором, значит гидравлическое сопротивление зазора велико, поэтому можно принять, что шарик смещается синхронно с потоком измеряемой среды. Поскольку рассматриваемая гидравлическая система симметрична, произвольно выбираем один подходящий канал входным (верхний по рис. 4.5), другой – выходным. Оптические пары оптоэлектронного узла съёма параметров движения шарика расположены в точках O и K на осевой линии $n-n$, проходящей между каналами подвода.

Поток измеряемой среды входит во входной канал, проходит по кольцевому каналу и выходит из выходного канала. В соответствии с соотношениями гидравлических сопротивлений часть потока закольцовывается. Таким образом, в точке K физической модели присутствует только кольцевой поток, а в точке O суммарный – сумма проходного и кольцевого потоков.

Перейдём к математической модели. Расход измеряемой среды в точке O есть произведение сечения $\pi D^2/4$ на перемещение D , отнесённое к времени t^0 .

$$Q_o = \frac{\pi D^3}{4} \times \frac{1}{t_o}, \quad (1.1)$$

где D – диаметр шарика.

Аналогично для точки K :

$$Q_k = \frac{\pi D^3}{4} \times \frac{1}{t_k}, \quad (1.2)$$

проходной поток составит:

$$Q = Q_o - Q_k = \frac{\pi D^3}{4} \left(\frac{1}{t_o} - \frac{1}{t_k} \right). \quad (1.3)$$

Если поток измеряемой среды не является стационарным, то одновременно будут измеряться интервалы времени (длительности импульсов) t_o и t_k .

Обратимся к электронному блоку. Для наглядности на рис. 1.6 изображены фотоприёмники 13,14 оптических пар и формирователи 21, 22 сигнала оптопар оптоэлектронного узла съёма параметров движения шарика. В целом электронный блок выполнен на типовых элементах электроники.

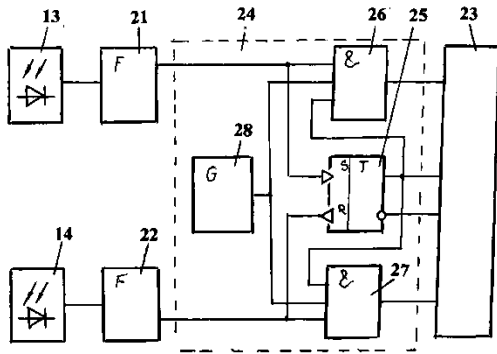


Рис. 1.6. Функциональная схема

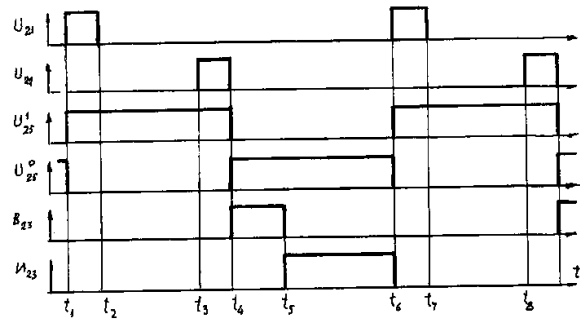


Рис. 1.7. Эпюры напряжений

Основу электронного блока составляет вычислитель с индикатором результата 23. Вычислитель реализует зависимость (1.3), а предварительно в его ячейку памяти записывается константа прибора C :

$$C = \frac{\pi D^3}{4}. \quad (1.4)$$

Управляющими сигналами для работы вычислителя являются выходные сигналы устройства подготовки 24. Устройство подготовки построено на базе RS-триггера 25, двух конъюнкторов 26,27 и генератора опорной частоты 28. На рис. 1.7 приведены эпюры напряжений на выходах элементов функциональной системы:

U_{21} – формирователя 21;

U_{22} – формирователя 22;

U_{25}^1 – единичного выхода триггера 25;

U_{25}^0 – инверсного выхода триггера 25,

а также условно показаны интервалы вычисления B_{23} и индикации I_{23} .

Работает электронный блок следующим образом. Исходное состояние триггера 25 устанавливается обычным образом фронтом электропитания блока. В момент времени t_1 на выходе формирователя 21 появляется прямоугольный импульс длительностью t_0 , который поступает на первый вход конъюнктора 26, одновременно фронтом этого импульса триггер 25 устанавливается в единичное состояние. Единичный потенциал триггера поступает на второй вход конъюнктора 26 и первый вход конъюнктора 27. Конъюнктор 26 подготовлен к прохождению импульсов генератора 28 через третий вход. Количество импульсов на выходе $t_0 = t_2 - t_1$ будет записано в первый входной регистр вычислителя 23.

В момент времени t_3 появляется прямоугольный импульс t_k на выходе формирователя 22, который поступает на второй вход конъюнктора 27, а срезом этого импульса (момент времени t_4) опрокидывается в исходное состояние триггер 25. В интервале $t_k = t_4 - t_3$ происходит запись кода длительности t_k во второй входной регистр вычислителя. В момент времени t_4 потенциалом инверсного выхода триггера вычислитель со своей тактовой частотой начинает вычисление расхода по формуле (1.3). Окончание вычисления заканчивается в момент времени t_5 . В интервале $t_5 - t_6$ значение расхода измеряемой среды будет отражаться на индикаторе прибора.

Таким образом, если расходомер используется для измерения расхода стационарных потоков, то постоянного значение расхода на индикаторе будет мерцать с частотой работы триггера 25. В случае измерения расхода нестационарных потоков расходомер следует дополнить регистратором результата вычислителя.

1.1.1. Математические модели систем с колебательными звеньями

Широкие возможности применения в качестве измерительных преобразователей имеет механическая колебательная система с одной степенью свободы – осциллятор. Характеристики свободных колебаний (собственные частоты и собственные формы) полностью определяют индивидуальные свойства системы и имеют первостепенное значение при анализе вынужденных и автоколебаний. Рассмотрим основные свойства такой системы [6].

Метод Лагранжа

Уравнение Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q'} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = \frac{\partial \Pi}{\partial q}, \quad (1.5)$$

здесь t – время;

q – обобщенная координата; q' – обобщенная скорость;

T – кинетическая энергия; Π – потенциальная энергия.

Кинетическая энергия может быть выражена через массу m_i материальной точки и скорость v_i этой точки

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_i v_i. \quad (1.6)$$

Если принять в качестве радиус-вектора i -ой материальной точки v_i , который определяется только обобщенной координатой q и не зависит явно от времен, то скорость точки равна

$$v_i = \frac{dr_i}{dt} = \frac{\partial r_i}{\partial q} q',$$

отсюда

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{\partial r_i}{\partial q} \right)^2 q'^2 = \frac{1}{2} q'^2 \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{\partial r_i}{\partial q} \right)^2. \quad (1.7)$$

Входящая в формулу (1.7) сумма является функцией обобщенной координаты q .

Обозначим

$$\sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{\partial r_i}{\partial q} \right)^2 = A(q) \quad (1.8)$$

и разложим (1.8) в ряд Маклорена в окрестности $q=0$

$$A(q) = A(0) + A'(0)q + \frac{1}{2} A''(0)q^2 + \dots \quad (1.9)$$

В выражении (1.9) штрихи обозначают производные функции $A(q)$ по обобщенной координате q .

Для практических приложений имеет важное значение частный случай малых колебаний системы около положения равновесия, отсчет координаты q удобно вести от этого положения. При малых значениях q в разложении (1.9) можно удержать лишь один первый член.

Обозначим

$$A(0) = M,$$

тогда формула кинетической энергии примет вид, сходный с выражением кинетической энергии одной материальной точки

$$T = \frac{1}{2} M q^2. \quad (1.10)$$

Входящий в выражение (1.10) множитель M называют инерционным коэффициентом. Для колебательной системы с поступательным движением это масса тела, а для системы с вращательным движением – момент инерции относительно оси вращения.

На практике любым образом получают кинетическую энергию через квадрат обобщенной скорости, затем по выражению (1.10) находят коэффициент M .

Обратимся к определению потенциальной энергии Π , которая представляет функцию обобщенной координаты q

$$\Pi = \Pi(q). \quad (1.11)$$

Поскольку потенциальная энергия обладает свойствами направленности и дифференцируемости, то ее можно разложить в ряд Маклорена в окрестности значения $q=0$

$$\Pi = \Pi(0) + \Pi'(0)q + \frac{1}{2}\Pi''(0)q^2 + \dots \quad (1.12)$$

Постоянному первому члену выражения (1.12) может быть приписано любое значение, т.к. потенциальная энергия определяется с точностью до произвольного постоянного слагаемого. Удобно положить $\Pi(0) = 0$. В положении равновесия обобщенная сила равна нулю, поэтому при отсчете координаты q от положения равновесия системы производная $\Pi'(0) = 0$. Следовательно разложение (1.12) начнется с члена, содержащего вторую степень координаты q . Считая перемещения q малыми можно сохранить в разложении (1.12) только один член.

Обозначим

$$\Pi''(0) = D, \quad (1.13)$$

тогда

$$\Pi = \frac{1}{2}Dq^2. \quad (1.14)$$

Постоянная D называется коэффициентом жесткости.

Приведенное изложение показывает, что в ряде случаев нелинейную реальную систему можно рассматривать как линейную.

За решением задачи следует анализ получаемых результатов, который требует от исследователя определенной общетеоретической подготовки. При этом чем сложнее система, тем более полной должна быть информация о возможном качественном характере ожидаемых явлений.

В ряде случаев проводят экспериментальную проверку. С помощью эксперимента могут быть обнаружены новые эффекты, проверяются некоторые гипотезы и допущения, использованные при теоретическом исследовании. При этом особенно важно убедиться в достоверности принятой модели.

При проектировании применительно к колебательным системам в первую очередь представляет интерес для снижения виброактивности механизмов или более эффективного использования колебаний. Нередко детали вычислительных процедур заслоняют фундаментальную проблему формирования модельных представлений об исследуемом объекте. При этом возникает реальная опасность, связанная с возможностью несоответствия громадного объема числовой информации уровню физического понимания наблюдаемых явлений. В свою очередь, это приводит к тому, что исследователь становится рабом ЭВМ, принимая за веру всю полученную от нее информацию. Указанное обстоятельство требует постоянного совершенствования физических представлений об объекте исследования, на основании которых в каждом классе машин может быть создана определенная иерархия моделей, разработаны инженерные оценки, способствующие исключению ошибок, вызванных неадекватностью моделей или допущенных при программировании и вычислениях.

Изображение колебаний на фазовой плоскости

Свободные колебания. Основное дифференциальное уравнение задачи о свободных колебаниях

$$M\ddot{q} = Dq = 0 \quad (1.15)$$

или

$$\ddot{q} + \omega^2 q = 0, \quad (1.16)$$

где

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{M}}. \quad (1.17)$$

Общее решение уравнение имеет вид

$$q = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \quad (1.18)$$

причём постоянные C_1 и C_2 определяются через начальные условия $q(0)=q_0$ и $\dot{q}(0)=\dot{q}_0$ в виде

$$C_1 = \frac{\dot{q}_0}{\omega}, \quad C_2 = q_0.$$

После подстановки получим

$$q = \frac{\dot{q}_0}{\omega} \sin \omega t + q_0 \cos \omega t. \quad (1.19)$$

Чаще пользуются другой формой записи

$$q = A \sin (\omega t + \lambda), \quad (1.20)$$

где амплитуда колебаний равна

$$A = \sqrt{\left(\frac{\dot{q}_0}{\omega}\right)^2 + q_0^2} \quad (1.21)$$

и начальная фаза

$$\lambda = \arctg \frac{\omega q_0}{\dot{q}_0}. \quad (1.22)$$

В ряде случаев, особенно при изучении нелинейных механических колебаний, определенными достоинствами обладают представления на фазовой плоскости. Состояние системы в любой фиксированный момент времени t определяется парой соответствующих значений q и \dot{q} и может быть представлено изображающей точкой в плоскости декартовой системы координат q, \dot{q} .

После дифференцирования функции перемещения получим выражение для скорости

$$\dot{q} = A \omega \cos (\omega t + \lambda). \quad (1.23)$$

Исключив время из уравнений (16), (19) получим

$$q^2 + \frac{\dot{q}^2}{\omega^2} = A^2, \quad (1.24)$$

т.е. уравнение эллипса.

Для рассматриваемой колебательной системы вся фазовая плоскость заполнена бесконечным множеством вложенных друг в друга таких эллипсов с общим центром в начале координат и отличающихся только параметром A – рис.1.8.

Колебательная система с вязким трением. В ряде практических случаев можно принять, что сила трения пропорциональна скорости.

Тогда уравнение Лагранжа принимает вид

$$M\ddot{q} + h\dot{q} + Dq = 0, \quad (1.25)$$

где h – коэффициент вязкого трения.

При не слишком больших значениях трения, когда $h < 2\sqrt{MD}$, общее решение уравнения (1.25) имеет вид

$$q = e^{-\beta t} (C_1 \sin \omega_1 t + C_2 \cos \omega_1 t),$$

где $\beta = \frac{h}{2M}$ и $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$, а следовательно C_1 и C_2 определяются из начальных условий

$$q(0) = q_0, \dot{q}(0) = \dot{q}_0.$$

в форме

$$C_1 = \frac{\dot{q}_0 + \beta q_0}{\omega_1}, C_2 = q_0^2.$$

Часто удобнее пользоваться другой формой решения

$$q = Ae^{-\beta t} \sin(\omega_1 t + \lambda), \quad (1.26)$$

где

$$A = \sqrt{\frac{(\dot{q}_0 + \beta q_0)^2}{\omega^2 - \beta^2} + q_0^2}, \quad \operatorname{tg} \lambda = \frac{q_0 \sqrt{\omega^2 - \beta^2}}{\dot{q}_0 + \beta q_0}.$$

Для малых значений h получим выражение для скорости

$$\dot{q} = Ae^{-\beta t} [\omega_1 \cos(\omega_1 t + \lambda) - \beta \sin(\omega_1 t + \lambda)]. \quad (1.27)$$

Система уравнений (1.26), (1.27) дает фазовые траектории рис. 1.9, которые представляют собой спирали, накручивающиеся на начало координат.

Как видно из (1.26) движение представляет собой затухающие колебания с постоянной частотой, но постепенно убывающими амплитудами. Огибающие кривой процесса определяются функциями

$$A = \pm A_0 e^{-\beta t}, \quad (1.28)$$

где A_0 – начальная ордината огибающей.

Угловая частота свободных затухающих колебаний равна

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}, \quad (1.29)$$

соответственно период колебаний

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}.$$

Последовательность амплитуд следует закону геометрической прогрессии. Отношение двух последовательных амплитуд $A(t)/A(t+T_1)$ является постоянной величиной, равной $e^{-\beta T_1}$. Натуральный логарифм этого отношения называется логарифмическим декрементом

$$D = \beta T_1 \approx \frac{\pi h}{\sqrt{MD}}. \quad (1.30)$$

Изображающая точка фазовой траектории пересекает положительную полуось через период T_1 . Отсюда можем получить значение добротности Q колебательной системы. Если начальная амплитуда равна A_0 , то следующая

$$A_I = A_0 e^{-\beta T_1} = A_0 e^{-\frac{\pi}{Q}}$$

Разность двух соседних амплитуд

$$\Delta A = A_0 - A_I = A_0 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q}} \right).$$

При больших добротностях Q можно принять

$$e^{-\frac{\pi}{Q}} \approx 1 - \frac{\pi}{Q}, \text{ тогда } Q = \frac{\pi}{1 - \frac{A_I}{A_0}}.$$

При достаточно больших h , начальная с $h = 2\sqrt{MD}$ (критическое затухание), движение системы становится неколебательным - апериодическим.

Опыт показывает, что иногда убывание амплитуд не следует закону геометрической прогрессии. Тогда силу вязкого трения можно принять пропорциональной n -ой степени скорости. В таком случае уравнение движения примет вид

$$M\ddot{q} + h/|q|^{n-1} \dot{q} + Dq = 0. \quad (1.31)$$

После интегрирования при начальном условии $A(0) = A_0$ получим

$$A = \frac{A_0}{n-1 \sqrt{1 + \frac{2h(n-1)\omega^{n+1} I(n) A_0^{n-1}}{\pi D} t}}. \quad (1.32)$$

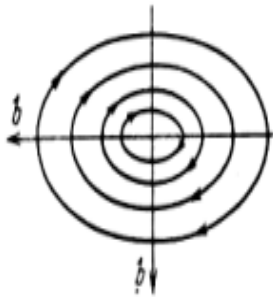


Рис. 1.8. Фазовые траектории свободной колебательной системы

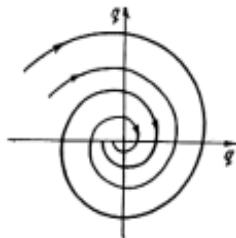


Рис. 1.9. Фазовые траектории системы с вязким трением

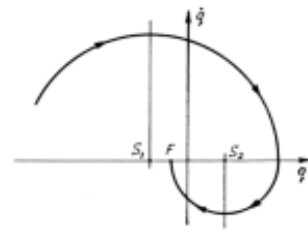


Рис. 1.10. Фазовая траектория системы с постоянным трением

Входящий сюда интеграл $I(n)$ выражается через гаммафункцию, для которой имеются готовые таблицы. С помощью таких таблиц можно вычислить значения I в зависимости от показателя n .

Значения интеграла $I(n)$

N	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$I(n)$	1,000	0,875	0,785	0,718	0,667	0,624	0,589

Колебательная система с постоянным трением. Случай постоянного (Кулонова) трения соответствует $n=0$ в общем решении (1.32)

$$A = A_0 - \frac{2h\omega}{\pi D} t, \quad (1.33)$$

т.е. убывание амплитуд следует линейному закону.

Колебательное движение при Кулоновом трении показано на фазовой плоскости рис. 1.10. Траектория движения изображающей точки состоит из дуг окружностей с центрами в точках S_1 и S_2 (в общем случае это дуги эллипсов). Нетрудно убедиться, что при каждом прохождении между двумя последовательными положениями $q = 0$ амплитуда уменьшается на величину $2S$. Движение инерционной массы M прекратится в точке F , которая лежит на отрезке S_1S_2 .

Интервал значений q от S_1 до S_2 называют зоной застоя. Из выражения (1.33) следует

$$S = \frac{h\omega}{\pi D}, \quad (1.34)$$

здесь h – коэффициент постоянного трения.

Найдем модель системы на примере устройства [27].

Устройство для измерения массы в невесомости содержит платформу 1, на которой жестко закреплен статор 2, контейнер 3 для размещения измеряемой массы, блок управления 4, датчик положения 5, индикатор 6 и частотомер 7, выход которого соединен со входом индикатора 6, а вход частотомера 7 соединен с выходом статора 2, вход которого соединен с выходом блока управления 4, вход блока управления 4 соединен с выходом датчика положения 5. Платформа 1 может быть выполнена из любого прочного материала. В нашем случае платформа 1 выполнена из алюминия Д16. Внутренняя поверхность статора 2 имеет сферическую форму. В качестве статора в предлагаемом устройстве использован статор электромагнитного подвеса. Контейнер 3 выполнен в виде сферы, в экваториальной области которой выполнены углубления для предотвращения поворота контейнера относительно центра масс. Контейнер 3 выполнен из ферромагнитного материала. Измеряемая масса находится вне зоны действия магнитных полей, что позволяет взвешивать любые типы материалов, в том числе магнитные, радиоактивные и т.д.

Блок управления 4 состоит из первого и второго блоков перемножения на заданные коэффициенты 4.1 и 4.2, блока дифференцирования 4.3, блока сложения 4.4. Вход блока управления 4 соединен с первым

и вторым блоками перемножения 4.1 и 4.2. Блок перемножения 4.2 соединен с блоком дифференцирования 4.3, выходы блока перемножения 4.1 и блока дифференцирования 4.3 соединены с блоком сложения 4.4, выход которого соединен с выходом блока управления 4.



Рис. 1.11. Функциональная схема устройства для измерения массы в невесомости

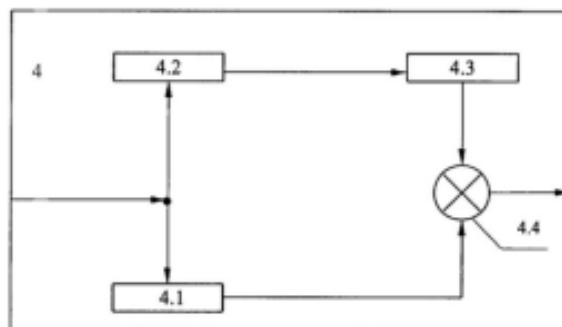


Рис. 1.12. Блок-схема управления

Датчик положения 5 может быть реализован, например, в виде индукционного оптического датчика положения. Оптические датчики состоят из источника света, фотодиодов. В нашем примере используется оптический датчик перемещения. Индикатор 6 может быть выполнен в виде матрицы на жидких кристаллах или в виде электронно-лучевой трубки. Частотомер 7 выполнен в виде стандартного блока.

Устройство для измерения массы в невесомости работает следующим образом. В контейнер 3 помещают измеряемую массу m_i . Контейнер 3, взаимодействуя с магнитным полем, создаваемым статором 2, образует электромагнитный подвес, который обеспечивает левитацию контейнера 3, создание бесконтактного силового воздействия на контейнер 3 и ориентацию его в пространстве.

Под действием возникающих в момент включения сил и в зависимости от своего начального положения контейнер отклоняется от своего равновесного положения, соответствующего геометрическому центру статора. Одновременно начинает работать датчик положения 5, включается источник света, который освещает контейнер 3 и создает светотеневую картину на фотодиодах. Сигнал, снимаемый с датчика

положения 5, пропорционален линейному перемещению контейнера 3. Сигналы, поступившие с датчика положения 3 на вход блока управления 4, поступают на входы первого 4.1 и второго 4.2 блоков перемножения. С выхода второго блока перемножения 4.2 сигнал поступает на блок дифференцирования 4.3. Сигналы с выхода блока перемножения 4.2 и блока дифференцирования 4.3 поступают на блок сложения 4.4, где суммируются и с выхода блока управления 4 поступают на статор электромагнитного подвеса 2.

Ток, возникающий в статоре 2, бесконтактно передает заданное усилие на контейнер 3. Таким образом контейнеру 3 сообщается тестовое усилие. Масса нетто контейнера 3 в этом случае равна m_n , а масса брутто – сумме масс m_n и m_i . Датчик положения 5 фиксирует перемещение контейнера 3, который сместился под действием приложенной бесконтактно со стороны статора 2 силы. Сигнал с датчика положения 5 поступает на блок управления 4.

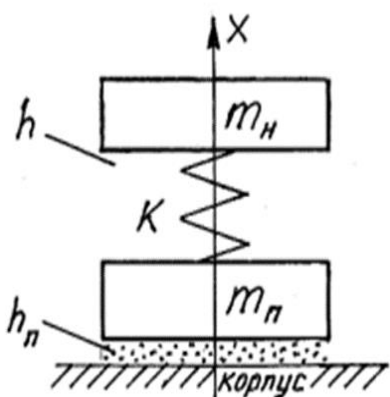


Рис. 1.13. Физическая модель устройства по рис. 1.5

Блок управления 4 за счет задания коэффициентов первого 4.1 и второго 4.2 блоков перемножения обеспечивает заданные динамические свойства устройства в автоколебательном режиме. Одновременно ток, протекающий в статоре 2, подается на частотомер 7, который измеряет частоту колебаний тока. Тогда измеряемая масса m_i пропорциональна изменению частоты колебаний тока. Сигнал с выхода частотомера 7 поступает на блок индикатора 6 для отображения.

Примем физическую модель рассматриваемого устройства – рис. 1.7. На физической модели обозначено:

m_H - масса контейнера с измеряемым телом;

m_n - масса платформы со статором;

K - жёсткость магнитного поля между статором и контейнером, т.е. отношение приращения приложенной к контейнеру силы к приращению перемещения по оси x ;

h, h_{Π} - интегральные коэффициенты трения, соответственно для массы m и m_{Π} .

Находится система в невесомости или в постоянном поле тяготения не имеет значения, поскольку во втором случае изменится лишь начальное положение.

Воспользуемся методом Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial q} = \frac{\partial T}{\partial q}, \quad (1.35)$$

где T, Π – соответственно кинетическая и потенциальная энергия системы.

$$T = \frac{1}{2} (m_H \dot{x}^2) + \frac{1}{2} (m_{\Pi} \dot{x}_{\Pi}^2); \Pi = \frac{1}{2} K (x_H - x_{\Pi}). \quad (1.36)$$

Согласно (1.35) без учёта потерь энергии

$$\begin{cases} m_H \ddot{x}_H + K(x_H - x_{\Pi}) = 0 \\ m_{\Pi} \ddot{x}_{\Pi} - K(x_H - x_{\Pi}) = 0 \end{cases} \quad (1.37)$$

Принимая частные решения в виде

$$\begin{aligned} x_H &= A_H \sin(nt + \alpha), \\ x_{\Pi} &= A_{\Pi} \sin(nt + \alpha) \end{aligned} \quad (1.38)$$

и подставляя их в уравнение (1.37) получим

$$\begin{cases} -m_H A_H n^2 \sin(nt + \alpha) + K(A_H - A_{\Pi}) \sin(nt + \alpha) = 0 \\ -m_{\Pi} A_{\Pi} n^2 \sin(nt + \alpha) - K(A_H - A_{\Pi}) \sin(nt + \alpha) = 0 \end{cases} \quad (1.39)$$

Преобразуем систему уравнений (1.36) к виду

$$\begin{cases} (-m_H n^2 + K)A_H - KA_{\Pi} = 0 \\ -KA_{\Pi} - (m_{\Pi} n^2 - K)A_{\Pi} = 0 \end{cases} \quad (1.40)$$

Если амплитуды A_H и A_{Π} не равны нулю, то равен нулю определитель системы (1.37)

$$A_H A_{\Pi} n^4 - (m_H K + m_{\Pi} K) n^2 = 0, \quad (1.41)$$

отсюда получаем корни уравнения.

Корень $n_1^2 = 0$ соответствует перемещению системы как твёрдого тела без деформации K . Второй корень характеризует колебательное движение с частотой

$$n_2 = n_0 = \sqrt{\frac{m_H + m_{\Pi}}{2m_H m_{\Pi}}} K. \quad (1.42)$$

Период колебаний

$$T_0 = \frac{2\pi}{n_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m_H m_{\Pi}}{(m_H + m_{\Pi})K}} = \sqrt{\frac{m_{\Pi}}{1 + \frac{m_{\Pi}}{m_H}}} \times 2\pi \sqrt{\frac{m_H}{K}}$$

Обозначим

$$Y = \sqrt{\frac{m_{\Pi}/m_H}{1+m_{\Pi}m_H}},$$

тогда получим

$$T_0 = YT. \quad (1.43)$$

Коэффициент y характеризует влияние опоры m_{Π} (платформы со статором) на период колебаний. Приведённые соотношения показывают, что в условиях ограниченной массы прибора повышение точности измерений следует реализовывать за счёт уменьшения массы m_{Π} , при этом коэффициент y уменьшается. Опуская выкладки, добротность колебательной системы можно записать

$$Q = \frac{\sqrt{Km_H m_{\Pi}(m_H+m_{\Pi})}}{h_H m_{\Pi} + h_{\Pi} m_H}. \quad (1.44)$$

Учитывая, что оценку стабильности частоты δ_n колебаний ведут по добротности

$$\delta_n \approx 10^{-3}/Q$$

можно сделать вывод, что без учёта влияния опоры и связи колебательной системы с общей массой носителя (корпуса) невозможно создать прецизионную измерительную систему. Заметим, что имеет место влияние внешних вибрационных или ударных воздействий со стороны носителя на амплитуду и частоту колебаний, которое также будет зависеть от коэффициента y .

1.1.2. Автоколебательный режим

В автоколебательной системе реализуется режим незатухающих колебаний. Компенсация потерь энергии в осцилляторе обеспечивается источником энергии. Поступление энергии к осциллятору осуществляется через клапан, при этом управление клапаном обеспечивается осциллятором по цепи обратной связи. Структура автоколебательной системы приведена на рис. 1.14.

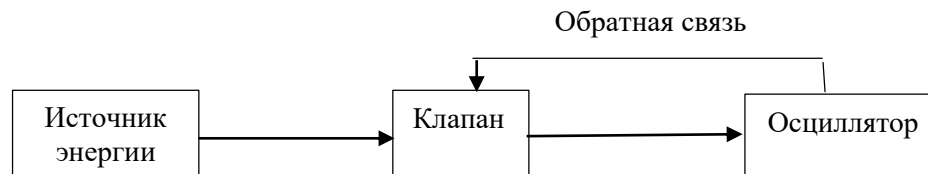


Рис. 1.14. Структура автоколебательной системы

Терминология отдельных элементов автоколебательной системы зависит от конструктивной реализации. В электронике автоколебательную систему называют автогенератором, осциллятор на основе LC звеньев – колебательным контуром. Значительное влияние на терминологию оказала часовая промышленность. Клапан получил название система привода, обратная связь – система освобождения, а оба этих устройства – система возбуждения. Применительно к механическим устройствам систему возбуждения называют спуск или ход. Система возбуждения совместно с осциллятором образует регулятор.

Автоколебательную систему характеризуют два отличительных признака:

- источник энергии имеет неколебательный характер (сжатая пружина, поднятый груз, гальванический элемент, аккумулятор);
- наличие обратной связи, регулирующей поступлением энергии через клапан от источника к осциллятору.

Система возбуждения оказывает влияние на период колебания осциллятора. Влияние мгновенных импульсов на период колебания сформировал английский астроном Эри (G. V. Airy) в 1827 году.

Пусть мгновенный подталкивающий импульс сообщается до положения равновесия в фазовом положении q_1 – см. рис. 1.15а. Следовательно, радиус-вектор A , описывающий цикл колебаний, пройдет угол α_1 мгновенно. Период колебаний будет равен

$$T_1 = \frac{2\pi - \alpha_1}{\omega},$$

что меньше периода свободных колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\omega},$$

т.е.

$$T_1 < T.$$

В случае, когда мгновенный подталкивающий импульс сообщается за положением равновесия в фазовом положении q_2 радиус-вектор A проходит угол α_2 дважды. Период колебаний составит – см. рис. 1.15б

$$T_2 = \frac{2\pi + \alpha_2}{\omega} > T. \quad (1.45)$$

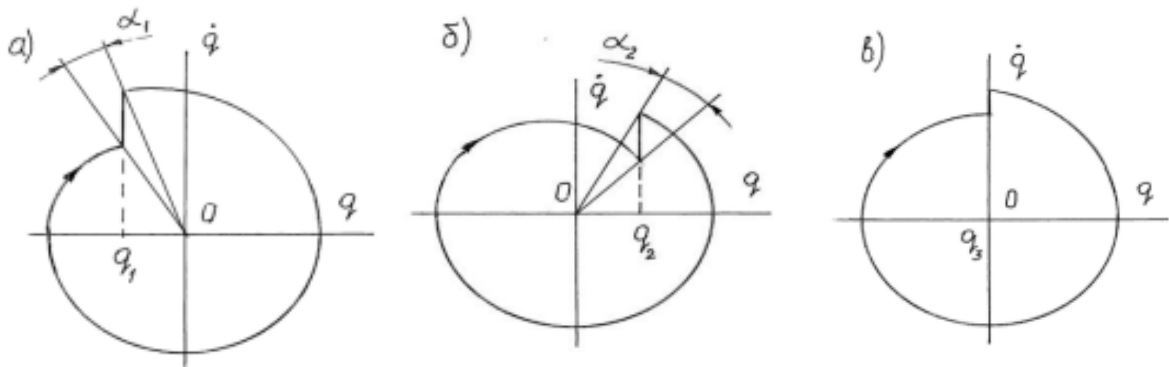


Рис. 1.15. Геометрическая интерпретация теоремы Эри

Если мгновенный подталкивающий импульс сообщается в положении равновесия ($q=0$), - см. рис. 1.15в, то угловое значение $\alpha_3 = 0$. Следовательно

$$T_3 = T.$$

Очевидно для отрицательных (тормозящих) импульсов влияние на период будет обратным.

Реальные импульсы в системе возбуждения протяженные во времени (кроме ударных), поэтому возмущающие импульсы следует симметризовать относительно положения равновесия.

Стационарный автоколебательный режим следует проверять на устойчивость. Различают два режима возбуждения – мягкий и жесткий. Обратимся к зависимостям энергии в функции амплитуды колебаний – см. рис. 1.16.

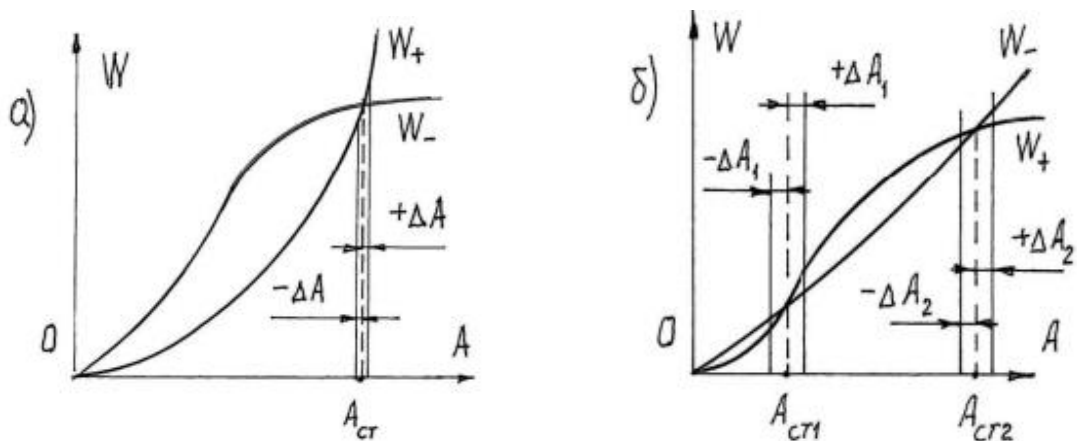


Рис. 1.16. Режимы возбуждения автоколебаний

Стационарная амплитуда автоколебаний A_{cm} определяется равенством подводимой $W+$ и рассеиваемой $W-$ энергий. В случае мягкого

режима возбуждения (рис. 1.13а) эта амплитуда устойчива. Действительно при $+\Delta A$ превышении амплитуды на рассеиваемая энергия W_- превысит подводимую W_+ , следовательно, после окончания возмущения система вернется в точку A_{cm} . При обратном возмущении на $-\Delta A$ наоборот подводимая энергия W_+ превысит рассеиваемую W_- . Таким образом, амплитуда $A_{ст}$ является устойчивой.

В случае жесткого режима возбуждения (рис. 1.13б) имеются две стационарных амплитуды A_{cm1} и A_{cm2} . Нетрудно заметить, что в точке A_{cm2} ситуация аналогична рис. 1.13а. В точке характеристики A_{cm1} соотношение энергий обратное, т.е. при положительном возмущении $+\Delta A$ подводимая энергия W_+ превысит рассеиваемую, следовательно, после окончания возмущения $+\Delta A$ текущая амплитуда A будет стремиться к A_{cm2} . При отрицательном возмущении $-\Delta A$ рассеиваемая энергия W_- превысит подводимую W_+ и текущая амплитуда будет стремиться к нулю, т.е. автоколебания будут затухать. Таким образом, стационарная амплитуда $A_{ст1}$ является неустойчивой. В этом случае для обеспечения устойчивого автоколебательного движения необходимо предварительно вывести систему из положения равновесия на величину превышающую A_{cm1} .

Заметим, что режим по рис. 13-б характерен для колебательных звеньев (осцилляторов) с постоянным трением (рис. 1.10).

Реализация режимов автоколебаний (рис. 1.13) осуществляется через исполнение клапана и обратной связи (рис. 1.11) с образованием системы возбуждения автоколебаний. Наибольшее применение получили системы возбуждений автоколебаний с магнитоэлектрическим приводом. В основе этих систем лежат магнитная цепь с постоянными магнитами, и электронная схема формирования импульсов привода (СФИП). Классическая СФИП (см. рис. 1.21) представляет собой электронный ключ с цепью отрицательной обратной связи на основе конденсатора для сбоя высокочастотной паразитной генерации. Ниже приведены примеры различных исполнений СФИП.

В отдельных случаях, например, с целью уменьшения дополнительной массы на осцилляторе, применяют электромагнитный привод. Рассмотрим испытательную установку [25].

Установка (рис.1.17) содержит основание 1, на котором с помощью пассивного захвата 2 закреплен образец 3 испытываемого материала. На свободном конце образца установлен активный захват 4, который

связан с магнитопроводным стержнем 5. По осевой линии магнитопроводного стержня около его концов на основании установлены соленоидные катушки 6, 7. По этой же осевой линии на некотором удалении от концов магнитопроводного стержня размещены упругие упоры 8, 9. На рис.1 упругие упоры представлены (рассмотрим один) корпусом 10, внутри которого имеется подвижный поршень 11 с пружиной 12. Пружина поджата гайкой 13. Упругие упоры фиксируются на основании установки винтами 14.

Для подведения энергии к активному захвату от источника электропитания 15 имеется схема формирования импульсов привода (СФИП) 16. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода представлена на рис. 2. СФИП управляется электрическим сигналом одной соленоидной катушки 6, назовем ее катушкой освобождения W_0 . Схема формирует короткий импульс тока в другую соленоидную катушку 7, назовем ее катушкой привода W_u . Каскад на транзисторе $VT3$ функционально представляет собой – электронный ключ, а каскады на транзисторах $VT1$ и $VT2$ являются усилителем формирователем.

Исходное состояние схемы по постоянному току (при отсутствии входного сигнала): транзистор $VT1$ находится в режиме глубокой отсечки за счет источника запирающего смещения $E_{см}$. Транзистор $VT2$ открыт – цепь смещения резистор $R4$, а ключевой транзистор $VT3$ закрыт нулевым смещением через резистор $R6$. Каскады по постоянному току разделены конденсаторами $C1-C3$. В исходном состоянии через катушку освобождения W_0 протекает небольшой ток источника питания E – подмагничивающий ток – через ограничительный резистор $R1$, а ток катушки привода близок к нулю, т.к. транзистор $VT3$ закрыт.

Предварительно поясним принцип работы предлагаемой установки на физической модели. В качестве физической модели возьмем свободную консервативную систему (систему без потерь энергии), состоящую из упругого образца 3 жесткостью $C3$ с массой m_3 на свободном конце (суммарная масса активного захвата и магнитопроводного стержня). Будем полагать, что масса образца m_3 мала по отношению к массе m_4

$$m_3 \ll m_4. \quad (1.46)$$

В физической модели жесткость пружины упругого упора обозначим C_{12} и примем

$$C_{12} \gg C_3 \quad (1.47)$$

Массой поршня можно пренебречь, т.к.

$$m_{11} \ll m_4. \quad (1.48)$$

Без учета влияния упоров инерционная масса m_4 будет совершать незатухающие колебания (по условию система не имеет потерь) по закону

$$x = X_m \sin \omega t, \quad (1.49)$$

где x – смещение массы m_4 ;

X_m – амплитуда колебаний;

$\omega = \sqrt{\frac{C_3}{m_4}}$ – циклическая частота.

Период колебаний T , собственная частота f и циклическая частота связаны

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.50)$$

График функции (1.49) приведен на рис. 1.19 точечной линией.

Теперь рассмотрим движение системы с учетом упоров. Рассмотрение начнем с положения равновесия. На участке 0-1 система движется свободно, подчиняясь закону (1.49). Когда масса m_4 пройдет путь X_1 она встретит упругий упор – точка 1. В этот момент времени $t=t_1$ скорость \dot{x}_1 составит

$$\dot{X}_1 = \frac{dx}{dt} = X_m \omega \cos \omega t_1, \quad (1.51)$$

при этом кинетическая энергия будет равна

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m_4 \dot{X}_1^2 \quad (1.52)$$

Кинетическая энергия (1.52) будет расходоваться на деформацию образца 3 и пружины упора 12. На участке 1-2 будем наблюдать замедление скорости \dot{x} . В точке 2 $E_{k1}=0$ и $\dot{x}_2=0$, т.е. масса m_4 будет остановлена. Перемещение на этом участке $X_{1-2}=\ell_{yn}$ и время движения $t_{1-2}=t_{yn}$ (см. рис. 1.19).

Далее за счет потенциальных энергий образца и пружины упора масса m_4 начнет ускоренно двигаться в обратном направлении – участок 2-3. Начиная с точки 3, система будет двигаться свободно по закону (4) пока не встретит второй упор – точка 5. На втором упоре процесс повторяется.

В результате закон перемещения активного захвата оказывается примерно трапециидальным (сплошная линия на рис. 1.19). Площадки

выстоя 1-2, 5-6, 9-10... на максимальных напряжениях образца позволяют обеспечить время на процессы пластической деформации образца. При этом время движения на участках 2-5, 6-9... может быть предельно малым, за счет этого уменьшается период цикла, что приводит к сокращению времени испытаний.

Обратимся к работе установки рис. 1.17.

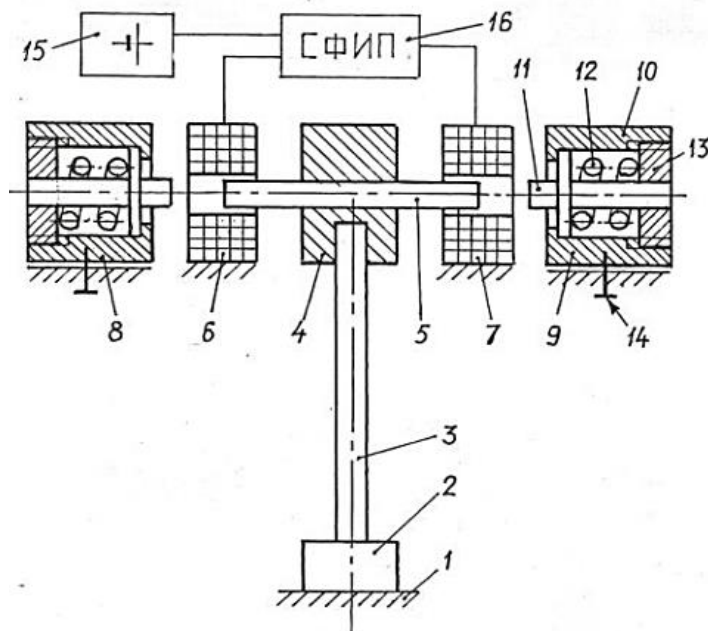


Рис. 1.17. Конструктивная схема установки

Устанавливают испытываемый образец 3 в пассивный захват 2. Далее на свободном конце образца закрепляют активный захват 4 с магнитопроводным стержнем 5. При включении питания источника 15 фронт напряжения обеспечит импульсы тока в катушках 6, 7. В силу неравенства этих токов взаимодействие магнитных полей катушек с магнитопроводным стержнем 5 через активный захват 4 создаст импульс силы, которая подтолкнет испытываемый образец 3. После окончания фронта питания образец начнет колебания на собственной частоте.

При колебаниях в катушке освобождения W_0 6 будет индуцироваться ЭДС пропорциональная подмагничивающему току и скорости магнитопроводного стержня 5 (т.к. транзистор $VT3$ закрыт, то подмагничивающий ток в катушке импульса W_u 7 ничтожно мал, поэтому ЭДС этой катушки не рассматриваем). Скорость магнитопроводного стержня представляет собой первую производную перемещения – фор-

мула (1.37). На рис. 1.19 функция скорости изображена пунктирной линией. Для наглядности функция скорости в некоторых точках совмещена с графиком перемещения, поэтому масштабы на отдельных участках не равны. В соответствии с вышеизложенным ЭДС e_0 в катушке W_0 пропорциональна скорости \dot{x} .

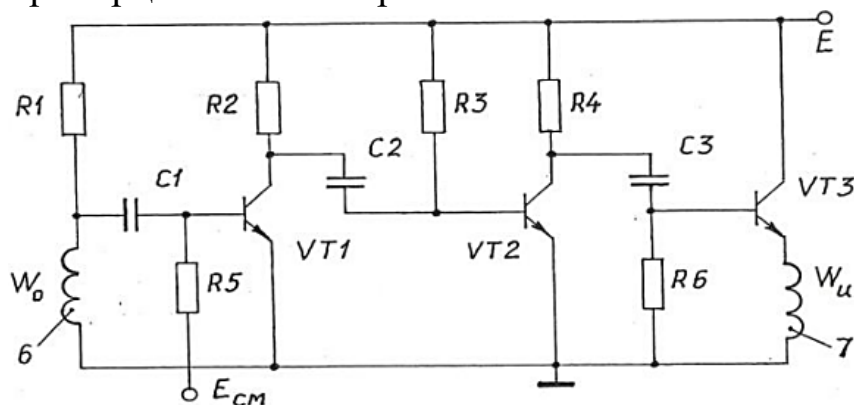


Рис. 1.18. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

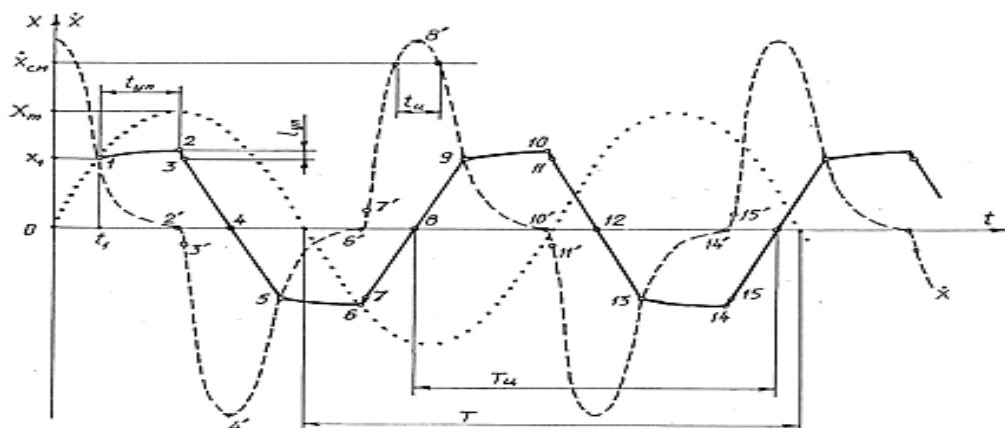


Рис. 1.19. Стилизованные графики перемещения и скорости активного захвата

ЭДС e_0 катушки освобождения 6 является управляющим сигналом для схемы формирования импульсов привода (СФИП) 16. При достижении скорости стержня $X_{см}$ ЭДС e_0 будет иметь уровень $e_{0см}$. Потенциал источника смещения $E_{см}$ принят равным этой величине. Следовательно, транзистор $VT1$ откроется при этом уровне и сформирует импульс длительностью t_u (рис. 1.19). Усиленный каскадом на транзисторе $VT2$ данный импульс откроет ключевой транзистор $VT3$ и через

катушку импульса W_i 7 пройдет импульс тока. Магнитное поле катушки обеспечит взаимодействие с магнитопроводным стержнем 5, т.е. механический импульс. Энергия импульса будет компенсировать энергию потерь в системе. После переходного процесса установится стационарный режим и перемещение активного захвата будет соответствовать функции X на рис.1.19. Заметим, что деформация функции X импульсом привода будет минимальна, поскольку импульс симметричен положению равновесия системы (соблюдены требования теоремы Эри). Пользователь для выбора параметров функции нагружения имеет возможность смещать исходное положение упругих упоров 8,9 и регулировать энергию подводимого через катушку привода 7 импульса уровнями питания E и смещения $E_{см}$ источника тока 15. При необходимости возможно применить пружины 12 упоров другой жесткости. При этом всегда характер функции нагружения (функция X на рис. 1.19) остается неизменным. Кроме регулирования режима работы установки имеется возможность при назначении максимального напряжения цикла варьировать геометрическими параметрами образца исследуемого материала.

