

3 Экспериментальные исследования работы машин

Исследования (испытания) работы машин являются одним из важных и трудоемких процессов (этапов) при создании и установлении рациональных их параметров.

Различают:

1. **Испытания машины** – проверка или установление выполнения машиной предусматриваемых при ее разработке функций и значений параметров, например, подъем, опускание рабочего органа и их величины (значения); перемещение отдельных элементов машины или самой машины и его значения; развиваемые скорость, усилия и т.д.

2. **Исследования работы машины** – установление действительных значений параметров и их характера, присущих рабочему процессу данной машины, например, силы и скорости резания, крутящего момента и т.д.

Испытания машин проводят либо в заводских условиях (на специальных испытательных стендах), либо на специальных полигонах. Испытания машин могут проводиться и в натуральных условиях, например, испытание автомобилей в натуральных условиях. Испытания машин являются первым несколько упрощенным “исследованием” машин, целью которых является установление их работоспособности или отдельных элементов, ресурса и т.д.

Экспериментальные исследования работы машин могут проводиться как в стендовых (лабораторных), так и в натуральных условиях. Предпочтение должно отдаваться натурным, т.е. проведенным в натуральных условиях эксплуатации, исследованиям. Независимо от вида исследования должны выполняться следующие основные требования [5,6]:

1. Представительность условий, в которых предполагается проведение исследований работы машины.

2. Достоверность получаемого экспериментального материала.

3. Достаточность экспериментального материала.

Представительность условий, в которых предполагается проведение исследований работы машины, означает, что условия, в которых будут проводиться исследования работы машины должны соответствовать или обладать набором характерных параметров, соответствующих параметрам условий, в которых предполагается эксплуатация машины. Условия, наиболее полно удовлетворяющие представительности, – это и есть условия эксплуатации машины. Другими словами, проведение исследований работы машины в условиях, в которых будут эксплуатироваться машины, наиболее полно удовлетворяют действительности. Так, например,

представительными условиями для проведения исследований работы горных машин являются шахтные условия; представительными условиями для исследования работы автомобиля являются условия реальных дорог и т.д.

Однако, по тем или иным причинам, например, невозможности фиксации нужных физических величин в реальных условиях, исследования работы машин проводятся в стендовых условиях. Вместе с тем, независимо от того, в реальных или стендовых условиях проводятся исследования работы машины, условия должны удовлетворять представительности. С этой целью при проведении исследований работы машины в реальных условиях предварительно проводится подбор условий, которые обладали или соответствовали бы условию представительности. Более сложно решается вопрос представительности условий при исследовании работы машин в стендовых условиях. В этом случае разрабатываются устройства (стенды), которые позволяли бы воспроизводить либо нужные движения, либо нужные по величине и характеру нагрузки т.е. воспроизводили бы по изучаемому процессу условия, близкие к реальным. Это обусловлено тем, что создание условий, которые соответствовали бы реальным условиям эксплуатации по всем процессам данной машины в условиях стенда весьма затруднительно, а во многих случаях – практически невозможно.

Достоверность экспериментального материала означает, что получаемый экспериментальный материал должен в полной мере отражать те процессы, которые протекают в машине при ее работе. Это достигается путем применения при проведении экспериментальных исследований, например, специальных тензорезисторов (сопротивлений), с помощью которых фиксируются мгновенные деформации элементов конструкции машины (в случаях измерения силовых параметров – усилия, моменты), специальных датчиков скорости, пути и других специальных устройств для фиксации мгновенных значений или отклонений исследуемых линейных и угловых величин; инерционных устройств, на пленки (светочувствительные или магнитные) которых фиксируются значения величин (осциллографы или магнитофоны). При этом, для безыскаженной передачи сигнала (информации) по кабельным линиям, соединяющим тензорезистор или другой датчик с осциллографом или магнитофоном, предъявляются специальные требования: во-первых, длина кабельной линии должна быть не более той, которая оговорена в технической характеристике прибора (в противном случае происходит искажение сигнала); во-вторых, во избежание так называемых наводок (помех) в качестве кабельной линии могут использоваться только кабели в металлических оплетках.

Кроме указанных требований, особое внимание должно уделяться частотной характеристике прибора, с помощью которого будет производиться фиксация измеряемых величин – собственная частота прибора должна быть не менее чем на порядок выше предполагаемых частот фиксируемой физической величины. Это дает возможность работать на линейной части характеристики прибора и получать безыскаженную информацию.

Для получения достоверного материала, кроме градуировки приборов перед началом и в конце эксперимента, необходимо проводить проверочные градуировки. При этом градуировка приборов должна производиться при включении прибора в полную измерительную сеть, т.е. градуировка прибора должна производиться в той же сети, в которую он включается при проведении исследований.

Достаточность экспериментального материала означает, что объем (число отсчетов для дискретных величин, продолжительность записи для непрерывных величин) экспериментального материала должен быть достаточным для того, чтобы с заданной (гарантийной) вероятностью погрешность оценки величины не превышала назначенной или установленной (допустимой).

Объем экспериментального материала может быть оценен по приведенным ниже зависимостям:

для дискретных случайных величин

$$\begin{cases} \text{Pr} = 2\Phi(t) \\ \varepsilon = t\sigma\sqrt{1/n} \end{cases}$$

для непрерывных случайных величин

$$\tau_{\max} = 2\pi / \lambda_{\min}; \quad T \geq 16\tau_{\max} / \varepsilon\%; \quad \Delta t = 0,1\pi / \lambda_{\max}.$$

Здесь Pr – гарантийная вероятность; $\Phi(t)$ – функция Лапласа; ε – допускаемая погрешность; σ – среднеквадратическое отклонение значений случайной величины; λ_{\max} , λ_{\min} – соответственно максимальная и минимальная частоты фиксируемого процесса; τ_{\max} – величина максимального смещения при определении корреляционной функции; T – длина реализации (записи) случайной функции; Δt – интервал сканирования (отсчетов) при кодировании случайной функции в виде случайной последовательности чисел; $\varepsilon\%$ – погрешность (допускаемая или принимаемая) при определении оценок исследуемой величины; n – число отсчетов (объем информации) случайной величины.

Целью планирования эксперимента является получение с минимальными затратами математической модели для оптимизации или аппроксимации исследуемого объекта.

Так, если имеется k переменных x_i ($i=\overline{1,k}$) и зависящая от них величина y , и если сами переменные имеют неслучайный характер, то на y влияют и другие, не поддающиеся точному контролю переменные, поэтому величина y может носить случайный характер. Необходимо определить влияние переменных x_i на y .

На математическом языке это выразится

$$\eta = F(x_1, x_2 \dots x_k),$$

где η – параметр системы, подлежащий оптимизации;

x_i –зависимые переменные.

В случае, когда аналитическое выражение функции отклика неизвестно, представим функцию отклика полиномом:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots$$

с теоретическими коэффициентами регрессии β_0 ; β_i ; β_{ii} ; β_{ij} .

Однако в результате эксперимента получают коэффициенты b_0 ; b_i ; b_{ii} ; b_{ij} , которые являются оценками теоретических коэффициентов. Тогда уравнение получает вид

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j + \dots ,$$

где \hat{y} – рассчитанное значение параметра оптимизации.

Прежде чем приступить к проведению эксперимента, основной целью которого является построение математической модели, необходимо последовательно решить следующие задачи:

- выбрать критерии оптимизации y ;
- выбрать независимые переменные x_i – факторы;
- вычислить коэффициенты регрессии b ;
- определить вид функции отклика и планирования.

Критерии оптимизации. Выбирая критерии оптимизации y в математической модели, необходимо учитывать многие соображения:

1) Критерий оптимизации желательно иметь таким, чтобы он однозначно и с достаточной полнотой характеризовал эффективность объекта исследования.

2) Следует стремиться, чтобы критерий был только один и имел ясный физический смысл. Не рекомендуется в качестве критерия выбирать параметры, которые нельзя измерять (например, выражаемые в % или в логарифмических, тригонометрических функциях).

3) Когда имеется несколько критериев оптимизации, следует рассмотреть возможность уменьшения их числа до минимума.

4) Критерий оптимизации должен быть количественным.

5) Существовать для всех ситуаций проведения эксперимента.

После выбора критериев оптимизации выбирают управляемые факторы – переменные, воздействие которых на объект исследования можно изменять целенаправленно.

Независимые переменные (факторы). Число выбранных факторов обуславливает размерность изучаемого факторного пространства. Выбирая факторы, необходимо:

1) учитывать область их применения;

2) отсутствие коррелируемости факторов;

3) совместимость факторов (т.е. все их комбинации осуществимы и безопасны);

4) управляемость. Это означает, что экспериментатор, выбрав нужное значение фактора, может поддерживать его постоянным в течение опыта;

5) точность замера. Если уровень фактора измеряется с большой ошибкой или значение фактора трудно поддержать на заданном уровне, то необходимо прибегнуть к другим методам исследования;

б) однозначность, т.е. непосредственное воздействие факторов на объект.

Степень точности математической модели определяется диапазоном изменения факторов. В результате предварительной работы для каждого i -го фактора устанавливают следующие значения:

x_{i0} – основной уровень фактора;

$x_{i\max}; x_{i\min}$ – верхний и нижний уровни i -го фактора;

Δx_i – интервал варьирования.

При проведении экспериментов используют кодированные значения уровней факторов. При этом основной уровень принимается равным нулю, верхний “+1”; нижний “-1”. Кодирование осуществляется по формуле

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (i = \overline{1, k}).$$

Хорошо разработаны планы для первого и второго порядков.

Для планов первого порядка

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i,$$

где b_0 – свободный член;
 k – число факторов;
 b_i – коэффициенты при соответствующих факторах;
 x_i – факторы.

В планах второго порядка

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{ij=1}^c b_{ij} x_i x_j,$$

где c – число сочетаний из k факторов по два.

Пример. Исследовать влияние режимов резания (v , S) на силу резания при торцовом фрезеровании высокопрочного чугуна ВЧ 50-1,5. На основании предварительных исследований были установлены пределы изменения факторов $v=90\dots150$ м/мин; $S=0,15-0,25$ мм/зуб.

Учитывая, что все точки плана должны быть симметричны относительно центра исследуемого пространства, определим значение нулевого уровня и интервалы варьирования.

$$\tilde{x}_{1\max} = 150 \text{ м/мин}; \tilde{x}_{1\min} = 90 \text{ м/мин}; \Delta \tilde{x}_1 = 30 \text{ м/мин};$$

$$\tilde{x}_{01} = 120 \text{ м/мин};$$

$$\tilde{x}_{2\max} = 0,25 \text{ мм/зуб}; \tilde{x}_{2\min} = 0,15 \text{ мм/зуб}; \Delta \tilde{x}_2 = 0,05 \text{ мм/зуб};$$

$$\tilde{x}_{02} = 0,2 \text{ мм/зуб}.$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета плана эксперимента

| Уровни варьирования исследуемых факторов | Исследуемые факторы | | | |
|--|-----------------------|-------|------------------------|-------|
| | Скорость резания | | Подача | |
| | \tilde{x}_1 , м/мин | x_1 | \tilde{x}_2 , мм/зуб | x_2 |
| Верхний уровень $\tilde{x}_{i\max}$ | 150 | +1 | 0,25 | +1 |
| Нулевой уровень \tilde{x}_{0i} | 120 | 0 | 0,20 | 0 |
| Нижний уровень $\tilde{x}_{i\min}$ | 90 | -1 | 0,15 | -1 |
| Интервал варьирования | 30 | 1 | 0,05 | 1 |

Условия проведения эксперимента можно записать в виде таблицы, строки которой соответствуют условиям различных опытов, а столбцы – значениям факторов. Такие таблицы называют матрицей планирования.

Все возможные варианты факторов при варьировании на 2 уровнях будут определяться 4 опытами, табл.3.2.

Таблица 3.2. – Матрица планирования эксперимента для двух факторов на двух уровнях.

| № опыта | Факторы | | Результат наблюдения y |
|---------|---------|-------|--------------------------|
| | x_1 | x_2 | |
| 1 | -1 | -1 | y_1 |
| 2 | +1 | -1 | y_2 |
| 3 | -1 | +1 | y_3 |
| 4 | +1 | +1 | y_4 |

Область определения факторов в эксперименте можно изобразить графически. После кодирования получаем квадрат. Вершины квадрата соответствуют номерам эксперимента, рис.3.1.

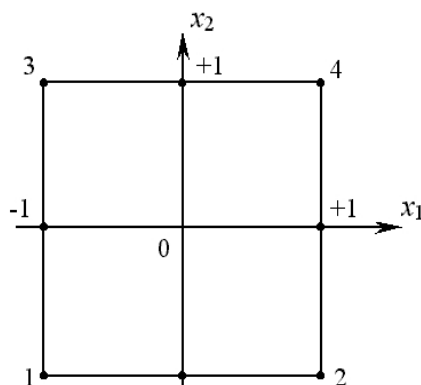


Рис.3.1. Область определения факторов в эксперименте

Для k факторов – получаем гиперкуб.

Выбор интервалов варьирования зависит от условий опыта. Если решается задача оптимизации, то центр плана следует располагать вблизи предполагаемого оптимума. Если решается задача аппроксимации, то следует стремиться охватить всю интересную зону (в отличие от задачи оптимизации, где интервалы варьирования принимают малыми по сравнению с общей областью определения факторов). При этом нижний предел интервала должен быть больше удвоенной среднеквадратичной ошибки определения фактора.

3.1 Матрица планирования ПФЭ 2^k и ее свойства

Если факторов два, то перебор всех возможных сочетаний на 2 уровнях не представляет труда. Увеличение числа факторов ведет к осложнениям. Существует несколько методов построения матрицы. Рассмотрим один из наиболее распространенных – прием чередования знаков.

Он состоит в том, что элементарное сочетание фактора (-1;+1) повторяется для каждого следующего на нижнем и верхнем уровнях. При этом в первом столбце, соответствующем x_0 , знаки не изменяются; во втором – изменяются через один; в третьем – через два; в четвертом – через 4 и т.д., например, см. таблицу 3.3.

Таблица 3.3. – Матрицы $2^2, 2^3, 2^4$

| Тип плана ПФЭ | № опыта | Факторы | | | | | Отклики y |
|---------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| | | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | |
| 2^2 | 1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | y_1 |
| | 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | y_2 |
| | 3 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | y_3 |
| | 4 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | y_4 |
| | 5 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | y_5 |
| | 6 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | y_6 |
| 2^3 | 7 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | y_7 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | y_8 |
| | 9 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | y_9 |
| | 10 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | y_{10} |
| | 11 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | y_{11} |
| | 12 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | y_{12} |
| 2^4 | 13 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | y_{13} |
| | 14 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | y_{14} |
| | 15 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | y_{15} |
| | 16 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_{16} |

Свойства матрицы:

1) Эти матрицы обладают свойством симметричности. Каждый фактор во всех опытах (в столбце) на верхнем уровне встречается столько раз, сколько и на нижнем.

$$\sum_{i=1}^n x_{iu} = 0, \quad \text{где } u \text{ – номер опыта;}$$

2) Свойство нормировки. Факторы в матрице встречаются только на уровнях +1 и -1. Математически это выражается зависимостью:

$$\sum_{u=1}^n x_{iu}^2 = n.$$

3) Свойство ортогональности.

$$\sum_{i=1}^n x_{iu} x_{ju} = 0.$$

Суммы полученных произведений двух любых столбцов матрицы равны нулю.

4) Свойство рототабельности. Сущность его состоит в том, что точки в матрице выбирают так, что точность предсказания параметра одинакова во всех направлениях.

Эти свойства делают матрицы ПФЭ оптимальным средством получения математической модели по результатам эксперимента и значительно упрощают вычисления, связанные с оценкой коэффициентов и статистическим анализом модели [10].

