

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Прикладная механика, динамика и прочность машин»

621.317(07)
Б484

И.Я.Березин, Е.Е.Рихтер

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
раздел
"ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ"

Учебное пособие к лабораторным работам

Допущено учебно-методическим объединением вузов по образованию в области машиностроения и приборостроения Госкомитета Российской Федерации по высшему образованию в качестве учебного пособия для студентов специальности "Динамика и прочность машин"

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2005

УДК 621.317.7(076.5)

Березин И.Я., Рихтер Е.Е. Экспериментальные методы исследований: Учебное пособие к лабораторным работам по разделу "Электромеханические измерения"; Под ред. И.Я.Березина. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005г. - 83 с.

Курс "Экспериментальные методы исследований" изучается студентами специальности 071100 ~ "Динамика и прочность машин" в У-УШ семестрах.

Учебное пособие содержит описание девяти лабораторных работ, при выполнении которых студенты изучают методы исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей неэлектрических величин в электрический сигнал, а также получают практические навыки использования наиболее распространенных типов датчиков при изучении напряженно-деформированного состояния конструкций, силовых и кинематических параметров.

Работа может быть использована студентами других машиностроительных специальностей, изучающих элементы и средства измерения и автоматизации.

Ил. 41, табл. 15, список лит. 10 назв.

Рецензенты: В.А. Жилкин, Б.М. Позин

ISBN 5-696-00437-7

С Издательство ЮУрГУ, 2005г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс "Экспериментальные методы исследования" изучается студентами специальности "Динамика и прочность машин" (071100) в У-УІІІ семестрах. Курс состоит из трех частей, в которых рассматриваются методы и средства электромеханических и оптико-геометрических измерений, а также методы автоматизации прочностных испытаний. В настоящем пособии описываются лабораторные работы, соответствующие разделу "Электромеханические измерения". В первую часть пособия включены лабораторные работы, в которых изучаются физические основы, принцип действия и методы определения основных метрологических характеристик измерительных преобразователей; во второй части рассматривается применение различных измерительных устройств в конкретных инженерных исследованиях.

При прохождении лабораторного практикума перед студентам ставятся следующие задачи:

- ознакомление с устройством измерительных преобразователей и датчиков, изучение методов определения их метрологических характеристик;
- ознакомление с современной измерительной и регистрирующей аппаратурой, применяемой при многоканальных измерениях динамических процессов;
- приобретение практических навыков самостоятельной работы при выполнении монтажа датчиков, сборке измерительных схем, настройке аппаратуры и проведении измерений;
- освоение методов обработки и анализа результатов с применением современных средств научного эксперимента, включающих микропроцессорные интерфейсные устройства и ПЭВМ.

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе 3-5 человек, каждая из которых получает индивидуальное задание; продолжительность занятий рассчитана на 2-4 академических часа.

По результатам каждой выполненной работы студенты составляют индивидуальные (или бригадные) отчеты, которые необходимо оформить в соответствии с требованиями на выпуск научно-технических отчетов по ГОСТ 7.32-81.

Настоящее пособие является переработанным и дополненным изданием аналогичного пособия, выпущенного в 1996 г. [1].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ПРАКТИКА НАКЛЕЙКИ И МОНТАЖА ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Освоение практических навыков по выбору типа датчиков, способам наклейки, монтажа, термообработке и контролю качества измерительных схем с тензорезисторными преобразователями.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Метод электротензометрии в настоящее время широко применяется для исследования напряжено-деформированного состояния конструкций, а также для измерений силовых и кинематических параметров машин. Наиболее часто при этом используются тензодатчики электрического сопротивления - тензорезисторы. Действие тензорезисторов основано на использовании эффекта изменения омического сопротивления датчика при изменении удельного сопротивления и геометрических размеров его чувствительного элемента. Изменение омического сопротивления тензорезистора соответствует деформации в точке поверхности детали, на которую наклеен тензодатчик.

Тензорезисторы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими аналогичными по назначению измерительными преобразователями. К их положительным качествам относятся: высокая чувствительность преобразования; большой частотный диапазон измерений, малые габариты и вес, возможность дистанционного многоканального измерения.

Тензорезисторы по типу используемого материала чувствительной решетки делятся на две группы: проводниковые и полупроводниковые. Проводниковые тензорезисторы в свою очередь подразделяются на проволочные и фольговые.

По форме чувствительной решетки тензорезисторы различают на одиночные, розеточные и мембранные.

Характерный вид одиночного, проводникового тензорезисторного преобразователя показан на рис.1.1, к его основным элементам относятся: чувствительная решетка (1), основа (2), подложка (3), выводные электроды (7). Чувствительная решетка представляет собой уложенную в виде спирали проволоку или фольгу, изготовленную из материала с высоким удельным сопротивлением типа: константан, элинвар, адванс, нихром. Основа датчика чаще всего изготавливается из полимеризующихся клеев или пленок, возможно использование бумаги или металла.

Подложка датчика, которой тензорезистор крепится к поверхности исследуемого объекта, изготавливается из бумаги, полимерных материалов или металла. Электроды изготавливаются из медной проволоки или фольги и крепятся к выводам чувствительной решетки посредством припайки или приварки.

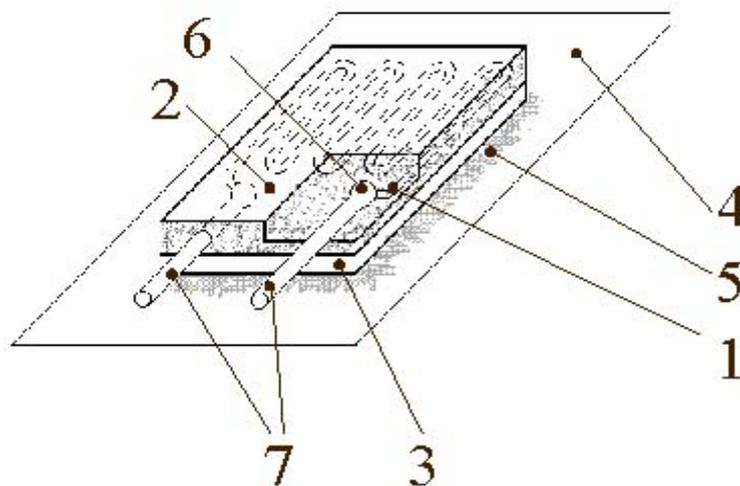


Рис.1.1. Схема тензорезисторного преобразователя:
 1 - чувствительная решетка; 2 - основа; 3 - подложка; 4.- исследуемая деталь; 5 - защитный элемент; 6 - узел пайки (сварки); 7 - выводные электроды.

Технические условия (ГОСТ 21616-76) предусматривают систему обозначений, включающую краткое описание технических характеристик тензорезисторов. Рассмотрим пример расшифровки условного обозначения тензорезистора: КФ4П1-10-200-АГ-12 - тензорезистор константовый, фольговый, прямоугольная розетка, база - 10 мм, $R_{ном} = 200 \text{ Ом}$; качество группы А, клей горячего отверждения, ТКС материала $\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Технологический процесс подготовки тензорезисторов к исследованиям требует скрупулезной точности и аккуратности при выполнении отдельных операций, неукоснительного соблюдения правил, обоснованных специальными исследованиями и многолетним опытом.

Процесс подготовки включает последовательное выполнение следующих основных операций:

1. Выбор и проверка исправности тензорезисторов с целью отбраковки и подбора групп датчиков с допустимым разбросом номинального сопротивления;
2. Подготовка поверхности детали с целью обеспечения требований технологии наклейки;
3. Выбор клея, составление клеевой композиции и наклейка тензорезисторов на деталь;
4. Монтаж тензорезисторов, включающий крепление соединительных проводов и их припайку к выводным электродам;
5. Термообработка наклеенных тензорезисторов с целью обеспечения условий полимеризации клеевого соединения;
6. Контроль исправности тензорезисторов и качества выполнения технологических операций;
7. Герметизация и защита тензорезисторов с целью предохранения их от механических повреждений и попадания влаги в процессе исследований.

Подробное описание процедур выполнения каждой из названных операций изложено в прилагаемой инструкции.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

С целью приобретения навыков каждому студенту предлагается выполнить весь комплекс операций по созданию полумостовой тензометрической схемы. В качестве объекта используется упругий элемент типа балки, который затем испытывается в лабораторной работе №2 для определения метрологических характеристик тензорезисторов.

Последовательность операций выполняется в соответствии с инструкцией:

2.1. Выбор и проверка исправности тензорезисторов. Из партии датчиков марки ПКБ или КФ с номинальным сопротивлением $R_n=100...200$ Ом с использованием вольтамперметра типа Р-386 выбираются по два датчика с сопротивлением, отличающимся не более чем на 1%;

2.2. Подготовка поверхности детали производится вручную с использованием абразивной ленты (шкурки). После обработки поверхность балки должна быть гладкой с матовой поверхностью. Обезжиривание подготовленной поверхности осуществляется спиртом или другим растворителем с помощью тампона.

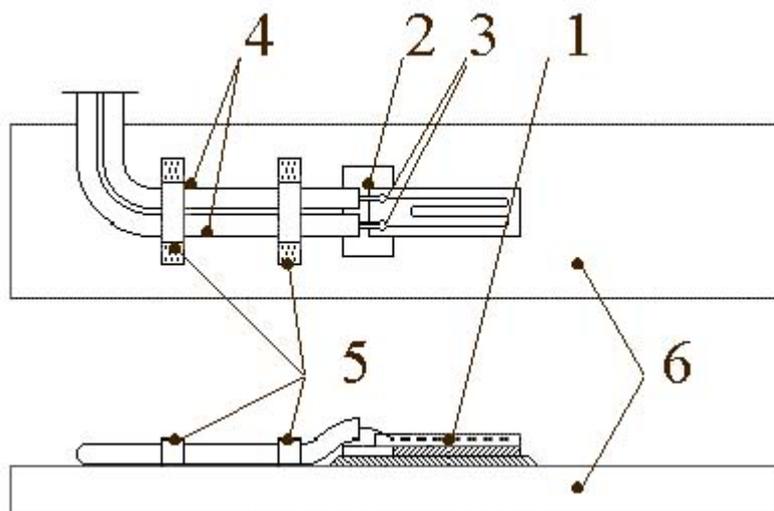


Рис.1.2. Схема установки тензорезистора на тарировочную балку:

1 - тензорезистор; 2 - изолирующая прокладка; 3 - места спайки (сварки);
4 - соединительные провода; 5 - металлические скобки; 6 – тарировочная балка.

2.3. Наклейка тензорезисторов в зависимости от типа датчиков осуществляется клеем

БФ-2 (БФ-4) или клеем типа "ЦИАКРИН АО" с точным и аккуратным выполнением всех требований инструкции.

2.4. Подготовка и электромонтаж измерительной схемы включает операции по подбору и лужению монтажных проводов, их крепление к упругому элементу посредством точечной сварки и припайке выводных электродов к монтажным проводам. После этого выполняется промежуточная проверка работоспособности тензорезисторов с использованием измерительного прибора типа «Тестер».

2.5. Термообработка тензорезисторов осуществляется для каждого сорта клея по режимам рекомендуемым в соответствии с инструкцией.

2.6. Окончательный контроль качества наклейки и электромонтажа схемы включает визуальный осмотр и регистрацию» конечного значения номинального сопротивления тензорезистора и контроль сопротивления изоляция тензорезисторов.

2.7. Завершающим этапом работ является герметизация датчиков с целью предохранения от механических повреждений и влияния влаги.

В процессе выполнения лабораторной работы студентом ведется протокол, в котором последовательно заносятся характеристики используемых датчиков и применяемых материалов, особенности технологии наклейки и режима термообработки. Протокол и подготовленная балка сдается преподавателю для последующего использования в лабораторной работе N2.

ИНСТРУКЦИЯ

по подготовке тензорезисторных преобразователей к исследованиям

Процесс подготовки тензорезисторов к исследованиям включает следующие технологические операции:

1. ВЫБОР И ПРОВЕРКА ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Тип применяемых тензорезисторов, геометрические размеры и сопротивление чувствительной решетки зависят от размеров и конфигурации исследуемой детали; вида и характера измеряемой деформации, градиента напряжений в пределах исследуемого участка поверхности детали, измерительной схемы, типа применяемого измерителя и других факторов. Последовательность действий:

1.1. Внешний осмотр тензорезисторов проводится с целью обнаружения возможных механических дефектов: не параллельности нитей чувствительной решетки, повреждение основы и выводов; пузырей и пустот в клеевом слое основы, загрязнения и т. д.

1.2. Проверка тензорезисторов на целостность чувствительных решеток с помощью обыкновенного омметра. Для этого к выводным электродам проверяемого тензорезистора необходимо подключить прибор для измерения омического сопротивления. Если стрелка прибора отклонилась на величину, соответствующую номинальному сопротивлению R_n , значит чувствительный элемент данного тензорезистора исправен.

1.3. Группировка тензорезисторов по величине номинального сопротивления производится специализированным прибором высокого класса точности (В7-27, Р-386 и т. д.). С этой целью на приборе устанавливается предел измерения, соответствующий сопротивлению тензорезисторов указанному в паспорте на партию тензодатчиков. Затем выводные электроды тензорезистора соединяются с входом регистрирующего прибора. Тензорезисторы данной партии распределяются по группам, разброс сопротивлений в каждой группе не должен

превышать 1,0% от номинального сопротивления тензорезистора.

1.4. Обезжиривание поверхности основы и подложки выбранных тензорезисторов. Взяв тензорезисторный преобразователь одной рукой за выводные электроды, другой протирают одновременно обе поверхности тензорезистора тампоном, слегка смоченном в растворителе или спирте. Обезжиренные тензорезисторы кладут на чистую бумагу, прикрывая их сверху от попадания пыли и влаги.

2. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Одно из основных условий прочного и надежного соединения тензорезисторов с исследуемой деталью (независимо от типа применяемого клея) состоит в том, что поверхность детали должна быть ровной, гладкой, с матовым оттенком, чистой и сухой. Последовательность действий:

2.1. Удаление с поверхности детали краски, масляных пятен, ржавчины, окалины и т.п. Для этого используются растворители, жесткие металлические щетки, напильники и шаберы.

2.2. Зачистка поверхности до матового оттенка, так как к шлифованным или полированным поверхностям тензорезисторы приклеиваются плохо. Зачистка поверхности абразивной лентой (шкуркой) выполняется так, чтобы риски располагались перпендикулярно оси наклеиваемых датчиков или перекрещивались с ней под углом 45° .

2.3. Обезжиривание поверхности чистым тампоном, смоченным в спирте или других растворителях; тампон меняют несколько раз до тех пор пока он не будет оставаться совершенно чистым.

2.4. Просушка обработанной поверхности в течение 5... 10 минут. До начала наклейки нельзя прикасаться к подготовленной поверхности детали.



1.3



1.4

Рис. 1.3., 1.4. Подготовка поверхности детали к наклейке тензорезисторов.

3. ВЫБОР КЛЕЯ И НАКЛЕЙКА ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ДЕТАЛЬ

В зависимости от условий выполняемых исследований и типа применяемых тензорезисторов применяют различные марки клеев; наибольшее распространение получили клеи горячего отверждения типа БФ-2 (БФ-4) и клей холодного отверждения типа "Циакрин АО".

Чтобы прочно и надежно связать тензорезисторы с поверхностью испытываемой детали и добиться при этом высокой степени электрической изоляции, термостойкости и стабильности свойств клеевого слоя, необходимо строго выполнять ряд условий.

Последовательность действий:

3.1. Наклейка тензорезисторов должна выполняться только кондиционным клеем. Перед применением клеи следует тщательно перемешать; для повышения жидкотекучести клеи подогревают или разбавляют соответствующим растворителем.

Температура поверхности детали должна быть не ниже 18...20 °С при влажности не более 80%. Необходимо предотвратить возможность конденсации влаги на поверхности детали, для этого в случае необходимости деталь следует подогревать с помощью нагревательных приборов.

3.2. Дополнительная изоляция мест пайки выводных электродов; для этого на деталь к пассивной части тензорезистора подклеивается бумажная полоска, длина которой позволяет расположить на ней выводные электроды.

3.3. Нанесение на поверхность детали меток для точной ориентации продольной оси чувствительной решетки датчика. При известных направлениях главных деформаций одиночные датчики ориентируются соответственно, в противном случае на поверхность детали наклеиваются трехкомпонентные розетки (подробнее исследование плоского напряженного состояния будет рассмотрено в лабораторной работе №4).

3.4. Наклейка тензорезисторов клеями горячего отверждения (БФ-2, 4) включает непрерывную последовательность операций: на подготовленную поверхность детали ровным слоем наносят клей, площадью, перекрывающей поверхность тензорезистора. Нижнюю (рабочую) поверхность тензорезистора, включая бумажную полоску, также покрывают тонким слоем клея. Тензорезистор держат за выводные проводники, не касаясь пальцами основы. Клею дают просохнуть, после чего наносят второй слой клея, и выдерживают его до "отлипа". Затем тензорезистор накладывают на поверхность и прокатывают его резиновым валиком. При этом нужно следить за тем, чтобы не нарушалась правильная ориентация тензорезистора, а давление было достаточно сильным, но не чрезмерным, так как можно повредить чувствительную решетку датчика. С помощью прикатывания и приглаживания пальцами выдавливают излишки клея, устраняют образующиеся в нем пузырьки воздуха и пустоты, добиваясь равномерного распределения клея и плотного соприкосновения соединяемых поверхностей по всей площади тензорезисторов.

При применении клеев холодного отверждения ("Циакрин АО") на подготовленную поверхность наносят тонкий слой клея; после чего, без выдержки, накладывается тензорезистор который равномерно прижимается к

поверхности детали через полиэтиленовую пленку в течение 1... .. 2 минут.

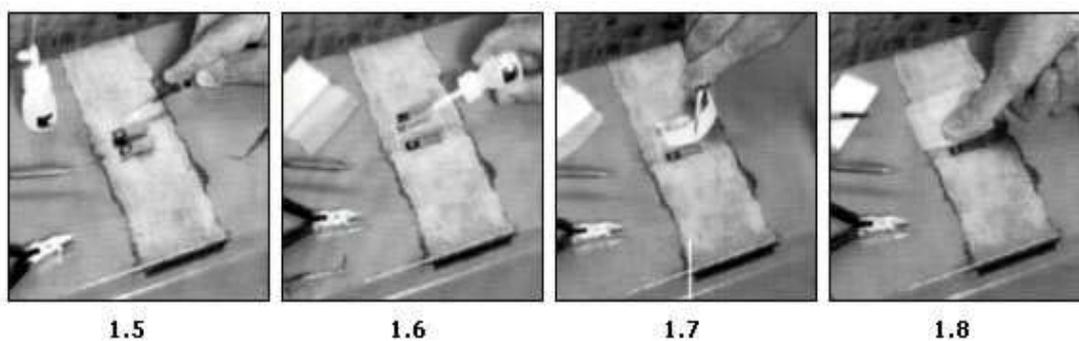


Рис. 1.5.—1.8. Этапы установки тензорезистора на поверхность исследуемой детали.

4. ЭЛЕКТРОМОНТАЖ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Последовательность действий:

- 4.1. Подбор монтажных проводов одинаковой длины, предназначенных для соединения тензорезисторных преобразователей с измерительным прибором; концы проводов зачищаются и залуживаются.
- 4.2. В непосредственной близости от выводных электродов тензорезисторов на поверхность детали приклеиваются пластинки из металлизированного гетинакса.
- 4.3. Монтажные провода с металлическими скобками крепятся на поверхности детали посредством точечной сварки.
- 4.4. Выводные электроды тензорезисторов и монтажные провода припаиваются к соответствующим контактам гетинаксовых пластинок.
- 4.5. Выполняется текущая проверка исправности чувствительной решетки тензорезистора и определяется электрическое сопротивление между одним из контактов датчика и поверхностью исследуемой детали. Датчик считается достаточно хорошо изолированным от поверхности детали, если сопротивление изоляции превышает 2 МОм.

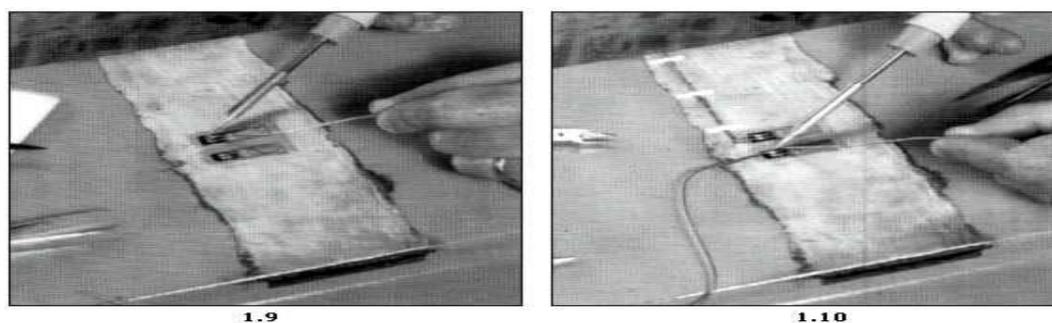


Рис. 1.9—1.10. Монтаж и присоединение удлиняющих проводов к тензорезисторам.

5. ТЕРМОБРАБОТКА КЛЕЕВОГО СЛОЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

В зависимости от типа используемого клея применяются различные режимы

термообработки клеевого слоя тензорезисторов. Для клея типа БФ-2 (используется в данной лабораторной работе) режим термообработки включает двухчасовую выдержку на воздухе с последующей термообработкой по режиму: нагрев до 70°C выдержка 1 час в печи нагрев до 140°C , выдержка 2 часа; нагрев до 180°C , выдержка 2 часа; охлаждение вместе с печью.

6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАКЛЕЙКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

После термообработки производят окончательную проверку качества установки тензорезисторов, которую начинают с внешнего осмотра и заканчивают измерением сопротивления решеток и сопротивления изоляции. Во время внешнего осмотра можно обнаружить ряд механических дефектов, таких как : нарушение правильной ориентации тензорезистора; искривление петель, темные пятна, наличие воздушных пузырей, вздутий; коробление и отслаивание основы от поверхности детали и т.п.

О наличии пустот можно судить по показанию измерителя: при хорошем качестве наклейки после нажатия на чувствительную решетку указатель сразу возвращается в прежнее положение, если же прибор фиксирует наличие остаточной деформации величиной $40...60 \frac{\text{мкм}}{\text{м}}$, то налицо дефектность наклейки.

Некачественно наклеенный тензорезистор имеет пониженную в 1,5...2,0 раза чувствительность к измеряемой деформации; плохую воспроизводимость результатов при повторных нагрузках и значительный гистерезис.

Контроль качества изоляции и электрического сопротивления тензорезисторов выполняется по пункту 4.5 настоящей инструкции.

7. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Защита тензорезисторов от вредного влияния окружающей среды (механических повреждений, влаги, температуры и т.п.) достигается путем применения специальных покрытий.

При выборе защитных средств исходят из конкретных условий испытаний, свойств сред, в которых будет находиться испытываемая деталь, и свойств клеевого материала, применявшегося для наклейки тензорезистора.