1.1.3. Применение метода моделей для многочастотных систем

В разделе 1.1.1 приведены модели устройства для взвешивания массы в невесомости [29]. В рассмотренном примере не учтено влияние массы носителя (спутника, космической станции). Учтём это влияние [9].

Устройство для взвешивания массы в невесомости в своей основе имеет колебательное звено, составленное из упругого элемента – мембраны-1 и инерционной массы, составленной контейнером 2, магнитной системой, состоящей из П-образного магнитопровода 3 и двух постоянных магнитов 4 осевой намагниченности, и соединительного стержня 5. Мембрана по наружному контуру завальцована во внутреннюю часть 6 платформы. На этой же части закреплена бифилярная (намотанная в два провода) катушка 7. В исходном положении осевые линии катушки и постоянных магнитов совмещены. Катушка совместно с магнитной системой образует датчик.

Обратим внимание на следующее. Сигнал датчика определяется величиной магнитной индукции в зазоре магнитной системы и количеством витков катушки. Следовательно, масса подвижной магнитной системы может быть минимизирована за счёт количества витков катушки. Это возможно, т.к. здесь катушка не силовая и диаметр провода мал. Величина магнитной индукции в зазоре не критична. Масса магнитов может быть снижена, если их изготовить из платинокса (ПлК 78). В отличие от прототипа контейнер может быть изготовлен из лёгких сплавов, например, на основе алюминия или магния. В целом, рассматриваемое конструктивное решение позволяет реализовать достаточное малое значение исходной инерционной массы (массы ненагруженной системы) – см. выше теоретический вывод.

Конструкция содержит внешнюю часть 8 платформы, форма которой определится условиями крепления на объекте. Внутренняя часть 6 и внешняя часть 8 соединены упругими звеньями 9. В качестве этих упругих звеньев можно использовать стандартные виброопоры при этом общую (суммарную) жёсткость звеньев 9 можно реализовать их количеством.

Для обеспечения автоколебательного режима имеется блок управления 10 с индикатором 11. Если при создании устройства для взвешивания массы предполагается его подключение к другим системам объекта (например, в составе измерительно-вычислительного комплекса), то блок управления может содержать только электронный ключ – см. рис.1.9. Ключ построен на транзисторе V_T . Одна часть бифилярной катушки W_0 предназначена для выработки сигнала освобождения (в терминологии автоколебательных систем), другая часть W_0 – предназначена для обеспечения импульса привода. Соответственно секция W_0 подключена к базе транзистора и общей шине, а секция – к коллектору транзистора и одному полюсу источника питания. Для сбоя возможной паразитной генерации ключа имеется обратная связь, представленная конденсатором C . В целом, электронный ключ представляет собой однокаскадный усилитель с общим эмиттером.

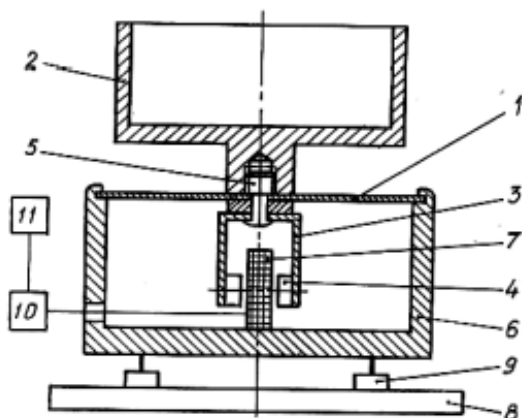


Рис. 1.20. Конструктивная схема устройства для взвешивания массы в невесомости

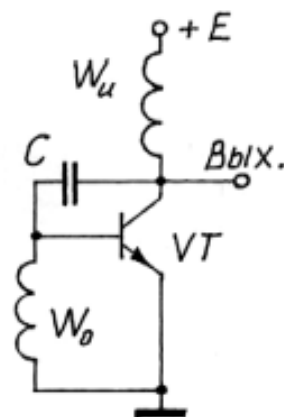


Рис. 1.21. Электрическая принципиальная схема электронного ключа

Работает устройство для взвешивания массы в невесомости следующим образом. Массу вещества (тела) помещают в контейнер 2 и при необходимости закрепляют (на рис.1.20 элементы крепления тела не отражены). Затем включают электропитание. Для скачкообразного фронта питания сопротивление конденсатора C мало (см. рис.1.21), а катушка не имеет сердечника и ее индуктивное сопротивление также мало, следовательно, по обмоткам катушки пройдет импульс тока. Взаимодействие созданным этим током поля катушек с полем зазора магнитной системы датчика обеспечит подталкивающий импульс инерционной массе, составленной из контейнера 2 с измеряемым телом, магнитной системы (магнитопровод 3 и два постоянных магнита 4) и соединительного стержня 5. Сформированный подталкивающий импульс сместит инерционную массу от положения равновесия, при этом произойдет упругая деформация (прогиб) мембраны 1. По окончании фронта питания подталкивающий импульс завершается, но в это время мембрана деформирована и в ней запасена некоторая потенциальная энергия. Теперь за счёт потенциальной энергии мембраны инерционная масса будет перемещаться.

Движение магнитной системы относительно катушки 7 обеспечит наведение в обмотках W_o и W_u ЭДС. Инерционная масса смещаясь к положению равновесия выработает потенциальную энергию мембраны, но наберёт кинетическую. По этой причине инерционная масса перейдёт положение равновесия, мембрана будет деформироваться в другую сторону, т.е. начнутся малые колебания. Учитывая, что осевые

линии катушки 7 и магнитов 4 в исходном положении совмещены, наводимая в обмотках ЭДС будет иметь синусоидальную форму.

Положительная полуволна ЭДС в обмотке W_0 откроет транзистор VT (на рис.1. изображён транзистор проводимости $n-p-n$), при этом по обмотке W_u пройдёт импульс тока. Созданный этим импульсом тока магнитное поле подтолкнёт инерционную массу. Указанный процесс будет повторяться на каждом периоде колебаний и установится стационарный автоколебательный режим.

Круговая частота автоколебаний зависит от измеряемой массы

$$n = \sqrt{\frac{K}{m_H}}.$$

где K - жёсткость мембраны;

$$m_H = m_u + m_0;$$

m_u - измеряемый параметр;

m_0 - константа прибора – величина инерционной массы колебательного звена при отсутствии измеряемого тела.

Очевидно, константу m_0 легко определить по периоду колебаний ненагруженной системы T_0

$$m_0 = \frac{K}{4\pi^2} T_0^2.$$

или по обратной величине – собственной частоте

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{n_0}{2\pi},$$

т.е.

$$m_0 = \frac{K}{4\pi^2} = \frac{1}{f_0^2}.$$

Обработку первичной информации (периода или частоты последовательности электрических импульсов с выхода электронного ключа) ведут в зависимости от поставленной перед проектировщиком задачи.

Если проектируются устройства для работы в составе информационно-измерительного комплекса то сигнал с выхода электронного ключа должен поступать на вход комплекса.

Простейший вариант автономного прибора – измерение периода или частоты посредством частотомера с последующей индикацией на индикаторе 11.

Полноразмерный прибор получим, если первичную информацию обработать вычислительным устройством и индицировать результат в единицах измеряемой величины.

Физическая модель изображена на рис. 1.22-а. Приняты обозначения:

$m_H = m_u + m_0$ - инерционная масса колебательного звена;

m_6 - масса внутренней части платформы

m_8 - масса внешней части платформ

K_1 - жёсткость мембраны;

K_9 - жёсткость упругого звена платформы.

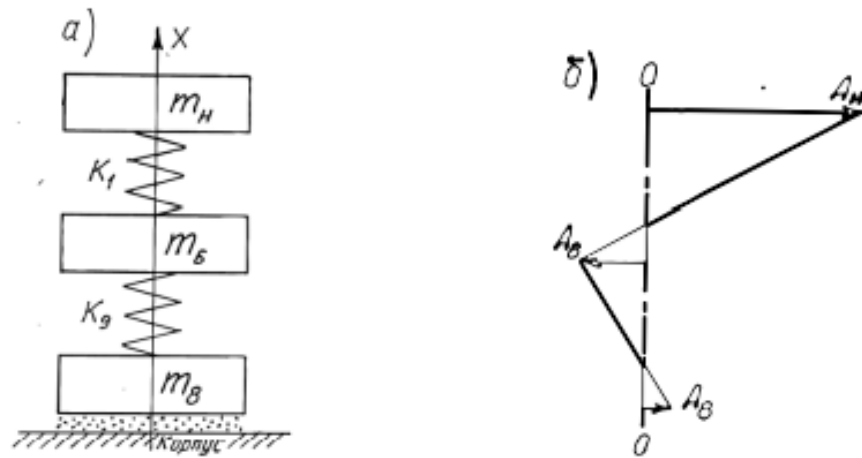


Рис. 1.22. Физическая модель устройства по рис. 1.20

Принятой модели консервативной системы соответствует при колебаниях система уравнений

$$\begin{cases} m_H \ddot{x}_H + K_1(x_H - x_6) = 0 \\ \ddot{x}_6 - K_1(x_H - x_6) + K_9(x_6 - x_8) = 0 \\ m_8 \ddot{x}_8 - K_9(x_6 - x_8) = 0 \end{cases} \quad (1.53)$$

Будем искать решение этой системы в виде

$$x_H = A_H \cos nt; \quad x_6 = A_6 \cos nt; \quad x_8 = A_8 \cos nt.$$

Подставим в (1.53) получим

$$\begin{cases} (m_H A_H n^2 - K_1(A_H - A_6)) = 0 \\ m_6 A_6 n^2 + K_1(A_H - A_6) - K_9(A_6 - A_8) = 0 \\ m_8 A_8 n^2 + K_9(A_6 - A_8) = 0 \end{cases}$$

Перепишем в виде

$$\begin{cases} (m_H n^2 - K_1)A_H + K_1 A_6 = 0 \\ K_1 A_H + (m_6 n^2 - K_1 - K_9)A_6 + K_1 A_8 = 0 \\ K_9 A_6 + (m_8 n^2 - K_9)A_8 = 0 \end{cases} \quad (1.54)$$

Уравнения (1.54) однородны относительно неизвестных амплитуд A_H , A_6 и A_8 . При колебаниях все они не могут равняться нулю одновременно, следовательно, должен равняться нулю определитель

$$\begin{vmatrix} m_H n^2 - K_1 & K_1 & 0 \\ K_1 & m_6 n^2 - K_1 - K_9 & K_1 \\ 0 & K_9 & m_8 n^2 - K_9 \end{vmatrix} = 0 \quad (1.55)$$

Раскрыв определитель (1.55) получим

$$m_H m_6 m_8 n^6 - [(m_H m_6 + m_H m_8) K_6 + (m_6 m_8 + m_H m_8) K_1] n^4 - K_1 K_9 (m_H + m_6 + m_8) n^2 = 0$$

Или

$$n^6 - \left[\left(\frac{1}{m_8} + \frac{1}{m_6} \right) K_9 + \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_6} \right) K_1 \right] n^4 + \frac{K_1 K_9}{m_H m_6 m_8} (m_H + m_6 + m_8) n^2 = 0 \quad (1.56)$$

Обозначим: $\left(\frac{1}{m_8} + \frac{1}{m_6} \right) K_9 = \frac{m_6 + m_8}{m_6 m_8} K_9 = n_{86}^2$

- квадрат частоты колебаний системы внешняя часть платформы – упругое звено платформы – внутренняя часть платформы.

$$\left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_6} \right) K_1 = \frac{m_H}{m_H m_6} K_1 = n_{6H}^2$$

- квадрат частоты колебаний системы внутренняя часть платформы – мембрана – инерционная масса.

С учётом принятых обозначений

$$n^6 - (n_{86}^2 + n_{6H}^2) n^4 + \frac{K_1 K_9}{m_H m_6 m_8} (m_H + m_6 + m_8) n^2 = 0 \quad (1.57)$$

Корни этого уравнения

$$n_1^2 = 0; n_{2,3}^2 = \frac{n_{86}^2 + n_{6H}^2}{2} \pm \sqrt{\frac{(n_{86}^2 + n_{6H}^2)^2}{4} - \frac{K_1 K_9}{m_H m_6 m_8} (m_H + m_6 + m_8)}. \quad (1.58)$$

Первые два корня $n_1^2 = 0$ соответствуют движению системы без деформации упругих элементов K_1 и K_9 . Два других действительных

корня характеризуют частоты двух форм колебаний. Знаку плюс в формуле (1.58) соответствуют синфазное движение масс m_6 и m_8 . Эта форма колебаний является неустойчивой. За счёт присоединённой массы объекта колебание переходит в форму (устойчивую), изображённую на рис. 1.22-б. Этой форме колебаний соответствует знак минус в формуле (1.58).

Амплитуда колебаний внешней части 8 платформы может быть получена из выражения (1.54)

$$A_8 = \frac{n^2 \frac{m_H}{K_1} - 1}{n^2 \frac{m_9}{K_9} - 1} A_H . \quad (1.59)$$

Формула (1.59) показывает какую долю от амплитуды A_H колебаний инерционной массы составляет амплитуда внешней части 8 платформы. Но в реальном изделии внешняя часть 8 платформы закреплена. Поэтому интерпретировать формулу (1.59) следует так – какая доля энергии измерительной колебательной системы, составленной из инерционной массы m_H и мембраны, переходит в корпус. Заметим, что отбор энергии от колебательного звена – это снижение добротности звена, следовательно, и точности измерений (см. доказательство выше). Заметим, что энергия колебательного звена пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому рассматриваемое соотношение на уровне энергий будет квадратично.

1.2. Метод Фурье

Метод Фурье применяется для исследования динамических процессов. Пусть имеется измерительный преобразователь с собственной циклической частотой ω_0 , на входе которого действует измеряемая величина в виде некоторой функции времени $s(t)$. В соответствии с методом раскладывают функцию $s(t)$ в гармонический ряд Фурье и получают амплитудно-частотный спектр этой функции. Затем проверяют как соотносятся отдельные гармоники спектра с собственной частотой измерительного преобразователя ω_0 . Может оказаться, что собственная частота ω_0 совпадает с одной из гармоник спектра. В этом случае передаточная функция измерительного преобразователя будет деформирована, т.е. получит резонансный подъём. Величина этого искажения зависит от добротности колебательного звена измерительного преобразо-

вателя и амплитуды соответствующей гармоники спектра. Для уменьшения амплитуды этого резонансного подъёма применяют специальные устройства – демпферы.

Рассмотрим случай измерения крутящего момента. Через величины крутящего момента и частоты вращения определяют мощность двигателей при стендовых испытаниях. В этом случае испытания ведут сопрягая исследуемый двигатель с тормозом, в качестве которого обычно используют электрическую машину в режиме генератора. Для статических режимов испытаний широко применяют в качестве тормоза машины балансирного исполнения (с подвижным статором), которые через весовое устройство позволяют определить крутящий момент. Такой подход не пригоден для динамических режимов в силу большой инерционности статора. Большее быстроедействие дает применение торсионных преобразователей момента. Но при этом возникает проблема резонанса.

Поставим задачу: изучить частотные свойства системы с целью выработки рекомендаций по определению жесткости первичного преобразователя – торсиона.

Известно, что трение (потери энергии) несущественно влияет на частотные свойства, поэтому испытательный стенд будем рассматривать как консервативную систему.

Примем упрощенную физическую модель испытательного стенда в виде последовательно соединенных момента инерции подвижных частей двигателя $I_{дв}$, торсиона с жесткостью C и момента инерции подвижных частей тормоза $I_{т}$.

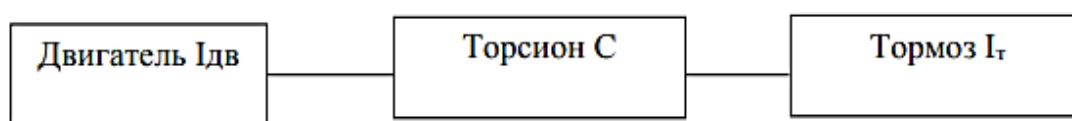


Рис. 1.23. Физическая модель стенда

В этой системе возможен резонанс на круговой частоте

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{I_{прив}}} \quad (1.60)$$

где $I_{прив} = \frac{I_{дв} \times I_{т}}{I_{дв} + I_{т}}$ – приведённый момент инерции стенда.

Динамический режим испытаний характеризуется функцией нагружения $S_T(t)$, которая может быть разложена в гармонический ряд Фурье.

$$S_T(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t), \quad (1.61)$$

где коэффициенты равны

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) \cos n\Omega t dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S_T(t) \sin n\Omega t dt.$$

Формула (1.61) показывает, что в разложении кроме постоянной составляющей a_0 присутствуют гармоники с кратными частотами

$$\lambda_n(t) = a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t = A_{mn} \cos(n\Omega t - \Psi_n) \quad (1.62)$$

с амплитудами

$$A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.63)$$

и начальными фазами Ψ_n , причём

$$\operatorname{tg} \Psi_n = \frac{b_n}{a_n} \quad (1.64)$$

Пусть функция нагружения периодическая и подчиняется треугольному закону – рис. 1.24. Аналитически эта функция имеет вид

$$S_T(t) = \frac{M_{ДВ}}{M_{ДВmax}} = \begin{cases} \frac{2}{T}(t - kT), & \text{при} \\ 0 \leq t - kT \leq \frac{T}{2}, \\ 2 - \frac{2}{T}(t - kT), & \text{при} \\ \frac{T}{2} < t - kT < T, \end{cases} \quad (1.65)$$

где k – целое число.

Ряд Фурье этой функции

$$S_T(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \cos(2n-1)\Omega t \quad (1.66)$$

Этому разложению соответствует амплитудный спектр рис.1.25.

Как видно из рис.1.25 наибольшую амплитуду имеет первая гармоника Ω , далее амплитуды гармоник быстро уменьшаются. Поэтому опасная ситуация соответствует условию

$$\omega_0/2\pi = \Omega \quad (1.67)$$

Таким образом, физическая модель стенда в виде консервативной системы дает

$$I_{ДВ} - C - I_T \quad (1.68)$$

математическую модель: формулы (1.60) - (1.64), а также условие проектирования (1.67), предписывающее разнести по частотному диапазону частоту (1.60) и спектр функции нагружения (1.66).

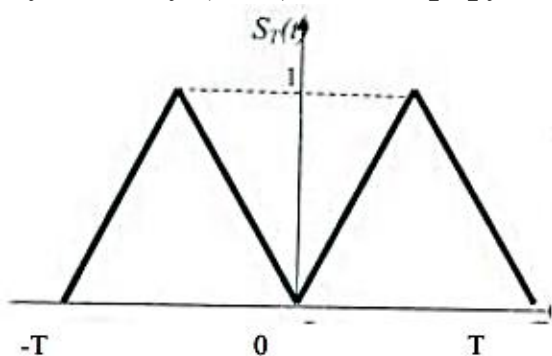


Рис. 1.24. Графическое изображение функции нагружения

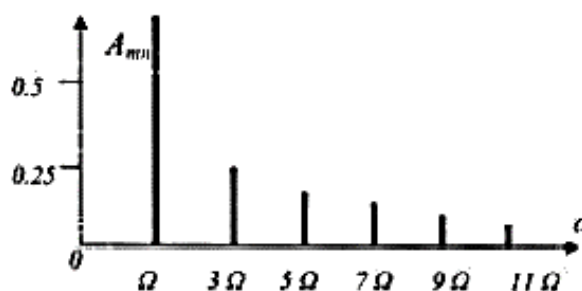


Рис. 1.25. Амплитудный спектр функции нагружения

Может оказаться, что вышеназванное условие конструктивно не реализуется, например, в случае, когда нет выбора тормоза (с необходимым I_T). В этом случае к модели консервативной системы следует добавить демпфер, обеспечивающий коэффициент затухания α . Заметим, что применение демпфера с постоянным (Кулоновым) трением нежелательно, т.к. в этом случае появляется зона застоя в угловом выражении равная

$$\beta = \arctg f_{\text{тр}} \quad (1.69)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент постоянного трения.

Зона застоя определит порог чувствительности.

Демпфер должен выполняться с вязким трением, т.е. трением, зависящим от скорости. С целью снижения точностных требований к элементам демпфера его следует проектировать регулируемым. Оценку эффективности демпфера делают по выбегу – по кривой затухающих колебаний. Амплитуды β_{mi} при выбеге равны

$$\beta_{mi} = \beta_{m0} e^{-\alpha t} \sin(\omega_c t - \Psi), \quad (1.70)$$

где β_{m0} - начальная амплитуда;

α – коэффициент затухания;

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}.$$

Увеличивая коэффициент затухания рассматриваемая система может из колебательной перейти в аperiodическую. Критическому режиму соответствует условие

$$\alpha = \omega_c \quad (1.71)$$

На практике следует устанавливать коэффициент затухания α несколько меньше ω_c .

Функцию преобразования измерителя крутящего момента можно выявить через уравнения движения инерционных масс. Для консервативной системы

$$\begin{cases} I_{\text{дв}}\ddot{\beta}_{\text{дв}} + M_{\text{дв}} = c\beta; \\ I_{\text{т}}\ddot{\beta}_{\text{т}} + M_{\text{т}} = c\beta; \\ M_{\text{дв}} = f(\beta_{\text{дв}}), \end{cases} \quad (1.72)$$

где $\beta = \beta_{\text{дв}} - \beta_{\text{т}}$ – угол скручивания торсиона;

$M_{\text{дв}}, M_{\text{т}}$ – моменты вращения на валах двигателя и тормоза;

$\ddot{\beta}_{\text{дв}}, \ddot{\beta}_{\text{т}}$ – вторые производные угла поворота валов двигателя и тормоза.

Глава 2 МЕМБРАНЫ

В качестве измерительных преобразователей мембраны используются для преобразования вида «давление – сила» или «давление – перемещение». Мембраны применяют в функции вспомогательных устройств, в частности для создания направляющих поступательного или вращательного перемещений. Расчеты мембран приведены в монографии [1]. Рассмотрим применение мембран для измерения ряда механических величин.

2.1. Измерение давления

Рассмотрим применение плоской мембраны в качестве первичного преобразователя на примере датчика давления [12].

Датчик давления устроен следующим образом. Имеется корпус 1, к которому винтами 2 присоединена скоба П-образной формы 3. В корпусе закаткой по контуру закреплена мембрана 4. По осевой линии устройства размещено колебательное звено, представленное плоской упругой лентой (растяжкой) 5 прямоугольного сечения толщиной h и шириной b и инерционной массой (балансом) 6. Концы растяжки закреплены в тисковых зажимах. Нижний зажим (рис. 2.2) содержит опору 7 прямоугольного сечения в верхней ее части (здесь и дальше ориентация по чертежу), имеется накладка 8, которая с помощью

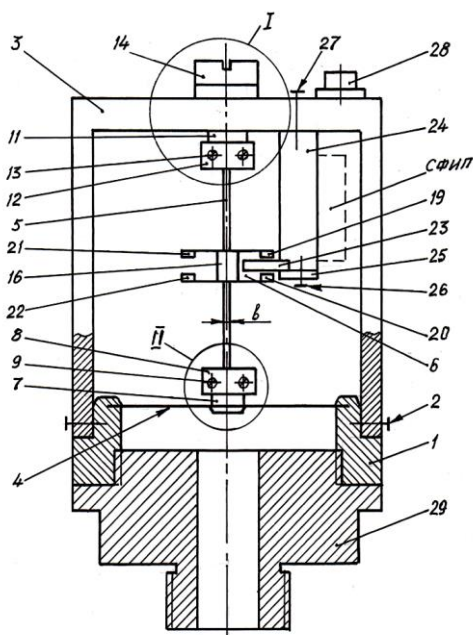


Рис. 2.1. Осевой разрез датчика давления

винтов 9 закрепляет нижний конец растяжки. Для удобства сборки ниже нижней кромки накладки в опоре выполнено глухое отверстие 10 диаметром, соответствующим сечению растяжки. Нижняя часть опоры 7 имеет цилиндрическую форму и развальцовкой закреплена по центру мембраны. Верхний зажим образован опорой 11,

накладкой 12 и винтами 13. Верхняя часть опоры 11 имеет квадратное сечение с центральным резьбовым отверстием и она размещена в отверстии квадратного сечения скобы 3. Крепление верхней опоры осуществляется винтом 14. Для базирования растяжки имеется отверстие 15.

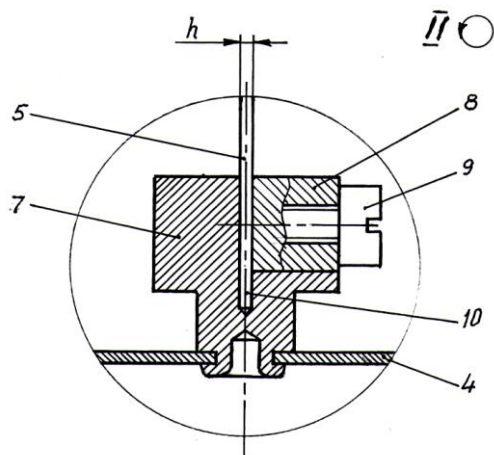


Рис. 2.2. Конструкция крепления конца растяжки в жестком центре мембраны

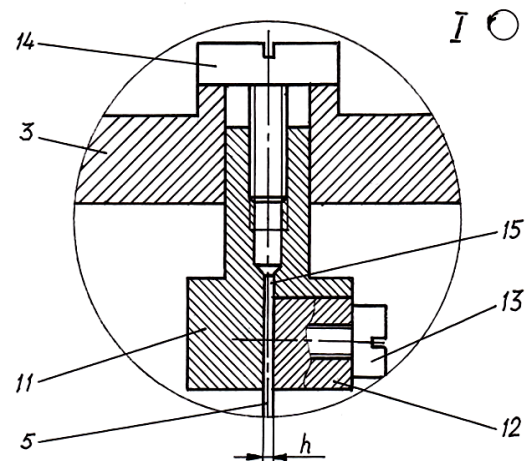


Рис. 2.3. Конструкция крепления конца растяжки на неподвижном элементе

Конструктивно баланс представляет собой сборочную единицу, составленную магнитопроводной втулкой 16, к которой по торцам развальцовкой присоединены два плоских магнитопровода 17, 18. Заметим, что на рис. 2.1 позиции магнитопроводов 17, 18 не обозначены по причинам графической плотности изображения и достаточной ясности по связям и функциям этих элементов в конструкции баланса. По одним концам этих магнитопроводов встречно прикреплены постоянные магниты 19, 20 осевой намагниченности с образованием магнитного зазора. Для приведения центра масс баланса к оси втулки 16 по другим концам магнитопроводов установлены противовесы 21, 22. Крепление баланса в средней части растяжки осуществляется полукруглыми коническими штифтами, устанавливаемыми в отверстие втулки 16 (на чертеже не показаны).

Для обеспечения автоколебательного движения баланса в его магнитный зазор помещена бескаркасная бифилярная (намотанная в два провода) катушка 23. Магниты 19, 20 и катушка образуют магнитоэлектрический привод, управление которым осуществляет электронная схема формирования импульсов привода – СФИП. Электрическая

катушка закреплена в расточке электроизоляционной стойки 24 с помощью накладки 25 и винтов 26. Стойка, в свою очередь, крепится к скобе 3 винтами 27. Схема формирования импульсов привода в простейшем варианте может быть выполнена в виде электронного ключа по рис. 2.4 и смонтирована навесным монтажом на боковой поверхности стойки 24. Электрические выводы СФИП соединены с разъемом 28.

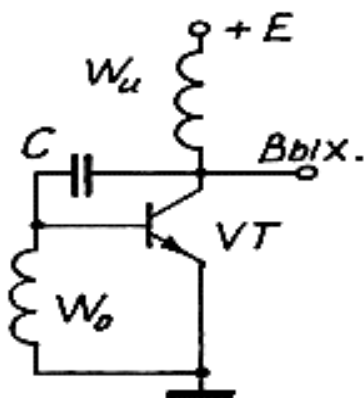


Рис. 2.4. Схема формирования импульсов привода

Присоединение измерителя давления к объекту исследования осуществляется с помощью переходника 29, который по внешней поверхности имеет шестигранную форму под стандартный гаечный ключ.

В реальной конструкции предусматривается герметизирующий чехол, закрывающий пространство автоколебательной системы (на рис. 2.1 чехол не показан).

Сборку измерителя давления осуществляют в следующей последовательности:

- развальцовывают в центральном отверстии мембраны 4 опору нижнюю 7;
- закаткой крепят по внешнему контуру мембрану 4 к корпусу 1;
- присоединяют в средней части заготовки растяжки предварительно собранный баланс;
- крепят верхний конец растяжки к верхней опоре 11;
- снизу вверх вставляют верхнюю опору в квадратное отверстие скобы 3 и предварительно закручивает винт 14;
- устанавливают и крепят к корпусу 1 скобу 3;
- крепят нижний конец растяжки к нижней опоре 7;
- устанавливают предварительно смонтированную (с катушкой 23 и СФИП) стойку 24 и подпаивают выводы СФИП к разъему 28;
- винтом 14 осуществляют исходное натяжение растяжки.

Последнюю операцию проводят исходя из амплитудного диапазона автоколебаний баланса. Большему натяжению растяжки соответствует большая частота автоколебаний, соответственно меньшая амплитуда автоколебаний баланса. По принципу работы магнитоэлектрического привода минимальная амплитуда φ_{\min} баланса равна половине

углового размера катушки. Поэтому, подключив СФИП к источнику электропитания E закручивают винт 14, выдерживая амплитуду баланса несколько больше φ_{\min} . Данной настройке будет соответствовать собственная частота колебаний баланса f_{\max} .

Под действием измеряемого давления исходный прогиб мембраны будет увеличиваться, следовательно, будет уменьшаться натяжение растяжки, что приведет к снижению частоты и увеличению амплитуды автоколебаний. Максимальная амплитуда φ_{\max} обычно принимается равной 270° , если при этом значении не будет превзойдено допустимое механическое напряжение в растяжке.

Таким образом, диапазон измерения давления будет определяться перепадом амплитуд $\varphi_{\min} - \varphi_{\max}$, которому в качестве выходного сигнала соответствуют частоты на выходе СФИП от f_{\max} до f_{\min} .

Определим передаточную функцию датчика давления. Как было отмечено выше, исходная настройка частоты f_{\max} колебательного звена баланс-растяжка осуществляется винтом 14. При этом мембрана 4 будет испытывать предварительную деформацию (прогиб центра) δ_0 . Этому предварительному прогибу соответствует некоторое (виртуальное) давление P_0 с внешней (нижней по чертежу) стороны мембраны. Воспользуемся соотношениями Л.Е. Андреевой (Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1962. С. 232-233)

$$\delta_0 = \frac{P_0 R^4}{64D}, \quad (2.1)$$

где R – внешний радиус мембраны;

$$D = \frac{E_M h_M^3}{12(1-\mu^2)} - \text{цилиндрическая жесткость мембраны.} \quad (2.2)$$

В формуле (2.2) обозначено E_M , h_M , μ – соответственно модуль упругости первого рода материала мембраны, ее толщина и коэффициент Пуассона.

С достаточной точностью можно принять $\mu=0,3$ (см. замечание Л.Е. Андреевой), тогда формула (2.1) может быть записана в виде

$$\frac{P_0 R^4}{E_M h_M^4} = \frac{16}{3(1-\mu^2)} \frac{\delta_0}{h_M} = 5,86 \frac{\delta_0}{h_M}. \quad (2.3)$$

Равнодействующая сил давления P_0 , приведенная к центру мембраны, равна

$$F_0 = \pi R^2 P_0. \quad (2.4)$$

С учетом выражений (2.3), (2.4) получим силу предварительного натяжения растяжки

$$F_0 = \pi R^2 \cdot 5,86 \frac{E_M h_M^3}{R^4} \delta_0 = \pi R^2 \cdot K, \quad (2.5)$$

где
$$K = 5,86 \frac{E_M h_M^3}{R^4} \delta_0. \quad (2.6)$$

Частота собственных колебаний баланса определяется моментом инерции I_δ баланса b и жесткостью на кручение C растяжки 5

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{I_\delta}}. \quad (2.7)$$

Жесткость C может быть выражена через первичные параметры

$$C = \frac{2}{3} \frac{b_p h_p G_p}{l_p} + \frac{b_p}{6l_p} F, \quad (2.8)$$

где G_p, h_p, b_p, l_p – соответственно, модуль упругости 2-го рода (модуль сдвига) материала растяжки, толщина, ширина и длина растяжки;

F – сила натяжения растяжки.

Примем обозначения

$$A = \frac{2}{3} \frac{b_p h_p G_p}{l_p I_\delta}, \quad (2.9)$$

$$B = \frac{b_p}{6l_p I_\delta}, \quad (2.10)$$

тогда формула (2.7) для исходной настройки примет вид

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{A + B F_0}. \quad (2.11)$$

При появлении измеряемого давления P_u возникает дополнительная деформация δ_u мембраны 4

$$\delta_u = \frac{R^4}{64D} P_u, \quad (2.12)$$

которой соответствует равнодействующая сила

$$F_u = \pi R^2 P_u. \quad (2.13)$$

Текущее значение частоты колебаний баланса при наличии измеряемого давления составит

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{A + B(F_0 - F_u)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{A + B'K - B'P_u} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{Z - B'P_u}. \quad (2.14)$$

В формуле (2.14) приняты обозначения

$$B' = 2\pi B \text{ и } Z = A - B'K. \quad (2.15)$$

Преобразуя формулу (2.14) получим передаточную функцию датчика давления

$$P_u = \frac{(Z - 4\pi^2)}{B'} f^2. \quad (2.16)$$

На рис. 2.5 показаны вид функции прогиба центра мембраны $\delta_u(P_u)$ и вид функции частоты колебаний баланса $f(P_u)$. С ростом измеряемого давления P_u растет прогиб центра мембраны и уменьшается частота колебаний за счет снижения натяжения растяжки.

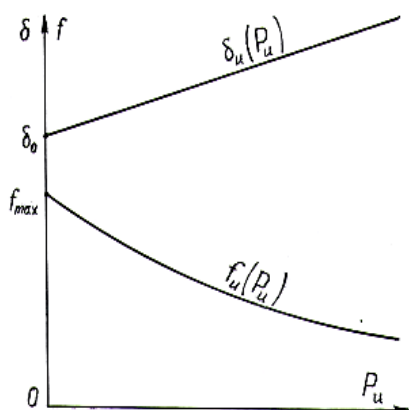


Рис. 2.5. Вид функций прогиба центра, мембраны δ (P_u) и частоты колебаний баланса f (P_u)

Предлагаемый датчик давления может использоваться либо в составе измерительно-вычислительного комплекса, либо в качестве автономного прибора. Во втором случае электронный блок прибора может быть реализован на базе микропроцессора, во флеш-память которого записывается передаточная функция датчика давления — формула (2.16).

Работает датчик давления следующим образом. С помощью переходника 29 закрепляют датчик давления на объекте исследования и соединяют кабелем электрический разъем 28 с электронным блоком.

При появлении измерительного давления P_u мембрана 4 испытывает дополнительный прогиб δ_u , который уменьшает натяжение растяжки 5. Уменьшение натяжения растяжки приводит к снижению частоты автоколебаний баланса 6. Частота автоколебаний со СФИП в форме импульсного сигнала через электрический разъем 28 передается в электронный блок, где обрабатывается по формуле (2.16).

Таким образом, в предлагаемом техническом решении мембрана работает полной поверхностью при малых деформациях, что обеспечивает линейность первичного преобразования. Датчик давления не содержит кинематических пар трения, соответственно, и зоны застоя. Колебательное звено баланс-растяжка обладает высокой добротностью и, как следствие, стабильностью его частоты. Частотный выходной сигнал датчика давления квантуется с высокой точностью и надежностью простыми аппаратными средствами. Указанные обстоятельства реализуют необходимую точность измерения при достаточно простой конструкции.

2.2. Измерение ускорений

Плоская мембрана позволяет спроектировать измерительный преобразователь ускорения [17]. Здесь использован оригинальный демпфер.

Чувствительным элементом генераторного акселерометра служит инерционное тело в виде стержневого постоянного магнита 1. Магнит посредством завальцовки закреплен в центральном отверстии мембраны 2, которая выполняет функции направляющей перемещения стержневого постоянного магнита (шарнира) и упругого элемента. В зависимости от диапазона измерения мембрана может быть плоской или гофрированной. Мембрана по внешнему контуру завальцована в кольцо 3, которое винтами 4 закреплено на корпусе 5. Корпус имеет чашеобразную форму, внутри него винтами 6 закреплен каркас 7 электрической катушки 8. Электрическая катушка совместно с инерционным телом в виде стержневого постоянного магнита 1 образуют магнитоэлектрический преобразователь. Осевые линии корпуса 1, мембраны 2, корпуса 7 и стержневого постоянного магнита 1 совмещены.

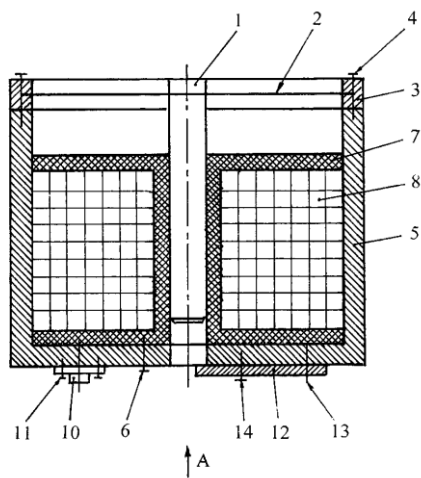


Рис. 2.6. Осевой разрез акселерометра

Магнит 1 установлен в каркасе 7 с некоторым радиальным зазором. В нижней части корпуса (ориентация чертежа) под торцом стержневого постоянного магнита выполнено сквозное отверстие 9. Электрические выводы катушки 8 проведены через отверстие корпуса (на чертеже не показано) и подпаяны к электрическому разъему 10, закрепленному винтами 11 к внешней торцовой поверхности корпуса. На этой же поверхности размещена заслонка 12, имеющая ось вращения в виде штифта 13 и фиксатор положения в виде винта 14, входящего в дугообразный паз 15 заслонки. Заслонка имеет такой внешний контур, что при ее повороте она частично перекрывает сквозное отверстие 9, изменяя его проходное сечение. В варианте автономного исполнения генераторный акселерометр снабжается защитным кожухом.

Таким образом, изложенные конструктивные решения соответствуют принципу агрегатности: основные детали образуют две сборочные единицы – чувствительный элемент (детали 1,2,4) и катушку (детали 7,8), что повышает технологичность конструкции. Детали генераторного акселерометра просты по форме, их изготовление предполагает типовые технологические процессы.

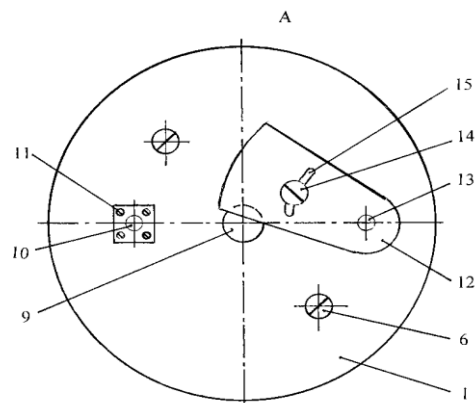


Рис. 2.7. Вид А по рис. 2.6

Поясним назначение и функции отдельных элементов акселерометра.

Под действием измеряемого ускорения $a(t)$ в осевом направлении x движение постоянного магнита 1 будет определяться выражением

$$m\ddot{x} + h_u\dot{x} + Dx = m * a(t), \quad (2.17)$$

где m – масса постоянного магнита,

h_u – интегральный коэффициент трения,

D – осевая жесткость мембраны,

\dot{x}, \ddot{x} – соответственно первая и вторая производные перемещения x по времени.

Перепишем выражение (2.17) в виде

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2x = a(t), \quad (2.18)$$

где $\beta = \frac{h_u}{2m}$ – коэффициент затухания,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}}$ – собственная круговая частота системы магнит-мембрана.

При $\beta < \omega_0$ имеет место колебательный режим с частотой

$$\omega_k = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (2.19)$$

Измеряемое ускорение представляет собой некоторую непрерывную функцию времени, которая для анализа может быть разложена в гармонической ряд Фурье

$$a(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t, \quad (2.20)$$

где a_0 – постоянная составляющая,

a_n, b_n – коэффициенты Фурье.

Отдельная гармоника

$$\lambda_n = a_n \cos \Omega t + b_n \sin \Omega t = A_{mn} \cos \Omega_b - \Psi_n \quad (2.21)$$

может иметь большую амплитуду A_{mn} и ее частота может совпасть с собственной частотой ω_0

$$n\Omega = \omega_0, \quad (2.22)$$

что приведет к явлению резонанса и к нарушению линейности преобразования.

Для исключения деформации функции преобразования служит заслонка 12, которая совместно со сквозным отверстием 9 корпуса выполняет функцию демпфера. При перемещении магнита образуется поршневой эффект и давление воздуха под торцом магнита изменяется пропорционально скорости \dot{x} . Если за счет поворота заслонки изменять проходное сечение сквозного отверстия 9, то пропорционально будет изменяться коэффициент вязкого трения h_u

$$h_u = \rho S, \quad (2.23)$$

где ρ – плотность воздуха,

S – проходное сечение отверстия 9.

За счет этого регулирования можно колебательную систему приблизить к апериодической. Граничное условие

$$\omega_0 = \beta. \quad (2.24)$$

Заметим, что некоторую небольшую долю в коэффициент затухания вносят потери энергии в материале мембраны (гистерезис) и сопротивление о воздух.

Таким образом, при юстировке акселерометра поворотом заслонки 12 приближают систему к условию (2.24), при этом перемещение магнита 1 будет пропорционально действующему ускорению $a(t)$.

Работа генераторного акселерометра. Под действием измеряемого ускорения $a(t)$ возникает переменная во времени сила

$$F = ma(t), \quad (2.25)$$

приложенная к стержневому постоянному магниту 1. Под действием этой силы постоянный магнит смещается на величину

$$x = \frac{F}{D}. \quad (2.26)$$

Смещение постоянного магнита приводит к образованию индукционной ЭДС в катушке 8 магнитоэлектрического преобразователя

$$e_u = k\dot{x}, \quad (2.27)$$

где k – константа генераторного акселерометра, определяемая конкретным исполнением (магнитная индукция, развиваемая постоянным магнитом 1, число витков катушки 8).

Выходной сигнал генераторного акселерометра (2.27) в соответствии с формулами (2.25), (2.26) однозначно определяет искомый параметр. Выходной сигнал не зависит от исходного (статического) положения стержневого постоянного магнита – снимается проблема нулевого сигнала.

Таким образом, предлагаемый генераторный акселерометр предназначен для измерения изменяющихся во времени линейных ускорений и образует измерительный сигнал без дополнительного источника электропитания. За счет простой формы деталей и блочного исполнения генераторный акселерометр высокотехнологичен.

В рассмотренном выше акселерометре угловой поворот центра мембраны ограничен сопряжением «постоянный магнит 1 – каркас электрической катушки 7». В устройстве [19] использовано другое решение – применены две плоские мембраны прямоугольной формы. Гашение колебаний осуществлено магнитоэлектрическим демпфером.

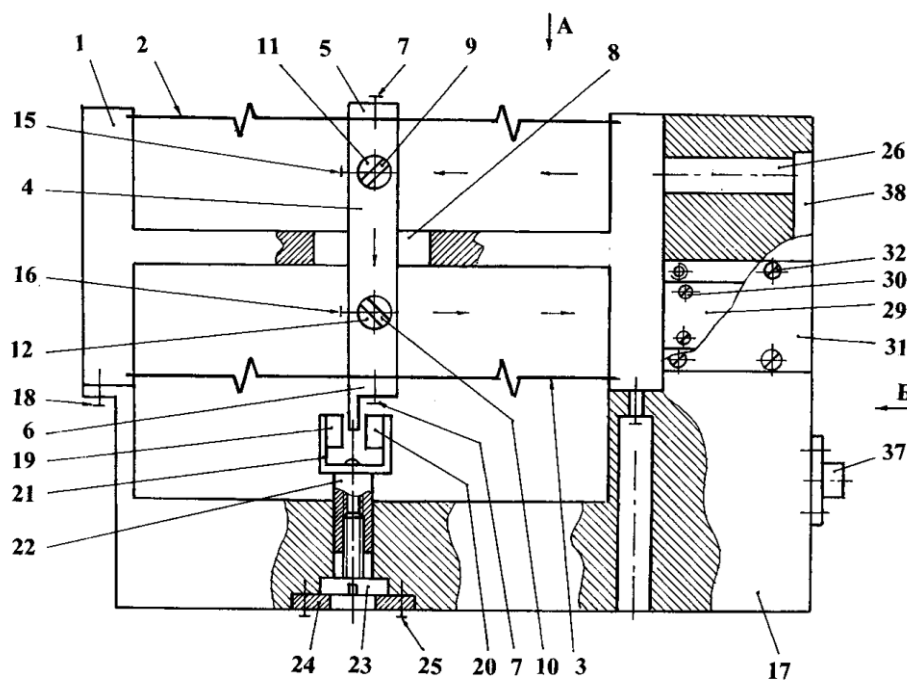


Рис. 2.8. Конструктивная схема устройства для измерения ускорений

Чувствительный элемент выполнен в виде отдельной оборочной единицы на базе корпуса 1 по форме двутавра. Сверху и снизу (здесь и далее ориентация чертежа) типовым образом завальцовкой закреплены две плоские пружины 2, 3. В зависимости от диапазона измерения эти

пружины могут выполняться гофрированными. Пружины имеют прямоугольную форму. Учитывая способ закрепления, характер возникающих механических напряжений и методику их расчета на прочность и жесткость, далее их будет именовать мембранами. Заметим, что возможно применение классических мембран круглой формы, но это приведет к уложению конструкции. В жестких центрах мембран 2, 3 закреплена инерционная масса, которая в своей основе имеет вставку 4, верхнюю 5 и нижнюю 6 – накладки, которые с помощью винтов 7 присоединены к вставке. Вставка размещена в окне 8 корпуса 1 чувствительного элемента.