На любую технологическую систему одновременно с управляемыми факторами воздействует большое количество неуправляемых и неконтролируемых факторов, которые создают дополнительный стохастический шум, искажающий истинные результаты экспериментов. Чтобы надежно отделить исследуемые факторы от шумового фона, необходимо воспользоваться **рандомизацией**, которая устанавливает случайный порядок проведения опытов, предусмотренных матрицей планирования. Наиболее просто эта процедура выполняется с помощью таблицы случайных чисел или генератора (на ЭВМ) случайных чисел.

Пример. Анализ предварительной информации о влиянии режимов резания (v , S , t) на силу резания при торцовом фрезеровании чугуна ВЧ 50-1,5 показал, что наиболее целесообразной схемой организации эксперимента является схема с дублированием опытов во всех точках плана, т.к. экспериментатор не располагает данными о величине дисперсии ошибки опыта и ее однородности. Поэтому было принято решение о проведении опытов с постоянным числом параллельных наблюдений в каждой точке ПФЭ типа 2^3 .

Рандомизация выполнялась с помощью таблицы случайных чисел для всей совокупности опытов, т.е. $N \cdot n = 8 \cdot 3 = 24$.

Выбор последовательности проведения опытов позволил получить следующий ряд случайных чисел: 3; 13; 4; 23; 24; 19; 8; 10; 22; 12; 1; 5; 18; 17; 21; 2; 9; 7; 6; 20; 16; 15; 14; 11.

Результаты рандомизации занесем в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Порядок рандомизации опытов ПФЭ 2^3

| № серии опытов | Факторы | | | | № опыта порядок реализации | | |
|----------------|---------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | +1 | -1 | -1 | -1 | 1/3 | 9/22 | 17/9 |
| 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | 2/13 | 10/12 | 18/7 |
| 3 | +1 | -1 | +1 | -1 | 3/4 | 11/1 | 19/6 |
| 4 | +1 | +1 | +1 | -1 | 4/23 | 12/5 | 20/20 |
| 5 | +1 | -1 | -1 | +1 | 5/24 | 13/18 | 21/16 |
| 6 | +1 | +1 | -1 | +1 | 6/19 | 14/17 | 22/15 |
| 7 | +1 | -1 | +1 | +1 | 7/8 | 15/21 | 23/14 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | 8/10 | 16/2 | 24/11 |

3.2 Дробные факторные планы

Отсутствие предварительной информации об изучаемом процессе или объекте существенно усложняет исследователю возможность правильного выбора необходимого плана эксперимента. Поэтому целиком оправданным является его стремление получить некоторую начальную, пусть и не очень точную, информацию об этом процессе или объекте при минимальных затратах на эксперимент. Использование в этих случаях полных факторных планов становится явно нецелесообразным, поскольку общее число опытов значительно превышает число коэффициентов линейного уравнения ($2^k > (k+1)$), т.е. эти планы обладают избыточной информативностью.

При построении линейной модели это свойство может быть использовано для сокращения числа опытов [11].

Построение матрицы планов этого типа начнем с простейшего случая. Для этого рассмотрим матрицу ПФЭ типа 2^2 , которая позволяет построить математическую модель

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2.$$

Если априорно известно, что в выбранных интервалах варьирования процесс может быть описан линейной моделью, то

достаточно определить всего 3 коэффициента – b_0, b_1, b_2 . При этом эффект взаимодействия $b_{12} \rightarrow 0$, т.е. является незначимой величиной. Принятое предположение позволяет включить в схему эксперимента новый фактор x_3 , которому приписываются уровни вектора-столбца x_1x_2 , т.е. будем считать, что $x_3 = x_1x_2$. В этом случае матрица плана 2^2 позволяет найти оценки влияния на исследуемый процесс уже 3-х факторов и полученная модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3.$$

Матрица данного плана сохранила свои свойства (симметричность, нормировку, ортогональность, ротатабельность) и требует реализации в 2 раза меньше опытов, чем ПФЭ 2^3 .

Таблица 3.5– Полуреплика от ПФЭ типа 2^3 (ДФЭ типа 2^{3-1})

| № серии опытов <i>и</i> | Расширенная матрица планирования с дополнительными столбцами | | | | | | Результаты эксперимента |
|----------------------------|--|-------|-------|---------------------|----------|----------|-------------------------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | $x_3 \equiv x_1x_2$ | x_1x_3 | x_2x_3 | |
| 1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | y_1 |
| 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | y_2 |
| 3 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | y_3 |
| 4 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_4 |

Анализируя вектор-столбцы план-матрицы, можно видеть, что уровни нового фактора x_3 полностью совпадают с уравнением эффекта взаимодействия x_1x_2 , а факторов x_1 и x_2 – с дополнительными столбцами эффекта взаимодействия x_2x_3 и x_1x_3 , соответственно.

Это свидетельствует о том, что линейные эффекты смешаны с эффектом парных взаимодействий, т.е.

$$b'_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}; \quad b'_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}; \quad b'_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

где b_i – вычисленные выборочные оценки коэффициентов;

β_i, β_{ij} – независимые истинные значения линейных коэффициентов и коэффициентов парного взаимодействия.

Однако, постулируя линейную модель, исследователь предполагает, что эффекты взаимодействия близки к 0, т.е.

$$b_1 \approx \beta_1; \quad b_2 \approx \beta_2; \quad b_3 \approx \beta_3.$$

Если же эксперимент не подтвердит исходной предпосылки, то для определения несмешанных оценок всех коэффициентов уравнения необходимо построить вторую половину матрицы типа 2^3 . В этом случае x_3 приравнивается к “ $-x_1x_2$ ”. Что позволяет найти новые смешанные оценки линейных факторов

$$b_1'' \rightarrow \beta_1 - \beta_{23}; \quad b_2'' \rightarrow \beta_2 - \beta_{13}; \quad b_3'' \rightarrow \beta_3 - \beta_{12}.$$

Используя смешанные оценки, можно найти отдельные оценки как линейных эффектов, так и эффектов парного взаимодействия:

$$b_1 = (b_1' + b_1'')/2; \quad b_2 = (b_2' + b_2'')/2; \quad b_3 = (b_3' + b_3'')/2;$$

$$b_{12} = (b_3' - b_3'')/2; \quad b_{13} = (b_2' - b_2'')/2; \quad b_{23} = (b_1' - b_1'')/2.$$

Таким образом, для построения дробных реплик при введении в планирование нового фактора необходимо поместить этот фактор в вектор-столбец матрицы, принадлежащей взаимодействию, которым можно пренебречь.

Для обозначения дробных реплик, в которых p линейных эффектов приравнены к эффектам взаимодействия, используется выражение ДФЭ типа 2^{k-p} . Тогда, если, например ПФЭ типа 2^5 включает 32 опыта, то его полуреплика 2^{5-1} содержит 16 опытов; а четвертьреплика – 2^{5-2} – 8 опытов.

Произведение основных факторов, определяющих значение элементов дополнительных столбцов матрицы плана **называют генерирующим соотношением.**

Так, при построении полуреплики типа 2^{3-1} в качестве генерирующего соотношения может быть принято произведение основных факторов x_1 и x_2 , т.е. $x_3 \equiv x_1x_2$ или $x_3 \equiv -x_1x_2$.

При построении полуреплики 2^{4-1} выбор генерирующего соотношения усложняется, т.к. в этом случае экспериментатор может в качестве генерирующего соотношения принять любое из 8 возможных соотношений:

$$x_4 \equiv x_1x_2; \quad x_4 \equiv x_1x_3; \quad x_4 \equiv x_2x_3; \quad x_4 \equiv x_1x_2x_3;$$

$$x_4 \equiv -x_1x_2; \quad x_4 \equiv -x_1x_3; \quad x_4 \equiv -x_2x_3; \quad x_4 \equiv -x_1x_2x_3.$$

Общее количество множества возможных генерирующих соотношений при построении полуреплик 2^{k-p}

$$Q = A_m^p \cdot 2^p,$$

где A_m^p – число размещений из элементов по p .

$$A_m^p = m! / (m-p)!,$$

где k – число исследуемых факторов;
 p – число новых вводимых факторов;
 m – количество вектор-столбцов взаимодействия.

Пример. Исследовать влияние режимов резания и физико-механических свойств (НВ) обрабатываемого материала на силу резания при торцовом фрезеровании чугуна ВЧ 50-1,5.

Для нахождения зависимости $P_T = f(v, S_z, t, \text{НВ})$ может быть использован ПФЭ типа 2^4 , который потребует реализации 16 опытов.

Однако предварительные исследования показали, что эффекты взаимодействия между исследуемыми факторами (v, S_z, t) незначимы. Поэтому для решения данной задачи можно использовать ДФЭ типа 2^{4-1} , приняв в качестве генерирующего соотношения $x_4 = x_1 x_2 x_3$, что позволит сократить число опытов при его реализации до $N=8$.

Учитывая, что дисперсии в каждой точке факторного пространства однородны, было решено воспользоваться схемой организации экспериментов с дублированием в одной точке (центре плана).

Выбранные уровни, матрица планирования и результаты приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Матрица ДФЭ типа 2^{4-1}

| № сер ии ОП ЫТ ОВ | Расширенная матрица планирования | | | | | | | | y_u | \hat{y}_u | $(\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2$ |
|--------------------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|-------------|-----------------------------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | $x_1 x_2$ | $x_1 x_3$ | $x_1 x_4$ | | | |
| 1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 895 | 868,8 | 686,4 4 |
| 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 830 | 853,8 | 566,4 4 |
| 3 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 1410 | 1408, 8 | 1,44 |
| 4 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 1200 | 1201, 4 | 1,96 |
| 5 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 1625 | 1626, 2 | 1,44 |

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|------|--------|---|
| 6 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 1420 | 1418,8 | 1,44 |
| 7 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 1950 | 1973,8 | 566,44 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 1985 | 1958,8 | 868,44 |
| Σ | 11315 | -445 | 1775 | 2645 | 385 | 95 | 105 | 5 | — | — | 2512,04 |
| b_i | 1414,375 | -55,625 | 221,875 | 330,625 | 48,125 | 11,875 | 13,125 | 0,625 | | | $x_4=x_1$ $\cdot x_2$ $\cdot x_3$ |

Твердость материала HB=246...255; $\Delta x_4=9$; $x_{40}=237$.

Дублирование опытов в нулевой точке дало следующие результаты:

$$y_{01}=1439 \text{ Н}; y_{02}=1393 \text{ Н}; y_{03}=1404 \text{ Н}; y_{04}=1446 \text{ Н}.$$

Среднее значение в нулевой точке $n_0=4$

$$\bar{y}_0 = \sum_{i=1}^{n_0} y_{0i} / n_0 = 5682 / 4 = 1420,5 \text{ Н}.$$

Дисперсия ошибки

$$S_{n0}^2 = \sum_{i=0}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2 / (n_0 - 1) = 2021 / 3 = 673,7 \text{ (Н}^2\text{)}$$

Анализ полученных данных показал, что из всех коэффициентов значимыми являются только b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 , т.к. для них выполняется условие $|b_i| > \Delta t_\alpha S$.

Тогда искомая математическая модель исследуемого процесса будет иметь вид

$$\hat{y}_u = -1414,4 - 55,6x_1 + 221,9x_2 + 330,6x_3 + 48,1x_4.$$

С ростом числа факторов использование полуреплик становится нецелесообразным, т.к. их реализация требует постановки большого числа экспериментов. Поэтому полуреплики типа $2^{6-1}, 2^{7-1}$, и т.д. практически не используются. Для дальнейшего сокращения объемов экспериментальных исследований необходимо увеличить дробность применяемых реплик.

3.3 Планы второго порядка

Если в интересующей нас области описать процессы в объекте линейным уравнением не удастся, то переходят к планам второго порядка [12]. Полином второй степени определяется видом:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{ij=1}^c b_{ij} x_i x_j,$$

где c – число сочетаний из k факторов по 2.

Для получения коэффициентов регрессии в этом случае варьирования факторами на 2 уровнях недостаточно. Переход к ПФЭ на 3 уровнях связан с постановкой большого числа опытов. Так, для 4 факторов ПФЭ 3^4 требуется 81 опыт, а ПФЭ 3^5 – 243 опыта.

Однако Бокс и Уилсон обосновали возможность использования схем, в которых план типа 2^k дополняется “звездными” точками по 2 на каждый фактор, а также нулевыми в центре плана.

Так, для 2 входных переменных расположение точек факторного пространства будет иметь вид, рис.3.2.

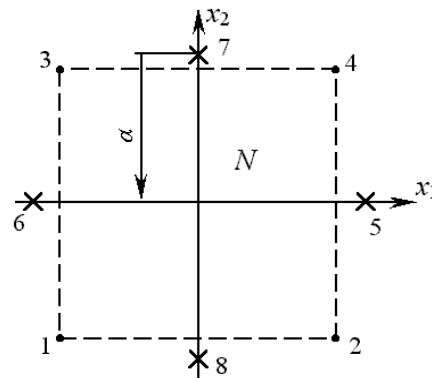


Рис.3.2 - Пример центрального рототабельного плана

Известен ряд методов построения матриц, расчетов коэффициентов регрессии, проверки адекватности планов второго порядка. Хорошие результаты дают центральные композиционные рототабельные планы, предложенные Боксом и Хантером. Данные для построения таких планов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Данные для матриц рототабельных планов второго порядка.

| Наименование | ПФЭ 2^n | | | | ДФЭ 2^{n-1} |
|----------------------------|-----------|---------|----------|----------|---------------|
| | n=2 | n=3 | n=4 | n=5 | n=5 |
| Число опытов ядра | $2^2=4$ | $2^3=8$ | $2^4=16$ | $2^5=32$ | $2^4=16$ |
| Число “звездных” точек | 4 | 6 | 8 | 10 | 10 |
| Число нулевых точек | 5 | 6 | 7 | 10 | 6 |
| Величина “звездного” плеча | 1,414 | 1,682 | 2,0 | 2,378 | 2,0 |

В качестве примера приведем матрицу рототабельного плана второго порядка для 3 факторов, таблица 3.8.

Данные столбцов 4, 5, 6 используются при постановке опытов и расчете коэффициентов регрессии, а столбцы 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12 – только для расчетов.

Коэффициенты регрессии определяются по следующим зависимостям:

$$b_0 = 0,1663 \sum_{u=1}^n y_u - 0,05679 \left[\sum_{u=1}^n x_1^2 y_u + \sum_{u=1}^n x_2^2 y_u + \sum_{u=1}^n x_3^2 y_u \right];$$

$$b_i = 0,0732 \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u;$$

$$b_{ii} = 0,0625 \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + 0,06889 \left[\sum_{u=1}^n x_1^2 y_u + \sum_{u=1}^n x_2^2 y_u + \sum_{u=1}^n x_3^2 y_u \right] - 0,05679 \sum_{u=0}^n y_u;$$

$$b_{ij} = 0,125 \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u.$$

Таблица 3.8 – Центральное композиционное рототабельное планирование

| № серии ОПЫ- ТОВ | Расширенная матрица планирования | | | | | | | | | | Пар а- метр y |
|---------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | x_1^2 | x_2^2 | x_3^2 | $x_1 x_2$ | $x_1 x_3$ | $x_2 x_3$ | |
| 1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_1 |
| 2 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | y_2 |
| 3 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | y_3 |
| 4 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | y_4 |
| 5 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | y_5 |
| 6 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | y_6 |
| 7 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | y_7 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | y_8 |
| 9 | +1 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_9 |
| 10 | +1 | -1,682 | 0 | 0 | 2,888 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{10} |
| 11 | +1 | 0 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{11} |
| 12 | +1 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | 2,888 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{12} |
| 13 | +1 | 0 | 0 | 1,682 | 0 | 0 | 2,828 | 0 | 0 | 0 | y_{13} |
| 14 | +1 | 0 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | 2,888 | 0 | 0 | 0 | y_{14} |
| 15 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{15} |
| 16 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{16} |
| 17 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{17} |
| 18 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{18} |
| 19 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{19} |
| 20 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_{20} |

3.4 Измерительная аппаратура для исследования машин

При проведении экспериментальных исследований работы машин используются современные электронные, практически безынерционные приборы – усилители, осциллографы, магнитофоны и т.д. Чувствительными элементами являются **датчики** – тензорезисторы, датчики линейной скорости, частоты вращения, ускорения и т.д. Принципиальная упрощенная схема измерений приведена на рис.3.3.



