

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**  
**для студентов по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине «Конструирование двигателей»**

Для программы лабораторных работ был отобран такой материал, на котором к концу курса обучения можно раскрыть методику современных научных исследований и конструирования двигателей. Лабораторные занятия связаны с тематикой лекционных занятий. Как правило, содержание лабораторной работы преподаватель указывает в конце занятий для того, чтобы студенты могли самостоятельно подготовиться к следующей лабораторной работе. При самостоятельной подготовке к лабораторным работам рекомендуется прежде всего [1, 2, 9]. В пособии [9] дан перечень выполняемых работ и порядок их выполнения. Полный перечень литературы приводится ниже.

**а) Основная литература**

1. Гоц А.Н. Расчеты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени: учебное пособие. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ; инфра-м, 2013. – 208 с.
2. Гоц А.Н. Расчеты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. Владим. гос. ун-т имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ. 2011 – 140 с.
3. . Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ; инфра-м, 2015. – 324 с.
4. Гоц А.Н., Эфрос В.В. Порядок проектирования автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 148 с.
5. Гоц А.Н. Анализ уравновешенности и способы уравновешивания автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 128 с.

**б) Дополнительная литература**

1. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей/Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, С.И. Ефимов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1983.
2. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей/Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, С.И. Ефимов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1984. 384 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей/Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, С.И. Ефимов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1985.
4. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 2. Динамика и конструирование / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2005. – 240 с.
5. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. и др. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. Под ред Н.Д. Чайнова. М.: Машиностроение, 208. – 496 с.

**в) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

1. Программы расчета циклов двигателя: BENDN – бензиновых двигателей; DIZDN – дизелей; GAZDN – газовых двигателей.

2. Программа динамического расчета двигателей DINN.
3. Программный комплекс «Diesel RK». Бесплатный удаленный доступ к системе **ДИЗЕЛЬ-РК** <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Rus/index.php?page=Vozmojnosti>.
4. Перечень литературы по расчету, кинематике и динамике ДВС можно найти на сайтах: <http://www.twirpx.com/files/transport/dvs/cindyn/> ; <http://vlgu.info/files/details.php?file=27>

Рассмотрим выполняемые лабораторные работы.

1. Лабораторная работа №1. Устройство и типы тензорезисторов, измерительные схемы, определение абсолютной и относительной погрешностей тензометрирования. – 2 часа.

Цель работы – изучить экспериментальные методы определения напряжений в деталях двигателя..

Электрические методы измерения деформаций являются косвенными: деформация преобразуется в изменение какого-либо электрического параметра (сопротивления, индуктивности, емкости), а уже это изменение воспринимается регистрирующим устройством.

Таким образом, аппаратура для электрического измерения деформации состоит из двух обязательных частей: датчика, т.е. элемента, воспринимающего деформации детали, и регистрирующего прибора (стрелочный прибор, осциллограф и т. п.). В большинстве случаев имеется еще и третий элемент – усилитель, усиливающий снимаемые с датчика сигналы. Благодаря отделению датчика от регистрирующей аппаратуры имеется возможность сделать датчик достаточно легким и малогабаритным, устанавливать его в труднодоступных местах, а также на движущихся деталях машин.

Электрические методы позволяют регистрировать не только статические деформации, но и динамические, как при периодических, так и при неустановившихся процессах (например, при ударе). Одновременно могут быть зафиксированы показания ряда датчиков, установленных в различных точках детали или на разных деталях.

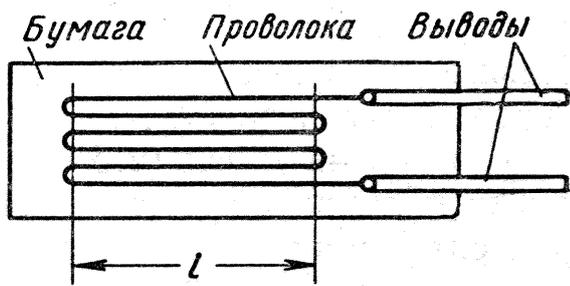
В зависимости от того, какой электрический параметр датчика изменяется при деформации, датчики носят название индукционных, емкостных, магнитострикционных, датчиков сопротивления.

Мы будем рассматривать лишь датчики сопротивления, которые благодаря своей универсальности, удобству применения и широким возможностям эксперимента получили исключительно широкое распространение в лабораторной практике.

Датчики имеют стандартную конструкцию и, в зависимости от характера исследуемых процессов (статические или динамические деформации), меняется лишь регистрирующая аппаратура.

### **Устройство датчиков сопротивления**

*Проволочные тензосопротивления* (рис. 1.1) преимущественно изготавливают из медноникелевых сплавов типа константана и железо-никельхромовых типа элинвара. Первые из них, имеющие небольшой коэффициент линейного расширения и приемлемую тензочувствительность, применяют в установках для статических испытаний. Вторые, имеющие в 50 раз больший температурный коэффициент линейного расширения, но и большую в 1,5 раза чувствительность к механическим воздействиям, – для динамических испытаний, в том числе, для электрических динамометров.



**Рис. 1.1. Проволочное тензосопротивление**

Устройство наиболее распространенных наклеиваемых проволочных тензосопротивлений показано на рисунке. Проволоку диаметром 0,02...0,05 мм, ровными зигзагообразными петлями укладывают на тонкую бумажную полоску, покрытую слоем клея. К концам проволоки припаивают или приваривают более толстые выводные проводники, при помощи которых сопротивление включают в измерительную

цепь. Сверху его покрывают защитным слоем лака или заклеивают с этой целью полоской тонкой бумаги, а иногда фетром. В результате получают отдельный тензочувствительный элемент в виде пакетика, толщиной всего в несколько десятых долей миллиметра. Базой датчика является длина петли проволоки  $l$ .

**Фольговые тензосопротивления** представляют собой весьма тонкие ленты или круглые пластинки толщиной 4...12 мкм, из которых часть металла вытравлена с помощью кислоты, а оставшаяся его часть образует решетку с выводами. Решетка может иметь любой нужный рисунок, что является существенным преимуществом фольговых тензосопротивлений.

**Пленочные тензосопротивления** получают путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на заранее подготовленную подложку, вследствие чего на последней образуется тончайший слой металла, напоминающий пленку. Такой способ обеспечивает массовое изготовление пленочных тензочувствительных элементов. Для пленочных, как и для фольговых тензосопротивлений, помимо обычных материалов применяют соединения германия, кремния и иных полупроводников, а также другие эффективные сплавы. Например, титаноалюминиевый сплав, позволяющий измерять деформации, достигающие до 12%.

Концы датчика припаиваются или привариваются к выводам, изготовленным из более толстого проводника.