Вставка содержит элементы зеркального отражателя. Имеется два плоских зеркала 9, 10, которые закреплены на консольных участках стержней 11, 12. Вторые концы стержней на своих выступах 13 имеют шпильки 14, с помощью которых осуществляется поворот стержней. В рабочем положении зеркала 9, 10 располагаются под углом 90° друг к другу, соответственно под 45° к оптическому лучу. Фиксация положения стержней осуществляется винтами 15, 16. Корпус 1 чувствительного элемента крепится на корпусе 17 устройства для измерения ускорений винтами 18.

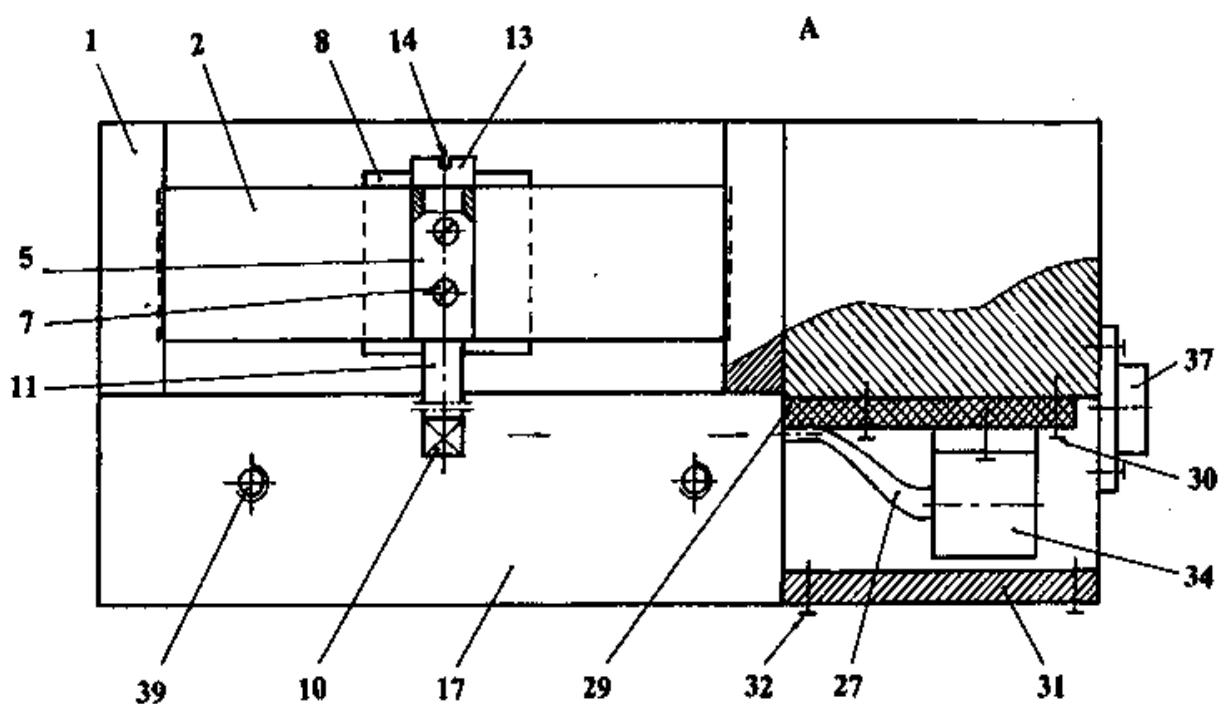


Рис. 2.9. Вид А по рис. 2.8

Чувствительный элемент снабжен демпфером колебаний. В демпфер колебаний входит магнитная система, составленная из двух постоянных магнитов 19, 20 осевой намагниченности и магнитопровода 21. В образованном магнитом зазоре размещена часть нижней накладки 6. Действие демпфера заключается в том, что при перемещении электропроводной накладки в магнитном зазоре в ней индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем зазора обеспечивают силу сопротивления. Эта сила пропорциональна скорости и площади перекрытия накладки магнитным зазором. Предусмотрено регулирование исходной площади перекрытия. Магнитная система закреплена на штоке 22 квадратного сечения, который размещен в корпусе 17 устройства для измерения ускорений.

Регулирование осуществляется винтом 23, а фиксация положения - шайбой 24 с винтами 25. Смещение инерционной массы воспринимается волоконно-оптическим информационным преобразователем.

Волоконно-оптический информационный образователь представлен осветителем 26 (например лазерным), который формирует тонкий луч света. Имеется световод 27 и фотоприемник 28 (например фотодиод). Световод с фотоприемником выполнены в виде отдельной сборочной единицы на плате 29 (см. рис. 2.10), закрепленной финтами 30 в нише корпуса 17 и защищенной крышкой 31 с винтами 32. Фотоприемник 28 установлен во втулке 33, которая размещена в кронштейне 34, последний крепится винтами 35 к плате 29.

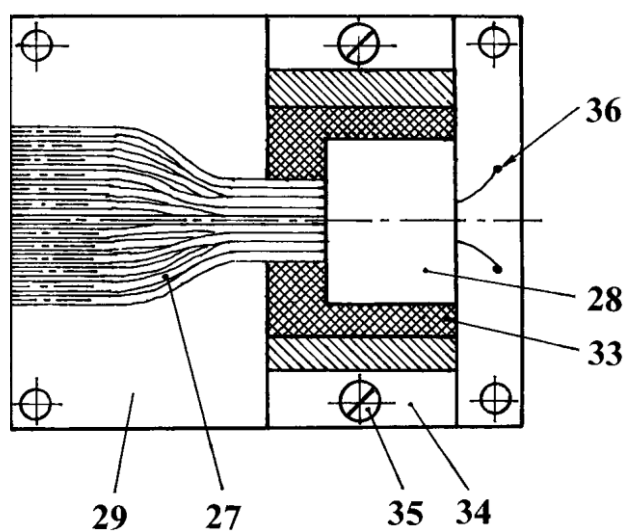


Рис. 2.10. Конструкция платы фотоприемника

Первые (обращенные к зеркальному отражателю) концы световолокон световода 27 уложены на плате 29 в один слой с равным шагом, а вторые – собраны в пучок во входном отверстии втулки 33 фотоприемника. Такая конструкция позволяет варьировать технологией формирования световода.

После окончательной сборки световод фиксируется

компаундом. Электрические выводы фотоприемника подпаяны к монтажным стойкам 36.

Положение и направления лучей света на чертежах показано стрелками. Необходимо отметить, что в исходном положении инерционной массы и при ее смещении под действием измеряемого ускорения прямой (осветителя) и отраженные лучи света параллельны, что обеспечивает пропорциональность перемещения луча на линейки световолокон в функции смещения инерционной массы, а значит и измеряемого ускорения.

Для соединения с блоком обработки сигнала предусмотрен электрический разъем 37. Укладка монтажных проводов осуществляется в нише 38 корпуса. В зависимости от условий применения устройство для измерения ускорений может комплектоваться защитным кожухом. Крепление устройства для измерения ускорений на объекте исследований осуществляется с помощью резьбовых отверстий 39 корпуса. Предлагаемые конструктивные решения соответствуют принципу агрегатности – основные детали устройства образуют три оборотных единицы: чувствительный элемент, плата фотоприемника и корпус устройства, что повышает технологичность конструкции. Детали просты по форме, их изготовления предполагает типовые технологические процессы.

Найдем передаточную функцию устройства. Осью чувствительности является осевая линия инерционной массы, назовем ее ось X. Под действием измеряемого ускорения $a(t)$ движение инерционной массы величиной m будет определяться уравнением

$$m\ddot{x} + h_u\dot{x} + Dx = m \times a(t) \quad (2.28)$$

где: D – жесткость мембран;

h_u – интегральный коэффициент трения;

\dot{x} , \ddot{x} - соответственно первая и вторая производные перемещения по времени.

Перепишем выражение (2.28) в виде

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2x = a(t), \quad (2.29)$$

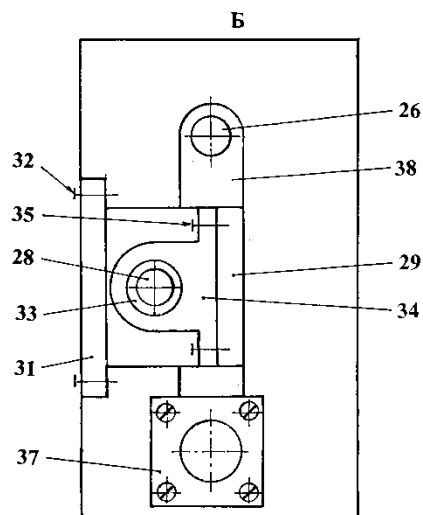


Рис. 2.11. Вид Б по рис 2.8.

где: $\beta = h_a/2m$ – коэффициент затухания;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}}$ собственная круговая частота чувствительного элемента.

При $\beta > \omega_0$ имеет место колебательный режим с частотой

$$\omega_k = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (2.30)$$

Измеряемое ускорение представляет собой некоторую непрерывную функцию времени, которая для анализа может быть разложена в гармонический ряд Фурье

$$a(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t \quad (2.31)$$

где a_n, b_n – коэффициенты Фурье;

a_0 – постоянная составляющая

Отдельная гармоника ряда

$$\lambda_n = a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t = A_{mn} \cos(n\Omega t - \psi_n) \quad (2.32)$$

может иметь большую амплитуду $A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ и ее частота может совпадать с собственной частотой ω_0 чувствительного элемента

$$n\Omega = \omega_0, \quad (2.33)$$

что приведет к явлению резонанса и деформации функции преобразования.

Для исключения этого явления в предлагаемом устройстве предусмотрен демпфер колебаний. При смещении инерционной массы в нижней накладке b индуцируются вихревые токи

$$i = k_i \dot{x} \quad (2.34)$$

пропорциональные скорости. Коэффициент k_i зависит от магнитной индукции зазора и электропроводности накладки. Появляется сила вязкого трения, определяемая коэффициентом трения

$$h_u = k_u \times i. \quad (2.35)$$

Коэффициент k_u зависит от площади перекрытия накладки магнитным зазором.

Изменяя исходное положение магнитной системы демпфера колебаний (за счет поворота винта 23) можно приблизить колебательную систему к апериодической. Граничное условие

$$\omega_0 = \beta. \quad (2.36)$$

Заметим, что некоторую долю в интегральный коэффициент трения h_u вносят потери энергии о воздух и внутреннее чистерезисное трение в материале мембран.

Для апериодического режима при скачке ускорения на величину a_0 получим решение

$$a(t) = a_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (2.37)$$

где $\tau_1 = m/h_u$; $\tau_2 = h_u D$.

Линеаризируя зависимость (2.37) получим функцию

$$a(t) = a_0 k t^2 N, \quad (2.38)$$

где константа устройства равна

$$K = h_u/m - 1/h_u D, \quad (2.39)$$

т.е. получаемый результат пропорционален длительности t_w прохождения лучом света шагов световода 27 и количеству N прошедших шагов. Юстировка устройства для измерения ускорений заключается в симметрировании луча света на световоде за счет поворота стержней 11, 12 зеркал и в обеспечении апериодического режима чувствительного момента за счет вращения винта 23 демпфера с последующей фиксацией, соответственно финтами 15, 16 и шайбой 24 с винтами 25.

При производстве измерений закрепляют устройство для измерения ускорений на объекте исследований с помощью резьбовых отверстий 39 корпуса 17, совмещая направление измеряемого ускорения с осью чувствительности устройства т.е. перпендикулярно площади крепления. Под действием измеряемого ускорения инерционная масса смещается, что приводит к смещению луча света на световоде и получению электрических импульсов на фотоприемнике. Обработка этого сигнала ведется в соответствие с формулой (2.38).

Таким образом, предлагаемое устройство для измерения ускорений позволяет получить достоверный результат измерения за счет линейности преобразования и дискретной формы информации. Отсутствие в кинематической цепи пар постоянного (Кулонова) трения обеспечивает постоянство параметров устройства в функций времени и

условий применения. Конструкция устройства проста и технологична. Этому способствует агрегатный (блочный) принцип построения. Применяемые детали имеют простую форму и предполагают освоенные промышленностью технологические процессы.

2.3. Измерение перепада давления

Одна из проблем при проектировании средств измерения перепада давления – это проблема точности. В соответствии с теорией погрешностей абсолютная погрешность разности равна сумме абсолютных погрешностей уменьшаемого и вычитаемого. Рассмотрим как решается эта проблема в устройстве [23], в котором первичными преобразователями служат мембраны.

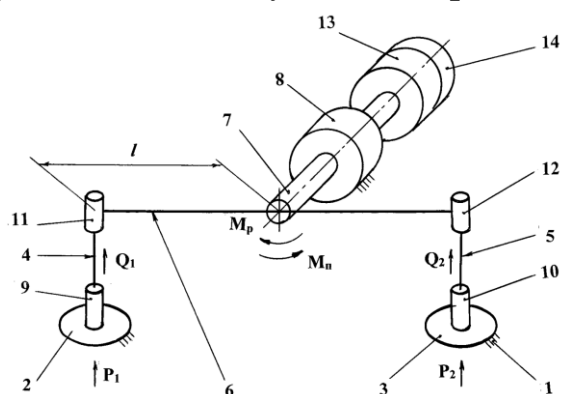


Рис. 2.12. Структурно-расчетная схема

Все элементы датчика смонтированы на корпусе 1 в форме пластины. Имеется мембранный преобразователь, содержащий две мембраны 2,3, жесткие центры которых соединены гибкими тягами 4,5 с концами качающегося рычага 6. Вал 7 рычага установлен в подшипнике 8. Жесткие центры 9,10 мембран выполнены в виде цанговых зажимов, аналогичные зажимы 11,12 закреплены на концах рычага. Гибкие тяги представляют собой отрезки стальной проволоки. С валом рычага кинематически связан преобразователь перемещения 13, содержащий модулятор 14.

Все элементы датчика смонтированы на корпусе 1 в форме пластины. Имеется мембранный преобразователь, содержащий две мембраны 2,3, жесткие центры которых соединены гибкими тягами 4,5 с концами качающегося рычага 6. Вал 7 рычага установлен в подшипнике 8. Жесткие центры 9,10 мембран выполнены в виде цанговых зажимов, аналогичные зажимы 11,12 закреплены на концах рычага. Гибкие тяги представляют собой отрезки стальной проволоки. С валом рычага кинематически связан преобразователь перемещения 13, содержащий модулятор 14.

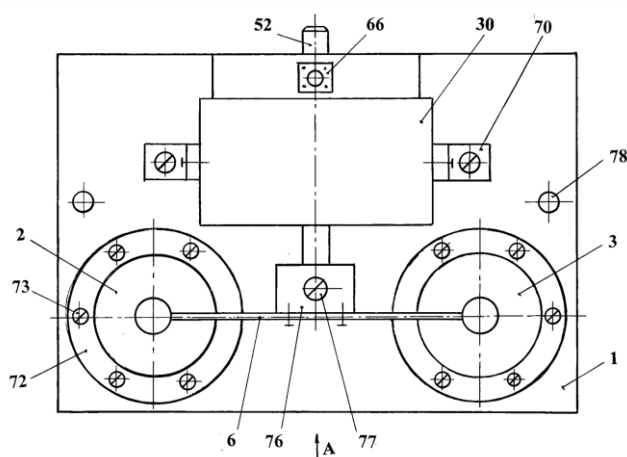


Рис. 2.13. Компонировочная схема

Типовые конструкции подшипников характеризуются некоторым моментом постоянного (Кулонова) трения. Наличие этого трения создает зону застоя (зону нечувствительности) φ_3 , определяемую коэффициентом трения $f_{тр}$

$$\varphi_3 = \arctg f_{тр}. \quad (2.40)$$

Указанное обстоятельство ограничивает точность измерения, особенно в области малых значений, поэтому подшипник 8 выполнен на упругих направляющих.

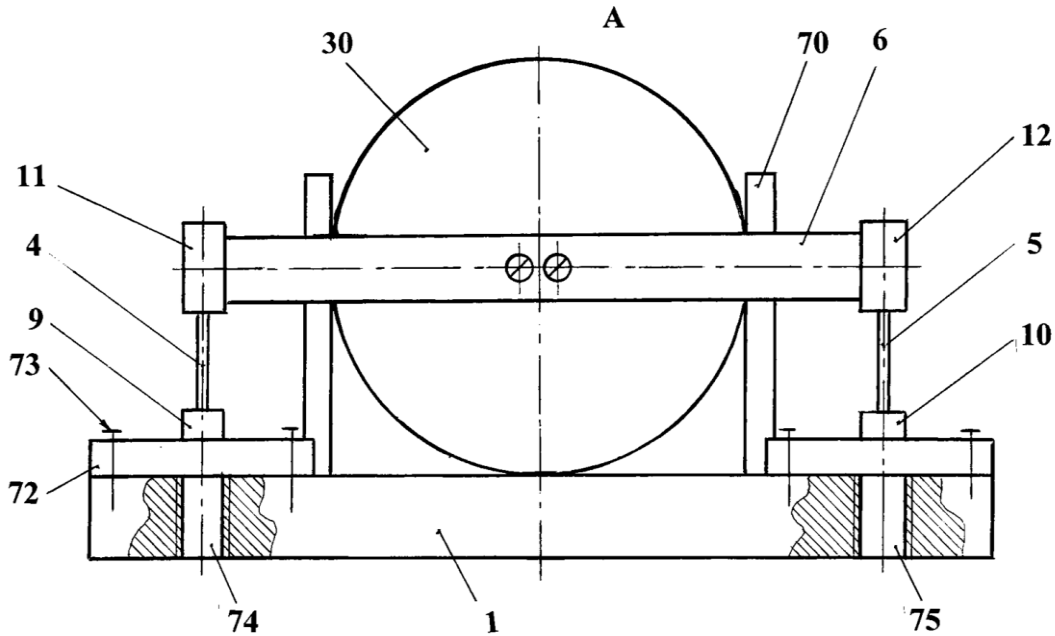


Рис. 2.14. Вид А по рис. 2.13

Подшипник выполнен из двух секций 15, 16. Каждая секция (рис. 2.15) содержит обойму 17 и две плоские пружины 18, 19.

Первые концы плоских пружин закреплены на валу в поперечном пазу с помощью накладок 20, 21 и винтов 22, 23. Вторые концы плоских пружин закреплены с применением накладок 24, 25 и винтов 26, 27 на обойме в ее торцовых углублениях. Пружины каждой секции расположены под углом 90 градусов друг к другу. При монтаже секций 15, 16 устанавливают так, чтобы их одноименные плоские пружины были в одной осевой плоскости. Обоймы подшипников закреплены винтами 28, 29 на корпусе 30 подшипника.

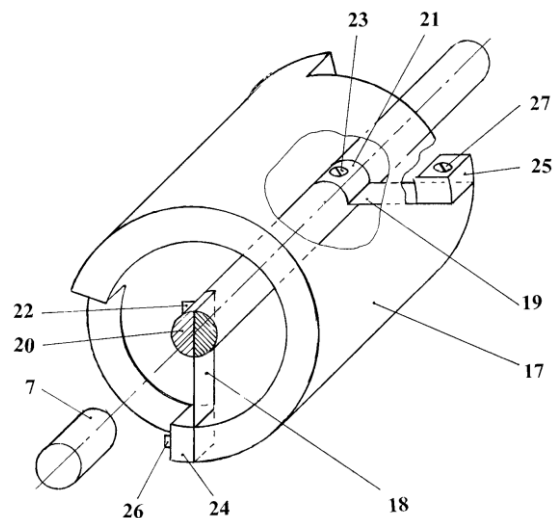


Рис. 2.15. Кинематическая схема подшипника качающегося рычага

$$\varphi = M_{\Pi} / D_{\Pi}, \quad (2.41)$$

где φ – угол поворота вала;

D_{Π} – суммарная жесткость на кручение плоских пружин;

M_{Π} – крутящий момент.

Преобразователь перемещения в выходной электрический сигнал и модулятор образуют общий конструктивный блок с подшипником – см. рис. 2.16.

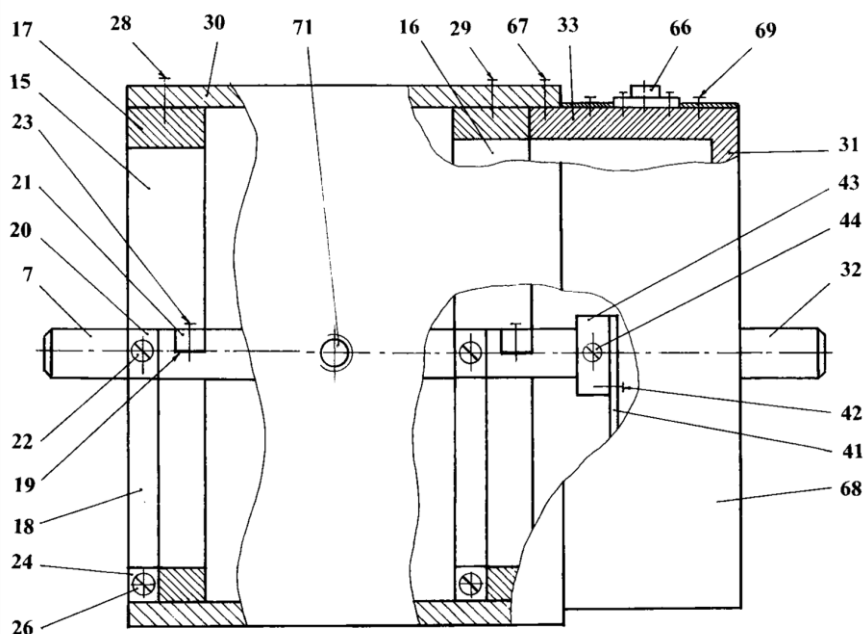


Рис. 2.16. Конструктивная схема преобразователя перемещения

Монтажной основой этой сборочной единицы служит плата 31 в форме круга, имеющая соосный хвостовик 32 и выступы 33 для присоединения к корпусу подшипника. Хвостовик предназначен для проведения метрологической аттестации и периодической поверки.

Имеется оптический канал на основе оптического кронштейна 34, который винтами 35 закреплен на плате 31. На общей осевой линии, параллельной осевой линии вала, на оптическом кронштейне установлен источник света 36, по разные стороны от него – фотоприемник 37 преобразователя и фотоприемник 38 модулятора. Для укладки электрических выводов фотоприемников в оптическом кронштейне предусмотрены пазы 39.

На рис. 2.17 в качестве источника света изображена безкорпусная лампочка (например, НСМ-9), которая своими выводами подпаяна к контактным стойкам. С целью снижения требований к фотоприемникам на размер их оптических окон в кронштейне 34 предусмотрены одинаковые калиброванные отверстия 40. Подвижным элементом оптического преобразователя является шторка 41, которая выполнена в виде плоской непрозрачной пластины, соединенной винтами 42 со втулкой 43. Посредством стопорных винтов 44 втулка крепится на валу 7. Второй конец шторки находится в зоне оптического луча источника света и имеет симметричный паз шириной равной диаметру оптического окна фотоприемника 37 преобразователя. Таким образом, при повороте вала 7 шторка будет изменять величину светового потока источника света 56.

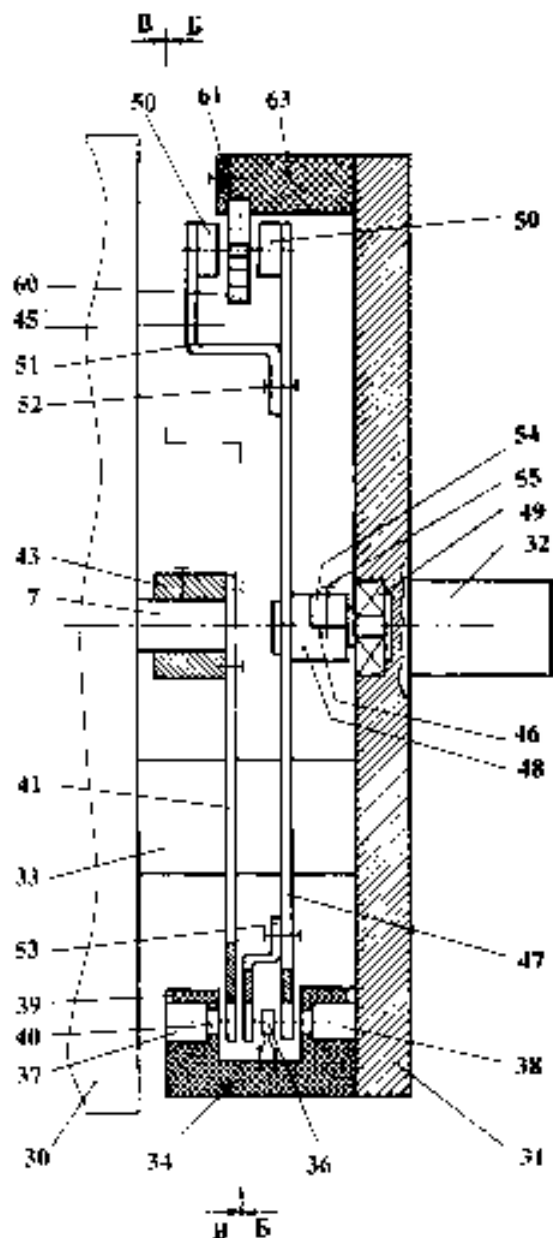


Рис. 2.17. Осевой разрез преобразователя перемещения

Поскольку в процессе поворота шторки относительное изменение светового потока мало, то погрешность этого преобразователя окажется неприемлемо большой. Поэтому в предлагаемом устройстве предусмотрен модулятор светового потока, с помощью которого результат преобразования переводится в дискретную форму. Модулятор построен на основе автоколебательной системы с магнитоэлектрическим приводом.

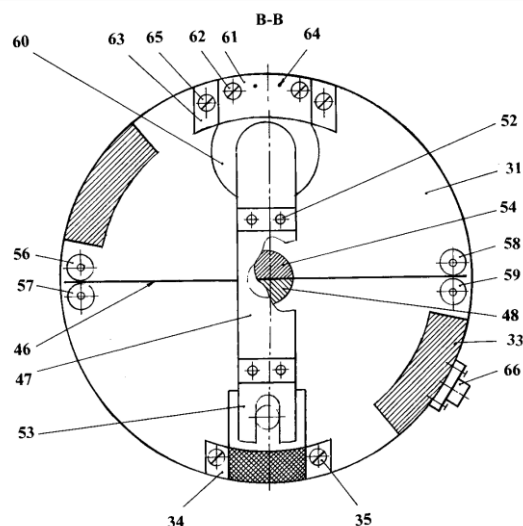
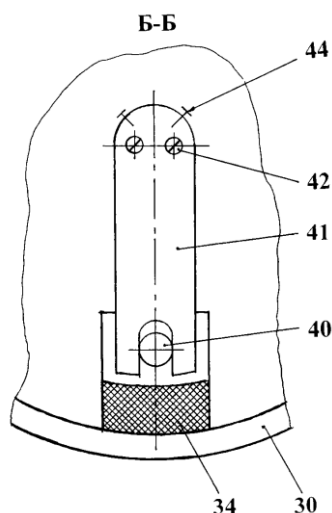


Рис. 2.18. Разрез Б-Б по рис. 2.17 Рис. 2.19. Разрез В-В по рис. 2.17

Колебательное звено составлено из баланса 45 (инерционное тело) и упругого элемента 46 в виде плоской пружины. Баланс составлен из крыла 47 в форме ленты, закрепленной методом развальцовки на валу 48, который установлен в подшипнике 49 платы 31. На одном конце крыла смонтирована магнитная система с двумя постоянными магнитами 50, которые образуют магнитный зазор с однородным магнитным полем. С целью упрощения конструкции крыло баланса следует выполнять из магнитопроводного материала, как и магнитопровод 51 магнитной системы. Магнитопровод 51 закреплен на крыле 47 заклепками 52. Постоянные магниты закреплены клеем.

На втором конце крыла баланса выполнена вилочная часть в виде параллельных поверхностей, составленных из крыла 47 и скобы 53. На элементах вилочной части выполнены симметричные относительно ее ширины радиальные пазы, равные по ширине пазу шторки 41 (соответственно равные диаметру оптических окон кронштейна 34.) Элементы вилочной части размещены по разные стороны источника света 36. Баланс статически уравновешен. Крепление упругого элемента колебательного звена выполнено следующим образом. Плоская пружина 46 средней частью закреплена с помощью накладки 54 и винта 55 в пазу вала 48. Концы пружины размещены в зазорах внешних колец пар подшипников качения – одна пара 56, 57 другая – 58, 59.

Магнитоэлектрический привод, кроме отменной выше магнитной системы баланса, составляет бифилярная (намотанная в два про-

вода) электрическая катушка 46 и схема формирования импульсов привода СФИП. Применена типовая СФИП на одном транзисторе. Катушка 60 привода закреплена накладкой 61 и винтами 62 на кронштейне 63 катушки. При сборке элементов СФИП обмоточные провода катушки (марки ПЭЛ или ПЭВ) подпаиваются к контактными шрифтам 64, закрепленным на накладке 61. Элементы СФИП – транзистор и конденсатор – смонтированы методом навесного монтажа на кронштейне 63. Кронштейн 63 закреплен на плате 31 винтами 65. Монтажные провода (МГШВ – 0,12) уложены по поверхностям рассматриваемой сборочной единицы, закреплены компаундом и соединены с электрическим разъемом 66, который установлен на одном из выступов 35 платы 31. Заметим, что выходные параметры автоколебательной системы – амплитуда и частота – не влияют на результат измерения искомого параметра, не требует юстировочных операций. Из соображений стабильности частоты амплитуду и автоколебаний баланса следует выбирать в номинальном выражении 45 градусов. С целью уменьшения количества проводов в кабеле связи датчика с электронным блоком напряжение питания СФИП и источника света 36 следует выбирать равными. Сборочная единица “Оптический преобразователь угла поворота в электрический сигнал” присоединяется к корпусу 30 по его внутреннему диаметру выступами 33 платы 31 с помощью винтов 67. Безопасность в служебном обращении обеспечивается кожухом из тонколистового материала в форме цилиндра. Стык кожуха на выступе электрического разъема фиксируется винтами 69. При сборке датчика юстировочная операция заключается в симметрировании положения пазов вилочной части модулятора относительно оптического окна фотоприемника 38 модулятора за счет крепежа оптического кронштейна 34, затем добиваются аналогичного положения оптического окна фотоприемника 37 с последующей фиксацией найденного положения стопорными винтами 44.

Перед общей сборкой датчика предварительно собирают ряд сборочных единиц:

Сборочная единица “Подшипник”. Монтируют секции 15,16 и закрепляют их в корпусе 30.

Сборочная единица “Модулятор”. Монтируют на плате 31 элементы модулятора. Устанавливают шторку 41 и присоединяют плату к

корпусу 30. Получают единый конструктивный блок “Преобразователя перемещения”.

Сборочная единица “Мембрана” – 2 шт. Собственно мембрану, например 2 крепят по наружному контуру в кольцевой оправке 72, а в центральном отверстии крепят цанговый зажим 9. Каждая из этих сборочных единиц будет крепиться винтами 73 над каналами 74,75 подвода перепада давления.

Сборочная единица “Качающийся рычаг” составлена из рычага 6, двух цанговых зажимов 11, 12, втулки 76 и крепежных винтов.

Общую сборку датчика начинают с крепежа сборочных единиц “Мембрана” на корпусе 1. Затем с помощью кронштейнов 70 с использованием резьбовых отверстий 71 в корпусе 30 подшипника закрепляют единый конструктивный блок “Преобразователь перемещения”. Далее стопорными винтами 77 скрепляют сборочную единицу “Качающийся рычаг” на валу 7 рычага. После этого закрепляют гибкие тяги 4,5 в цанговых зажимах мембран и рычага. Для крепления датчика к объекту исследования в корпусе 1 предусмотрены отверстия 78.

Рассмотрим процесс получения выходного электрического сигнала.

При поступлении входных давлений P_1 и P_2 измеряемой среды центры мембран будут перемещаться, т.к. к ним приложены силы Q_1 и Q_2

$$\begin{aligned} Q_1 &= F_{\text{ср}} P_1; \\ Q_2 &= F_{\text{ср}} P_2, \end{aligned} \quad (2.42)$$

где $F_{\text{ср}} = \pi R_{\text{ср}}^2$;

$$R_{\text{ср}} = R - r;$$

R – внешний радиус мембраны;

r – радиус жесткого центра (цангового зажима).

Эти силы создают на валу 7 крутящий момент – см. рис. 2.12

$$M_p = Q_1 l - Q_2 l = l(Q_1 - Q_2), \quad (2.43)$$

где l – плечо качающегося рычага.

Рычаг 6 окажется в равновесии, когда крутящий момент сравняется с моментом пружин (2.40) подшипника вала

$$M_p = M_{\text{п}}, \quad (2.44)$$

или через первичные параметры получим

$$l F_{\text{ср}} (P_1 - P_2) = \varphi D_{\text{п}}$$

Условию (2.44) будет соответствовать перемещение в виде угла поворота φ вала 7 качающегося рычага 6.

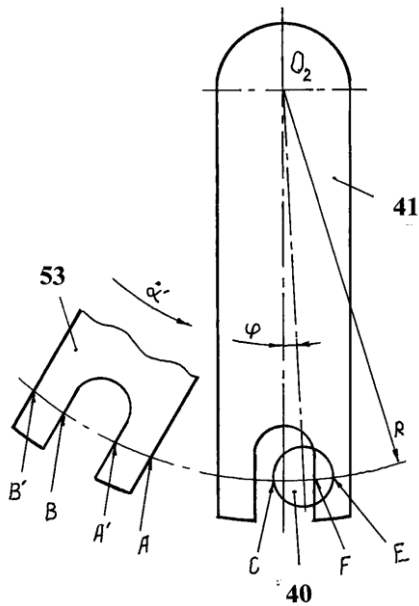


Рис. 2.20. Расчетная схема

на кромке паза шторки – F.

Когда точка A вилочной части доходит до точки C оптических окон – момент времени t_{AC} – начинается перекрытие оптического луча источника света и появляются импульсы U_{37}, U_{38} от обоих фотоприемников. Импульс на фотоприемнике преобразователя заканчивается в момент времени $t_{A'F}$ при совмещении точек A' и F, а на фотоприемнике модулятора в момент времени $t_{A'E}$. Аналогичная ситуация будет по второму участку BB' вилочной части. В результате срез одного импульса сдвинут по времени на величину Δt по отношению к срезу другого импульса.

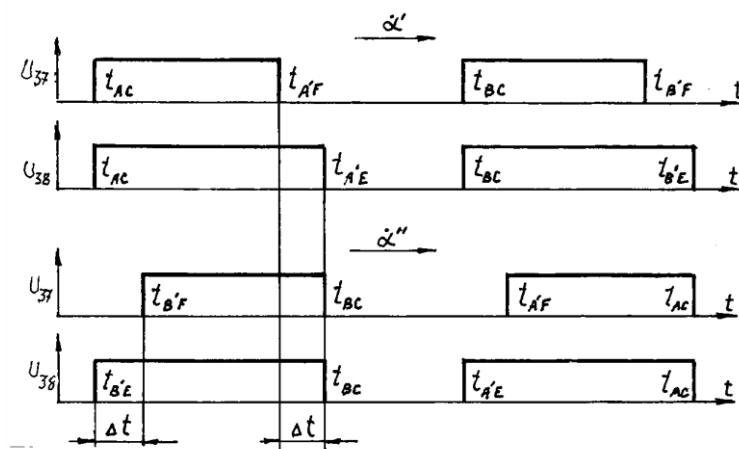


Рис. 2.21. Эшюры напряжений

При движении баланса в обратном направлении (α) окажутся сдвинуты на Δt фронты импульсов. Фазовый сдвиг в радианной мере будет пропорционален относительному сдвигу. Искомый результат будет получен по формуле

$$(P_1 - P_2) = \frac{D_{\Pi}}{lF_{\text{cp}}} \frac{\Delta t}{t_{38}}, \quad (2.45)$$

где t_{38} - длительность импульса фотоприемника модулятора;

Δt – временной сдвиг импульсов фотоприемников преобразователя и модулятора.

Если соотношение входных давлений P_1 и P_2 окажется обратным, то результат измерения не изменится за счет симметричности преобразования.

Таким образом в предлагаемом дифференциальном датчике давления высокая точность результата реализуется за счет непосредственного независимого от помех выявления, отражающего перепад давления, перемещения с последующим дискретным преобразованием перемещения в выходной электрический сигнал. Устройство датчика реализуется с учетом агрегатного принципа проектирования, что обеспечивает высокую технологичность конструкции.

Глава 3 РАСТЯЖКИ, ПОДВЕСЫ

Исходной заготовкой (за редчайшими исключениями) является отрезок проката круглого или прямоугольного сечения. В составе измерительных преобразователей эти элементы применяются в комплекте с инерционной массой, при этом используются деформации кручения либо изгиба при наличии растягивающей силы.

Малые потери энергии – имеются только вязкое (трение о воздух) и гистерезисное трение в материале упругого элемента - позволяют создавать высокодобротные измерительные автоколебательные звенья, работающие на больших амплитудах и характеризующиеся высокой стабильностью частоты.

3.1. Измерение перемещений

Рассмотрим применение автоколебательной системы баланс-растяжка в качестве чувствительного элемента (первичного преобразователя) для измерения перемещения [28]. Входная величина – перемещение преобразуется в выходную величину – частоту автоколебаний.

Монтажной основой датчика служит сборка из отдельной сборочной единицы «мембранный блок» и двух стоек 1. Мембранный блок представлен внешней втулкой 2, внутренней втулкой 3 и двумя гофрированными мембранами 4. Мембраны закреплены во втулках обычным образом (завальцовкой). Стойки закреплены винтами 5 с головкой потай в прямоугольных пазах втулки 2, при этом внешняя поверхность стоек цилиндрической формы одинакового диаметра со втулкой 2.

Колебательная система составлена из растяжки 6 и баланса 7. Растяжка имеет прямоугольное сечение. Баланс классического типа – имеется магнитопроводная втулка 8, на которой закреплены магнитопроводы 9, на одних концах которых установлены постоянные магниты 10, на других – противовесы 11. Сопряжение баланса с растяжкой реализуется посредством конических полуштифтов.

Растяжка закреплена посредством верхнего 12 и нижнего 13 зажимов тискового типа (здесь и далее ориентация чертежа). В свою очередь нижний зажим завальцовкой закреплен на упругой балке 14, ко-

торая винтами 15 присоединена к стойкам 1. Заземление осуществляется винтами 16 через накладку 17. Для удобства монтажа предусмотрено отверстие 18.

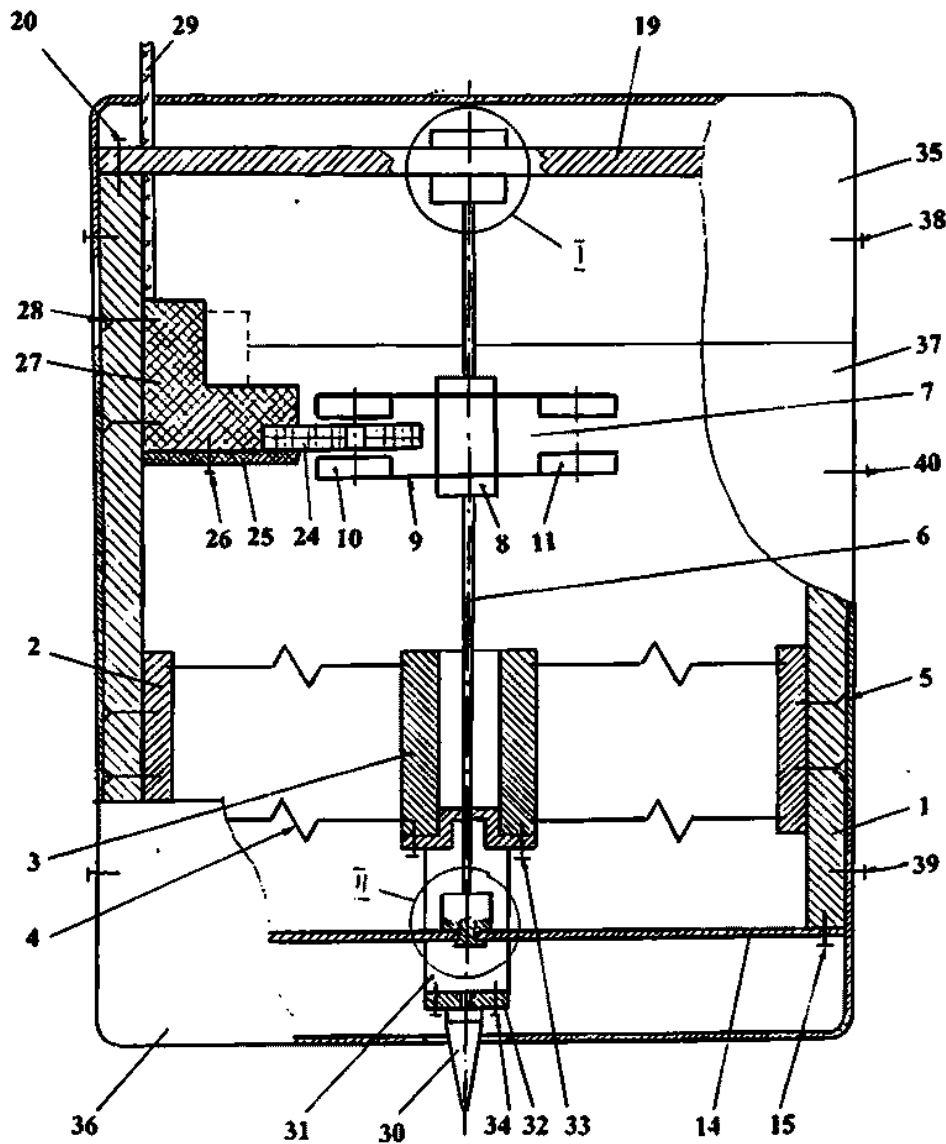


Рис. 3.1. Осевой разрез датчика

Верхний зажим предназначен для реализации исходного натяжения растяжки. Он установлен в квадратном отверстии жесткой балки 19, закрепленной винтами 20 на стойках 1. Заземление осуществляется винтами 21 через накладку 22. Удобство монтажа обеспечивается сквозным отверстием 0. Исходное натяжение растяжки регулируют винтом 23.

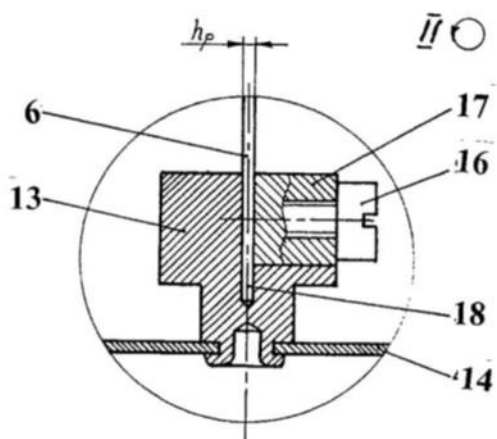


Рис. 3.2. Конструкция нижнего зажима растяжки

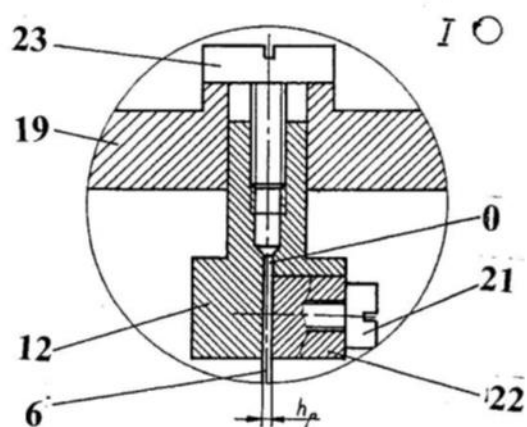


Рис. 3.3. Конструкция верхнего зажима растяжки

Автоколебательный режим баланса 7 обеспечивается схемой формирования импульсов привода (СФИП) – рис. 3.4. В эту схему входит электрическая бифилярная катушка 24, одна секция которой выполняет функцию катушки привода $W_{и}$, другая $W_{о}$ – функцию катушки освобождения. При колебаниях баланса в катушках индуцируется ЭДС, одна полуволна, которой открывает транзистор VT и по катушке $W_{и}$ проходит импульс тока. Взаимодействие этого тока с поле зазора магнитов 10 создает подталкивающий импульс. Катушка 24 закреплена с помощью накладки 25 и винтов 26 на кронштейне 27, который винтами 28 с головкой потай зафиксирован на стойке 1. Связь с другими устройствами системы измерения перемещений осуществляется кабелем 29.

Измеряемое перемещение воспринимается съемным щупом 30. Щуп соединен с ограничителем 31 через планку 32. Ограничитель выполнен на основе заготовки токарного типа. В этой заготовке срезаны диаметрально расположенные участки цилиндрической части с образованием деталей вилочного вида. На донной части, входящие во втулку 3, выполнен сквозной паз для размещения растяжки.

Ограничитель крепится на втулке 3 винтами 33, а планка присоединена к торцам вилочной части ограничителя винтами 34.

После сборки функциональной части датчика винтом 23 регулируют исходное натяжение растяжки, контролируя частоту последовательностей импульсов СФИП. Если датчик используется автономного

прибора, то он снабжается защитным кожухом. Кожух выполнен трехсекционным. Верхняя 35 и нижняя 36 части имеют одинаковую конфигурацию чашечного вида, а средняя часть 37 представляет собой свертку из листового проката. Элементы Кожуха крепятся к стойкам 1 с помощью винтов 38-40.

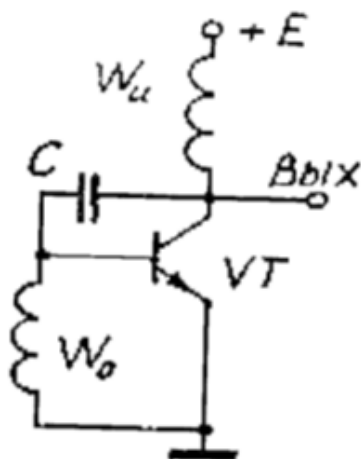


Рис. 3.4. СФИП

Пользователь присоединяет датчик к объекту исследования, обеспечивая механический контакт с нужным элементом объекта. При отсутствии перемещения щупа частота последовательности импульсов на выходе СФИП равна

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_{6-0}}{I_7}}, \quad (3.1)$$

где D_6 - жесткость растяжки на кручение;

I_7 - момент инерции баланса.

Для растяжки прямоугольного сечения имеем [5]

$$D_{6-0} = \frac{2}{3} \frac{bsG}{l_0} + \frac{b^2}{6l_0} F, \quad (3.2)$$

где b , s , G - соответственно ширина и толщина сечения растяжки, модуль сдвига материала;

l_0 , F - исходные рабочая длина растяжки и натяжение.

