

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания  
и дизельных установок**

**ЗАПИСЬ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ КРУТИЛЬНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ СУДОВЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

***Методические указания к лабораторной работе***

**Санкт-Петербург  
1997**

В методических указаниях рассмотрены эффективные способы измерения и алгоритм предварительной и основной обработки экспериментальных записей крутильных колебаний судовых валопроводов.

Указания предназначены для студентов Государственного морского технического университета, обучающихся по специальностям "Судовые энергетические установки" и "Двигатели внутреннего сгорания".

МИНАСЯН Минас Арменович  
РУМБ Виктор Карлович

ЗАПИСЬ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ КРУТИЛЬНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ ВАЛОПРОВОДОВ СУДОВЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Методические указания к лабораторной работе

© СПбГМТУ,  
1997

Ответственный редактор канд.техн.наук, доцент Г.В.Яковлев  
Редактор Т.Б.Симоненко  
Корректор Н.Ф.Сухинина

---

Подписано в печать 24.11.97. Зак. 1011. Тир. 300. Уч.-изд.л. 0,9.  
Изд. центр СПбГМТУ, Лоцманская, 10

## I. Цель измерения крутильных колебаний

Крутильные колебания относятся к числу явлений, которые до настоящего времени представляют опасность для прочности судовых валопроводов. Вместе с тем, часто расчетные и экспериментально замеренные напряжения от действия этих колебаний существенно разнятся между собой. Данный факт еще раз подтверждает сложность колебательных процессов и многообразие факторов, оказывающих влияние на уровень их развития. Поэтому экспериментальную проверку признано считать заключительным этапом исследования крутильных колебаний. В частности, Правила Морского Регистра содержат требования, согласно которым результаты расчета крутильных колебаний должны быть подтверждены их измерениями во всем диапазоне частот вращения валопровода.

## 2. Способы измерений крутильных колебаний

Экспериментальная запись крутильных колебаний, известная в практике под названием торсиографирование, осуществляется двумя способами, которые отличаются друг от друга приборной базой и регистрируемым параметром колебательного процесса.

Основу первого способа измерения составляет запись во времени деформации доступного сечения вала механическим торсиографом. Он состоит из алюминиевого шкива, маховой массы, спиральной пружины, двух угловых рычагов, лентопротяжного механизма, устройства для нанесения меток времени и оборотов. Принцип работы торсиографа заключается в следующем. Шкив приводится во вращение от испытуемого вала непосредственно либо через ременную передачу и повторяет его колебания. Маховая масса, связанная со шкивом спиральной пружиной, вращается равномерно. Возникающие между шкивом и массой относительные движения трансформируются угловым рычагом в отклонение пишущего рычага. Последний фиксирует на бу-

мажной ленте в выбранном масштабе крутильные колебания исследуемого сечения вала.

Второй способ позволяет измерять переменные напряжения тензометрированием вала. В качестве чувствительных элементов применяются тензорезисторы, которые используют явление тензоэффекта. Это явление заключается в изменении электрического сопротивления проводника при его механической деформации. При этом соблюдается пропорциональность сопротивления от продольной деформации.

Важной характеристикой тензорезистора является коэффициент тензочувствительности  $k$ , определяемый как отношение изменения электрического сопротивления к изменению длины проводника, т.е.

$$k = \varepsilon_R / \varepsilon,$$

где  $\varepsilon_R = \Delta R / R$  - относительное изменение электрического сопротивления проводника;  $\varepsilon = \Delta l / l$  - относительная деформация проводника.

Для большинства тензорезисторов  $k \approx 2$ .

Тензорезисторы бывают проволочные, фольговые и полупроводниковые (рис. 1).