Датчик наклеивается на исследуемую деталь, деформации которой передаются проволоке. Изменения омического сопротивления проволоки, соответствующие этим деформациям, регистрируются с помощью соответствующей аппаратуры.

Изменение сопротивления датчика при его деформации определяется как изменением геометрических размеров (длины и поперечного сечения) проволоки, так и изменением ее удельного сопротивления.

Экспериментально установлено, что при растяжении проволоки ее сопротивление меняется линейно в зависимости от деформации в соответствии с формулой

$$\Delta R = \gamma_0 R \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\Delta R$  – изменение сопротивления проволоки;  $R$  – её начальное сопротивление;  $\varepsilon$  – относительное удлинение;  $\gamma_0$  – коэффициент тензочувствительности материала.

Сопротивление датчика, наклеенного на деталь, также линейно связано с деформациями последней. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma \varepsilon_x + \delta \varepsilon_y \quad (2)$$

$\Delta R$  – изменение сопротивления датчика при деформации;  $R$  – его начальное сопротивление;  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – относительные удлинения детали в месте наклейки датчика в направлении его петель и в поперечном направлении. Коэффициенты  $\gamma$  и  $\delta$  называются коэффициентами продольной и поперечной тензочувствительности датчика.

Ввиду того, что деформация полностью передается только участкам проволоки, ориентированным в направлении базы, а криволинейные участки петель датчика не являются активными, коэффициент продольной тензочувствительности датчика  $\gamma$  меньше, чем коэффициент тензочувствительности проволоки.

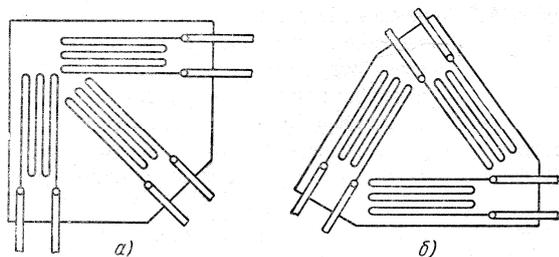
Чем меньше база датчика, тем больше относительная роль криволинейных участков проволоки, не участвующих в продольной деформации, и тем меньше, следовательно, продольная тензочувствительность датчика. Поперечная тензочувствительность тензодатчиков, как правило, невелика и коэффициентом  $\delta$  в формуле (2) обычно пренебрегают. Однако с уменьшением базы датчика чувствительность его к поперечным деформациям возрастает.

При малых базах (2,5...5 мм) неучет поперечной чувствительности датчика может повести к существенным погрешностям измерения. В этих случаях коэффициент поперечной тензочувствительности датчика должен определяться специальной тарировкой.

Обычно применяются датчики с базой 20, 10, 5 и 2,5 мм. Выбор базы датчика определяется задачами исследования. Как правило, следует выбирать датчики с наибольшей возможной по условиям опыта базой, исходя лишь из требования, чтобы на длине базы датчика деформации детали были в достаточной степени однородными.

Наклеенный на деталь датчик не может быть снят с нее неповрежденным. Поэтому тарировка каждого датчика невозможна.

Обычно тарировке подвергается несколько датчиков от партии, изготовленной из одной катушки проволоки на одном и том же приспособлении. Чувствительность остальных датчиков партии принимается равной средней чувствительности испытанных. В случае большого разброса в чувствительности датчиков партия бракуется. Иногда датчики могут быть протарированы непосредственно на детали; в этих случаях разброс в чувствительности датчиков не ведет к ошибкам при измерениях.



**Рис. 1.2. Розетки датчиков: а – для прямоугольная, б – равноугольная**

определить деформации в трех направлениях. По значениям этих деформаций можно подсчитать величину и направление главных деформаций. В случае необходимости розетки датчиков могут быть получены и посредством соответствующей наклейки на деталь трех одинаковых датчиков.

Наряду с одиночными датчиками применяются также розетки из датчиков сопротивления, служащие для определения величины и направления главных деформаций.

Эти розетки бывают двух типов – прямоугольные (фиг. 1.2, а) и равноугольные (фиг. 1.2, б). Каждая из таких розеток состоит из трех одинаковых датчиков, наклеенных на общей подложке. Розетка датчиков позволяет

## Приклейка датчиков

Успешность измерения деформаций с помощью проволочных тензодатчиков во многом зависит от качества их приклейки.

Необходимо, тщательно зачистить и обезжирить место приклейки. Слой клея должен быть тонким и он должен быть хорошо высушен. Обычно используется довольно густой клей. Клей наносится на деталь, к которой затем прижимается датчик: при этом удаляются пузырьки воздуха и выжимается лишний клей так чтобы между деталью и датчиком оставался лишь тонкий слой.

Для приклейки датчиков могут быть использованы различные типы клея, но наибольшее применение получили целлулоидный клей, бакелитовый лак и бутварно-фенольные клеи (марки БФ-2 и БФ-4).

Целлулоидный клей представляет собой раствор целлулоида в ацетоне. Преимуществом этого клея является быстрое высыхание. В естественных условиях он полностью высыхает примерно в течение часа. Ускорять сушку датчика с помощью прогрева теплым воздухом или инфракрасными лучами не рекомендуется. Однако целлулоидный клей обеспечивает достаточную прочность приклейки лишь при хорошем качестве целлулоида и чистом растворителе.

Целлулоидный клей нетермостоек, при высокой температуре (больше 60°) он размягчается.

Бутварно-фенольный клей дает очень большую прочность приклейки при высокой термостойкости.

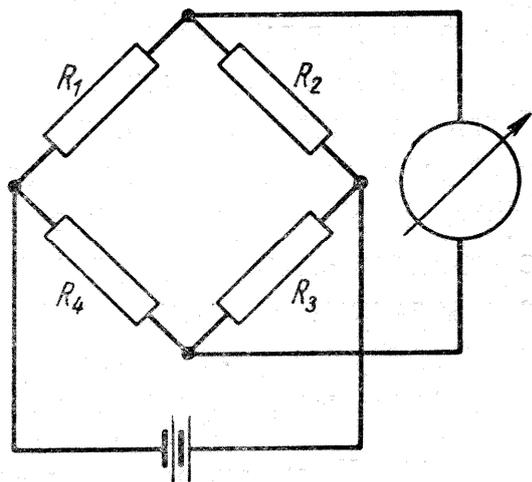
Для реализации этих качеств он должен быть подвергнут полимеризации – клей БФ-4 при температуре 60°, а клей БФ-2 при 140° в течение 20...30 мин. Подогрев производится только после полного высыхания клея.