При появлении перемещения x рабочая длина растяжки составит

$$l = l_0 - x \quad (3.3)$$

следовательно текущее значение жесткости растяжки будет равно

$$D_{6-и} = \frac{2}{3} \frac{bsG}{l_0-x} + \frac{b^2 F}{6(l_0-x)}, \quad (3.4)$$

что приведет к повышению чистоты автоколебаний и баланса. Текущее значение частоты составит

$$f_{и} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_{6-и}}{I_7}}. \quad (3.5)$$

Обработку сигнала датчика ведут по формулам (3.4), (3.5) выявляя перемещение x .

Таким образом, предлагаемая конструкция датчика перемещения проста и высокотехнологична. Дуплексированный мембранный блок исключает влияние поперечного смещения щупа на результат измерения.

3.2. Измерение крутильных колебаний валов

Валы многих механизмов, например валы двигателей внутреннего сгорания, испытывают ударное воздействие, которое приводит к паразитным крутильным колебаниям. Эта дополнительная нагрузка снижает долговечность вала. По этой причине в процессе доводки механизма параметры крутильных колебаний измеряют и по результатам принимают конструктивные меры по снижению прежде всего амплитуды крутильных колебаний. Рассмотрим конструкцию преобразователя [10] для производства таких измерений, приведенную на рис.3.5.

Монтажной основой преобразователя крутильных колебаний служит корпус 1, имеющий стойки 2,3 и 4. Чувствительный элемент 5 представляет собой осесимметричное тело, составленное из двух плоских прямоугольного сечения магнитопроводов 6,7, закрепленных на торцах магнитопроводной втулки 8. На концах магнитопроводов чувствительного элемента установлены (приклеены) постоянные магниты 9 осевой намагниченности. Каждая пара постоянных магнитов образует магнитный зазор, при этом направление осевой намагниченности постоянных магнитов в паре одинаково.

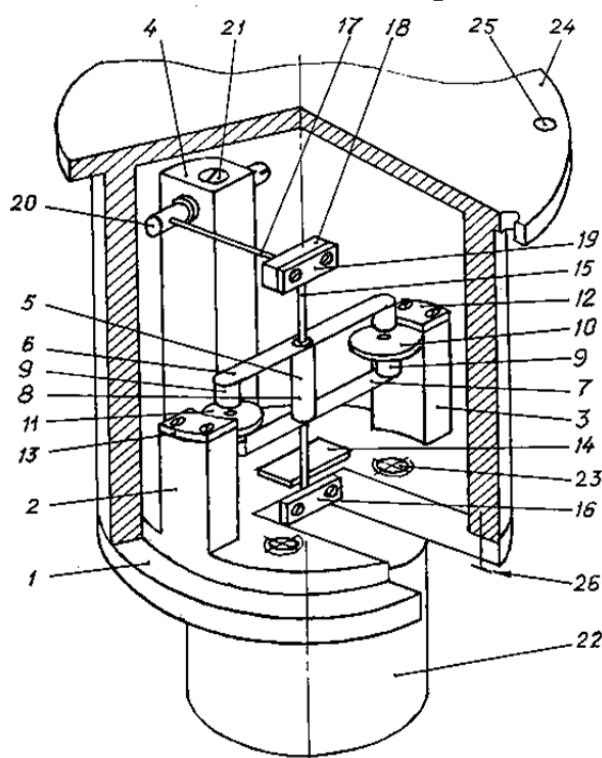


Рис. 3.5. Конструктивная схема преобразователя крутильных колебаний

Крепление магнитопроводов на втулке обеспечивается развальцовкой ступенчатых торцов втулки. Постоянные магниты чувствительного элемента для малогабаритных преобразователей крутильных колебаний могут быть изготовлены из платинокса марки ПЛК78 цилиндрической формы.

В магнитных зазорах чувствительного элемента свободно размещены плоские бескаркасные катушки 10,11, закрепленные, соответственно, на стойках 2,3 корпуса с помощью накладок 12,13 и винтов.

Катушки изготавливают путем намотки на оправках с пропиткой клеем (лаком). В качестве моточного провода применяют провода марок ПЭЛ и ПЭВ. Электрические выводы катушек образованы концами моточного провода. Эти концы моточного провода катушек закреплены по поверхностям стоек и корпуса компаундом и подключены пайкой к контактными площадкам кроссплаты 14.

Пространственное положение чувствительного элемента обеспечивает упругая ось 15, представляющая собой растяжку – плоскую натянутую пружинную ленту. Растяжка одним концом закреплена на корпусе с помощью накладки 16 и винтов. Натяжение растяжки реализуется за счет рессоры 17, на консольном конце которой закреплено основание 18 тискового крепления второго конца растяжки. Другим элементом этого тискового крепления служит накладка 19, которая присоединяется к основанию винтами. Рессора представляет собой упругую балку, например круглого сечения. Заделка рессоры выполнена в виде поворотного шарнира, который образован валом 20 и отверстием стойки 4 корпуса. Заделочный конец рессоры жестко соединен с валом (например, запрессовкой). Рабочее угловое положение вала шарнира заделки рессоры фиксируется винтом (фиксатором) 21. Крепление растяжки во втулке чувствительного элемента осуществляется с помощью четырех (по два с каждой стороны) полукруглых клиньев, при этом чувствительный элемент располагают в средней части растяжки. В качестве материала рессоры может быть применена любая пружинная сталь, например 65Г, 60С2А, а в качестве материала растяжки предпочтительно использовать сплавы с малыми потерями на механический гистерезис, например Н41ХТА, 40КНХМВ.

Для трансляции измерительной информации (ЭДС) с катушек магнитоэлектрического преобразователя на регистрирующую аппаратуру предусмотрен токосъемник 22. В промышленности конструкции токосъемников отработаны, поэтому на фиг.1 он показан условно. Типовой токосъемник имеет корпусную втулку из электроизоляционного материала, которая в данном случае через дно винтами крепится к корпусу преобразователя крутильных колебаний с использованием резьбовых отверстий 23. Типовой токосъемник имеет на внешней поверхности корпусной втулки электропроводные кольца, которые контактируют с неподвижными подпружиненными щетками. Электрическое соединение выводов катушек магнитоэлектрического преобразователя с

электропроводными кольцами токосъемника осуществляется монтажным проводом, например марки МГШВ-0,12. Концы монтажного провода подпаиваются к внутренней стороне электропроводных колец токосъемника и соответствующим контактным площадкам кроссплаты.

Преобразователь крутильных колебаний крепится к объекту исследования с помощью переходника 24 через посадочные отверстия 25. Переходник скрепляется с корпусом преобразователя крутильных колебаний винтами 26.

При сборке преобразователя крутильных колебаний расчетное натяжение растяжки 15 осуществляют за счет поворота вала 20 шарнира заделки рессоры с последующей фиксацией найденного положения винтом 21. Поскольку характеристика преобразования определяется моментом инерции J_5 чувствительного элемента 5 и крутильной жесткостью C_{15} растяжки (а она является функцией материала, сечения, длины и натяжения), то результат натяжения удобно контролировать по собственной частоте колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{15}}{J_5}}, \quad (3.6)$$

Рассматриваемый преобразователь крутильных колебаний относится к датчикам генераторного типа, т.е. он не требует внешнего электропитания, а измерительный сигнал вырабатывается (генерируется) за счет в данном случае магнитоэлектрического преобразователя. Поэтому при регулировании натяжения растяжки можно давать небольшое механическое возбуждение на чувствительный элемент, приводящее к свободным колебаниям, и наблюдать (измерять) собственную частоту f по индуцируемой электродвижущей силе на выводах любой катушки.

Необходимо заметить, что регулируемая рессора выполняет функцию компенсатора погрешностей, т.к. за счет изменения натяжения растяжки компенсируются производственные допуски на размеры деталей.

Работает датчик крутильных колебаний следующим образом. Перед началом крепят датчик к объекту исследования с помощью отверстий 25 переходника и к щеткам токосъемника присоединяют регистрирующую аппаратуру. Для определенности положим, что объектом исследования является поршневой двигатель внутреннего сгорания. В этом примере датчик крепят к выходному концу коленчатого вала. При

производстве испытаний объекта исследований возможны значительные угловые ускорения на переходных режимах, т.е. на этапах разгона и торможения. По этой причине на эти этапах следует ограничить (исключить) угол закручивания растяжки. В катушки 10,11 подают от внешнего источника через токосъемник постоянный ток. Направление тока должно быть таким, чтобы вектор магнитной индукции поля катушки был противоположен вектору поля магнитного зазора, образованного парой постоянных магнитов 9 осевой намагниченности.

Указанное направление векторов можно определить по реакции чувствительного элемента для каждой катушки. В силу наличия производственных допусков в исходном положении осевые линии постоянных магнитов и катушки несколько не совпадают. Поэтому разнонаправленные векторы приведут к появлению силы совмещающей эти осевые линии, что обеспечит поворот чувствительного элемента. Но подойдя к совмещенному положению векторов чувствительный элемент, наберет некоторую кинетическую энергию и по инерции пройдет совмещенное положение, при этом знак силы взаимодействия изменится. В результате можно наблюдать малые колебания чувствительного элемента относительно совмещенного положения.

Попутно отразим реакцию чувствительного элемента на обратное направление тока катушки. В этом случае сила взаимодействия будет расталкивать векторы, в результате чувствительный элемент повернется на угол, когда момент магнитного взаимодействия будет равен моменту вращения закрученной растяжки. Будем наблюдать отклоненное положение чувствительного элемента – постоянные магниты будут располагаться напротив края катушки.

Вернемся к процессу испытаний исследуемого объекта. На этапе выхода на стационарный режим (режим измерений) магнитное взаимодействие за счет тока катушек удерживало чувствительный элемент в исходном положении (растяжка не закручена). После выхода на режим измерений отключают удерживающий ток катушек, и соответствующие щетки токосъемника подключают к регистратору. В этот момент времени t_0 чувствительный элемент, вращаясь вместе с валом объекта исследований, обладает большой кинетической энергией.

$$W_0 = \frac{1}{2} J_5 \omega_0^2, \quad (3.7)$$

Если исследуемый вал будет иметь непостоянство исходной частоты вращения ω_0 , то корпус преобразователя крутильных колебаний

будут повторять это непостоянство, что приведет к смещению катушек относительно чувствительного элемента. Указанное смещение будет индуцировать в катушках электродвижущую силу (ЭДС).

Индуцируемая в каждой катушке ЭДС определяется векторным произведением

$$\bar{e} = \bar{B} \bar{l} S \bar{V}, \quad (3.8)$$

где \bar{B} – вектор магнитной индукции поля зазора;

\bar{V} - вектор линейной скорости осевой линии катушки относительно поля зазора;

\bar{l} - направление витков катушки;

S - эффективная площадь перекрытия катушки магнитным зазором.

Поясним принцип образования информационной ЭДС – формула (3.8). Поскольку датчик симметричен, достаточно рассмотреть взаимодействие магнитного поля одной пары магнитов с одной катушкой. Полагая, что величина магнитного зазора мала по отношению к диаметрам постоянных магнитов можно пренебречь эффектом выпучивания поля зазора и принять поле зазора однородным по сечению и равным сечению магнитов.

На рис. 3.6 сечение поля зазора показано кругом радиуса R_9 , катушка внешним радиусом R_{10} (внутренний радиус от технологической оправки не обозначен). Если крутильные колебания исследуемого объекта отсутствуют, то рассматриваемые элементы преобразователя датчика крутильных колебаний вращаются с одинаковой угловой частотой ω_0 – рис. 3.6-а. При этом условии нет относительного смещения катушки и зазора, относительная линейная скорость V равна нулю, ЭДС так же равна нулю. Появление крутильных колебаний вызывает смещение катушки относительно чувствительного элемента. В текущий момент времени катушка смещена на угол φ (рис. 3.6-б) и ее линейная скорость равна

$$V = R_5 \frac{d\varphi}{dt}, \quad (3.9)$$

где R_5 – межосевое расстояние растяжка-катушка.

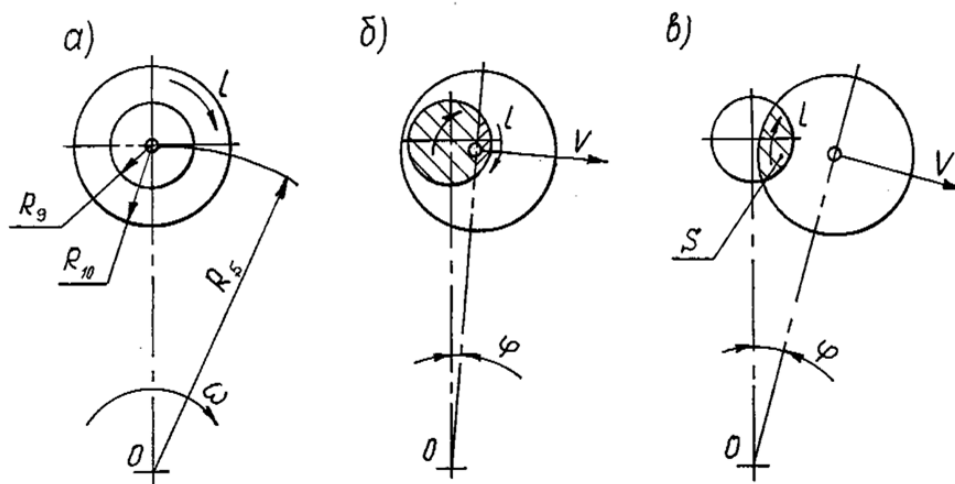


Рис. 3.6. Отдельные положения элементов преобразователя

На всех частях витков катушки, перекрытых полем зазора будет индуцироваться ЭДС, но ее полярность будет разная, в зависимости от направления витков катушки l . В результате выходная ЭДС датчика по этой катушке будет соответствовать алгебраической сумме ЭДС двух частей витков. Т.к. толщина катушки постоянна, то количество частей витков, участвующих в образовании суммарной ЭДС можно рассматривать как величину пропорциональную разности площади зазора части витков одного направления l и другого. Это и есть эффективная площадь перекрытия S . С увеличением угла φ эффективная площадь перекрытия будет соответствовать обозначению на рис. 3.6-в. Если амплитуда крутильных колебаний превысит суммарный угловой размер

$$\varphi_{\Sigma} = \frac{R_9 + R_{10}}{R_5}, \quad (3.10)$$

то ЭДС датчика будет представлять собой последовательность двуполярных импульсов.

При производстве измерений с помощью преобразователя крутильных колебаний необходимо учитывать соотношения его собственной частоты – формула (3.6) – и частотных свойств объекта исследований. Для примера вернемся к вращению коленчатого вала поршневого двигателя внутреннего сгорания. Крутильные колебания коленчатого вала отличаются от гармонического закона и выражаются некоторой функцией времени $S(t)$. Эта функция может быть разложена в гармонический ряд Фурье

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t), \quad (3.11)$$

т.е. в общем случае в разложении присутствует постоянная составляющая $a_0/2$ и сумма гармоник

$$\lambda_n = a_n \cos n \Omega t + b_n \sin n \Omega t = A_{mn} \cos(n\Omega t + \psi_n), \quad (3.12)$$

где a_n, b_n – коэффициенты Фурье;

A_{mn} – амплитуда n -ой гармоники;

$\psi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$ – начальная фаза n -ой гармоники.

Для механических объектов ряд Фурье – формула (3.11) – быстро убывает, соответственно наибольшую амплитуду будет иметь 1-я гармоника. Если собственная частота преобразователя крутильных колебаний f совпадет с одной из гармоник (3.12), то возникнет резонанс. Потому собственную частоту f следует разнести по оси частот от диапазона частот объекта исследований, а главное от 1-ой гармоники диапазона частот.

Другой подход при производстве измерений заключается в демпфировании колебаний чувствительного элемента. В этом случае измерительный (информационный) сигнал ЭДС регистрируется с одной катушки, а вторая используется в составе демпфера. Для введения затухания достаточно во вторую катушку, в этом случае назовем ее демпферной, задать от внешнего источника постоянный ток такого направления, чтобы векторы магнитного поля зазора и катушки были разнонаправлены. Изменяя величину подаваемого в демпферную катушку постоянного тока можно приблизить колебательное звено чувствительный элемент – растяжка к апериодическому. Заметим, что при этом вводится затухание пропорциональное скорости, т.е. вязкое, а оно не вносит в характеристику преобразования так называемую зону застоя.

Таким образом, предлагаемый преобразователь крутильных колебаний имеет простую конструкцию и технологичен за счет компенсатора погрешностей. Преобразователь крутильных колебаний позволяет использовать движение чувствительного элемента в составе колебательного звена, при этом собственная частота колебаний выбирается вне спектра частот исследуемого объекта, а также в составе апериодического звена, если указанное соотношение частот обратное.

3.3. Измерение расхода

В разделе 3.1 показано применение автоколебательной системы баланс-растяжка для измерения перемещения за счет изменения рабочей длины растяжки. Такой преобразователь позволяет реализовать дифференциальный режим. Рассмотрим задачу измерения расхода. Одним из способов измерения расхода является нахождение измеряемой величины через перепад давления на сужающем устройстве. Обратимся к конструкции расходомера, в котором чувствительным элементом служит система баланс-растяжка [21].

Конструктивно расходомер выполнен из двух блоков – измерительного блока, который монтируется на магистрали, и электронного блока, предназначенного для обработки первичной информации и индикации результата измерения. Эти блоки соединены электрическим кабелем.

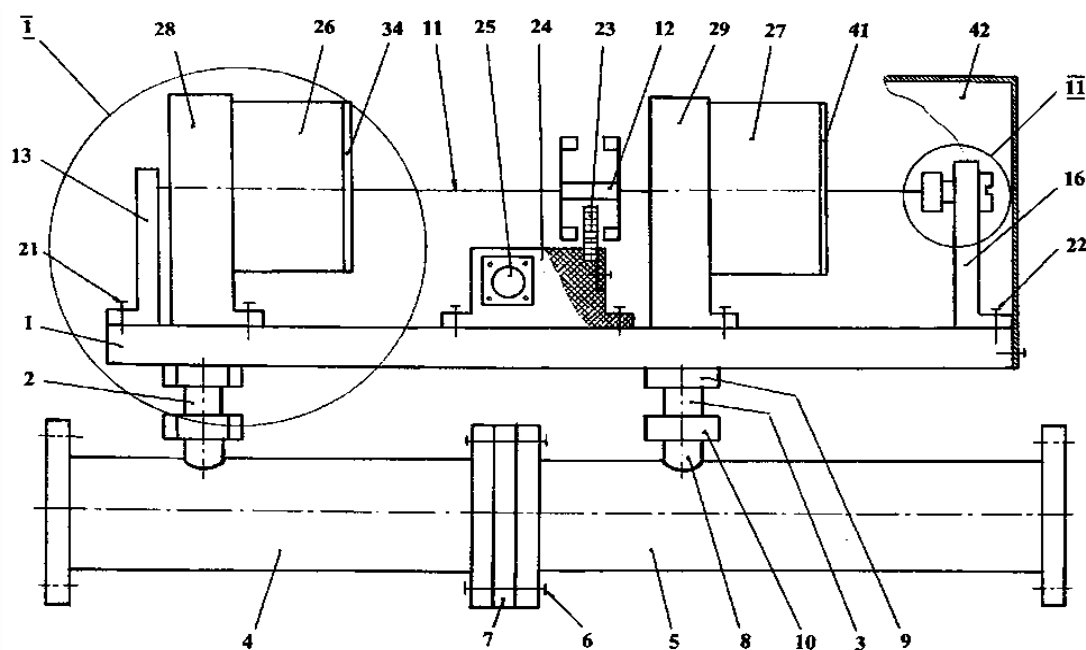


Рис. 3.7. Чертеж общего вида

Монтажной основой измерительного блока служит основание (корпус) 1 в виде пластины прямоугольной формы, которое имеет продольный паз (см. рис. 3.9) для базирования элементов конструкции. Снизу к основанию (здесь и далее ориентация чертежа) с помощью двух штуцеров 2,3 крепится измерительный трубопровод, составленный из двух участков 4,5, каждый из которых представляет отрезок

трубы с крепёжными фланцами по торцам. На стыке участков с помощью стяжек 6 закреплён преобразователь расхода 7, создающий перепад давления. Выбор преобразователя расхода определяется типом перекачиваемой среды и диапазоном измерения, например, в виде стандартной диафрагмы.

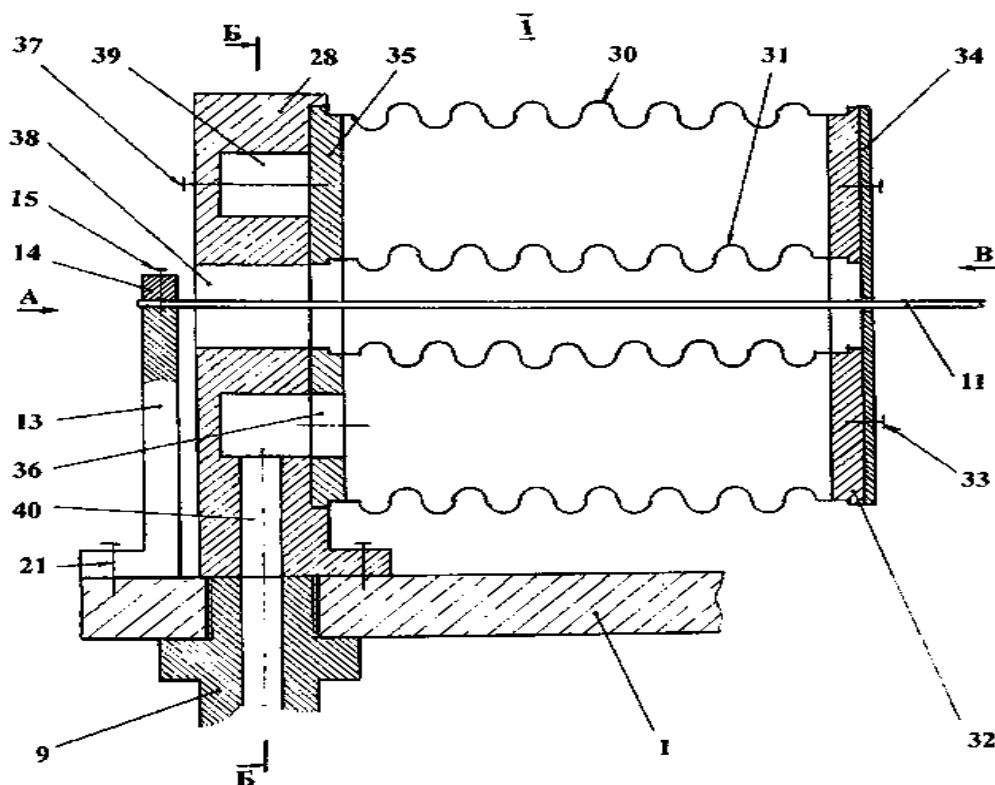


Рис. 3.8. Разрез фрагмента I по рис. 3.7

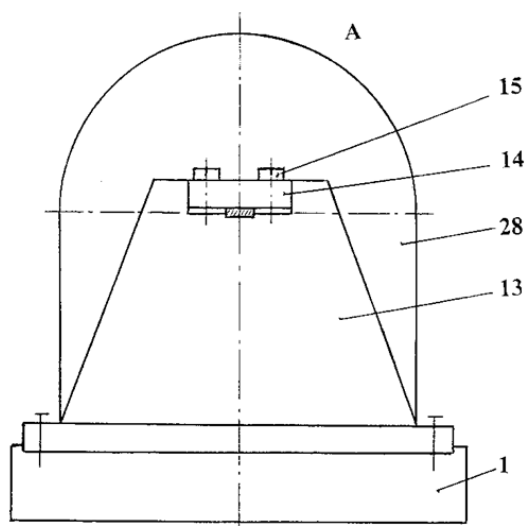


Рис. 3.9. Вид А по рис. 3.7

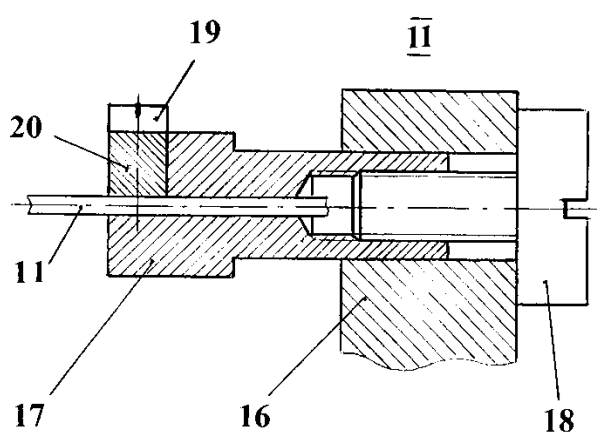


Рис. 3.10. Разрез фрагмента II по рис. 3.7

Штуцеры выполнены однотипно из двух частей. Нижняя часть 8 сваркой присоединена к соответствующему участку измерительного трубопровода, а верхняя 9, с помощью резьбы – к основанию блока. Сопряжение частей штуцера осуществляется по конической поверхности с применением гайки 10. Заметим, что направление течения измеряемой среды в измерительном трубопроводе определяется типом преобразователя расхода. Для симметричных преобразователей (например, стандартной диафрагмы) направление произвольное. В случае несимметричного преобразователя (например, сопла) направление течения определяется типом преобразователя расхода. Примем для определённости, что входным участком измерительного трубопровода является участок 4. Выходными параметрами измерительного трубопровода являются давления P_4 и P_5 .

Расход измеряемой среды измеряется перепадом давления $\Delta P = P_4 - P_5$. На верхней поверхности смонтирован преобразователь перепада давления ΔP в частотный электрический сигнал. Частотный сигнал схемотехнически просто квантуется и обеспечивает высокую точность и помехоустойчивость преобразования. В основе преобразователя перепада давления лежит автоколебательная система баланс-растяжка. Подобные системы освоены промышленностью. Колебательное звено представлено растяжкой 11 в виде плоской упругой ленты и балансом 12. Растяжка закреплена по концам тисковым методом. Один конец растяжки закреплён в кронштейне 13 с применением накладки 14 и винтов 15. Базирование реализуется пазом на посадочной плоскости кронштейна. Второй конец растяжки (рис. 3.10) закреплён в кронштейне 16 с возможностью регулирования натяжения. Имеется ползун 17 перемещаемый винтом 18. Растяжка закреплена винтами 19 через накладку 20. Для базирования в продолжении плоскости заземления в ползуне предусмотрено отверстие. Кронштейны 13, 16 закреплены на основании винтами 21, 22 соответственно.

Баланс выполнен обычным образом. По торцам магнитопроводной втулки развальцовкой закреплены плоские магнитопроводы, на нижних концах которых установлены постоянные магниты осевой намагниченности с образованием магнитного зазора. На противоположных концах магнитопроводов закреплены латунные противовесы. Баланс крепится на растяжке с помощью конических полушлифтов. В магнитном зазоре баланса установлена бескаркасная бифилярная

(намотанная в два провода) катушка 23, которая закреплена на электроизоляционном кронштейне 24 с помощью накладки. Выводы катушки подключены к электрическому разъёму 25, а через него к схеме формирования импульсов привода (СФИП) электронного блока.

При подключении электропитания к СФИП баланс будет совершать колебания на частоте

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D_{11}}{J_{12}}}, \quad (3.13)$$

где J_{12} – момент инерции баланса 12;

$$D_{11} = \frac{2}{3} \frac{Gh^3b}{l} \frac{Fb^2}{6l}, \quad (3.14)$$

- жёсткость растяжки на кручение;

здесь G , h , b , l , F – соответственно модуль упругости материала, толщина и ширина сечения, рабочая длина растяжки, сила натяжения.

Характерный для системы баланс – растяжка диапазон частот – десятки Герц.

Принцип работы преобразователя перепада давления в частотный электрический сигнал заключается в том, что перепад давления изменяет рабочую длину растяжки, соответственно частоту автоколебаний (3.13). Для реализации этого принципа в устройстве предусмотрены два одинаковых дуплексированных сильфона 26, 27, закреплённых на кронштейнах 28, 29. Устройство рассматриваемых сборочных единиц удобно рассмотреть по рис. 3.8. Дуплексированный сильфон представляет собой сборку внешней 30 и внутренней 31 сильфонных оболочек, двух торцовых достаточно тонких втулок одинаковых по внешнему контуру и имеющих базирующие цилиндрические поверхности. Донная втулка 32 имеет группу резьбовых отверстий для крепления винтами 33 ограничителя 34 угла поворота растяжки. Входная втулка 35 снабжена группой сквозных отверстий 36 и группой резьбовых отверстий под крепёжные винты 37. Неподвижное и герметичное соединение втулок 32, 35 с сильфонными оболочками 30, 31 реализуется пайкой твёрдым припоем или электронно-лучевой сваркой. В результате образуются открытый объём внутри внутренней сильфонной оболочки и закрытый кольцевой объём в межоболочечном пространстве. Несущий кронштейн имеет осевое по отношению к внутреннему объёму сквозное отверстие 38, глухой кольцевой канал 39, который сообщается со штуцером отверстием 40.

Если в измерительной магистрали (в этом частном рассмотрении её части 4) появится давление P_4 измеряемой среды, то это давление через отверстие 40, кольцевой канал 39 отверстие 36 входной втулки будет поступать в замкнутый объём дуплексированного сильфона. Появится сила F_{32} , приложенная к данной втулке

$$F_{32} = P_4 * S_{32}, \quad (3.15)$$

где S_{32} – кольцевая площадь данной втулки.

Эта сила обеспечит совместное перемещение l_{34} донной втулки и ограничителя 34

$$l_{34} = F_{32} / D_{26}, \quad (3.16)$$

где D_{26} – осевая жёсткость дуплексированного сильфона.

Для сильфонов, как преобразователей давления в перемещение, характерна низкая осевая жёсткость по отношению к другим преобразователям этого назначения, например, мембранам. Поэтому чувствительность преобразования давления в перемещение на основе сильфона окажется высокой, что способствует повышению точности преобразования и, в конечном счёте, достоверности результата измерения расхода.

Аналогичная ситуация будет на втором дуплексированном сильфоне 27. При появлении давления P_5 на участке 5 измерительного трубопровода ограничитель 41 получит перемещение l_{41} . При равенстве давлений P_4 и P_5 перемещения ограничителей будут равны.

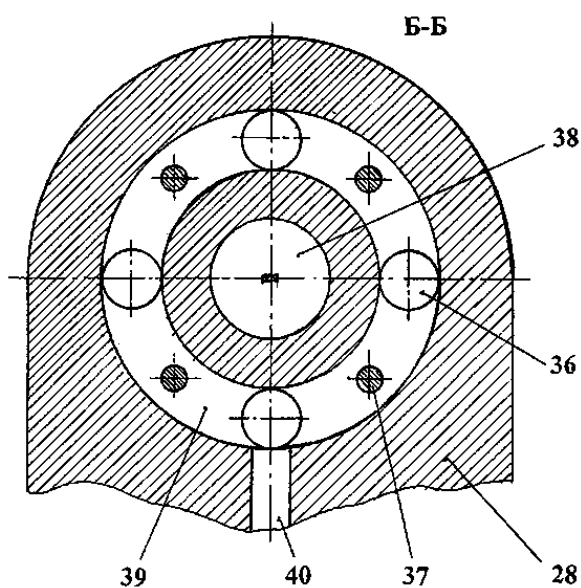


Рис. 3.11. Разрез Б-Б по рис. 3.8

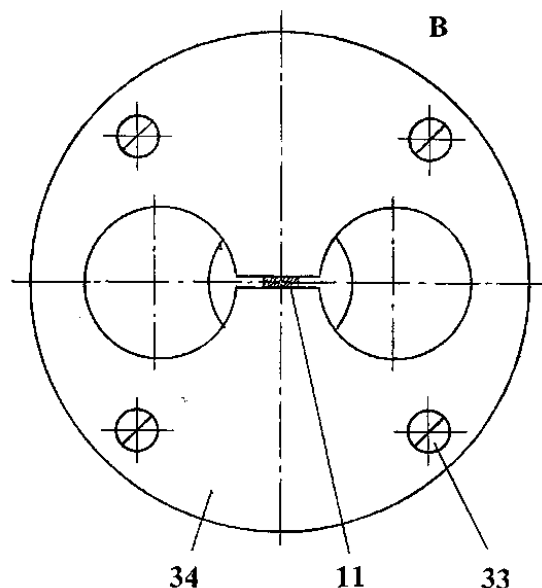


Рис. 3.12. Вид В по рис. 3.8

При расчёте величин перемещения l_{34} и l_{41} ограничителей учтено следующее. Перемещение ограничителя возможно только при наличии зазора между растяжкой и щелью ограничителя – их относительное положение см. на рис. 3.12. Величина зазора должна быть согласована с амплитудой колебаний баланса 12, а именно: угол поворота сечения растяжки в щели ограничителя должен быть на порядок меньше амплитуды колебаний баланса. В процессе колебаний растяжка дважды за период своей кромкой касается щели ограничителя, при этом возникает трение, но в положении равновесия баланса этого касания нет, соответственно нет и трения. Таким образом, так называемая зона застоя при перемещении ограничителя отсутствует. Для снижения потерь энергии на внутреннее трение в качестве материала для сульфонов 30, 31 следует выбирать материал с узкой петлёй механического гистерезиса, например, бериллиевую бронзу.

После окончательной сборки преобразователя перепада давления в электрический сигнал устанавливается защитный кожух 42.

Работает предлагаемый расходомер следующим образом. Крайними фланцами измерительного трубопровода (участки 4, 5) монтируют расходомер на исследуемой магистрали. При прохождении измеряемой среды по измерительному трубопроводу за счёт наличия преобразователя расхода 7 возникают давления P_4 и P_5 соответственно на участках 4, 5 измерительного трубопровода. Давление P_4 через штуцер 2 отверстие 40, кольцевой канал 39 кронштейна 28 и отверстия 36 входной втулки 35 поступает в замкнутый объём дуплексированного сильфона 26, что приводит к смещению l_{34} ограничителя 34. Аналогично за счёт давления P_5 на участке 5 измерительного трубопровода появляется смещение l_{41} дуплексированного сильфона 27.

Обозначим исходную рабочую длину растяжки 11 l_0 – это расстояние между ограничителями 34 и 41. При наличии расхода измеряемой среды текущее значение рабочей длины l растяжки составит

$$l = l_0 + (l_{34} - l_{41}), \quad (3.17)$$

т.е. изменение рабочей длины растяжки в соответствии с формулами (3.15), (3.16) пропорционально перепаду давления в измерительном трубопроводе расходомера. Изменение рабочей длины l растяжки приведёт в соответствии с формулой (3.13) к изменению частоты автоколебаний системы баланс-растяжка, т.е. изменению следования импульсов СФИП.

Электронный блок расходомера производит вычисление и индикацию величины расхода измеряемой среды в соответствии с формулой (3.13) и передаточной функцией применённого преобразователя расхода 7.

Таким образом, предлагаемый расходомер для низконапорных трубопроводов имеет широкие эксплуатационные возможности за счёт использования сменных первичных измерительных преобразователей расхода. Дискретный принцип преобразования первичной информации обеспечивает высокую помехозащищённость и достоверность результата измерения. Этому свойству способствует высокая чувствительность преобразования перепада давления с помощью дуплексированных сильфонов малой осевой жёсткости. Конструкция расходомера реализуется на простых и высокотехнологичных деталях.

3.4. Измерение ускорений

Выше были показаны возможности автоколебательной системы баланс-растяжка в качестве измерительного преобразователя. Но сопряжение инерционного тела (баланса) с упругим элементом в виде растяжки позволяет использовать не только вращательное (колебательное) движение инерционного тела, но и поступательное.

Рассмотрим типичный случай – измерение импульсного ускорения [11].

Устройство для измерения импульсных ускорений состоит из двух блоков – датчика (рис. 3.13) и электронного блока (рис. 3.15).

Датчик содержит чувствительный элемент (первичный преобразователь) в виде груза 1 цилиндрической формы из магнитопроводного материала, который закреплен зачеканкой в средней части натянутой стальной проволоки круглого сечения – растяжки 2. Монтажной основой датчика является корпус 3 цилиндрической формы, к которому снизу (здесь и далее ориентация чертежа) винтами 4 прикручена пластина 5, а сверху также винтами 6 втулка 7, к которой методом закатки по контуру прикреплен мембрана 8, выполняющая функцию пружины для реализации усилия натяжения растяжки. Крепление концов растяжки цанговое. Верхняя цанга 9 развальцовкой закреплена в центральном отверстии мембраны и имеет гайку 10. Нижняя цанга 11 в нижней части имеет хвостовик квадратного сечения, который входит в

аналогичное отверстие пластины 5. Нижняя цанга имеет резьбовое отверстие для натяжного винта 12. Пря этой цанге имеется зажимная гайка 13.

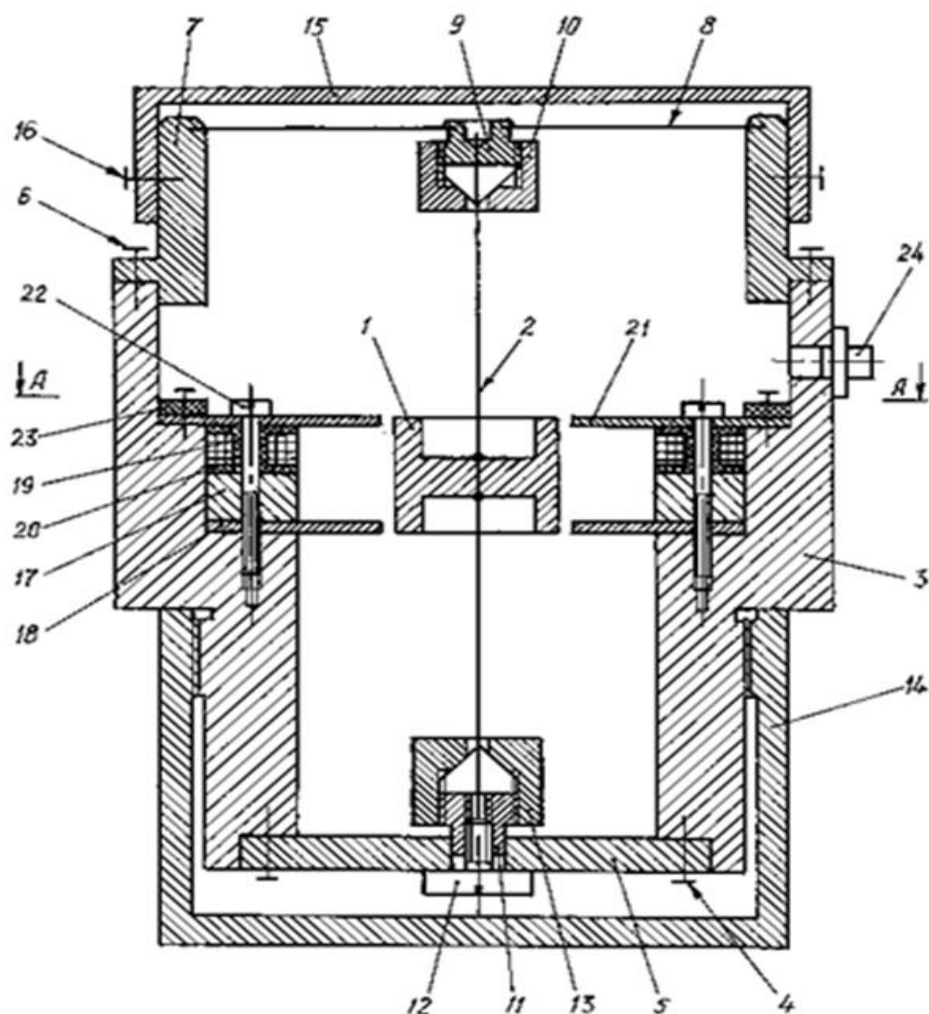


Рис. 3.13. Осевой разрез датчика

Предусмотрена гайка 14, блокирующая нарушение исходной настройки натяжения растяжки винтом 12. Сверху мембрана закрыта крышкой 15. На верхней лицевой плоскости крышки изображен стилизованный круг, по которому в кружках проставлены номера катушек вторичного преобразователя от 1 до n. Крышка крепится винтами 16 в однозначном положении, чтобы радиальные направления на одноименные катушки и номера на крышке совпадали.

Вторичное преобразование датчика индукционного типа. Имеется кольцевой постоянный магнит осевой намагниченности 17, снизу которого размещен шайбообразный магнитопровод 18, а сверху – n

электрических катушек 9, намотанных на каркасах 20, и n магнитопроводов 21 лепестковой формы. Перечисленные элементы присоединены к корпусу немагнитопроводными (латунь) винтами 22. Электрические выводы катушек с применением кольцевой кроссплаты 23 подключены к разъему 24. В результате в этой конструкции в исходном состоянии образуется n одинаковых магнитных потоков.

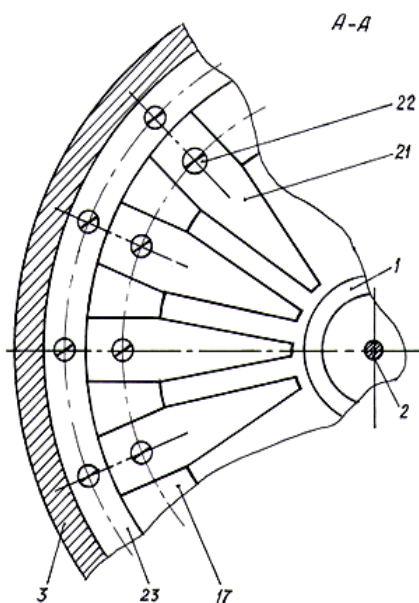


Рис. 3.14. Разрез А-А по рис 3.13

При смещении груза перпендикулярно оси растяжки изменится магнитное сопротивление зазоров, что приведет к изменению магнитных потоков Φ . В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея это приводит к появлению в катушках 16 ЭДС

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.18)$$

Пренебрегая малым по отношению к зазору магнитным сопротивлением магнитопроводов ($\mu \gg \mu_0$) магнитный поток для одного вторичного преобразователя равен

$$\Phi = \frac{B_r \mu_0 S^2}{l}, \quad (3.19)$$

где B_r – индукция остаточного намагничивания магнита 14;

S – сечение зазора;

l – длина зазора;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. По магнитным свойствам воздух близок к вакууму.

Величина зазора пропорциональна ускорению a и боковой жесткости C растяжки

$$l = M \cdot a \cdot C, \quad (3.20)$$

где M – масса груза 1.

Заменим постоянные параметры в формулах (3.19), (3.20) обобщенным коэффициентом K , получим

$$\frac{d\Phi}{dt} = -K \frac{dl}{dt}. \quad (3.21)$$

В соответствии с формулой (3.21) при импульсном ускорении смещение груза 1 приводит к появлению в катушках ЭДС e по форме близкой к рис.3.16. В момент времени t_y инерционная сила $F=m \cdot a$ будет уравновешена растяжкой

$$M \cdot a = Cl \quad (3.22)$$

и груз остановится. Поскольку в это время импульс ускорения заканчивается, то начинается с t_y груз будет смещаться под действием упругости деформированной растяжки обратно к положению равновесия. Далее будем наблюдать затухающие колебания груза, а на катушках – затухающую синусоиду ЭДС (на рис. 3.15 не показано).

Принцип работы электронного блока основан на том, что амплитуда и крутизна фронта положительного импульса ЭДС будут тем больше, чем быстрее уменьшается магнитный зазор. Пусть направление измеряемого ускорения направлено радиально по i -ому магнитопроводу 21. Тогда эюре ЭДС i -ой катушки 19 будет соответствовать верхняя кривая на фиг.3. На части других катушек, в цепи которых магнитные зазоры также уменьшаются, амплитуды и крутизны импульсов ЭДС будут меньше. На другой части катушек, в цепи которых магнитные зазоры увеличиваются, ЭДС будет иметь обратный знак. Задав определенный пороговый уровень e_0 по рис. 3.16 видим, что первой по времени появится ЭДС i -й катушки.

Функциональную схему электронного блока составляют n ограничителей уровня 25 ЭДС катушек 19 датчика. Выходы ограничителей подключены к установочным входам входных RS триггеров 26, вторые входы которых образуют шину сброса, управляемую кнопкой 27. Прямые выходы RS триггеров являются входами n -входного логического элемента ИЛИ 28, выход которого соединен с измерителем амплитуды 29, имеющем m выходов. Каждый из выходов измерителя амплитуды через вторые RS триггеры 30 соединен со входами шифратора 31, а вы-

ход последнего подключен к цифровому табло индикатора 32. Индикатор кроме цифрового табло содержит изображение круга по типу как на крышке 15 датчика с номерами и светодиодами 33. Светодиоды управляются соответствующими выходами RS триггеров 26. Имеется общий блок питания 34. В конкретной реализации электронного блока может оказаться, что светодиоды 33 индикатора 32 требуют другого уровня питания, чем основные микросхемы U_m , тогда следует в цепь управления светодиодами включить n электронных ключей 35 и повысить напряжение питания до уровня U_n . Аналогично для согласования амплитуды ЭДС датчика с уровнем питания измерителя амплитуды 29 следует включить в функциональную схему электронного блока электронный ключ 36, на выходе которого вместо уровня логической единицы U_m будет уровень U_0 источника питания. Измеритель амплитуды предназначен для выявления максимального (амплитудного) значения измеряемого импульсного ускорения. Имеется делитель $R_1 \dots R_m$ из одинаковых резисторов. Опорное напряжение питания делителя выбирают из условия $U_0 \gg e_{max}$, где e_{max} – максимально возможная ЭДС одной из катушек 19 датчика на верхнем пределе диапазона измерения a_{max} рассматриваемого устройства. Число резисторов делителя m определяет шаг дискретности $\Delta U = U_0/m$ выходного сигнала. Имеется m компараторов 29^a. В соответствии с функцией компаратора на его выходе появятся логическая единица при условии $U_{i+1} < e_{max} < U_i$, где U_{i+1} и U_i соответственно потенциалы относительно общей шины на резисторах R_{i+1} и R_i .

Шифратор 31 электронного блока формирует из логической единицы с выходов RS триггеров 30 цифровой позиционный код для цифрового табло индикатора в соответствии с используемой микросхемой. Например, пусть логической единице на выходе i -го триггера 30 соответствует значение амплитуды ускорения 634 м/с^2 .

Работает устройство для измерения импульсных ускорений следующим образом. Устанавливают на объекте исследования датчик устройства таким образом, чтобы неизвестное по амплитуде и направлению ускорение было в плоскости перпендикулярной оси датчика, т.е. в плоскости перпендикулярной растяжке. Измеряемое при этом ускорение смещает груз 1, при этом будут изменяться зазоры между грузом, шайбообразным магнитопроводом 18 и лепестковыми магнитопроводами 21. Изменение зазоров приведет к изменению магнитных потоков

31 данного триггера противопоставляет его номеру (от 1 до m) цифровой десятичный код, который отражается на цифровом табло индикатора 32.