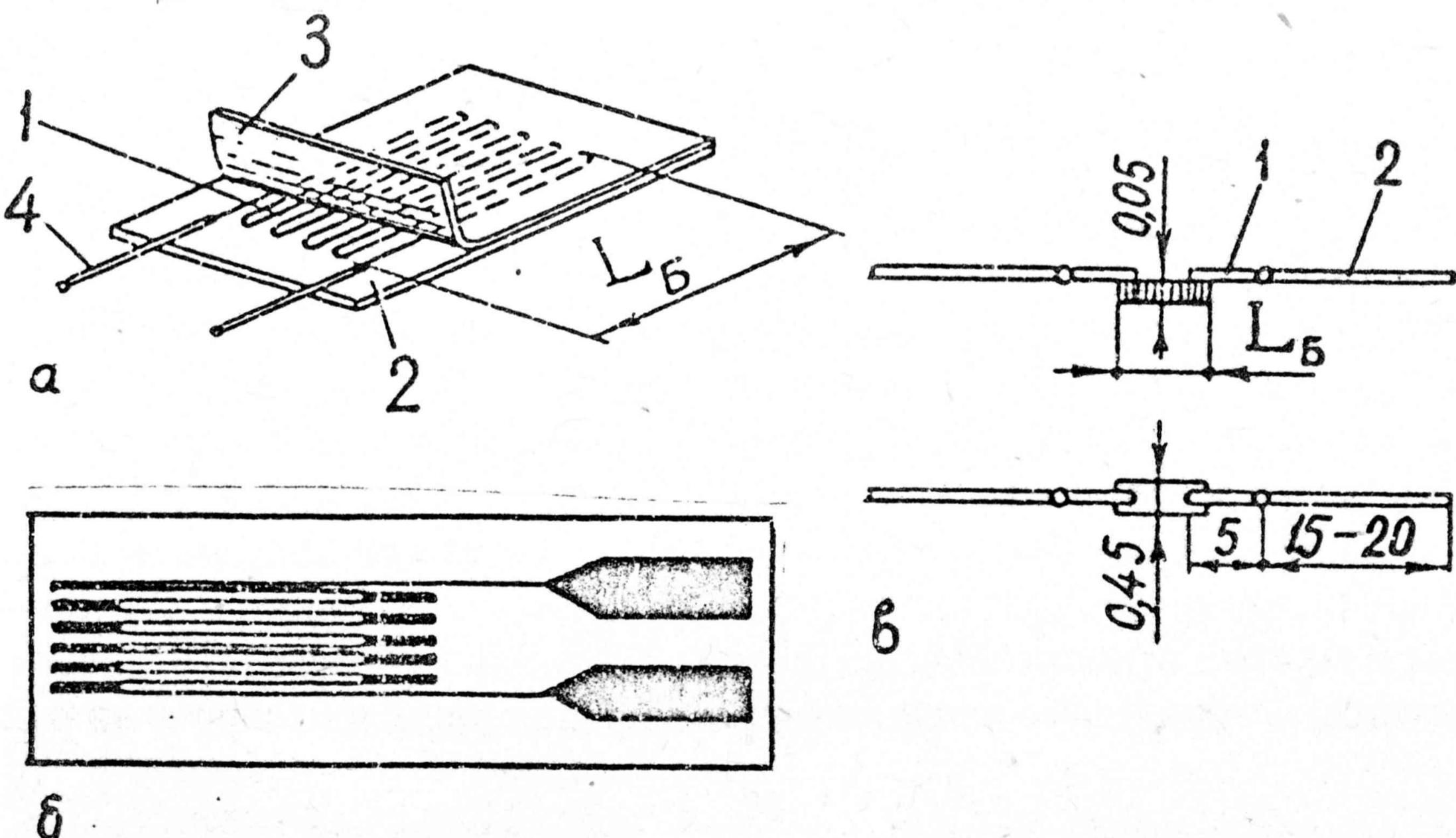


Рис. 1. Схемы датчиков: а - проволочного: 1 - тензометрическая проволока (чувствительный элемент), 2 - бумага, 3 - бумага защитная, 4 - медные выводы (для электрического соединения),  $L_B$  - база тензорезистора; б - фольгового; в - полупроводникового: 1 - тензочувствительный материал, 2 - выводы,  $L_B$  - база тензорезистора

Проволочные тензорезисторы изготавливают из константановой проволоки диаметром 0,02-0,05 мм. Проволоку петлями укладывают на полоску тонкой бумаги или лаковую пленку и приклеивают по всей длине. К концам тензометрической проволоки припаивают медные выводы. Сверху тензорезистор заклеивают защитной бумагой и покрывают слоем лака. Толщина такого датчика обычно не превышает 0,4 мм.

Измерительной базой тензорезистора является длина петли. Наиболее часто используются датчики с базой 5-30 мм, обладающие сопротивлением 30-500 Ом.

Фольговые тензорезисторы представляют собой решетку, изготавливаемую из тонкой ленты толщиной 4-12 мкм методом фототравления. Фольговая решетка может быть любой сложной формы, оптимальной по чувствительности и габаритам.

В последние годы появился еще один способ массового изготовления тензорезисторов, заключающийся в вакуумной возгонке тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку. В качестве материала таких датчиков, помимо обычных, используется также целый ряд полупроводниковых материалов, например, германий, кремний. Благодаря новой технологии удается изготавливать тензорезисторы с базой менее одного миллиметра.

Тензорезисторы прикрепляются к поверхности вала при помощи различных клеящих составов. Наибольшее применение в судостроении получили клеи нитроцеллюлозной группы и бакелитово-фенольные. Более оперативно удается выполнять замеры с так называемыми съемными тензорезисторами (рис.2). Они представляют собой датчики обычного исполнения, наклеенные на стальную подложку толщиной 0,1-0,5 мм. Такие датчики крепятся на вал путем точечной сварки.