Основные требования, предъявляемые к средствам герметизации:

- простота и удобство применения;
- защитные средства не должны растворять клей, которым наклеены тензорезисторы;
- непроницаемость для воды и газа, наличие высоких электроизоляционных свойств противодействие агрессивным средам и механическому воздействию.

В качестве герметизирующих средств широко используются: вазелин, парафин, воск, клеи, применяемые для наклейки тензорезисторов.



1.11

Рис. 1.11. Герметизация тензорезистора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЗОРЕЗИСТОРОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Освоение методов определения метрологических характеристик тензорезисторных преобразователей; привитие навыков работы с современной многоканальной измерительной тензоаппаратурой.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Измерение проводниковыми тензорезисторами основано на эффекте изменения электрического сопротивления чувствительной решетки при ее деформации. При этом изменение омического сопротивления тензорезистора обусловлено двумя явлениями: изменением продольного и поперечного размеров проводника с одной стороны и удельного сопротивления материала с другой. Зависимость вида:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2 \times \mu + m) \times \varepsilon = S_T \times \varepsilon, (2.1)$$

называется основным уравнением электротензометрии,

где $\Delta R/R$ - относительное изменение активного сопротивления чувствительного элемента тензорезистора, мкОм/Ом.;

ε - деформация исследуемой детали, е.о.д.;

μ - коэффициент Пуассона;
 m - коэффициент изменения удельного сопротивления материала от деформации ;

S_T - коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Поскольку каждый тензорезистор может быть наклеен на поверхность детали только один раз, непосредственная тарировка этого типа преобразователей невозможна. Поэтому в соответствии с методикой ГОСТ 21616-76 для определения метрологических характеристик партии датчиков из нее отбирается 10% от общего количества для проведения механических и термических испытаний.

Выбранные тензорезисторы наклеиваются на поверхность тарировочного образца (балки), изготовленного из стали с высокими упругими характеристиками (60С2, 62С, 65Г, 30ХГСА и т.д.).

Для проведения механических испытаний используется специальное тарировочное устройство, схема которого приведена на рис.2.1.

Основными метрологическими характеристиками тензорезисторов являются:

1.1. БАЗА ТЕНЗОРЕЗИСТОРА L_6 - База тензорезистора равна длине прямолинейного участка чувствительного элемента датчика. Отечественной промышленностью выпускаются тензорезисторы базой от 0,5 до 100 мм. Малобазные тензодатчики ($L_6 < 3$ мм) используются для анализа напряженно-деформированного состояния в области значительных градиентов напряжений, например в зоне концентрации напряжений. При тензометрировании конструкций изготовленных из материалов, имеющих неоднородную структуру (типа бетона и т.д.) используются тензорезисторы с большой базой ($L_6 > 50$ мм), чтобы исключить влияние местных напряжений.

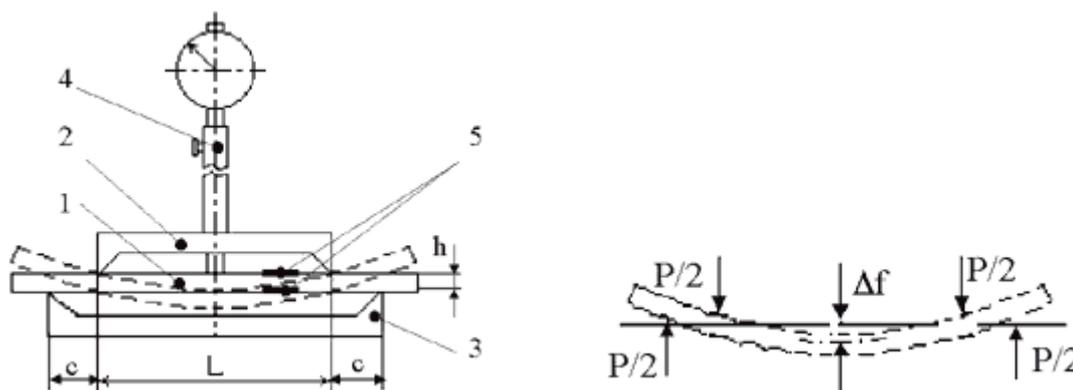


Рис. 2.1. Схема тарировочного устройства:

- 1 - упругий элемент с наклеенными тензорезисторами;
- 2 - верхняя траверса; 3.- нижняя траверса;
- 4,- индикатор часового типа со штоком;
- 5 - исследуемые тензорезисторы.

1.2. НОМИНАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ $R_{ном}$ - значение активного сопротивления чувствительной решетки тензорезистора в Омх. В настоящее

время выпускаются тензодатчики сопротивлением от 50 до 800 Ом. Выбор датчиков по $R_{ном}$ выполняется для согласования выходного сопротивления измерительной схемы и входного сопротивления используемой тензометрической аппаратуры.

1.3. МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЙ ТОК ПИТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ I_{max} - допустимый ток в мА, при котором не происходит заметного нагрева тензорезистора, способного повлиять на характеристики тензорезистора. В зависимости от типа исследуемого тензорезистора I_{max} принимается равным 30 мА для проволочных датчиков и до 0,5 А для фольговых. Это отличие объясняется более благоприятными условиями теплопередачи через плоскую поверхность чувствительной решетки фольговых датчиков.

1.4. ПРЕДЕЛ И ИЗМЕРЯЕМОЙ ДЕФОРМАЦИИ ϵ_{max} - наибольшее значение деформации, до которого гарантируется надежная работа тензорезисторов и линейность их метрологических характеристик. Часто величину ϵ_{max} измеряют в единицах относительной деформации (е.о.д.) или в процентах (%). Отожженная константановая проволока до деформации порядка 10% (100000 е.о.д.) сохраняет линейность преобразования. У наклеиваемых датчиков линейность преобразования сохраняется до 1,5% (15000 е.о.д.). Заводы-изготовители ограничивают верхний предел использования проволочных и фольговых тензорезисторов величиной деформации 0,3% (3000 е.о.д.).

1.5. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН РАБОТОСПОСОБНОСТИ D_t - область изменения температуры, при которой погрешности измерения, обусловленные влиянием температуры на свойства тензорезистора, не выходят за допустимые пределы. Температурный диапазон работоспособности указывается в паспорте на партию датчиков.

1.6. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ S_t - отношение приращения (относительного) сопротивления наклеенного тензорезистора к деформации образца, измеренной в направлении оси базы тензорезистора:

$$S_T = \frac{\Delta R / R}{\epsilon}, \quad (2.2)$$

Коэффициент S_t зависит от большого числа различных факторов и прежде всего от материала чувствительного элемента, свойств клеевого соединения базы тензорезистора, качества наклейки тензодатчиков на поверхности детали и других. Коэффициент тензочувствительности проволочных и фольговых датчиков изменяется в диапазоне от 1,9 до 2,6. На рис.2.2 приведен пример статической характеристики тензорезисторного преобразователя, с использованием которой может быть определен коэффициент тензочувствительности тензодатчиков.

1.7. ПОЛЗУЧЕСТЬ - явление уменьшения чувствительности наклеенного тензорезистора, при действии деформации постоянной величины.

Величина ползучести \dot{I}_τ определяется:

$$\dot{I}_\tau = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\tau - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\varepsilon}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\varepsilon} \times 100 \%, \quad (2.3)$$

где $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\tau$ - показания тензорезистора, регистрируемые через заданный промежуток времени (τ) с тарировочной балки при $\varepsilon = \text{const}$;
 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_\varepsilon$ - показания тензорезистора, регистрируемые с момента нагружения конструкции до значения $\varepsilon = \text{const}$.

Явление ползучести связано с упругопластическими свойствами основы и клея, применяемого для наклейки тензорезисторов. Наличие ползучести ухудшает воспроизводимость результатов измерений. Различают временную и температурную ползучесть. На рис.2.3 приведен график, иллюстрирующий явление временной ползучести тензорезисторных преобразователей.

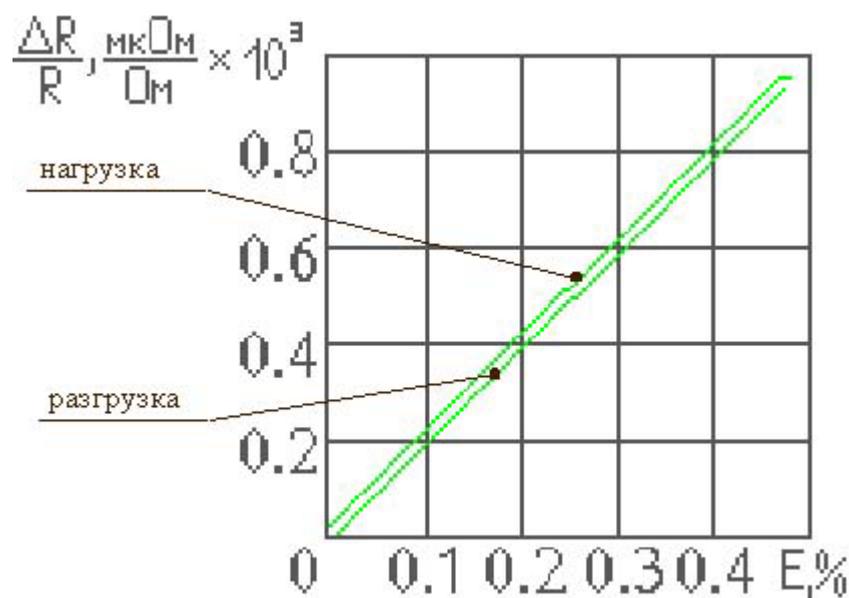


Рис. 2.2. Статическая характеристика наклеиваемого тензорезистора:
 1 – нагрузка; 2 – разгрузка.

1.8. МЕХАНИЧЕСКИЙ ГИСТЕРЕЗИС Γ_m - явление несовпадения тарировочных зависимостей тензорезисторов, снятых при нагрузке и разгрузке. Величина механического гистерезиса Γ_m пропорциональна площади ограниченной кривыми «нагрузка-разгрузка» на графике статической характеристики тензорезисторных преобразователей (см. рис.2.2).

$$\tilde{A}_i = \frac{|[(\Delta R / R)]_{\delta\alpha\zeta\tilde{\alpha}\delta} - [(\Delta R / R)]_{i\tilde{\alpha}\tilde{\alpha}\delta}|}{(\Delta R / R)_{\max}} \times 100 \%, (2.4)$$

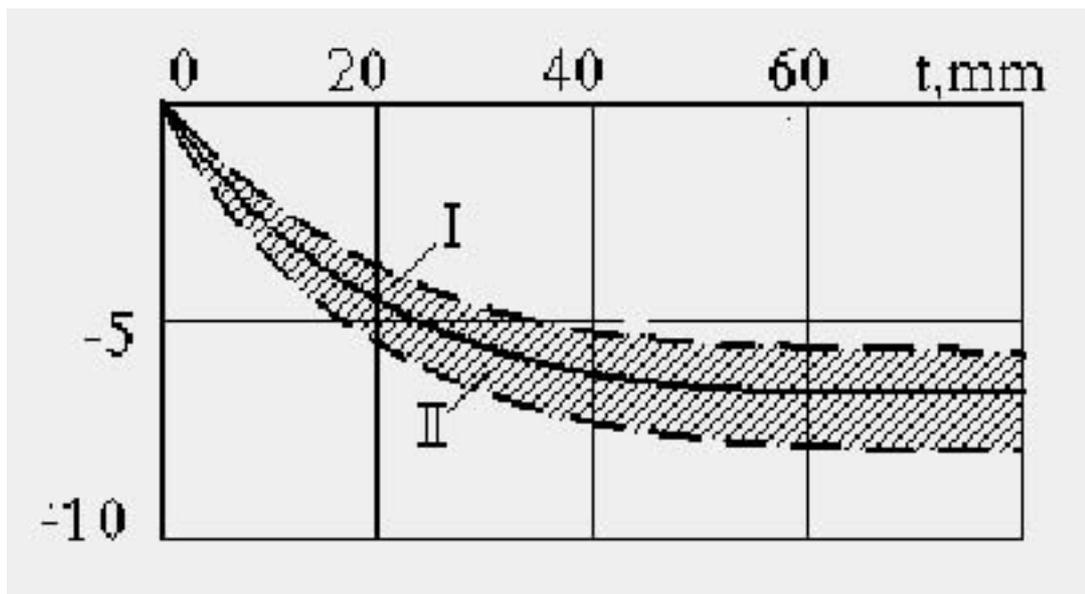


Рис. 2.3. Кривая (временной) ползучести тензорезисторов типа КФ4, КФ5:
 I - зона разброса характеристик ползучести;
 II - среднее значение кривой ползучести.

1.9. **ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС** - явление несопадения температурных характеристик наклеенного тензодатчика, снятых при нагреве и охлаждении тарировочного образца. Величина температурного гистерезиса Γ_m определяется экспериментально.

1.10. **ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ (Т.К.С) α_t** - коэффициент, характеризующий зависимость относительного сопротивления тензорезистора от изменения температуры. Сопротивление тензорезистора изменяется с температурой по двум причинам: во-первых, ТКС проволоки не равен нулю, во-вторых ввиду различия температурных коэффициентов расширения (ТКР) материала проволоки и детали. С учетом сказанного, температурный коэффициент сопротивления тензорезистора определяется:

$$\alpha_t = \alpha_i + (\beta_i - \beta_i) \times S_i, (2.5)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ - ТКС свободной проволоки;

$\beta_{\text{п}}, \beta_{\text{м}}$ - ТКР проволоки и детали, соответственно;

$S_{\text{п}}$ - коэффициент тензочувствительности свободной проволоки.

Рассматриваемое явление иллюстрируется на рис. 2.4.

1.11. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ "ДРЕЙФ НУЛЯ" - явление поэтапного уменьшения чувствительности наклеенного тензорезистора, находящегося под воздействием максимально допустимой для данного датчика температуры.

Температурный "дрейф нуля" определяется как максимальное значение приращения кажущейся деформации за 1 час действия на образец предельной положительной температуры (измеряется в мкм/м). Значение D_t определяется экспериментально.

1.12. СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ $R_{\text{из}}$ (сопротивление утечки) - электрическое сопротивление, измеренное между любым выводом наклеенного тензорезистора и массой исследуемой детали. Клей должен не только прочно связывать тензорезистор с поверхностью исследуемой детали, но и обеспечивать достаточную электрическую изоляцию нитей чувствительной решетки от массы детали. Если диэлектрические свойства клея недостаточно высоки, то нити решетки шунтируются сопротивлением утечки клеевого слоя.

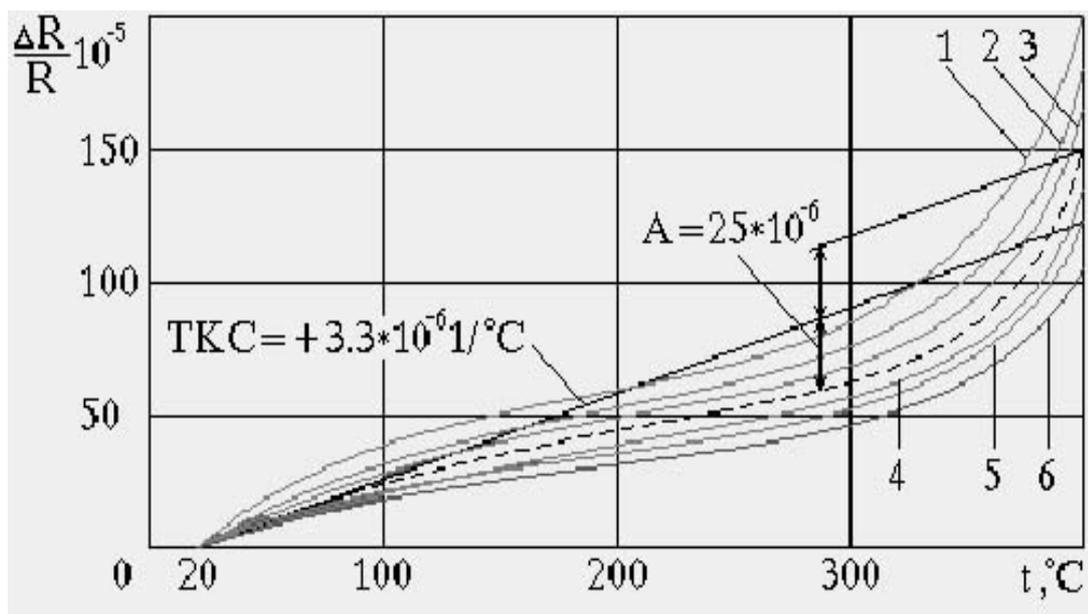


Рис. 2.4. Зависимость изменения ТКС от температуры:

I - зона разброса ТКС; II - среднее значение ТКС;

α_t^{cp} - угол наклона, соответствующий среднему значению ТКС тензорезисторов.

Уменьшение сопротивления изоляции приводит к уменьшению чувствительности тензорезистора.

$$S_{\sigma \cdot \dot{\sigma} / D} = \frac{S_T}{1 + \frac{R_{i \cdot \dot{\sigma} / D}}{R_{\dot{\sigma}}}}, (2.6)$$

При несовершенстве изоляции тензорезистора относительно металлических частей детали в измерительную цепь могут проникать различного рода паразитные токи, которые, накладываясь на полезный сигнал будут вносить погрешность в результаты измерений. На практике стремятся к тому, чтобы $R_{из}$ тензорезистора находилось на уровне сотен и даже тысяч МОм.

1.13. ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧАСТОТА ИЗМЕРЯЕМОЙ ДЕФОРМАЦИИ I_{max} - максимальная частота динамических деформаций, которую можно измерять с помощью металлических тензорезисторов. I_{max} - зависит от материала детали, на которую они наклеены и базы используемых для этого тензодатчиков. Величина предельной частоты для применяемых тензорезисторов превышает значение 50 кГц.

1.14. ПОЛНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ РЕСУРС P_c - гарантируемое заводом-изготовителем число циклов динамической нагрузки при ϵ_{max} , в течение которых свойства тензорезистора сохраняются в заданных пределах. Установлено, что под воздействием динамических деформаций происходит постепенное уменьшение чувствительности тензорезистора в результате ослабления связи между тензорешеткой и основой, между основой и поверхностью детали, либо происходит нарушение контакта в месте соединения тензорезистора с выводами и другие виды повреждений.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с большим разнообразием метрологических характеристик тензорезисторов в работе используется различное оборудование в контрольно-измерительные приборы. Методика определения некоторых характеристик тензорезисторов описана ниже.

2.1. Для проведения работ по определению метрологических характеристик тензорезисторов используются упругие элементы с датчиками, подготовленные при выполнении лабораторной работы N1 настоящего пособия.

2.2. База тензорезистора определяется с использованием штангенциркуля или линейки.

2.3. Номинальное сопротивление наклеенного тензодатчика определяется с использованием высокоточных цифровых: вольтметров типа В7-27 или Р-386. В соответствии с инструкцией по эксплуатации измерительного прибора необходимо подключить его к сети и установить соответствующий диапазон измерений сопротивления (как правило до 1 кОм). После этого произвести измерение сопротивления исследуемого датчика путем одновременного замыкания выводов датчика с соответствующими контактами соединительного

кабеля. Указанную процедуру проделать не менее трех раз, полученные результаты осреднить и записать в журнал испытаний тензорезисторов.

2.4. Коэффициент тензочувствительности S_T тензорезисторных преобразователей определяется на специальном тарировочном устройстве с использованием многоканальной тензометрической аппаратуры (СИИТ-2, СИИТ-3, ИЦЦ, ИСД и т.д. в каждом конкретном случае студент должен ознакомиться с соответствующей инструкцией по эксплуатации прибора). Наклеенные на противоположные поверхности упругого элемента тензорезисторы соединяются в полумостовую измерительную схему, которая через разъем подключается на вход тензоусилителя. Исследуемый образец 1 с датчиками устанавливается в приспособление (рис.2.1) на опоры 2 и 3 устройства и посредством вращения маховика, получает перемещение, на участке балки между опорами 2 реализуется вариант нагружения чистым изгибом. С использованием стрелочного индикатора 4 регистрируется прогиб балки. Величина деформации в зоне наклейки тензорезистора связана с прогибом зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{4 \times (h + 2 \times \Delta h) \times f}{L^2 + 4 \times f^2 + 4 \times f \times h}, (2.7)$$

где h - толщина балки, мм;

Δh - расстояние от поверхности балки до середины чувствительного элемента тензорезистора, мм ;

f - прогиб на базе L , мм ;

L - длина балки между опорами 2.

При малых значениях Δh и f можно вычислять деформацию по упрощенной формуле:

$$\varepsilon = \frac{4 \times h}{L^2}, (2.8)$$

Задавая различные значения ε , по показаниям тензоусилителя, регистрируют соответствующие изменения относительного сопротивления $\Delta R/R$ и строят статическую характеристику тензорезистора $\Delta R/R=f(\varepsilon)$. В соответствии с формулой (2.1) коэффициент тензочувствительности определяется по формуле:

$$S_T = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}, (2.9)$$

2.5. Величину ползучести Π_T (временная ползучесть) определяют с использованием оборудования, описанного в п. 2.4. С помощью тарировочного

устройства создают прогиб упругого элемента соответствующий деформации 10^3 е.о.д. или 0,1% при этом заданная деформация не должна изменяться в процессе испытаний более чем на 5 е.о.д. (или 0.0005%). Нагружение упругого элемента и снятие первоначальных показаний производят за ограниченное время, не превышающее 10 с.

После окончания нагружения и снятия первого измерения упругий элемент остается под действием постоянной деформации, при этом регистрируется изменение относительного приращения сопротивления $\Delta R/R$ через интервалы времени в 5, 10, 20, 30 и 60 мин. Для каждого исследуемого тензорезистора по результатам испытаний определяется величина ползучести Π_{τ_1} , - соответствующая времени τ_1 , при этом используется зависимость типа (2.3) из раздела 1 .7 . По полученным результатам строят зависимость ползучести от времени и среднюю кривую ползучести для тензорезисторов всей партии (рис.2.3) .

2.6. Величина механического гистерезиса определяется на основе результатов, полученных в п.2.4 при определении коэффициента тензочувствительности . Зависимость $\Delta R/R=$, построенная при нагрузке и разгрузке, позволит определить величину механического гистерезиса по формуле (2.4). Механический гистерезис для данной партии датчиков определяется путем осреднения результатов 4... 5 опытов на разных упругих элементах.

2.7. Определение ТКС тензодатчиков, наклеенных на упругие элементы, осуществляют по следующей методике: свободные упругие элементы помещают в электропечь, обеспечивающую скорость нагрева от 3,0 до 30,0°C в минуту. Образцы выдерживают в печи в течении 10 мин. при нормальной температуре, при этом фиксируются начальные показания тензоусилителя. Затем производят испытания двумя способами; а). непрерывным нагреванием или охлаждением с регистрацией $\Delta R/R$ и температуры; б). ступенчатым нагревом или охлаждением с приращением температуры на 10...20% от предельной и выдержке на каждой ступени по 5...10 мин. Для каждого исследованного тензорезистора строят зависимость $\Delta R/R$ от температуры и определяют среднее значение для всей партии. Для температур, составляющих 50, 75 и 100% от предельной рабочей температуры, определяют среднеквадратичное отклонение $\sigma(\Delta R/R)_t$. Средний ТКС определяют по методике приведенной на рис.2.4, из точки, соответствующей температуре +20°C, проводят прямую, угловой коэффициент которой определяют методом наименьших квадратов; этот коэффициент равен среднему ТКС тензодатчиков для диапазона температур от нормальной до предельной.