Как было отмечено выше, направление действия измеряемого импульса ускорения зафиксировано одним из входных триггеров 26. Потенциал прямого выхода сработавшего входного триггера обеспечивает высвечивание этого номера светодиода 33 индикатора 32. Поскольку стилизованный корпус с номерами катушек на крышке 15 датчика соответствует номерам светодиодов 33 индикатора 32, то оператор определяет направление измеряемого импульса ускорения.

Таким образом, предлагаемое устройство для измерения импульсных ускорений позволяет определить амплитуду и направление ускорения объекта исследований. Конструкция датчика проста и технологична. Электронный блок выполнен на типовых элементах электроники. Эти обстоятельства позволят с минимальными затратами освоить устройство для измерения импульсных ускорений в производстве.

Близкую к растяжке функцию выполняет **подвес**. Измерительный преобразователь на основе подвеса представляет собой длинный упругий элемент обычно круглого сечения с заземлением на одном конце и инерционной массой (грузом) на другом. Натяжение подвеса определяется величиной груза. Пространственное положение такого преобразователя предопределено вектором ускорения силы тяжести. Преобразователь на основе подвеса может использовать изгибные или крутильные деформации в автоколебательном или апериодическом режимах.

Рассмотрим применение измерительного преобразователя на основе подвеса для измерения горизонтальных ускорений.

Предлагаемое устройство выполнено в виде двух основных сборочных единиц – датчика 1 и электронного блока 2, которые смонтированы на общем основании 3 прямоугольной формы. В зависимости от условий применения эти сборочные единицы могут закрываться кожухом, имеющим окно для индикатора результата.

Корпус датчика представлен тремя электроизоляционными втулками – втулка преобразователя 4, втулка подвеса 5 и втулка демпфера 6. Втулки соединяются винтами 7, 8, при этом винты 8 имеют головку потай. На этапе предварительной сборки сопряжения втулок снабжаются базирующими штифтами. На внутренней цилиндрической по-

верхности втулки преобразователя по образующей цилиндра выполнена с постоянным угловым шагом группа прямоугольных пазов, сопряженно с ними на нижней торцовой поверхности выполнены аналогичные пазы. В эти пазы уложены и закреплены клеем электропроводные пластины 9 Г-образной формы. Нижние концы этих пластин выступают за внешний контур втулки и служат для присоединения к электронному блоку. Из соображений наглядности на рис. 3.18 электропроводные пластины 9 показаны пунктирной линией. Заметим, что для снижения требований по точности к исходным деталям целесообразно заготовки втулки 4 и электропроводных пластин изготавливать с припуском, а после сборки образованную сборочную единицу доработать до расчетных размеров совместно по внутреннему диаметру и торцам.

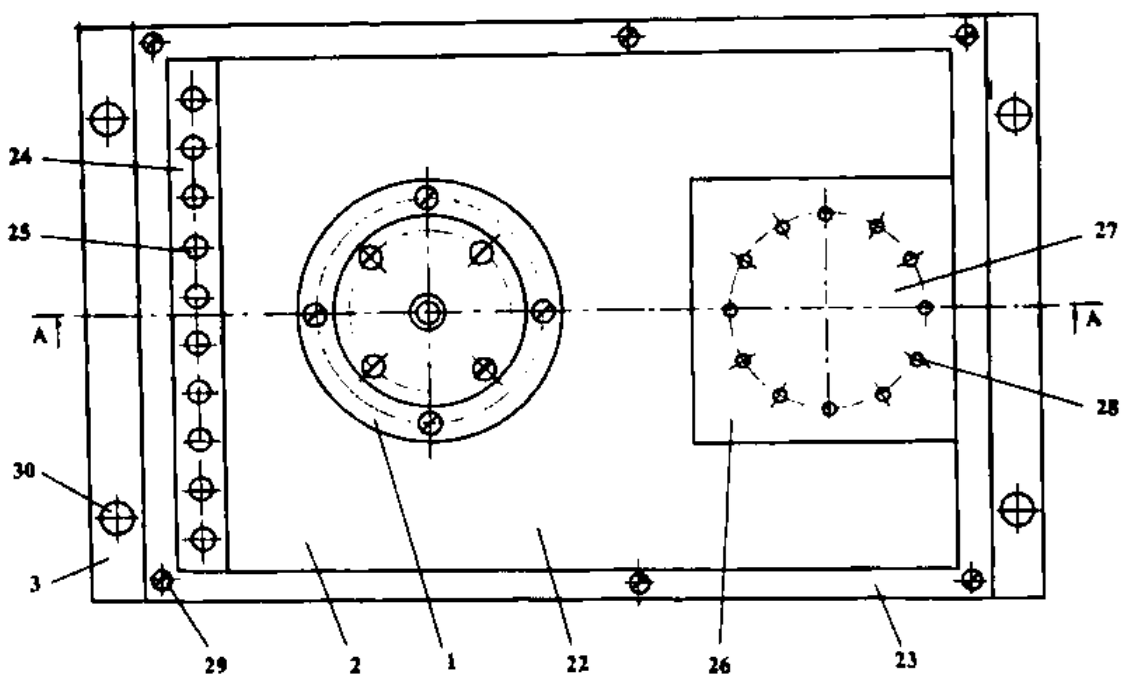


Рис. 3.17. Вид сверху

Чувствительный элемент датчика составлен из инерционного элемента в виде груза 10 цилиндрической формы и упругого шарнира в виде подвеса 11 из проволоки круглого сечения. С целью расширения возможным вариантов массы груз выполнен составным. Основу составляет корпус 12 в виде перевернутой чаши из электропроводного материала. В раскрытой данной части посредством резьбы закреплен магнитопровод 13, имеющий центральное отверстие. В верхней части корпуса 12 установлен цанговый режим 14.

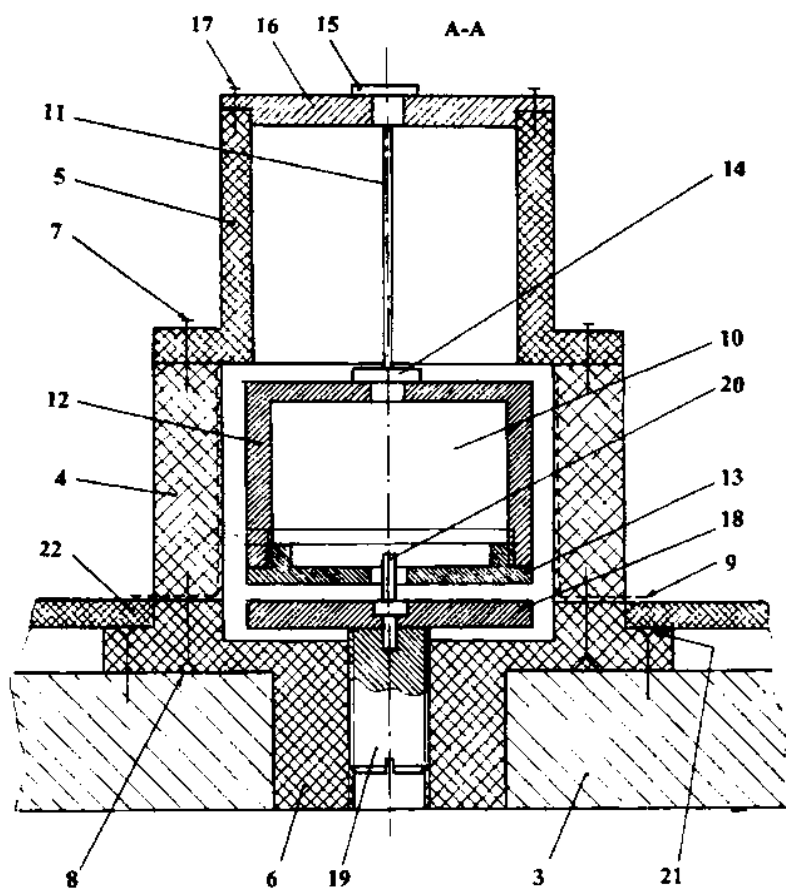


Рис. 3.18. Разрез А-А по рис. 3.17

Подвес 11 выполняют из материалов с узкой петлей механического гистерезиса, обычно это кобальтовые или никелевые сплавы, например, сплав Н41ХТА. Для организации крепления подвеса предусмотрен цанговый зажим 15, который закреплен на крышке 16, установленной на втулке подвеса 5 с помощью винтов 17. Цанговые зажимы являются стандартными изделиями, поэтому на рис. 3.18 они показаны условно.

В датчике предусмотрен демпфер колебаний груза. Демпфер представлен постоянным магнитом 18 осевой намагниченности в виде шайбы с резьбовым ползуном 19. Ползун установлен в центральное отверстие втулки демпфера 6. Крепление магнита на ползуне реализуется ступенчатым немагнитопроводным штифтом 20, который запрессован в центральном глухом отверстии резьбового ползуна. Верхняя часть ступенчатого штифта входит в отверстие магнитопровода 13, полученный зазор ограничивает величину предельного смещения груза.

Собранный датчик устанавливается в отверстие основания 3 и закрепляется винтами 21, имеющими головку потай. Угловое положение датчика относительно осевой линии основания согласовано с электронным блоком (см. рис. 3.19).

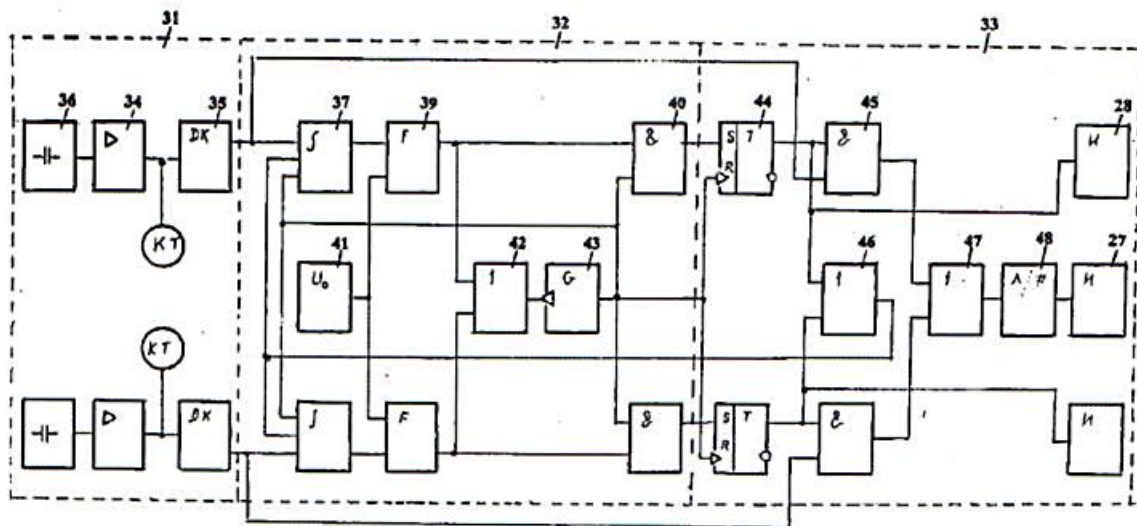


Рис. 3.19. Функциональная схема электронного блока

Элементы электронного блока смонтированы на печатной плате 22, которая установлена в рамку 23. На печатной плате размещены электронные компоненты, входящие в функциональную схему рис. 3.19, колодка 24 с гнездами 25 контрольных точек, и коробка 26 для размещения источника автономного электропитания. В верхней части коробки закреплен индикатор результата 27 в виде комбинации двух полей – центрального поля для цифровой индикации величины ускорения и кольцевого поля для индикации направления ускорения. На кольцевом поле размещены точечные светоизлучающие элементы 28 (светодиоды) с постоянным шагом в количестве равном количеству электропроводных пластин 9 датчика, при этом пространственное (угловое) положение каждой пары пластина – светодиод одинаково. Смонтированный электронный блок устанавливается на основании 3 и крепится винтами 29.

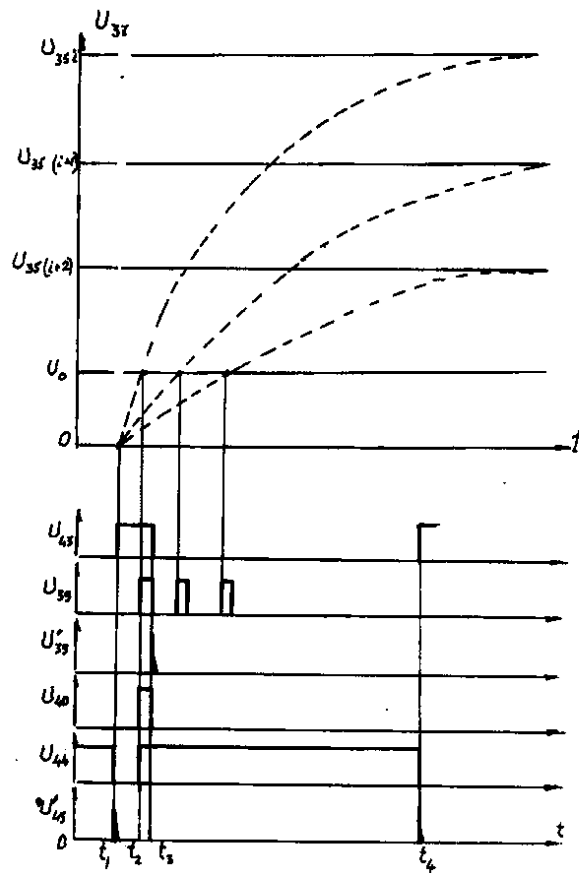


Рис. 3.20. Эпюры напряжений на выходах элементов функциональной схемы

На этапе установки, предварительно выступающие концы электропроводных пластин 9 датчика, отгибают вверх и обжимают по внешней поверхности втулки преобразователя 4. Это необходимо, чтобы указанные концы пластин прошли через зазор между датчиком и отверстием платы 22. Окончательная операция установки – возвращают отогнутые концы пластин в исходное положение и подпаивают их к контактным площадкам печатной платы 22. Далее следует операция контроля качества. После этого изделие готово к использованию. Крепеж изделия на объекте исследования осуществляется с использованием монтажных отверстий 30 основания 3.

Обратимся к принципу выявления величины ускорения с использованием вышеизложенной конструкции датчика. Груз 10 чувствительного элемента совершает маятниковое движение. В реальной конструкции длина l подвеса 11 существенно больше горизонтального смещения x груза. Линеаризуя рассматриваемую систему, уравнение

движения груза массой m под действием ускорения $a(t)$ запишется в виде:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Dx = a(t), \quad (3.23)$$

где \dot{x} , \ddot{x} – соответственно первая и вторая производные смещения;

h – интегральный коэффициент вязкого трения;

D – приведенная к центру масс груза поперечная жесткость подвеса.

Перепишем уравнение (3.23) в виде:

$$x + 2\beta\dot{x} + \ddot{\omega}_0 = a(t)/m, \quad (3.24)$$

где $\beta = \frac{h}{2m}$ – коэффициент затухания;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}}$ – круговая частота чувствительного элемента.

При $\beta < \omega_0$ имеет место колебательный режим с частотой

$$\omega_k = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (3.25)$$

Измеряемое ускорение $a(t)$ представляет собой некоторую непрерывную функцию времени, которая для анализа может быть разложена в гармонический ряд Фурье

$$a(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t), \quad (3.26)$$

где a_n , b_n – коэффициенты Фурье;

a_0 – постоянная составляющая разложения.

Отдельная гармоника ряда (3.26)

$$\lambda_n = a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t = A_{mn} \cos(n\Omega t - \varphi_n) \quad (3.27)$$

может иметь большую амплитуду

$$A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.28)$$

и ее частота может совпадать с собственной частотой ω_0 чувствительного элемента:

$$n\Omega = \omega_0, \quad (3.29)$$

что приведет к явлению резонанса и деформации функции преобразования.

Для исключения этого явления в предлагаемом устройстве предусмотрен демпфер колебаний. При смещении груза в магнитопроводе 13 за счет магнитного поля магнита 18 индуцируются вихревые токи

$$i = K_i \dot{X} \quad (3.30)$$

Коэффициент K_i зависит от электропроводности магнитопровода и магнитной индукции в зазоре.

За счет токов i появляется сила вязкого трения, определяемая интегральным коэффициентом трения h

$$h = K_u i. \quad (3.31)$$

Изменяя величину зазора путем поворота резьбового ползуна 19, можно приблизить колебательную систему к апериодической. Граничное условие:

$$\omega_0 = \beta. \quad (3.32)$$

Заметим, что некоторую долю в интегральный коэффициент трения h вносят силы трения о воздух и внутреннее трение в материале подвеса.

На практике приближение к условию (3.32) осуществляют, наблюдая свободные затухающие колебания груза. Вращением резьбового ползуна добиваются примерно трех циклов свободных колебаний.

Смещение груза 10 под действием измеряемого ускорения отслеживается емкостным преобразователем. Каждая электропроводная пластина 9 совместно с цилиндрической поверхностью груза образует свою парциальную электрическую емкость. В исходном положении парциальные емкости равны:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\Delta X_0}, \quad (3.33)$$

где ε_0 – физическая константа (диэлектрическая проницаемость вакуума);

ε – диэлектрическая проницаемость воздуха;

S – совместная площадь электропроводной пластины и части цилиндрической поверхности груза;

ΔX_0 – зазор по нормальям между указанными поверхностями.

Рассмотрим значения парциальных емкостей при смещении груза. На рис. 3.21 лучами X_i и X_{i+1} показано угловое положение i -ой и $(i+1)$ -ой электропроводных пластин, окружность радиуса R_4 отражает внутреннюю поверхность втулки преобразователя 4, а окружность радиуса R_{10} – наружную поверхность груза. Угловой шаг электропроводных пластин обозначен α .

Под действием ускорения $a(t)$ груз смещен по направлению X_i на величину X_a

$$X_a = \frac{ma(t)}{D}. \quad (3.34)$$

Межэлектродный зазор i -ой парциальной емкости отражен отрезком $A_i B_i$ и равен:

$$\Delta X_i = R_4 - (X_a + R_{12}). \quad (3.35)$$

Межэлектродный зазор $(i+1)$ -ой парциальной емкости отражен отрезком $A_{i+1} B_{i+1}$ и может быть найден методами аналитической геометрии, или приближенно равен:

$$\Delta X_{i+1} = R_4 - (X_a + R_{12} \cos \alpha) / \cos \alpha. \quad (3.36)$$

Для наглядности рассмотрим пример. Пусть $R_4=15$ мм, $R_{12}=10$ мм, $X_a=2$ мм, $\alpha=30^\circ$. Тогда получим

$$\Delta X_i = 3 \text{ мм};$$

$$\Delta X_{i+1} = 4,46 \text{ мм}.$$

Пользуясь значениями межэлектродного расстояния (3.35) и (3.36), получим величины парциальных емкостей

$$C_i = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\Delta X_i}; \quad (3.37)$$

$$C_{i+1} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\Delta X_{i+1}}, \quad (3.38)$$

следовательно

$$C_i > C_{i+1}. \quad (3.39)$$

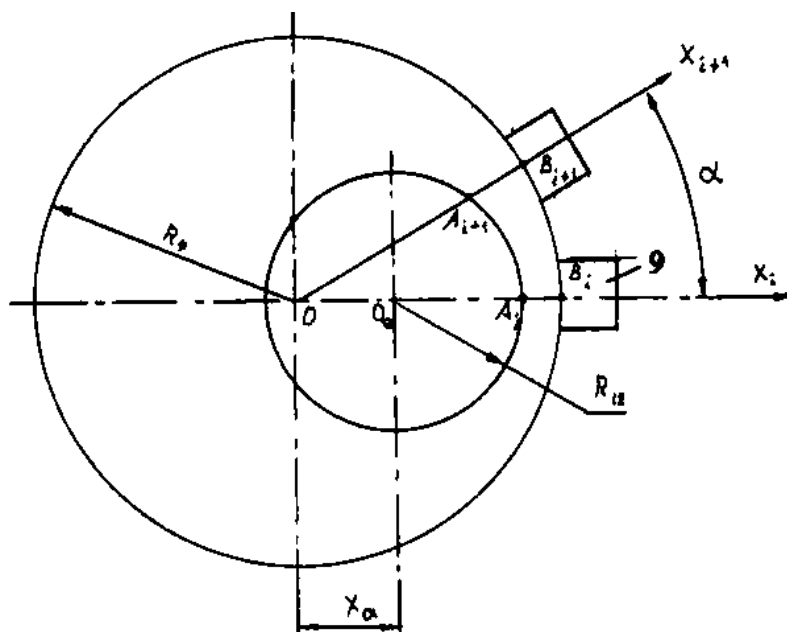


Рис. 3.21. Расчетная схема

Электрические емкости (3.37), (3.38) образуют преобразователь перемещения. Конструктивно электрический вывод одной обкладки

емкости – цилиндрической поверхности груза 10 – выполнен монтажным проводом, соединяющим цанговый зажим 15 подвеса и печатную плату 22, а другой обкладки – электропроводной пластины 9 – ее отогнутой частью, как отмечено выше.

Таким образом, в пределах угла π направлений симметричная парциальная емкость, совпадающая по направлению с измеряемым ускорением, будет расти быстрее соседних парциальных емкостей. В противоположном угле π направлений при этом ситуация обратная.

Электронный блок 2 построен по функциональной схеме рис. 3.20. Этот блок выполнен многоканальным по количеству электрических пластин датчика и структурно поделен на три функциональных блока – модуля ускорения 31, направления ускорения 32 и фиксации результата 33. На чертеже элементы канала изображены в одну строку, а межканальные элементы – между канальных строк. Поскольку каналы идентичны, показано два, а позиционная нумерация выполнена для одного.

Функциональный блок модуля ускорения 31 содержит канальные элементы – резонансный усилитель 34 и частотный детектор 35. Первый вход резонансного усилителя электрически связан через упругий подвес 11 с грузом 10, а второй вход с соответствующей электропроводной пластиной 9 преобразователя 36 датчика 1.

Резонансный усилитель классического типа, он содержит подстроечную индуктивность L , которая совместно с емкостью преобразователя образует колебательный контур. Частота ω выходного напряжения резонансного усилителя

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.40)$$

отражает емкость C преобразователя, следовательно, величину измеряемого ускорения.

Частотный детектор преобразует сигнал резонансного усилителя в аналоговую функцию напряжения, пропорциональную частоте. Таким образом, на выходе функционального блока модуля ускорения будет аналоговая функция напряжения, отражающая в каждый момент времени величину измеряемого ускорения. Для удобства пользователя выходной сигнал резонансных усилителей выведен на гнезда 25 колодки 24. На схеме контрольные точки обозначены индексом КТ.

Функциональный блок направления ускорения 32 содержит канальные элементы – интегратор 37 с электронным ключом 38, формирователь импульсов 39, выходной конъюнктор 40 и межканальные элементы – источник опорного напряжения 41, дизъюнктор направления 42 и генератор тактовой частоты 43.

Интеграторы построены по электрической принципиальной схеме рис. 3.22 на основе интегрирующей цепи R_1-C_1 . Первым входом интегратора является выход частотного детектора 35, вторым – выход генератора 43 тактовой частоты, а третьим – выход дизъюнктора фиксации направления функционального блока фиксации результата.

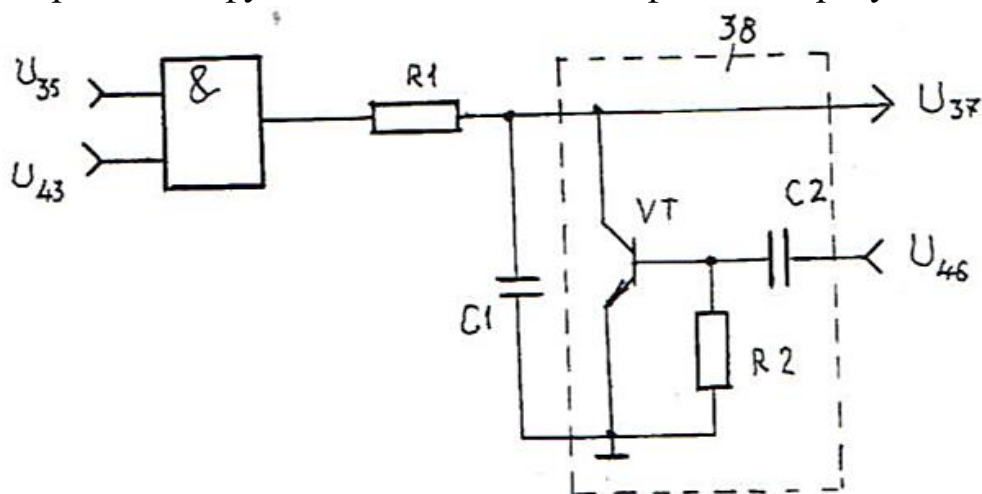


Рис. 3.22. Электрическая принципиальная схема интегратора

В момент времени t_1 (рис. 3.20) появляется импульс тактового генератора 43 и начинается процесс заряда конденсатора C_1 по закону:

$$U_{37} = U_{35} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (3.41)$$

где $\tau = R_1 C_1$.

Асимптотами функций заряда являются напряжения на выходах частотных детекторов 35. Индексация напряжений сохранена по рис. 3.21.

Формирователь 39 в момент времени t_2 , когда напряжения (3.41) совпадают с опорным напряжением U_0 источника 41, вырабатывает короткий прямоугольный импульс, заканчивающийся в момент времени t_3 . По времени импульс U_{39} появится первым для i -го канала, соответственно появится импульс на выходе i -го выходного конъюнктора 40. Срезом U_{39} импульса формирователя отсекается длительность импульса генератора тактовой частоты 43. Схемотехнически генератор

представляет собой комбинацию генератора постоянной частоты и триггера.

Работа блока направления 32 заканчивается импульсом дизъюнктора фиксации функционального блока 33, поступающего на вход интегратора. Очередной цикл работы начинается в момент времени t_4 с приходом следующего импульса тактового генератора 43.

Функциональный блок фиксации результата 33 содержит каналные элементы – RS-триггер 44, конъюнктор модуля 45 и межканальные элементы – дизъюнктор фиксации направления 46, дизъюнктор фиксации модуля 47, преобразователь амплитуда-код 48, индикатор результата с цифровым полем 27 и кольцевым полем со светодиодами 28.

Импульс с выхода выходного конъюнктора 40 функционального блока направления 32 поступает на установочный вход RS-триггера 44 и переводит его в единичное состояние, что приводит к высвечиванию светодиода 28 направления и открытию конъюнктора модуля 45, через который текущее значение измеряемого ускорения в форме напряжения с выхода частотного детектора 35 функционального блока модуля 31 через дизъюнктор фиксации модуля 47 поступает на вход преобразователя амплитуда-код 48. Преобразователь 48 формирует десятичный код, который отражается на индикаторе результата 27. Индицируемая информация удерживается в интервале времени t_2-t_4 и обновляется с частотой генератора тактовой частоты 43. Сброс RS-триггеров осуществляется по динамическому входу фронтом импульса генератора тактовой частоты.

Работает устройство для измерения горизонтальных ускорений следующим образом. Устанавливают устройство на объекте исследования, выдерживая горизонтальное положение основания 3. Имеется дополнительная возможность проверки этого положения, а именно: проверка исходных частот (3.40) по контрольным точкам 25 на колодке 24 – они должны быть одинаковы.

Обычным образом при первичном включении электропитания фронтом триггеры 44 устанавливаются в исходное состояние. При появлении горизонтального ускорения смещается груз 10, что приводит к изменению емкостей преобразователя 36. Наибольшее изменение 3.37 произойдет в направлении действия ускорения x_i (по рис. 3.21). На выходе частотного детектора 35 на этом канале будет максимальное

напряжение U_{35i} – см. рис. 3.20. В момент времени t_1 появляется импульс генератора тактовой частоты U_{43} , который открывает конъюнктор интегратора 37 и начинается процесс заряда конденсатора C_1 (3.41). Выходные напряжения интегратора поступают на формирователь 39, где в момент времени t_2 совпадения напряжения U_{37} с опорным U_0 вырабатывается прямоугольный импульс U_{39} длительностью t_1-t_2 . Срезом этого импульса U_{39} отсекается длительность импульса генератора тактовой частоты 43. За время действия импульса генератора 43 конъюнктор 40 пропускает на выход i -ый импульс формирователя 39.

Импульс конъюктора 40 по установочному входу переводит RS-триггер 44 в единичное состояние, что приводит к высвечиванию индикаторного светодиода 28 i -го канала и открыванию конъюктора 45, последний передает значение измеряемого ускорения в виде напряжения частотного детектора через дизъюнктор 47 и преобразователь амплитуда-код 48 на цифровой индикатор результата 27. Информация на индикаторе обновляется с частотой генератора тактовых импульсов.

Таким образом, предлагаемое устройство для измерения горизонтальных ускорений имеет широкий диапазон измерения, в частности по нижней границе. Положенные в основу технические решения минимизируют влияние резонансных эффектов на характеристику преобразования, что способствует повышению точности измерения. конструкция устройства проста и высокотехнологична за счет исполнения в виде отдельных сборочных единиц. Электронный блок выполнен на типовых элементах электроники.

Выше рассмотрены средства измерений наиболее часто встречающихся параметров. Выделяют задачи измерения свойств материалов. Рассмотрим применение упругого подвеса для измерения вязкости жидкости.

Монтажной основой установки является основание 1, в небольшом углублении которого установлена емкость 2 для исследуемой жидкости. Емкость может иметь метку уровня. Над емкостью расположен датчик 3 с выступающим из его корпуса зондом 4. Зонд имеет метку (на чертеже не показано) глубины погружения III. Пространственное положение датчика реализуется посредством кронштейна 5. Крепление датчика осуществляется винтами 6, а крепление кронштейна – винтами 7.

Датчик выполнен в виде отдельной сборочной единицы, все его

элементы смонтированы на корпусе 8 прямоугольного сечения Г-образной формы. Привод перемещения зонда 4 выполнен на основе вращательного колебательного звена баланс-упругий подвес. Сборочная единица баланс (инерционное тело) 9 содержит центральную магнитоприводную втулку 10, к которой прикреплены верхнее магнитоприводное крыло 11 в форме круга, нижнее магнитоприводное крыло 12 в форме перевернутой чаши и цанговый зажим 13 для крепления нижнего конца упругого подвеса 14. Упругий подвес представляет собой отрезок проволоки круглого сечения из материала с малым внутренним трением (узкой петлей механического гистерезиса). Верхний конец упругого подвеса закреплен в цанговом зажиме 15 корпуса датчика. Цанговые зажимы являются стандартными элементами, поэтому на рис. 3.23 они показаны условно.

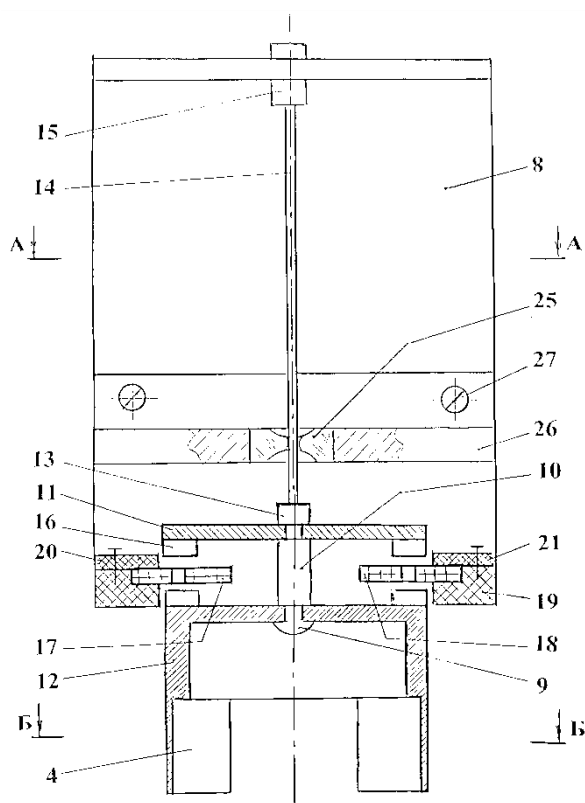


Рис. 3.23 Осевой разрез датчика

Имеется магнитоэлектрическая система возбуждения автоколебаний баланса. К ней относятся диаметрально закрепленные с помощью клея на крыльях баланса две пары постоянных магнитов 16 осевой намагниченности. В целом баланс осеуравновешен. В магнитных зазорах баланса установлены бескаркасные плоские электрические катушки 17, 18. Катушки имеют одинаковые внешние диаметры. Одна катушка намотана бифилярно (в два провода) и содержит секцию W_u и секцию W_o , а вторая – только секцию W_u . Катушки входят в схему формирования импульсов привода (СФИП) – рис. 3.26. Пространственное положение катушек обеспечивается с помощью кронштейна из электроизоляционного материала 19 – см. рис. 3.24. Этот кронштейн совместно с другими элементами образует отдельную сборочную единицу. Катушки 17, 18 размещены в расточках концевых участков кронштейна и поджаты накладками 20, 21 с помощью винтов 22. Методом навесного

монтажа на кронштейне установлены транзистор VT и конденсатор С СФИП. Внешнее электрическое соединение реализуется с помощью разъема 23. Кронштейн 19 крепится к корпусу 8 датчика винтами 24.

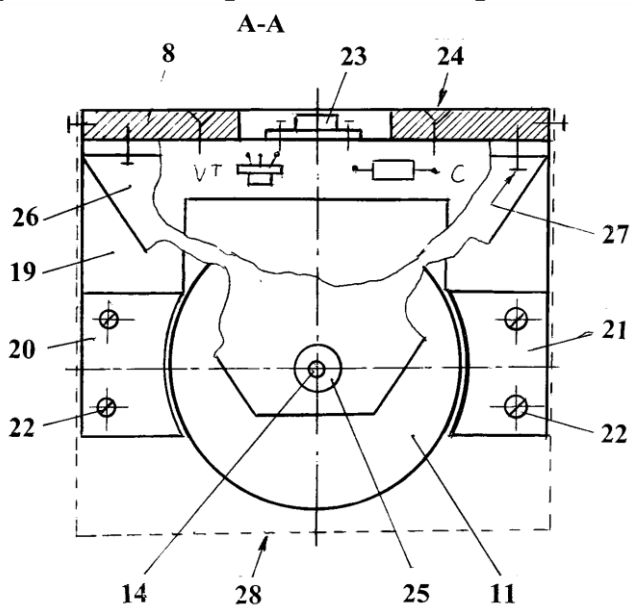


Рис. 3.24 Разрез А-А по рис. 3.23

При проектировании зонда необходимо иметь в виду обеспечение касательных напряжений в исследуемой жидкости. На рис. 3.24 показано сечение зонда. Он представляет собой два сектора тонкостенной цилиндрической оболочки с высотой, превышающей расчетную глубину погружения $l_{\text{п}}$. Кромки секторов притуплены. Зонд соединен с приводом перемещения, а именно с балансом. Учитывая

форму этих элементов зонд и нижнее крыло баланса следует выполнять в виде единой детали. К расчетным параметрам зонда относятся:

R – радиус оболочки;

α – угол сектора;

h – толщина оболочки;

$l_{\text{п}}$ – глубина погружения;

S – общая площадь взаимодействия с измеряемой жидкостью.

Учитывая, что $R \gg h$

$$S = 4R \alpha l_{\text{п}} \quad (3.42)$$

В датчике предусмотрена блокировка возможных по причине внешних возмущений маятниковых колебаний баланса, соответственно зонда. В нижней части упругого подвеса установлена втулка (подшипник) 25. Втулка представляет собой стандартную и широко распространенную в приборостроении опору из искусственных минералов (рубин, лейкосапфир) с оливированным отверстием. Втулка запрессована в отверстие кронштейна 26, который винтами 27 присоединен к корпусу 8 датчика.

После монтажа функциональных элементов датчика устанавливается защитный кожух 28 из листового материала П-образной формы.

Из соображений наглядности на рис. 3.24 он показан условно пунктирной линией.

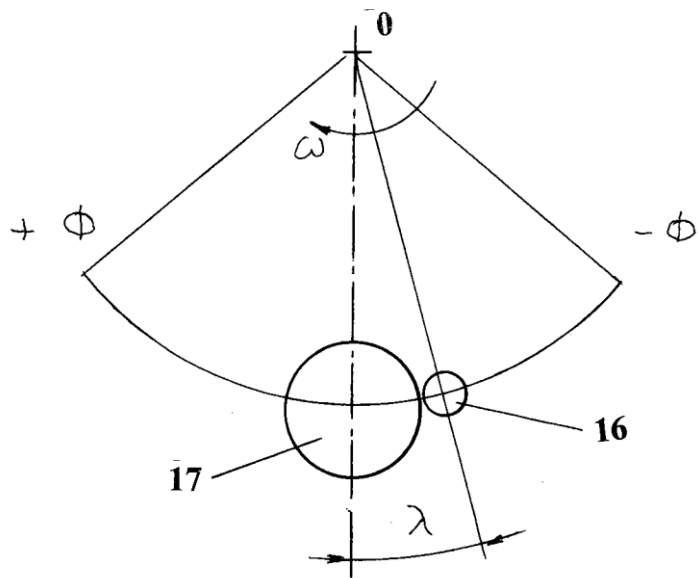


Рис. 3.25 Осевой разрез датчика

Расчетная стационарная амплитуда автоколебаний баланса, следовательно, зонда, реализуется уровнем электропитания E схемы формирования импульсов привода (СФИП) – рис. 3.26. При движении баланса по направлению ω (рис. 3.25) в пределах угла импульса λ в обмотках катушек 17, 18 индуцируется ЭДС.

ЭДС обмотки освобождения W_0 в векторной форме

$$\bar{e}_0 = \bar{B} \bar{l} \bar{v}, \quad (3.43)$$

где \bar{B} – магнитная индукция в зазоре;
 \bar{l} – направление витка;
 \bar{v} – линейная скорость.

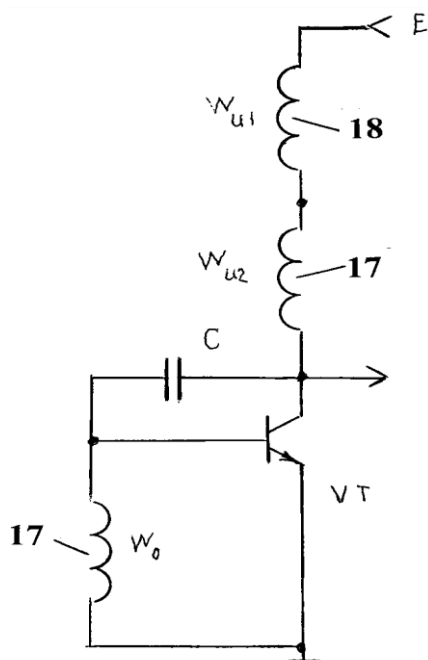


Рис. 3.26 Схема формирования импульсов привода

Концы обмотки W_0 подключены так, что e_0 в пределах λ положительна. После прохождения положения равновесия изменяется направление \bar{l} витка и ЭДС меняет знак. Для транзистора VT принятый проводимости (n - p - n) положительная полуволна ЭДС открывает транзистор и по обмоткам импульса W_{u1} и W_{u2} проходит импульс тока, обеспечивающий подкачку энергии к колебательному звену. Катушки включены последовательно (рис. 3.26), токи в них равны, следовательно образуется пара сил, что исключает появление поперечной (маятниковой) силы. Возможный диапазон амплитуд ϕ автоколебаний

$$(\pi - \lambda) > \phi > \lambda, \quad (3.44)$$

Для определенности примем значение стационарной амплитуды $\phi_{ст} = 1$ рад.

Поясним принцип выявления искомого параметра (динамической вязкости жидкости). Рассмотрим свойства системы.

Первым параметром колебательного звена является собственная частота f

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (3.45)$$

где T – период колебаний;

ω – циклическая частота,

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (3.46)$$

здесь D – крутильная жесткость подвеса;

J – момент инерции баланса.

Энергетические свойства колебательного звена характеризуются величиной добротности Q

$$Q = \frac{E_{кол}}{E_{пот}}, \quad (3.46)$$

где

$$E_{кол} = \frac{D \phi^2}{2} \quad (3.47)$$

– колебательная энергия при амплитуде ϕ ;

$E_{пот}$ – энергия потерь за один период T .

Вместо величины добротности пользуются значением интегрального коэффициента трения h_u

$$h_u = \frac{\sqrt{JD}}{Q}, \quad (3.48)$$

Значения величин h_u или Q определяют экспериментально (Шарыгин Л.Н., Сорокин А.А. Автоколебательные системы в средствах измерения и контроля: учеб. Пособие. – Владимир: изд. Атлас, 2016. – 205 с. ISBN 978-5-903087-53-2). Для этого получают функцию выбега $\phi = f(t)$. Применительно к рассматриваемой установке регистрируют импульсы ЭДС e_0 обмотки W_0 СФИП при отключенном электропитании E . Из формулы (3.43) следует, что пиковое значение e_0 пропорционально амплитуде ϕ

$$e_0 = K \phi \quad (3.49)$$

поскольку

$$V_{max} = \omega \phi r_6,$$

где r_6 – межосевое смещение магнитов 16. Значение коэффициента K – формула (3.48) – находят при $\phi = \phi_{ст}$.

Формула (3.48) показывает, что в процессе эксплуатации установки при установлении нужного значения амплитуды автоколебаний баланса $\phi_{ст}$ следует измерять максимальное значение ЭДС освобождения e_0 . Поскольку положительная полуволна e_0 несколько уменьшается за счет тока базы транзистора $VТ$, предпочтительно пользоваться отрицательной полувольной.

На функции выбега в окрестностях стационарной амплитуды $\phi_{ст}$ берут два значения $\phi_1 > \phi_{ст}$ и $\phi_N < \phi_{ст}$ и вычисляют значение добротности

$$Q = \frac{N}{\ln \frac{\phi_1}{\phi_N}}, \quad (3.50)$$

где N – количество периодов T за время движения от амплитуды ϕ_1 до амплитуды ϕ_N .

В соответствии с формулой (3.46) энергия потерь $E_{пот}$ за один период T колебаний составит

$$E_{пот} = \frac{D \phi_{ст}^2}{2Q}. \quad (3.51)$$

За это время от источника энергии E системы возбуждения передана энергия

$$E_{ист} = I_{ср} T, \quad (3.52)$$

где $I_{ср}$ – средний ток источника E .

Учитывая, что в исходном положении транзистор $VТ$ за счет нулевого смещения находится в режиме отсечки, то при больших значениях коэффициента передачи тока β транзистора форма импульсов тока близка к прямоугольной, тогда

$$E_{ист} = 2 I_m t_u, \quad (3.53)$$

где I_m – амплитуда тока в импульсе;
 t_u – длительность импульса.

В соответствии с формулами (3.51), (3.52) коэффициент полезного действия γ равен

$$\gamma = \frac{E_{пот}}{E_{ист}} = \frac{D \phi_{ст}^2}{2Q I_{ср} T}. \quad (3.54)$$

Из формулы (3.53), (3.54) следует, что аттестовав значение коэффициента полезного действия γ достаточно при нахождении энергии

потерь $E_{\text{пот}}$ в процессе эксплуатации установки измерить среднее значение потребляемого тока $I_{\text{ср}}$

$$E_{\text{пот}} = \gamma E_{\text{ист}} \quad (3.55)$$

По результатам метрологической аттестации фиксируют основные параметры установки – $J, D, \omega, T, \gamma, K, \phi_{\text{ст}}, I_{\text{ср}}^0, Q^0, h_u^0, E_{\text{пот}}^0$. Параметрам, которые изменяются при измерении вязкости жидкости присвоен верхний индекс 0. В спецификацию установки входят: измеритель среднего значения импульсного тока, источник регулируемого постоянного электропитания, измеритель ЭДС.

Пользуются установкой следующим образом:

1. Наполняют емкость 2 исследуемой жидкостью выдерживая уровень погружения l_{π} зонда 4
2. Регулировкой уровня электропитания E устанавливают значение стационарной амплитуды автоколебаний $\phi_{\text{ст}}$ баланса. Контроль ведут по величине e_0 (отрицательная полуволна).
3. Измеряют среднее значение тока $I_{\text{ср}}$.
4. По разности $(I_{\text{ср}} - I_{\text{ср}}^0)$ вычисляют $E_{\text{пот}}$, h_u и находят величины их увеличения

$$\begin{aligned} E_{\text{пот}}^{\text{ж}} &= E_{\text{пот}} - E_{\text{пот}}^0, \\ h_u^{\text{ж}} &= h_u - h_u^0. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Энергия $E_{\text{пот}}^{\text{ж}}$ равна работе сил вязкого трения в исследуемой жидкости.

5. Принимают модель жидкости и находят динамическую вязкость η . Для ньютоновской жидкости при колебательном методе измерения получено выражение для нахождения динамической вязкости η

$$h_u^{\text{ж}} = S \sqrt{\eta \frac{\rho \omega}{2}}, \quad (3.57)$$

где ρ – плотность жидкости;

S – площадь зонда – см. формулу (3.42).

Таким образом, предлагаемая установка для определения вязкости жидкости за счет блочного исполнения конструктивно проста и высокотехнологична, что предполагает низкие трудозатраты при освоении в производстве. Процедура выявления параметров вязкого трения исследуемой жидкости не требует высокой квалификации оператора.

Глава 4 СТРУНЫ

4.1. Виды струн и способы крепления

Общие вопросы проектирования измерительных преобразователей на основе струн изложены в монографии [3]. Наиболее простой формой струны является отрезок проката круглого или прямоугольного сечения.

Главной проблемой конструирования преобразователей на основе струн является проблема закрепления концов струны. Именно крепление определяет стабильность и долговечность преобразователя. Рассмотрим основные способы крепления – рис. 4.1.