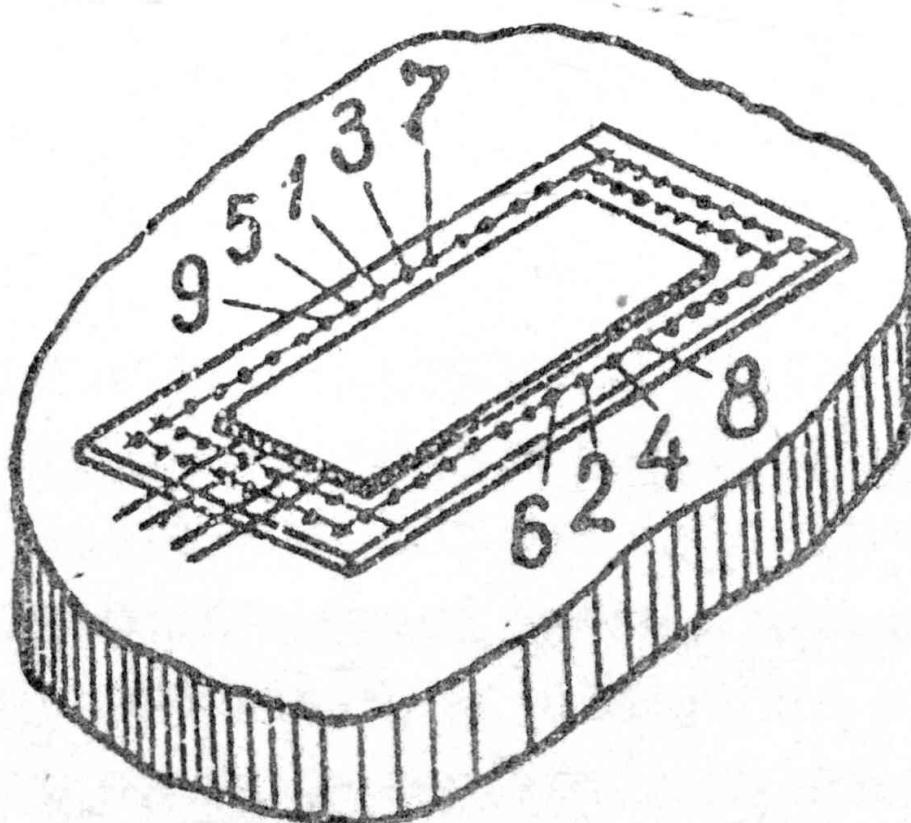


Рис.2. Привариваемый проволочный тензодатчик: 1-9 - порядок приварки тензодатчика к детали

Таким образом, тензорезистор, закрепленный на исследуемом вале, воспринимает деформации его поверхности. При этом входной величиной датчика будет деформация решетки, а выходной - изменение электрического сопротивления.

Схема включения тензорезисторов в измерительную сеть показана на рис.3.

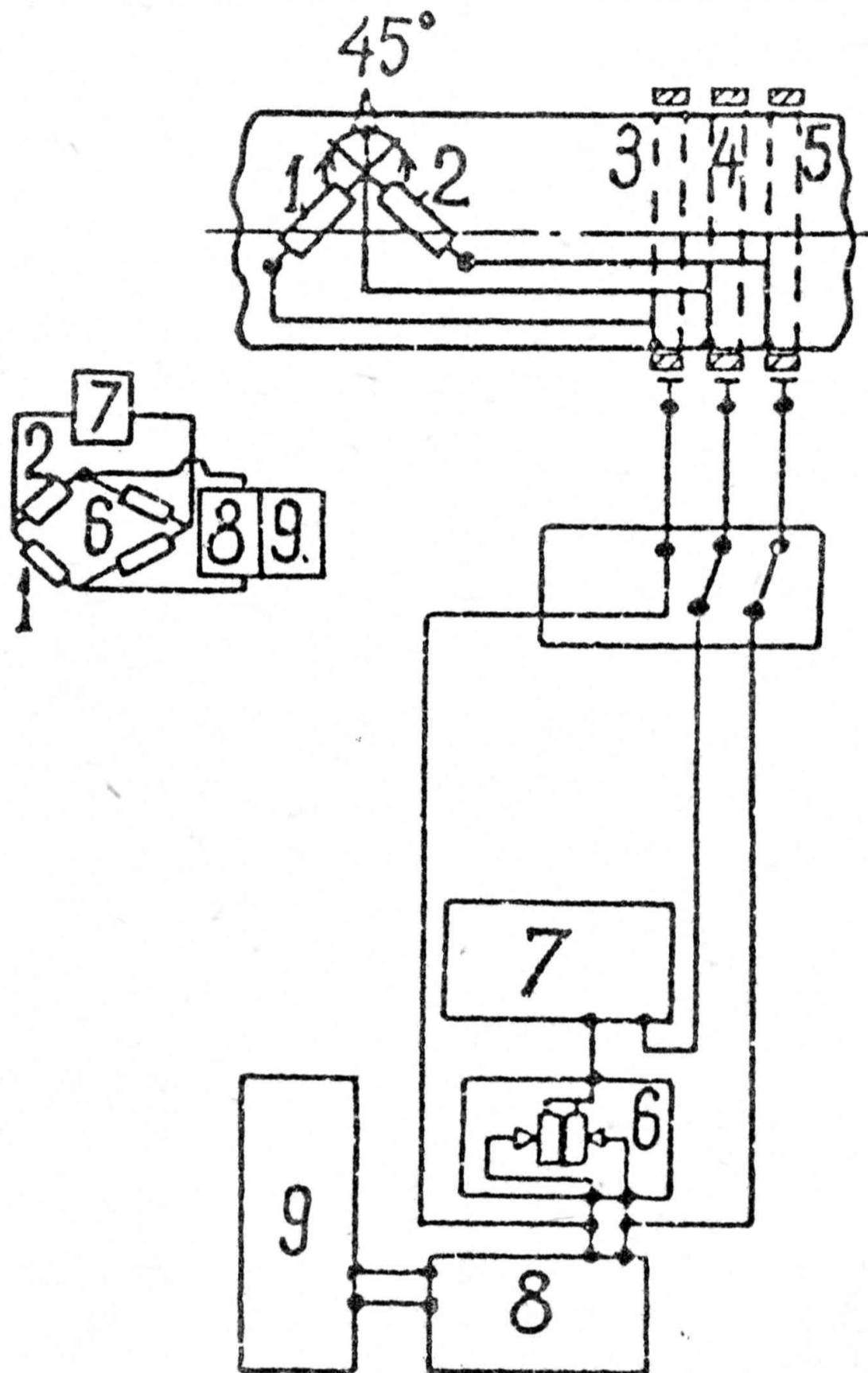


Рис.3. Схема включения проволочных тензорезисторов: 1, 2 - тензорезисторы; 3, 4 и 5 - контактные кольца; 6 - регулируемые сопротивления; 7 - генератор несущей частоты; 8 - усилитель; 9 - шлейфный осциллограф

Принцип тензометрирования заключается в следующем.