Рис.3.3 Структурная схема измерений.

Тензометрические датчики применяются для измерения мгновенных значений усилий, деформаций, перемещений, поворотов, крутящих моментов, давления и прочих физических величин [13,14].

Тензометрирование машин, механизмов, агрегатов и технического оборудования необходимо для оценки напряженно-деформированного состояния элементов, деталей и узлов при эксплуатационных или специальных режимах работы. **Основные цели тензометрирования:**

–изучение условий действительной работы деталей, узлов и несущих конструкций машин для проверки и оптимизации расчетных схем, установления критериев равнопрочности и совершенствования конструктивной формы отдельных узлов и деталей;

–установление фактических внешних нагрузок, статистических или функциональных закономерностей их появления;

–оценка воздействия на объект исследования различных условий внешней среды;

–проверка соответствия напряженно-деформированного состояния различным данным;

–определение количественных показателей надежности узлов и деталей машин при нормальной эксплуатации и при специальных режимах работы;

–изучение влияния технологических операций изготовления машиностроительных деталей и узлов на их прочность и надежность.

Методы тензометрии основаны на изучении и измерении деформаций, что в большинстве случаев дает возможность оценки напряженного состояния.

3.4.1 Методы и средства тензометрии

Для экспериментального определения **напряженно-деформированного** состояния узлов машин применяются методы и средства, в которых использованы различные принципы измерений. Методы тензометрии можно подразделить на группы:

- рентгеновские;
- поляризационно-оптические;
- муаровых полос;
- хрупких покрытий;
- гальванических покрытий;
- методы, основанные на преобразовании деформаций поверхности объекта исследований с помощью тензометров.

Одним из основных элементов тензодатчиков является тензорезистор. **Тензорезистор** – прибор, действие которого основано на принципе изменения сопротивления металлов и полупроводников под действием деформаций.

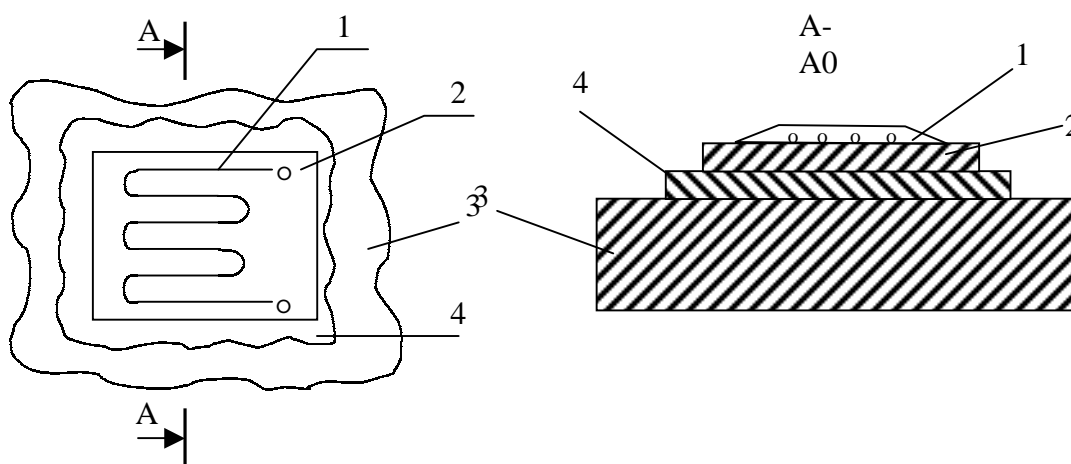


Рис. 3.4 – Вид тензорезистора

Тензорезистор включает решетку 1 из тонкой проволоки или фольги толщиной 0,004...0,03 мм. Материал решетки – константан или сплав НМ23ХЮ. В качестве чувствительного элемента может выступать и полупроводниковый монокристалл из кремния или

германия. С помощью клея или цемента чувствительный элемент соединен с основой 2. На объекте исследования 3 тензорезистор прикрепляется при помощи клея 4. Для электрического соединения тензорезистора с измерительными схемами имеются выводы 5.

Геометрические размеры наклеенного на деталь датчика при деформации детали изменяются. Изменение длины, сечения и структуры проводника резистора обуславливают изменение его электрического сопротивления.

Кроме фольговых и проволочных датчиков для исследований применяют и полупроводниковые датчики.

Достоинством полупроводниковых датчиков является высокая чувствительность, которая в 50..60 раз выше, чем у проволочных. Поэтому можно обходиться без усилителей.

Недостатки полупроводниковых датчиков:

1. Недостаточная прочность и податливость.
2. Высокая чувствительность к параметрам внешней среды.
3. Нелинейность характеристик.

3.4.2 Тензометрические измерительные мосты постоянного тока

Изменение сопротивления проволочного тензорезистора, соответствующего предельно допустимым деформациям детали, сравнительно мало и может быть оценено величиной порядка 0,2%.

Столь малые значения $\frac{\Delta R}{R}$ можно достаточно точно измерить посредством мостовых, или дифференциальных схем, которые при измерениях выполняют следующие функции:

- осуществляют преобразование величины $\frac{\Delta R}{R}$ в пропорциональное значение напряжения или тока;
- дают возможность исключить температурные погрешности измерений.

Схема соединения тензорезисторов по мостовой схеме приведена на рис.3.5.

Напряжение на выходе схемы может быть рассчитано по формуле [13,14]

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}.$$

Мост находится в режиме равновесия, если $\frac{\Delta U}{U} = 0$. Это возможно при выполнении условия $R_1 R_4 = R_2 R_3$.

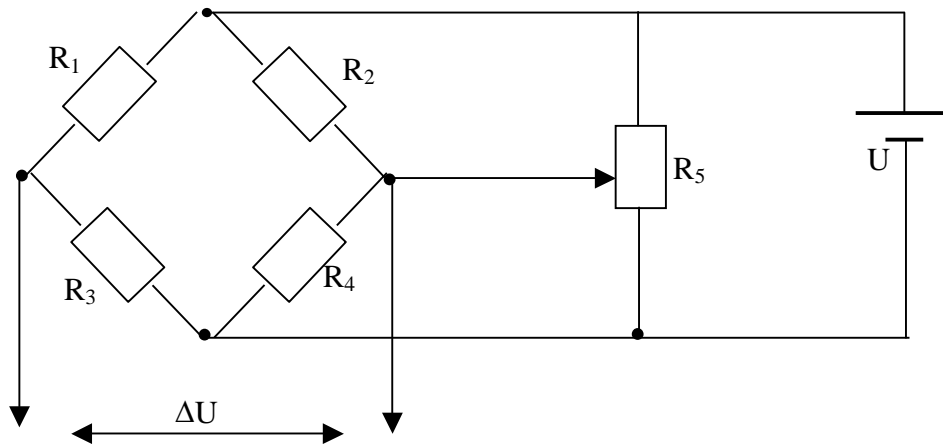


Рис.3.5- Мостовая схема соединения тензорезисторов

При наличии деформаций тензорезисторов мост выходит из равновесного состояния. Для уравнивания моста вводят переменный резистор R_5 .

3.4.3 Схемы расположения тензорезисторов на детали

1. Для фиксации деформаций сжатия или растяжения применяют следующую схему наклейки тензорезисторов, рис. 3.6.

Резисторы R_1 и R_2 ; R_3 и R_4 должны быть соединены так в паре, чтобы выполнялось неравенство

$$R_1^{\uparrow} R_2^{\uparrow} \neq R_3^{\downarrow} R_4^{\downarrow}$$

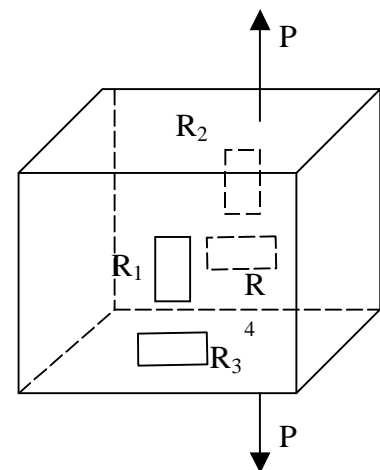


Рис. 3.6 - Схема измерений деформаций сжатия (растяжения)

2. Для фиксации деформаций изгиба схема наклейки тензорезисторов приведена на рис. 3.7.

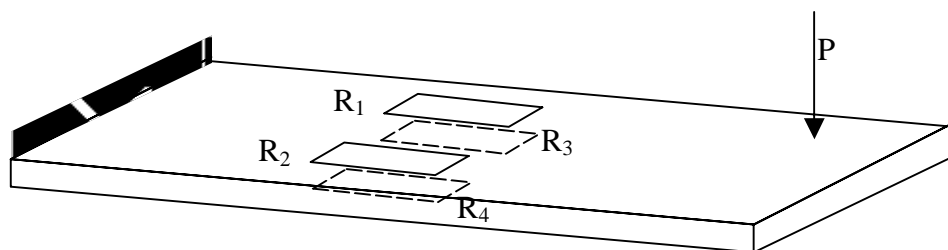


Рис.3.7- Схема измерений деформаций изгиба

Соединения резисторов должно быть таковым, чтобы выполнялось неравенство:

$$\uparrow R_1 \uparrow R_2 \neq \downarrow R_3 \downarrow R_4,$$

где знак \uparrow – символ растяжения резистора (увеличение его сопротивления),

\downarrow – символ сжатия резистора (уменьшение его сопротивления).

3. Для фиксации деформации кручения или крутящего момента схема наклейки тензорезисторов на валу (оси) приведена на рис. 3.8.

Схема соединения тензорезисторов должна удовлетворять условию

$$\uparrow R_1 \uparrow R_2 \neq \downarrow R_3 \downarrow R_4.$$

В рассмотренных схемах расположения тензорезисторов в некоторых случаях резисторы R_1-R_4 могут быть составными (из 2-х и более тензорезисторов) либо схемы расположения могут включать 2 тензорезистора – это “полумостовая” схема наклейки датчиков.

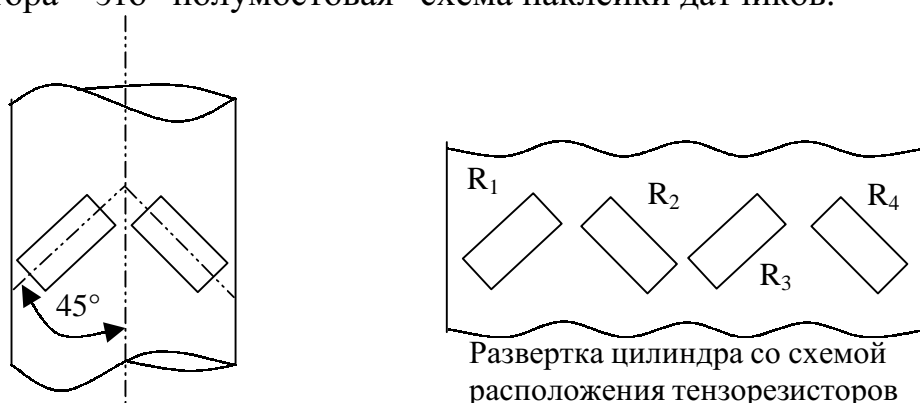


Рис.3.8- Схема измерений крутящего момента

3.4.4 Материалы, используемые для тензодатчиков

При проектировании механических датчиков важное место занимает выбор конструкционных материалов.

Так, стремление получить большую величину механического сигнала при минимальной нелинейной нагрузочной характеристике диктует выбор материала датчика, обладающего достаточной величиной предела текучести. Этому требованию удовлетворяют: шарикоподшипниковая сталь ШХ15, конструкционная 30ХГСА, 36НХТЮ. При доминирующем требовании к массе датчика можно использовать алюминиевый сплав АМг6 или сплав титана ВТ6.

При необходимости получения быстродействующего датчика при заданной его чувствительности используют материалы с наименьшей величиной произведения модуля упругости E на плотность ρ . Для этого используют сплавы алюминия и магния АМг6 и Д16Т. Эти сплавы характеризуются малой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью, высокой пластичностью. Они не подвержены хрупкости при низких температурах, могут применяться в условиях морского и тропического климата, агрессивной химической среды.

Общими требованиями к материалу датчиков являются технологичность при механической обработке, свариваемость, немагнитность и др. Этому удовлетворяют материалы из хромоникелевых коррозионностойких сплавов 12Х18Н9Т и 36НХТЮ.

3.4.5 Конструктивные особенности датчиков

Датчики малых перемещений

Необходимость в измерении перемещений возникает при прочностных исследованиях, оценке жесткости элементов и узлов, прогибов, поворотов и биений движущихся элементов машин, при определении износа элементов машин в процессе их эксплуатации.

Измерения перемещений выполняются как в статическом, так и динамическом режимах. Граница диапазона измерений от сотых долей миллиметров до сотен миллиметров. Частотный диапазон – 0...100 кГц.

В зависимости от назначения и рабочего диапазона форма и размеры датчиков могут быть разнообразны:

- элементы балочного типа;
- элементы рамочного типа;
- элементы арочного типа;
- элементы кольцевого типа;
- элементы мембранного типа, рис. 3.9.

Датчики сил и крутящих моментов

а) балочного типа

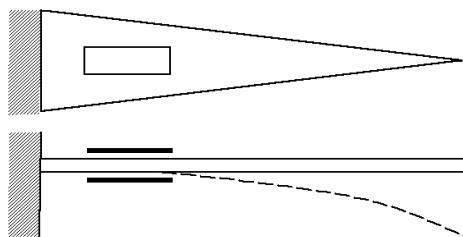
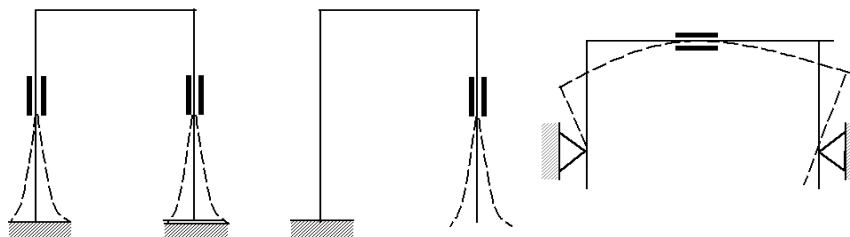


Рис.3.9- Схемы датчиков

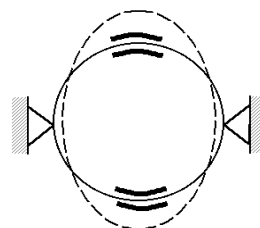
б) рамочного типа



в) арочного типа



г) кольцевого типа



Результаты экспериментальных исследований деформаций и напряжений в узлах и деталях машин, а также других механических параметров чаще всего являются функциями действующих в узлах сил и моментов сил.

Измерение сил осуществляется двумя способами:

1. **Первый способ** основан на измерении деформаций узлов, передающих или воспринимающих силу. Возможность использования этого способа определяется условиями:

- деталь должна работать в пределах пропорциональности;
- измеряемая деформация должна быть однозначно связанной с определяемой силой (в противном случае будет наблюдаться погрешность);

- деталь должна быть легкоъемной, для проведения градуировки;

- рабочее сечение тензометрируемой детали должно быть таким, чтобы минимальное напряжение составляло 300 даН/см^2 (при меньших напряжениях чувствительность будет недостаточна). В силу приведенных условий такой способ имеет ограниченное применение.

2. **Второй способ** состоит во введении специального тензорезисторного преобразователя силы в разрыв исследуемой силовой цепи. Такой способ позволяет измерять значения сил, когда непосредственная наклейка тензорезисторов на объект исследования слишком сложна или невозможна.

Конструктивные схемы силоизмерительных датчиков приведены на рис. 3.10.