Можно и не подогревать наклеенные датчики для полимеризации, однако, в этом случае измерения следует начинать не ранее чем через сутки после приклейки датчика. Датчики, приклеенные без полимеризации клея БФ, не пригодны для работы при температуре свыше 50°. Для защиты датчика от атмосферных влияний рекомендуется после приклейки покрыть его лаком. Для этого, может быть использован бакелитовый лак или тот же клей БФ, который применяется для приклейки датчика. При работе в условиях повышенной влажности поверх лака датчики покрываются слоем вазелина.

Для того чтобы предотвратить обрыв выводов от датчика, следует выводные, провода закреплять на детали в непосредственной близости от датчика.

Очень удобны для этой цели переходные колодочки, приклеиваемые на детали рядом с датчиком. Такая колодочка может быть изготовлена из двух листков тонкого (0,5 мм) гетинакса. В отверстия верхнего листка продеты латунные полоски (толщиной 0,1 мм), к которым с одной стороны припаиваются выводы датчика, а с другой – провода, идущие к измерительной, аппаратуре. Листки склеиваются между собой и приклеиваются к детали.

## **Включение проволочных датчиков**



**Рис. 1.3. Мостовая схема включения датчиков**

При измерении деформаций с помощью проволочных датчиков используются две схемы их включения – мостовая и потенциометрическая.

Простейшая **мостовая схема** представлена на рис. 1.3. Мост составлен из четырех сопротивлений, из которых  $R_1$  – датчик,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  – постоянные проволочные сопротивления. К одной из диагоналей моста подведено питающее напряжение, а к другой подключен измерительный прибор.

Ток, проходящий через прибор, сопротивление которого предполагается малым, равен

$$I = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_4 R_2 R_3 + R_1 R_3 R_4} \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение источника тока.

Условием отсутствия тока в измерительном приборе (балансировки моста) является равенство

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Обычно сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  делают одинаковыми  $R_2 = R_3 = R$ , а в качестве сопротивления  $R_4$  используют такой же датчик, как и  $R_1$  ( $R_4 = R_1 = R_d$ ).

Если теперь вследствие деформации сопротивление наклеенного на деталь датчика изменится на  $\Delta R$  и станет равным  $R_1 = R_d + \Delta R$ , через прибор моста пойдет ток.

Величину этого тока можно найти по формуле (3), полагая в ней  $R_2 = R_3 = R$ ;  $R_1 = R_d + \Delta R$ ;  $R_4 = R_d$  и пренебрегая в знаменателе малой величиной  $\Delta R$  по сравнению с  $R_d$ .

Тогда

$$I = \frac{U}{2(R + R_d)} \frac{\Delta R}{R_d}$$

Поскольку величина

$$\frac{U}{R + R_d} = I_d$$

представляет собой ток, протекающий через датчик, то

$$I = I_d \frac{\Delta R}{2R_d} \quad (4)$$

Таким образом, ток, протекающий через гальванометр, пропорционален изменению сопротивления датчика, а значит и деформации.

Сопротивление датчика изменяется не только в связи с деформациями детали, но и при изменении температуры.

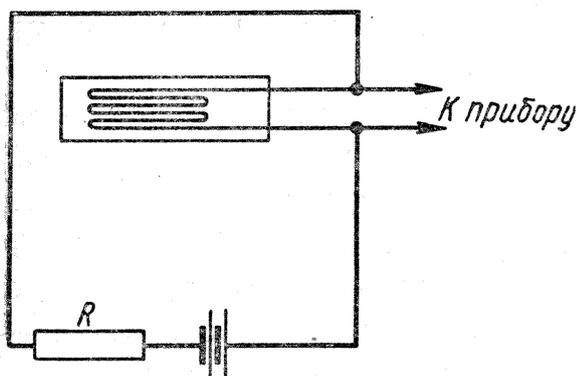
В последнем случае ввиду различия коэффициентов линейного расширения провода датчика и материала детали, на которую он наклеен, в проводе датчика возникают температурные напряжения, в связи с чем изменяется его сопротивление. Кроме того, с изменением температуры изменяется и удельное сопротивление материала.

Температурные изменения сопротивления датчика довольно велики. Так, например, при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$  сопротивление наклеенного на стальную деталь датчика из константановой проволоки изменяется так же, как и при деформации детали напряжением  $7\text{ кг/см}^2$ .

При изготовлении датчика из других материалов влияние температуры еще больше.

Это приводит при измерении статических деформаций к необходимости температурной компенсации. При мостовой схеме включения датчика температурная компенсация выполняется без затруднений. Для этого в качестве сопротивления  $R_4$  применяется компенсационный датчик, т.е. такой же точно датчик, как измерительный, наклеенный на пластинку из того же материала, что и деталь, находящуюся в таких же температурных условиях.

Тогда при изменении температуры сопротивления измерительного и компенсационного датчиков изменяется одинаково, и балансировка моста не нарушится.



**Рис. 1.4. Потенциометрическая схема включения датчиков**

**Потенциометрическая схема**

включения датчика представлена на рис. 1.4. В этом случае источник тока подключается к датчику через добавочное сопротивление  $R$ , а измерительный прибор, сопротивление которого весьма велико, регистрирует изменение напряжения на датчике.

Если сопротивление датчика изменяется на  $\Delta R$  вследствие деформации, то напряжение на нем  $U_d$ , которое до деформации было равно

$$U_d = \frac{UR_d}{R + R_d},$$

где  $U$  – напряжение источника тока, изменится на величину

$$\Delta U = U_d \frac{R}{R + R_d} \frac{\Delta R}{R_d}.$$

Это изменение напряжения весьма мало по сравнению с  $U_d$ . Поэтому потенциометрическая схема включения применяется только при использовании для измерения динамических деформаций усилителей переменного тока, не реагирующих на величину постоянного напряжения  $U_d$ , и регистрирует лишь его изменения при деформации.

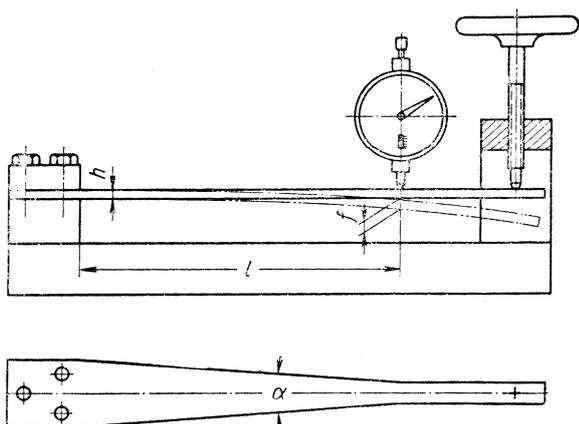
При потенциометрической схеме, так же как и при мостовой схеме, может быть применена температурная компенсация. Компенсационный датчик, идентичный с активным, включается последовательно с ним вместо сопротивления  $R$  (фиг. 1.4). Если внутреннее сопротивление источника тока мало по сравнению с сопротивлением датчика, то при одновременном и одинаковом изменении сопротивления активного и компенсационного датчиков, в связи с изменением температуры, напряжение на каждом из датчиков остается постоянным и равным половине напряжения источника тока.