Чтобы получить электрический сигнал, пропорциональный изменению сопротивления, через это сопротивление должен быть пропущен электрический ток или к нему должно быть подведено электрическое напряжение. Если, например, запитать тензорезистор постоянным током, то изменение его сопротивления приведет к падению напряжения. Для того чтобы фиксировать только это падение, его начальное постоянное значение должно быть сведено к нулю. Это достигается путем

балансировки так называемой мостовой схемы, состоящей из четырех сопротивлений (рис.4). К зажимам 1, 3 моста подается напряжение питания  $U_{\Pi}$ , на зажимах 2 и 4 появляется выходное напряжение  $U$ . Если  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4$  сопротивления моста, то указанные напряжения будут связаны зависимостью

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

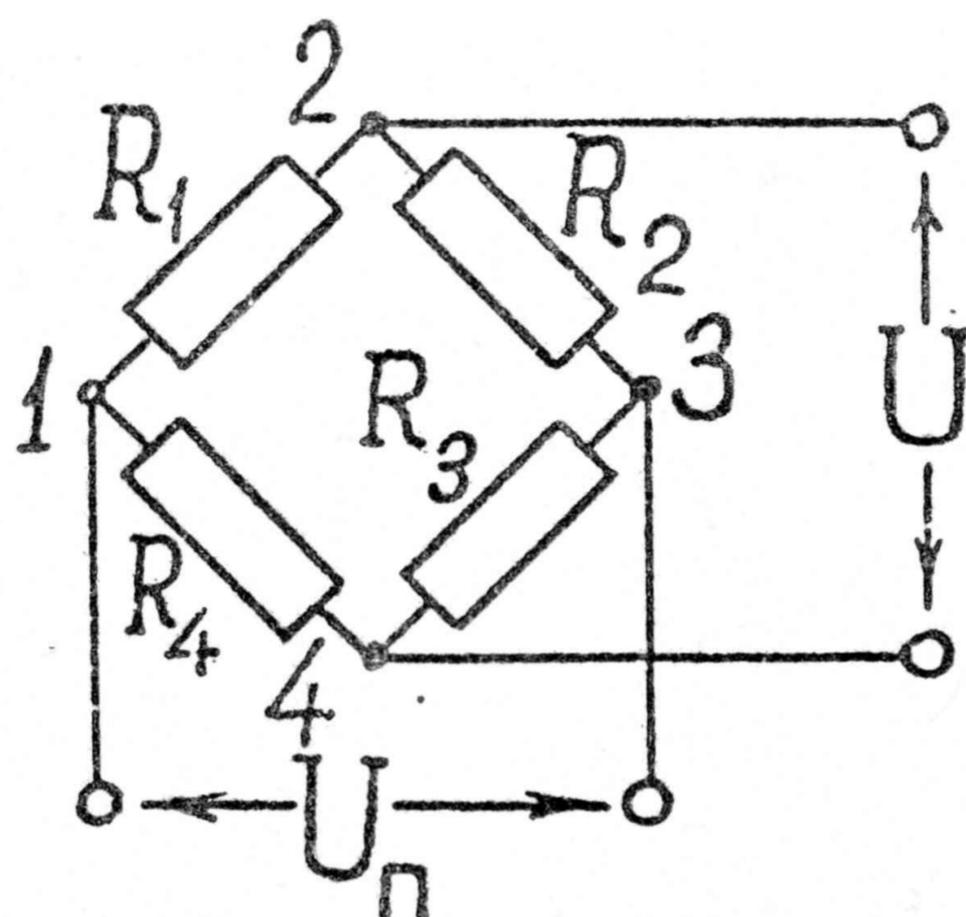


Рис.4. Электрический мост деформаций

Если все сопротивления моста равны, то  $U / U_{\Pi} = 0$ , т.е. мост будет сбалансирован. Теперь представим ситуацию, когда одно или несколько сопротивлений моста изменили свою величину. Это приведет к изменению напряжения на выходе, которое будет пропорционально алгебраической сумме относительных деформаций активных сопротивлений. В зависимости от числа активных сопротивлений различают:

- четвертьмост, который имеет одно активное сопротивление  $R_1$ ;
- полумост, имеющий два активных сопротивления, которые одинаково изменяются, т.е.  $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ ;
- полный мост, у которого все сопротивления активные, причем  $\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4$ .