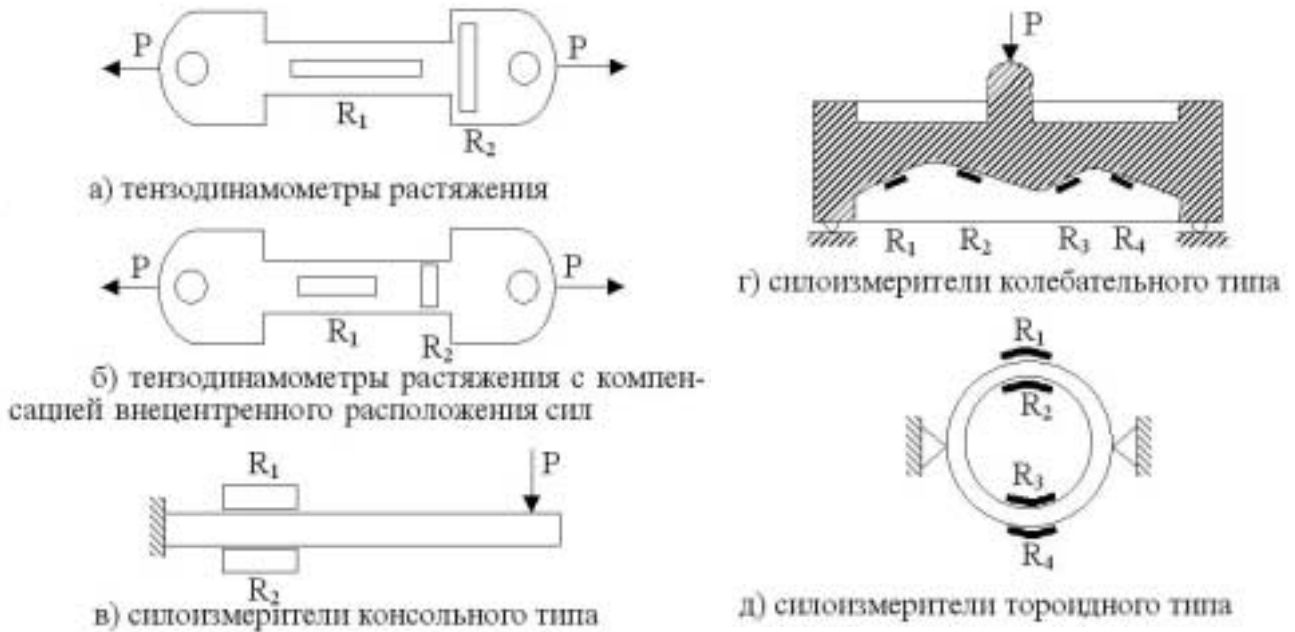
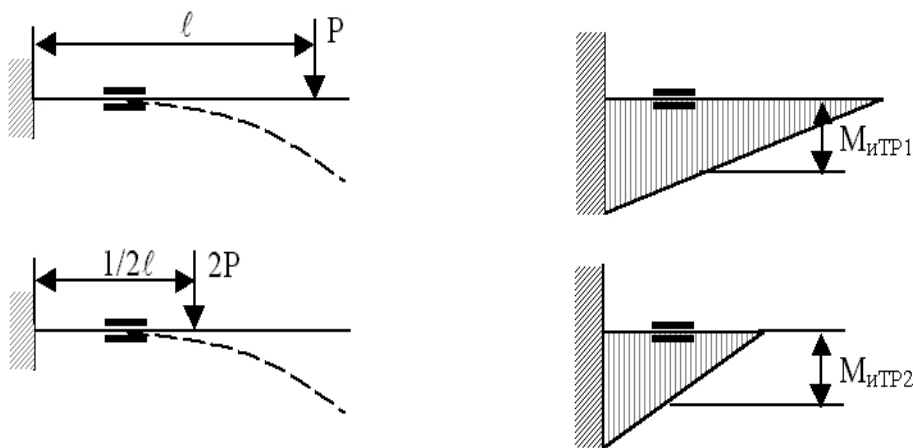


Рис.3.10 - Конструкции датчиков для измерения одноосной силы

Приведенные схемы конструкций хорошо себя зарекомендовали при определении динамически изменяющихся сил, но с постоянным



$$M_{ИТР1} = M_{ИТР2}, \text{ но } P \neq 2P; \quad l \neq 2l$$

Рис.3.11- Схемы нагружения балочных датчиков

их местом приложения. Если же неизвестно не только величина силы, но и место ее приложения, то пользоваться такими динамометрами

нельзя, т.к. при различном месте приложения силы P (см. рис. 3.11) и при вариации силы P , но в одном месте приложения, изгибающие моменты, (а значит и деформации тензорезисторов) могут быть одинаковыми.

Поэтому для определения сил, место приложения которых в пространстве непостоянно, применяют другие схемы датчиков и схемы расположения тензорезисторов, рис. 3.12 (силоизмерители консольного типа).

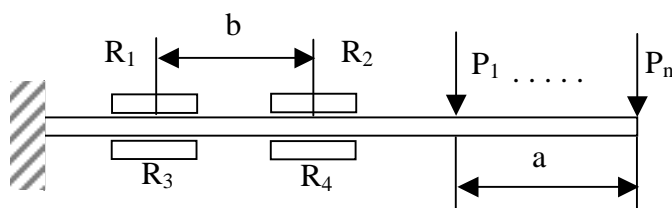


Рис.3.12 - Датчик консольного типа для измерения силы

Так, при приложении усилия P в в промежутке «а» значения деформации датчиков будут постоянными, если они соединены по дифференциальной схеме. Тогда, поскольку «b»=const, разность

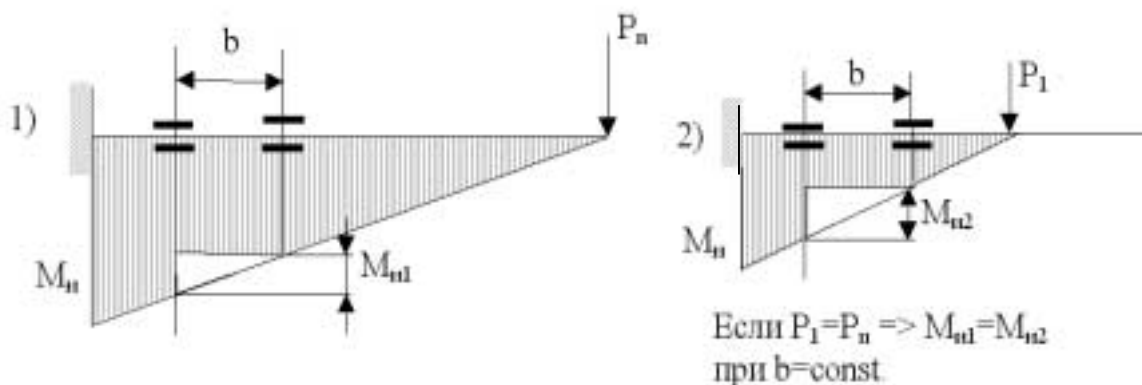


Рис.3.13 - Эпюра изгибающих моментов

деформаций пар датчиков (см. рис.3.13) будет также постоянной [15,16].

То же имеет место и для силоизмерителей, основанных на принципе П-образных балок (рис. 3.14). На рис.3.15 приведена одна из конструкций 3-х компонентного датчика силы, который предназначен для измерения сил. шлифования. Независимо от места приложения сил P , если $P_1=P_2$, то при $b=const$ $M_{и1}=M_{и2}$.

Такой принцип силоизмерения на П-образных балках заложен в конструкциях (разработанных на кафедре “Горные машины” ДОННТУ) двухкомпонентных и

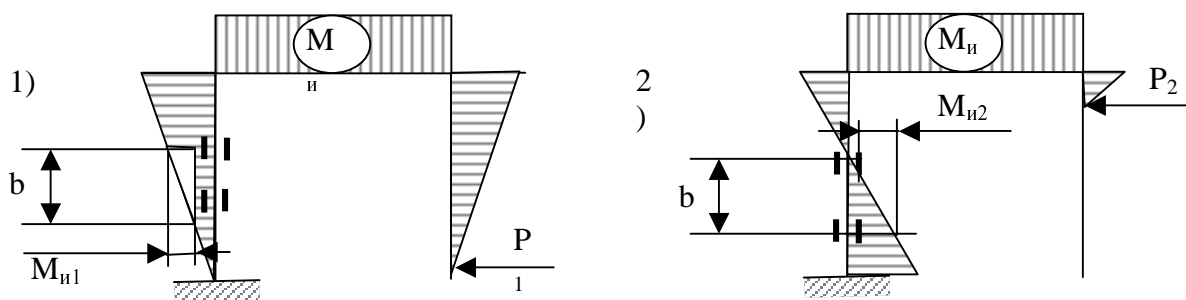


Рис.3.14 - П-образный датчик

трехкомпонентных тензодатчиков силы. Аналогов конструкции датчики не

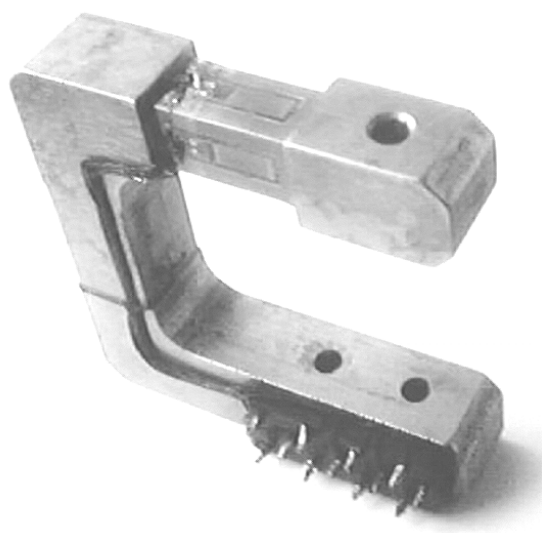
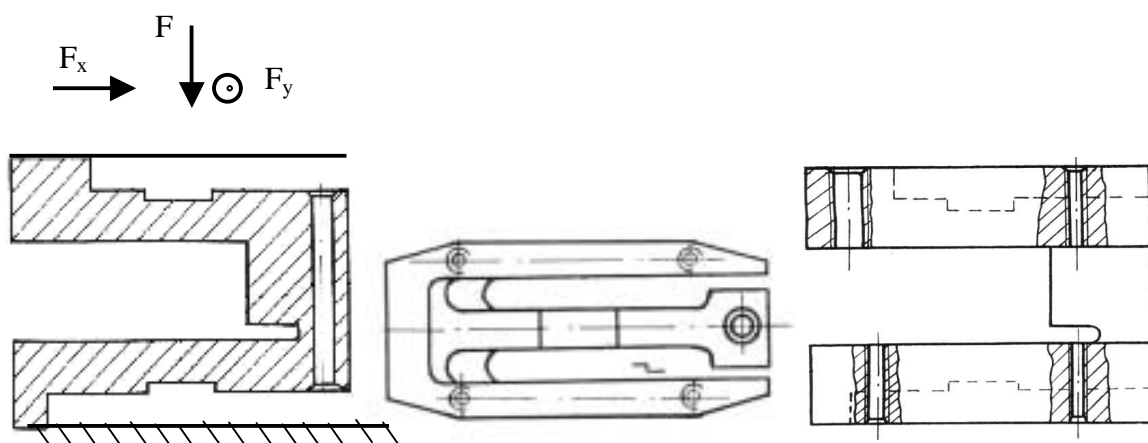
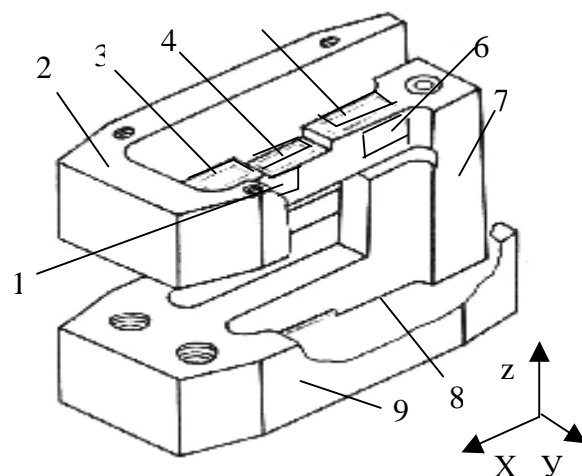


Рис.3.15 – Вид П-образного датчика для измерения 3 составляющих сил резания

имеют. Новизна и техническая значимость устройства подтверждены авторским свидетельством СССР №1041886. Конструкция 3-компонентного датчика сил и моментов приведена на рис.3.16. Устройство представляет собой жесткое соединение двух П-образных рам 2 и 9, рис.3.16, с дополнительной рамой 7, которая расположена перпендикулярно им. При помощи резьбовых отверстий в раме 9 устройство неподвижно крепится в месте установки. К раме 2, при помощи винтов, крепится пластина, воспринимающая внешние, подлежащие измерению усилия. Пластине придается форма, повторяющая форму рабочей поверхности рабочего органа в месте установки датчика. Тензорезисторы 1,3,4,5,6,8 расположены на измерительных брусках рамы 7. При помощи тензорезисторов 3 и 5 измеряются усилия F_z , при помощи тензорезисторов 4 и 8 - F_x , а при

помощи тензорезисторов 1 и 6 - F_y . Разработанный датчик позволяет измерять три составляющие усилия независимо от места приложения силы, с максимальной величиной взаимного влияния не превышающей 3 %, что позволяет устранить необходимость дополнительного электронного блока выделения компонент и упростить систему управления.

Рис. 3.16 – Схема конструкции трехкомпонентного силоизмерительного датчика



Другая схема **конструкции 3-х компонентного датчика** силы простой и технологичной конструкции с минимальной величиной взаимных влияний измеряемых усилий друг на друга (не превышают 3%) приведена на рис.3.17. Устройство разработано на кафедре «Технология машиностроения» ДонНТУ [17] представляет собой втулку, наружная поверхность которой располагается в расточке корпуса устройства. В проточках датчика располагаются тензорезисторы R1-R10, схема соединения которых приведена на рис.3.18. При этом на тензорезисторах R1-R4 моста формируются напряжения, пропорциональные усилию P_z , на тензорезисторах R5-R8 моста формируются

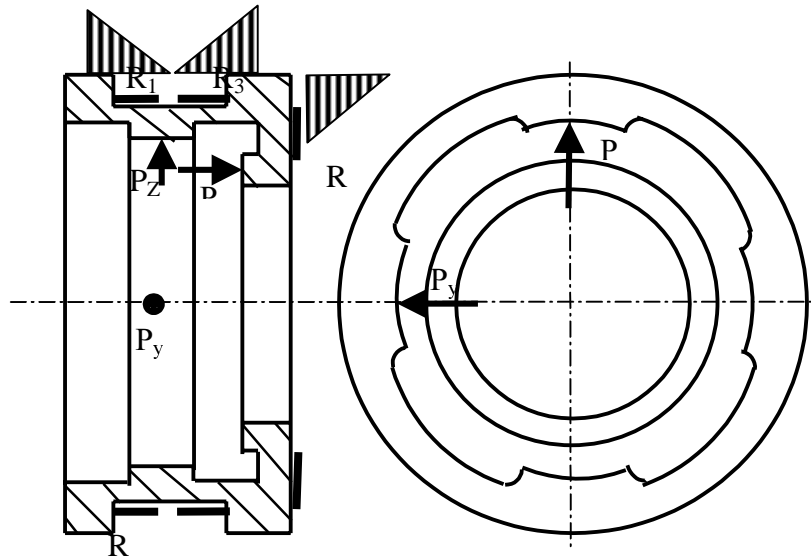


Рис. 3.17 – Схема конструкции датчика силы

напряжения, пропорциональные усилию P_y , на тензорезисторах R9-R10 – пропорционально усилию P_x [18].