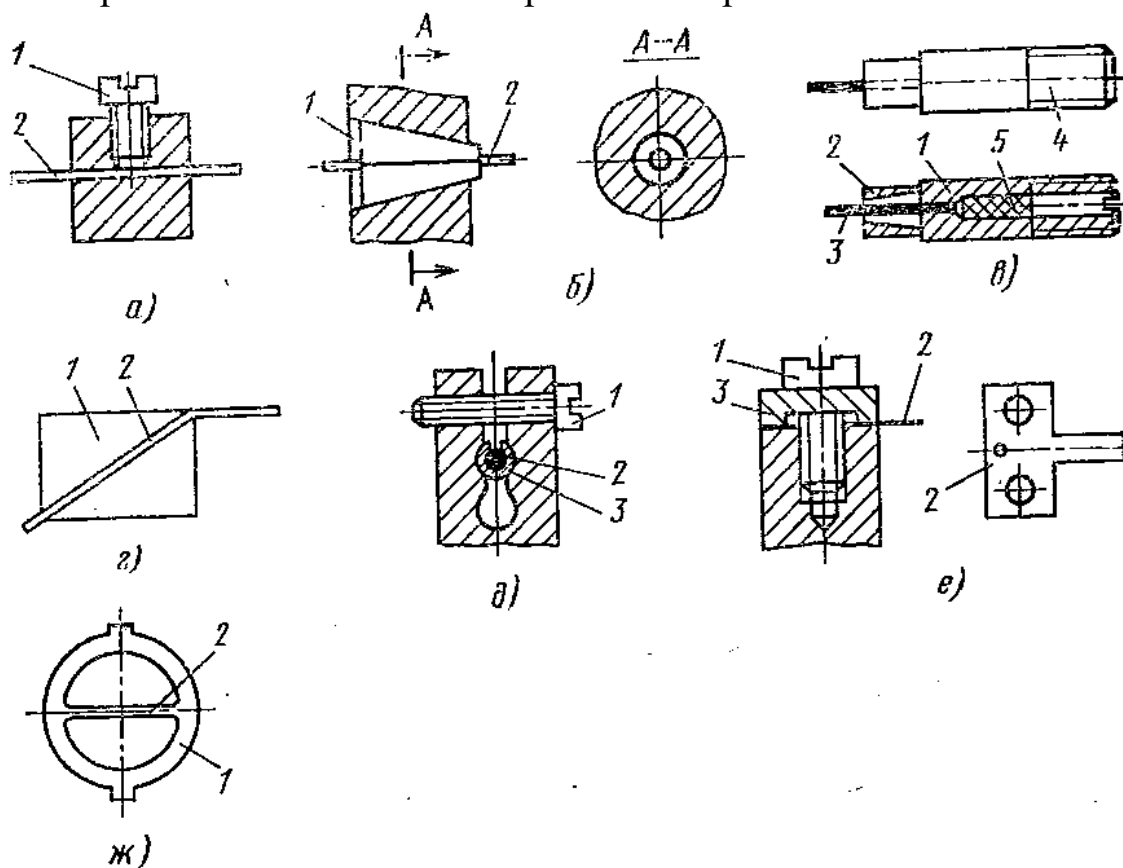


Рис. 4.1. Крепление струн:

а – в отверстии (*1* – винт, *2* – струна); *б* – разрезанным конусом (*1* – разрезанный конус, *2* – струна); *в* – в ниппеле (*1* – ниппель, *2* – коническая втулка, *3* – струна, *4* – контргайка, *5* – медь); *г* – в призме (*1* – призма, *2* – струна); *д* – щелевое (*1* – винт, *2* – струна, *3* – втулка); *е* – между плоскостями (*1* – винт, *2* – струна, *3* – планка); *ж* – изготовление струны за одно целое с упругим элементом [*1* – упругий элемент, *2* – струна (плоская балка)]

Крепление струны в отверстии с помощью винта (рис. 4.1-а) очень простое, но имеет ряд существенных недостатков: непостоянство длины струны в процессе эксплуатации, неравномерное распределение напряжений и изгиб струны в месте закрепления.

Использование закрепления струны между плоскостями разрезного конуса (рис 4.1-б) позволяет устранить изгиб струны в месте закрепления, но возникают технологические трудности изготовления.

Усовершенствованием этого способа стал способ крепления струны в ниппеле (рис. 4.1-в). При этом способе струну сначала закрепляют в коническую втулку, затем пропускают в ниппель и зачеканивают красной медью. Место стыковки ниппеля с конической втулкой оплавляют.

На рис. 4.1-г приведен способ крепления струны в призме. В качестве недостатка этого способа отметим изгиб струны в месте выхода из зажима, что приводит к изменению длины струны в процессе эксплуатации.

Для снижения напряжений в зоне крепления используют закрепление круглой струны с утолщенными концами – рис. 4.1-д. струна закрепляется через промежуточную разрезную втулку.

Наилучшим способом крепления ленточной струны является зажим между хорошо обработанными и подогнанными параллельными плоскостями – рис. 4.1-е.

Используют изготовление струны и упругого элемента в виде единой детали – рис. 4.1-ж.

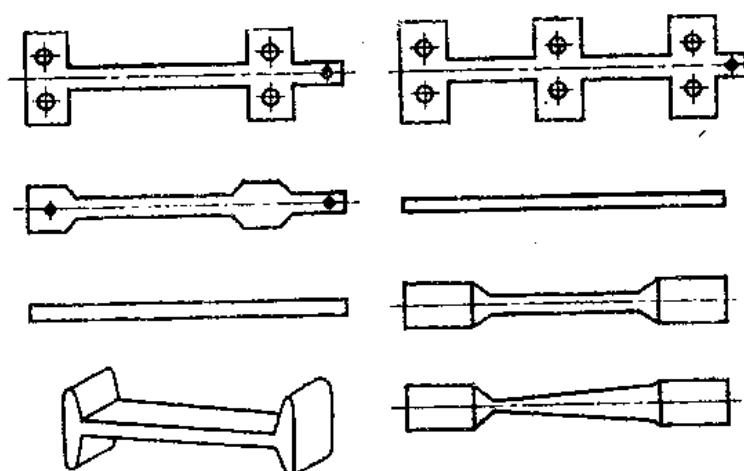


Рис. 4.2. Конструкции струн, применяемых в датчиках

Некоторые варианты форм струн показаны на рис. 4.2. Более сложные формы предполагают более высокую трудоемкость изготовления.

Струны любого конструктивного исполнения осуществляют преобразование вида сила – частота, то есть входная величина – сила, изменяя натяжение струны изменяет выходную величину – частоту колебаний струны. При этом возможны два режима – режим свободных колебаний при ударном возбуждении и режим автоколебаний.

4.2. Режим свободных колебаний

Для выявления текущего состояния крупных инженерных сооружений – плотин, мостов – используют измерительные системы со множеством датчиков, состояние которых проверяется по определенной программе. Рассмотрим датчик силы [15] для измерительных систем подобного назначения.

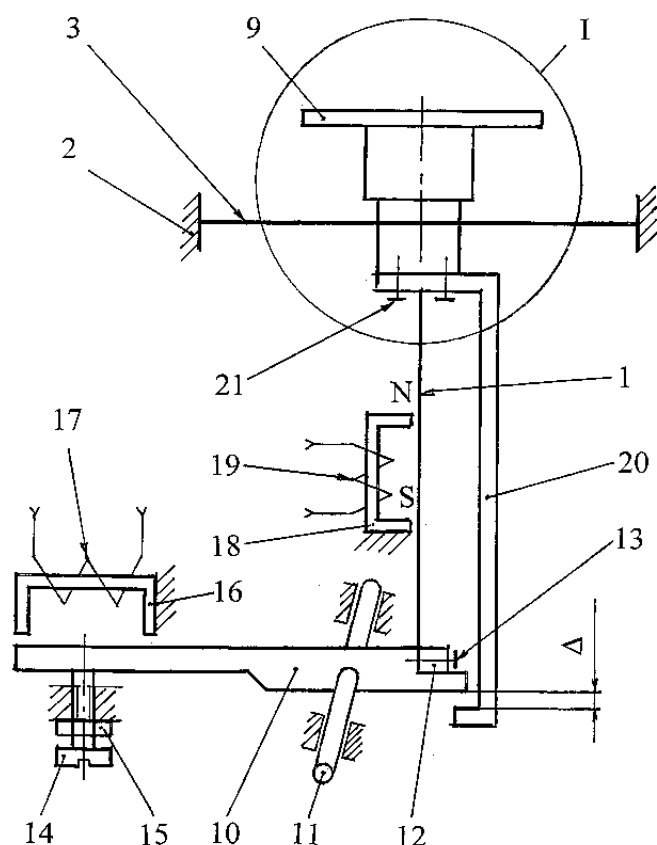


Рис. 4.3. Конструктивная схема датчика силы

Поскольку рычаг в датчике силы один, то в пределах описания будем применять краткий синоним: вместо полного термина «Двуплечий поворотный рычаг» использовать термин «Рычаг».

Чувствительным элементом датчика силы является струна 1, выполненная в виде плоской ленты из магнитопроводного материала. Струна размещена внутри корпуса 2 (на чертеже показан штриховкой).

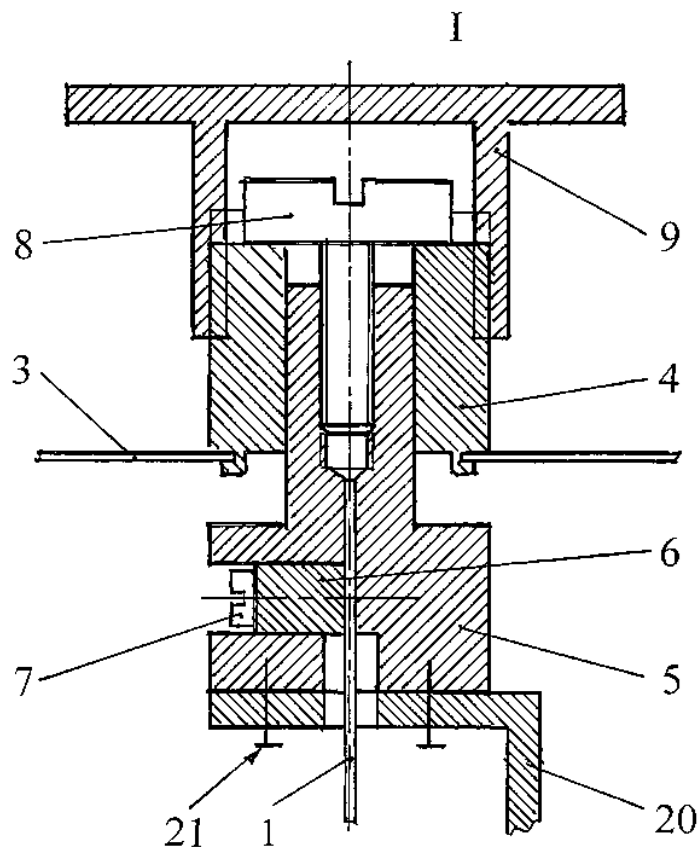


Рис. 4.4. Разрез I по рис. 4.3

Верхнее крепление струны (здесь и далее ориентация чертежа) выполнено следующим образом. В корпусе по контуру закреплена мембрана 3 имеющая жесткий центр, который образуют:

- втулка 4, имеющая центральное сквозное отверстие квадратного сечения, закрепленная в центральном отверстии мембраны завальцовкой;

- подвижный зажим струны, в основе которого корпус зажима 5, имеющий хвостовик квадратного сечения с резьбовым отверстием входящий в квадратное отверстие втулки 4. В корпусе зажима выполнен паз, в котором размещена накладка 6. Плоское дно паза совместно с накладкой и винтами 7 накладки образуют тисковое крепление струны.

Для удобства первичного монтажа, в корпусе зажима от верхней кромки паза до резьбового отверстия выполнено отверстие диаметром, несколько превышающим диагональ сечения струны. Втулка 4 и корпус зажима 5 соединены винтом 8.

С жестким центром соединен переходник 9, через который передается измеряемая сила. Переходник закреплен на втулке 4 с помощью резьбы.

Обратимся к нижнему креплению струны. Имеется подвижный элемент 10 в виде двуплечего поворотного рычага с осью вращения 11. Рычаг 10 выполнен из магнитопроводимого материала. Первое плечо рычага соединено с концом струны посредством накладки 12 и винтов 13. Накладка установлена в пазу первого плеча рычага. От нижней плоскости этого паза выполнено сквозное технологическое отверстие для струны по аналогии с отверстием для струны в корпусе зажима 5. Таким образом, нижнее крепление струны тоже тисковое. В состав подвижного элемента входит стопор и электромагнит рычага, которые размещены по разные стороны второго плеча рычага. Стопор на рис. 4.3 представлен винтом 14 и контргайкой 15. Электромагнит рычага имеет магнитопровод 16, обмотку 17 и установлен в корпусе с образованием зазора, обеспечивающего поворот рычага 10.

Для возбуждения колебаний струны и получения измерительного сигнала предусмотрен электромагнит струны, состоящий из поляризованного магнитопровода 18 и обмотки 19. Поляризованный магнитопровод выполнен либо из магнитотвердого материала, либо составлен из постоянного магнита с полюсными наконечниками из магнитомягкого материала с образованием магнитных полюсов N и S. Электромагнит струны закреплен на корпусе в зоне средней части струны.

В конструкции датчика силы предусмотрен ограничитель 20 в форме скобы, который верхним отогнутым концом винтами 21 снизу закреплен на корпусе 5 подвижного зажима струны. Второй отогнутый конец ограничителя размещен в зоне конца первого плеча двуплечего поворотного рычага 10, таким образом, что обеспечивается ограничение поворота рычага 10 (по часовой стрелке).

В соответствии с электрической схемой датчика силы (рис. 4.5) внутри корпуса 2 закреплен электрический конденсатор С (на рис. 4.3 не показан). В целом, датчик силы герметизирован. Вопросы герметизации, фиксации винтов, в частности винта 8, подвижного соединения

переходника с корпусом являются типовыми и здесь не рассматриваются.

При сборке датчика силы его настраивают на исходную частоту струны f_0 , которая определяется параметрами струны и силой предварительного натяжения F_0 . При сравнительно длинной струне и расположением возбуждающей силы в средней ее части получается первая форма колебаний (струна колеблется с образованием одной полуволны). Начальная собственная частота колебаний

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0}{ml}} = \frac{\omega_0}{4\pi} \sqrt{\frac{F_0}{ml}}, \quad (4.1)$$

где m, l – соответственно масса и длина струны;

$\omega_0 = 2\pi f_0$ - круговая частота.

В процессе настройки изменяют силу предварительного натяжения F_0 с помощью винта 8 жесткого центра мембраны и винта 14 стопора двуплечего поворотного рычага. По окончании настройки первое плечо (правое по чертежу) двуплечего поворотного рычага будет опираться на отгиб ограничителя 20, т.е. зазор Δ по рис. 4.3 будет равен нулю. При этом мембрана 3 будет иметь начальный прогиб δ_0 - смещение жесткого центра

$$\delta_0 = \frac{F_0 R_{\text{cp}}^2}{16D}, \quad (4.2)$$

где $R_{\text{cp}} = \frac{(R_3 + R_4)}{2}$ – средний радиус мембраны;

$D = \frac{E_M h_M^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость мембраны, обозначено

R_3, R_4 - соответственно внешний радиус мембраны 3 и внешний радиус (радиус закольцовки) втулки 4;

E_M, h_M, μ - соответственно модуль упругости первого рода материала мембраны, ее толщина и коэффициент Пуассона.

Контроль начальной настройки ведут следующим образом. Подают на вход-выход Е (см. рис. 4.5) короткий прямоугольный импульс (миллисекундный диапазон), за счет которого струна получает некоторое отклонение и переходит в режим свободных колебаний. При колебаниях изменяется зазор между струной и поляризованным магнитопроводом 18 электромагнита струны, что приводит к изменению магнитного потока и появлению индукционной ЭДС. Заметим, что ампли-

туда ЭДС кажется сравнительно большой за счет поляризации магнитопровода электромагнита струны 18. Большая величина амплитуды ЭДС обеспечивает надежность и достоверность результата измерения частоты (либо обратной величины – периода колебаний).

Рассмотрим происходящие процессы подробнее с использованием электрической схемы – рис. 4.5. Электромагнит рычага на электрической схеме отражен индуктивностью L_p обмотки 17 и ее активным сопротивлением R_p . Аналогично электромагнит струны представлен индуктивностью $L_{эс}$ и активным сопротивлением обмотки 19 - $R_{эс}$. Как было отмечено выше последовательно с обмоткой 19 включен конденсатор C . Таким образом, образованы две параллельные цепи. Одна, объединенная точка образует общую шину, а вторая точка E является электрическим входом-выходом датчика силы.

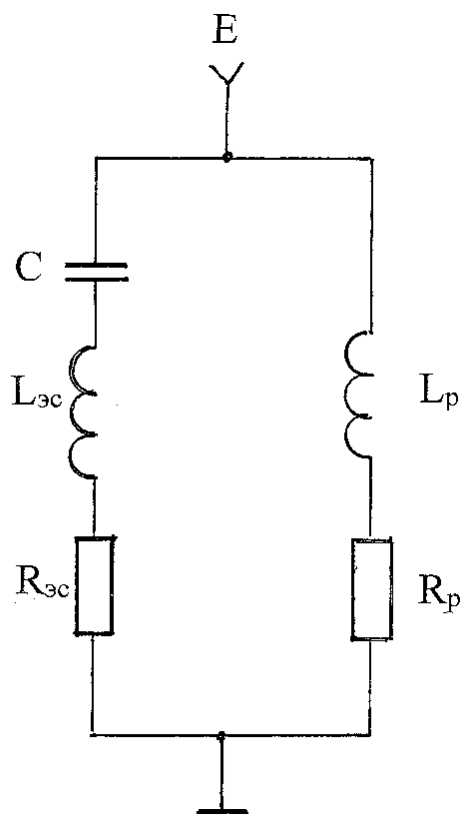


Рис. 4.5. Электрическая схема датчика силы

является электрическим входом-выходом датчика силы.

Цепь электромагнита струны представляет собой последовательный колебательный контур с круговой частотой

$$\omega_{эс} = \frac{1}{\sqrt{L_{эс}C}} \quad (4.3)$$

и добротностью

$$Q_{эс} = \frac{\omega_{эс}L_{эс}}{R_{эс}} = \frac{1}{R_{эс}\omega_{эс}C}. \quad (4.4)$$

Полоса пропускания контура

$$2\Delta\omega_{эс} = \omega_{эс \max} - \omega_{эс \min} \quad (4.5)$$

определяется добротностью контура

$$2\Delta\omega_{эс} = \frac{\omega_{эс}}{Q_{эс}}. \quad (4.6)$$

Вторая ветвь электрической схемы является апериодическим звеном и характеризуется постоянной времени

$$\tau_{\rho} = \frac{L_{\rho}}{R_{\rho}}, \quad (4.7)$$

где L_{ρ} - индуктивность обмотки 17 электромагнита рычага;

R_{ρ} - активное сопротивление обмотки 17.

Рассмотрим прохождение короткого одиночного прямоугольного импульса длительностью t_u подаваемого на вход-выход Е – ситуация контроля начальной настройки.

Прямоугольный импульс может быть разложен в гармонический ряд Фурье. Этому разложению соответствует сплошной («белый») спектр. Гармоники спектра в пределах полосы пропускания (4.4) имеют большую амплитуду. Пусть начальные параметры соответствуют условию – см. формулы (4.1) и (4.5)

$$\omega_{эс\ max} = \omega_0, \quad (4.8)$$

тогда произойдет резонансное возбуждение струны на круговой частоте ω_0 .

После окончания импульса t_u точка Е подключается к измерителю частоты.

Положим, что соблюдено условие

$$\tau_{\rho} \gg t_u. \quad (4.9)$$

Тогда за время действия импульса t_u ток в цепи катушки 17 электромагнита рычага практически оказывается ничтожно малым, следовательно, магнитное взаимодействие с рычагом 10 будет отсутствовать, т.е. двулучий поворотный рычаг останется в исходном положении на стопоре 14.

Реализуются отмеченные выше условия (4.7), (4.8) подбором величины емкости С и параметров электромагнитов.

Рассмотрим процедуру при прохождении отрицательного импульса t_u . Отрицательный импульс организуем следующим образом. Подадим на вход-выход Е постоянное напряжение U, затем прервем это напряжение на время t_u .

В момент включения фронт напряжения даст короткий дифференцированный импульс тока по цепи $L_{эс}R_{эс}C$, за счет которого будут обеспечены свободные колебания струны с малой начальной амплитудой, следовательно с малым временем $t_{зат}$ затухания колебаний. Принято считать, что переходные процессы в цепях с реактивностью за-

канчиваются за время, равное трем постоянным времени цепи. В рассматриваемом случае ток в цепи катушки 17 электромагнита рычага достигнет номинального значения

$$I_{17} = \frac{U}{R_{\rho}} \quad (4.10)$$

за время

$$t_{17} = 3\tau_{\rho} \quad (4.11)$$

С учетом отмеченного выше замечания будем полагать, что за это же время прекратятся затухающие колебания струны, т.е.

$$t_{\text{зат}} < t_{17}. \quad (4.12)$$

По исходному условию в момент времени превышающий t_{17} прервем питающее напряжение U на время t_u , что соответствует отрицательному прямоугольному импульсу длительностью t_u . Разложение Фурье не зависит от знака импульса, спектр частот остается прежним.

Следовательно, отрицательный импульс t_u обеспечит такое же возбуждение свободных колебаний струны, как и положительный, рассмотренный выше. Но здесь изменилась ситуация с двуплечим поворотным рычагом. Номинальный ток электромагнита рычага 10 обеспечит достаточную силу взаимодействия, и рычаг будет стремиться поворачиваться. Поворот рычага возможен только до механического контакта с ограничителем 20.

Изложенное рассмотрение позволяет сделать выводы:

1. Положительный и отрицательный прямоугольные импульсы оказывают одинаковое возбуждение свободных колебаний струны.
2. В случае положительного импульса поворотный двуплечий рычаг остается в исходном положении – на стопоре.
3. В случае отрицательного импульса поворотный двуплечий рычаг прижат к ограничителю.

Работа датчика силы. Устанавливают датчик силы на объекте таким образом, чтобы измеряемая сила F_u воздействовала на переходник 9 в осевом направлении.

Под действием измеряемой силы F_u увеличится предварительный прогиб мембраны 3, т.е. жесткий центр сместится вниз. Совместно с жестким центром сместится вниз ограничитель 20. При этом будет потерян механический контакт ограничителя с рычагом 10. В случае

длинной струны появится некоторый зазор Δ . Текущее значение силы натяжения струны составит

$$F = F_0 - F_u. \quad (4.13)$$

Соответственно собственная частота струны будет равна

$$f_u = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}}. \quad (4.14)$$

С учетом формул (4.13), (4.14) передаточная функция датчика силы будет иметь вид

$$F_u = F_0 - 4 ml f_u^2. \quad (4.15)$$

Диапазон измерения определяется полосой пропускания контура – формула (4.5). Нижняя граница $F_{u \min}$ диапазона измерения соответствует циклической частоте $\omega_{c \max}$, а верхняя – частоте $\omega_{c \min}$. Верхняя граница диапазона измерения может быть увеличена за счет повышения чувствительности вторичного прибора.

Достоверный результат измерения получают в три этапа:

1. От вторичного прибора на вход-выход Е датчика силы дают положительный прямоугольный импульс t_u . Непосредственно после окончания этого импульса измеряют частоту f_u и вычисляют по формуле (4.14) измеряемую силу.

2. Производят контроль текущего состояния датчика силы по величине силы предварительного натяжения F_0 . Для этого от вторичного прибора на вход-выход Е датчика силы дают отрицательный прямоугольный импульс. При этом рычаг 10 поворачивается и опирается на нижний отгиб ограничителя 20, обеспечивая исходную длину струны. По окончании отрицательного импульса измеряют собственную частоту настройки f_0 .

3. Если результат по п.2 не равен паспортному значению f_0 , то производят пересчет результата измерения, полученного в п.1, по формуле (4.15).

Таким образом, предлагаемый датчик силы может работать в удаленном доступе при двухпроводной линии связи, обеспечивает необходимую достоверность результата измерения за счет контроля его текущего состояния и большой амплитуды генерируемой ЭДС.

4.3. Режим автоколебаний

Режим автоколебаний применяют для непрерывного измерения регистрируемой величины. Для повышения достоверности результатов измерения применяют дифференциальный способ. Рассмотрим вариант исполнения датчика силы такого типа.

Функциональные элементы датчика смонтированы в корпусе, который состоит из основания 1 из немагнитопроводного материала и двух стальных пластин – верхней 2 и нижней 3 (здесь и далее ориентация чертежа). Пластины 2, 3 соединены с основанием винтами 4, 5. Для закрепления датчика на объекте исследования в основании 1 предусмотрены два резьбовых отверстия 6, 7. Струна 8 выполнена из магнитопроводной ленты прямоугольного сечения и закреплена посредством накладок 9-11 и винтов 12-14 в трех точках. Верхнее крепление осуществляется непосредственно на пластине 2, нижнее – на бобышке 15 устройства натяжения. Средняя точка струны соединена с упругим шарниром 16.

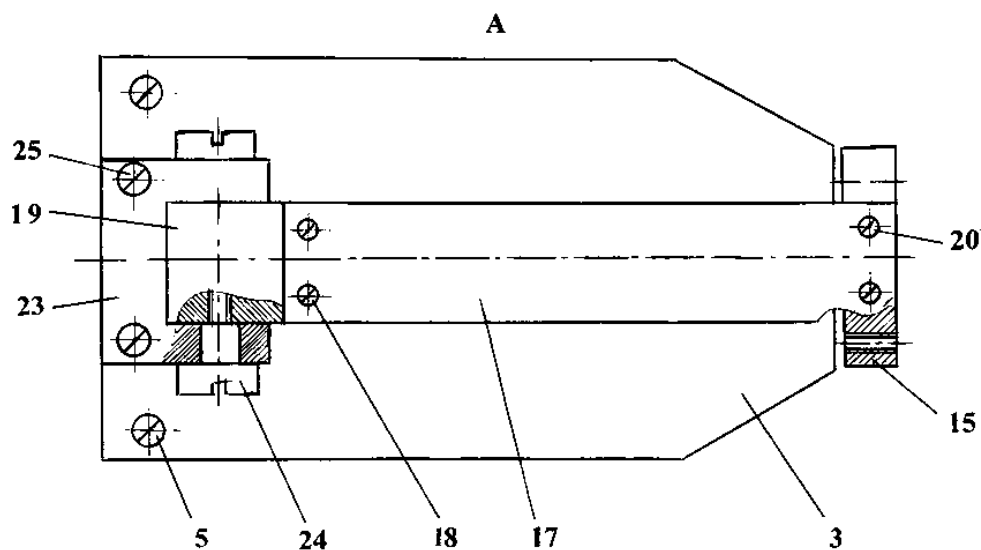


Рис. 4.6. Вид А по рисунку 2.17

Устройство натяжения (см. рис. 4.6) основано на плоской пружине 17, которая винтами 18 закреплена на подвижной части 19 Т-образной формы поворотного шарнира. На консольной части пружины 17 винтами 20 закреплена бобышка 15. Поворотная часть 19 шарнира размещена в пазу 21 нижней пластины 3 и имеет сквозное резьбовое отверстие 22. Неподвижная часть 23 шарнира имеет вилочную форму

с двумя соосными отверстиями, в которые входят стандартные элементы винт-ось 24, образующие вал поворота. Неподвижная часть 23 винтами 25 закреплена на пластине 3. Для регулирования натяжения струны предусмотрен винт 26 (рис. 4.7).

Упругий шарнир 16 средней части струны представляет собой направляющую поступательного перемещения рычага 27 передающего измеряемую силу. Передающий рычаг 27 имеет П-образную форму, его нижний отгиб соединен с подвижным элементом упругого шарнира. Измеряемая сила воспринимается верхним отгибом рычага. Для

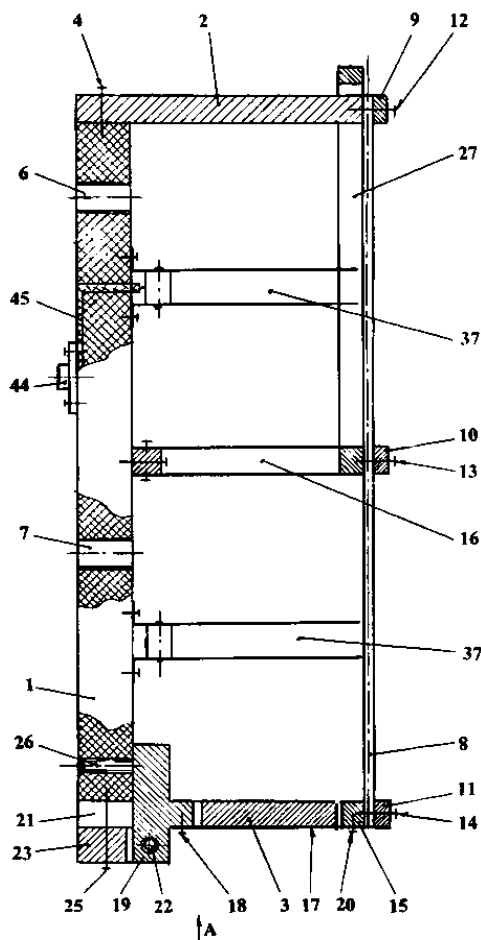


Рис. 4.7. Конструктивная схема датчика силы дифференциального типа

обеспечения кинематической связи с объектом исследования на верхнем отгибе могут выполняться вспомогательные элементы формы, например резьбовые отверстия (см рис. 4.8).

П-образная форма передающего рычага позволяет совместить направление измеряемой силы с осевой линией струны, что исключает крутящий момент в заделке средней точки струны. Основу шарнира 16 составляют две плоские пружины 28, 29, которые винтами 30, 31 закреплены на колодке 32, закрепленной винтами на основании 1 с использованием резьбовых отверстий 33. На консольной части пружин винтами 34 присоединена бобышка 35, имеющая резьбовые отверстия 36 для присоединения накладки 10. Рычаг 27 и бобышка 35 выполнены в виде единой детали.

При конструировании упругого шарнира за счет геометрических параметров и материала пружин обеспечивают малую изгибную жесткость в направлении осевой линии струны и большую вращательную жесткость.

При этих условиях и с учетом высокого значения силы натяжения струны позиционной погрешностью можно пренебречь.

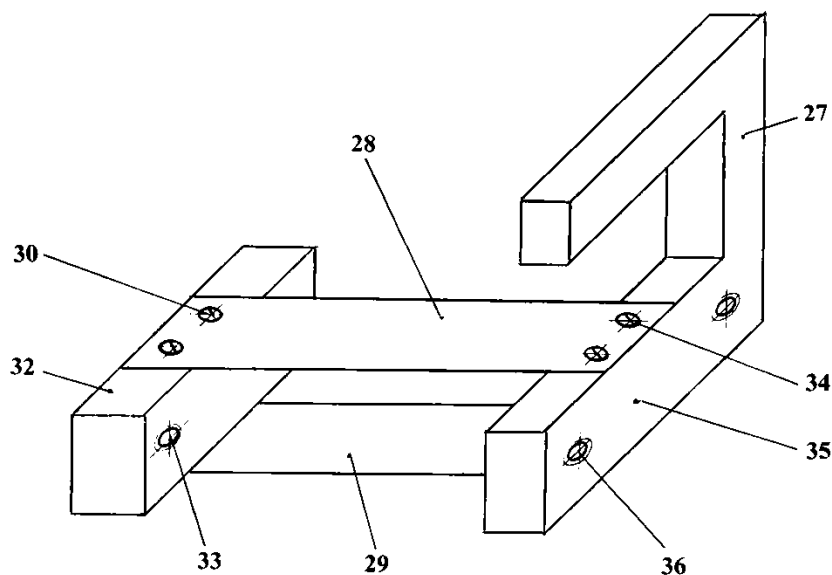


Рис. 4.8. Конструкция упругого шарнира с передающим рычагом

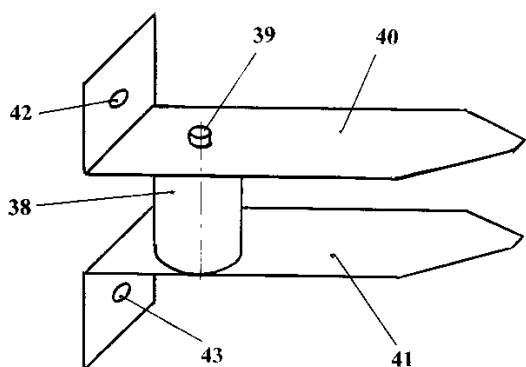


Рис. 4.9. Конструкция блока магнитной цепи системы возбуждения автоколебаний

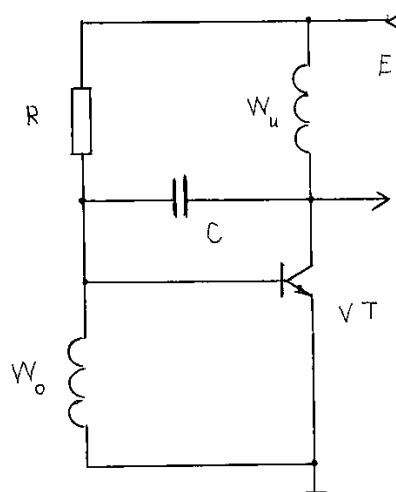


Рис. 4.10. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

В датчике предусмотрены два канала возбуждения автоколебаний, каждый из которых содержит блок магнитной цепи 37 (рис. 4.9) и схему формирования импульсов привода (рис. 4.10). Блок магнитной цепи выполнен в виде отдельной сборочной единицы. Он содержит бифилярную электрическую катушку с секциями W_o и W_u намотанную на цилиндрическую шпую (каркас) 38. Посредством стяжки 39 из магнитопроводного материала шпую с обмоткой соединена с плоскими магнитопроводами 40, 41. Отгибы магнитопроводов с отверстиями 42,

43 предназначены для крепления на основании 1. Обращенные к струне концы магнитопроводов сформированы по ширине сечения струны и образуют с ней постоянный зазор. Полагая, что предлагаемый датчик силы будет работать в составе измерительной системы, отнесем схему формирования импульсов привода к этой системе. В другом варианте исполнения электронные компоненты привода могут быть установлены методом навесного монтажа на основании 1 датчика. Для обеспечения связи между блоками предусмотрен электрический разъем 44, контакты которого соединены с обмотками W_o и $W_{и}$ монтажными проводами 45. Монтажные провода пропущены в отверстия основания 1, по внешней поверхности уложены в пазы с последующим закреплением компаундом.

Схема формирования импульсов привода выполнена на биполярном транзисторе VT, эмиттер которого соединен с общей шиной. Она содержит резистор R и конденсатор C, первые выводы которых подключены к базе транзистора. Резистор R предназначен для смещения рабочей точки, транзистора в середину его активной области, а конденсатор C – для сбоя высокочастотной паразитной генерации. Первая секция электрической катушки (катушка освобождения W_o) блока магнитной цепи 37 включена между базой транзистора и эмиттером. Первый вывод второй секции электрической катушки (катушка импульса $W_{и}$) и второй вывод резистора подключены к шине электропитания E, а второй вывод катушки $W_{и}$ и второй вывод конденсатора подключены к коллектору транзистора с образованием выходной шины.

Системы возбуждения автоколебаний участков струны работают автономно. При включении электропитания E фронтом тока в катушках блока магнитной цепи создается магнитный импульс по цепи: магнитная стяжка 39 – магнитопроводы 40, 41 – зазоры – струна 8. Взаимодействие поля с магнитопроводной струной обеспечивает ее смещение. Далее начавшиеся колебания струны моделируют магнитный поток Φ и в катушках индуцируется ЭДС. ЭДС катушки освобождения $\omega_{ов}$ витков, равна

$$e_o = -\omega_{ов} \frac{d\phi}{dt}. \quad (4.16)$$

Положительной полуволной этой ЭДС открывается транзистор и по катушке $W_{и}$ проходит импульс тока, компенсирующий потери энергии при колебаниях струны.

При сборке датчика смещением в пределах зазора крепления упругого шарнира добиваются равенства длин участков струны. Контроль этой операции ведут измеряя собственные частоты участков – верхнего $f_{ов}$ и нижнего $f_{он}$

$$f_{ов} = f_{он} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0}{ml}}, \quad (4.17)$$

где m, l – соответственно масса и длина участка струны.

Расчетное начальное значение частот $f_{ов}, f_{он}$ реализуют начальным натяжением F_0 струны путем поворота винта 26 устройства натяжения. И из теории колебаний известно, что каждой конструкции колебательного звена соответствует определенный диапазон собственных стабильных частот, определяемый добротностью колебательного звена. Применительно к рассматриваемому датчику силы начальные собственные частоты участков струны (4.17) должны соответствовать середине диапазона возможных частот участков струны.

Рассмотрим случай измерения сжимающей силы F_u – сила приложена к рычагу 27 сверху вниз (см. рис. 4.6). Алгебраическое сложение сил показывает, что текущее натяжение верхнего участка струны составит

$$F_в = F_0 + F_u, \quad (4.18)$$

А нижнего участка

$$F_н = F_0 - F_u. \quad (4.19)$$

Текущие значения частот будут равны:

для верхнего участка струны

$$f_в = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 + F_u}{ml}}, \quad (4.20)$$

для нижнего участка

$$f_н = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0 - F_u}{ml}}. \quad (4.21)$$

На рис. 4.11 приведены основной линией графики функций преобразования – формулы (4.20), (4.21). Приведено построение для фиксированного значения измеряемой сжимающей силы F_{u1} . При построении графиков учтено, что

$$F_0 \gg F_u \quad (4.22)$$

Примечательно к сжимающей силе в первом квадрате располагается график функции преобразования верхнего участка струны, а в тре-

твом квадранте – нижнего участка. При условии (4.22) графики участков имеют полярную симметрию, поэтому графические отрезки $F_{u1}B$ и $-F_{u1}H$ равны, соответственно отрезок разности частот f_{B1}, f_{H1} равен сумме отрезков $F_{u1}B$ и $-F_{u1}H$.

Искомое значение измеряемой силы F_u может быть получено совместным решением уравнений (4.20), (4.21), или через разность квадратов частот

$$F_u = 2ml(f_B^2 - f_H^2). \quad (4.23)$$

На рис. 4.11 пунктирной линией показаны графики функций преобразования для случая появления внешних возмущающих факторов. Внешние факторы (температура, старение материала, эффект «выползания» струны из заделки) в конечном счете изменяют натяжение струны. Начальная частота становится равной f'_0 , при этом вид функций преобразования не изменяется – пунктирные графики получаются аддитивным смещением. Приведенное построение показывает равенство отрезков

$$\begin{aligned} F_{u1}B &= F_{u1}B'; \\ -F_{u1}H &= -F_{u1}H', \end{aligned} \quad (4.24)$$

следовательно остается постоянной разность частот (равенство отрезков)

$$f_{B1} - f_{H1} = f'_{B1} - f'_{H1}. \quad (4.25)$$

Приведенные доводы показывают высокую достоверность результата измерения силы с применением предлагаемого датчика. Основной выходной информационный параметр датчика – разность частот участков струны – не зависит от внешних влияющих факторов.

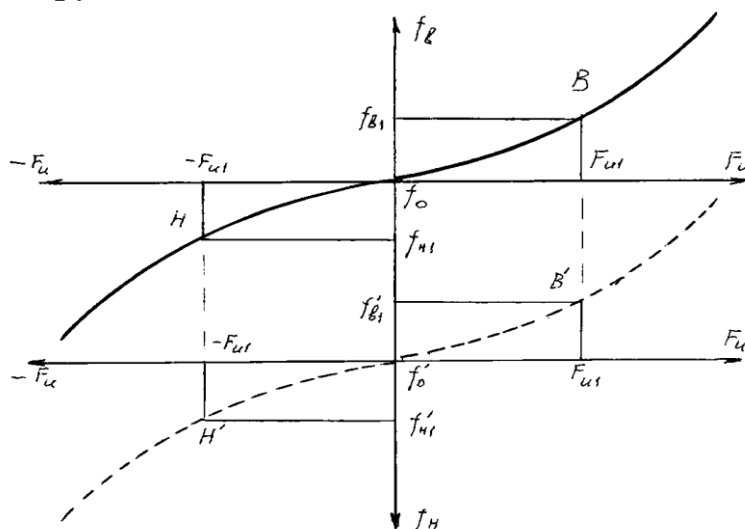


Рис. 4.11. Расчетная схема

Обратимся к случаю измерения растягивающей силы F_u . Применительно к рис. 4.6 направление растягивающей силы снизу вверх. Алгебраическое сложение сил показывает, что в этом случае текущее натяжение верхнего участка струны равно

$$F_g = F_o - F_u, \quad (4.26)$$

а нижнего участка

$$F_n = F_o + F_u. \quad (4.27)$$

Соответственно для случая растягивающей измеряемой силы частоты участков составляет

$$f_B = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_o + F_u}{ml}}, \quad (4.28)$$

$$f_H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_o - F_u}{ml}}. \quad (4.29)$$

Для случая растягивающей силы разность частот ($f_B - f_H$) окажется отрицательной.

Если выполнить графическое построение, то в первом квадранте будет график функции преобразования нижнего участка струны, а в третьем – верхнего. Аналогичная картина будет для случая наличия внешних возмущающих факторов, логический вывод на достоверности результата измерения окажется таким же, как в случае сжимающей силы.

Сопряжение с датчиком устройство обработка первичной информации будет отражать на своем индикаторе величину (модуль) измеряемой силы и направление, например знаком плюс для сжимающей силы, а минус для растягивающей.

Пользуются предлагаемым датчиком силы следующим образом. Базируют датчик на объекте исследования таким образом, чтобы консольная часть передающего рычага 27 контактировала с элементом силы исследуемого объекта. Крепят датчик на объекте с использованием резьбовых отверстий 6, 7 основания 1. Присоединяют к электрическому разъему 44 кабель связи с устройством преобразования информационного сигнала датчика. Включают электропитание и производят измерение.

Таким образом, предлагаемый датчик силы дифференциального типа позволяет получить достоверную первичную информацию как о модуле, так и о направлении измеряемой силы. Форма информации в

виде разности частот колебаний участков струны минимизирует влияние внешних возмущающих факторов. Измерение производится при малых перемещениях источника силы. За счет сравнительно высоких частот колебаний реализуется необходимое быстродействие. Конструкция датчика силы образована из простых по форме и высокотехнологичных деталей, что предполагает низкую себестоимость.

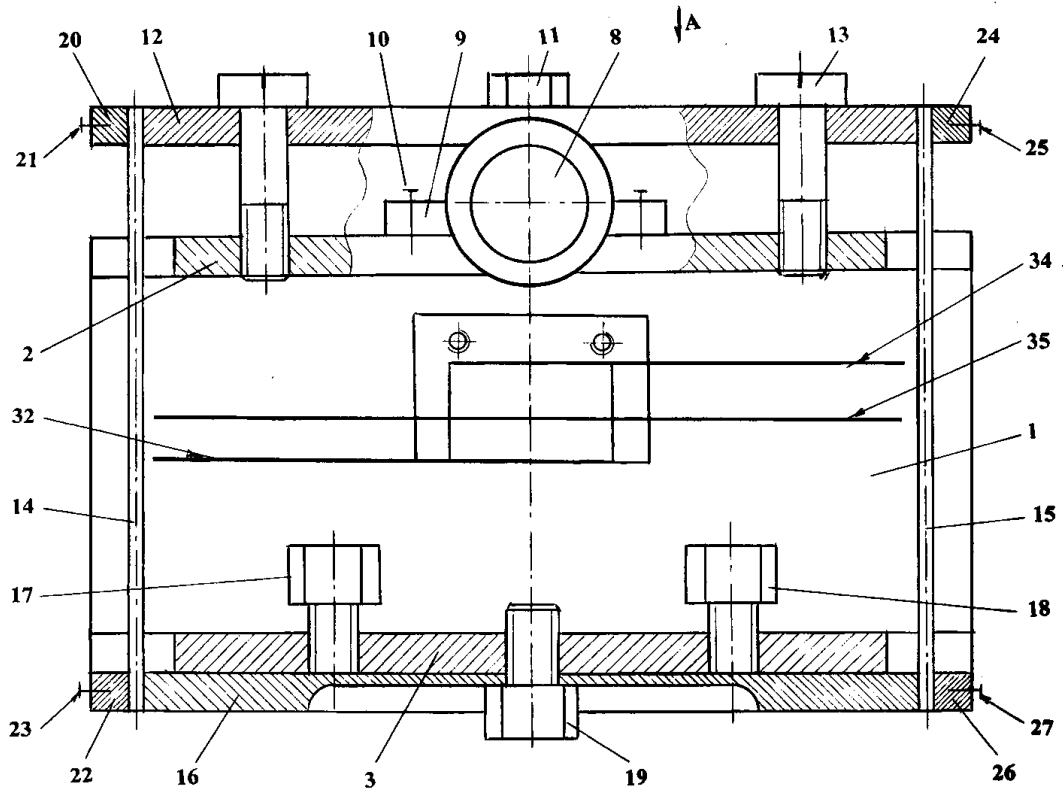


Рис. 4.12. Общий вид датчика

Рассмотрим еще один пример использования струн в автоколебательном режиме для измерения крутящего момента.

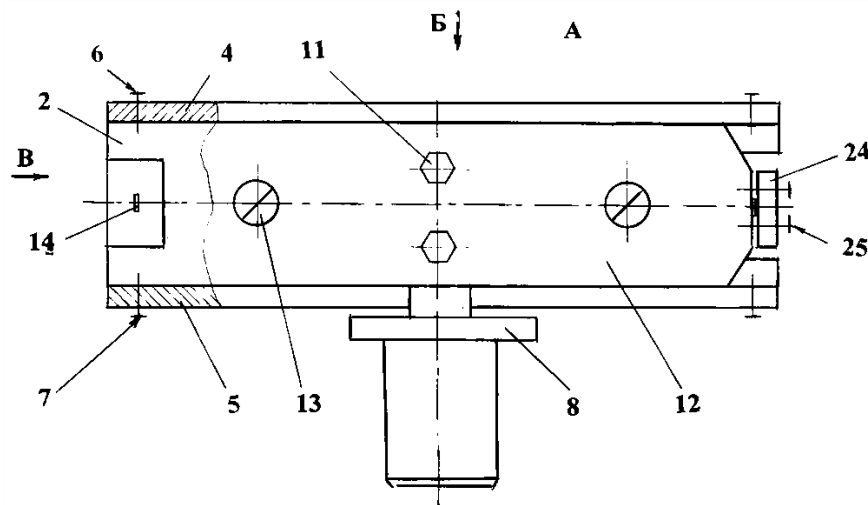


Рис. 4.13. Вид А по рис. 4.12

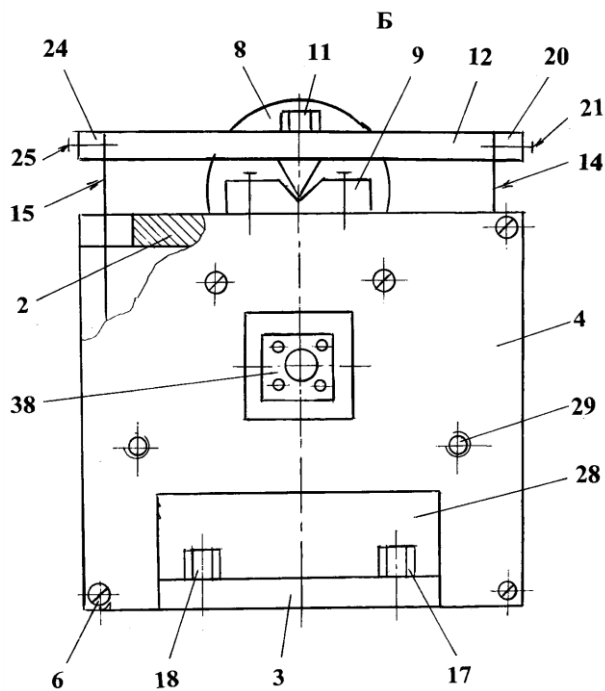


Рис. 4.14. Вид Б по рис. 4.13

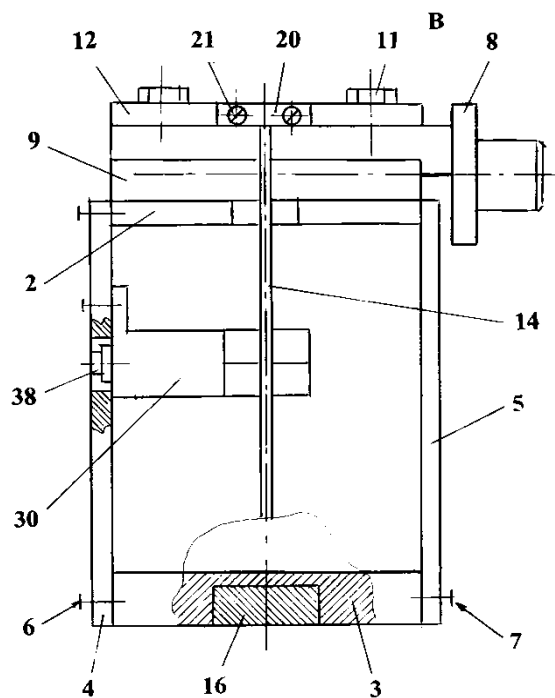


Рис. 4.15. Вид В по рис. 4.13

Корпус 1 датчика коробчатого типа; в его состав входят верхняя плита 2, нижняя плита 3 и боковые стенки 4,5. Соединение элементов корпуса осуществляется группой винтов 6,7.