Выходное напряжение тензометрического моста можно связать с коэффициентом тензочувствительности и относительной деформацией проводника. Эта связь для полного моста имеет вид  $U / U_{\Pi} = k\varepsilon$ . Аналогично для полумоста  $U / U_{\Pi} = k\varepsilon / 2$ , а для четвертьмоста

$U / U_{\Pi} = k \epsilon / 4$ . Другими словами, при прочих равных условиях выходное напряжение полного моста будет в четыре раза больше, чем у четвертьмоста. Значит чувствительность полного моста будет наибольшей.

Чувствительность тензометрирования связана также с ориентацией тензорезисторов на поверхности вала. Из курса сопротивления материалов следует, что при кручении вала наибольшие касательные напряжения действуют по площадкам, ориентированным под углом 45 или 135° к оси вращения. Следовательно, при записи крутильных колебаний тензорезисторы будут давать наибольшую чувствительность, если их располагать под углами, указанными выше. В этом случае деформация тензорезистора равна

$$\epsilon = \pm \frac{Md}{2GI_p},$$

где  $M$  - крутящий момент;  $d$  - диаметр вала;  $G$  - модуль сдвига;  $I_p$  - полярный момент сопротивления сечения.

Противоположные знаки для  $\epsilon$  определяются соответственно углами 45 и 135°. Они создают преимущества при включении тензорезисторов в полумостовую схему так, как показано на рис.3.

Для запитки измерительной цепи и регистрации падения напряжения служат тензостанции. Среди отечественных приборов чаще всего применяют усилитель 8АНЧ-7м, который позволяет замерять одновременно до восьми независимых колебательных процессов. Напряжение питания моста 7 В. Внешний измерительный контур - полумост. Предусмотрена возможность балансировки моста до 0,3% от исходного сопротивления тензорезистора.

Запись процесса падения напряжений осуществляется осциллографом. Например, светолучевой осциллограф Н105 позволяет одновременно записывать 12 процессов на фотоленту УФ, не требующую химического проявления. Кроме того, предусмотрена возможность фиксации временных отметок линяющего типа с различными интервалами в секундах.

### 3. Тарировка тензометрической аппаратуры

После размещения тензорезисторов и сборки измерительной сети выполняют ее тарировку. Под тарировкой понимают метрологическую операцию, при которой ординатам осцилограммы придаются числовые значения.

вые значения, выраженные в единицах механических напряжений, например, МПа.

Чаще всего тарировку тензометрической аппаратуры выполняют по известной деформации упругого элемента. Для этой цели изготавливают специальное тарировочное устройство, представляющее собой вал длиной примерно 200 мм и диаметром 20 мм. Один конец вала жестко защемляют, а к другому прикладывают посредством рычага и грузов скручивающий этот вал момент. На тарировочный вал наклеивают тензорезисторы, размещение и включение которых строго соответствует основной измерительной цепи. Тензорезисторы для тарировочного и испытываемого валов всегда берут из одной партии.

Тарировка измерительной цепи производится непосредственно до и после испытаний. Переключать измерительные цепи удается оперативно с помощью специального прибора переключателя тензодатчиков, например, ГП-3. По результатам тарировки определяется масштаб записи тензометрической аппаратуры

$$k_t = \tau_T / h_T,$$

где  $h_T$  - отклонение луча на фотоленте осциллографа, мм;  $\tau_T$  - касательные напряжения в тарировочном вале, МПа.

Указанные напряжения подсчитываются в функции величины груза  $P$  (Н), длины рычага  $l$  (м) и полярного момента сопротивления кручения тарировочного вала  $W_p$  ( $\text{м}^3$ ) по формуле

$$\tau_T = Pl / W_p.$$

При наличии в установке тормозного устройства или прибора, фиксирующего крутящий момент, тарировку измерительной цепи можно не производить. В этом случае напряжения определяются непосредственно для испытываемого вала:

$$\tau = M / W_p.$$

Иногда крутящий момент валопровода судовой энергетической установки вычисляют по известной формуле

$$M = N_e / \omega,$$

где  $N_e$  - мощность, передаваемая валом;  $\omega$  - угловая скорость вращения вала.

Помимо рассмотренного способа известна тарировка по величине приращения сопротивления. Суть этого способа заключается в том, что на вход тензостанции подключают конкретное сопротивление, величи-

на которого может меняться в известных пределах. В качестве эталона используют магазин сопротивлений. Таким образом, осциллограф фиксирует величину изменения сопротивления, с которой измеряемая деформация связана посредством коэффициента тензочувствительности, т.е.  $\varepsilon = k\varepsilon_R$ .

Рассмотренные способы тарировки тензометрической аппаратуры являются статическими. В отличие от них динамическая тарировка учитывает отклонение луча осциллографа от деформации при различных частотах колебательного процесса. При динамической тарировкенимаются частотно-фазовые характеристики аппаратуры. Установлено, если частота крутильных колебаний не превышает 200 Гц, то результаты статической и динамической тарировки практически совпадают.

#### 4. Запись и анализ крутильных колебаний

После размещения тензорезисторов, их включения в мостовую схему, проверки измерительной цепи и тарировки тензометрической аппаратуры осуществляется торсиографирование вала. Осцилограммы записываются при медленном изменении частоты вращения коленчатого вала от минимально устойчивых до максимальных и обратно.