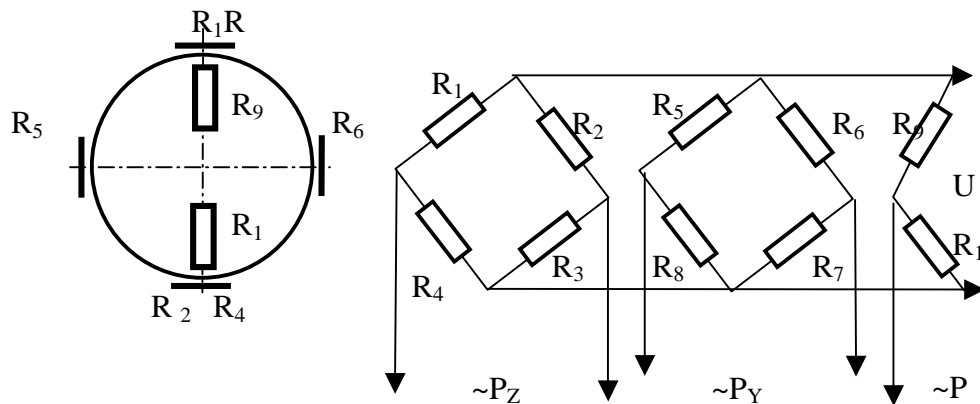


Рис.3.18 - Схема расположения тензорезисторов (а) и их подсоединения (б)

Конструктивные параметры сенсорного устройства (учитывая, что конструкция является тонкостенной и выразив наружный диаметр кольца сенсорного устройства через внутренний с учетом толщины стенки δ) будут иметь вид:

$$\pi\delta^3 + 2\pi r\delta^2 + \pi r^2\delta - W = 0$$

где δ – толщина стенки сенсорного устройства, $r=0,5D$ – радиус поверхности втулки, W – момент сопротивления сенсора.

Момент сопротивления сенсорного устройства определим как :

$$W = M_{и}/[\sigma]_{и},$$

где $[\sigma]_{и}$ - допускаемое по чувствительности тензодатчиков напряжения изгиба материала кольца сенсора, $M_{и}$ – изгибающий момент, действующий на сенсор.

Решив нелинейное уравнение третьей степени можно определить значение конструктивного параметра δ [19].

Одна из конструкций 3-х компонентного устройства для измерения усилий зацепления колесно-реечной передачи приведена на рис.3.19, [15, 16].

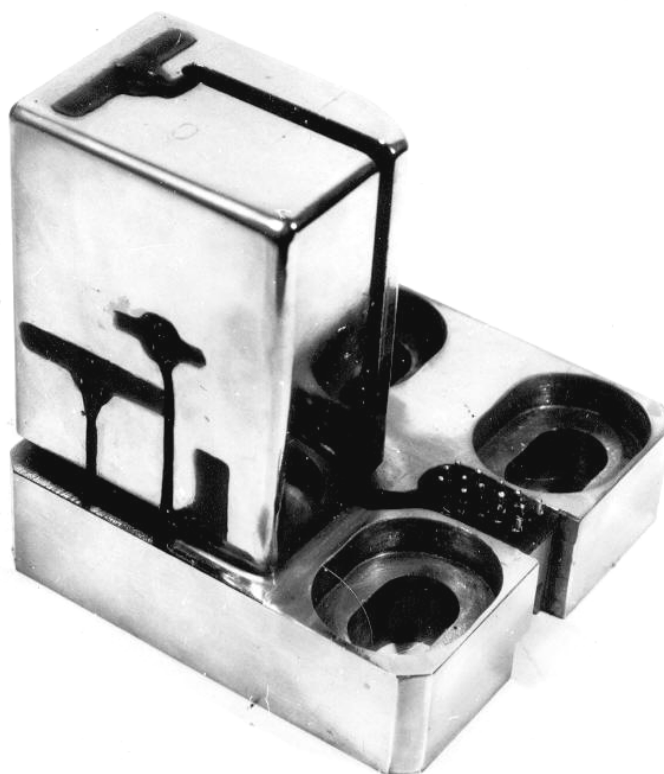


Рис.3.19 – Вид конструкции тензозуба рейки

Датчики для измерения крутящего момента

Определение величины моментов сил в приводах и трансмиссиях машин с помощью тензорезисторов производится тремя способами:

- 1) непосредственным измерением деформаций закручивания вала исследуемого механизма;
- 2) измерением окружной силы, передаваемой специальным силоизмерителем;
- 3) специальным тензометрическим преобразователем крутящего момента.

Первый способ прост. Однако далеко не на каждый вал можно наклеить тензорезисторы. Кроме того некоторые валы выполняют с большим запасом прочности, что уменьшает измеряемые деформации, увеличивая тем самым погрешность измерения.

Второй и третий способы обеспечивают наибольшую точность, но требуют демонтажа и даже временного изменения конструкции исследуемого узла или разрыва силовой цепи, что не всегда осуществимо.

Первый способ может быть осуществлен наклеиванием тензорезисторов по мостовой или полумостовой схеме с расположением осей тензорезисторов под углом 45° к оси детали, см. рис. 3.20.

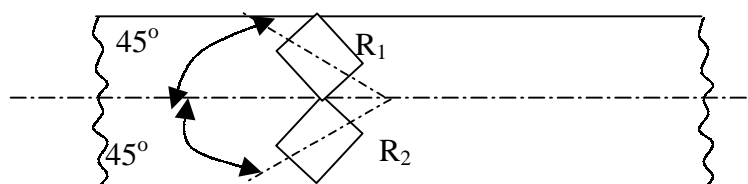


Рис.3.20 - Схема расположения тензорезисторов для измерения крутящего момента

Для передачи электрического сигнала при таком способе необходимо применение токосъемного вращающего устройства (т.к. вал вращается, а провода порвутся).

Крутящий момент можно измерить при помощи установки дополнительного устройства – преобразователя крутящего момента, который представляет собой тензовал с токосъемным устройством 2. Концы вала снабжены шпоночными пазами 3 или шлицами для соединения в трансмиссии, рис. 3.21.

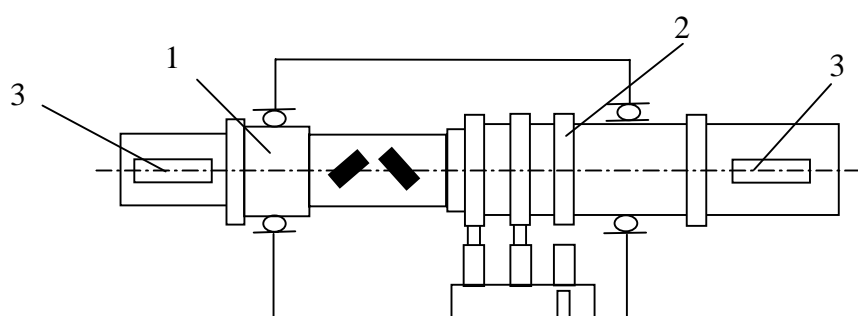


Рис.3.21 - Схема преобразователя крутящего момента

Здесь используется токосъемное устройство в виде колец из диэлектрика с кольцевыми тоководами и щеток.

Для измерения относительно малых значений моментов силы применяют преобразователи, где тензорезисторы 1 наклеивают на изгибаемые чувствительные элементы 2, см. рис.3.22.

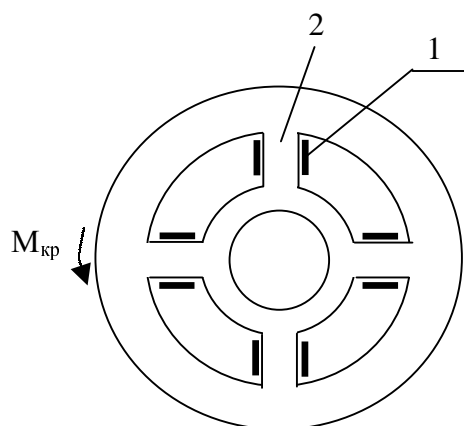


Рис.3.22- Схема преобразователя для измерения малых значений моментов

Однако и при такой конструкции преобразователя необходимо использование токосъемного устройства.

Одна из схем конструкции преобразователя, применительно к кулачковой муфте токарного станка с ЧПУ модели 16К20Ф3, приведена на рис. 3.23, [20].



Рис.3.23 – Правая полумуфта резцедержателя, используемая в качестве упругого элемента датчика

Конструкция датчика и предложенная на рис.3.24 схема установки тензорезисторов позволит использовать настоящий датчик в системе адаптивного управления токарным станком [20].

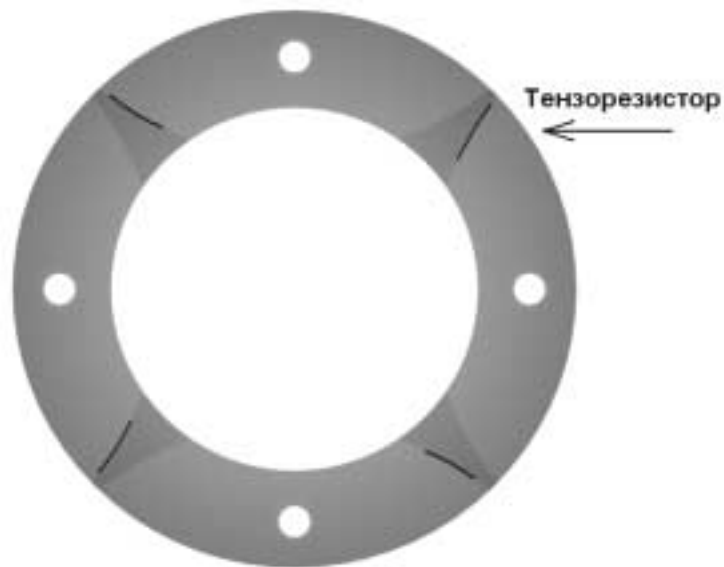


Рис.3.24 – Схема установки тензорезисторов на прорези корпуса правой полумуфты станка 16K20Φ3

В качестве измерительной системы можно использовать стандартную мостовую систему измерения рис.3.25.

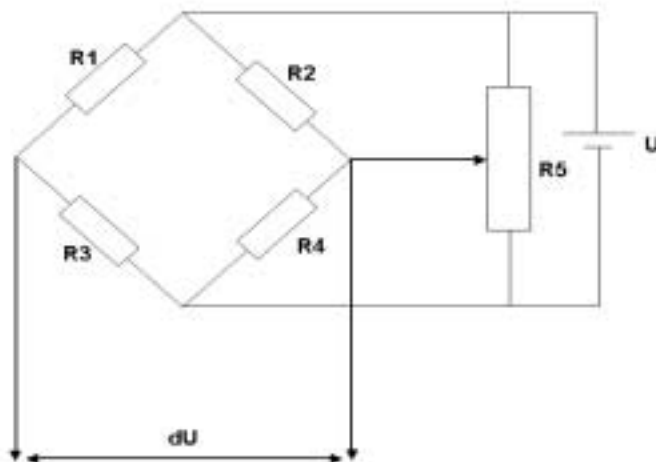


Рис. 3.25 – Мостовая измерительная система датчика

3.4.6 Устройства для измерения перемещения механизмов

Для измерения характеристик перемещения (пройденного пути, линейной и угловой скорости, ускорений) элементов машин и приспособлений могут использоваться следующие датчики:

- 1) тензометрические балочки;
- 2) потенциометрические датчики;
- 3) генераторные датчики угловой скорости;

- 4) индукционные датчики линейной скорости;
- 5) инерционные ускорениемеры.

1. **Тензометрические балочки.** Применяются для точного измерения перемещения элементов машин на небольшую величину (до 200мм), рис.3.26, [21].

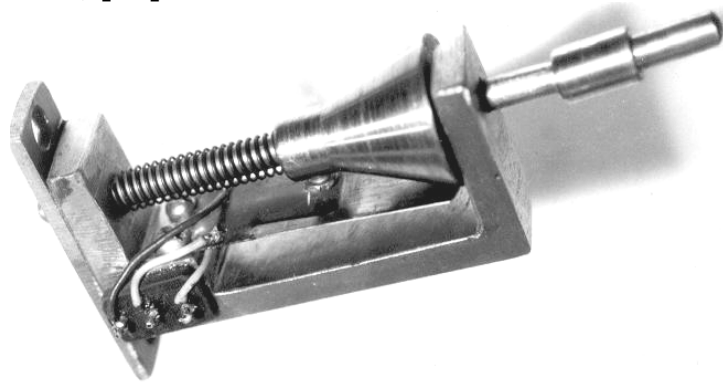


Рис.3.26 – Вид тензометрической балочки консольного типа

2. **Потенциометрические датчики.** Применяются для измерения перемещений элементов машин на большие расстояния по сравнению с первым случаем. Однако такие датчики менее точны за счет дискретного изменения сопротивления проволочных резисторов при контакте щупа с обмоткой.

Конструктивно выполнены в виде проволочных (нихромовых, константановых) резисторов со скользящим по обмотке щупом, связанным с движущимся предметом, рис.3.27

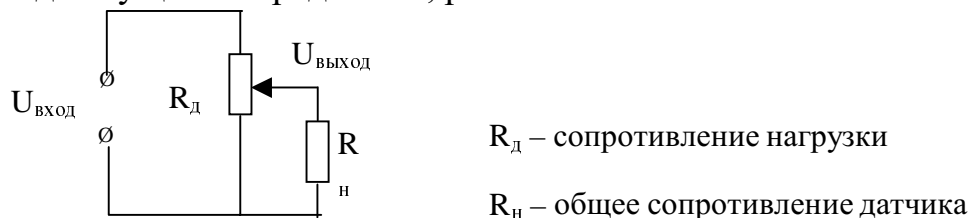


Рис.3.27 - Схема потенциометрического плоского датчика

Потенциометр может быть выполнен и в виде сегмента с проволочным сопротивлением, по которому скользит щуп. Щуп снабжен шкивом, который соединен либо с вращаемым элементом машины, либо тросиком с поступательно перемещаемой частью машины или механизма, рис. 3.28.

3. Генераторные датчики угловой скорости

Представляют собой, либо генераторы постоянного тока, либо генераторы переменного тока с выпрямительными устройствами электронного или механического характера. Датчики используются для определения характера движения, его скорости и ускорений. Результаты определения параметров движения используются как в

средствах автоматизации технологических процессов, так и для проведения исследовательских работ

Принципиальная схема датчика угловой скорости приведена

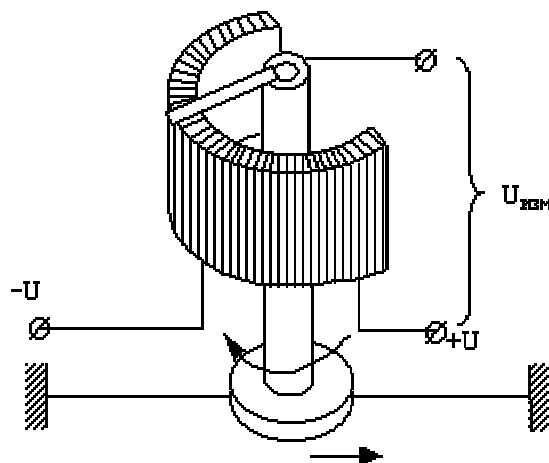


Рис.3.28 - Схема сегментного потенциометра

на рис.3.29. Датчик представляет собой трехфазный генератор переменного тока с механическим выпрямителем, рис.3.30. Датчик состоит из статора, ротора и механического коммутатора. Ротор состоит из :

- 2-х полюсных наконечников 1, изготовленных из магнитомягкого материала,
- двух постоянных кольцевых магнитов 2,
- двух бронзовых стержней 3,
- основания 4 из мягкой стали,
- вала 5, соединенного с валом, скорость которого необходимо измерять.

На статоре генератора находится замкнутая тороидальная обмотка. Обмотка разбита на 3 части (H_1-K_1 , H_2-K_2 , H_3-K_3) и образует 3-х фазную систему. При вращении ротора в обмотках H_1-K_1 , H_2-K_2 , H_3-K_3 индуцируется ЭДС.

Механический коммутатор состоит из текстолитового диска и 3-х пар контактов. Диск вращается ротором и поочередно через 1/3 оборота размыкает ранее замкнутую пару контактов, далее замыкает следующую пару контактов. Для определения линейной скорости либо трос, либо датчик крепится на подвижной части машины, согласно схемы, приведенной на рис.3.31.