В корпусе посредством подшипникового узла установлен вал 8. Подшипниковый узел выполнен в виде призматической опоры. Вал 8 (рис. 4.16) выполнен из ступенчатой заготовки, на его конце образована внешняя часть опоры. Внутренняя часть опоры выполнена на опорной пластине 9, которая винтами 10 закреплена на верхней плите 2 корпуса. При выполнении призматической опоры необходимо обеспечить малый радиус притупления рабочего ребра внешней части и несколько больший радиус впадины внутренней части. При этом условии в опоре не будет трения скольжения, а будет трение качения.

С применением резьбовых отверстий вала (рис. 4.16) на нем винтами 11 закреплен равноплечий рычаг 12. Для удобства выполнения монтажных работ предусмотрены технологические (съёмные) винты 13, которые входят в отверстия рычага 12 и фиксируются посредством резьбы на верхней плите 2.

Торцовые поверхности равноплечего рычага являются элементами связи с преобразователем угла поворота вала в электрический сигнал. Основу этого преобразователя составляют две струны 14, 15, которые выполнены из ленточных заготовок прямоугольного сечения

из магнитопроводного материала. Для обеспечения работы струн в характерном для них частотном диапазоне предусмотрена упругая балка 16. Упругая балка размещена в пазу нижней пластины 3 корпуса. Средняя часть балки за счет пониженного сечения имеет упругий (пружинный) участок. Рабочая (деформированная) форма балки определяется двумя опорными винтами 17, 18 и крепежным винтом 19. Струны закреплены на торцовых поверхностях равноплечего рычага и упругой балки однотипно: струна 14 посредством накладки 20 и винтов 21 – на равноплечем рычаге, с помощью накладки 22 и винтов 23 – на упругой балке, соответственно струна 15 с помощью накладки 24 и винтов 25 закреплена на равноплечем рычаге, а с помощью накладки 26 и винтов 27 на упругой балке. Для удобства операции сборки и юстировки в боковой стенке 5 предусмотрено технологическое окно 28. Крепление датчика на объекте исследования осуществляется за резьбовые отверстия 29.

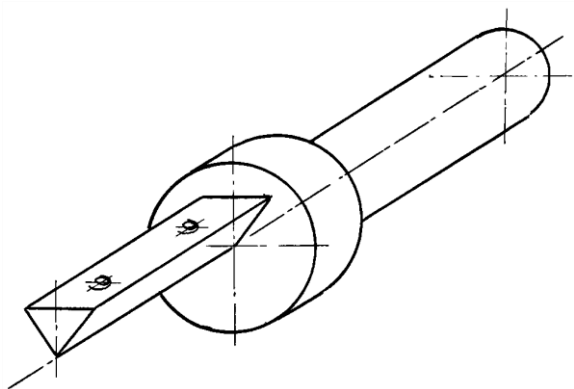


Рис. 4.16. Форма вала

Предусмотрен режим автоколебаний струн. Системы возбуждения автоколебаний струн независимы, но конструктивно основные элементы обеих систем смонтированы на общем кронштейне 30 в виде сборочной единицы «Кронштейн системы возбуждения автоколебаний» – рис. 4.17. Имеется блок магнитной цепи. Для одной струны в него входят плоские магнитопроводы 31, 32 и намотанная на

каркас бифилярная (в два провода) электрическая катушка 33. Соответственно для другой струны – магнитопроводы 34, 35 и катушка 31. Магнитопроводы 31 и 35 выполнены в виде единой детали. Через отверстия в магнитопроводах и каркасах катушек пропущена магнитопроводная стяжка 37, объединяющая указанные элементы. Кронштейн 30 выполнен из диэлектрического немагнитопроводного материала, имеет крепежные резьбовые отверстия, его передняя часть имеет форму разновысокой вилки. Блок магнитной цепи размещен на вилочной части кронштейна и закреплен винтами 38.

Каждая электрическая катушка входит в состав схемы формирования импульсов привода (СФИП) – рис. 4.18. Элементы обеих СФИП (два транзистора, два резистора и два конденсатора) методом навесного монтажа установлены на кронштейне 30 (на чертеже не показано) и соединены монтажными проводами с электрическим разъемом 38. Рассмотренная сборочная единица винтами 39 закреплена на стенке 4 корпуса.

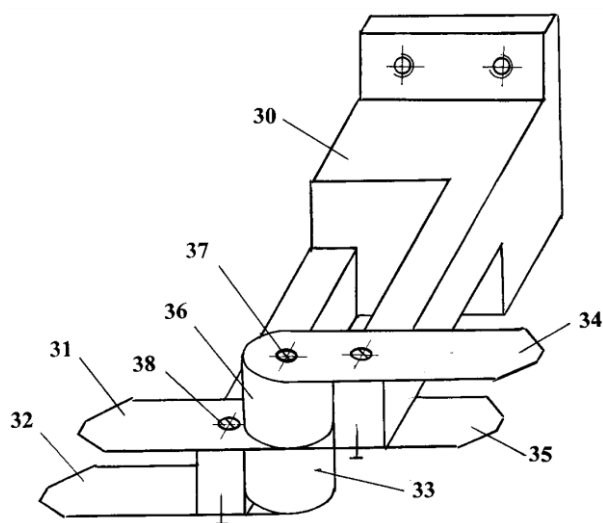


Рис. 4.17. Конструкция сборочной единицы «Кронштейн системы возбуждения автоколебаний»

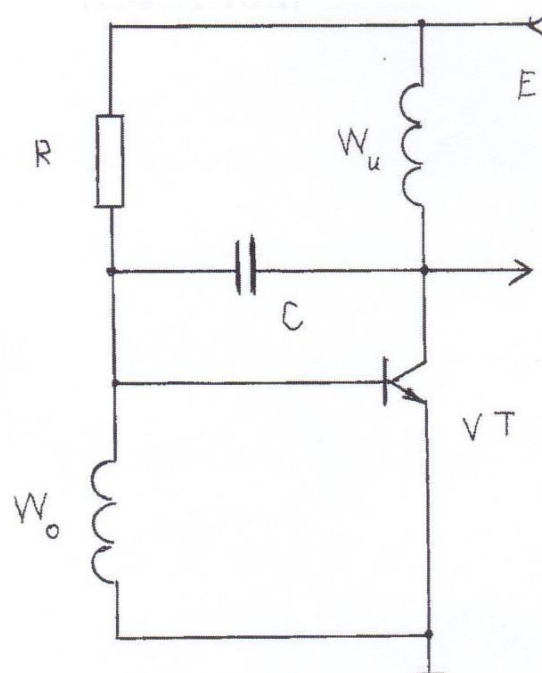


Рис. 4.18. Схемы формирования импульсов привода

Схема формирования импульсов привода выполнена на биполярном транзисторе VT, эмиттер которого соединен с общей шиной. Она содержит резистор R и конденсатор C, первые выводы которых подключены к базе транзистора. Резистор R предназначен для смещения рабочей точки транзистора в середину его активной области, а конденсатор C – для сбоя высокочастотной генерации. Первая секция электрической катушки (катушка освобождения W_0) блока магнитной цепи включена между базой транзистора и эмиттером. Первый вывод второй секции электрической катушки (катушка импульса W_u) и второй вывод резистора подключены к шине электропитания E, а второй вывод катушки W_u и второй вывод конденсатора подключены к коллектору транзистора с образованием выходной шины.

Системы возбуждения автоколебаний струн работают автономно. При включении электропитания E фронтом тока в катушках блока магнитной цепи создается магнитный импульс по цепи – магнитопроводная стяжка 37 – плоские магнитопроводы – зазоры – струна. Взаимодействие поля с магнитопроводной струной обеспечивает ее смещение. Далее начинающиеся колебания струны модулируют магнитный поток ϕ и в катушках индуцируется ЭДС. ЭДС катушки возбуждения e_0 имеющей ω_{0B} витков равна

$$e_0 = -\omega_{0B} \frac{d\phi}{dE}, \quad (4.30)$$

Положительной полуволной ЭДС открывается транзистор и по катушке W_u проходит импульс тока компенсирующий потери энергии струны.

Таким образом, датчик структурно представляет собой две автоколебательные системы, построенные на одинаковых струнах, заделки которых смещены от осевой линии вала на одинаковое расстояние, равное плечу рычага 12.

При сборке датчика посредством винтов 17, 18, 19 обеспечивают расчетное значение начальных частот струн. Заметим, что при этом равенство начального натяжения обеспечивается автоматически. Из уравнения равнодействующих сил, приведенных на ось вращения следует, что возможное неравенство приведет к изменению исходного фазового положения вала. Но исходное фазовое положение вала не влияет на точность измерения. Указанное обстоятельство снижает трудоемкость первичной настройки, т.е. повышает технологичность.

Начальные частоты струн равны

$$f_{14}^0 = f_{15}^0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_0}{ml}}, \quad (4.31)$$

где m, l – соответственно масса и длина струны;

F_0 – сила предварительного натяжения.

Приложим к валу 8 внешний (измеряемый) крутящий момент M . Примем направления момента M против часовой стрелки (ориентация по рис 4.12).

Текущее натяжение составит

$$F_{14} = F_0 - \frac{M}{l_{12}}; \quad (4.32)$$

$$F_{15} = F_0 + \frac{M}{l_{12}},$$

где l_{12} – плечо равноплечего рычага 12.

Соответственно, текущее значение частот будет равно

$$f_{14} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_{14}}{ml}}; \quad (4.33)$$

$$f_{15} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F_{15}}{ml}}; \quad (4.34)$$

Искомое значение крутящего момента может быть получено совместным решением уравнений (4.33), (4.34) или через разность квадратов частот

$$M = 2ml l_{12} (f_{14}^2 - f_{15}^2), \quad (4.35)$$

Как показывают приведенные формулы при смене направления измеряемого момента M изменится знак разности, т.е. входной сигнал датчика несет информацию как о величине (модуле) крутящего момента, так и о направлении.

Обратимся к влиянию внешних возмущающих факторов. К ним относятся: температура, старение материала, эффект «выползания» струны из заделки. Эти факторы влияют одинаково на обе струны и их влияние приводит к изменению начального натяжения F_0 и соответственно к одинаковому смещению начальных частот – формула (4.31). Важно то, что при этом разность частот остается неизменной. Этим фактом подчеркиваются высокие помехоустойчивость и точность измерения, в широком смысле высокая технологичность конструкции, поскольку нет необходимости вводить компенсирующие цепи.

Пользуются датчиком крутящего момента следующим образом. С помощью резьбовых отверстий 29 корпуса 1 закрепляют датчик на объекте исследования и обеспечивают кинематическую связь с валом 8 датчика. Через электрический разъем 38 подводят электропитание уровня Е. Проводят эксперимент. Результаты эксперимента получают на соответствующих контактах электрического разъема 38 датчика.

Таким образом, предлагаемый датчик крутящего момента высокотехнологичен. Конструкция датчика содержит малое количество простых по форме деталей, что обеспечивает низкие трудозатраты на изготовление, обслуживание и метрологическую аттестацию. Дифференциальная схема построения преобразователя угла поворота вала в электрический сигнал реализует высокую помехоустойчивость.

Глава 5 ДРУГИЕ УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

5.1. Торсионы

Торсионом называют участок вала или отдельную вставку, которые работают на кручение. Торсион в составе чувствительного элемента преобразует крутящий момент в угол закручивания. При конструировании измерительных преобразователей на основе торсионов важно исключить влияние изгибающих моментов.

Рассмотрим конструкцию устройства для измерения крутящего момента [29].

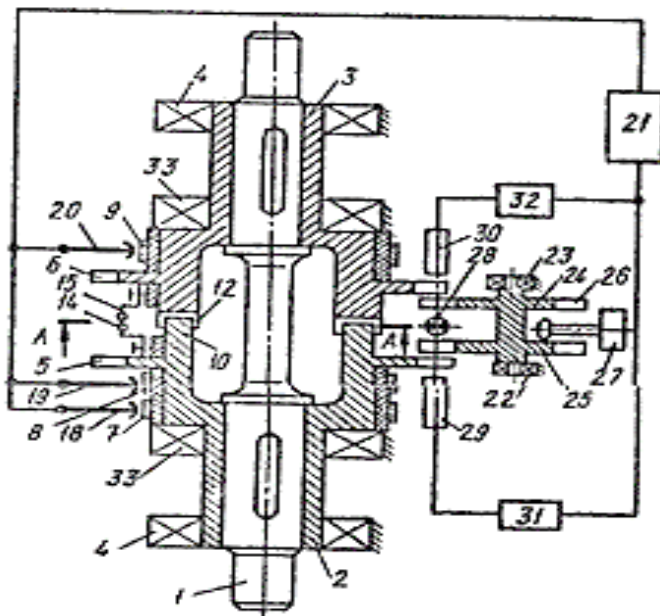


Рис. 5.1. Конструктивная схема измерителя

Устройство содержит торсионный вал 1, на котором закреплены втулки 2 и 3 с подшипниками 4 (рис. 5.1). Последние установлены в корпусе измерителя (не показан). Втулки 2 и 3 содержат зубчатые диски 5 и 6 и электроизолированные кольца 7-9, а по торцам – диаметрально расположенные в форме кольцевых секторов выступы 10 и 11 – на втулке 2 и 12 и 13 – на втулке 3. При этом выступы одной втулки входят во впадины

второй, образуя угловой зазор δ (рис. 5.2), равный допустимому углу закручивания торсионного вала.

Выступы 10-13 втулок 2 и 3 несут контакты 14, 15 и 16, 17. При этом контакт 14 подключен к кольцу 7, контакты 15 и 16 – к кольцу 9. К кольцам поджаты токосъемные щетки 18-20. На параллельной торсионному валу оси в подшипниках 22 и 23 установлен модулятор 24 с зубчатыми дисками 25 и 26, имеющий электропривод 27 с фрикционной связью.

Внутри зубцовых зон дисков расположен осветитель 28, а снаружи – два фотоприемника 29 и 30, подключенных через усилители 31 и 32 к регистратору. Контакты 14-17 образуют переключающую группу электрических контактов, позволяющую определять предельную угловую деформацию торсиона каждого знака. Торсионный вал 1 снабжен дополнительными подшипниками 33.

При передаче крутящего момента от двигателя к нагрузке торсионная часть вала закручивается. При этом происходит относительный поворот втулок 2 и 3 вместе с зубчатыми дисками 5 и 6. Модулированный световым потоком осветителя 28 воспринимается фотоприемниками 29 и 30, где образуются сдвинутые по времени последовательности электрических импульсов. Эти импульсы через усилители 31 и 32 поступают на регистратор 21. Величина фазового сдвига импульсов пропорциональна передаваемому моменту. Если угол деформации торсионного вала 1 достигает величины δ , то происходит замыкание контактов 14-15 либо 16-17. Сигнал об этом через кольца щетки 18-20 подается на регистратор 21. При этом передаваемый крутящий момент воспринимается выступами 10, 11 и 12, 13 втулок 2 и 3 и передается на торсионный вал 1. Изгибающий момент как со стороны двигателя, так и со стороны нагрузки воспринимается соответствующей парой подшипников 4 и 33, расположенной на одной втулке, и на торсионный вал не передается.

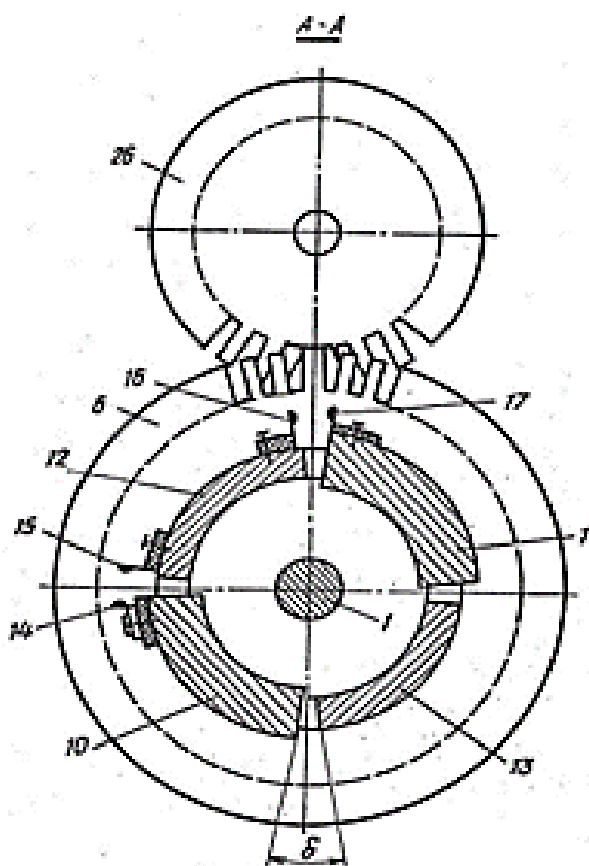


Рис. 5.2. Разрез А-А по рис 5.1

Приведенная на рис. 5.1-5.2 конструкция показывает, что момент инерции вращающихся частей крутящего момента мал.

Приведенная на рис. 5.1-5.2 конструкция показывает, что момент инерции вращающихся частей крутящего момента мал.

5.2. Плоские пружины

Отличительной чертой плоских пружин является простота формы и высокая технологичность. Их применение весьма разнообразно. В разделе 2.3 показан ленточный шарнир в качестве преобразователя крутящего момента в угол поворота. Такую же функцию выполняют плоские пружины в датчике крутильных колебаний [16] и моментомере для статических [20].

Рассмотрим использование плоской пружины в устройстве для измерения крутящего момента на вращающихся валах [18].

В корпусе 1 с помощью подшипников 2, 3 установлены два полувала 4, 5 (рис. 5.3). Имеется центральный подшипник 6, который размещен в расточке полувала 5 с внутренней стороны и соединен с цапфой полувала 4. Полувалы 4, 5 снабжены зубчатыми дисками 7, 8. В центральной части полувала 4 с помощью накладки 9 и винтов 10 закреплена своей средней частью плоская пружина 11 (торсионная часть вала). На рис. 5.4 зона установки накладки для наглядности условно повернута. На зубчатом диске 8 полувала 5 выполнены два выступа 12, 13. На торцевой поверхности выступов 12, 13 установлены по два подшипника качения (шарикоподшипники), соответственно 14, 15 и 16, 17. Каждый подшипник 14-17 установлен посредством ступенчатого штифта 18. Эти штифты

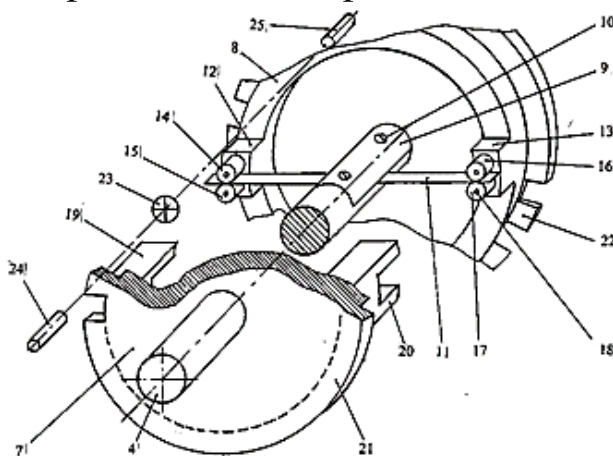


Рис. 5.3. Кинематическая схема

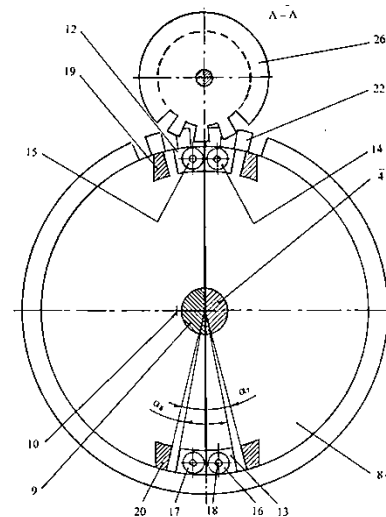


Рис. 5.4. Осевой разрез
моментомера

запрессованы в выступы 12, 13 до упора ступенчатой частью, а подшипники 14-17 установлены с натягом по внутреннему кольцу на выступающей части штифтов 18. Концы плоской пружины 11 размещены между наружными кольцами с некоторым натягом. Две поверхности выступов 12, 13 выполнены плоскими в радиальном направлении и образуют угол α_8 .

В целом, вал устройства составляют два полувала 4, 5 и сменная торсионная часть в виде плоской пружины 11. Плоская пружина изготавливается из закаленной плоской заготовки и в дальнейшем термообработке не подлежит. Для взаимодействия с выступами 12, 13 на зубчатом диске 7 предусмотрены выступы 19, 20. Эти выступы имеют радиальные пазы с углом α_7 , при этом осевая длина паза такова, что обеспечивается взаимодействие выступов 12, 13 пазами выступов 19, 20 по плоским граням, которые соответствуют углам α_7 и α_8 . Таким образом, в нештатной ситуации, когда измеряемый крутящий момент превысит допустимые пределы деформация торсионной части вала (пружины 11) не превысит углового зазора γ

$$\gamma = \frac{1}{2}(\alpha_7 - \alpha_8). \quad (5.1)$$

Преобразование деформации пружины 11 в электрический сигнал осуществляется оптическим каналом. Для этого на дисках 7, 8 выполнены одинаковые зубцовые зоны 21, 22, между которыми размещен источник света 23, а снаружи — на общей осевой линии два фотоприемника 24, 25, например, фотодиоды. В процессе вращения при нулевом крутящем моменте (плоская пружина 11 недеформирована) на фотоприемниках 24, 25 формируются одинаковые последовательности прямоугольных электрических импульсов. При появлении крутящего момента плоская пружина 11 изгибается и появляется фазовый сдвиг зубцовых зон дисков, что приводит к временному сдвигу последовательностей импульсов фотоприемников. Измеряемый крутящий момент пропорционален величине относительного временного сдвига последовательностей импульсов фотоприемников

$$M = D \frac{\Delta T}{T}, \quad (5.2)$$

где D — жесткость плоской пружины 11 на кручение;

T — период последовательностей импульсов фотоприемников;

ΔT — временной сдвиг.

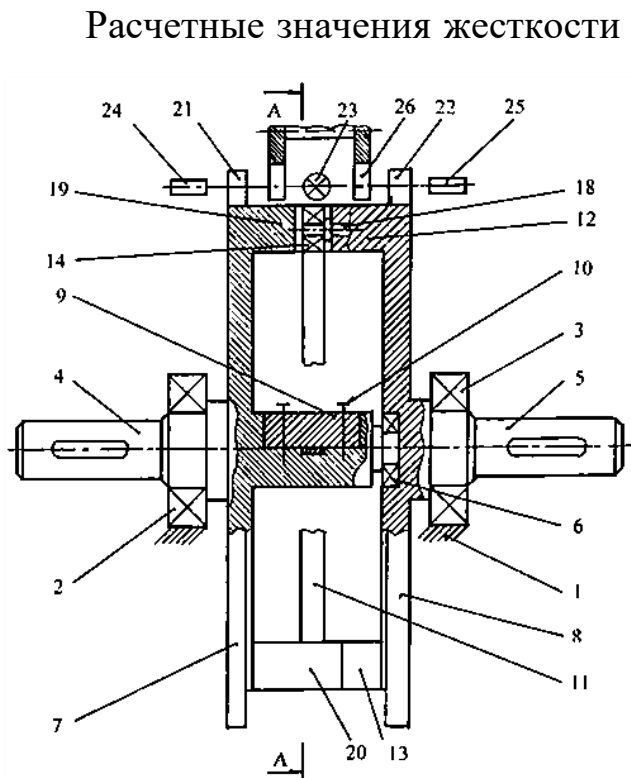


Рис. 5.5. Разрез А-А по рис. 5.4

Расчетные значения жесткости D при юстировке устройства получают шлифованием торцов плоской пружины, уменьшая ее ширину. Для статических измерений и метрологической аттестации устройства для измерения крутящего момента предусмотрен модулятор светового потока источника света. На рис. 5.5 модулятор представлен зубчатым ротором 26, который приводится во вращение от независимого привода.

В случае применения устройства для измерения крутящего момента, когда диссипативные потери энергии источника крутящего мо-

мента (двигателя) и потребителя (тормоза) малы в системе могут возникнуть колебания на частоте резонанса

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{I}}, \quad (5.3)$$

где I – обобщенный момент инерции.

$$I = \frac{I_{дв} * I_{т}}{I_{дв} + I_{т}}, \quad (5.4)$$

здесь $I_{дв}$, $I_{т}$ – соответственно, момент инерции двигателя и тормоза.

В предлагаемом устройстве частично демпфирование колебаний осуществляется за счет потери энергии в подшипниках 2, 3, 6 вала. Дополнительное демпфирование можно увеличить увеличением натяга сопряжения концов плоской пружины 11 с внешними кольцами пар 14-15 и 16-17 подшипников качения.

Работает устройство для измерения крутящего момента следующим образом. При исследовании двигателя предлагаемое устройство устанавливает в разрыв кинематической цепи двигатель-тормоз. В процессе вращения, если крутящий момент двигателя не равен нулю, происходит деформация торсионной части вала (плоской пружины 11),

что приводит к фазовому сдвигу зубцовых зон 21, 22 дисков 7, 8. Модулированный световой поток источника света 23 формирует на фотоприемниках 24, 25 последовательности электрических импульсов, сдвинутых одна относительно другой на величину ΔT . Вторичный прибор преобразует это в значение измеряемого параметра по формуле (5.2).

Таким образом, предлагаемое устройство для измерения крутящего момента высокотехнологично за счет конструктивной простоты. Настройка устройства осуществляется уменьшением ширины плоской пружины путем шлифования, что не предусматривает процессов термообработки. Съем и установка плоской пружины не требует полной разборки устройства.

5.3. Винтовые пружины

Винтовые пружины разных видов – цилиндрические, конические из проволоки преимущественно круглого сечения используются прежде всего для замыкания силовых цепей. Применительно к измерительным преобразователям нашли применение цилиндрические винтовые пружины, работающие на кручение [8]. Такой вариант позволяет получить большую чувствительность по сравнению с торсионами.

Рассмотрим применение цилиндрической винтовой пружины для измерения сравнительно малых крутящих моментов [22].

Конструктивно установка для испытаний пружинных двигателей выполнена из двух блоков – первичного и электронного, которые соединены электрическим кабелем.

Элементы первичного блока смонтированы в корпусе, составленном из двух вертикальных пластин 1, 2 (здесь и далее ориентация чертежа) и трех горизонтальных – 3, 4, 5 (рис. 5.6). Испытываемый пружинный двигатель 6 устанавливается сверху в отверстие пластины 3 через переходник 7. Переходник представляет собой втулку со ступенчатым отверстием – малый диаметр отверстия соответствует диаметру барабана пружинного двигателя, а большой – диаметру выступов зубцовой зоны. В переходнике выполнены глухие отверстия 9 для взаимодействия с фиксатором. Фиксатор представляет собой плоскую пружину

10, один конец которой по ходовой посадке через шайбу 11 развальцовкой установлен на стойке 12 верхней пластины корпуса, а на консольном конце пластины закреплен стопор 13.

Нагрузочное устройство представлено реверсивным электродвигателем 14 (например, серии РД) и редуктором – см. рис. 5.7, рис. 5.8.

Связь вала пружинного двигателя с валом нагрузочного устройства (выходным валом редуктора) осуществляется через промежуточный вал. Промежуточный вал выполнен составным.

Имеется верхняя жесткая часть – полувал 15 и нижняя жесткая часть – полувал 16.

Эти две части соединены амортизирующей передачей в виде винтовой пружины 17, работающей на кручение. Крепление концов пружины на полувалах тискового типа в составе накладок 18, 19 и винтов 20, 21. Полувалы установлены в пластинах корпуса посредством подшипников 22, 23.

Внешние кольца подшипников поджаты шайбами 24, 25 с винтами 26, 27. На хвостовике полувала 15 закреплена промежуточная втулка 28 имеющая квадратное отверстие для стыковки с квадратным хвостовиком вала пружинного двигателя 6.

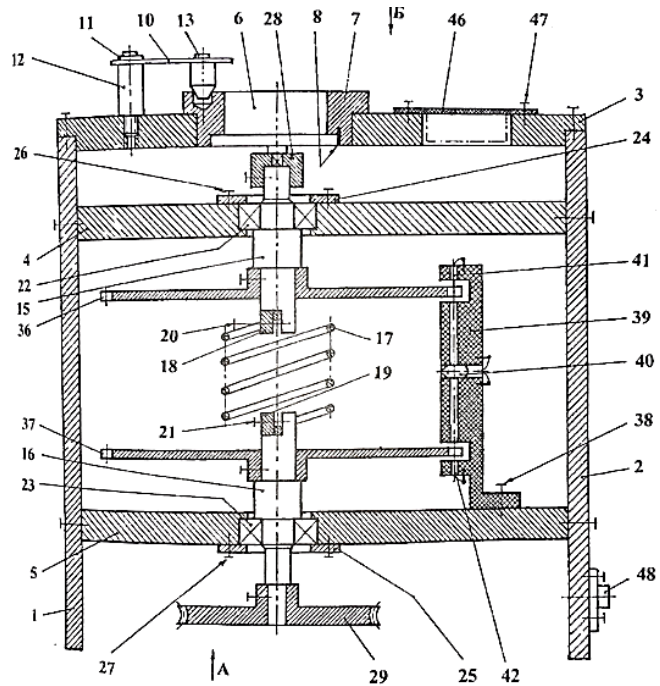


Рис. 5.6. Осевой разрез первичного блока

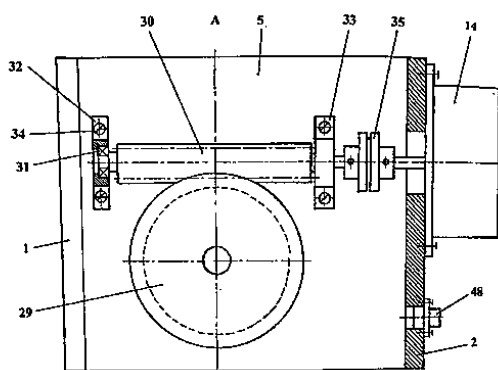


Рис. 5.7. Вид А по рис. 5.6

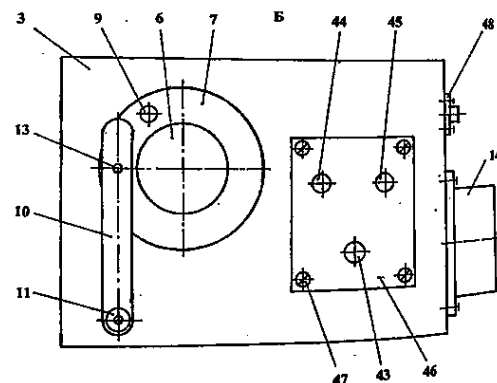


Рис. 5.8. Вид Б по рис. 5.6

Редуктор нагрузочного устройства представлен червячной передачей. На нижнем хвостовике полувала 16 закреплено червячное колесо 29. Червяк 30 установлен с помощью подшипников 31 в кронштейнах 32, 33, последние винтами 34 закреплены снизу на пластине 5 корпуса. Для соединения червяка с валом реверсивного электродвигателя 14 предусмотрена муфта 35.

На промежуточном валу предусмотрены элементы для получения первичной информации о величинах крутящего момента и частоты вращения. На полувалах 15, 16 закреплены светомодулирующие диски 36, 37 имеющие по окружности зубчатые зоны с простым профилем (прямоугольник). Диски закреплены таким образом, что при недеформированной пружине 17 их зубчатые зоны совпадают. Имеется оптический канал. На пластине 5 корпуса винтами 38 закреплен оптический кронштейн 39, содержащий осветитель 40 (например, лампочка НСМ – 9) и два фотоприемника (например, фотодиоды) 41, 42. Общая осевая линия осветителя и фотоприемников пересекает зубцовые зоны дисков.

Для удобства оператора сверху корпуса размещены кнопка «Пуск» 43, индикатор красного свечения «Брак» 44 и индикатор зеленого свечения «Годен» 45, которые закреплены с помощью щитка 46 и винтов 47 на верхней пластине корпуса. Для связи с электронным блоком предусмотрен электрический разъем 48.

Выходными сигналами первичного блока являются две последовательности импульсов фотоприемников 41, 42, которые электронным блоком доводятся до прямоугольной формы. При появлении крутящего момента M пружина 17 деформируется, появляется фазовый сдвиг светомодулирующих дисков, соответственно временной сдвиг ΔT последовательностей импульсов.

Крутящий момент равен

$$M = D \frac{\Delta T}{T}, \quad (5.5)$$

где D – крутильная жесткость пружины 17;

T – период последовательности импульсов одного фотоприемника.

Абсцисса α характеристики двигателя (рис. 5.9) может быть определена как сумма угловых шагов одного светомодулирующего диска

$$\alpha = N \cdot \alpha_{ш}, \quad (5.6)$$

где $\alpha_{ш}$ – угловой шаг зубцовой зоны диска.

При постоянной частоте вращения ω промежуточного вала, которую задает реверсивный электродвигатель 14, получим временной шаг

$$t_{ш} = \frac{\alpha_{ш}}{\omega}. \quad (5.7)$$

Изготовителем пружинных двигателей задаются номинальные значения крутящего момента в трех контрольных точках характеристики (рис. 5.9):

- номинальное значение крутящего момента пружинного двигателя в нижней точке линейного участка M_H^0 при фазовом положении угла поворота вала пружинного двигателя α_H ;

- номинальное значение крутящего момента пружинного двигателя в верхней точке линейного участка M_B^0 при фазовом положении угла поворота вала пружинного двигателя α_B ;

- предельное значение крутящего момента в конечной точке характеристики (момент затяжки) $M_{пред}$ при фазовом угле поворота вала $\alpha_{пред}$.

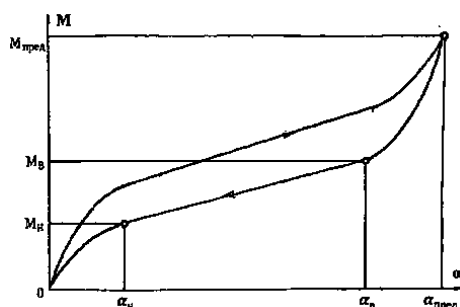


Рис. 5.9. Характеристика пружинного двигателя с обозначением точек контроля

Испытываемый пружинный двигатель признается годным, если

$$M_H > M_H^0; \quad (5.8)$$

$$M_B > M_B^0. \quad (5.9)$$

Значения параметров номинальной характеристики пружинного двигателя задаются в техническом описании на установку для испытаний в форме кодов.

Электронный блок предназначен для проверки условий (5.8), (5.9). Структурно электронный блок содержит:

- канал крутящего момента для установки исходных данных и выявления текущего значения (канал M);

- канал угла поворота для установки исходных данных и выявления текущего значения (канал α);

- канал результата для сравнения исходных данных с фактическим (текущим) значением и для индикации результата (канал R);

- канал управления для управления процессом испытаний (канал У) (рис. 5.10).

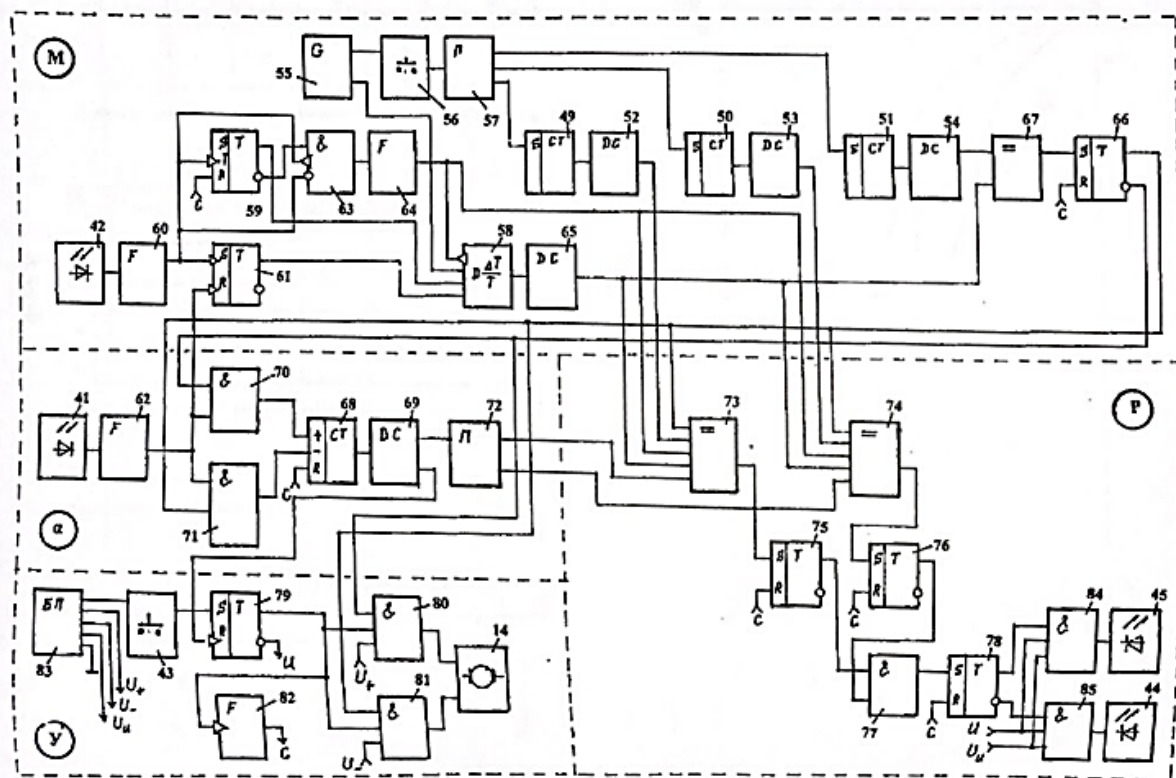


Рис. 5.10. Функциональная схема электронного блока

Канал М содержит счетчики 49, 50 и 51 для задания, соответственно M_n^0 , M_B^0 , $M_{пред}$ с дешифраторами 52-54. Запись кода в счетчики 49-51 осуществляется импульсами генератора 55 посредством нажатия кнопки 56 с использованием переключателя 57, этим же переключателем к выходам дешифраторов 52-54 подключается цифровой индикатор (на чертеже не показан). Для выявления текущего значения крутящего момента по формуле (5.5) имеется вычислитель 58. Примем в качестве вычислителя микропроцессор низкого уровня, который имеет флеш-память для записи кода жесткости D и регистр результата с параллельным кодом. Значение периода T формируется счетным триггером 59 по сигналам формирователя 60, связанного с фотоприемником 42. Длительность фазового сдвига формируется RS-триггером 61, который управляется фронтами импульсов формирователей 60 и 62, последний соединен с фотоприемником 41. Цикл работы электронного блока двухтактный. На первом такте (единое значение триггера периода 59) происходит запись значений T и ΔT во входные регистры вычислителя 58, окончание записи соответствует срезу единичного им-

пульса триггера 59. Такт вычислений задается соответствующим выходом генератора 55. Цепь сброса регистров вычислителя подготовлена конъюнктом 63 с формирователем 64. Короткий импульс сброса соответствует срезу импульса формирователя 64. Состояние выходного регистра вычислителя преобразуется в позиционный код дешифратора 65. Как следует из изложенного, вычисление текущего значения крутящего момента происходит на втором такте электронного блока. Начало вычислений соответствует срезу импульса триггера 59, а окончание определяется частотой генератора 55. Канал М содержит триггер реверса 66 управляемый схемой сравнения 67.

Канал α в своей основе содержит реверсивный счетчик 68 с дешифратором 69. Управление реверсивным счетчиком осуществляется через конъюнкты 70, 71 по сигналам формирователя 62 нагрузки. Для установки значений α_n , α_v служит переключатель 72.

Канал Р содержит схемы сравнения 73, 74, RS-триггеры 75, 76, конъюнкты 77 и триггер 78 результата. Состояние триггера через конъюнкты 84, 85 транслируются на светодиодные индикаторы 45 «Годен», 44 «Брак» первичного блока.

Канал У адресован оператору. Органом управления является кнопка 43 «Пуск» на первичном блоке. Этой кнопкой устанавливается в единичное состояние триггер управления 79. Посредством этого триггера через конъюнкты 80 завода и 81 спуска реализуется подключение электропитания электродвигателя 14. Триггер управления фронтом запускает формирователь 82 сброса, который формирует короткий импульс на шину сброса С электронного блока. Имеется блок питания 83 с тумблером и индикатором включения. Блок питания обеспечивает уровень Е питание микросхем, уровень U_u питания индикаторов результата 44, 45 и уровень U_+ питания электродвигателя при заводе, U_- — при отпуске испытываемого пружинного двигателя. Имеется типовая (на чертеже не показана) цепь сброса первичного включения электропитания. Дискретное преобразование характеризуется абсолютной погрешностью в один импульс, поэтому при переходе от функциональной схемы на принципиальную следует либо в цепях задания, либо в цепях управления расчетный вывод дешифраторов объединять с предыдущим и последующим. При больших емкостях счетчиков и регистров относительная погрешность будет малой.

Рассмотрим работу электронного блока. Перед началом испытаний устанавливаются номинальные значения паспортных параметров пружинного двигателя в форме кодов:

– коды значений $M_{\text{н}}^0$, $M_{\text{в}}^0$, $M_{\text{пред}}$ записывают по цепи генератор 55, кнопка 56, переключатель 57, счетчики 49, 50, 51. Переключателем 57 последовательно подключают входы счетчиков, одновременно к выходам их дешифраторов подключается цифровой индикатор. Нажатием кнопки 56 заполняют счетчики до табличных значений. Используют низкочастотный выход генератора 55, например, 1 Гц;

– коды значений $\alpha_{\text{н}}$, $\alpha_{\text{в}}$ устанавливают двойным переключателем 72, тем самым каждому выходному контакту переключателя будет соответствовать «своя» шина дешифратора 69.

При перебросе тумблера «Сеть» на блоке питания 83 в положение включено фронтом реализуется сброс триггеров 59, 61, 66, 75, 76, 78, 79 и счетчика 68.

Процесс испытаний начинается нажатием кнопки 43 «Пуск». При нажатии кнопки триггер управления 79 устанавливается в единичное состояние, что открывает конъюнктор 80 завода и напряжение U_+ поступает на электродвигатель 14, начинается завод пружинного двигателя. Одновременно инверсный выход триггера 79 блокирует электропитание $U_{\text{ц}}$ индикаторов 44, 45 результата через конъюнктуры 79, 80.

В процессе завода пружинного двигателя импульсы формирователя 62 заполняют счетчик 68 через открытый потенциалом триггера реверса 66 конъюнктор 70. Одновременно триггер 66 блокирует срабатывание схем сравнения 73, 74. Канал крутящегося момента M работает одинаково при заводе и спуске пружинного двигателя, поэтому подробнее проследим его работу на спуске. Пока ограничимся тем, что при достижении на выходе вычислителя 58 значения $M_{\text{пред}}$ появляется сигнал (логическая единица) на выходе схемы сравнения 67, который опрокидывает триггер 66 реверса, появляется логическая единица на его прямом выходе. Потенциалом прямого выхода дается разрешение на работу схем сравнения 73, 74 одновременно открывается конъюнктор 81 и электродвигатель 14 реализует спуск пружинного двигателя. На момент срабатывания триггера 66 в счетчике 68 записана количество импульсов, соответствующее углу $\alpha_{\text{пред}}$.

При спуске триггер реверса 66 открывает конъюнктор 71 и импульсы формирователя 62 начинают уменьшать содержимое счетчика 68.

Воспользуемся циклограммой работы. Пусть в некоторый момент времени t_0 начинается импульс формирователя 62, а заканчивается в момент времени t_2 — см. рис. 5.11. Поскольку крутящийся момент неравен нулю, импульс формирователя 60 появляется в момент времени t_1 и заканчивается в момент t_3 . Фронтом импульса U_{62} триггер 59 формирует единичный импульс соответствующий периоду T последовательности U_{62} .

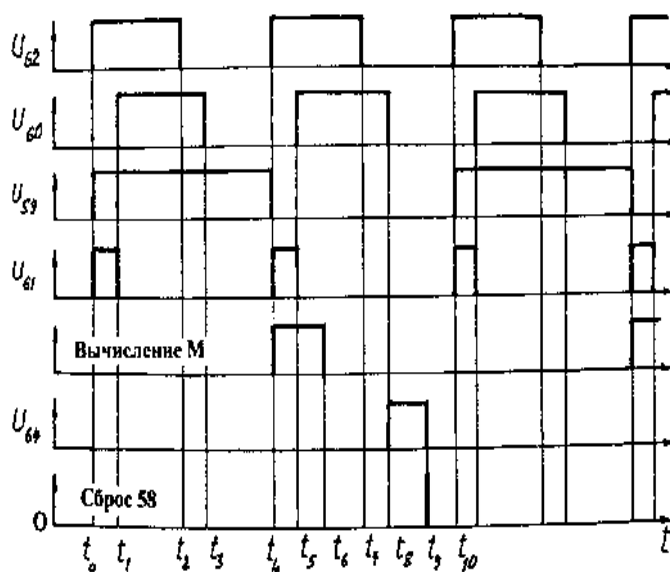


Рис. 5.11. Эпюры напряжений на выходах отдельных элементов функциональной схемы

Сдвиг фронтов импульсов формирователей 60, 62 $\Delta T = t_1 - t_0$ формирует триггер 61. Длительности T и ΔT записываются на входных регистрах вычислителя 58. Срезом импульса триггера 59 начинаются вычисления по формуле (5.5) с тактовой частотой генератора 55 (например, 10 МГц). Вычисления заканчиваются в момент времени t_6 , результат сохраняется на выходном регистре вычислителя в параллельном коде до момента сброса срезом импульса формирователя 64. Время действия импульса U_{64} открываются схемы сравнения 73, 74. Если в момент сравнения возбуждена шина α_v дешифратора 69 и имеет место соотношение кодов крутящего момента (5.7), то на выходе схемы сравнения 74 появляется логическая единица, которая переворачивает триггер 76. Аналогично результат сравнения схемой 73 фиксируется триггером 75. При соблюдении условий (5.8), (5.9) триггер 78 результата окажется в единичном состоянии. Спуск пружинного двигателя будет продолжаться до тех пор, пока не обнулится счетчик 68. Импульсы пулевой шины дешифратора 69 фронтом сбросит триггер 79 управления, который инверсным выходом откроет конъюнктуры 79, 80, что обеспечит высвечивание либо светодиода 44 «Брак», либо — 45

«Годен». Состояние схемы будет сохраняться до очередного нажатия кнопки «Пуск» 43, тогда фронтом триггера 79 короткий импульс формирователя 82 возвратит схему в исходное состояние.