По полученной непрерывной записи крутильных колебаний строится график развития амплитуд напряжений. Для иллюстрации на рис.5 представлен такой график для промежуточного вала одного судна. Из графика следует, что резонанс крутильных колебаний наблюдается при частоте вращения коленчатого вала 138 мин<sup>-1</sup> (точка 3). Запись колебаний на этой частоте вращения показана на рис.6, где дополнительно отмечены точки А, В и С - отметки оборотов, полученные от индукционного датчика, который размещается в непосредственной близости от вращающего вала и подключается к осциллографу; вертикальные линии - временные отметки с интервалом 0,1 с.

Обработка осцилограмм предусматривает выполнение следующих операций для каждого цикла в отдельности. За цикл обычно принимают участок записи, равный двум оборотам коленчатого вала.

Первая операция - определение частоты вращения коленчатого вала двигателя. Алгоритм этой операции покажем на примере упомянутой выше записи крутильных колебаний (см.рис.6). Расстояние между отметками оборотов составляет 54,4 мм. Интервалу времени 0,1 с соответствует отрезок осцилограммы, равный 12,5 мм. Следовательно,

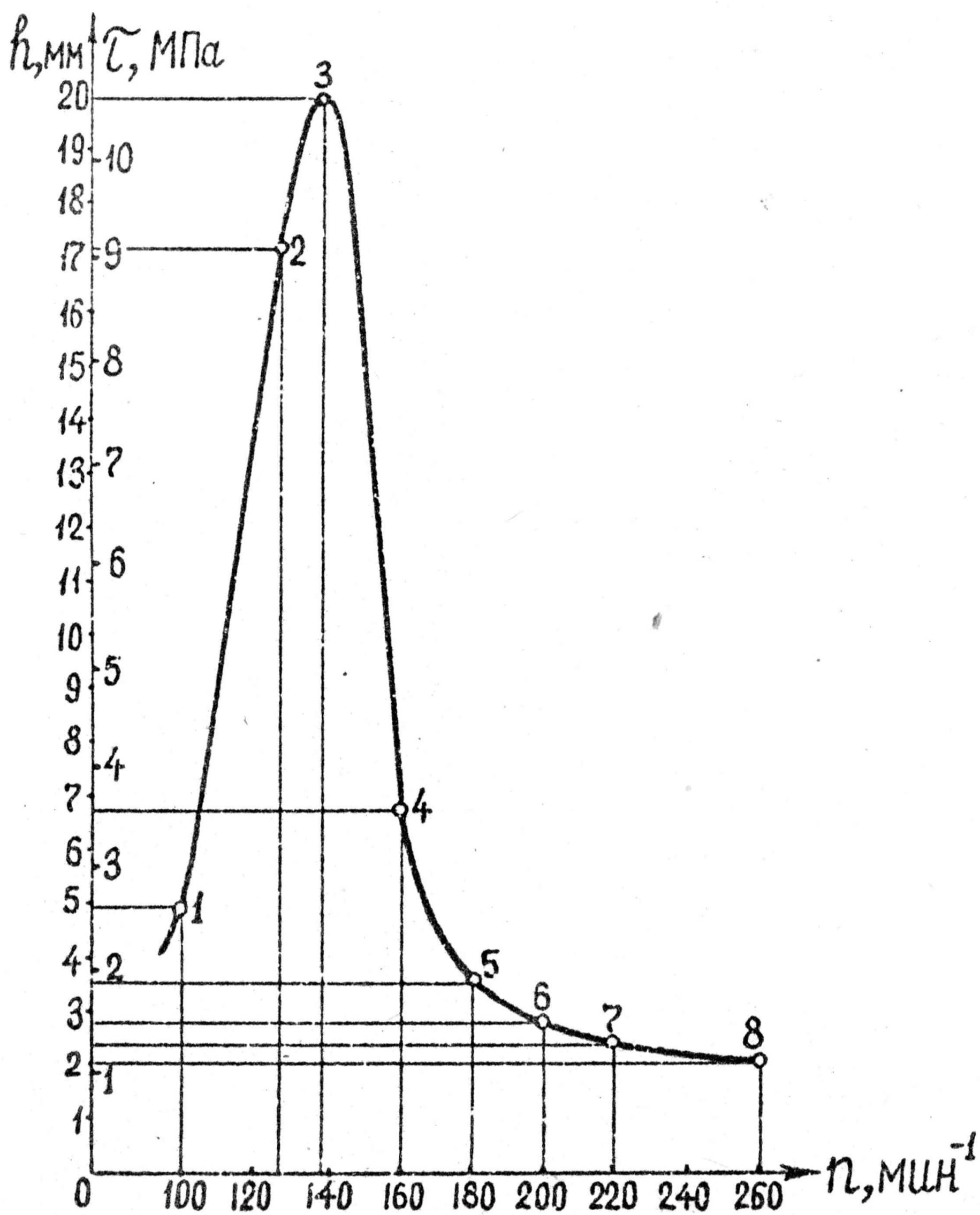


Рис.5. График развития амплитуд напряжений в сечении вала

время одного оборота коленчатого вала будет равно

$$54,4 / 12,5 \cdot 0,1 = 0,453 \text{ с.}$$

Частота вращения коленчатого вала

$$n = 60 / 0,435 = 138 \text{ мин}^{-1}.$$

Следующая операция - определение частоты вынужденных крутильных колебаний. Обычно эту частоту представляют в виде порядка гармонической составляющей колебательного процесса. Под порядком