2.8. Сопротивление изоляции определяют при нормальной температуре. Измерение сопротивления изоляция производят мегаомметром с пределом измерений не менее 10000 Ом , при этом установившееся напряжение должно быть не ниже 100 В.

2.9. Определение предельно допустимой деформации является заключительным

этапом исследования метрологических характеристик тензорезисторов. Для испытаний используют тарировочные балки, которые подвергаются деформации растяжения-сжатия на испытательных машинах, снабженных устройством для измерения деформаций. Применяют два способа нагружения: а). растяжением со ступенчатым приращением деформации по 10% от величины предполагаемой ε_{\max} с фиксацией деформации на каждой ступени; б). равномерное растяжение со скоростью нагружения от $50 \cdot 10^{-6} \dots 5000 \cdot 10^{-6}$ е.о.д./с до начала предела текучести образца и выше.

При проведении испытаний упругие элементы нагружают до тех пор, пока тензорезисторы не выйдут из строя, в следствии обрыва элементов чувствительной решетки. В процессе нагружения измеряют деформации образца и $\Delta R/R$ и строят зависимость $\Delta R/R=f(\varepsilon)$, по которой определяют область упругой работы тензорезистора.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Определить базу проверяемого тензорезистора в соответствии с пунктом 2.2.

3.2. Измерить номинальное сопротивление датчиков в соответствии с пунктом 2.3. Записать данные в журнал испытаний.

3.3. Произвести распайку разъема для подключения тензорезисторов к тензоусилителю по полумостовой схеме. Установить тарировочную балку в нагрузочное приспособление и подключить разъем к тензометрической системе. Задавая прогиб балки, контролируемый по стрелочному индикатору ($f_{\min}=0$; $f_{\max}=5,0$; $\Delta f=0,5$ мм), фиксируют показания тензоаппаратуры при нагрузке и разгрузке балки. Полученные значения занести в таблицу. Опыт повторить не менее трех раз для каждой тарировочной балки.

N п/п	f_i , мм	ε , е.о.д.	$\Delta R/R$
-------	------------	------------------------	--------------

Полученные данные осреднить и построить графики для нагрузки и разгрузки. По полученной статической характеристике тензорезистора определить величину коэффициента тензочувствительности S_T .

3.4. Оценить величину ползучести наклеенного тензорезистора с этой целью установить упругий элемент в нагрузочное приспособление и задать величину постоянного прогиба, соответствующую деформации 0,1%.

После чего осуществить регистрацию показаний тензоаппаратуры через 0,2, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 и 30 мин, данные измерений занести в таблицу 2.2.

N п/п	τ , мин.	$\Delta R/R$, мкОм/Ом	$\Pi_\tau(\tau)$
-------	---------------	------------------------	------------------

Затем с использованием зависимости (2.3) определить величину ползучести для каждой тарировочной балки и построить зависимость изменения величины ползучести во времени. Осреднить полученные результаты и построить кривую

ползучести для данной партии тензорезисторов.

3.5. В соответствии с п.2.6 по зависимости (2.4) и данным табл. 2.1 определить среднюю величину механического гистерезиса для данной партии тензодатчиков.

3.6. В соответствии с рекомендациями п.2.7 определить ТКС тензорезисторов. Исследуемые балки (за исключением одной -контрольной) поместить в электропечь. В начальный момент времени зарегистрировать показания всех датчиков, после чего включить нагрев. Через одинаковые промежутки времени $\Delta t = 5$ мин, фиксируют показания датчиков, находящихся в печи и показания датчиков на контрольной балке. Испытания заканчиваются при достижении предельной температуры для данного типа тензодатчиков. Результаты экспериментов заносят в таблицу 2.3.

N п/п	τ , мин.	$\Delta R/R$, мкОм/Ом	$\Pi_{\tau}(\tau)$
-------	---------------	------------------------	--------------------

По данным таблицы строят график зависимости $\Delta R/R=f(T)$ и, с помощью методики описанной в разделе 2.7, определяют среднее значение ТКС для данной партии тензорезисторов.

3.7. Определение сопротивления изоляции $R_{из}$ в соответствии с п.2.8 настоящего руководства.

3.8. Предельно допустимую для данного типа тензорезистора деформацию определяют по методике, описанной в п.2.9. Тарировочная балка с датчиком устанавливается в захваты разрывной машины, задается скорость перемещения захватов не более 100 е.о.д./с. Нагружение осуществляется ступенями с приращением деформации не более 10% от величины предполагаемой ε_{max} . На каждой ступени нагружения фиксируется величина деформации ε и значения показаний тензорезистора $\Delta R/R$. Полученные данные заносят в таблицу № 2.4.

Таблица 2.4

N п/п	ε	$\Delta R/R$, мкОм/Ом
-------	---------------	------------------------

Нагружение производят до разрушения тензорезистора. В заключении строится зависимость $\Delta R/R=f(\varepsilon)$, по которой определяют предельное значение упругих деформаций тензорезистора ε_{max} .

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчет по лабораторной работе должна входить следующая информация:

- 4.1. Название работы, цель и основные задачи исследования.
- 4.2. Краткое изложение теоретических основ электротензометрии.
- 4.3. Результаты определения метрологических характеристик исследуемых тензорезисторов:
 - база тензорезисторов;

- номинальное сопротивление ;
- статическая характеристика тензорезисторов (нагрузка, разгрузка), таблица результатов и график функции $\Delta R/R=f(\epsilon)$; среднее значение статической характеристики тензорезистора , коэффициент тензочувствительности;
- значение коэффициента временной ползучести, таблица результатов и графики функции $P_{\tau}=f(\tau)$ и среднее значение величины коэффициента временной ползучести;
- величина коэффициента механического гистерезиса;
- значение ТКС, результаты измерений, итоговый график функции $\Delta R/R=f(T)$, среднее значение ТКС тензорезистора;
- сопротивление изоляции;
- величина предельной деформации и зависимость $\Delta R/R=f(\epsilon)$.

4.4. Сравнение полученных результатов с паспортными данными завода-изготовителя на данную партию датчиков.

4.5. Выводы и заключение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ. ДИНАМИЧЕСКАЯ ТРАИРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

При экспериментальных исследованиях временных процессов результат измерения в значительной мере зависит от соотношения динамических свойств измерительного преобразователя и частотного спектра исследуемого входного сигнала. Амплитудно-фазовая частотная характеристика отображает реакцию измерительного преобразователя на установившееся гармоническое возмущение и необходима при установлении границ применения датчиков и оценки уровня динамических погрешностей.

В данной работе проводятся исследования датчиков инерционного типа, которые широко применяются для изучения кинематических параметров машин (перемещений, скоростей, ускорений).

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1 . Расчетное и экспериментальное определение амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) измерительного преобразователя и сопоставление полученных результатов.

2. Динамическая градуировка датчиков ускорений трех типов: индуктивного, пьезоэлектрического и тензорезисторного.

1 . ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Исследование динамических характеристик измерительных преобразователей выполняется различными методами, в частности: на основе дифференциального уравнения движения инерционной массы датчика и экспериментальным, основанным на сопоставлении входного и выходного сигналов. В качестве

сигналов стандартного воздействия чаще всего используются переходная и импульсная функции, а также воздействие в виде гармонического сигнала. Амплитудно-фазовой частотной характеристикой измерительного преобразователя называют комплексную функцию, отображающую отношение выходного сигнала к гармоническому входному воздействию.

В большинстве случаев для измерения параметров вибраций используются датчики инерционного типа, схема которого показана на рис.3.1. Корпус прибора (1) крепится на поверхности исследуемого объекта так, что направление вибрации x_r совпадает с направлением перемещений массы прибора X .

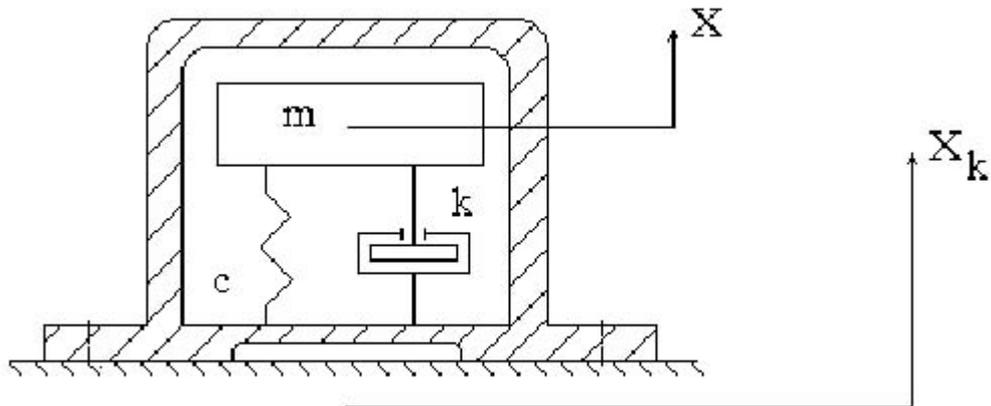


Рис. 3.1. Расчетная схема измерительного преобразователя инерционного типа:
 m – масса датчика; k – коэффициент демпфирования;
 c – жесткость динамической системы;
 x, x_k – системы координат, связанные с основанием и положением центра масс датчика соответственно.

Параметры движения такой колебательной системы, ее реакцию на внешнее воздействие можно описать неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m \ddot{x} + k \dot{x} + cx = k \dot{x}_k + cx_k, (3.1)$$

Движение массы m относительно основания измерительного преобразователя описывается уравнением:

$$\ddot{x}_m + 2 \cdot n \cdot \dot{x}_m + p^2 \cdot x_m = -\ddot{x}_k, (3.2)$$

где $x_m = x - x_k$ - относительное перемещение массы m ;

$p = \sqrt{\frac{c}{m}}$ - собственная (круговая) частота недемпфированной системы;

$n = \frac{k}{2 \cdot m}$ - относительный коэффициент демпфирования.

В случае, когда колебания исследуемого объекта гармонические, т. е.

$x_k = x_0 \cdot \sin(\omega t)$, где x_0 - амплитуда, а ω - частота колебаний изучаемого объекта.

Тогда перемещения колебательной системы преобразователя будут:

$$\ddot{x}_m + 2 \cdot n \cdot \dot{x}_m + p^2 \cdot x_m = x_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t), (3.3)$$

Решение такого уравнения можно представить в виде:

$$x_m = x_1 + x_2,$$

где

$$x_1 = A \cdot e^{-nt} \cdot \sin(p \cdot t), (3.4)$$

- уравнение свободных колебаний преобразователя:

$$x_2 = \frac{x_0 \cdot \omega^2}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \omega^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), (3.5)$$

уравнение вынужденных колебаний с частотой равной частоте воздействия с некоторым запаздыванием, т. е. сдвигом по фазе колебаний системы на угол.

Угол сдвига фаз между колебаниями кинематического возмущения и реакцией колебательной системы преобразователя определяет выражение:

$$\varphi = \arctg \frac{2 \cdot n \cdot \omega}{\omega^2 - p^2}, (3.6)$$

Таким образом, амплитудно-частотную $A(\omega)$ и фазочастотную $\varphi(\omega)$ характеристики датчиков рассчитывают по формулам (3.7-3.8).

Рассмотрим два принципиально противоположных конструктивных решения колебательной системы преобразователя: $\omega \gg p$ и $\omega \ll p$.

В том случае, когда собственная частота колебательной системы измерительного преобразователя во много раз (на порядок или больше) меньше частоты вынужденных колебаний объекта: $\omega/p \gg 1$, а демпфирование мало ($2n \ll \omega$) выражение (3.7) примет вид:

$$x_m(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t) \cong x_k(t), (3.7)$$

т.е. движение массы m колебательной системы измерительного преобразователя практически точно соответствуют перемещению объекта, но находятся с ним в противофазе. Рассмотренные условия работы преобразователя называются режимом виброметра.

У реальных измерительных преобразователей удовлетворить условию $\omega \gg p$ бывает сложно, кроме того нецелесообразно стремиться к малому демпфированию поскольку именно демпфирование сокращает время переходного процесса, т. е. влияние на запись собственных колебаний преобразователя. Следовательно, фактическая погрешность записи реальным датчиком - отношение x_m/x_k зависит от соотношения частот ω/p и коэффициента демпфирования n (или относительного коэффициента демпфирования $D=n/p$). Такая зависимость называется амплитудно-частотной или просто частотной характеристикой измерительного преобразователя по перемещению (рис.3.2).

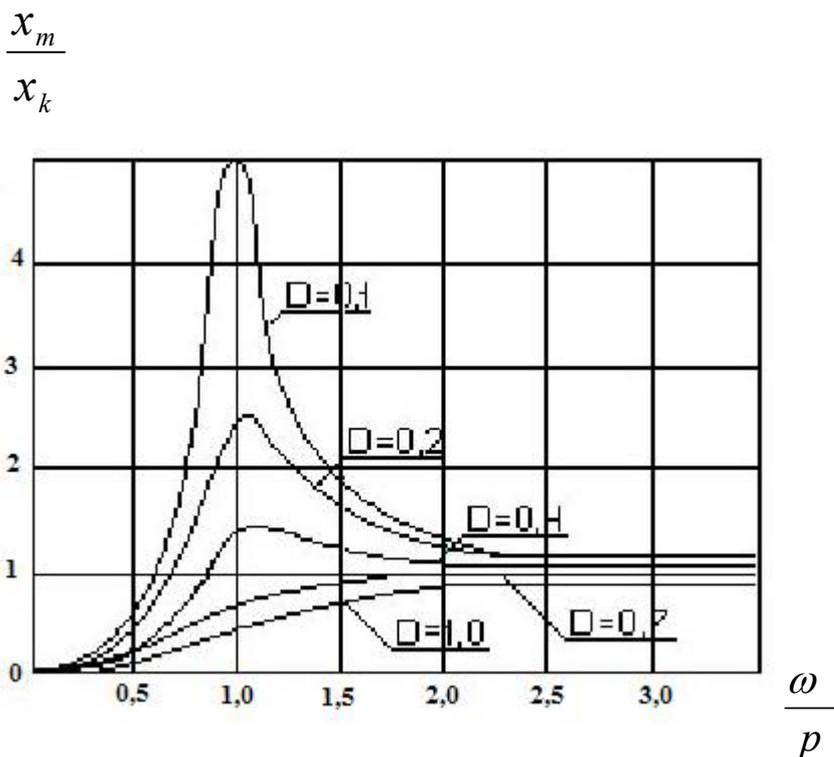


Рис. 3.2. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя, работающего в режиме виброметра.

Как видно из рисунка, условию $x_m/x_k = 1$ соответствует горизонтальный участок при $\omega/p > 3$ и D

Когда выполняется соотношение $p \gg \omega$, т.е. когда колебательная система измерительного преобразователя является относительно высокочастотной $\omega/p < 1$, и n весьма значительным. Уравнение (3.5) можно представить в виде:

$$x_m(t) = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{p}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{\omega}{p}\right)^2} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot x_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi), (3.8)$$

Согласно принятым для акселерометра условиям, если $\omega/p \approx 0,1..0,2$ $p \approx 0,1..0,2$, то при этом первый член правой части уравнения (8) стремится к единице, а выражение $x_0 \sin(\omega t + \varphi) = \ddot{x}_k$ определяет ускорение конструкции:

$$x_m \cong \frac{1}{p^2} \cdot \ddot{x}_k, (3.9)$$

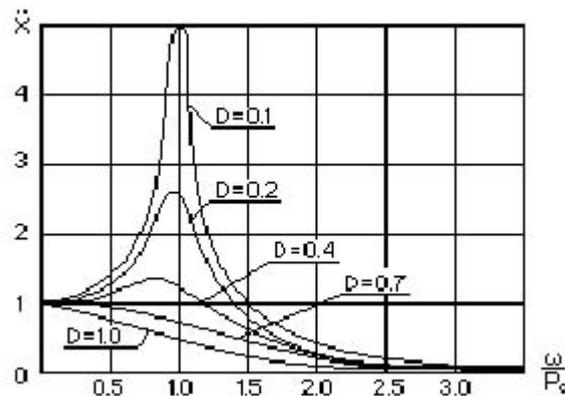


Рис. 3.3. Амплитудно-частотная характеристика преобразователя, работающего в режиме акселерометра.

Как следует из анализа выражения (9), перемещение жесткой колебательной системы измерительного преобразователя может быть настолько мало, что возникают затруднения по их измерению. Поэтому применение в качестве акселерометров высокочастотных колебательных систем сопряжено со значительным снижением чувствительности. На рисунке 3.3 приведены АЧХ акселерометра для различных значений коэффициента D и соотношения частот ω/p ; хорошо видно, что наиболее приемлемым значением затухания $D = 0.6..0.7$.

Таким образом, измерительные преобразователи, используемые для регистрации кинематических параметров, могут в зависимости от соотношения собственной частоты преобразователя и частоты исследуемого процесса регистрировать различные параметры: либо быть акселерометрами - датчиками для измерения ускорений (рис. 3.3), либо использоваться в качестве резонансных датчиков (в области $0,95 < \omega/p < 1,05$ или баллистические $\omega/p > 4..6$).

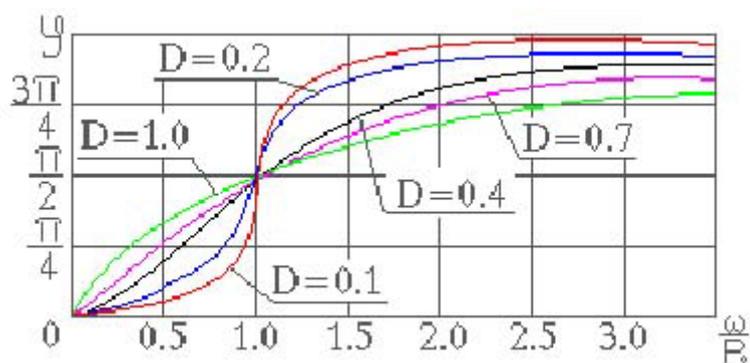


Рис. 3.4. Фазочастотная характеристика преобразователя.

В отличие от амплитудно-частотной, фазочастотная характеристика измерительного преобразователя не имеет горизонтального участка (рис.3.9). Если $\omega/p \ll 1$ (режим акселерометра), колебания подвижной системы преобразователя практически совпадают по фазе с колебаниями объекта, при $\omega/p > 1$ (режим виброметра) они находятся в противофазе с направлением внешнего воздействия. Из рис.3.4 следует, что изменение фазы колебаний (в области $\omega/p=1$) на обратную происходит тем резче, чем меньше затухание системы.

2. Описание установки и методика исследований

Установка для определения АФЧХ измерительных преобразователей состоит из вибростенда 1, исследуемых датчиков и комплекса усилительной 3 и регистрирующей 4 аппаратуры.

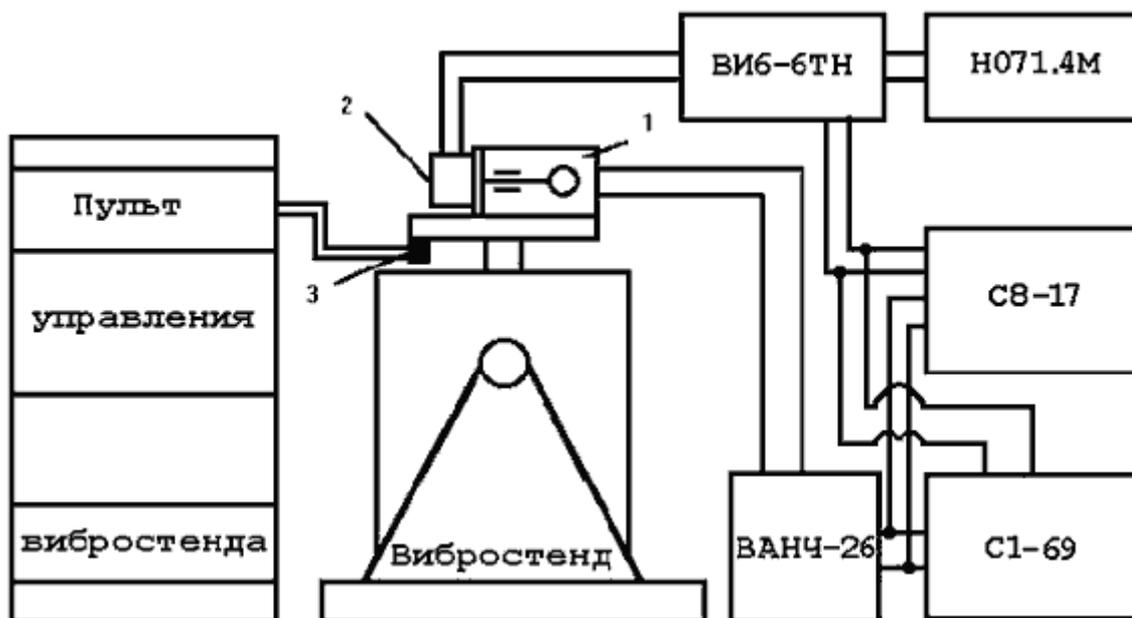


Рис. 3.5. Лабораторная установка для исследования АЧХ и ФЧХ измерительных преобразователей инерционного типа.

Вибрационный электродинамический стенд типа-10А состоит из пульта управления вибратором, размещенных в приборной стойке, а также вибратора ВЭД-10А.

В конструкции вибратора использована электродинамическая приводная система, в которую входит электромагнит с кольцевым воздушным зазором и подвижная система, подвешенная на двух упругих мембранах. Через катушку подмагничивания пропускается постоянный ток от блока подмагничивания, а через подвижную катушку пропускают переменный ток, частота и амплитуда которого определяется условиями испытаний и задается с пульта управления вибратора через усилитель.

Контроль параметров колебательного процесса осуществляется с помощью эталонного датчика ускорений. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным магнитным полем электромагнита и создает толкающую силу F , величина которой определяется по формуле:

$$F = 0,102 \cdot 10^{-1} \cdot B \cdot I \cdot L,$$

где B - индукция в воздушном зазоре; I - сила тока в подвижной катушке; L - длина проводника подвижной катушки.

Величины “ B ” и “ L ” являются для данного вибратора постоянными, упругие мембраны (верхняя и нижняя) удерживают подвижную катушку в среднем рабочем положении в воздушном зазоре электромагнита. Мембраны подобраны таким образом, чтобы частота системы, зависящая от упругости мембраны и массы подвижной части вибратора, была равной от 15 до 25 Гц.

Величина виброускорения, создаваемая вибратором, зависит от толкающей силы F , массы испытуемых изделий, массы подвижных частей вибратора и определяется по формуле:

$$x_k = \frac{F}{(m_{\text{в.ч.}} + m_{\text{и.м.}})},$$

На столе вибратора закреплены исследуемые измерительные преобразователи трех различных типов:

- тензорезисторные 3.2 (1 - инерционная масса; 2 - упругий элемент; 3 - тензорезисторы).
- индуктивные 3.3 (1 - катушки; 2 - масса; 3 - пружины).
- пьезоэлектрические 3.4 (1 - масса; 2 - прокладка; 3 - пьезоэлементы).