## Контрольные вопросы

1. Как измеряется напряжения с помощью тензорезисторов?
2. Как наклеиваются тензорезисторы на испытываемую деталь?
3. Почему используется мостовая схема подключения?

## 2. Лабораторная работа №2. Тарировка проволочных датчиков сопротивления

Для тарировки датчиков используются тарировочные балочки – консольные или двухопорные.

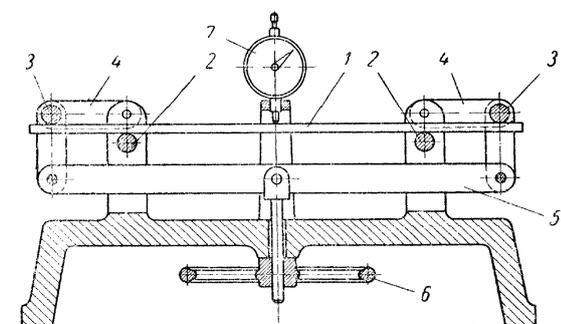


**Рис. 1. Консольная тарировочная балочка равного сопротивления**

заделки:

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} f .$$

Для того чтобы указанный способ тарировки давал необходимую точность нужно выполнить всё приспособление и особенно заделку балочки достаточно жесткими. Угол клина  $\alpha$  не должен превышать  $6 \dots 8^\circ$ . Чтобы расширить пределы деформаций, при которых тарируются датчики, и избежать пластических деформаций балочки, она должна быть изготовлена из стали с высоким пределом текучести и термообработана. После термообработки плоскости балочки шлифуются.



**Рис. 2. Тарировочная балочка, работающая на чистый изгиб**

Консольная тарировочная балочка представлена на рис. 1. Эта балочка имеет в плане треугольную форму (балочка равного сопротивления) и нагружается винтом в точке пересечения боковых сторон балочки.

В этом случае балочка изгибается по цилиндрической поверхности, причем в пределах клиновидной ее части деформации по длине постоянны. Эта часть балочки используется для наклейки тарируемых датчиков. Величина деформации рассчитывается по прогибу  $f$  балочки, измеряемому индикатором на расстоянии  $l$  от

Другой вариант тарировочного устройства – с балочкой, работающей на чистый изгиб – изображен на рис. 2. Балочка 1 лежит на неподвижных опорах 2 и нагружается роликами 3. Звенья 4 обеспечивают одинаковое расстояние роликов от опор.

Равномерное распределение нагрузки на ролики достигается с помощью рычага 5. Нагружается балочка поворотом маховичка 6, прогиб измеряется индикатором 7.

При установке индикатора в середине пролета балочки деформация выражается через прогиб  $f$  уравнением

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2} f,$$

где  $l$  – расстояние между неподвижными опорами балочки;  $h$  – ее толщина.

Для определения как продольной, так и поперечной тензочувствительности датчиков используются результаты тарировки двух датчиков, один из которых наклеивается вдоль балочки, а другой – поперек. Допустим, что в первом случае продольной деформации балочки  $\varepsilon_x = \varepsilon$  и поперечной деформации  $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon$ , где  $\mu$  – коэффициент Пуассона для материала балочки, соответствует относительное изменение сопротивления датчика  $(\Delta R/R)_1$ . При той же деформации балочки относительное изменение сопротивления датчика, наклеенного в поперечном направлении, составит  $(\Delta R/R)_2$  (для этого датчика  $\varepsilon_x = -\mu\varepsilon$ ,  $\varepsilon_y = \varepsilon$ ).

Для этих датчиков:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = (\gamma - \delta\mu)\varepsilon;$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = (-\mu\gamma + \delta)\varepsilon.$$

Отсюда находим:

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \frac{\mu}{(1-\mu^2)\varepsilon} \left[ \mu \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 \right];$$

$$\delta = \frac{1}{(1-\mu^2)\varepsilon} \left[ \mu \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 \right].$$

Обычно  $(\Delta R/R)_1$  и  $(\Delta R/R)_2$  имеют различные знаки и второе слагаемое в формуле для  $\gamma$  весьма мало по сравнению с первым.

Коэффициент Пуассона  $\mu$ , необходимый для расчета по приведенным формулам, можно определять с помощью механических тензометров, устанавливаемых на тарировочной балочке.

Тарировка партии датчиков обязательна в том случае, когда датчики предназначены для исследования распределения деформаций в деталях сложной формы.

В ряде случаев, когда целью эксперимента является установление нагрузок, действующих на деталь (в статически неопределимой конструкции или при динамической нагрузке), датчики с успехом могут быть протарированы непосредственно на детали.

Для этого деталь с наклеенными датчиками подвергается предварительному нагружению известными силами с помощью грузов или в испытательной машине и при этом определяется отношение между нагрузкой и изменением сопротивления датчиков.

Используя это отношение, можно в дальнейшем по измеренному изменению сопротивления датчика определить воспринимаемую деталью нагрузку.

### Контрольные вопросы

1. В чем смысл балочки равного сопротивления?
2. Какова погрешность измерения напряжений?
3. Назовите пути снижения погрешностей.

#### 4. Лабораторная работа №3. Контроль затяжки резьбовых соединений

##### 1. Определение напряжений в болтах или шпильках при затяжке резьбовых соединений

Изложим методику расчетно-экспериментального исследования напряжений от изгиба в шатунных болтах по данным экспериментального определения нормальных напряжений в трех точках поперечного сечения болта  $A_1, B_1, C_1$  (рис. 1). При выводе полученных соотношений опирались на допущение, что в поперечном сечении болта суммарные нормальные напряжения в от растяжения и изгиба имеют линейный закон распределения [1-3]. Представив нормальные напряжения в поперечном сечении болта в виде векторов, с учетом принятого допущения можно утверждать, что концы векторов  $\sigma$  ( $\sigma_{A_1}, \sigma_{B_1}, \sigma_{C_1}$  – напряжения в точках  $A_1, B_1, C_1$  поперечного сечения болта) располагаются на некоторой плоскости  $q$  (рис.1). Точки  $A_1, B_1, C_1$  поперечного сечения могут быть произвольные, однако для упрощения полученных соотношений расположим эти точки на внешней окружности поперечного сечения симметрично через  $120^\circ$ . Начало координат  $O$  выбираем в центре поперечного сечения  $F$ , а ортогональная координатная система  $Oxyz$  выбрана так, что ось  $x$  проходит через точку  $A_1$  (рис. 1). Уравнение плоскости  $q$ , проходящей через три точки (концы векторов напряжений в точках  $A_1, B_1, C_1$ ):  $A(r, 0, \sigma_{A_1}); B(-r/2, r\sqrt{3}/2, \sigma_{B_1}); C(-r/2, -r\sqrt{3}/2, \sigma_{C_1})$  имеют вид [4]:

$$\begin{vmatrix} r \cos \varphi - r & r \sin \varphi & \sigma - \sigma_{A_1} \\ -\frac{3r}{2} & r \frac{\sqrt{3}}{2} & \sigma_{B_1} - \sigma_{A_1} \\ -\frac{3r}{2} & -r \frac{\sqrt{3}}{2} & \sigma_{C_1} - \sigma_{A_1} \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение в произвольной точке  $M$  поперечного сечения на окружности болта;  $\varphi$  – центральный угол, отсчитываемый от оси  $x$  так, что с положительного направления оси  $z$  поворот виден против хода часовой стрелки.

Раскрыв определитель (1), найдем напряжение

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{A_1} + \sigma_{B_1} + \sigma_{C_1}) + \frac{\sqrt{3}}{3}(\sigma_{B_1} - \sigma_{C_1})\sin \varphi - \frac{1}{3}(\sigma_{B_1} + \sigma_{C_1} - 2\sigma_{A_1})\cos \varphi. \quad (2)$$

Экстремальные значения напряжений будут при  $\left. \frac{d\sigma}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_0} = 0$ .

Тогда из уравнений (2) определим:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = -\frac{\sqrt{3}(\sigma_{B_1} - \sigma_{C_1})}{\sigma_{B_1} + \sigma_{C_1} - 2\sigma_{A_1}} \quad (3)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_0 &= -\frac{\sqrt{3}(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}; \\ \cos \varphi_0 &= \frac{\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1}}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}. \end{aligned} \right| \quad (4)$$

Подставив в выражение (2) значения (4), получим максимальное  $\sigma_{\max}$  или минимальное  $\sigma_{\min}$  напряжение в поперечном сечении болта. Заметим, что проводить дополнительно исследование найденного корня не требуется. Действительно, если при  $\varphi = \varphi_0$  из уравнения (2) найдем  $\sigma$ , которое по величине больше  $\sigma_{A1}$ ,  $\sigma_{B1}$ ,  $\sigma_{C1}$ , то полученное значение – максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ , а тогда при  $\varphi = (\varphi_0 \pm \pi)$  – минимальное напряжение  $\sigma_{\min}$  (или наоборот). При  $\varphi = (\varphi_0 \pm \pi/2)$  значение  $\sigma$  равно напряжению от растяжения. Впрочем по вычисленным напряжениям  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  напряжение изгиба  $\sigma_{и}$  равно:

$$\sigma_{и} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (5)$$

напряжение растяжения  $\sigma_p$ :

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}. \quad (6)$$

Значение усилия затяжки  $Q_3$  в болте или шпильке равно

$$Q_3 = \sigma_p F. \quad (7)$$

Таким образом, соотношения (2), (3), (4) позволяют провести исследование напряженного состояния шатунного болта.

Момент на ключе можно определить как

$$M_{кл} = Q_3 \cdot d_0 \cdot k,$$

где  $d_0$  – средний диаметр резьбы шатунного болта;  $k$  – коэффициент трения в резьбе. Отсюда можно определить  $k$ :

$$k = \frac{M_{кл}}{Q_3 d_0} = \frac{M_{кл}}{\sigma_p F \cdot d_0}.$$

С учетом выражения (4) экстремальные напряжения в поперечном сечении болта

$$\sigma_{\text{экстр}} = \frac{1}{3}(\sigma_{A1} + \sigma_{B1} + \sigma_{C1}) - \frac{(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}} - \frac{1}{3} \frac{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}.$$

## **2. Экспериментальные методы исследования резьбовых соединений**

При экспериментальных исследованиях обычно находят экспериментальную зависимость между моментом на ключе (моментом затяжки) и усилием в болте или шпильке.

Значение момента на ключе  $M_3$  при затяжке записывается через динамометр при известном плече рычага.

Напряжение в болте или шпильке определяется с помощью наклеенных на внешней поверхности симметрично через  $120^\circ$  тензорезисторов. Такое расположение тензорезисторов позволяет вычислить величину напряжений от изгиба и от растяжения. Осевое усилие в болте определяется по известному напряжению при растяжении и площади поперечного сечения.

На рис.2 приведен эскиз дообработанного под наклейку тензорезисторов шатунного болта с указанием места наклейки тензорезисторов.

## **3. Испытательное оборудование и приборы.**

Испытания проводятся на безмоторной установке, принципиальная схема которой приведена на рис.3.

В состав установки входят:

- тарировочный ключ с наклеенными на рычаг тензорезисторами;
- преобразователь угловых перемещений фотоэлектрической модели ПУФ ВЕ-178 класса точности 8 по ГОСТ 26242-84;
- корпус преобразователя, который жестко закрепляется к основанию, на которое устанавливается шатун;
- резьбовое соединение - шатун.

Преобразователь угловых перемещений 3 закрепляется в корпусе 4. Вал преобразователя 1 спомощью торсиона связан с вращающейся головкой ключа. Питание ПУФ ВЕ-178 осуществляется от блока питания. Выходной сигнал от ПУФ через преобразователь подается на осциллограф или другой прибор.

Сигнал от тензорезисторов, наклеенных на рычаг ключа, через усилитель подается также на осциллограф или на измеритель деформаций ИДЦ-1. Градуировка сигнала проводится на величину момента.

Сигналы от тензорезисторов, наклеенных на болт, подаются аналогично. Градуировка сигналов проводится на величину относительной деформации.

Таким образом обеспечивается одновременная запись на осциллограмму момента на ключе при затяжке  $M_3$ , угла поворота гайки, а также напряжений в трех точках на поверхности болта.

## **4. Порядок проведения испытаний**

Перед началом испытаний шатунный болт с наклеенными на внешней поверхности поперечного сечения симметрично через  $120^\circ$  тремя тензорезисторами устанавливают в шатун и проводят градуировку тензорезисторов для определения величины напряжения.

На головку ключа устанавливается корпус преобразователя угловых ПУФ, а вал его соединяется с помощью торсиона с головкой ключа. Сигнал от ПУФ должен быть отградуирован при записи на осциллограмму.

Затем производится затяжка резьбовых соединений и сигналы от тензорезисторов и ПУФ одновременно записывают на осциллограф.

Записывать угол поворота головки шатунного болта рекомендуется, когда момент затяжки равен 5...10 Н·м.