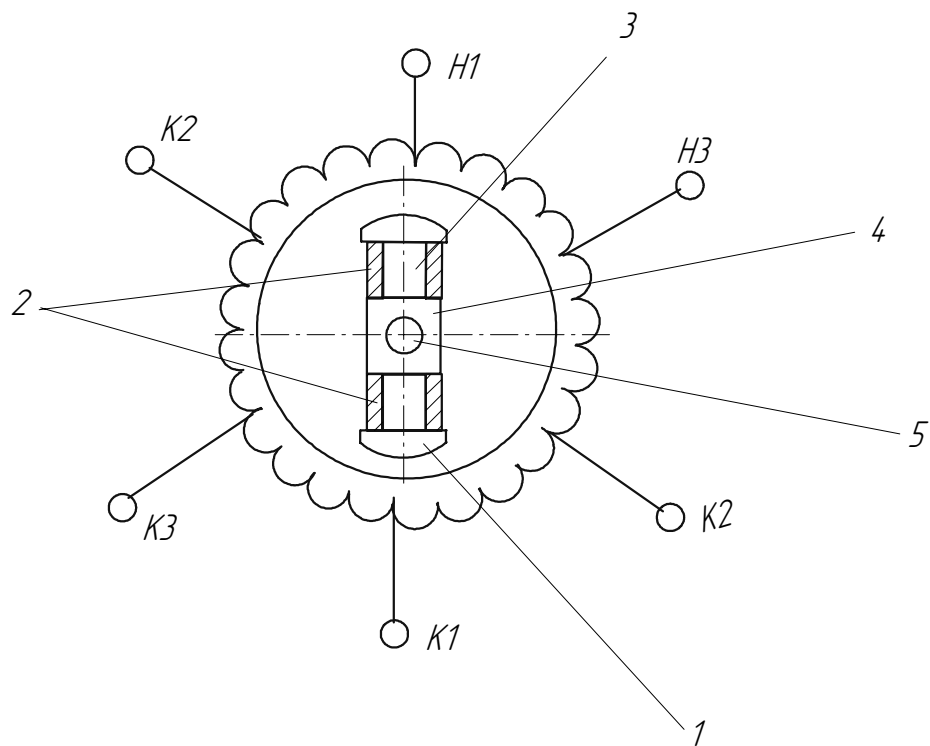


Рис.3.29 – Схема датчика угловой скорости



Рис.3.30 – Вид датчика угловой скорости

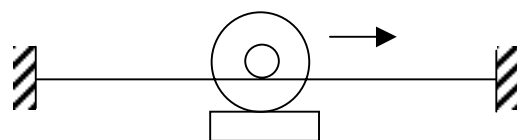


Рис.3.31 - Схема измерения линейной скорости

4. Индукционные датчики линейной скорости

Предназначены для измерения линейной скорости элементов машины и механизмов, рис.3.32. Принцип действия датчика основан

на том, что в воздушном зазоре магнитопровода перемещается цилиндр 1 из изоляционного материала с однослойной обмоткой на его поверхности. Магнитопровод образован цилиндрическим сердечником 2 с полюсным наконечником 3, трубой 4 и торцевой шайбой 5. Цилиндр 1 связан со штоком 6. Шток 6 контактирует с перемещаемым элементом исследуемого объекта. На сердечнике 2 навита обмотка, которая питается постоянным током.

При перемещении штока и цилиндра в однослойной обмотке индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения штока.

Разновидность конструкции индуктивного датчика линейной скорости (конструкции «Донгипроутглемаш») приведена на рис.3.33. Особенностью конструкции такого датчика является использование постоянного магнита.

Датчик состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть датчика состоит из магнитопровода 1, выполненного из опор 2,3, пласти 4, корпуса 5 из листовой стали, крышек 6 и 7 из дуралюмина.

На пластинах магнитопровода уложены однослойные обмотки 8.

Подвижная часть состоит из дуралюминовой каретки 9, в которой установлен постоянный магнит 10, и штоков 11 и 12.

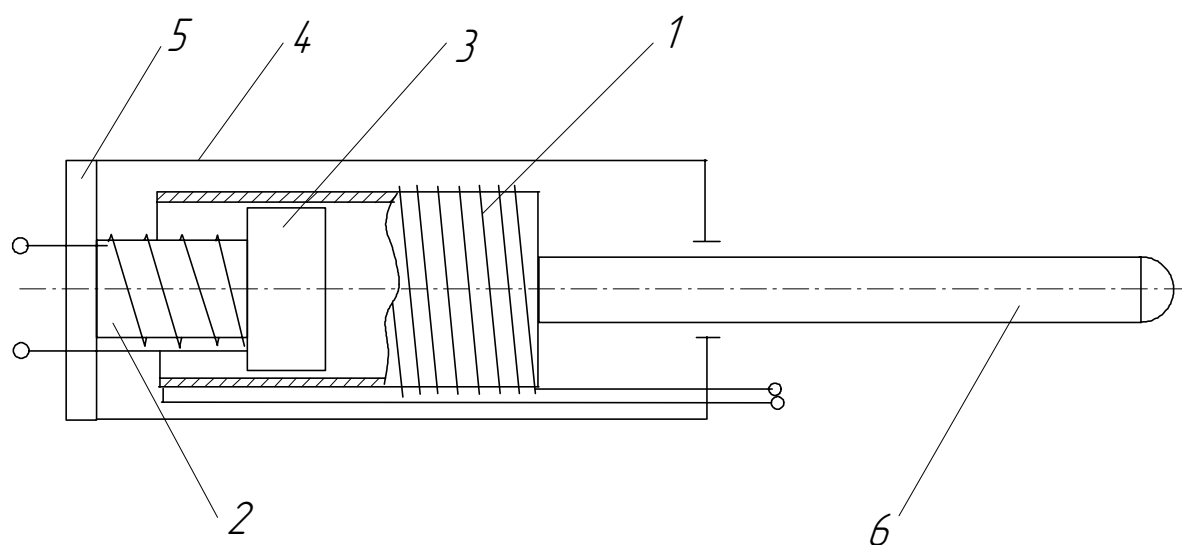


Рис.3.32 – Схема индуктивного датчика линейной скорости

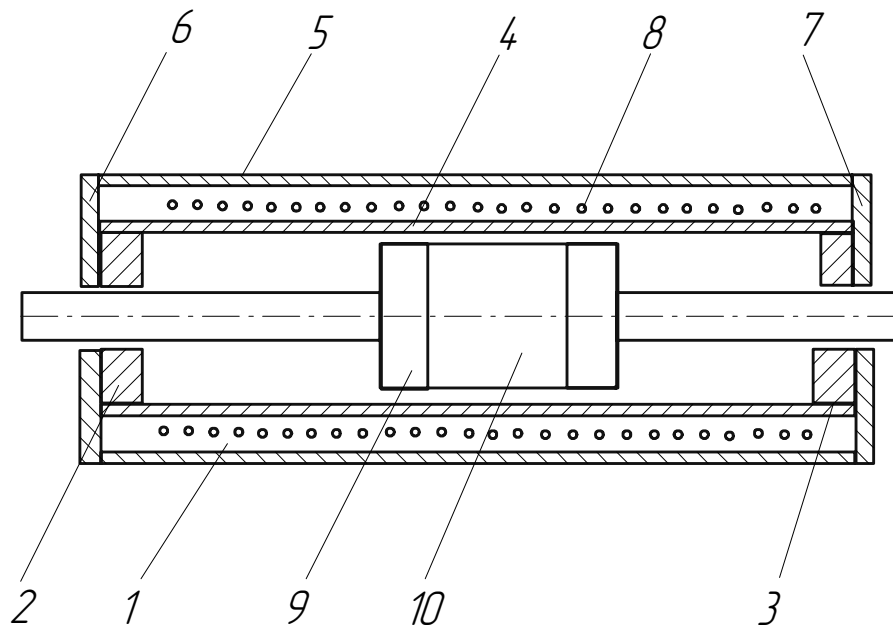


Рис. 3.33 – Схема индуктивного датчика конструкции Донгипроуглемаш

Недостатком конструкций таких датчиков является ограниченный ход штоков (не более 1000мм).

5. Ускоренимеры

Для измерения ускорения используют датчики инерционного типа, которые содержат инерционную массу 1, соединенную чувствительным элементом 2 с основанием преобразователя, рис. 3.34.

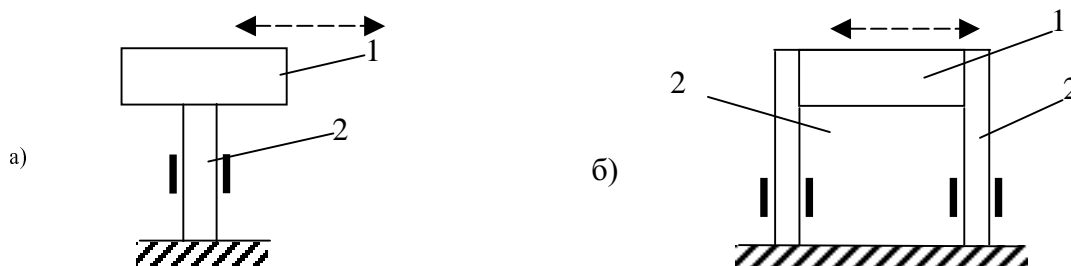


Рис.3.34 - Возможные схемы ускоренимеров

Возможность применения инерционных преобразователей в качестве ускоренимера определяется соотношением частот исследуемого процесса F_v к собственной частоте f_0 преобразователя и

величиной степени успокоения β (при заливке в корпус преобразователя демпфирующей жидкости). Должно выполняться условие $\frac{F_q}{f_0} \ll 1$.

На практике это соотношение удовлетворяет, если $f_0 > (5..10) \cdot f_n$.

Схема а), рис. 3.34, ускоренимера состоит из консольной балки чувствительного элемента с тензорезисторами (может быть как равного сечения, так и равного сопротивления изгибу) и закрепленной на корпусе балки инерционной массы. Расчет параметров ускоренимера сводится к расчету консольной балки на изгиб от силы инерции.

В схеме б), рис. 3.34, добавлена еще одна балка.

В качестве измерителей ускорения могут быть использованы датчики на основе пьезоэффекта, в конструкцию которых входят инерционные массы, пьезоэлементы, установленные в корпусе датчика, рис.3.35 , [22].

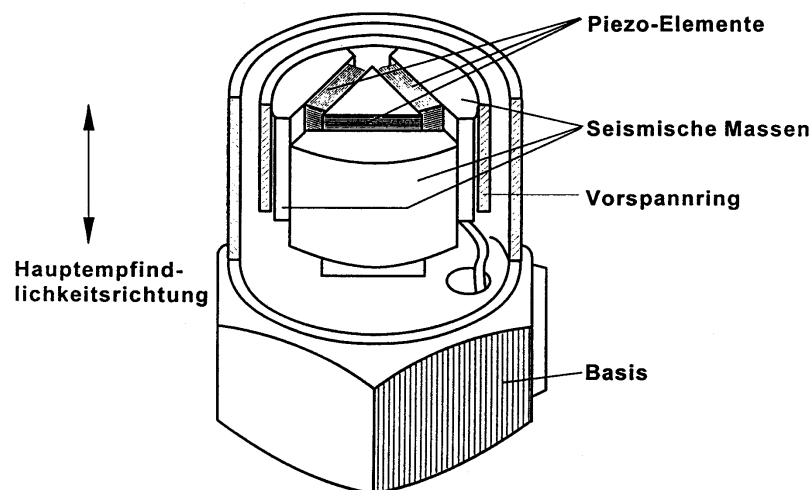


Рис.3.35 – Схема конструкции инерционного пьезодатчика-ускоренимера

3.4.7 Пьезоэлектрические измерители параметров работы машин

Пьезоэлектрические датчики с чувствительным элементом из пьезоматериала применяются для измерения мгновенных значений усилий, изгибающих моментов, деформаций, перемещений, поворотов, давления и других механических величин. Принцип работы пьезоэлемента при воздействии на него различных сил приведен на рис.3.36. Поскольку на выходе пьезодатчика при воздействии на него механического усилия образуется разность

потенциалов, пропорциональная деформации, то для ее фиксации необходимо преобразовать электрический сигнал, воспользовавшись схемой, рис.3.37.

Рассмотрим варианты конструкций пьезодатчиков.

Пьезодатчики кольцевого типа

Для непосредственного измерения упругих деформаций могут быть использованы пьезоэлектрические датчики **кольцевого типа**, действие которых основано на измерении заряда, пропорционального внутренним механическим напряжениям растяжения-сжатия или сдвига, вызванным действующей силой. Типичные датчики силы представляют собой кварцевые или пьезокерамические шайбы, установленные соосно в цилиндрическом корпусе (рис. 3.38).

Преимуществами пьезоэлектрических преобразователей являются их малые размеры и масса. Однако существуют технологические трудности изготовления кварцевых чувствительных элементов на нагрузки менее 10 Н, когда диаметр шайб должен быть очень мал.

Основной **недостаток** пьезоэлектрических чувствительных элементов проявляется в эффекте стекания заряда. Это приводит к тому, что при типичных значениях емкости датчика 10 пФ и суммарном сопротивлении утечки 10^{13} Ом нижняя граница частоты для динамических измерений составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-4}$ Гц, так как общая постоянная времени датчика достигает 10^3 с. Однако при единичном скачкообразном входном силовом воздействии уже через 1 с появится погрешность в 10^{-3} из-за стекания заряда.

Использование прямого пьезоэффекта обеспечивает в полной мере измерение только динамических и квазистатических сил. Поэтому пьезоэлектрические датчики подобного типа целесообразно использовать в тактильных системах, которые регистрируют факт наличия касания и мгновенное значение контактной силы, а также в силомоментных системах, предназначенных для измерения динамических сил.