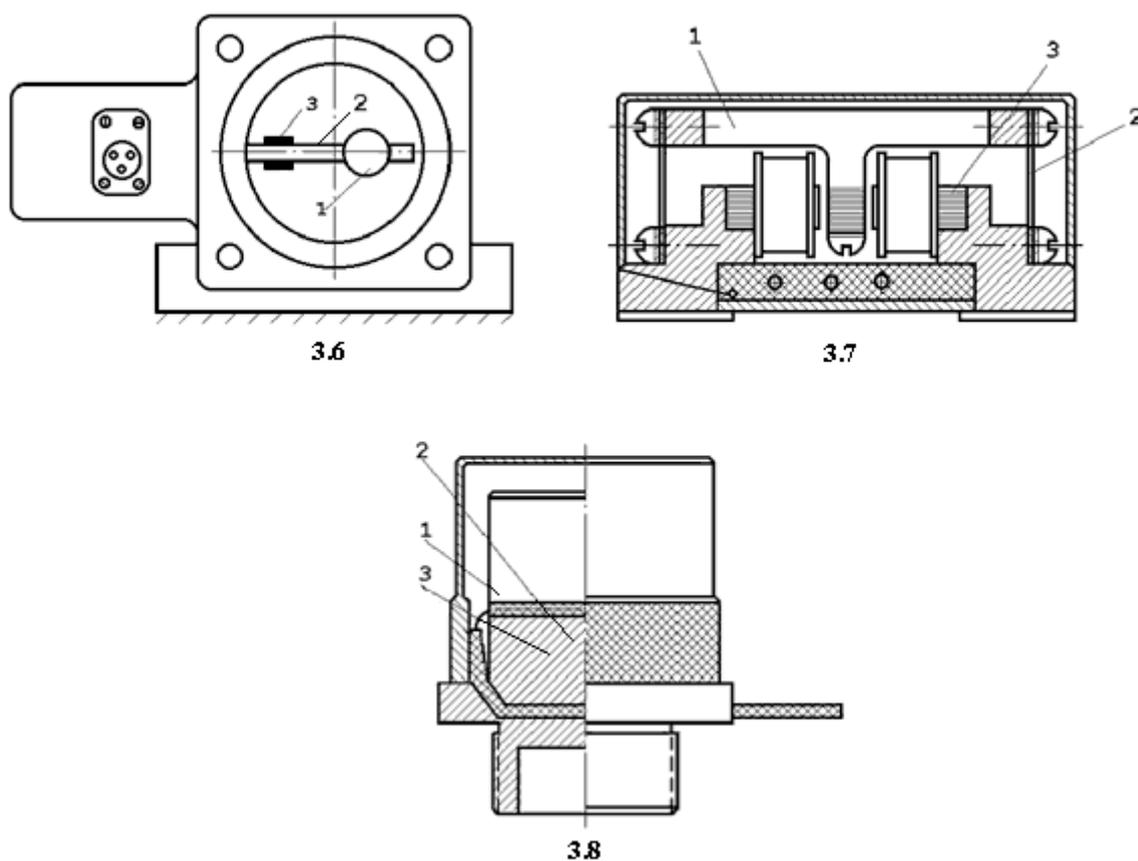


Рис.3.6—3.8. Принципиальные схемы инерционных преобразователей различных типов: тензометрического, индуктивного и пьезоэлектрического.

Чувствительным элементом тензорезисторного преобразователя 1 является консольная балка, на которой наклеены тензорезисторы, включенные по полумостовой схеме. Упругий элемент (балка) с сосредоточенной массой на конце совершает колебания в камере, заполненной силиконовым маслом (с целью демпфирования). Сигнал тензорезисторного преобразователя усиливается с помощью тензоусилителя 8АНЧ-26.

Акселерометр индуктивного типа марки ДУ-5С 2 используется в комплекте с виброизмерительным комплексом ВИБ-6ТМ. Работа измерительного преобразователя основана на изменении индуктивного сопротивления катушек (1) за счет изменения величины воздушного зазора при перемещении массы (2), установленной на двух плоских пружинах (3). В качестве упругого элемента пьезоэлектрического датчика 3 используется кристалл пьезоэлектрического материала (1), в котором под действием инерционной силы появляется заряд, пропорциональный величине действующего ускорения. Сигналы датчиков, усиленные аппаратурой, поступают на регистраторы. В лабораторной работе в качестве регистраторов используются электронно-лучевые осциллографы С1-69 и С8-14, а также светолучевой осциллограф НО.071.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЗАТУХАЮЩИХ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Характеристиками инерционных преобразователей являются их собственная частота (p) и коэффициент демпфирования (μ). Постоянные измерительных преобразователей инерционного типа определяются по осциллограммам их собственных колебаний, возбуждаемых легким ударом по корпусу прибора. Типичная картина затухающих колебаний чувствительного элемента датчика показана на рисунке 3.5.

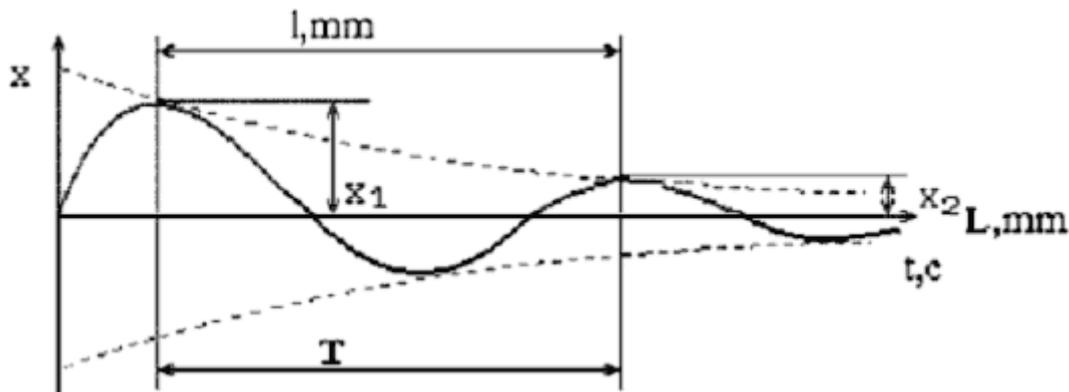


Рис. 3.9. Свободные затухающие колебания инерционной массы измерительного преобразователя.

Собственная частота p (или f_0) преобразователя определяется по формуле:

$$p = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{x_1}{x_2}\right)^2}, \quad f_0 = \frac{p}{2\pi}, \quad (3.10)$$

Период колебаний T определим из выражения: $T = 1 A$, где A - временной масштабный коэффициент осциллографа.

4. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ И ФАЗО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики датчиков рассчитывают по формулам (3.5-3.6).

ПРИМЕЧАНИЕ: При $\omega/p > 1$ по формуле (3.6) получаем $\varphi(\omega) < 0$; в этом случае на графике следует откладывать величину $\varphi(\omega) = 180^\circ + \varphi(\omega)$.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АФЧХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ФИГУР ЛИССАЖУ

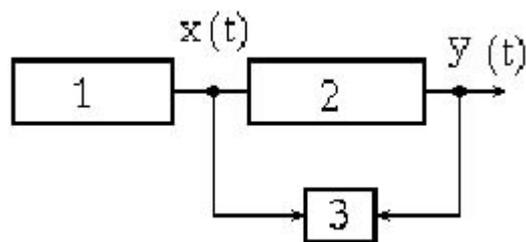


Рис. 3.10. Принципиальная схема соединения измерительной аппаратуры для регистрации АФЧХ датчиков методом фигур Лиссажу.

1 - генератор гармонических сигналов; 2 - измерительный преобразователь; 3 - электронно-лучевой осциллограф.

Достаточно просто можно определить частотную и фазовую характеристики измерительных преобразователей в том случае, когда входной и выходной сигналы имеют электрическую природу.

На рисунке 3.10 представлена принципиальная схема подсоединения датчиков к задающей и регистрирующей аппаратуре для снятия частотной и фазовой характеристик методом фигур Лиссажу. Сигнал эталонного вибропреобразователя Д-14, который представляет собой входное воздействие на датчик поступает на горизонтальные отклоняющие пластины электронно-лучевого осциллографа, а сигнал исследуемого преобразователя поступает на вертикальные отклоняющие пластины. В результате на экране осциллографа появляется изображение эллипса координаты точек которого являются функциями времени:

$$x = X_m \sin(\omega t), \quad y = Y_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где X_m и Y_m - амплитудные значения входного и выходного сигналов.

Получая изображение эллипса на различных частотах нагружения, можно, используя определенную методику расшифровки, построить частотную и фазовую характеристики исследуемых датчиков.

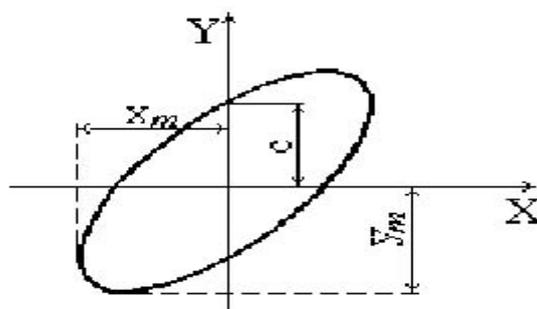


Рис. 3.11. Определение АЧХ и ФЧХ измерительных преобразователей с использованием фигуры Лиссажу.

Измеряя отношение Y_m к X_m , получаем соответствующие данной частоте значения на амплитудно-частотной характеристике, а фазовый угол $\varphi(\omega)$ определяется через отрезок C , ограниченный началом координат и точкой пересечения эллипса с осью Y . При этом $\varphi = \arcsin(C/Y_m)$.

6. ДИНАМИЧЕСКАЯ ТАРИРОВКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ИССЛЕДУЕМЫХ ДАТЧИКОВ

Рабочим диапазоном частот исследуемых преобразователей индукционного типа, в котором они могут использоваться как акселерометры, является отрезок частотной характеристики на котором отношение амплитуд выходного и входного сигналов сохраняется постоянным: $Y_m/X_m = \text{const}$.

Динамическая тарировка измерительных преобразователей осуществляется с использованием того же измерительного комплекса, что и при определении АФЧХ. Используя возможности вибростенда, задавая различные уровни виброускорений на фиксированной частоте нагружения определяют величину ускорения, которую фиксирует исследуемый датчик и сравнивают ее с показаниями вибропреобразователя Д-14. После чего для реализуемого диапазона виброускорений строят график функции: $Y_{\text{ВЫХ}} = f(X_{\text{ВХ}})$, где $Y_{\text{ВЫХ}}$ - показания исследуемого датчика, а $X_{\text{ВХ}}$ - показания вибропреобразователя Д-14.

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.1. Собрать измерительную схему.

7.2. Включить и прогреть аппаратуру: вибростенд, усилитель 8АНЧ-26, ВИ6-6ТМ, С1-69, С8-14, НО.071.

7.3. По осциллограммам свободных колебаний чувствительных элементов датчиков (1, 2 и 3) определить их собственные частоты и постоянные затухания.

7.4. Построить расчетные АФЧХ измерительных преобразователей.

7.5. Построить с помощью фигур Лиссажу экспериментальную АФЧХ.

7.6. Выполнить динамическую градуировку и определить рабочий диапазон частот исследуемых измерительных преобразователей.

8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

8.1. Описание установок, применяемых приборов, измерительных преобразователей и необходимые теоретические данные к каждому этапу исследований;

8.2. График процесса свободных колебаний чувствительных элементов датчиков со всеми необходимыми параметрами. Расчет собственной частоты и постоянной затухания измерительных преобразователей.

8.3. Формулы и графики расчетной АФЧХ преобразователей,

8.4. График типовой фигуры Лиссажу со всеми необходимыми параметрами.

8.5. Таблица данных для экспериментального определения АФЧХ датчиков.

Таблица

$f, \text{Гц}$	25	40	50	...	200	...	1000	...	5000
$\ddot{x}_0, \text{м/с}^2$									
$Y_m, \text{дел.}$									
$X_m, \text{дел.}$									
Y_m/X_m									
$C, \text{дел.}$									
$\varphi, \text{град.}$									

\ddot{x}_0 - показания блока измерения вибраций вибростенда;

8.6. Градуировочный график измерительных преобразователей в координатах $Y_{\text{вых}}=f(X_{\text{вх}})$ и рабочий диапазон частот, в котором датчики работают как акселерометры.

8.7. Сравнение АФЧХ различных акселерометров, полученных расчетным и экспериментальным методами.

8.8. Выводы и заключение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ

Метод электротензометрии в настоящее время широко применяется для исследований деформированного состояния сложных конструкций, находящихся под воздействием силового, кинематического и теплового нагружения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния конструкций. 2. Освоение практических навыков использования современной измерительной и регистрирующей тензоаппаратуры при проведении многоточечных исследований напряженно-деформированного состояния конструкций.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Среди механических величин, экспериментальному исследованию которых придается большое значение, важное место принадлежит деформациям и напряжениям, возникающим в материале деталей при внешнем воздействии. Это связано с тем, что в ряде случаев расчетное определение полей напряжений и деформаций в деталях сложной формы с достаточной степенью точности выполнить затруднительно, а иногда невозможно. Чаще всего в инженерных расчетах оценку работоспособности конструкции ведут в напряжениях; в терминах напряжений также выражаются условия прочности и предельные

характеристики материалов (σ_B , σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_{-1}). Однако напряжения, как условный параметр, не поддаются непосредственному измерению, их пересчитывают по данным, полученным при измерении деформаций. Из курса «Сопротивление материалов» известно о существовании трех видов напряженного состояния: 1) линейного одноосного; 2) плоского или двухосного напряженного состояния; 3) объемного или трехосного. Поскольку тензорезисторы наклеиваются только на свободную поверхность детали, то с их помощью может быть исследованы линейное и плоское напряженное и деформированное состояния.

Теоретические положения, на основе которых получены формулы для пересчета деформаций, измеренных тензодатчиками в величину и направление главных напряжений подробно излагаются в учебниках по курсу «Сопротивление материалов».

В общем случае нагружения конструкции направление главных напряжений неизвестно; ориентацию главных площадок и величины главных деформаций можно определить через деформации, измеренные не менее чем в трех произвольно выбранных направлениях (метод третьей оси). Таким образом, в общем случае нагружения необходимо наклеить на деталь под некоторыми углами друг к другу не менее трех тензорезисторов.

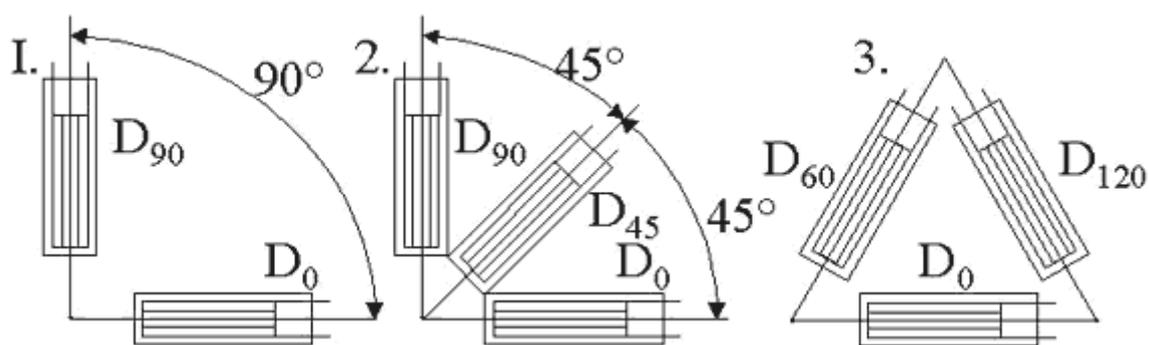


Рис. 4.1. Типы розеток для исследования плоского напряженного состояния конструкций.

I - прямоугольная двухкомпонентная розетка; 2 - прямоугольная трехэлементная розетка; 3 - равноугольная трехэлементная розетка.

В частных случаях, когда направление главных деформаций известно, можно ограничиться наклейкой двух датчиков. Для достижения наибольшей точности получаемых результатов и упрощения расчетных формул углы между тензорезисторами желательно выбирать равными 45, 60 или 90 градусов. Группу расположенных под определенными углами тензорезисторов, называют розеткой (см. рис. 4.1). Заводы-изготовители тензорезисторов выпускают многоэлементные фольговые розетки, у которых несколько ориентированных решеток расположены на одной основе. Существует несколько типов розеток: прямоугольная двухэлементная (рис. 4.1.1), прямоугольная трехэлементная (рис.4.1.2), равноугольная трехэлементная или дельта-розетка(рис.1.3), равноугольная четырехэлементная, или T - дельта-розетка. При известных направлениях главных

осей напряжений и деформаций используется прямоугольная двухкомпонентная розетка, которая состоит из двух тензорешеток, расположенных под углом 90 градусов. В этом случае датчики-розетки наклеиваются на поверхность детали в направлении, строго соответствующем направлениям главных деформаций. Подобного типа розетки используются для исследования напряженно-деформированного состояния при кручении стержней, сосудов под действием давления и т. п.

Величины главных напряжений для этого типа розеток определяется по зависимостям вида:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_0 + \mu\varepsilon_{90}), \quad (4.1)$$

$$\sigma_{2(3)} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_{90} + \mu\varepsilon_0), \quad (4.2)$$

Если направления главных площадок известны приблизительно, то применяют прямоугольную трехэлементную розетку (рис 4.1 и 4.2). Наклейку розетки осуществляют таким образом, чтобы взаимно-перпендикулярные чувствительные элементы тензорезистора располагались в направлении предполагаемых главных осей. Это позволяет получать наиболее точные данные для вычисления значений главных напряжений. Величины главных деформаций и угол поворота площадок при этом определяются по формулам:

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})]^2},$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_0 = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}, \quad (4.3)$$

Если направления главных осей неизвестны, то применяют равноугольную или дельта-розетку, т.к. в этом случае важно, чтобы углы между решетками были как можно больше. В этом случае величины главных деформаций определяются по формуле:

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{90}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{3}\right)^2},$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}, \quad (4.4)$$

По найденным значениям главных деформаций определяются главные напряжения:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3), \quad \sigma_{2(3)} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1),$$

Применяют также и более сложные четырехэлементные розетки, например Т - дельта розетки, верные розетки и т.д. Четвертая дополнительная розетка служит для контроля результатов измерения. Если измерения проведены правильно, то для верной розетки будем иметь:

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} = \varepsilon_{45} + \varepsilon_{135} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 ,$$

Если все решетки, составляющие розетку, соединить между собой последовательно или параллельно и включить их в одно плечо мостовой схемы, то можно определить среднее значение деформации на данном участке детали:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{90}) = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}) .$$

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

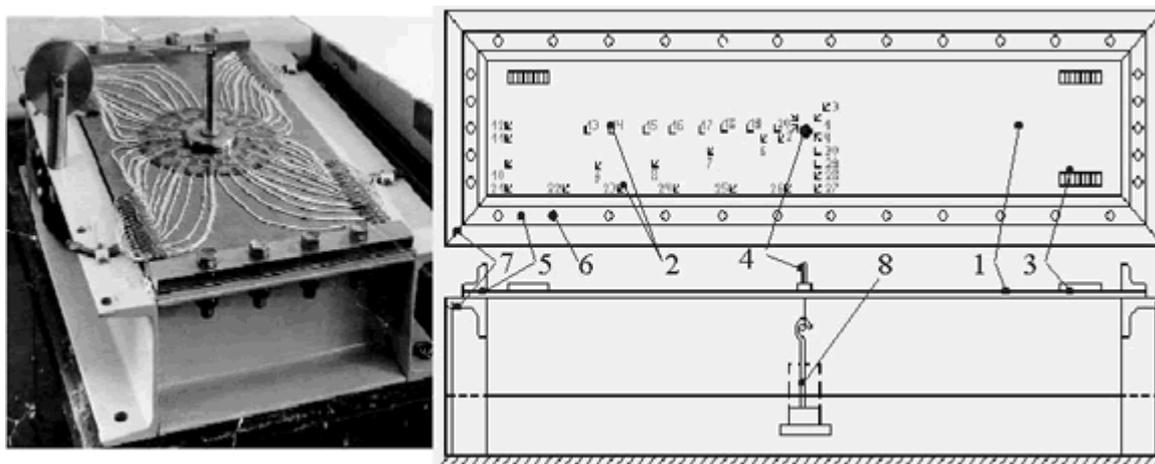


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки по исследованию напряженно-деформированного состояния пластины.

1 - исследуемая пластина; 2 - двух- и трехкомпонентные розетки; 3 - колодки; 4 - нагрузочное приспособление; 5 - верхняя рама; 6 - крепеж; 7 - нижняя рама; 8 - подвес.

Установка для исследования напряженно-деформированного состояния пластины (см. рис. 4.2) состоит из исследуемой пластины (1) с наклеенными на

ней розетками тензодатчиков (2), верхней (5) и нижней (7) рамы и нагрузочного приспособления (4). В центре пластины выполнено небольшое отверстие для установки нагрузочного приспособления. На пластине наклеено 35 трехкомпонентных прямоугольных розетки и 12 двухкомпонентных розеток, выполнен монтаж и распайка датчиков по полумостовой схеме измерения с одним активным датчиком. Выводы от датчиков выведены на периферию пластины и распаяны на стационарные колодки (3). Устанавливается один общий компенсатор для всех тензорезисторов, наклеенных на пластине. К этим колодкам подключаются провода от тензометрической системы «СИИТ - 3».



Рис.4.3. Схема передачи сигнала измерительной информации от тензорезистора в память ПЭВМ

Конструкция лабораторной установки позволяет реализовать различные варианты закрепления пластины и ее нагружение сосредоточенной силой или моментом. Принципиальная схема комплекса показана на рис.4.2. Возможны два варианта проведения измерений: с использованием ПЭВМ и без нее. В первом случае измерительная цепь выглядит как показано на рис.4.3. Толщина пластины, форма отверстия, способ закрепления, величина и направление действия сосредоточенной силы могут варьироваться в зависимости от задания на проведение лабораторной работы.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. В зависимости от варианта заданного преподавателем закрепите пластину и установите нагрузочные приспособления.

3.2. В зависимости от типа используемого оборудования осуществите подключение тензорезисторных преобразователей, установленных на пластине, к контрольно-измерительной аппаратуре.

3.3. Выполните проверку и настройку измерительного комплекса в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

3.4. Выполните маркировку и согласование номеров тензодатчиков с измерительными каналами комплекса.

3.5. Осуществите запись показаний тензорезисторных преобразователей при свободном ненагруженном состоянии пластины.

3.6. Осуществите запись показаний тензорезисторов при нагружении пластины по схеме, заданной преподавателем.

3.7. Операции, описанные в пунктах 4 и 5, повторяются не менее трех раз.