### 5. Обработка результатов испытаний.

Если при проведении испытаний в точках  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  получены значения деформации (в единицах относительной деформации – ЕОД), то пересчет в напряжения проводится по известной формуле:

$$\sigma = E \cdot \epsilon,$$

где  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа - модуль упругости материала болта;

Определение напряжений от растягивающей нагрузки (силы затяжки  $Q_3$ ) и от изгиба ( см. п.1 описания ) можно провести вручную или по специально разработанной программе для ЭВМ ( программа Bolt).

Результаты обработки рекомендуется записать в таблицу :

№ по п.п.	Момент затяжки $M_3$ , Нм	Угол поворота головки болта
-----------	---------------------------	-----------------------------

По полученным результатам строят график зависимости  $Q_3$  и угла поворота головки болта от момента затяжки.

Литература

1. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В. Затяжка и стопорение резьбовых соединений - М.: Машиностроение, 1985.
2. Расчет на прочность деталей машин. Под. ред. И.А.Биргера. - М.: Машиностроение, 1966.
3. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. - М.: Машиностроение, 1990.
4. Гоц А.Н., Некрасов С.И. Снижение напряжений от изгиба в шатунных болтах. - Двигателестроение, N 2, 1986, С. 54-56.

### Контрольные вопросы

1. Почему рекомендуется наклеивать тензорезисторы под углом  $120^\circ$  друг относительно друга ?

2. От чего зависит момент затяжки резьбовых соединений?

4. Лабораторная работа №4. Изучение вибраций двигателя в стендовых условиях.

Цель работы – изучить условия возникновения вибраций поршневого двигателя, ознакомиться с аппаратурой для измерения вибрации и экспериментально определить уровень вибрации в различных точках двигателя при его работе в стендовых условиях.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип действия и конструкцию виброметра ВМ-1.
2. Ознакомиться с назначением органов управления прибором, подготовить прибор к работе.

3. Проверить работоспособность прибора, прохождение сигнала от датчика к стрелочному указателю уровня.
4. Установить вибродатчик в определенную точку на двигателе (по указанию преподавателя). Подготовить измеритель к работе.
5. Запустить и прогреть двигатель на моторном стенде. В выбранном диапазоне скоростных режимов работы двигателя через определенные интервалы частоты вращения коленчатого вала произвести замеры виброускорения (виброскорости, виброперемещения).
6. Изменить установку вибродатчика (по указанию преподавателя) и повторить замеры виброускорения (виброскорости, виброперемещения) на тех же скоростных режимах.
7. При проведении измерений вибраций бензинового двигателя отключить зажигание одного из цилиндров на выбранном скоростном режиме и оценить изменение параметров вибраций. То же самое проделать еще на нескольких скоростных режимах. Записать результаты измерений.
8. Результаты экспериментов занести в таблицу. По полученным данным построить графики зависимостей виброускорения (виброскорости, виброперемещения) в различных точках двигателя от частоты вращения коленчатого вала двигателя, а также при отключенном зажигании одного из цилиндров. Выполнить анализ полученных результатов.

#### Контрольные вопросы

1. Каковы причины, вызывающие вибрации двигателя?
2. Каков частотный диапазон вибраций двигателя?
3. Каков уровень виброускорений в различных точках двигателя?
4. В каких единицах измеряется виброускорение (виброскорость, виброперемещение) ?
5. Как устроен и работает вибродатчик?
6. Опишите структуру и принцип действия виброметра.

5. Лабораторная работа №5. Исследование жесткости деталей механизма газораспределения двигателя.

Цель работы – изучить методы экспериментального исследования жесткости деталей привода клапана и определить его частоты собственных колебаний.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой проведения работы, лабораторными установками.
2. Определить деформации деталей привода клапана при нагрузке механизма до 1000 Н с интервалом 100 Н с последующей разгрузкой механизма.
3. Снять характеристику клапанных пружин при перемещении клапана от нуля до максимального значения деформации с интервалом 1 мм с последующей разгрузкой пружин.
4. Построить графики деформаций  $\Delta l = f(P)$  деталей привода клапана (см. рис.3). Деформации деталей определить как среднюю величину при нагрузке и разгрузке
$$\Delta l = \frac{(\Delta l_{наг} + \Delta l_{раз})}{2}.$$
5. Определить жесткости деталей привода клапана  $c_{кор}, c_o, c_{ш}, c_в$ , общую жесткость  $c$ .
6. Построить характеристики клапанных пружин  $P = f(h)$  (см. рис.5) с учетом нагрузки и разгрузки (по средней величине).
7. Определить жесткость клапанных пружин  $c_n$ .
8. Определить массу деталей механизма, участвующих в колебаниях  $M$ .
9. Определить частоту собственных колебаний привода клапана  $V$ .
10. Построить все необходимые графики (по указанию преподавателя).

### Контрольные вопросы

1. Опишите методику определения жесткости привода клапана.
2. Объясните причину несовпадения кривых деформаций при нагрузке и разгрузке механизма.
3. Как определяется частота собственных колебаний отдельных деталей?
4. Проанализируйте влияние жесткости отдельных деталей на общую жесткость привода клапана.
5. Продолжите конструктивные пути повышения жесткости привода клапана.

6. Лабораторная работа №6. исследование колебаний клапанного механизма двигателя.

Цель работы – изучить методы экспериментального исследования колебаний клапанного механизма и определить действительные нагрузки на детали привода клапана.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать совместно с преподавателем измерительное устройство, выбрать гальванометры осциллографа, коэффициенты усиления тензостанции ТА-5 и протарировать систему, построить тарировочные графики.

2. Совместно с лаборантом установить коромысла с тензодатчиками на двигатель, установить зазор между клапаном и коромыслом  $\delta = 0,3$  мм, настроить измерительную систему, установить кассету с фотобумагой на осциллограф.
3. Запустить двигатель и после его прогрева подобрать скорость развертки осциллографа, записать процессы при  $n = 500, 1000, 1500, 1800$  и  $2000$  мин<sup>-1</sup> при полной нагрузке.
4. Установить зазор между клапаном и коромыслом  $\delta = 0,5$  мм и повторить запись процессов.
5. Установить зазор между клапаном и коромыслом  $\delta = 0,8$  мм и вновь повторить запись процессов.
6. Выключить двигатель и тензоизмерительную аппаратуру, проявить светочувствительную бумагу. Пронумеровать осциллограммы и написать на них исходные данные – частоту вращения вала и величину теплового зазора, нанести обозначения на кривые.
7. Обработать осциллограммы: определить максимальные и минимальные силы, действующие в механизме, частоту колебаний привода клапанов, действительную частоту вращения коленчатого вала, продолжительность открытия клапанов и фазы газораспределения, наличие разрывов кинематической цепи привода клапанов. Для обработки выбирается участок осциллограммы (рис.2) с постоянной скоростью развертки (средний участок ленты).