понимают отношение периода одного оборота коленчатого вала двигателя к периоду гармоники. Другими словами, порядок показывает, сколько полных колебаний совершают вал за время одного оборота коленчатого вала. Из рассматриваемой записи следует, что порядок гармоники  $v = 4$ . Таким образом, частота вынужденных колебаний исследуемого вала

$$N_v = v n = 4 \cdot 138 = 552 \text{ мин}^{-1}.$$

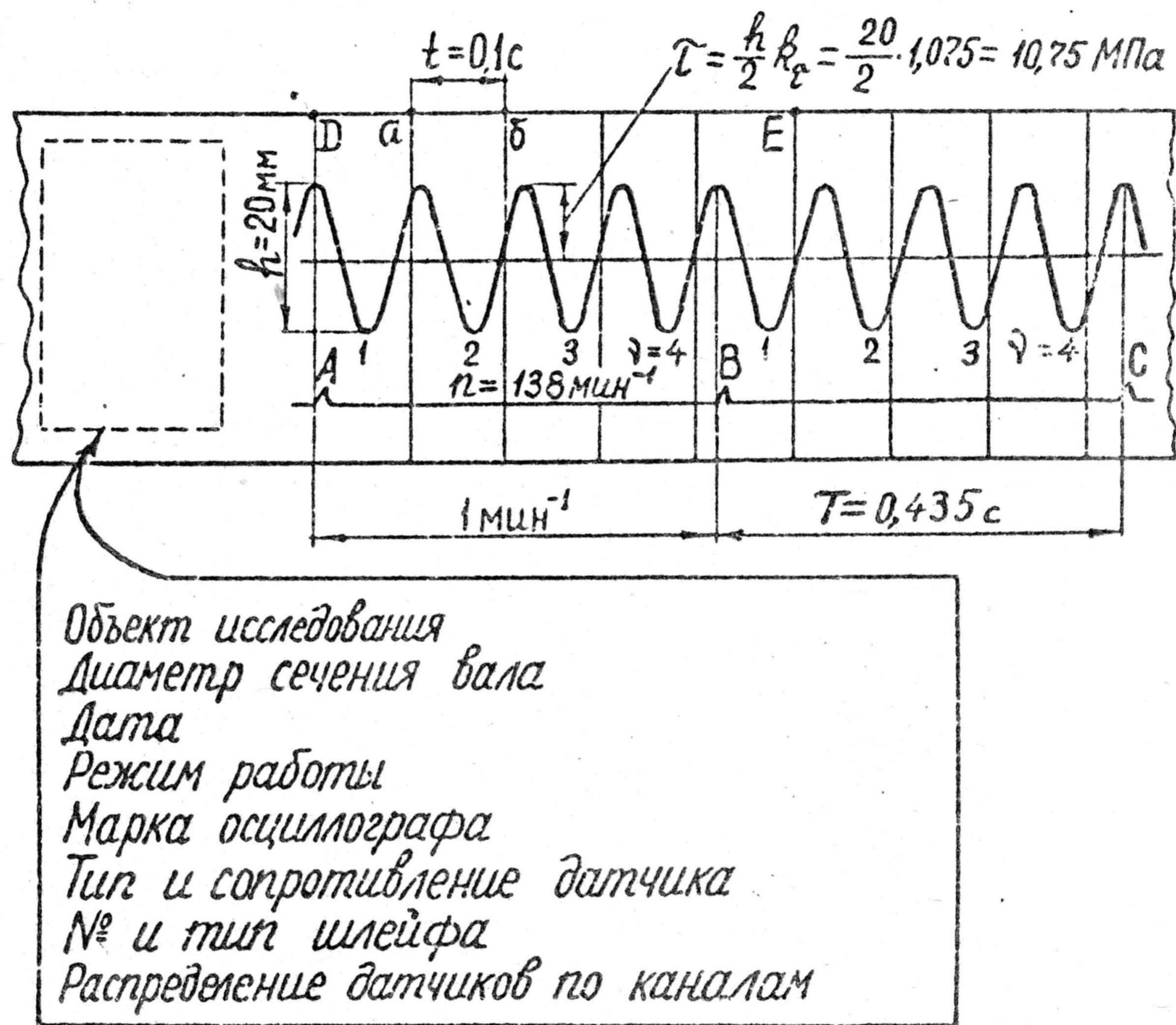


Рис.6. Пример записи крутильных колебаний при резонансной частоте вращения вала

Заключительная операция обработки записи колебаний сводится к определению касательных напряжений в сечении вала, где размещены тензорезисторы. Предварительно устанавливается масштаб записи. На рис.7 показана осциллограмма тарировки тензометрической аппаратуры. Из нее следует: отклонение луча осциллографа  $h_T = 26,5 \text{ мм}$ , напряжение в тарировочном вале  $\tau_T = 28,5 \text{ МПа}$ , следовательно:

$$k_T = 28,5 / 26,5 = 1,075 \text{ МПа/мм.}$$

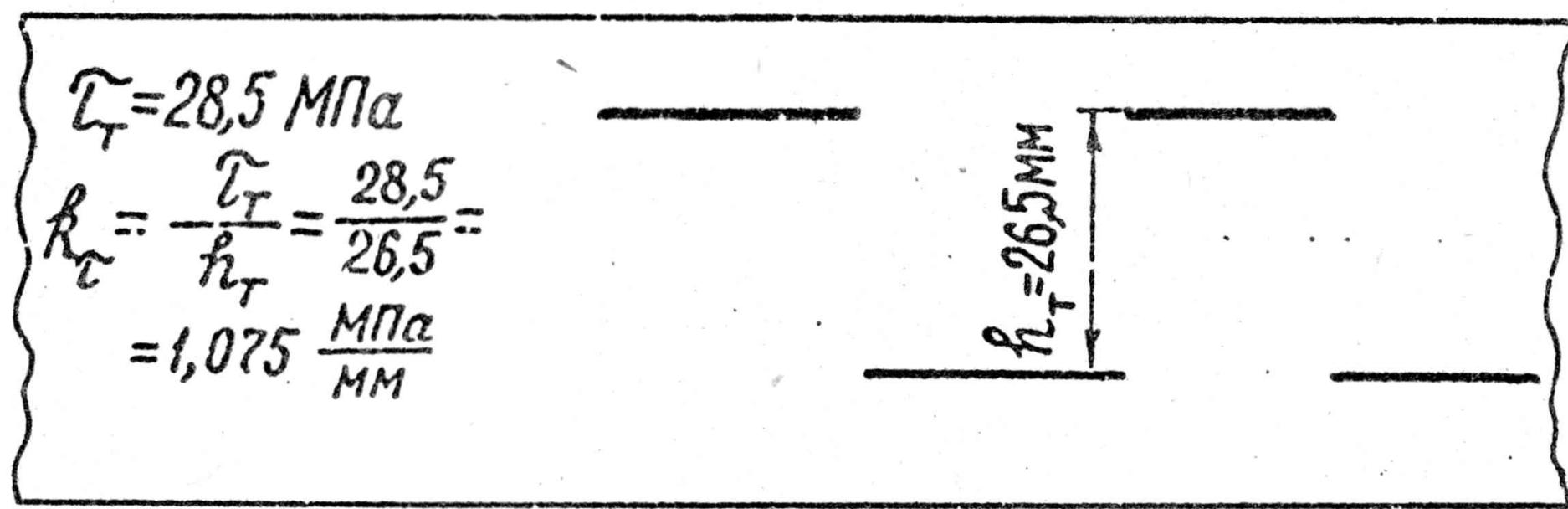


Рис.7. Отклонение тарировочной метки на ленте осциллографа

Далее замеряется размах колебаний на осцилограмме основной записи колебательного процесса. Величина размаха  $h = 20$  мм. Таким образом, амплитудное значение напряжений от кручильных колебаний в исследуемом сечении валопровода определяется по формуле

$$\tau = \frac{h}{2} \cdot \tau_T = \frac{20}{2} \cdot 1,075 = 10,75 \text{ МПа.}$$

Аналогичным способом производится обработка всех остальных участков осцилограммы колебательного процесса. Полученные в результате обработки напряжения сводят в таблицу, подобную приведенной.

#### Определение амплитуд напряжений в сечении вала при различных частотах вращения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
$n$ , мин <sup>-1</sup>	100	126	138	160	180	200	220	260
$h$ , мм	4,9	17	20	6,7	3,5	2,8	2,4	2
$\tau$ , МПа	2,63	9,14	10,75	3,6	1,88	1,51	1,29	1,08

## 5. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Подготовить тензометрическую аппаратуру и тарировочное устройство для работы.
2. Запустить двигатель, прогреть его и проверить измерительную цепь.
3. Произвести тарировку тензометрической аппаратуры и измерительной цепи. По результатам тарировки построить график зависимости отклонения луча осциллографа от напряжения.
4. Осуществить запись колебательного процесса при медленном изменении частоты вращения коленчатого вала от минимальных до максимальных и обратно.
5. Проверить качество записи и в случае необходимости повторить п.4.
6. Разделить осциллограмму на циклы.
7. Каждый цикл подвергнуть обработке в полном соответствии с изложенным выше алгоритмом.
8. По результатам обработки осциллограмм построить график развития амплитуд напряжений в исследуемом сечении вала.
9. По Правилам Морского Регистра судоходства России подсчитать величину допускаемых напряжений и сравнить ее с экспериментально замеренными напряжениями.
10. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен включать в себя:
  - описание и основные данные тензометрической аппаратуры, токсъемного и тарировочного устройств, тензорезисторов;
  - описание экспериментальной установки;
  - результаты тарировки тензометрической аппаратуры и измерительной цепи;
  - фрагменты записей крутильных колебаний валопровода;
  - результаты обработки осциллограмм;
  - заключение о степени опасности напряжений от крутильных колебаний.

## Литература

1. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами. Перевод с немецкого под редакцией Я.В.Малкова. М.: Мир, 1974, 285 с.

2. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие/Под ред. Р.А.Макарова. М.: Машиностроение, 1975, 287 с.
3. Дайчик М.Л., Пригородский Н.И., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник. М.: Машиностроение, 1989, 240 с.
4. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний. ГНТИ МЛ. М.: 1948, 252 с.

## Оглавление

1. Цель измерения крутильных колебаний .....	3
2. Способы измерений крутильных колебаний .....	3
3. Тарировка тензометрической аппаратуры .....	8
4. Запись и анализ крутильных колебаний .....	10
5. Порядок выполнения лабораторной работы .....	14
Литература .....	14