3.8. Обработка измерительной информации осуществляется с использованием пакета прикладных программ «С\$К». Для чего в диалоговом режиме осуществляется ввод необходимых данных и представление результатов в виде таблиц, графиков и картин полей главных деформаций и напряжений.

3.9. Определите эквивалентные напряжения по одной из наиболее употребимых гипотез прочности (максимальных касательных напряжений или энергии формоизменения).

3.10. Для заданных условий закрепления и нагружения пластины создайте дискретную модель и выполните расчет с использованием ППП «COSMOS».

3.11. Сравните экспериментальные и расчетные результаты.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Цель работы, принципиальная схема установки, структурная схема измерения.

4.2. Условия проведения эксперимента: внешнее нагружение, условия закрепления пластины, число ступеней нагрузки.

4.3. Результаты экспериментов представляются в виде таблицы вида:

Таблица 4.1

Номер розетки	Номер датчика			Деформации			Угол поворота исходной площадки
	D_0	D_{45}	D_{90}	ϵ_0	ϵ_{45}	ϵ_{90}	

Таблица 4.2

Номер розетки	Главные деформации		Главные напряжения		Эквивалентные напряжения (эксперимент)	Эквивалентные напряжения (расчет)	Расхождение результатов, %
	ϵ_1	ϵ_2	σ_1	σ_2			

4.4. Графическое представление пластины с изображением установленных розеток датчиков и нанесенное поле главных напряжений.

4.5. Зависимость эквивалентных напряжений от величины приложенной нагрузки (для 3 ... 4 розеток, указанных преподавателем).

4.6. Сравнить результаты экспериментальных и расчетных исследований; результаты представить на графике и в таблице 4.2.

4.7. Выводы и заключение по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗОК

Использование датчиков на основе тензорезисторных преобразователей позволяет наряду с оценкой напряженно-деформированного состояния исследовать разнообразные силовые и кинематические процессы. В ряде отраслей науки и техники возникает необходимость исследования нагрузок, величина и точка приложения которых изменяются во времени случайным образом. Примерами таких технических задач могут служить исследования ударных усилий при погрузочно-разгрузочных работах, ветровых нагрузок на высотные сооружения и т.п.; в спорте: измерение усилий при ударах, прыжках, бросках и др.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Изучение методических и практических вопросов измерения, регистрации и статистической обработки импульсных нагрузок, величина и точка приложения которых изменяется во времени случайным образом. 2. Определение статистических характеристик случайных импульсных процессов.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Установка (рис.5.1) предназначена для изучения импульсных нагрузок, линия действия которых перпендикулярна плоскости удара, а величина силы P и координаты точки ее приложения (X , Y) изменяются случайным образом. Конструкция установки состоит из мишени (платформы) 1, трех упругих элементов, выполненных в виде консольных балок 2. Один конец упругого элемента зашпелен в основании устройства 3 посредством прокладок 4, второй конец свободен и связан с мишенью (платформой) посредством шарнирной опоры. Таким образом, мишень оказывается установленной на трех упругих несвязанных элементах. В качестве измеряемых параметров приняты деформации, возникающие в трех несвязанных элементах, воспринимающих исследуемую нагрузку. Измерение деформаций упругих элементов, работающих на изгиб, выполняют с помощью тензометрических датчиков 3, наклеенных на

балки и собранных в полумостовые тензометрические схемы, обеспечивающие температурную компенсацию и удвоенную чувствительность.

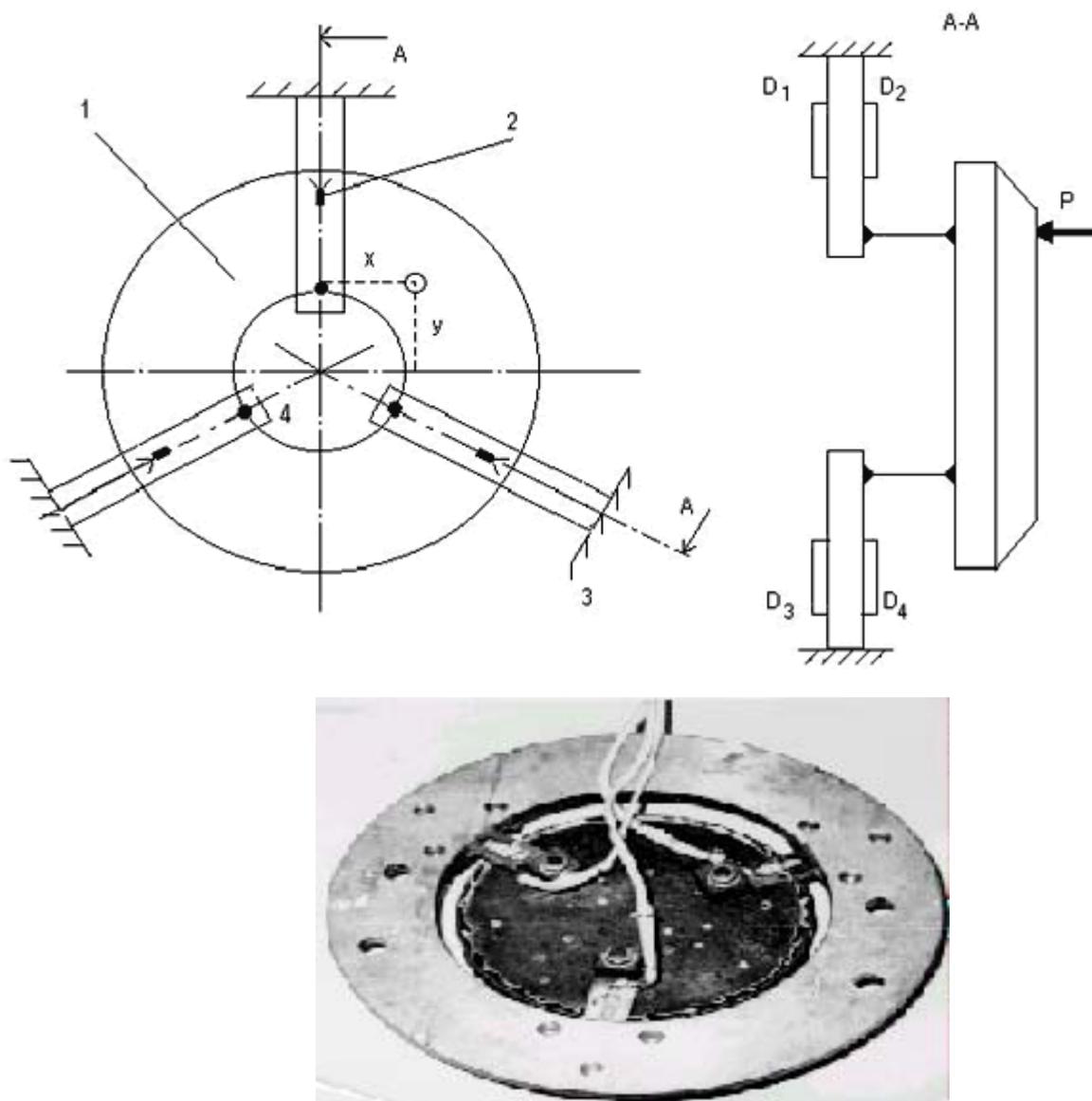


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки

I - мишень (платформа); 2 - упругие элементы; 3 - основание устройства; 4 - прокладки.

Тензорезисторные преобразователи типа ПКБ-100-10-БГ подключаются к тензоусилителю типа 8АНЧ-26, регистрация сигналов измерительной информации осуществляется с использованием светолучевого осциллографа НО.71.4, либо вводится в память ПЭВМ с использованием специального устройства на основе микроконтроллера типа МК-88 (рис.5.2).

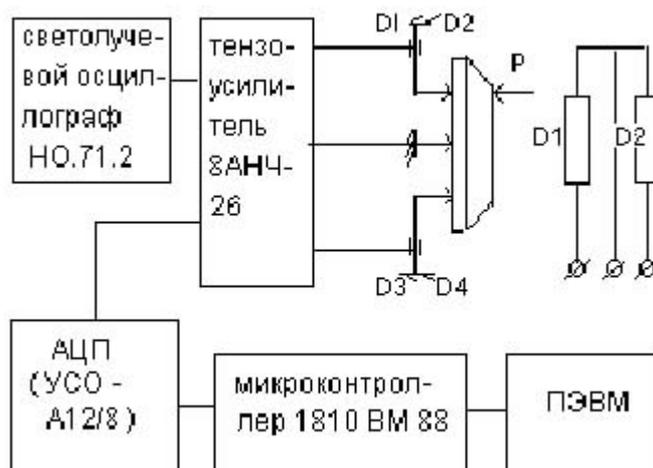


Рис. 5.2. Принципиальная схема передачи измерительной информации.

Определение исследуемых параметров основано на одновременном измерении деформаций в упругих элементах и последующем их пересчете в значения P , X , Y . Исследуемые параметры (P, X, Y) связаны с усилиями, действующими на каждый упругий элемент следующими соотношениями:

$$P = \sum_{i=1}^3 F_i,$$

$$X = \frac{(F_2 - F_3) \cdot R \cdot \sin 120^\circ}{\sum_{i=1}^3 F_i}, \quad (5.1)$$

$$Y = \frac{F_1 \cdot R - (F_2 + F_3) \cdot R \cdot \cos 120^\circ}{\sum_{i=1}^3 F_i},$$

В свою очередь усилия F_i связаны с измеряемыми деформациями:

$$F_i = \frac{E \cdot W}{L} \cdot \varepsilon_i,$$

где W - момент сопротивления сечения; E - модуль упругости 1 рода; L - расстояние от шарнирной опоры до места наклейки тензорезистора.

Повышение точности измерений достигается путем непосредственной градуировки измерительных каналов.

2. ТАРИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для проведения тарировочных исследований мишень снимается с вертикальных стоек и устанавливается в горизонтальное положение. В фиксированной точке с координатами (X,Y) прикладывается известная сила P и регистрируются показания измерительных устройств. Тарировочный опыт необходимо повторить минимум три раза при различных значениях силы и ее точки приложения. Повторные эксперименты позволят снизить влияние различного рода погрешностей на величину коэффициентов линейно-независимых уравнений вида:

$$P_j = \sum_{i=1}^3 K_i^p \cdot \varepsilon_{i,j}, [\text{кГ}] \quad X_j = \sum_{i=1}^3 K_i^x \cdot \varepsilon_{i,j}, [\text{мм}] \quad Y_j = \sum_{i=1}^3 K_i^y \cdot \varepsilon_{i,j}, [\text{мм}] \quad j=1, 2, 3 \quad (5.2)$$

где $\varepsilon_{i,j}$ - деформация, измеренная на i-м упругом элементе в j-м опыте;

K_i^p, K_i^x, K_i^y - соответствующие тарировочные коэффициенты.

Решение системы относительно коэффициентов K_i^p, K_i^x, K_i^y позволит определить тарировочные зависимости для каждого из исследуемых процессов: P, X, Y. Для случая, когда предел измерения тензоаппаратуры равен $\gamma=10^{-3}$ е.о.д., а величина масштабной отметки $A_i^T=40$ мм, значения тарировочных коэффициентов определены и сведены в табл.5.1

Таблица 5.1

Тарировочные коэффициенты	Номер тензоэлемента		
	1	2	3
K_i^p	2,31	2,26	2,43
K_i^x	0,33	3,01	-3,32
K_i^y	3,35	-1,52	-1,74

Предлагаемая в данной лабораторной работе установка используется в качестве стенда для сравнительной оценки степени технической подготовки спортсменов «боксеров». «Боксерам», экипированным боксерскими перчатками, предлагается наносить удары по поверхности платформы мишени. При этом осуществляется непрерывная запись осциллограммы, на которой в виде импульсных потоков одновременно регистрируются значения деформаций трех упругих элементов $\varepsilon_{i,j}$.

Перед студентами ставится задача в течение ограниченного интервала времени нанести наибольшее количество ударов, сила которых должна быть

максимальной, а точка приложения равнодействующей и располагаться в центре мишени. Статистическая обработка полученных осциллограмм и анализ результатов позволяют сделать объективную сравнительную оценку уровня технической подготовки «боксеров». Критериями для сравнения служат гистограммы и оценки математического ожидания и дисперсии силы ударов P и отклонения ее точки приложения центра мишени p , а также частота нанесения ударов и др.

Наряду с приведенными зависимостями может быть получен и ряд других критериев, объективно характеризующих степень технической подготовки спортсменов. Например, корреляционные зависимости между силой и точностью удара, между продолжительностью «раунда» и силой удара, между силой удара и весом боксера, между параметрами ударов, проведенных левой и правой рукой и т.п.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Собрать измерительную схему, проверить работу измерительных каналов.

3.2. Провести тарировку измерительных каналов. Для этого мишень устанавливается в горизонтальное положение, в трех фиксированных точках подвешиваются различные грузы. Значения ε_{ij} подставляются в уравнения (5.2), из которых находят тарировочные коэффициенты.

3.3. Установить мишень в вертикальное положение, зарядить кассету осциллографа фотобумагой, поставить скорость протяжки ленты $V=20\dots 50$ мм/с.

3.4. Провести запись масштабных отметок. Для этого включить двигатель осциллографа, включить генератор масштабных отметок на усилителе 8АНЧ-26, включить протяжку ленты и в течение 5-6 с проводить запись. Установка готова к проведению испытаний.

3.5. Перед одним из студентов («боксер А») ставится задача в течение ограниченного интервала времени наносить удары по мишени как можно точнее, сильнее и чаще. Он надевает боксерские перчатки и готовится к «бою».

3.6. Другой студент включает протяжку ленты, после чего подает команду «бокс» и одновременно включает секундомер. «Бой» продолжается в течение 20 с. После чего подается команда «брек». Не выключая протяжку ленты, через 1..2 с вновь записывается масштабная отметка и протяжка.

3.7. Экспонированная бумага извлекается из осциллографа и проявляется.

3.8. Вышеизложенная процедура повторяется с «боксером Б».

3.9. Провести анализ экспериментов и оформить отчет.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

4.1. Результаты тарировки и значения тарировочных коэффициентов.

4.2. Осциллограммы серии испытаний.

4.3. Результаты расшифровки осциллограмм, представленные в таблице № 5.2.

Таблица 5.2

Номер опыта	Отклонение луча			Усилие	Смещение от центра		
	$A_{i,j}$	$A_{i,j}$	$A_{i,j}$		X	Y	ρ
j	$A_{i,j}$	$A_{i,j}$	$A_{i,j}$	P	X	Y	ρ

4.4. Гистограмма силы удара P и промахов ρ отдельно для «боксеров», участвовавших в эксперименте.

4.5. Значения оценок математических ожиданий и дисперсий параметров P и ρ , а также частоту нанесения ударов. Числовые характеристики свести в таблицу 5.2.

4.6. Анализ полученных результатов, выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИЗМЕ ТОРМОЖЕНИЯ

Механизмы торможения находят применение в устройствах разного назначения, например, в системах аварийного торможения лифтов, в тренажерах, испытательных стендах и т. п.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Исследование силовых и кинематических процессов в механизме экстренного торможения. 2. Исследование влияния различных параметров системы на величину и характер изменения сил сопротивления.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Лабораторная установка представляет собой механическую систему, состоящую из двух кареток 2 и 10, перемещающихся по направляющим тросам 1, натянутым внутри рамы 14. Верхняя каретка 2, вес которой можно изменять с помощью дополнительных грузов 3, механизмом подъема 12 поднимается на определенную высоту. Положение нижней каретки фиксируется упором 11 и упругим поджатием направляющих тросов на участке торможения. После отключения муфты механизма подъема рукояткой 13 каретка 2 начинает двигаться под действием собственного веса до соударения с кареткой 10, затем начинается их совместное движение на участке торможения. Торможение кареток осуществляется за счет разведения тросов на угол α винтом 7. Кроме того, устройство содержит специальный механизм 8 для регулировки усилия натяжения тросов.

Изменяющимися параметрами установки являются: P_k - вес верхней каретки; H - высота подъема верхней каретки; β - предварительный угол развода тросов на тормозном участке; N_0 - предварительное усилие натяжения тросов.

Для исследования динамических параметров системы установка оснащена специальными датчиками и устройствами: акселерометрами 15 и 4, для регистрации ускорений при свободном падении каретки 2 и совместном движении кареток 2 и 10, датчиком перемещений для регистрации перемещения при совместном движении кареток 2 и 10 и тензоэлементом 6 для измерения усилия натяжения троса.

1.1. Измерение ускорений

Измерение ускорения кареток до и после соударения осуществляется с помощью акселерометров 4 и 15, представляющих собой инерционные датчики индуктивного типа (9, 10). Конструктивно датчики выполнены в виде отдельного корпуса, в котором на двух плоских упругих элементах установлена инерционная масса, перемещающаяся в зазоре между двумя катушками индуктивности. Под влиянием действующего ускорения происходит смещение инерционной массы датчика при этом изменяется воздушный зазор в катушках индуктивности. Изменение зазора приводит к пропорциональному изменению индуктивности катушки L . Характеристики акселерометра и его тарировочный график определяются по методике, изложенной в лабораторной работе 3.

1.2. Измерение пути торможения кареток

Для измерения этого параметра установка оснащена индуктивным датчиком перемещения 5 (рис.6.1). На нижней каретке 10 укреплен ферритовый сердечник индуктивного датчика перемещений соленоидного типа. Неподвижная катушка индуктивности закреплена вертикально на нижней части рамы 14. Перемещение при совместном движении кареток 2 и 14 приводит к смещению ферритового

сердечника в катушке индуктивного датчика, что вызывает изменение индуктивности катушки, пропорциональное величине перемещения.

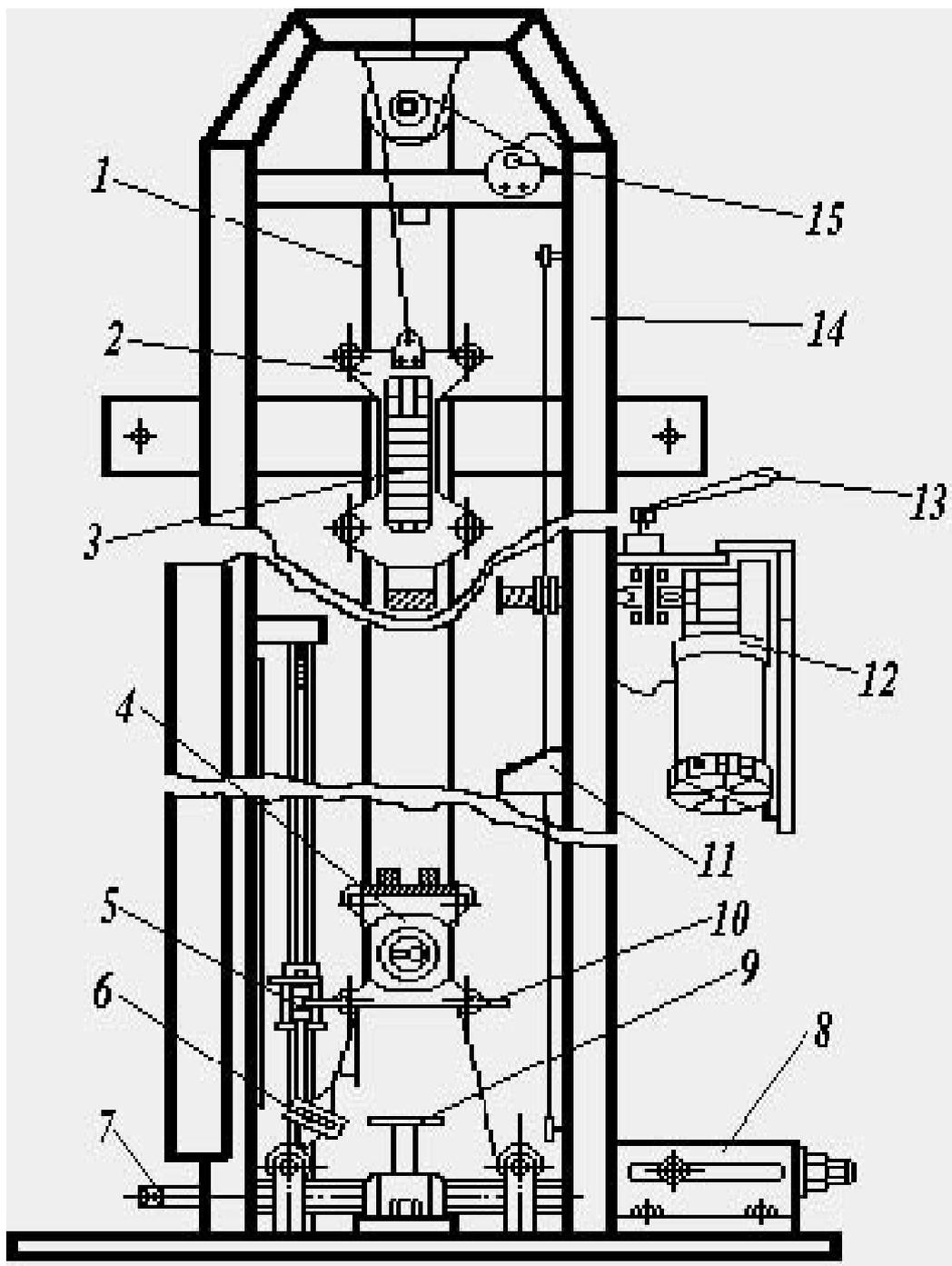


Рис. 6.1. Схема установки для исследования процесса торможения

1.3. Определение динамических усилий в тросе

При совместном движении кареток на участке торможения со стороны тросов на них действует восстанавливающая сила $F(x)$ и силы сопротивления $R_2(x, \dot{x})$.

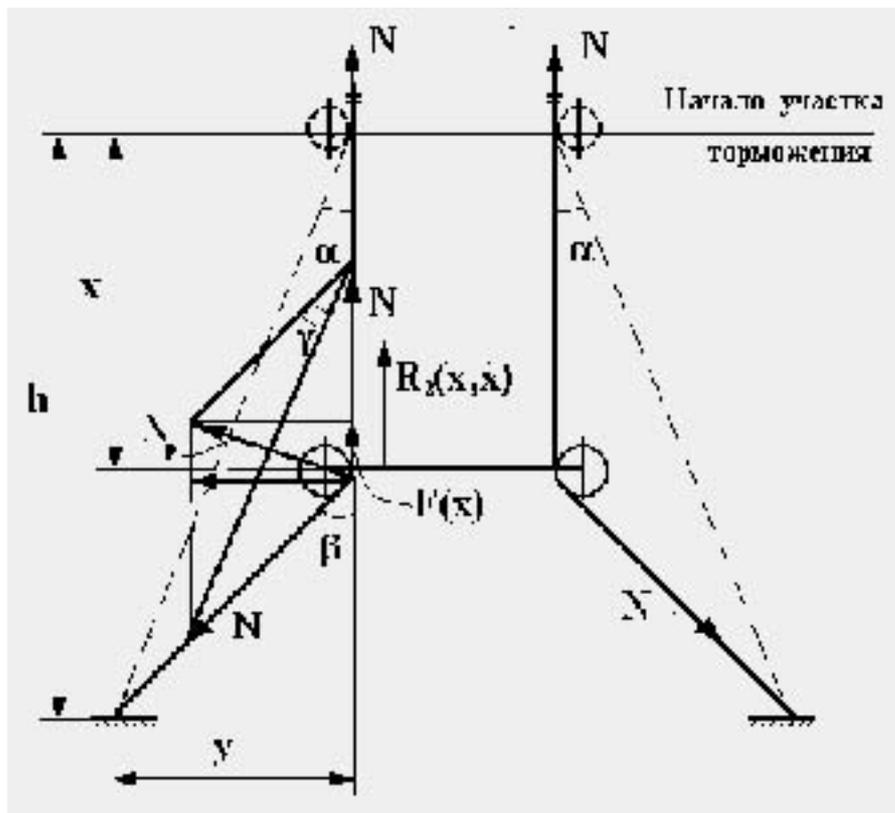


Рис. 6.2.Схема нагрузок, действующих на каретку на этапе торможения

Для определения $F(x)$ необходимо знать изменение натяжения тросов $N(x)$ по мере перемещения кареток на участке торможения. Усилие натяжения троса N измеряется с помощью тензоэлемента, показанного на рисунке.