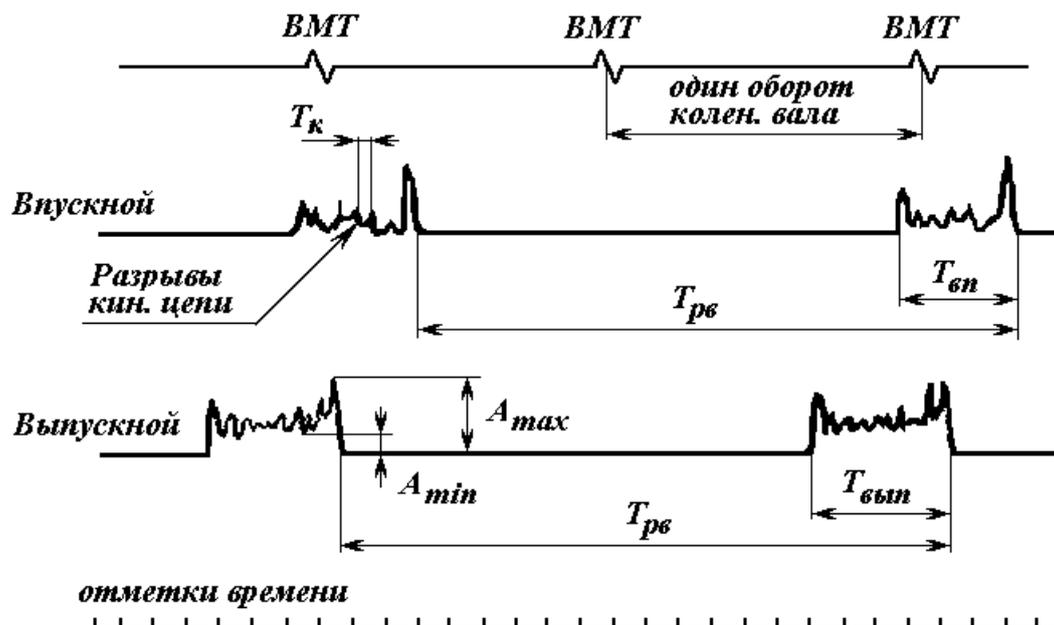


Рис. 2

Частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>

$$n = \frac{60N}{(zT_{отм})},$$

где  $N$  – число оборотов двигателя, измеренное по отметкам ВМТ на осциллограмме;  $z$  – число отметок времени на осциллограмме, соответствующих  $N$  оборотам двигателя;  $T_{отм}$  – период колебаний отметчика времени (чередование меток времени), определяемый по скорости развертки осциллографа.

$$\nu = \frac{60N_1}{(mT_{отм})},$$

где  $N_1$  – число колебаний, измеренных на осциллограмме;  $m$  – число отметок времени на осциллограмме, соответствующее  $N_1$  колебаниям.

$$P_{\max} = kA_{\max}, \quad P_{\min} = kA_{\min},$$

где  $k$  – масштаб осциллограммы сил, взятый с тарировочного графика (Н/мм);  $A$  – амплитуды максимальной и минимальной сил на осциллограмме, мм.

Наличие разрывов кинематической цепи соответствует участкам, где  $P \leq 0$  (отсутствие силового замыкания).

$$\varphi_{вп} = \frac{360T_{вп}}{T_{рв}}; \quad \varphi_{вып} = \frac{360T_{вып}}{T_{рв}},$$

где  $T_{вп}, T_{вып}$  – продолжительность открытия впускного и выпускного клапанов на осциллограмме, мм;  $T_{рв}$  – продолжительность одного оборота распределительного вала на осциллограмме, мм.

Фазы газораспределения (углы опережения открытия и запаздывания закрытия впускного и выпускного клапанов определяются по продолжительности открытия клапанов относительно отметок ВМТ и НМТ). По результатам обработки осциллограмм построить следующие графики  $P_{\max, \min} = f(n, \delta)$ ,  $\phi_{вп, вып} = f(n, \delta)$  для впускного и выпускного клапанов.

### Контрольные вопросы

1. Опишите методику определения сил, действующих в механизме газораспределения.
2. Объясните характер изменения сил в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и величины зазора между клапаном и коромыслом.
3. Объясните причины разрывов кинематической цепи привода клапана.
4. Объясните характер изменения продолжительности открытия клапанов и фаз газораспределения от частоты вращения вала двигателя и величины теплового зазора.

5. Какие практические выводы можно сделать из данной работы по техническому обслуживанию клапанного механизма при эксплуатации двигателя?

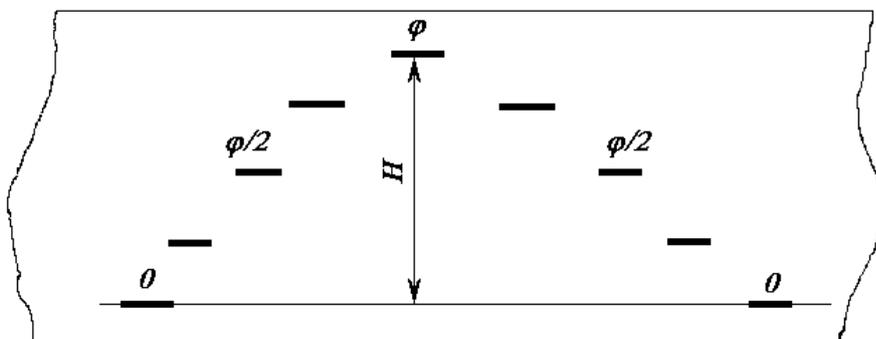
7. Лабораторная работа № 7. Экспериментальное исследование крутильных колебаний коленчатого вала

Цель работы – изучить методы экспериментального исследования крутильных колебаний коленчатого вала двигателя.

#### Порядок выполнения работы

Подготовка к торсиографированию состоит в выборе гальванометра осциллографа с частотой собственных колебаний, превышающей в 8...10 раз наибольшую частоту крутильных колебаний коленчатого вала. Для двигателей с частотой вращения вала до 2400 мин<sup>-1</sup>, частота собственных колебаний гальванометра должна быть не менее 1200 Гц. Затем включается усилитель, осциллограф и после прогрева и проверки исправности измерительной системы выполняется ее тарировка. Выбирается коэффициент усиления сигнала из условия получения максимальной амплитуды сигнала торсиографа. При перемещении маховика из одного крайнего положения в другое амплитуда сигнала на экране осциллографа должна составлять 80...100 мм при ширине фотобумаги 120 мм.