Как следует из вышеизложенного цикл измерения равен периоду последовательности импульсов триггера 59, в обозначениях циклограммы это от t_0 до t_{10} . В первой половине цикла от t_0 до t_4 выявляются первичные параметры T и ΔT , во второй половине цикла от t_4 до t_{10} выполняется вычисление $(t_4 - t_6)$ и сравнение $(t_8 - t_9)$.

Приемочные испытания проводят следующим образом. Устанавливают испытываемый пружинный двигатель 6 в переходнике 7 совмещающая впадину зубчатой зоны со шрифтом 8. Полученную сборку вкладывают в отверстие верхней пластины 3 корпуса первичного блока, совмещая квадратный хвостовик вала пружинного двигателя с квадратным отверстием втулки 28. Поднимая за консольный конец пружины фиксатора 10 стопорят переходник через отверстие 9. Тумблером «Сеть» на электронном блоке включают электропитание установки. Последовательно переводят переключатель 57 в три положения и нажатием кнопки 56 вводят коды крутящих моментов M_n^o , M_v^o и $M_{пред}$, отслеживая их значения по цифровому индикатору. Переключателем 72 устанавливают коды α_n и α_v .

Процесс испытаний начинается нажатием кнопки 43 «Пуск». С этого момента начинается завод пружинного двигателя и обесточиваются индикаторные светодиоды 44, 45. При достижении крутящим моментом значения $M_{пред}$ срабатывает триггер 66 реверса, выходы которого закрывают конъюнктор 80 и открывают конъюнктор 81. Начинается спуск пружинного двигателя. если двигатель удовлетворяет условиям (5.8), (5.9), то последовательно появляются импульсы на выходных схемах сравнения 73, 74, триггеры 75, 76 устанавливаются в единичное состояние, что посредством конъюктора 77 обеспечивает срабатывание триггера 78 результата. Процесс спуска заканчивается обнулением счетчика 68, при этом сбрасывается триггер 79 управления, который инверсным выходом откроет конъюнктор 79, что обеспечит электропитание индикаторного светодиода «Годен».

Для случая бракованного пружинного двигателя одно или оба условия (5.8), (5.9) не соблюдаются, тогда один или оба триггера 75, 76 остаются в исходном состоянии, также в исходном состоянии остается триггер 78 результата, следовательно, открытым окажется конъюнктор

80 и после сброса триггера 79 будет высвечиваться индикаторный светодиод 44 «Брак». Свечение индикаторных светодиодов будет продолжаться до очередного нажатия кнопки 43 «Пуск».

Таким образом, предлагаемая установка для испытаний пружинных двигателей минимизирует трудозатраты на проведение испытаний за счет простых операций монтажа исследуемого пружинного двигателя, автоматизации процесса испытания и выявления результата испытаний. Предлагаемая установка позволяет проводить испытания широкого спектра типоразмеров испытываемых двигателей. Установка конструктивно проста и высокотехнологична. Электронный блок построен на типовых элементах электроники.

5.4. Спиральные пружины

Спиральные пружины, в отличие от винтовых рассмотренных выше, позволяют реализовать большие углы закручивания. Спиральные пружины малых размеров широко применяются в системе баланс-спираль механических часов.

При проектировании системы баланс-спираль в качестве измерительного преобразователя следует иметь в виду, что момент инерции спиральной пружины $\gamma_{\text{п}}$ зависит от угла закручивания φ

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{mr_2^2}{30} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{\varphi}{\mu}\right)^2} + \frac{15}{\mu} \frac{1}{\left(1 + \frac{\varphi}{\mu}\right)^4} \right], \quad (5.10)$$

где m – масса спиральной пружины;

r^2 – внешний радиус;

μ – полный угол.

Таким образом, переменное значение момента инерции спиральной пружины приводит к зависимости частоты колебаний системы баланс-спираль от амплитуды колебаний. Одним из способов стабилизации частоты колебаний является стабилизация амплитуды. Рассмотрим этот способ на примере устройства для измерения моментов инерции деталей [7].

В основе устройства для измерения моментов инерции тел лежит колебательная система (осциллятор), представленная на рис. 5.12 спиральной пружиной 1 и составным инерционным звеном (балансом). На валу 2 баланса с помощью втулки 3 закреплена магнитная система, состоящая из магнитопровода 4 и постоянного магнита 5 осевой намагниченности. Магнитная система уравновешена немагнитопроводным противовесом 6, закрепленном на крыле 7. Ось баланса установлена в подшипниках 8, 9, имеет конический хвостовик 10, на котором посажена платформа 11 для размещения подлежащих измерению тел. На оси баланса также установлена колодка 12 для крепления внутреннего витка спиральной пружины, внешний виток которой закреплен на неподвижной колонке 13.

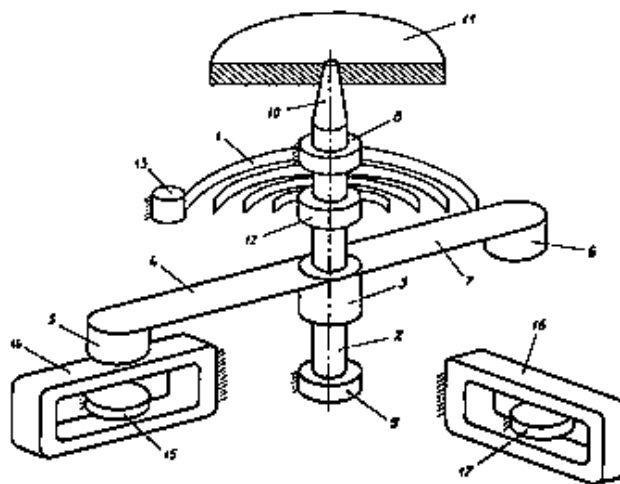


Рис. 5.12. Конструктивная схема устройства для измерения моментов инерции тел

В положении равновесия баланса под магнитом 5 неподвижно размещена кольцевая бифилярная катушка 14. Эта катушка расположена в плоскости вала баланса. В центральной отверстии данной катушки неподвижно и соосно с постоянным магнитом 5 в положении его равновесия закреплен постоянный магнит 15, имеющий такую же намагниченность.

Таким образом, в положении равновесия баланса образуется магнитный зазор, где магнитное поле однородно. Магнитный поток при этом замыкается через магнитопровод баланса, магнитопроводные (стальные) несущие элементы конструкции и вал баланса. В магнитном поле зазора оказывается только одна часть катушки, где направление всех витков одинаково. Заметим, что направление витков на другой половине катушки (вне зазора) имеет обратный знак.

В положении отклонения баланса в одну сторону на расчетную (стационарную) амплитуду колебаний $\Phi_{ст}$, установлена вторая аналогичная по форме, но с одной обмоткой катушка 16. Она ориентирована

по отношению к магниту 5 для этого положения баланса аналогично катушке 14. Подобным же образом внутри окна этой катушки закреплен постоянный магнит 17 осевой намагниченности того же направления.

Рассмотрим движение свободного баланса от одного крайнего положения (Φ_{\max}) до другого ($-\Phi_{\max}$). Будем полагать, $\Phi_{\max} > \Phi_{\text{ст}}$. Для примера можно принять $\Phi_{\text{ст}} = 135^\circ$.

На рис. 5.13 окружностью показано сечение постоянных магнитов: основная линия соответствует сечению магнита 5, пунктирная – сечению магнитов 15, 17. Штрихпунктирная линия отражает траекторию движения центра магнита 5.

Отдельные положения баланса показаны цифрами внутри окружности магнита 5. Катушки 14, 16 изображены в виде прямоугольников, вектором l показано направление витков катушек (той части катушек, которая оказывается в магнитном зазоре).

Знаком $+B$ обозначено направление вектора магнитной индукции поля зазора.

При движении баланса по часовой стрелке (вектор угловой скорости $\dot{\varphi}_n$) от положения 1 до положения 10 взаимодействие поля магнитной системы с витками катушек возможно на участках 2–3 и 5–7. Это взаимодействие обеспечивает в витках катушек появление индукционной ЭДС e . Знак ЭДС определяется векторным произведением $\bar{e} = \bar{V} \bar{I} \bar{\vartheta}$ ($\bar{\vartheta}$ – вектор линейной скорости). При выбранных направлениях движения, витка и поля, пользуясь правилом правой руки, получим направление ЭДС совпадающее с направлением витков l . На рис. 5.14 показана стилизованная форма ЭДС e в функции угла поворота баланса φ . Там же соответствующими цифрами отмечены положения баланса в соответствии с рис. 5.11. При обратном движении ба-

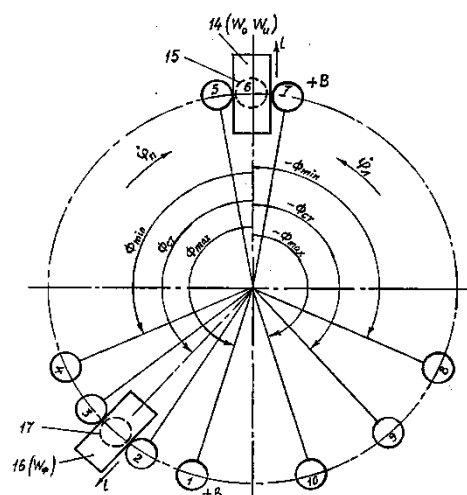


Рис. 5.13. Схема прохождения магнитной системы пути при колебаниях

ланса (направление $\dot{\varphi}_л$) от положения 10 до положения 1 ЭДС в катушках будет возникать на тех же участках, но знак ЭДС изменится на обратный, поскольку изменилось направление вектора скорости. Заметим – если поменять местами выводы катушек (начало - конец), то знаки ЭДС изменятся на обратные.

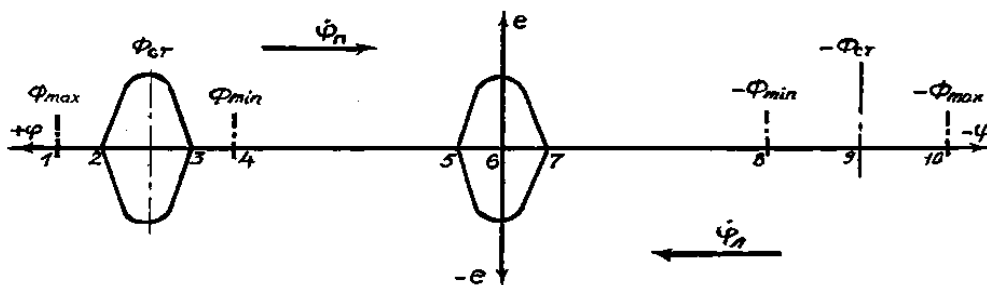


Рис. 5.14. ЭДС в катушках

Появляющиеся в катушках ЭДС являются управляющими сигналами для работы электронной схемы управления приводом рис. 5.15. Будем рассматривать вариант построения на транзисторах проводимости n-p-n.

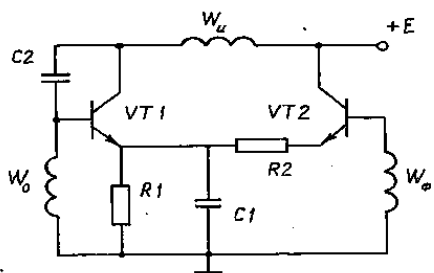


Рис. 5.15. Электрическая принципиальная схема формирования импульсов привода

В случае транзисторов p-n-p следует поменять подключение концов катушек и подключение полюсов источника питания E. На транзисторе VT1 построен электронный ключ, к базе которого подключена обмотка возбуждения W_0 катушки 14, а обмотка импульса W_u этой катушки подключена между коллектором и полюсом +E источника питания. Второй полюс источника питания соединен с общей шиной. Между эмиттером транзистора VT1 и общей шиной включены параллельно соединенные резистор R1 и конденсатор C1. Для срыва возможной высокочастотной паразитной генерации из-за влияния межвитковой емкости катушки 14 между коллектором и базой транзистора VT1 подключен конденсатор C2. Через резистор R2 к эмиттеру VT1 подключен эмиттер транзистора VT2. База транзистора VT2 связана с общей шиной через обмотку W_ϕ (поз. 16 на рис. 5.12 и рис. 5.13), а коллектор соединен с полюсом +E источника питания.

Рассмотрим работу электронной схемы управления приводом. Пусть момент инерции измеряемых тел находится в диапазоне от $I_{u \min}$

до $I_{u \max}$. Общий момент инерции осциллятора будет в пределах $I_{\min} = I_0 + I_{u \min} - I_{\max} = I_0 + I_{u \max}$, где I_0 – собственный момент инерции осциллятора (включая платформу с крепежом для установки измеряемых тел). Стационарной амплитуде колебаний баланса $\Phi_{\text{ст}}$ при I_{\min} , будет соответствовать наибольшая частота колебаний, что обеспечит наибольшее значение ЭДС в катушках e_{\max} , а при I_{\max} будет e_{\min} для той же амплитуды $\Phi_{\text{ст}}$.

Пока баланс неподвижен смещение обоих транзисторов равно нулю. Их исходные рабочие точки на выходных характеристиках будут находиться на границе зоны отсечки и активной области (пренебрегая обратными тепловыми токами в силу их малости) при этом токи баз VT1 и VT2 равны нулю.

При колебаниях на минимальной амплитуде Φ_{\min} будет появляться ЭДС только в обмотках W_0 и W_u . Параметры измерительной автоколебательной системы выбраны таким образом, что амплитудному значению ЭДС e_{\min} в обмотке W_0 соответствует значение тока импульса в обмотке W_u $I_{u \max}$, при этом рабочая точка каскада VT1 смещаясь по нагрузочной прямой не выходит в область насыщения, т.е. рабочая точка остается в активной области транзистора форма тока в обмотке W_u (тока коллектора) будет повторять форму ЭДС в обмотке W_0 (небольшой деформацией вершины тока импульса за счет ЭДС в обмотке W_u пренебрегаем).

При уменьшении величины измеряемого момента инерции I_u растет частота колебаний и ЭДС в обмотках W_0 и W_u , следовательно, растет ток в катушке импульса W_u . Увеличивающаяся энергия импульса увеличивает амплитуду колебаний баланса. Увеличение амплитуды колебаний приводит к тому, что вблизи $\Phi_{\text{ст}}$ появляется ЭДС в катушке W_ϕ . Эта ЭДС открывает транзистор VT2 (каскад с общим коллектором) и его эмиттерный ток в течении импульса ЭДС обмотки W_ϕ заряжает конденсатор C1. Напряжение на конденсаторе C1 является запирающим смещением для каскада VT1, т.е. исходная рабочая точка VT1 перед очередным импульсом привода в катушке W_u оказывается смещенной в область отсечки характеристик транзистора VT1. Поэтому при появлении ЭДС в обмотках W_0 и W_u транзистор VT1 откроется лишь тогда, когда его рабочая точка переместится из зоны отсечки в активную область транзистора. Ток импульса в катушке W_u повторит лишь часть формы ЭДС катушки W_0 . Энергия импульса уменьшится.

В силу достаточно большой постоянной времени системы этот процесс будет происходить на нескольких колебаниях, на все уменьшающихся амплитудах. При каждом импульсе ЭДС в обмотке W_{Φ} будет происходить подзаряд конденсатора $C1$, а в паузах между импульсами – разряд через резистор $R1$. Среднее установившееся значение напряжения на конденсаторе $C1$ обеспечит значение амплитуды в заданных пределах для данного значения измеряемого момента инерции тела.

Процесс нахождения момента инерции измеряемого тела осуществляется в несколько этапов.

Сначала подготавливают платформу 11 – устанавливают элементы базирования и крепления измеряемой детали. Затем подготовленную платформу устанавливают на конический хвостовик 10 вала 2. Приводят баланс в автоколебания и измеряют значение периода колебаний баланса T_0 , пользуясь импульсами на коллекторе транзистора $VT1$. Для повышения точности измерения значения T_0 следует брать как среднее по нескольким периодам. На следующем этапе на платформу устанавливают измеряемое тело и определяют период колебаний нагруженной системы T_u . Искомое значение момента инерции тела I_u вычисляют по формуле

$$I_u = \frac{C}{4\pi^2} T_u^2 - I_0, \quad (5.11)$$

где C – жесткость спиральной пружины (константа измерительной автоколебательной системы);

$$I_0 = \frac{C}{4\pi^2} T_0^2. \quad (5.12)$$

Предложенное техническое решение устройства для измерения моментов инерции тел на основе автоколебательной системы обеспечивает высокую стабильность частоты колебаний, следствием которой является высокая точность измерения искомого параметра. Стабильность частоты в предлагаемом устройстве реализуется за счет симметричности подводимого в систему импульса энергии относительно положения ее равновесия и стабилизации амплитуды колебаний. Последний фактор также существенно расширяет диапазон измерения.

Заметим также, что предлагаемое устройство может быть применено для целей измерения жесткости спиральных пружин или винтовых пружин, работающих на кручение.

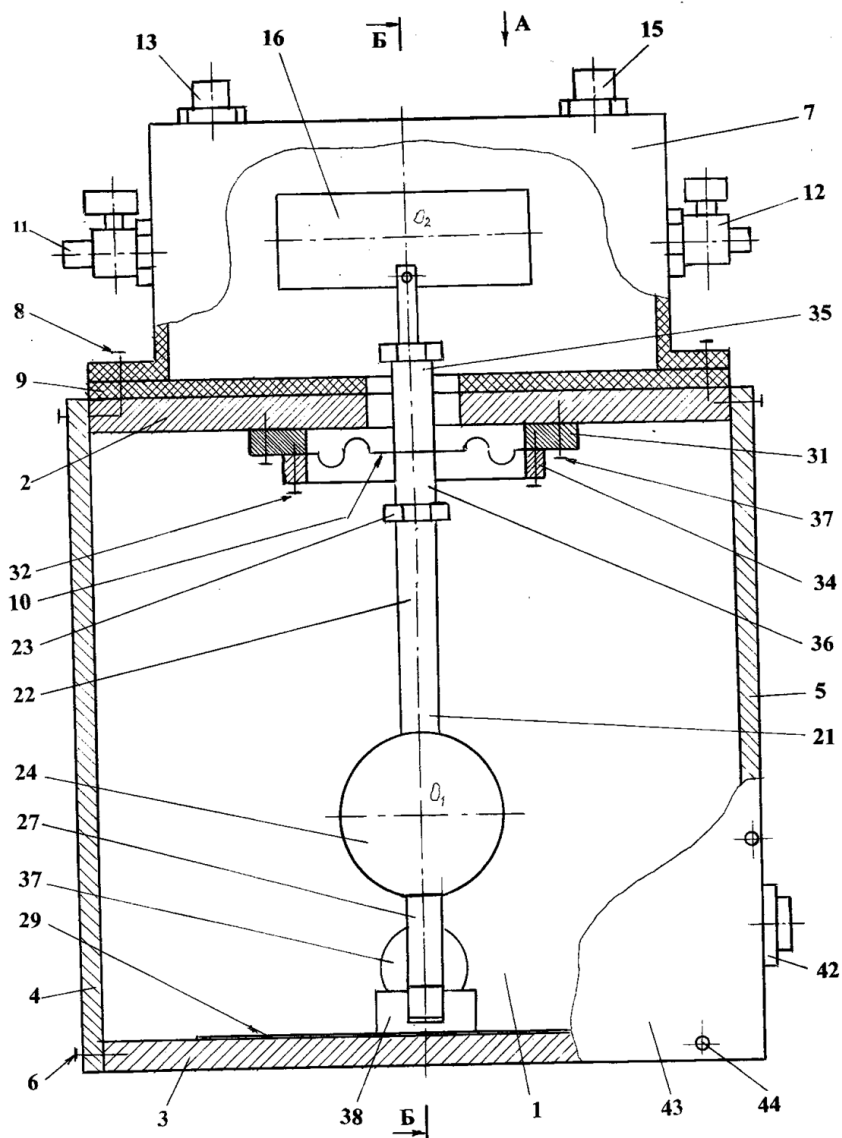


Рис. 5.16. Общий вид установки

В процессе развития средств измерений с позиций унификации широко применяют упругие элементы, форма которых освоена в производстве. Но в некоторых случаях это невозможно. Например, рассмотренная выше система баланс-спираль имеет позиционную погрешность, поэтому для приведения центра масс спирали формируют так называемые кольцевые кривые. Рассмотрим случай гофрированной мембраны специальной формы на примере установки для определения вязкости газов.

Структурно установка для определения вязкости газов состоит из накопителя исследуемого газа, зонда, взаимодействующего с газом, двигателя движения зонда и средств измерения параметров движения.

Все элементы конструкции смонтированы в корпусе 1 корабчатой формы. Имеются верхняя 2 и нижняя 3 плиты, которые соединены стойками 4,5 с помощью винтов 6.

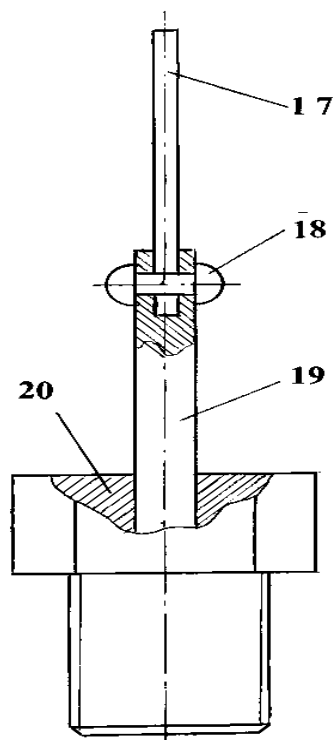


Рис. 5.17. Конструкция зонда

В верхней части корпуса установлена рабочая емкость 7 в виде накопителя исследуемого газа. Корпус емкости выполнен из материала с низкой теплопроводностью и закреплен на верхней плите 2 винтами 8 через прокладку 9 из термоизоляционного материала. Герметизация емкости обеспечивается мембраной 10. На диаметральных стенках корпуса емкости закреплены сборки штуцер-кран 11, 12. Сверху на корпусе 7 закреплены датчик 13 температуры, датчик 14 давления и электронагреватель 15.

Для взаимодействия с исследуемым газом предусмотрен зонд 16 (рис. 5.17). Зонд выполнен в виде отдельной сборочной единицы и содержит пластину 17 из тонколистового материала, которая заклепкой 18 закреплена в пазу поводка 19. Конец поводка запрессован в отверстии держателя 20 болтообразной формы с шестигранной головкой.

Сверху на корпусе 7 закреплены датчик 13 температуры, датчик 14 давления и электронагреватель 15.

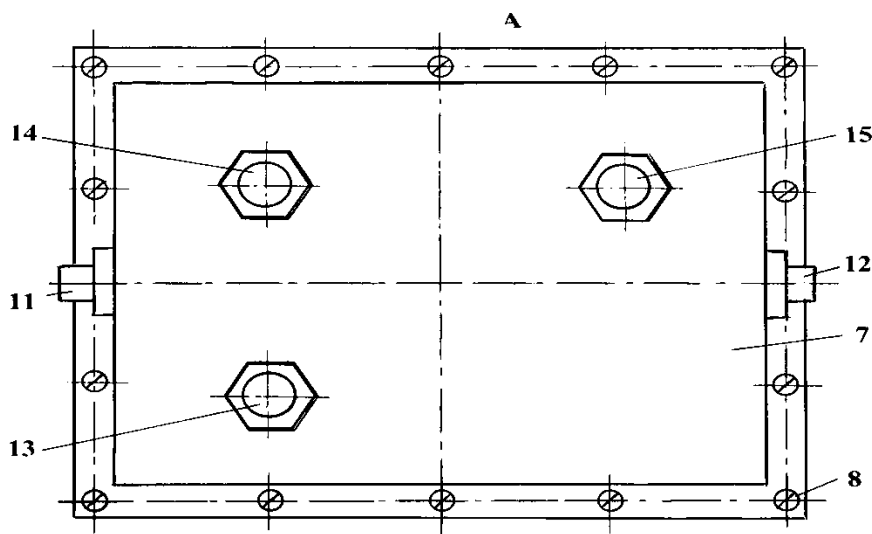


Рис. 5.18. Вид А по рис. 5.16

При движении зонда 16 его внешняя поверхность обеспечивает появление вязкого трения в исследуемом газе.

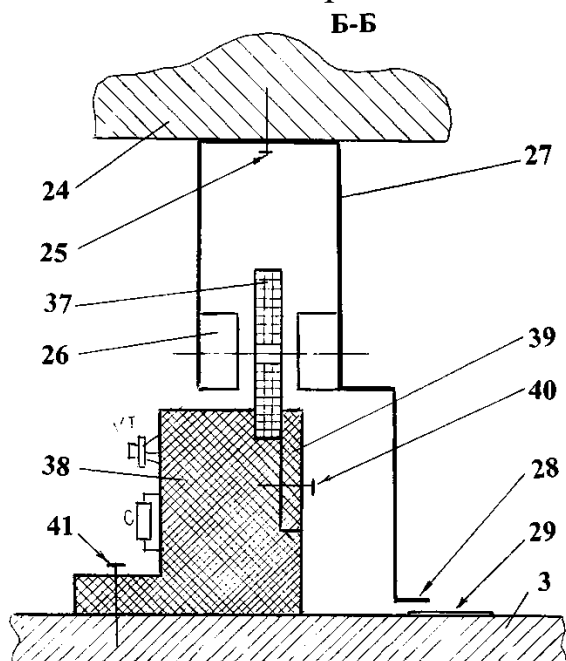


Рис. 5.19. Разрез Б-Б по рис. 5.16

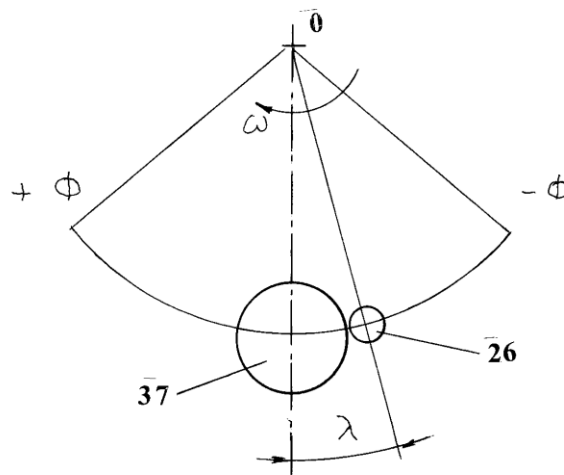


Рис. 5.20. Схема для расчета угла импульса

Движение зонда относительно неподвижного газа реализуется двигателем относительного движения. Двигатель построен на основе физического маятника 21. Имеется штанга 22, верхняя часть которой имеет резьбовой хвостовик для соединения с подвесом и шестигранный участок 23 под монтажный ключ. Инерционная масса – линза 24 – выполнена в форме диска и закреплена на штанге.

К линзе винтами 25 присоединена магнитная система устройства возбуждения автоколебаний. Имеются два постоянных магнита 26 осевой намагниченности, которые клеим закреплены на магнитопроводе 27 с образованием магнитного зазора. Магнитопровод выполнен из ленточной заготовки, его один конец сформирован с образованием стрелки (указателя) 28. Стрелка располагается над шкалой 29 амплитуд колебаний, закрепленной на нижней плите 3.

Подвес маятника выполнен на основе осесимметричной гофрированной мембраны 10 (рис. 5.21) с центральным отверстием 30. Мембранный узел образует отдельную сборочную единицу. В качестве монтажной основы служит несущая рамка 31. Мембрана винтами 32 по

контуру через отверстия 33 посредством накладной рамки 34 зажимается по контуру. Жесткий центр мембраны образован из двух шестигранных втулок 35, 36 с внутренней резьбой, при этом одна втулка имеет резьбовой хвостовик. На этапе сборки осуществляется стяжка втулок через отверстие 30 с использованием хвостовика. Собранный мембранный блок винтами 37 крепится на верхней плите 2. Далее в центральное резьбовое отверстие верхней втулки 35 крепится зонд 16, в резьбовое отверстие нижней втулки 36 – маятник 21.

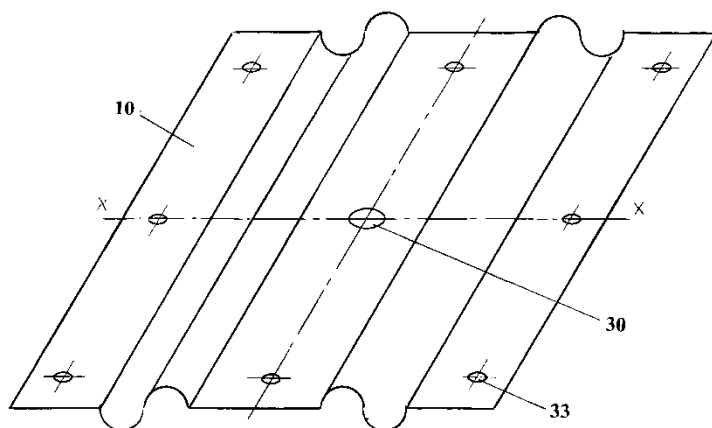


Рис. 5.21. Форма мембраны

При колебаниях ненагруженного маятника возникают потери энергии за счет трения о воздух и гистерезисного трения в мембране. Заметим, что эти потери постоянны (не зависят от нагрузки) при фиксированных собственной частоте и амплитуде колебаний. Для компенсации этих потерь слу-

жит система возбуждения автоколебаний. В магнитном зазоре установлена бифилярная (намотанная в два провода) электрическая катушка 37, одну секцию которой назовем катушкой освобождения W_0 , другую – катушкой привода W_u . Эти катушки входят в состав схемы формирования импульсов привода (СФИП) – рис. 5.22. Для снижения влияния подводимого импульса на период колебаний принято (с учетом требований теоремы Эри)

$$\phi_{ст} \gg \lambda, \quad (5.13)$$

где $\phi_{ст}$ - стационарная амплитуда колебаний;
 λ - угол импульса (рис. 5.20)

Катушка 37 размещена в расточке кронштейна 38 и поджата накладкой 39 с винтами 40. На кронштейне 38 методом навесного монтажа смонтированы транзистор VT и конденсатор С. Кронштейн закреплен на нижней плите 3 винтами 41. Монтажные провода СФИП подключены к разъему 42.

При движении маятника по направлению ω (рис. 5.20) поле зазора пересекает витки катушки и в них индуцируется ЭДС. ЭДС катушка

освобождения в векторной форме

$$\bar{e}_0 = \bar{B} \bar{v} \bar{l}, \quad (5.14)$$

где \bar{B} - магнитная индукция в зазоре;

\bar{v} - линейная скорость;

\bar{l} - направление витка.

Концы катушки W_0 подключены так, что в пределах угла λ возникает положительная полуволна ЭДС. За положением равновесия \bar{l} меняет знак, соответственно возникает отрицательная полуволна ЭДС. Положительная полуволна ЭДС открывает транзистор VT и по обмотке W_u проходит импульс тока, обеспечивающий подкачку энергии маятнику. Изменяя уровень электропитания E (рис. 5.22) добиваются стационарного значения $\Phi_{ст}$ амплитуды автоколебаний. Для определенности примем $\Phi_{ст} = 0,2$ рад.

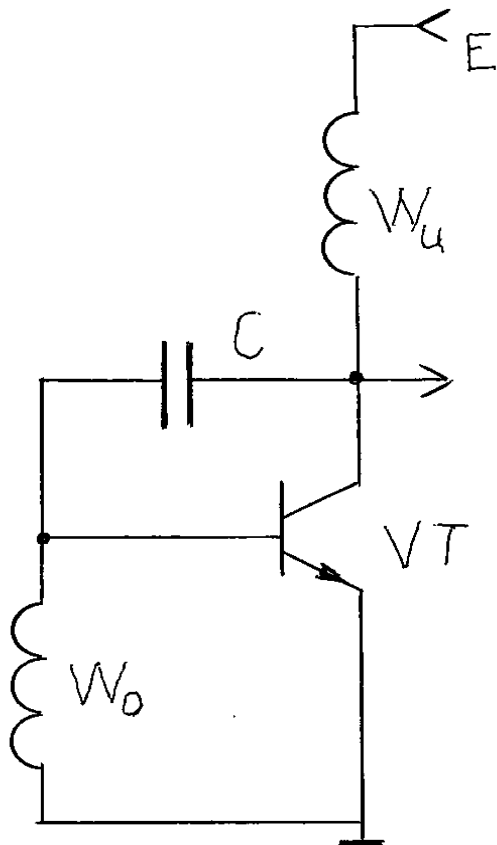


Рис. 5.22. Схема формирования импульсов привода

После сборки установки объем корпуса 10 с двух сторон закрывается защитными листами 43, которые крепятся винтами 44. Листы 43 удобно изготавливать из прозрачного материала.

Кратко рассмотрим свойства маятника как основы двигателя относительного движения. Свойственная частота колебаний f определяется моментом инерции J и моментом восстанавливающих сил. Опуская полный расчет примем для определенности в случае массивной линзы 24 в первом приближении

$$J = m * d^2, \quad (5.15)$$

где m - масса линзы;

$d = 0 \ 0_1$ - расстояние от центра отверстия 30 мембраны до центра линзы.

Восстанавливающий момент складывается из двух составляющих:

момента сил тяжести. Для малых углов отклонения α

$$M_g = m g d \alpha , \quad (5.16)$$

где g – ускорение силы тяжести;

и момента мембраны D_M

$$M_M = D_M \alpha , \quad (5.17)$$

где D_M – изгибная жесткость мембраны в плоскости колебаний (плоскость

$x - x$ по рис 5.21)

С учетом выражений (5.16), (5.17) получим эквивалентную жесткость

$$D = D_M + m g d \quad (5.18)$$

Собственная частота f маятника

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (5.19)$$

где ω – циклическая частота;

T – период колебаний.

Потери энергии при колебаниях характеризуются добротностью

Q

$$Q = \frac{E_{\text{кол}}}{E_{\text{пот}}}, \quad (5.20)$$

где $E_{\text{кол}}$ – колебательная энергия;

$E_{\text{пот}}$ – энергия потерь за период колебаний.

$$E_{\text{кол}} = \frac{1}{2} D \phi^2 \quad (5.21)$$

где ϕ – амплитуда колебаний.

Добротность Q определяют экспериментально (Шарыгин Л.Н., Сорокин А.А. Автоколебательные системы в средствах измерения и контроля: учеб. пособие. – Владимир: изд. Атлас, 2016. – 205 с. ISBN 978-5-903087-53-2). Для этого получают функцию выбега $\phi = f(t)$. Применительно к рассматриваемой установке регистрируют импульсы ЭДС e_0 (отрицательную полуволну).

Обратимся к формуле (5.14). Максимум линейной скорости равен

$$V_m = \omega \phi r_M \quad (5.22)$$

где r_M – межцентровое смещение магнитов от точки О подвеса.

Таким образом e_0 пропорциональна амплитуде

$$e_{0\max} = K\phi. \quad (5.23)$$

На функции выбега $\phi = f(t)$ берут в окрестностях стационарной амплитуды $\phi_{ст}$ два значения

$$\phi_1 > \phi_{ст} > \phi_N \quad (5.24)$$

и вычисляют значение добротности

$$Q = \frac{N}{\ln \frac{\phi_1}{\phi_N}}, \quad (5.25)$$

где N – количество периодов T колебаний при движении от амплитуды ϕ_1

до амплитуды ϕ_N .

Вместо значения добротности используют также значение интегрального коэффициента трения h_u

$$h_u = \frac{\sqrt{JD}}{Q}. \quad (5.26)$$

Энергия потерь $E_{пот}$ – формула (5.20) – за период T составит

$$E_{пот} = \frac{D \phi_{ст}}{2Q}, \quad (5.27)$$

За это время от источника E системы возбуждения автоколебаний передана энергия $E_{ист}$

$$E_{ист} = I_{ср} T, \quad (5.28)$$

где $I_{ср}$ – среднее значение импульсного тока.

Учитывая, что в исходном положении транзистор VT за счет нулевого смещения находится в режиме отсечки, то при больших значениях коэффициента передачи тока β транзистора форма импульсов тока близка к прямоугольной, тогда можно $E_{ист}$ найти по другому

$$E_{ист} = 2 I_m t_u, \quad (5.29)$$

где I_m – амплитуда импульса тока;

t_u – длительность импульса.

В соответствии с формулами (5.27), (5.28) коэффициент полезного действия привода γ составит

$$\gamma = \frac{E_{\text{пот}}}{E_{\text{ист}}} = \frac{D \phi_{\text{ст}}^2}{2 Q I_{\text{ср}} T}. \quad (5.30)$$

Полученные выше соотношения позволяют выполнить метрологическую аттестацию установки и получить искомый параметр.

При метрологической аттестации вакуумируют рабочую камеру, проводят эксперимент и фиксируют основные паспортные параметры: J , D , T , γ , $\phi_{\text{ст}}$, K , Q^0 , h_u^0 , $I_{\text{ср}}^0$, $E_{\text{пот}}^0$. Параметрам, которые будут изменяться при измерении вязкости газа присвоен верхний индекс 0.

В спецификацию установки входят:

- источник регулируемого питания Е;
- источник питания электронагревателя 15;
- вторичные блоки датчика давления 14 и датчика температуры 13;
- регистратор ЭДС e_0 ;
- измеритель среднего тока источника Е.

Пользуются установкой для определения вязкости газов следующим образом.

1. Пользуясь штуцер-кранами 11, 12 наполняют рабочую емкость 7 исследуемым газом под нужным давлением. При необходимости электронагревателем 15 изменяют температуру газа.

2. Регулировкой уровня электропитания Е устанавливают стационарное значение амплитуды $\phi_{\text{ст}}$ автоколебаний маятника. Контроль ведут по ЭДС e_0 .

3. Измеряют среднее значение тока $I_{\text{ср}}$ источника Е.

4. По разности $(I_{\text{ср}} - I_{\text{ср}}^0)$ вычисляют

$$\begin{aligned} E_{\text{пот}}^r &= E_{\text{пот}} - E_{\text{пот}}^0; \\ h_u^r &= h_u - h_u^0. \end{aligned} \quad (5.31)$$

Энергия $E_{\text{пот}}^r$ равна работе сил вязкого трения в исследуемом газе за один период T колебаний маятника.

5. Вычисляют динамическую вязкость η исследуемого газа

$$\eta = \frac{h_u^r}{L_{17}}, \quad (5.32)$$

где L_{17} - путь геометрического центра O_2 пластины 17 зонда 16 за период колебаний T

$$L_{17} = 4 \phi_{ст} d_{17}, \quad (5.33)$$

где d_{17} расстояние от центра отверстия 30 мембраны до геометрического центра O_2 пластины зонда.

Таким образом, предлагаемая установка для определения вязкости газов позволяет проводить измерения вязкости в широких диапазонах исходных давления и температуры. В проектировании установки использован блочный принцип. Установка конструктивно проста и высокотехнологична. Технология измерения не требует высокой квалификации пользователя.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

А. Предложите конструкцию

1. Линейной направляющей на основе плоских пружин
2. Линейной направляющей на основе гофрированных мембран
3. Линейной направляющей на основе плоских мембран
4. Поворотного шарнира на основе плоских мембран
5. Поворотного шарнира на основе гофрированных мембран
6. Поворотного шарнира на основе плоских пружин

Б. Поясните метрологические возможности преобразователя на основе:

7. Плоских пружин
8. Гофрированных мембран
9. Плоских мембран
10. Растяжек
11. Подвесов
12. Спиральных пружин
13. Струн плоского сечения
14. Струн круглого сечения
15. Колебательных звеньев

В. Предложите конструкцию преобразователя для измерения:

16. Линейных ускорений
17. Угловых ускорений
18. Импульсных ускорений
19. Линейного перемещения
20. Углового перемещения
21. Скорости поступательного перемещения
22. Частоты вращения
23. Электрической емкости зазора
24. Индуктивности регулируемого дросселя
25. Частоты колебаний маятника
26. Частоты колебаний LC-контура

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебный план подготовки будущих учителей технологии предусматривает ряд дисциплин технического творчества.

Студенты изучают и анализируют типовые технологические процессы и разрабатывают новые. При разработке прогрессивных технологических процессов возникает задача создания сопутствующих средств – приспособлений, средств измерения и контроля. Содержание учебного пособия призвано мотивировать студента рассматривать упругие элементы не только в качестве замыкателя силовой цепи, но и в составе измерительного преобразователя. Если в первом случае достаточно определить характеристики прочности и жесткости упругого звена, то во втором необходимо выявить влияние парциальных параметров на метрологические свойства изделия.

В учебном пособии были изложены принципы подхода к созданию новой техники на основе многочисленных примеров. Показано применение упругих элементов в преобразователях для измерения силы, перемещения, давления, расхода различных сред.

Результаты изучения представленных технических решений послужат подспорьем при освоении дисциплин технического творчества, которые предусмотрены учебным планом по направлению подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1962. – 456 с.
2. Шарыгин Л.Н., Каткова Л.Е. Проектирование конкурентноспособных технических изделий: учебник. – Владимир: Транзит-ИКС, 2017. – 364 с.
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
4. Стенд для испытаний двигателя внутреннего сгорания. Патент RU2518755C1 МПК G01M 15/05 / В.С. Воронин, Ю.А. Краснов, С.Н. Кротов. Оpubл. 10.06.2014.
5. Шарыгин Л.Н., Сорокин А.А. Автоколебательные системы в средствах измерения и контроля: учебное пособие. – Владимир: Атлас, 2016. – 205с.
6. Шарыгин Л.Н. Итоги науки: монография. / Л.Н. Шарыгин, Н.П. Ершов, С.А. Золотой и др. – М.: изд-во РАН, 2013. – 218 с.
7. Устройство для измерения моментов инерции тел. Патент RU86325U1 МПК G04C 3/00 / А.А. Бугров, А.В. Поваров, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.08.2009.
8. Устройство для измерения крутящего момента. Патент RU84550U1 МПК G01L 3/04 / Д.Н. Богданов, А.С. Ломов, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 10.07.2009.
9. Устройство для взвешивания массы в невесомости. Патент RU2488784C1 МПК G01G 9/00 / К.Г. Ульянова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.07.2013.
10. Преобразователь крутильных колебаний. Патент RU142033U1 МПК G01L 3/04 / И.А. Башкирова, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.06.2014.
11. Устройство для измерения импульсных ускорений. Патент RU147269U1 МПК G01P 15/11 / И.А. Башкирова, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.10.2014.
12. Датчик давления. Патент RU153752U1 МПК G01L 7/06 / Г.К. Потапов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.07.2015.
13. Лопастной расходомер. Патент RU154440U1 МПК G01F 1/20 / В.А. Макурина, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.08.2015.

14. Установка для определения внутреннего трения в материале. Патент RU163380U1 МПК G01N 3/32, 19/02 / Т.В. Смирнова, Л.Е. Каткова, И.Ф. Гильманова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.07.2016.

15. Датчик силы. Патент RU162006U1 МПК G01L 1/10 / А.А. Сорокин, Л.Е. Каткова, Т.А. Антонова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 20.05.2016.

16. Датчик крутильных колебаний. Патент RU2615915C1 МПК G01L 3/04 / Л.В. Желтухина, Л.Е. Каткова, А.С. Чернышёва, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 11.04.2017.

17. Генераторный акселерометр. Патент RU172727U1 МПК G01P 15/02 / Л.В. Желтухина, В.О. Васильев, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 21.07.2017.

18. Устройство для измерения крутящего момента. Патент RU2658142C1 МПК G01L 3/00 / А.А. Николаенко, В.Ю. Воронина, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 19.06.2018.

19. Устройство для измерения ускорений. Патент RU182627U1 МПК G01P 15/093 / И.А. Аверьянов, А.Е. Головский, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 24.08.2018.

20. Моментмер для статических измерений. Патент RU2659180C1 МПК G01L 3/04 / А.Н. Кухваева, Д.К. Седов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 28.06.2018.

21. Расходомер для низконапорных трубопроводов. Патент RU194999U1 МПК G01F 1/00 / Н.С. Савинов, С.С. Федулов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 13.01.2020.

22. Установка для испытаний пружинных двигателей. Патент RU200984U1 МПК G01M 15/00 / Н.С. Савинов, С.С. Федулов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 23.11.2020.

23. Дифференциальный датчик давления. Патент RU197698U1 МПК G01B 11/14 / С.С. Федулов, Н.С. Савинов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 21.05.2020.

24. Установка для испытаний длинных образцов материалов. Патент RU205712U1 МПК G01N 3/38 / М.А. Яковлева, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 29.07.2021.

25. Установка для ускоренных испытаний материалов на усталость. Патент RU108843U1 МПК G01N 3/32 / А.Н. Сушина, Н.А. Елгаев, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 27.09.2011.

26. Шариковый расходомер прозрачных сред. Заявка на ПМ №2021123169/09 (048340) МПК G01F 1/06 / М.А. Яковлева, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 02.08.2021.

27. Устройство для взвешивания массы в невесомости. Патент RU2239796C1 МПК G01G 19/00 / А.О.Кадкин, А.Н.Синяков, Г.А.Сапожников, С.В.Богословский, Д.А.Северов, А.В.Тиль.опуб. 10.11.2004.

28. Датчик перемещения. Патент RU53752U1 МПК G01L 7/06 / Г.К. Потапов, Л.Е. Каткова, Л.Н. Шарыгин. Оpubл. 07.07.2015.

29. Устройство для измерения крутящего момента. Авт. свид. SU1357731 МПК G01L 3/04 / Л.Н. Шарыгин, А.Н. Гоц. Оpubл. 08.08.1987.

Учебное электронное издание

ХРУСТАЛЕВА Надежда Владимировна
ШАРЫГИН Лев Николаевич

ПРИМЕНЕНИЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlsu@vlsu.ru

Кафедра технологического и экономического образования
ttd.tef@vlsu.ru