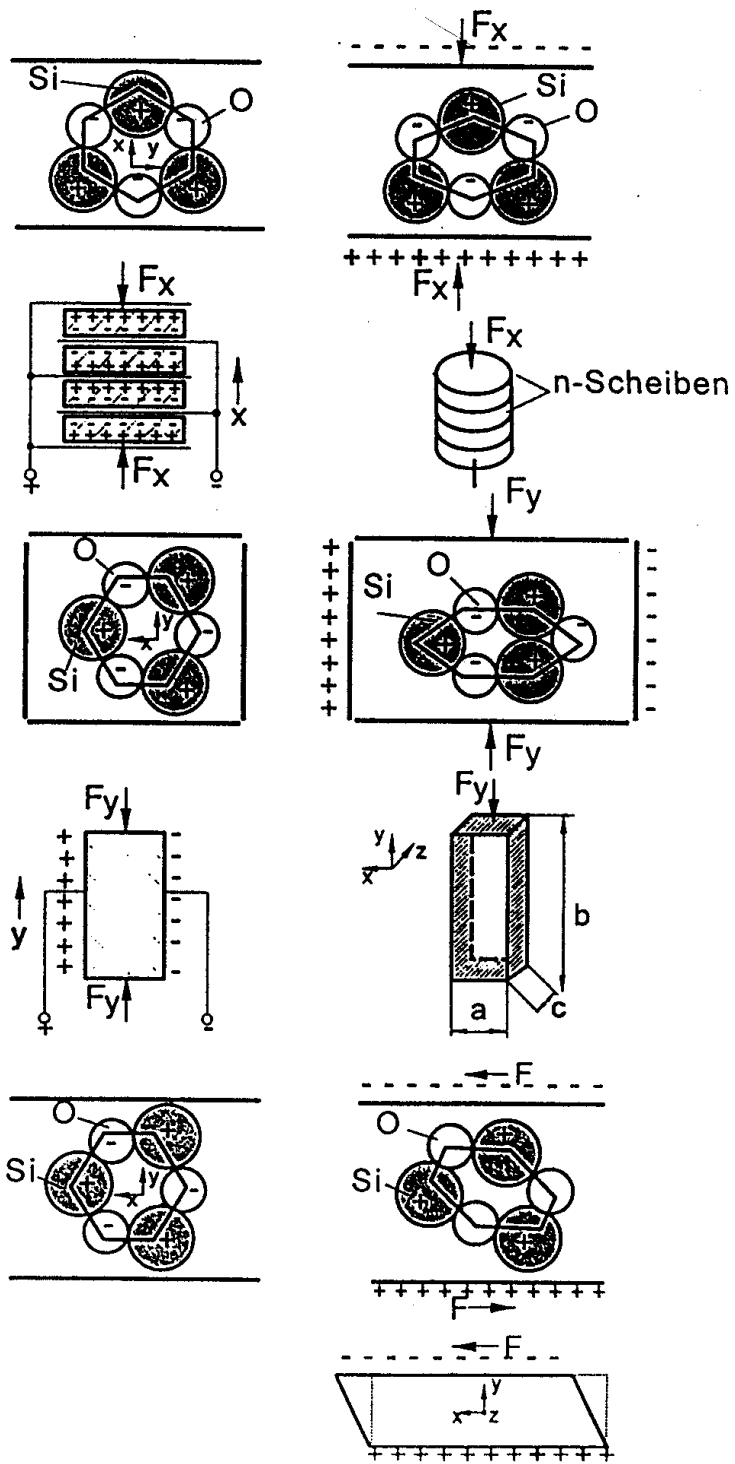


Рис.3.36 – Принцип работы пьезоэлемента

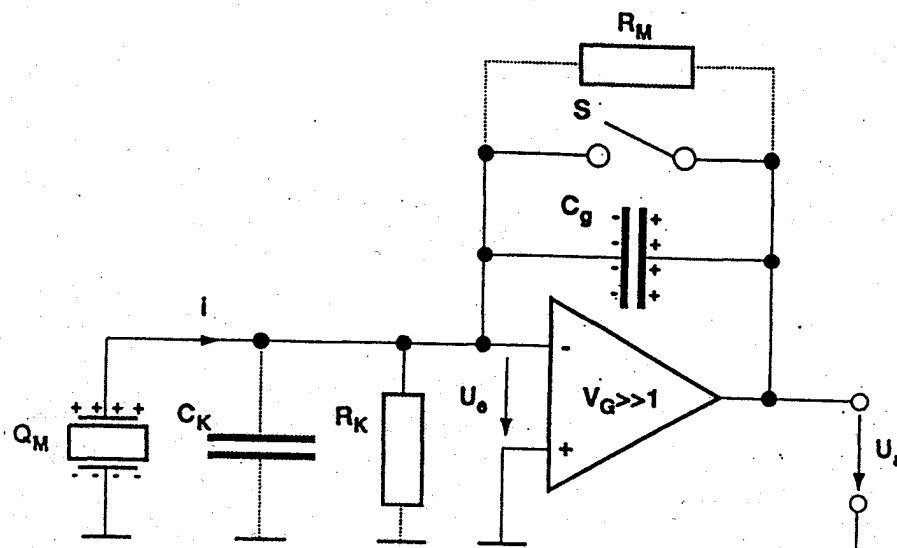


Рис.3.37 – Схема подключения пьезодатчика

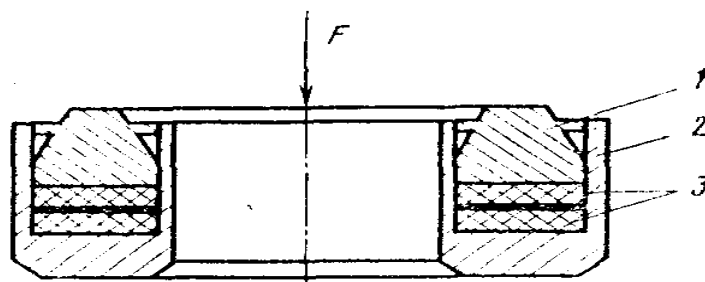


Рис. 3.38– Схема конструкции кольцевого пьезодатчика силы:

- 1. - силораспределительный элемент;
- 2. - корпус в виде упругой гильзы;
- 3. - кварцевые шайбы.

Измерение давления среды и вибраций при помощи пьезоэффекта

Используя особенности пьезоэффекта имеется возможность измерения изменяющихся величин давления жидкостей или газа, колебаний и вибраций деталей и частей механизмов. Схема конструкции пьезодатчика для измерения вибраций (схема конструкции которого аналогична схеме конструкции кольцевого пьезодатчика) приведена на рис.3.39. Вариант использования пьезодатчика в двигателях внутреннего сгорания приведен на рис. 3.40.

Пьезоэлектрические кварцевые и керамические датчики с измерением заряда находят применение, прежде всего при определении квазистатических сил при высоких температурах внешней среды и малых объемах для размещения датчика в устройстве. Значительные трудности возникают при использовании таких датчиков для измерения при повышенной влажности окружающей среды.



Рис. 3.39– Схема конструкции пьезодатчика вибраций

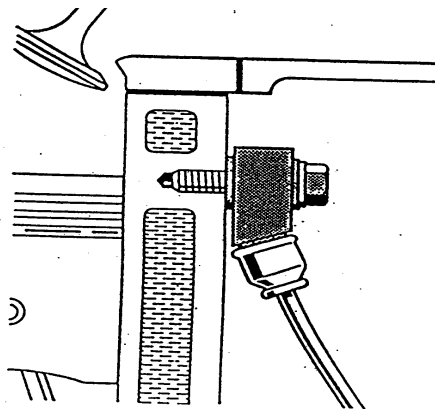


Рис.3.40 – Схема установки пьезодатчика вибраций на двигателе внутреннего сгорания автомобиля

3.4.8 Измерители параметров работы электропривода машин

В качестве электропривода механизмов и машин наиболее часто используются электродвигатели. Основными показателями, характеризующими работу электродвигателей, являются:

- напряжение – U ;
- сила тока – I ;
- мощность – N ;

- скольжение – S ;

В зависимости от характера задачи исследования возможны варианты измерения этих величин:

- мгновенные;
- средние.

Мгновенные параметры U , I , N , S характеризуют динамику работы электропривода и машины, средние – производительность машины и другие параметры.

1. Измерение мгновенных значений величин.

а) Измерение мгновенного значения силы тока I осуществляется трансформаторами тока УТТ-5М и УТТ-6М, которые собирают по схеме, приведенной на рис. 3.41.

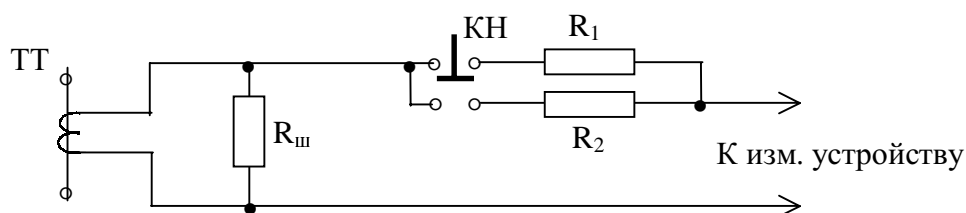


Рис.3.41 - Схема измерения мгновенной силы тока

На схеме обозначено:

ТТ – трансформатор тока;

КН – кнопка переключения;

$R_{ш}$ – сопротивление шунта;

R_1 и R_2 – добавочные сопротивления для измерения тока пуска и тока установившейся работы.

б) Измерение мгновенного напряжения U .

Измеряется обычно не величина абсолютного значения напряжения U_{ϕ} , а разница отклонения от номинального значения - $\Delta U(t)$:

$$\Delta U(t) = \Delta U(t) - U_n .$$

Приборы – трансформаторы напряжения.

в) Измерение электрически активной мощности.

Активная мощность может быть измерена по схеме двух однофазных ваттметров. Для этого используют измерительные преобразователи мгновенной величины мощности ПОО4 и ПОО5, которые позволяют осциллографировать процесс. В преобразователях используют эффект Холла.

г) Измерение скорости вращения двигателя.

На практике измеряют не мгновенное значение скорости вращения ротора электродвигателя, а скольжение ротора.

Конструкция датчика состоит из зубчатого колеса 1, устанавливаемого на валу ротора 2 двигателя и магнитоэлектрического преобразователя 3, рис. 3.42. При вращении колеса формируется сигнал с частотой

$$f = n * Z ,$$

где Z – количество зубьев зубчатого колеса;
 n – частота вращения колеса.

При этом в катушке наводится ЭДС. Скольжение двигателя:

$$S = \frac{n_c - n}{n_c} \equiv \frac{f_c - f}{f_c} = k * \Delta f ,$$

где n_c, f_c – синхронные скорость вращения и частота;
 n, f – скорость вращения и частота (мгновенные);
 k – коэффициент пропорциональности.

Но $\Delta f = f_c - f$, а $f = n * Z$.

При работе осуществляется измерение $\Delta f = f_c - f$.

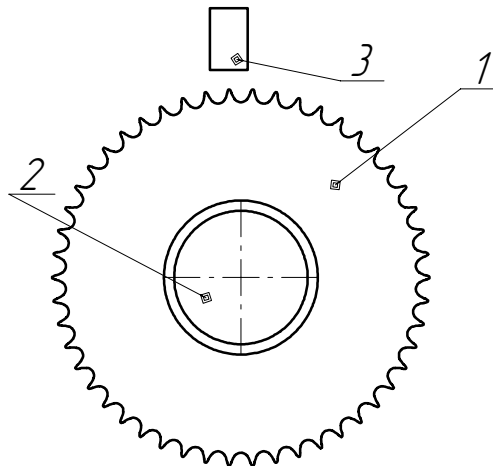


Рис.3.42 – Схема конструкции магнитоэлектрического преобразователя

2. Измерение медленно изменяющихся величин (средних).

а) Напряжение U и силу тока I измеряют и фиксируют при помощи самоизмеряющих приборов – вольтметра и амперметра, которые фиксируют среднюю величину U и I на диаграммную бумагу. При этом приборы на колебания U и I выше 4 Гц не реагируют. Схемы подключения вольтметров могут иметь вид, показанный на рис. 3.43.

При силах тока $I > 100$ А пользуются схемой подключения амперметра при помощи трансформатора тока УТТ, рис. 3.44.

б) **Измерение мощности.** Так как нагрузка в трехфазном электродвигателе по фазам равномерна, то в первом приближении можно воспользоваться измерением мощности с одной фазы с помощью самопишущих ваттметров.

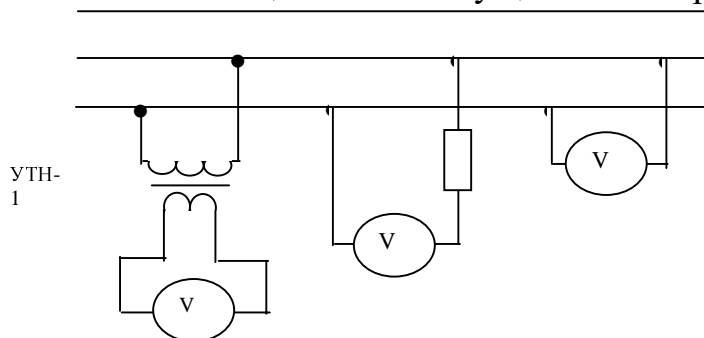


Рис.3.43 - Схемы подключения вольтметров

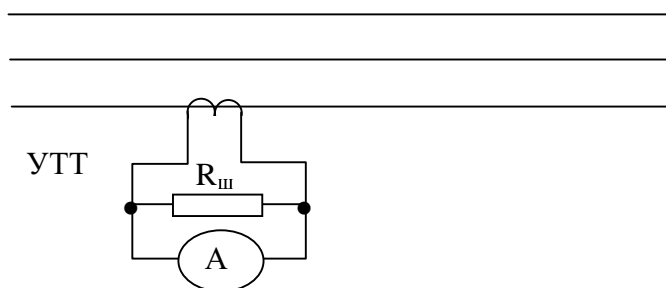


Рис.3.44 - Схема подключения трансформатора УТТ

3.4.9 Преобразователи давления жидкостей и газов

Необходимость в измерении давлений жидкостей и газов возникает при исследовании узлов машин с гидравлическим приводом, двигателей внутреннего сгорания, пневмоприводов и других объектов. Диапазон измеряемых давлений колеблется от сотых долей до сотен МПа. Также широк и частотный диапазон измеряемых давлений – 0...10 кГц. Объекты исследования, в которых измеряют давления, могут работать в широком диапазоне температур.

Давления при экспериментальных исследованиях определяют двумя способами:

- тензометрированием поверхности трубопровода;
- с помощью специальных преобразователей давления.

Основное преимущество первого способа измерения давления состоит в том, что не требуется рассоединения системы. Однако недостаточные чувствительность и точность ограничивают применение этого способа. Такой метод применяют, главным образом,

для качественных оценок. Например, для регистрации каких-либо характерных явлений в исследуемых процессах во времени.

В качестве специальных преобразователей используют датчики мембранного типа. Тензорезисторы 1 наклеивают непосредственно на мембрану 2 или на промежуточный преобразователь 3, связанный с мембраной 2, рис. 3.45.

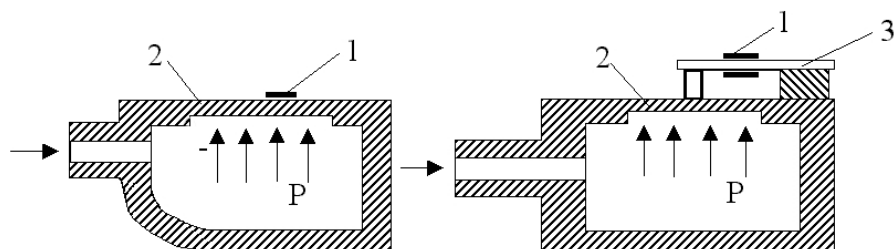


Рис.3.45 - Схемы измерения давления тензометрированием

С помощью мембранных преобразователей в зависимости от размеров мембран можно измерять давления в диапазоне 10^{-3} Па...20 МПа.

Для измерения более высоких давлений (выше 5 МПа) применяют цилиндрические чувствительные элементы.

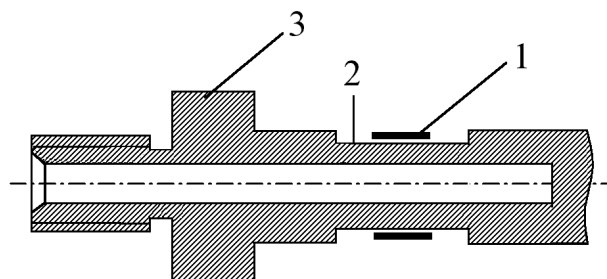


Рис.3.46 - Штуцерный преобразователь

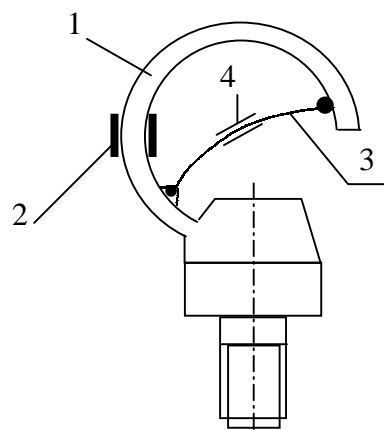


Рис.3.47 - Датчик в виде трубки Бурдона

Преобразователи выполняют в виде штуцера заглушки.

Тензорезисторы 1 размещают на наружной поверхности 2 датчика 3, рис. 3.46.

Для измерения статических и медленно изменяющихся давлений (до 10 Гц) можно использовать датчик в виде трубки Бурдона 1 от любого технического манометра с наклеенными на него тензорезисторами 2 или используя промежуточный преобразователь 3 с тензорезисторами 4, рис.3.47.



Рис.3.48 – Вид штуцерного датчика давления

3.4.10 Емкостные датчики

Емкостные измерительные преобразователи нашли широкое применение при проектировании датчиков уровнемеров и манометров, измерителей несплошности и других механических величин.