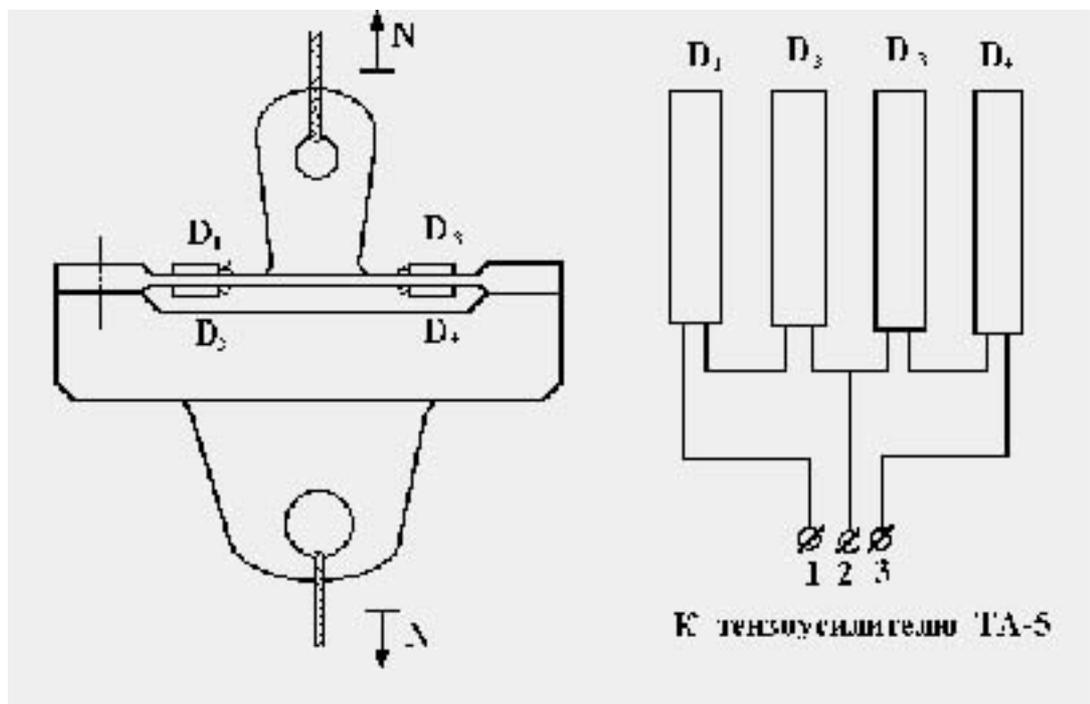


Рис. 6.3.Датчик для измерения усилия натяжения в тросах

Сигналы с индуктивных и тензорезисторных преобразователей регистрируются с помощью виброизмерительного комплекса ВИ6-6ТМ, тензоусилителя 8АНЧ-26 и осциллографа НО.071. Параллельно осуществляется регистрация сигналов измерительной информации через АЦП в память ПЭВМ. Расшифровка осциллограмм позволяет получить функцию $N(t)$.

Методикой исследования предусмотрено разделение процесса движения на два этапа:

1 этап:

Движение верхней каретки (с нулевыми начальными условиями) до момента соударения с нижней кареткой. Уравнение движения каретки в этом случае запишется в виде:

$$m_1 \ddot{x} = m_1 g - R_1(x, \dot{x}), \quad (6.1)$$

Тогда сила $R_1(x, \dot{x})$ сопротивления движению каретки определится так:

$$m_1 (\ddot{x} - g) + R_1(x, \dot{x}) = 0, \quad (6.2)$$

Функцию ускорения получим непосредственно из опыта, расшифровывая осциллограмму записи показаний акселерометра 15 установленного на верхней каретке. Зная величину ускорения \ddot{x} в различные моменты времени, из выражения (6.2), находим силы сопротивления $R_1(x, \dot{x})$ в каждый момент времени.

2 этап:

Совместное движение кареток на участке торможения. После соударения каретки движутся как одно тело массой $m = m_1 + m_2$, на участке с разведенными тросами происходит интенсивное торможение. Уравнение движения запишется в виде:

$$m \ddot{x} = mg - R_2(x, \dot{x}) - F(x), \quad (6.3)$$

где $R_2(x, \dot{x})$ - силы сопротивления движению; $F(x)$ - восстанавливающая сила (рис 6.2). Силы сопротивления определяются из уравнения движения (6.3):

$$R_2(x, \dot{x}) = m(g - \ddot{x}) - F(x), \quad (6.4)$$

Ускорение \ddot{x} определяется экспериментально с помощью акселерометра 4 (рис.6.1), а восстанавливающую силу $F(x)$ определим по функции силы натяжения троса $N(x)$.

Для различных положений x_i , определяются углы: $\beta = \arctg \frac{y}{h-y}$, $\gamma = \frac{\beta}{2}$.

Величину распорного усилия N_p выражают через усилия натяжения троса $N(x)$:

$N_p = 2N(x)\sin \gamma$. Тогда величина восстанавливающей силы:

$F(x) = N_p \sin \gamma = 2N \sin^2(\frac{\beta}{2})$. Далее, используя уравнение (6.4), строят зависимость $R_2(x)$ и с помощью экспериментальной зависимости $x(t)$ преобразуют ее в выражение $R_2(t)$.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Включить аппаратуру согласно инструкции. Произвести тарировку датчика ускорений, тензоэлемента и датчика перемещений нижней каретки.

Тарировка датчика силы осуществляется по схеме:

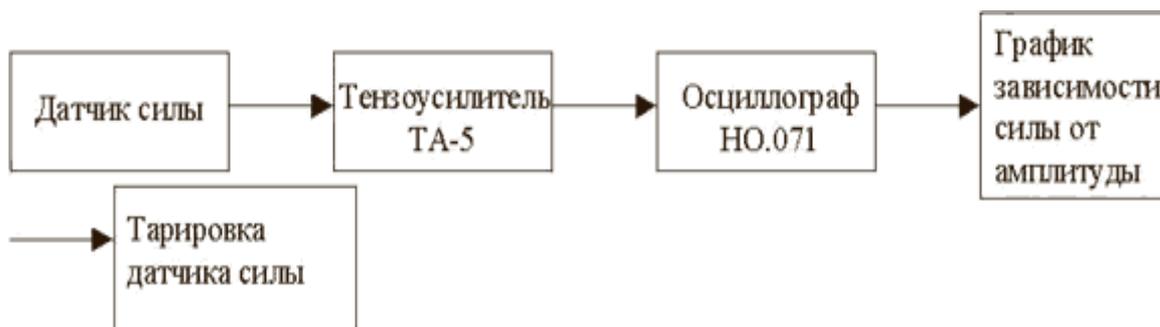


Рис.6.4. Принципиальная схема передачи измерительной информации при тарировке датчика силы.

Т а р и р о в о ч н ы й г р а ф и к с и л ы

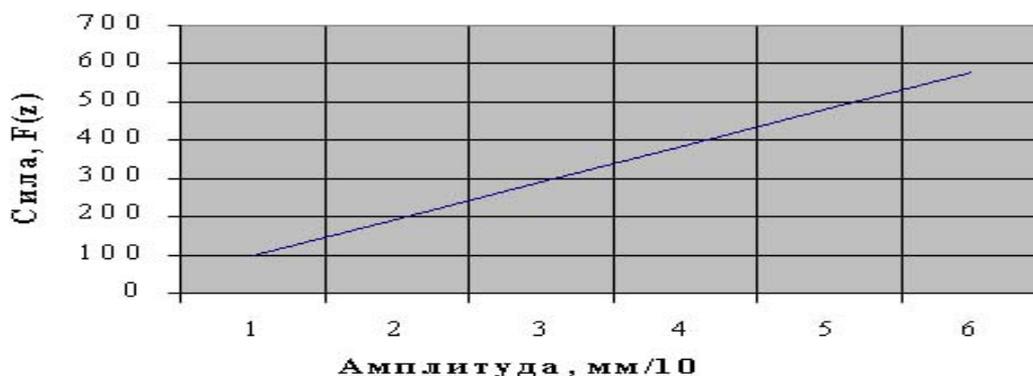


Рис. 6.5. Тарировочный график преобразователя усилия натяжения тросов.

Тарировка датчика перемещений осуществляется по схеме:



Рис. 6.6. Принципиальная схема передачи измерительной информации при тарировке датчика перемещений



Рис. 6.7. Тарировочный график датчика перемещения подвижной каретки.

2.2. Подготовить установку:

- при помощи подъемного механизма 12 поднять верхнюю каретку на высоту H ;
- нижнюю каретку опустить на упор 9 при помощи механизмов 7, 8 (см рис 6.1);
- произвести балансировку тензоусилителя и юстировку осциллографа согласно их техническим описаниям; прописать на осциллограмме нули и тарировочные сигналы;
- с помощью механизма натяжения 8 и винта разводки тросов 7 дать предварительное натяжение троса, чтобы нижняя каретка поднялась на высоту h . Замерить угол разведения тросов. На осциллограмме зафиксировать результат предварительного натяжения.

2.3. Включить лентопротяжный механизм осциллографа, предварительно установив нужную скорость протяжки, а затем освободить верхнюю каретку движением рукоятки 13. После соударения кареток и полной их остановки выключить осциллограф. На ленте осциллографа должны быть зафиксированы следующие процессы: $\ddot{x}(t)$, $x(t)$, $N(t)$, t .

2.4. Используя тарировочные графики и таблицы, произвести расшифровку полученных осциллограмм.

2.5. Оформить отчет по лабораторной работе.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.1. Отчет оформляется как законченная исследовательская работа на листах формата А4.

3.2. Привести краткое описание установки, применяемой аппаратуры, всех электромеханических преобразователей и необходимые теоретические данные к каждому этапу исследования.

3.3. Известные начальные данные по параметрам исследуемой системы занести в таблицу 6.1

Таблица 6.1

№ опыта	H, м	h, м	α , рад.	y, м	$P_{к1}$, Н	$P_{к2}$, Н	N_0 , Н
---------	------	------	-----------------	------	--------------	--------------	-----------

3.4. Занести в отчет тарировочные графики: а) датчика перемещений; б) акселерометров; в) тензоэлемента.

3.5. Проведя исследования на 1-м этапе, все вычисленные величины занести в таблицу 6.2. Построить график зависимостей $\ddot{x}(t)$, $R_1(t)$.

Таблица 6.2

№ опыта	T, °C	V, м/с ²	R_1 , Н
---------	-------	---------------------	-----------

3.6. Проведя исследования на 2-м этапе, все определенные данные занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3

№ опыта	X, м	β , рад.	V(t), м/с ²	N(x), Н	F(x), Н	$R_2(t)$, Н
---------	------	----------------	------------------------	---------	---------	--------------

3.7. По данным таблицы 6.3 построить графики функций N(t); F(t); $R_2(t)$.

3.8. Построить совместный график функции R(t) при движении кареток на 1 и 2-ом этапах.

3.9. Дать анализ исследуемой системы и сделать выводы, используя таблицы 6.1, 6.2, 6.3 и графики $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R(t)$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

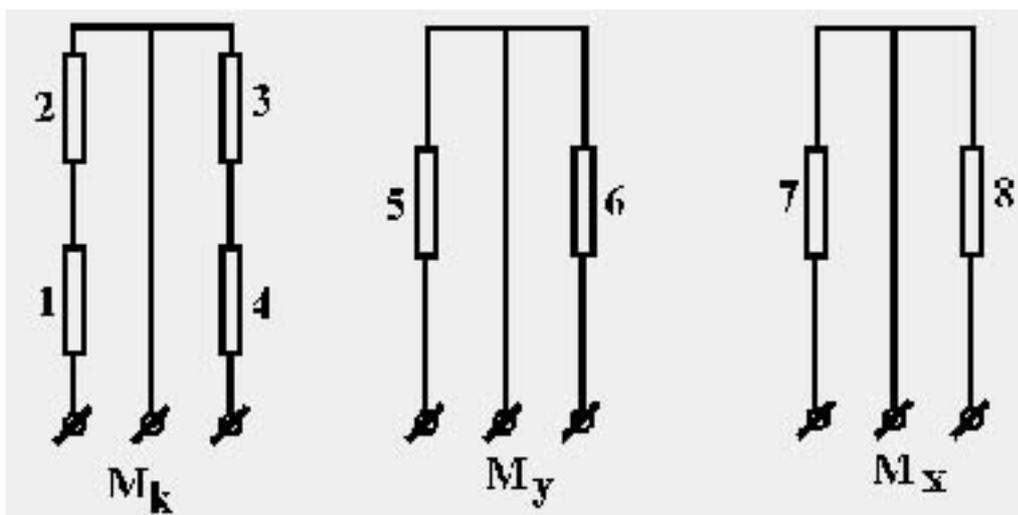
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В КУЛАЧКОВОМ МЕХАНИЗМЕ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ К.П.Д. ВЫСШЕЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПАРЫ

Решение вопросов прочности, жесткости, износа и т.п. требует определения динамических усилий, действующих в механизмах в процессе работы. В ряде случаев, например, в задаче определения величины, направления и точки приложения равнодействующей усилий в высших кинематических парах, расчетные методы не могут обеспечить необходимую точность в связи со сложностью процессов взаимодействия контактирующих деталей. Важное значение в таких задачах приобретают экспериментальные методы. Существуют разнообразные способы определения нагруженности узлов и деталей машин; в частности путем непосредственного измерения деформаций или введением специального тензорезисторного силоизмерителя в разрыв исследуемой силовой цепи. В данной лабораторной работе используется способ непосредственного измерения деформаций на поверхности одного из силовых элементов, а именно на валу кулачкового механизма.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Освоение практических навыков проведения измерений динамических процессов методами электротензометрии.
2. Иллюстрация возможностей электротензометрии в области определения действующих внешних нагрузок по регистрируемым деформациям упругих элементов.
3. Изучение особенностей проведения измерений и съема сигналов с вращающихся объектов.
4. Исследование динамических усилий в зоне контакта кулачкового механизма с плоским толкателем.
5. Определение коэффициента полезного действия высшей кинематической пары кулачек-толкатель.



7.2. Схема измерения усилий в кулачковом механизме.

Измерительный канал включает группу тензодатчиков, наклеенных на рабочем участке динамометрического вала, многоканальный струнный токосъемник, тензометрический усилитель 8АНЧ-26 и магнитоэлектрический осциллограф НО.71.04 (описание и инструкция по эксплуатации приборов прилагаются к описанию лабораторной работы). Положение кулачкового механизма регистрируется с помощью индукционного датчика дискретного действия. В общем случае приложения контактной нагрузки в сечении тензометрического вала одновременно действуют несколько внутренних силовых факторов. При этом деформации от каждого из них, накладываясь, создают сложную картину деформированного состояния. Однако методами электротензометрии можно выделить деформации от каждого силового фактора в отдельности путем применения специальных мостовых схем, внутри которых электрические эффекты от побочных силовых факторов компенсируются. Указанные на рис.7.1. тензометрические схемы позволяют независимо друг от друга осуществлять измерение следующих внутренних силовых факторов в сечениях динамометрического вала: M_x - изгибающего момента относительно оси x в сечении 1; M_y - изгибающего момента относительно оси y в сечении 2; T - крутящего момента. Одновременная непрерывная регистрация на осциллограммах величин M_x , M_y , M_z , позволяет посредством пересчета получить значения исследуемых параметров в различные моменты времени.

Величина R и направление α контактного усилия связаны со значениями моментов зависимостями:

$$R = (R_x^2 + R_y^2)^{\frac{1}{2}} = (M_y^2 + M_x^2)^{\frac{1}{2}} / B, \quad (7.3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_y}{R_x} = \frac{M_y}{M_x}, \quad (7.4)$$

Положение линии действия силы R определяется углом α и расстоянием до оси кулачка h :

$$h = T/R, \quad (7.5)$$

Уравнение линии действия силы R , выраженное через измеренные параметры M_x , M_y , T в системе координат, связанной с кулачком, имеет вид:

$$x \cdot \cos \theta + (y - c) \cdot \sin \theta - h = 0, \quad (7.6)$$

Координаты точек приложения вектора силы (x, y) находят из совместного решения уравнения (7.6) и уравнения профиля кулачка. В частном случае, когда профиль кулачка описывается окружностью, система упомянутых уравнений имеет вид:

$$x \cdot \cos \theta + (y - c) \cdot \sin \theta - h = 0,$$

$$x^2 + y^2 = D^2/4, \quad (7.7)$$

Таким образом, по значениям внутренних силовых факторов можно определить величину, направление и координаты точки приложения вектора контактного усилия. Тангенциальная составляющая полного вектора силы является силой трения в зоне контакта кулачок-толкатель (рис.7.4):

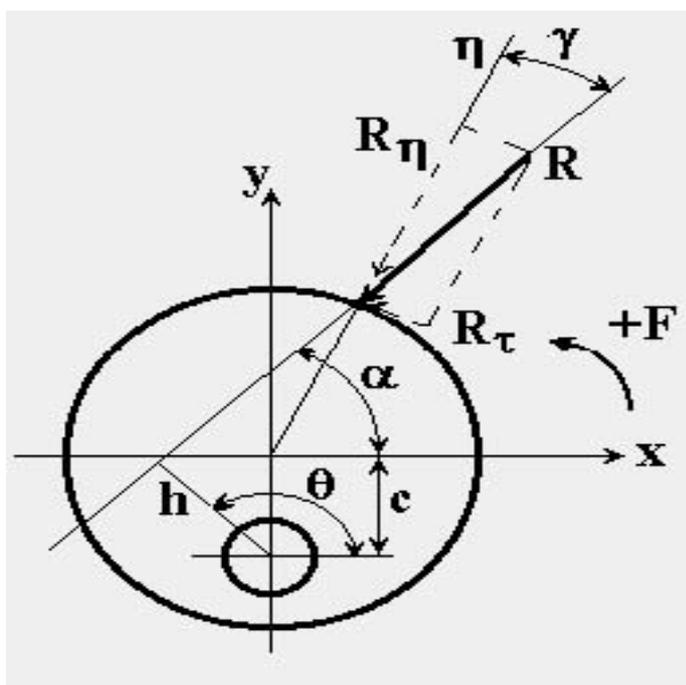


Рис. 7.3. Определение контактных усилий в кулачковом механизме.

$$F_{\delta\delta} = R \cdot \tau = R \cdot \sin \gamma, \quad (7.8)$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{k_N - k_R}{1 + k_N \cdot k_R}, \quad (7.9)$$

где

$k_N = X_k / Y_k$ - угловой коэффициент нормали к поверхности в точке контакта;

$k_R = \operatorname{tg} \alpha$ - угловой коэффициент линии действия контактного усилия.

Расстояние, на которое перемещается вектор силы трения по рабочей поверхности кулачка за малый интервал времени Δt определяется из приближенного выражения:

$$\Delta S = \sqrt{\Delta X_k^2 + \Delta Y_k^2}, \quad (7.10)$$

Повторяя описанную процедуру вычислений через интервал Δt , можно получить значения $F_{\text{тр}}$, ΔS , T , $\Delta \varphi$ для последовательных моментов времени. Коэффициент полезного действия кинематической пары кулачкового механизма:

$$\eta = 1 - \frac{A_{\delta\delta}}{A_{\dot{a}\dot{a}}}, \quad (7.11)$$

где $A_{\delta\delta} = \int_0^{\pi \cdot D} F_{\delta\delta}(S) \cdot dS$ - работа сил трения; $A_{\dot{a}\dot{a}} = \int_0^{2\pi} T(\varphi) \cdot d\varphi$ - работа движущих сил.

Заменяя интегралы в последних выражениях конечными суммами, получаем:

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n F_{\delta\delta} \cdot \Delta S}{\sum_{j=1}^n T_j \cdot \Delta \varphi_j}, \quad (7.12)$$

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Ознакомьтесь с руководством к лабораторной работе и прилагаемыми инструкциями по аппаратуре.

2.2. подготовить установку к работе

2.2.1. Установите параметры заданного режима работы кулачкового механизма (вес груза на толкателе, скорость вращения кулачка).

2.2.2. На основе приближенных расчетов определите диапазон изменения исследуемых параметров.

2.2.3. Подготовьте аппаратуру.

2.3. Проведение эксперимента

2.3.1. Снимите кулачок, включите тумблер «Тарировка» усилителя и тумблер «Съемка» осциллографа, запишите тарировочные отметки (Рис. 7. 2);

2.3.2. Установите кулачок, запустите электродвигатель установки, запишите несколько периодов вращения кулачка (Рис. 7. 3);

2.3.3. Выключите установку, проявите осциллограмму процесса.

2.4. Расшифровка осциллограмм.

2.4.1. Выберите для расшифровки один период работы кулачкового механизма и разлуните его вертикальными линиями с интервалом $\Delta t = 0,04$ с (рассчитайте время, используя значение скорости протяжки ленты осциллографа).

2.4.2. Определите знаки процессов путем непосредственной тарировки динамометрического вала.

2.4.3. Вычислите масштабы записи процессов.

Масштабы записи процессов вычисляются по формуле:

$$\mu_i = \frac{4 \cdot K_{\Delta \dot{\theta} \dot{\theta}}}{A_k \cdot n \cdot S_T \cdot K_{\dot{\theta}}} \cdot E_K, \quad (7.13)$$

где μ_i - масштаб осциллограммы; $S_T=2$ - коэффициент тензочувствительности; $K_{\Delta \dot{\theta} \dot{\theta}}$ и $K_{\dot{\theta}}$ - тарировочные коэффициенты; $n=2$, $E_K=0,00025$.

Значения внутренних силовых факторов в каждый момент времени:

$$M_{x_j} = A_{x_j} \cdot \mu_x \cdot E \cdot W_x, \quad M_{y_j} = A_{y_j} \cdot \mu_y \cdot E \cdot W_y, \quad T_j = A_{k_j} \cdot \mu_k \cdot E \cdot W_k, \quad (7.14)$$

M_{x_j} , M_{y_j} , T_j - внутренние силовые факторы (изгибающие и крутящие моменты в сечении 1) в j -й момент времени; A_{x_j} , A_{y_j} , A_{k_j} - амплитуды записи процессов, измеренные на осциллограмме для j -го момента времени, мм; μ_x , μ_y , μ_k - масштабы осциллограмм, определенные по формуле (7.1); E , G - характеристики материала вала; W_x , W_y , W_k - моменты сопротивления сечения 1.