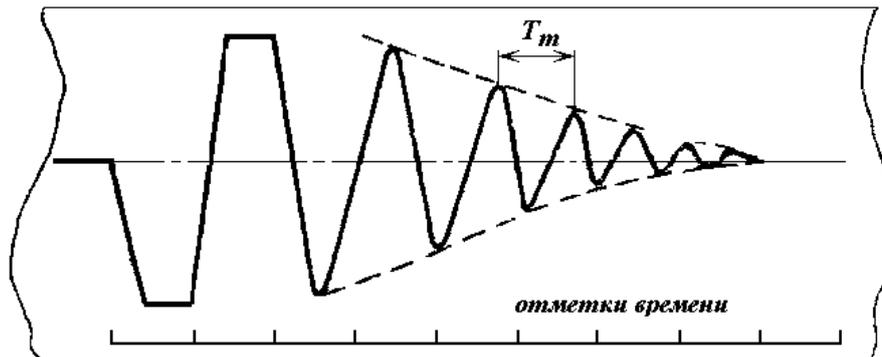
Характеристика торсиографа практически линейна, т.е. сигнал тензодатчиков прямо пропорционален углу поворота маховика относительно оси торсиографа. Поэтому масштаб



торсиограммы определяется делением амплитуды сигнала  $H$  на экране осциллографа на полный угол поворота маховика торсиографа  $\varphi$ , который может быть определен угломером или расчетом. Тарировка записывается на осциллограмму (рис.10).

После тарировки измерительной системы снимаются осциллограммы собственных колебаний торсиографа, для чего включается небольшая скорость протяжки ленты осциллографа и фиксируются колебания торсиографа, выведенного из положения равновесия (рис.11).

Затем приступают к торсиографированию коленчатого вала двигателя. Осциллограммы снимаются на режимах холостого хода, полной и частичной нагрузок при частоте вращения - от минимально устойчивой до максимальной с интервалом  $200 \text{ мин}^{-1}$ . Для получения удобных для обработки осциллограмм скорость протяжки ленты осциллографа при частоте вращения до  $2000 \text{ мин}^{-1}$  выбирается равной  $0,5 \text{ м/с}$ , а при более высокой –  $1,0 \text{ м/с}$ . Обработка осциллограмм заключается в определении частоты вращения коленчатого вала,



амплитуды и частоты его колебаний (рис.12).

Частота вращения коленчатого вала двигателя определится,  $\text{мин}^{-1}$

$$n = \frac{60N}{(zT_{отм})},$$

где  $N$  – число оборотов двигателя, замеренное по отметкам ВМТ на осциллограмме;  $z$  – число отметок времени на осциллограмме, соответствующее  $N$  оборотов двигателя;  $T_{отм}$  - период колебаний отметчика времени (определяется по скорости протяжки ленты осциллографа), с.

Частота крутильных колебаний определится по формуле, кол./мин

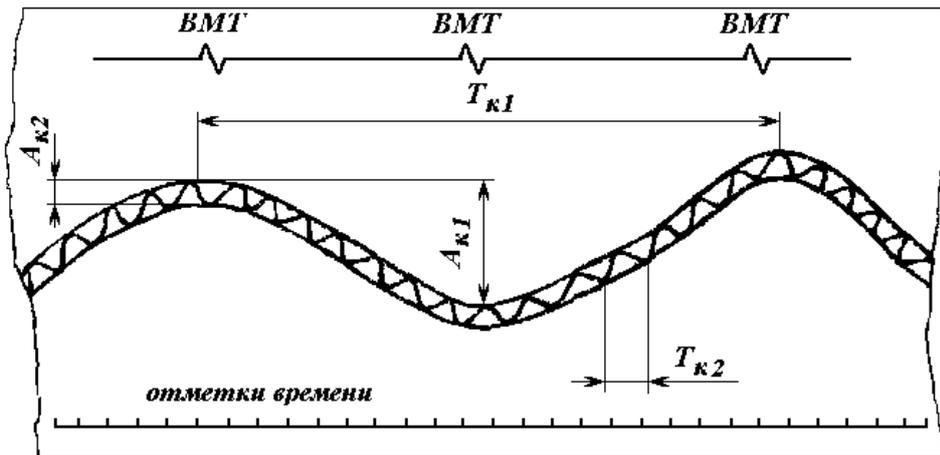


Рис. 12

$$v = \frac{60N_k}{(mT_{отм})},$$

где  $N_k$  - число колебаний, измеренных на осциллограмме;  $m$  – число отметок времени на осциллограмме, соответствующих  $N_k$  колебаниям.

Амплитуда колебаний, рад

$$A = lA_k,$$

где  $l$  - масштаб торсиограммы, рад/мм;  $A_k$  - амплитуда колебаний на осциллограмме, мм.

По полученным осциллограммам выявляются резонансные режимы работы двигателя, которые затем исследуются с небольшим интервалом по частоте вращения коленчатого вала.

По результатам торсиографирования строится зависимость амплитуды колебаний коленчатого вала от частоты вращения и определяется порядок резонирующей гармоники

$$K = \frac{v}{n}.$$

Часто кривая крутильных колебаний не является чисто синусоидальной, поэтому для определения частот и амплитуд колебаний необходимо провести ее гармонический анализ с использованием ЭВМ.

### Контрольные вопросы

1. Опишите методику торсиографирования.
2. Изложите методику обработки осциллограмм.
3. Как устроен и работает торсиограф?
4. Что такое крутильные колебания?
5. Как определяются резонансные режимы работы двигателя?

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ**

Каждая из лабораторных работ относится к определенному разделу учебного курса. Поэтому при подготовке необходимо детально ознакомиться со всеми вопросами, относящимися к данной работе, по источникам [1, 9], приведенным в списке рекомендуемой литературы.

Перед выполнением каждой работы студент должен изучить устройство лабораторной установки и порядок выполнения задания. При недостаточной подготовленности студент к выполнению лабораторной работы не допускается.

При выполнении лабораторных работ студенты должны строго соблюдать все правила техники безопасности, с которыми они были ознакомлены на инструктаже.

Результаты измерений студент заносит в протокол наблюдений. Протокол подписывается преподавателем и прилагается к отчету.

Отчет должен содержать краткое изложение основ теории, принципиальную схему испытательной установки, протокол испытаний (наблюдений), результаты обработки опытных данных, необходимые графические зависимости (характеристики двигателя и др.), оценку погрешностей экспериментальных данных, анализ полученных результатов. Графики выполняются *обязательно* на миллиметровой бумаге формата А4 с применением чертежных инструментов или компьютерной графики (на листах бумаги А4).

Для получения зачета по выполненной работе следует представить преподавателю отчет, показать знание основных положений теории, техники и методики эксперимента, а также умение критически оценить полученные результаты.