Емкостные преобразователи представляют собой электрические конденсаторы, емкости которых меняются вследствие изменения измеряемой величины площадей перекрытия обкладок.

По конструктивному решению чувствительных элементов (конденсаторов) емкостные датчики подразделяются на:

- плоскопараллельные;
- коаксиальные;
- стержневые;
- с обкладками из сеток и др.

Емкость датчика с плоскопараллельными обкладками, работающего в диэлектрических средах, можно записать в виде

$$C_1 = (\epsilon_0 \epsilon S) / d .$$

Если информативным параметром является расстояние d между обкладками или диэлектрическая проницаемость ϵ контролируемой среды, то

$$C_1 = [\epsilon_0 (\epsilon_r S_1 + \epsilon_c S_2)] / d ,$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная;

ϵ_c - диэлектрическая проницаемость измерительной среды;

ϵ_r - диэлектрическая проницаемость газообразной среды;

S - полная площадь перекрытия обкладок;

S_1 - площадь перекрытия части обкладок, расположенных в газообразной среде;

S_2 - площадь перекрытия обкладок, расположенных в исследуемой среде.

Широкое распространение получили емкостные уровнемеры дискретного и непрерывного действия, рис. 3.49.

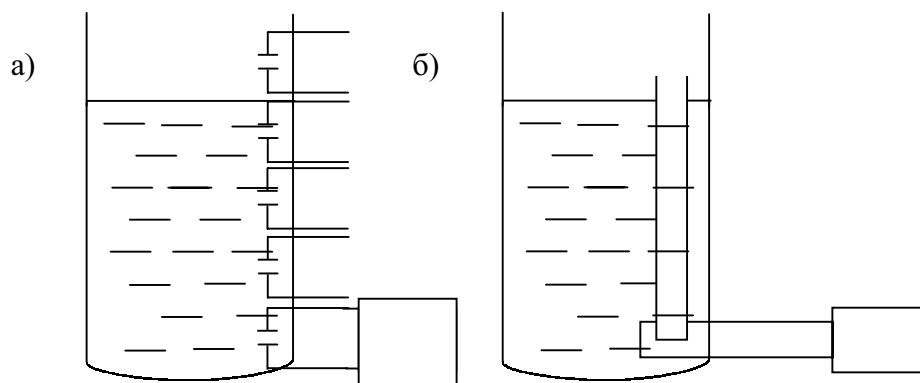


Рис.3.49 - Емкостные уровнемеры (а) дискретного и (б) непрерывного действия

Емкостные датчики могут быть использованы для измерения уровня как непроводящих, так и электропроводящих сред. В последнем случае обкладки датчиков изолируют от среды.

Основное преимущество емкостных датчиков-уровнемеров заключается в полном отсутствии каких-либо механических подвижных инерционных частей.

Емкостные датчики применяют и для измерения давлений, т.е. в качестве манометров. В их основе используют емкостные преобразователи, построенные на принципе изменяющегося воздушного зазора. Они работают как конденсаторные микрофоны, в которых изменение емкости получается за счет прогиба мембраны при воздействии измеряемого давления. Конструктивно такие датчики могут быть выполнены с тонкой деформируемой мембраной и с заземленной мембраной, рис.3.50.

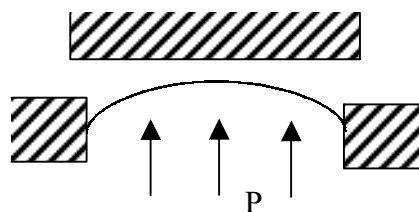


Рис.3.50 - Схема датчика с заземленной мембраной

3.4.11 Фотоупругие датчики

В ряде случаев при испытаниях машин и механизмов исключается возможность применения электроэнергии и громоздкой измерительной аппаратуры. В таких случаях можно использовать фотоупругие датчики. Такие датчики взрывобезопасны, обеспечивают достаточную точность измерений, легко монтируются на деталях, могут применяться во влажной среде, не требуют никаких дополнительных устройств, кроме лампы и переносного поляроида.

Рассмотрим конструкцию таких датчиков. Донгипроуглемашем разработан одноосный фотоупругий датчик, который изготавливается из эпоксидной смолы ЭД-6, отвержденной малеиновым ангидридом с прибавлением 15% дибутилфталата. Пластинки из этого материала (размерами 32x12x2,5 мм) проходят специальную обработку “замораживанием” (нагрев со скоростью $V=10^{\circ}/\text{час}$ до $t=130^{\circ}$, задержка 8 ч и затем охлаждение с $v=5^{\circ}/\text{час}$). Пластинка наклеивается на деталь клеем (ЭД-6 – 100 весовых частей; дибутилфталат – 5 весовых частей; полиэтиленполиамин – 10 весовых частей), который затвердевает в течении 6-8 часов.

Схема наклейки датчика приведена на рис.3.51.

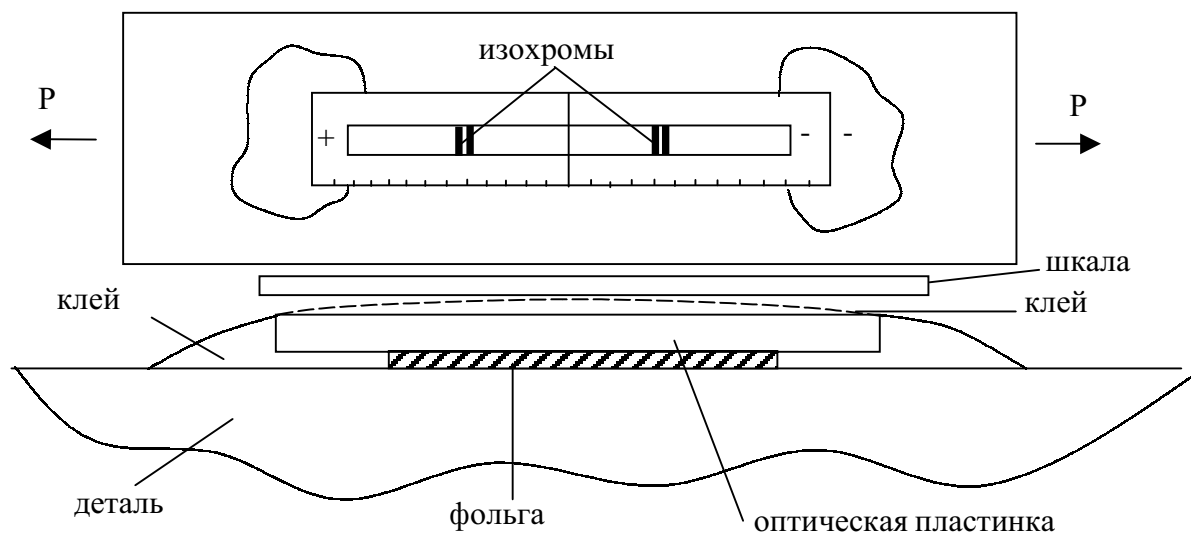


Рис.3.51 - Схема наклейки фотоупругого датчика

При измерениях на датчик попадает луч от источника света, проходящий через поляризатор П, и отражается от фольги, попадая в глаз через наблюдателя, рис.3.52.

При нагружении детали изохромы смещаются относительно первоначального их положения в направлении, зависящем от знака деформации.

При необходимости измерения двухосного усилия, направление которого нельзя предугадать или оно меняется, применяют двухосные фотоупругие датчики. Датчики выполняют в форме кольца. При нагружении появляется интерференционная картина, ориентированная таким образом, что оси симметрий совпадают с главными направлениями напряжений. Изменение нагрузки ведет к немедленному изменению интерференционных полос.

Соотношение главных напряжений σ_1 и σ_2 определяется по типу наблюдаемой картины полос по осям симметрии относительно первоначального положения, рис. 3.53.

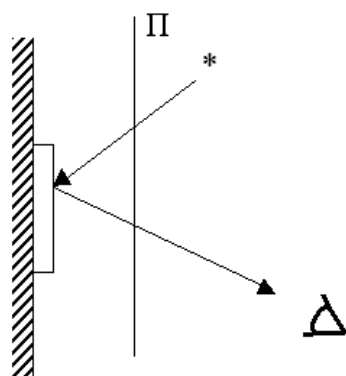


Рис.3.52 - Схема измерений с помощью фотоупругого датчика

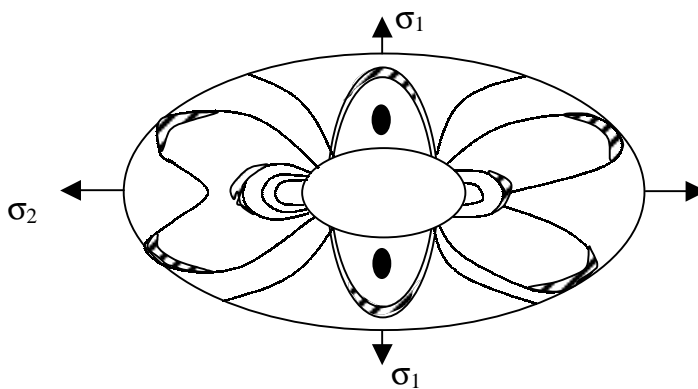


Рис.3.53 - Схема измерений двухосного усилия

3.4.12 Устройства регистрации информации

Светолучевые осциллографы представляют собой приборы, состоящие из ленто- (бумаго-) протяжного механизма, скорость протяжки которого регулируется, и проволочных гальванометров. **Гальванометр**, в свою очередь, представляет собой рамку из тонкой проволоки с наклеенным на нее зеркалом, на которое направлен световой луч от источника света. Рамка с зеркалом помещена в магнитное поле. При подаче на рамку усиленного напряжения от

тензорезистора в ней возникает ток, взаимодействие которого с магнитным полем обуславливает появление крутящего момента, а следовательно, и поворот рамки с зеркалом. Отраженный от зеркала луч направлен на светочувствительную бумагу и фиксируется на ней. При протягивании бумаги и непрерывном воздействии на нее луча света на ней фиксируется величина угла закручивания зеркала гальванометра и характер этого кручения. Указанные же величины обусловлены величиной и характером поданного на гальванометр напряжения, а те, в свою очередь, – величиной и характером тех процессов (нагрузок), которые имеют место на элементе, на котором закреплены тензорезисторы.

Магнитофоны, которые применяются при исследовании работы машин, по устройству и принципу действия аналогичны промышленным магнитофонам. В этом случае усиленное напряжение тензорезистора подается на записывающую головку магнитофона.

Одним из важных вопросов, которые решаются при проведении исследований, - число и расположение записываемых на одном носителе информации величин. Максимально возможное число величин, одновременно записываемых на светочувствительную бумагу одного осциллографа, принимается на единицу меньше числа гальванометров для данного типа осциллографа. Один, оставшийся, гальванометр, как правило, используют для записи интервала времени посредством записи частоты колебаний напряжения сети, которое является практически постоянным и составляет 50 Гц, т.е. период этих колебаний составляет 0,02 с. Для записи отметки времени также могут использоваться специальные отметчики, входящие в состав фиксирующей аппаратуры.

В случаях достаточной ширины носителя информации фиксируемые величины следует располагать так, чтобы они не пересекались. Если пересечение величин избежать не удастся, можно воспользоваться несколькими осциллографами, магнитофонами, самописцами и т. д. В других случаях для четкого выделения можно подобрать толщину, “жирность” или толщину и “жирность” линии записи.

Наряду с расположениями величин на носителе информации важную роль играет вопрос скорости его протяжки. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, возможностью машинного кодирования полученного материала для его дальнейшей обработки; во-вторых, расходом, например, светочувствительной бумаги и химических реактивов для ее обработки.

При машинном кодировании экспериментально полученной информации и последующей ее машинной обработке крутизна нарастания и спада фиксируемой величины играет решающую роль.

Это обусловлено возможностью кодирующих устройств. Крутизна же фронта импульса кривой, за исключением случаев ударного нагружения, обуславливается частотой ее изменения и скоростью протяжки ленты. Исходя из этого, скорость ленты (бумаги) осциллографа выбирается такой, чтобы величина угла наклона линии была не больше допустимого значения. Действительно, зная примерно частоту фиксируемой величины, определяем период ее изменения T , рис.3.54,

$$T = 2\pi/\omega,$$

где ω - частота изменения величины.

Исходя из известного выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = H \cdot \ell^{-1},$$

где ℓ – длина четверти периода на ленте осциллографа, получим

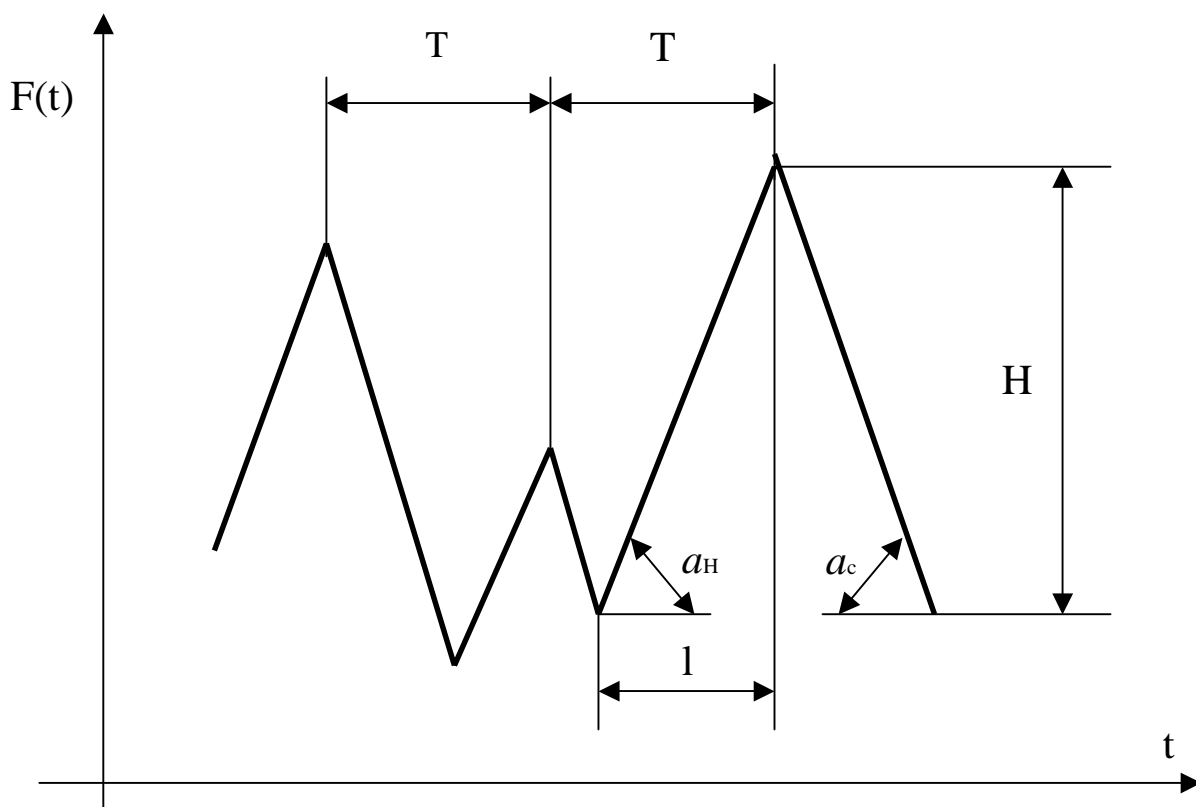


Рис.3.54 - Параметры крутизны фронта импульса: α_n , α_c – угол, соответственно, нарастания и спада фронта импульса

$$V_{np} \geq \frac{4H}{T \operatorname{tg}[\alpha]} = \frac{2H\omega}{\pi \operatorname{tg}[\alpha]},$$

здесь V_{np} - скорость протяжки ленты (бумаги) осциллографа; $[\alpha]$ - допускаемый угол наклона линии. Аналогичные вопросы решаются и при машинном (с помощью аналого-цифровых преобразователей, встроенных в ПЭВМ) считывании информации с датчиков и ее последующей обработке.