Осциллограмма процесса

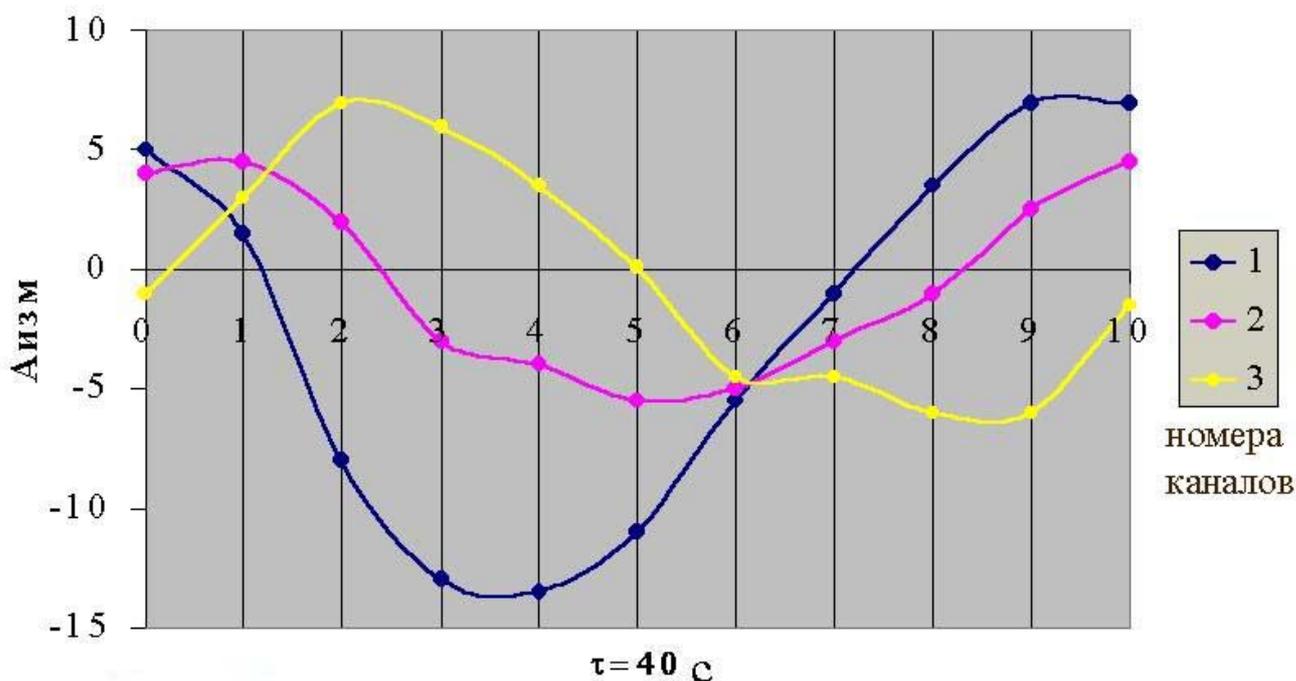


Рис. 7.4. Пример осциллограммы процесса.

2.4.4. Провести нулевые линии процессов, измерить по осциллограмме и записать в таблицу значения ординат процессов с интервалом Δt , по формулам (7.2) определить значения внутренних силовых факторов в каждый момент времени.

2.5. Проведение расчетов.

Для каждого момента времени определите величину, направление и линию действия контактного усилия по формулам (7.3 - 7.5) с использованием (7.1) и (7.2). Найдите величины γ_j , ΔS_j , Δf_j путем графического решения системы (7.7). (Для каждого момента времени по величинам Θ , h графически найдите линию действия контактного усилия относительно профиля кулачка). Вычислите коэффициент полезного действия по выражению (7.12).

2.6. Анализ результатов исследований, оформление отчета.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по выполненной работе должен включать:

3.1. Краткое описание лабораторной работы (цель работы, описание установки, методику исследований, порядок выполнения).

3.2. Результаты выполнения работы:

3.3.1. Осциллограмму процессов.

3.2.2. Расчет масштабов.

3.2.3. Результаты графического определения значений угла γ .

3.2.4. Сводную таблицу расчетов:

Таблица

Параметры	Замер № 1	Замер №2	Замер №3	. . .	Замер № ...
A_x , мм					
A_y , мм					
A_k , мм					
M_x , Нм					
M_y , Нм					
T_k , Нм					
R , Н					
h , м					
Θ , рад.					
γ , рад.					
$F_{тр}$, Н					
ΔS , м					
$\Delta\phi$, рад.					

3.2.5. Графики зависимостей $R=R(t)$, $F_{тр}=F_{тр}(t)$.

3.2.6. Результаты расчетов КПД .

3.3. Анализ результатов исследований, выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

В ряде отраслей техники важное значение имеет задача обеспечения прочности конструкций при повышенных температурах. Кроме того, температура является и одним из важнейших параметров многих технологических процессов. В связи с этим становится актуальной задача исследования температурных полей и напряжений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: 1. Расчетно-экспериментальные исследования температурных полей и напряжений при нестационарном нагреве тонкостенного цилиндрического стержня, являющегося элементом статически неопределимой системы.

2. Тензометрическое исследование усилий и напряжений при повышенной температуре.

3. Сравнительный анализ результатов, полученных различными методами измерений.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В комплекс лабораторной установки (рис.8.1,8.2) входят: стержневая конструкция, состоящая из трех колонн 1 и цилиндрического тонкостенного стержня 2, смонтированная в сборе с плитами 3 и нагревательным элементом 4; потенциометр КСП - 4 для регистрации температуры; осциллограф НО.071 (или самописец Н2030-3) для регистрации показаний тензомостов; усилитель 8АНЧ-26; термопары и тензорезисторы; коммутационные коробки и удлинительные провода; магазины сопротивлений; микроконтроллер МИК-88 и ПЭВМ.

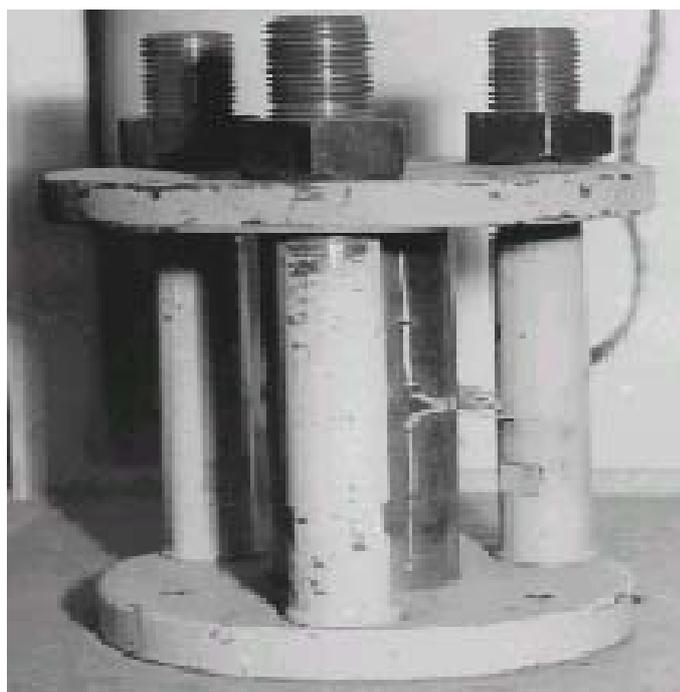
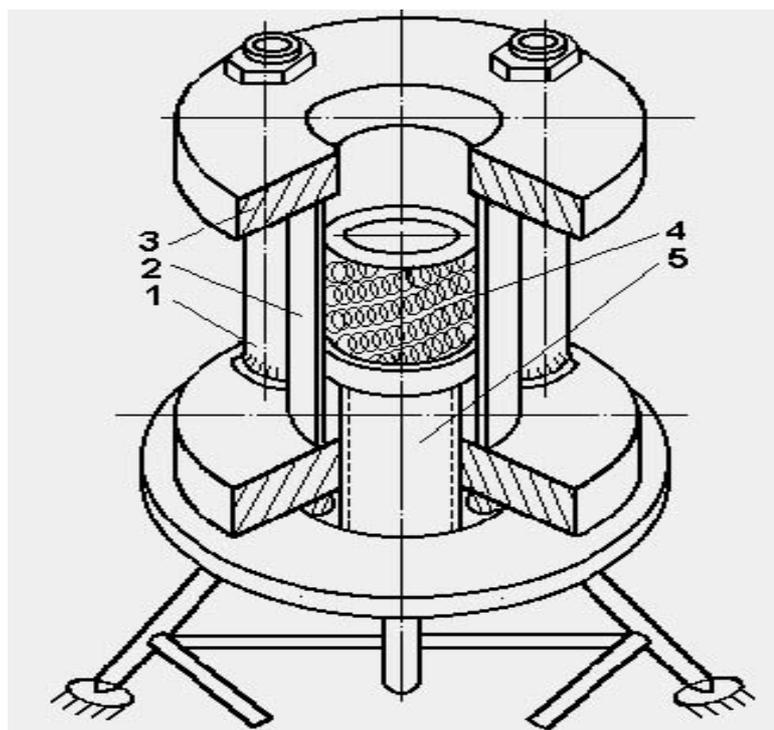


Рис. 8.1. Схема и фотография экспериментальной установки.

Нагрев тонкостенного цилиндрического стержня осуществляется с помощью электрического нагревательного элемента, смонтированного соосно с цилиндрическим стержнем на фланце ходового винта. Ходовой винт служит для перемещения нагревательного элемента.

При экспериментальном исследовании температурных полей в качестве первичных теплоприемников используются хромель-алюмелевые термопары, изготовленные из стандартной термоэлектродной проволоки диаметром 0,3 мм. Рабочий спай каждой из термопар приварен конденсаторной сваркой в намеченной точке наружной поверхности цилиндрического стержня. Свободные концы термопар удлинительными («компенсационными») проводами коммутируются с вторичным прибором - потенциометром КСП-4 через соединительную колодку, удаленную на достаточное расстояние от поверхности нагрева. Регистрация изменения температуры во времени осуществляется дискретно (с частотой установленного цикла) на диаграммной ленте потенциометра, движущейся с постоянной заданной скоростью.

Для определения нормальных сил и напряжений, возникающих в стержнях при нагреве, на колонны наклеены рабочие и компенсационные датчики в виде прямоугольной розетки датчиков типа 2ФКРВ с базой 10 мм. Получаемая с тензодатчиков информация регистрируется на самопроявляющейся фотоленте осциллографа НО.071 или на ленте самописца Н2030-3.

Синхронизация процессов регистрации результатов термометрирования и тензометрирования осуществляется с помощью специального синхронизатора, позволяющего одновременно включать механизмы лентопротяжки потенциометра и осциллографа (или самописца). Возможно также использование для регистрации данных с тензо- и термодатчиков использовать измерительно-вычислительный комплекс на базе микропроцессора МИК-88, описанный в предыдущих работах.

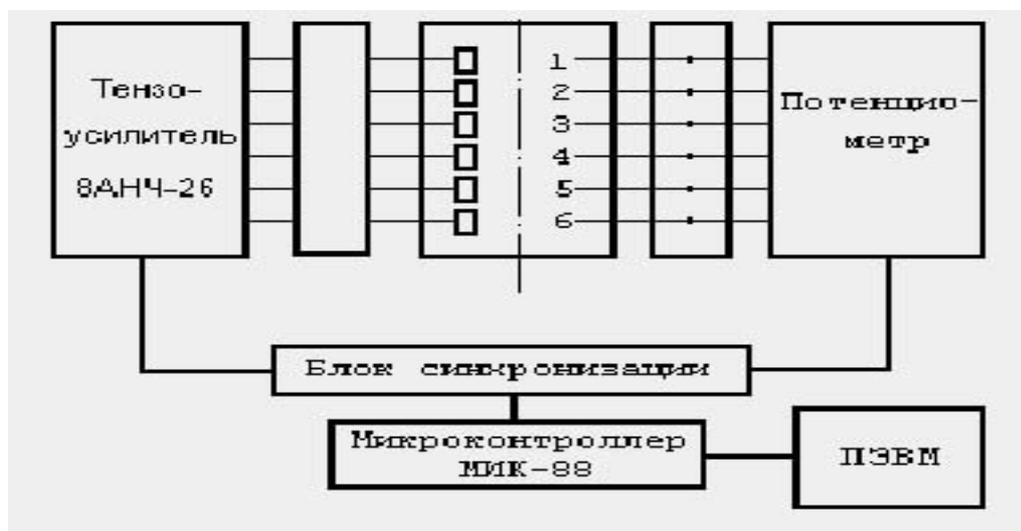


Рис. 8.2. Принципиальная схема процесса измерения.

Аналитическое решение задачи о температурных напряжениях производится известными методами (например: методом сил) с использованием температурных полей в различные моменты времени, полученных экспериментально в процессе термометрирования.

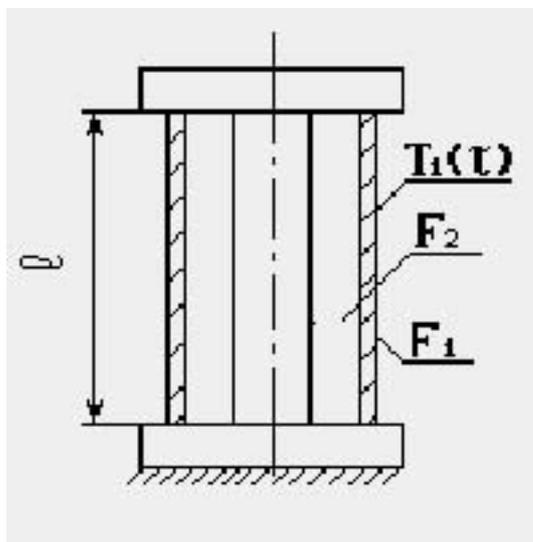


Рис. 8.3. Расчетная схема конструкции.

Расчетная схема конструкции представлена на рис.8.4. Здесь вследствие симметрии конструкции допустимо сведение трех колонн в один расчетный элемент с суммарной площадью $F_2 = 3 F_k$ Материал элементов (колонн и тонкостенного цилиндрического стержня) - сталь 20 с модулем упругости $E=2,0 \cdot 10^5$ Мпа и коэффициентом линейного расширения $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. В расчетах будем полагать, что температурной зависимостью модуля упругости E и коэффициента линейного расширения α можно пренебречь. Размеры элементов и соотношения между ними таковы, что в расчетной схеме с достаточной степенью точности принимается $l_1=l_2=l_3$; $F_1:F_2=1:3$; т.е. длины и площади поперечного сечения каждой из колонн и цилиндрического стержня равны.

Предположим, что нагрев цилиндра осесимметричен, а распределение температуры по толщине стенки - равномерное. Тогда решение задачи об определении усилий и напряжений в однажды статически неопределимой системе при известном для произвольного момента времени τ_i температурном поле дает следующие выражения искомых величин:

$$N_1(\tau_i) = N_2(\tau_i) = -\frac{3}{4} \cdot \frac{E \cdot \alpha \cdot F_1}{l} \cdot \int_0^l \Delta T(z) \cdot dz, \quad (8.1)$$

$$\sigma_1(\tau_i) = -\frac{3}{4} \cdot \frac{E \cdot \alpha}{l} \cdot \int_0^l \Delta T(z) \cdot dz, \quad (8.2)$$

$$\sigma_k(\tau_i) = \frac{N_2}{3 \cdot F_k} - \frac{1}{4} \cdot \frac{E \cdot \alpha}{l} \cdot \int_0^l \Delta T(z) \cdot dz, \quad (8.3)$$

где $N_1(\tau_i)$ - осевое усилие в цилиндре в момент времени τ_i ; $N_2(\tau_i)$ - суммарное осевое усилие в трех колоннах в момент времени τ_i ; $\sigma(\tau_i)$ - нормальное напряжение в поперечных сечениях цилиндра в момент времени τ_i ; $\sigma_k(\tau_i)$ - нормальное напряжение в поперечном сечении колонны; $\Delta T(z) = [T(\tau_i) - T(0)](z)$ - закон распределения приращений температуры по длине цилиндра к моменту времени τ_i ; $T(0)$ - начальное распределение температуры. В выражениях (8.1) и (8.2) интеграл $\int_0^l \Delta T(z) \cdot dz$ может быть вычислен приближенно по площади под кривой $\Delta T(z)$, построенной для момента τ_i по результатам исследования температурных полей.

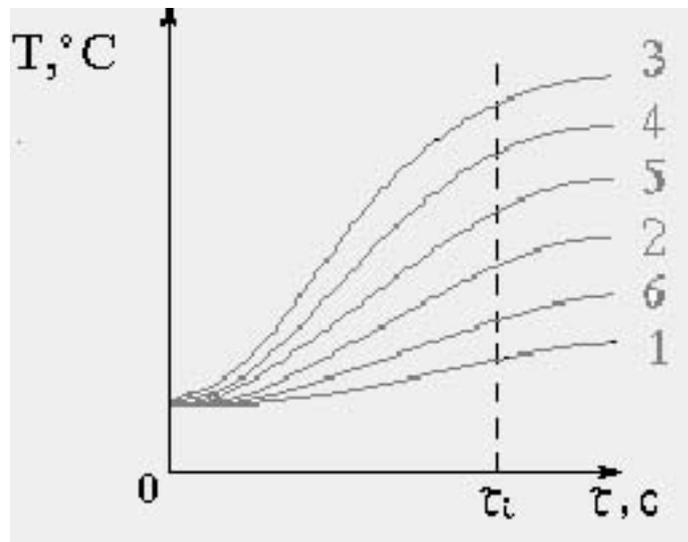


Рис. 8.4. Кинетика роста температуры в цилиндре.

Тогда для определения усилий и напряжений:

$$N_1(\tau_i) = -N_2(\tau_i) = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha \cdot E \cdot F}{l} \cdot \Omega \cdot \mu_T \cdot \mu_l,$$

$$\sigma_1(\tau_i) = -\frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha \cdot E}{l} \cdot \Omega \cdot \mu_T \cdot \mu_l,$$

$$\sigma_k(\tau_i) = \frac{1}{4} \cdot \frac{\alpha \cdot E}{l} \cdot \Omega \cdot \mu_T \cdot \mu_l,$$

где Ω - площадь под кривой $\Delta T(z)$, мм^2 (рис.8.5); μ_T - масштаб вдоль оси температуры, град/мм; μ_l - линейный масштаб вдоль оси Z , мм/мм. Мгновенное распределение температуры $T(z)$ вдоль оси цилиндра находят по кривым $T(\tau)$ (рис.8.3). Далее для момента времени $\tau = \tau_i$ находят аппроксимирующие кривые

$T(z)$ в графическом виде. Здесь время τ_i может определяться по известной и постоянной скорости протяжки диаграммной ленты (рис.8.5).

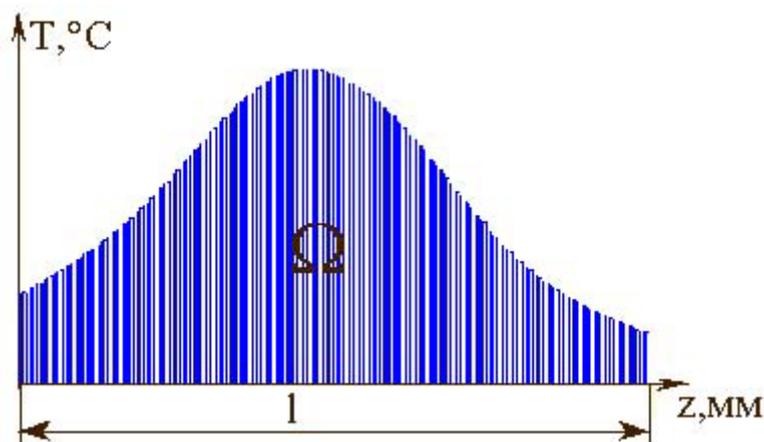


Рис. 8.5. Изменение температурного поля по длине образующей цилиндра для момента времени τ_i .

С целью определения усилий и напряжений в элементах системы синхронно с термометрированием проводится тензометрирование колонн и нагреваемого цилиндра. Тензометрирование колонн при постоянной (и нормальной) температуре осуществляется по общепринятой методике [5, 7]. Для тензометрирования цилиндра при повышенных температурах используются специальные тензодатчики типа КФ, их рабочие температуры лежат в интервале $20 \dots 200 ^\circ\text{C}$.

Основное отличие тензометрирования в условиях переменных повышенных температур от тензометрирования при постоянных и нормальных температурах состоит в использовании какого-либо способа для внесения поправки на температурное приращение сопротивления.

Одним из таких наиболее доступных способов является способ, согласно которому соответствующая поправка определяется на предварительно изученной зависимости температурного приращения сопротивления данной партии тензорезисторов [2, 5, 7]. Для этого в процессе измерения деформации в моменты снятия отсчетов с тензодатчиков измеряется также и температура в ближайшей окрестности тензодатчика, включенного в активное плечо измерительного моста. Тензодатчики, включенные в компенсационное плечо, находятся при нормальной постоянной температуре и не деформируются. В лабораторной работе активные тензодатчики R_1 в количестве 4 штук (для исключения влияния эксцентриситета осевой нагрузки) наклеены ба цилиндре на уровне термопары №5, показания которой и используются для определения поправки на температурное приращение сопротивления. В качестве компенсационного датчика используется магазин сопротивлений. Схема измерительного моста приводится на рис. 8.6. В качестве усилителя используется тензоусилитель марки 8АНЧ-26. регистрация показаний всех мостов осуществляется синхронно с термометрированием непрерывно с момента начала нагрева цилиндрического стержня.

К началу проведения исследований, планируемых в рамках данной лабораторной работы, должны быть проведены тарировочные испытания двух типов:

1. Тарировка тензомостов и измерительных приборов при нагружении исследуемой конструкции известной механической нагрузкой в условиях нормальной температуры, по результатам которой определяется коэффициент тензочувствительности прибора или зависимость между показаниями прибора и изменением нагрузки.

2. Испытания тарировочной балки из материала нагреваемого элемента конструкции (с тензодатчиками одной партии, наклеенными тем же клеем) в условиях ступенчатого увеличения температуры и отсутствия механической нагрузки по результатам которых получают кривую температурного изменения сопротивления $\Delta R/R=f(T)$.

Подробно методика определения ТКС описана в лабораторной работе №2.

Результаты тарировочных испытаний в виде графиков выдаются на рабочем месте в качестве приложения.

При обработке экспериментальных данных, полученных в процессе тензометрирования, суммарные усилия в колоннах $N_2(\tau_i)$ определяются непосредственно по осциллограммам с использованием тарировочных данных при нормальной температуре.

Усилия $N_1(\tau_i)$ в цилиндрическом тонкостенном стержне определяются также по осциллограмме, но с внесением поправки на температурное приращение сопротивления.

В предположении равенства температуры чувствительной решетки тензодатчиков и детали, постоянства температуры окружающей среды, отсутствия приращения сопротивления компенсационного резистора (магазина сопротивления) мгновенная осевая деформация в точке наклейки тензорезистора определится так:

$$\varepsilon_1(\tau_i) = \frac{1}{S_T} \cdot \left\{ \varphi \cdot k_{пр} - \left[\frac{\Delta R}{R} \right] (T) \right\},$$

где S_T – коэффициент тензочувствительности тензодатчика, $k_{пр}$ -- коэффициент чувствительности прибора; $\left\{ \frac{\Delta R}{R} \right\}$ – температурное приращение сопротивления, снятое с кривой $\Delta R/R=f(T)$ в момент времени τ_i снятия отсчета φ с осциллограммы.

Тогда, значение мгновенного усилия $N_1(\tau_i)$ в цилиндрическом образце определится так: $N_1(\tau_i)=\varepsilon_1(\tau_i) E F$. Далее необходимо сравнить абсолютные значения усилий N_1 и N_2 в элементах конструкций, найденных расчетным путем по экспериментально подученному температурному полю и экспериментальным путем в результате тензометрирования. Сравнение, по-видимому, можно провести по отношению к экспериментально определенному

усилию в колоннах. Так как усилие в тонкостенном цилиндрическом стержне по условиям равновесия должно быть равно усилию во всех трех колоннах $|N_1(\tau_i)| = |N_2(\tau_i)|$, то отличие в результатах исследования может быть определено так:

$$\delta^{\text{ддд}} = \frac{N_1^{\text{ддд}} - N_2^{\text{ддд}}}{N_1^{\text{ддд}}} \cdot 100\%,$$

Результаты расчетов для нескольких моментов времени τ_i представляются в виде графиков $T(z)$ - температурных полей для всех этих моментов времени, а также в виде кривых $\sigma_1(\tau)$ и $\sigma_k(\tau)$ (рис.8.8), характеризующих изменение напряжений в цилиндрическом тонкостенном стержне и каждой колонне во времени.

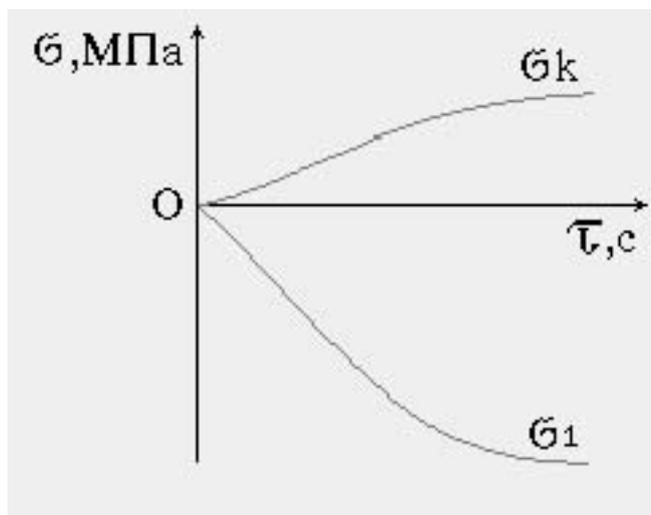


Рис. 8.8. Зависимость напряжений в цилиндре (σ_1) и колоннах (σ_k) от температуры.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Убедиться путем наружного осмотра в исправности тензодатчиков и термопар, регистрирующих приборов, питающих цепей, нагревательного элемента.

2.2. Провести замеры конструкции и на эскизе разметить положение точек приварки термопар и наклейки датчиков.

2.3. Установить тонкостенный цилиндрический стержень 2 (рис.8.1) между плитами 3 и вручную завинтить гайки на колоннах, обеспечив предварительный натяг.

2.4. Собрать термоизмерительные и тензоизмерительные цепи. Установить нагревательный элемент на заданной высоте.

2.5. Подать напряжение в цепи питания потенциометра КСП-4 и осциллографа Н0.071 и дать прогреться регистрирующим приборам а течении 15-20 мин. Подготовить приборы к работе. Опробовать лентопротяжные механизмы. Установить необходимую скорость протяжки диаграммных лент.

2.6. После прогрева приборов включить с помощью синхронизатора их

механизмы лентопротяжки, а затем через 30-40 с подать напряжение на нагревательный элемент.

2.7. Внимательно следить за работой нагревательного элемента и регистрирующей аппаратуры на диаграмме потенциометра. Не допускать нагрев образца выше 350 °С.

2.8. Произвести обработку результатов термометрирования и тензометрирования. Выполнить расчеты по определению усилий и напряжений в стержнях системы для различных моментов времени τ_i .

2.9. Провести анализ исследований, оформить отчет.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет включает в себя краткое описание установки и методики выполненной работы. Полученные результаты расчетно-экспериментальных исследований должны быть представлены в виде диаграмм, таблиц, графиков и пояснительных рисунков.

3.1. Результаты термометрирования и тензометрирования представляются в виде диаграммных лент регистрирующих приборов.

3.2. Результаты обработки диаграмм представляются графиками температурных полей $T(z)$ и таблицей значений температуры и деформации для i -х моментов времени.

Таблица 8.1

i	τ_i	T_5	$\Delta R/R$	$\varphi k_{пр}/S_T$	$(\Delta R/R)/S_T$	ε_i
-----	----------	-------	--------------	----------------------	--------------------	-----------------

3.3. Результаты расчетов нормальных усилий представляются в табл. 8.2.

i	Ω	$N_1^{òàíð}$	$N_1^{ýèñè}$	$N_2^{ýèñè}$
-----	----------	--------------	--------------	--------------

3.4. Результаты расчета напряжений представляются в виде графиков.

3.5. Краткий анализ результатов проведенных исследований, выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

В инженерной практике часто возникает необходимость экспериментального изучения динамических параметров при исследовании технологических процессов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Исследование методами электротензометрии нагруженности шпинделя сверлильного станка в зависимости от режимов процесса сверления (усилия подачи, диаметра сверла, материала образца и др.).

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является сверлильный станок с вертикальным расположением шпинделя. Шпиндель является основным рабочим органом станка, воспринимающим систему динамических усилий резания. Нагрузки, возникающие при сверлении, можно разложить на ряд составляющих:

1. Усилие, действующее вдоль оси шпинделя P_z и способствующее внедрению сверла в металл. При сверлении P_z уравнивается усилием подачи инструмента.

2. Тангенциальные нагрузки P_r , обеспечивающие процесс резания металла. Они создают скручивающий момент на шпинделе, который уравнивается моментом электродвигателя.

3. Радиальные нагрузки P_r , действующие на режущую кромку сверла. При правильной заточке сверла усилия P_r уравниваются друг друга.

Для измерения динамических нагрузок при сверлении между шпинделем 1 станка (рис.9.1) и патроном со сверлом 2 установлено тензометрическое устройство, включающее чувствительный элемент 3 в виде участка вала с системой тензодатчиков 4 и струнный токосъемник 5. Размеры вала подобраны таким образом, что, с одной стороны, его введение несущественно изменяет жесткость системы "станок -инструмент", а с другой стороны обеспечивает достаточную чувствительность при регистрации деформации вала с помощью тензорезисторов.

Измерение усилий при сверлении с помощью тензоэлемента осуществляется косвенно, путем регистрации отдельных компонент деформации вала группами тензорезисторов, подключаемых к тензоусилителю по полумостовой схеме [2, 5, 7].

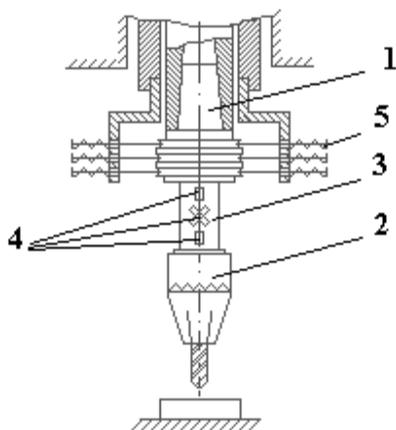


Рис. 9.1. Измерительное устройство для регистрации динамических параметров процесса сверления:

- 1.—шпиндель сверлильного станка; 2.—патрон со сверлом;
- 3.—чувствительный упругий элемент; 4.—система тензорезисторов;
- 5.—струнный токосъемник.

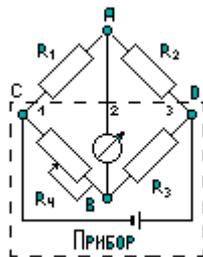


Рис. 9.2. Электрическая схема включения тензорезисторных преобразователей.

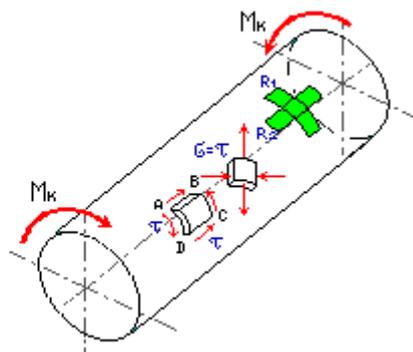


Рис. 9.3. Схема наклейки тензорезисторов на чувствительный элемент.

Одним из основных свойств мостовой схемы соединения тензодатчиков является отсутствие тока в измерительной диагонали АВ моста (рис. 9.2) при выполнении равенства:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4, \quad (9.1)$$

Увеличение сопротивления рабочего датчика R_1 на ΔR или уменьшение R_2 на ΔR приводит к появлению в измерительной диагонали моста тока одного направления.

Деформации, измеряемые тензодатчиком, пропорциональны отношению его омического сопротивления:

$$\Delta R/R = S_T \cdot \epsilon_x, \quad (9.2)$$

где S_T - коэффициент тензочувствительности датчиков.

При включении в полумост одного рабочего тензодатчика (например, R_1) ток в измерительной диагонали будет пропорционален величине деформации в точке поверхности исследуемой детали. Вторым тензодатчик R_2 в этом случае служит для температурной компенсации. Он наклеивается на ненагруженный образец, который помещают в те же температурные условия, что и исследуемую деталь. В случае, когда оба датчика R_1 и R_2 являются рабочими, ток в измерительной диагонали пропорционален алгебраической разности изменения их сопротивлений. В частности, если деформации, регистрируемые с помощью датчиков R_1 и R_2 , равны по величине, но противоположны по знаку, деформация в исследуемой точке сечения детали пропорциональна половине

алгебраической разности изменения их сопротивлений, т.е. такая схема имеет удвоенную чувствительность.

Схема включения датчиков с удвоенной чувствительностью применена для измерения величины и знака касательных напряжений, вызванных действием крутящего момента.

Как известно, в стержне круглого поперечного сечения, нагруженного скручивающими моментами, в площадках, грани которых параллельны продольной оси, возникает только касательное напряжения (например, боковые грани площадки АБСД на рис.9.3). Главными, в этом случае являются площадки, ориентированные под углом 45° к продольной оси бруса, а действующие в них нормальные напряжения равны по абсолютной величине касательным напряжениям. Тензодатчики R_1 и R_2 размещенные вдоль линии действия главных напряжений, будут испытывать одинаковые по величине, но противоположные по знаку деформации. Величина касательных напряжений, возникающих в сечении стержня, определяется из соотношения:

$$\tau = \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_y + \mu \cdot \varepsilon_x), \quad (9.3)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае $\varepsilon_y = \varepsilon_x$, получаем

$$\tau = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_y - \varepsilon_x) - \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \varepsilon_y - 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y, \quad (9.4)$$

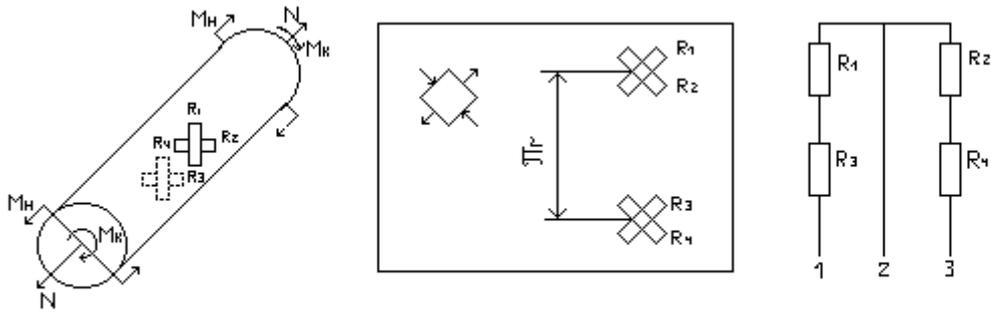
Тогда, крутящий момент $M_{\text{ед}} = \tau \cdot W_p = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y \cdot 0,2 \cdot d^3 \cdot K_1 = 0,4 \cdot d^3 \cdot \varepsilon_y \cdot G \cdot K_1$,

где ε_v - деформация датчика, измеренная регистрирующим прибором;

K_1 - коэффициент усиления схемы; для полумостовой схемы с двумя рабочими датчиками $K_1 = 0,5$.

При нагружении вала комбинацией нагрузок, включающей изгибающие моменты и осевые усилия, одиночная розетка датчиков не позволяет выделить компоненты деформаций только от кручения, поскольку в этом случае датчики будут регистрировать деформации от действия всех внутренних силовых факторов (ВСФ).

Применение двойной розетки датчиков и особый способ их подключения в полумост позволяет компенсировать деформации изгиба и растяжения (сжатия) и выделить только деформации от крутящего момента. Размещение розеток датчиков на поверхности вала и способ их подключения в полумост для измерения деформаций кручения в общем случае нагружения показаны на рис. 9.4.



Развертка цилиндрической поверхности

Рис. 9.4. Наклейка и включение тензорезисторов по схеме полного моста.

Изменение омического сопротивления датчиков в общем случае нагружения вала:

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \Delta R_{кр} + \Delta R_p + \Delta R_{и}, & \Delta R_2 &= -\Delta R_{кр} + \Delta R_p + \Delta R_{и}, \\ \Delta R_3 &= \Delta R_{кр} + \Delta R_p + \Delta R_{и}, & \Delta R_4 &= -\Delta R_{кр} + \Delta R_p + \Delta R_{и}, \end{aligned}$$

где $\Delta R_{кр}$, ΔR_p , $\Delta R_{и}$ - изменения омического сопротивления датчика, вызванные скручиванием, растяжением или изгибом вала.

Изменение сопротивлений плеч полумоста при подключении датчиков по схеме, показанной на рис. 9.4:

$$\Delta R_{л} = 2 \Delta R_{кр} + 2 \Delta R_p, \quad \Delta R_{пр} = -2 \Delta R_{кр} + 2 \Delta R_p,$$

Относительное изменение левого и правого плеч полумоста:

$$\Delta R_{л}/R_{л} = (\Delta R_{кр} + \Delta R_p)/R, \quad \Delta R_{пр}/R_{пр} = (-\Delta R_{кр} + \Delta R_p)/R, \quad (9.5)$$

где R - номинальное сопротивление используемого тензорезистора; тогда ток в измерительной диагонали моста оказывается пропорционален удвоенной деформации кручения тензоэлемента, т.е. $i = A 2 \epsilon_{кр}$.

Итак, рассмотренный способ подключения двух розеток датчиков в полумост позволяет получить схему измерения с удвоенной чувствительностью, которая регистрирует только деформации кручения и обеспечивает температурную компенсацию.

Описанный выше тензоэлемент рекомендуется для измерения крутящего момента при сверлении деталей сверлами диаметром более 10 мм. При меньших значениях диаметров сверл величина крутящего момента оказывается небольшой, соизмеримой с величиной погрешностей, вносимых измерительной схемой. Уменьшение диаметра тензоэлемента с целью повышения чувствительности в этом случае резко меняет жесткость тензоузла.

При исследовании процесса сверления деталей сверлами малых диаметров предлагается использовать измерительное устройство другой конструкции (рис.9.5), в котором чувствительные элементы выполнены в виде балок 1, которые при передаче крутящего момента от шпинделя 2 к сверлу 3 работают на изгиб.

Для измерения осевых усилий на тензоэлементе следует дополнительно разместить два одиночных датчика R_5 и R_6 на противоположных концах диаметра сечения вдоль оси вала (рис.9.6). Последовательное соединение датчиков в рабочем плече полумоста позволит исключить деформации от изгиба вала при

действию неуравновешенных радиальных нагрузок и получить измерительную схему с удвоенной чувствительностью для регистрации только деформаций растяжения или сжатия.

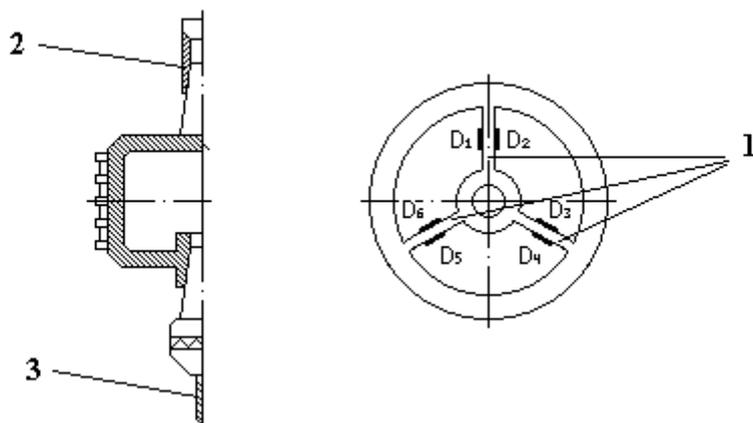


Рис. 9.5. Измерительное устройство для регистрации усилий при сверлении сверлами малых диаметров.

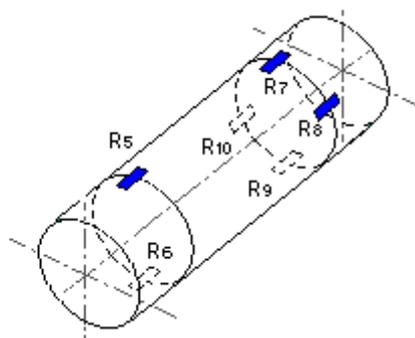


Рис. 9.6. Схема наклейки тензорезисторов для измерения осевого усилия.

При измерении суммарного усилия, действующего перпендикулярно оси сверла, следует учесть возможное циклическое изменение изгибающего момента от данного фактора в каждой из точек сечения элемента из-за вращения шпинделя станка. Поэтому измерительная схема должна состоять из двух пар тензодатчиков $R_7 \dots R_{10}$ (рис.9.6), расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволяет определить мгновенные значения результирующего момента в сечении вала.

Подключение тензодатчиков каждой пары в этом случае следует производить в смежные плечи полумоста, что позволяет исключить деформации от растяжения и получить схему для измерения только деформаций изгиба с удвоенной чувствительностью.

Тарировку (определение масштаба записи исследуемого процесса на осциллограмме) каждой из измерительных схем можно осуществить с помощью калиброванного сигнала тензоусилителя.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Ознакомиться с правилами техники безопасности и инструкциями по эксплуатации приборов. Описание и руководства по эксплуатации тензоусилителя и регистрирующего устройства выдаются преподавателем ведущим лабораторный практикум.

2.2. Подготовить приборы к работе и проверить правильность сборки измерительной схемы. Прогреть аппаратуру, проверить ее исправность и осуществить балансировку измерительной схемы.

2.3. Подобрать коэффициент усиления приборов и произвести тарировку измерительной схемы. Определить величину масштабов записи осциллограмм (по деформациям и крутящим моментам):

$$\mu_{\epsilon} = K_1 K_{\text{ту}} \cdot 10^{-3} / A; \text{ ед. отн. деф./мм,}$$
$$\mu_{\text{Мкр}} = K_1 K_{\text{ту}} \cdot 10^{-3} / A; \text{ Нм/мм}$$

где $K_{\text{ту}}$ -- коэффициент усиления тензоусилителя;

A -- размах записи тарировочного сигнала на осциллограмме, мм

d - диаметр тензоэлемента, мм ;

G - модуль сдвига ($G = 8,85 \cdot 10^4$, МПа) ;

K_1 - коэффициент усиления измерительной системы.

2.4. Для различных диаметров сверла и усилий подачи выполнить регистрацию исследуемого параметра при сверлении на установившихся режимах деталей из различных материалов.

2.5. Выполнить расшифровки осциллограмм, пользуясь схематизацией реального процесса по среднему уровню действующих напряжений, и построить зависимость исследуемого силового параметра от технологических характеристик процесса сверления.

2.6. Выполнить анализ исследований, оформить отчет.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по выбранному исследованию должен содержать:

3.1. Краткое описание применяемых устройств и аппаратуры, а также методики исследований.

3.2. Результаты тарировки измерительного канала и сводную таблицу варьируемых параметров.

3.3. Характерные виды осциллограмм исследуемого процесса при различных режимах с разметкой для расшифровки и записью тарировочного сигнала.

3.4. Графики изменения исследуемого параметра в зависимости от режимов сверления.

3.5. Общие выводы по результатам проведенного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабораторные работы по курсу "Экспериментальные методы исследований динамики и прочности машин" (электромеханические измерения): Методические указания / Под ред. И.Я.Березина, - Челябинск: ЧПИ, 1981.- 59 с.
2. Литвак В.Н. Тензореле. Расчет, конструирование, применение. - М.: Машиностроение, 1989.- 160 с.
3. Сопротивление материалов / Под ред. акад. АН УССР Г.С.Писаренко.- 5-е изд., перераб. и доп. - Киев: Виша школа, Головное изд-во, 1986. - 775 с.
4. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. -М.: Энергия, 1978. - 704 с.
6. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. К.П.Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. - 480 с.
7. Справочник по вероятностным расчетам / Абезгаус и др. - М.: Воениздат, 1970. - 536 с.
7. Тензометрия в машиностроении: Справочник / Под ред. Р.А. Макарова. - М.: Машиностроение, 1975. - 287 с.
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов : Учебник для вузов. – 9-е изд., перераб. - М.: Наука . Гл. ред. физ.-мат. лит, 1986. - 512 с.
9. Электромагнитные датчики механических величин / Н.К.Конюхов, Ф.М.Медников, М.Л.Нечаевский. - М.: Машиностроение, 1987. - 256 с.
10. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В.Новицкого. - 5-е изд., перераб. и доп.-Л.: Энергия, 1975. - 576 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	
Лабораторная работа №1. Практика наклейки и монтажа тензорезисторных преобразователей на исследуемые объекты	
ИНСТРУКЦИЯ по подготовке тензорезисторных преобразователей к исследованиям	
Лабораторная работа №2. Определение метрологических характеристик тензорезисторов	
Лабораторная работа № 3. Определение амплитудно-фазовых частотных характеристик измерительных преобразователей. Динамическая тарировка акселерометров.	
Лабораторная работа № 4. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций методом электротензометрии	
Лабораторная работа № 5. Исследование случайных нагрузок.	
Лабораторная работа № 6. Исследование динамических процессов в механизме торможения	
Лабораторная работа № 7. Исследование динамических усилий в кулачковом механизме. Определение КПД высшей кинематической пары ...	

Лабораторная работа № 8. Исследование температурных полей и напряжений

Лабораторная работа № 9. Исследование динамических параметров процесса сверления

ЛИТЕРАТУРА