

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод»

## **ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ГИДРОПНЕВМОСИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-36 01 07  
«Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск  
БНТУ  
2024

УДК 62-82+62-85(075.8)

ББК 34.447я7

И88

**А в т о р ы:**

*Л. Г. Филипова, И. А. Маковская,*

*В. А. Сокол, Я. А. Чикилевский*

**Р е ц е н з е н т ы:**

заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили» УО БГАТУ,

канд. техн. наук, доцент *Г. И. Гедроить;*

начальник сектора мобильной гидравлики ИП «Линтера ТехСервис»

канд. техн. наук *Е. М. Заболоцкий*

**Исследования** и испытания гидропневмосистем : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» / Л. Г. Филипова [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – 57 с.

ISBN 978-985-583-965-2.

В учебно-методическом пособии освещены вопросы устройства и принципа действия измерительно-регистрирующей аппаратуры, применяемой при исследовании гидропневмосистем мобильных и технологических машин. Приведено описание лабораторных установок и изложены методики испытаний, которые используются при выполнении лабораторных работ.

УДК 62-82+62-85(075.8)

ББК 34.447я7

ISBN 978-985-583-965-2

© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ .....	4
Лабораторная работа № 1. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ И СПОСОБЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ.....	5
Лабораторная работа № 2. ТАРИРОВКА ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ....	14
Лабораторная работа № 3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ .....	20
Лабораторная работа № 4. ТАРИРОВКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ .....	28
Лабораторная работа № 5. ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА (ТАХОГЕНЕРАТОРА) .....	33
Лабораторная работа № 6. ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ТУРБИННОГО ТИПА.....	40
Лабораторная работа № 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРМОЗНОГО КРАНА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА .....	45
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА ДВУХСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ НА ШТОКЕ .....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	57

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ каждый студент обязан строго соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Включение измерительно-регистрирующего прибора в электросеть следует производить только в присутствии преподавателя (лаборанта).

2. При обнаружении неисправностей приборов необходимо немедленно прекратить работу и доложить об этом руководителю.

3. В случае перерыва в работе прибор должен отключаться от источника электропитания.

4. Устранять обнаруженные неисправности необходимо под наблюдением руководителя занятий.

5. Запрещается бесцельно крутить ручки управления приборов, нажимать кнопки, снимать крышки люков приборов.

6. По окончании работы следует обесточить потребителей тока, выключить тумблеры электроприборов.

### 7. КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

– пользоваться неисправными приборами и инструментом;  
– прикасаться руками к оголенным проводам и токонесущим частям, находящимся под напряжением;

– оставлять без присмотра включенные электроприборы и оборудование;

– выполнять на работающих приборах регулирование, наладку, смазочные и другие работы без выключения их и полной остановки вращающихся деталей.

8. В случае травмы следует немедленно выключить прибор (установку), вызвать при необходимости врача и до его прихода оказать помощь пострадавшему.

## Лабораторная работа № 1

### ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ И СПОСОБЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

#### Цель работы

Изучить тензорезисторы различных типов, способы их наклеивания и тарировки.

#### Общие сведения

Тензорезисторы представляют собой резисторы, сопротивление которых изменяется в зависимости от деформации под действием внешних факторов. Работа тензорезисторов основана на явлении тензоэффекта: изменении сопротивления проводников при их механической деформации [1]. Тензорезисторы бывают проволочные, фольговые и полупроводниковые.

Геометрические размеры тензорезисторов первых двух типов изменяются при их деформации. Основную роль в образовании электрического сигнала в полупроводниковых тензорезисторах играет изменение их удельного сопротивления под действием механической нагрузки.

Чувствительность как механических, так и полупроводниковых тензорезисторов оценивается коэффициентом тензочувствительности  $k$ , определяемым тензоэффектом:

$$k = 1 + 2\mu + \nu = \frac{(\Delta R/R)}{(\Delta l/l)}, \quad (1.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\nu$  – коэффициент изменения удельного сопротивления проводника;

$\Delta R$  – приращение сопротивления проводника;

$R$  – сопротивление проводника;

$\Delta l$  – приращение (уменьшение или увеличение) геометрических параметров проводника;

$l$  – длина проводника.

Проволочный тензорезистор (рис. 1.1, *a*) представляет собой решетку из проволоки  $l$  диаметром 0,02–0,05 мм, наклеенную на основу 2 из тонкой бумаги или лаковой пленки 3.

В качестве материала для проволоки чаще всего используется константан, характеризующийся достаточно большим коэффициентом тензочувствительности  $k$  и малым температурным коэффициентом сопротивления.

Проволочные тензорезисторы выполняют базой (длиной петли  $l_6 = 5–30$  мм). Коэффициент тензочувствительности проволочных тензорезисторов, выполненных из константановой проволоки, равен  $k = 2 \pm 0,2$ , номинальный рабочий ток –  $I \approx 0,3$  мА, максимальная деформация не должна превышать 0,3 %.

Примеры условного обозначения проволочного тензорезистора: 2 ПКП-5-50 Г; 2 ПКБ-20-200Х. Первая буква (П) указывает, что решетка выполнена из проволоки; вторая буква (К) – константан (материал проволоки); третья (Б или П) – материал основы (бумага или пленка); цифры указывают длину базы и номинальное сопротивление решетки; последняя буква (Г или Х) – температуру наклейки (Х – не более 30 °С, Г – не более 180 °С).

Влияние на тензочувствительность датчика оказывают расстояние между витками ( $b$ ) и длина витков ( $l_6$ ).

Фольговый тензорезистор (рис. 1.1, *б*), в отличие от проволочного, имеет решетку из полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4–12 мкм, которые наносят на лаковую основу.

Благодаря большой площади контакта полосок с объектом измерения теплоотдача фольгового тензорезистора значительно выше, чем проволочного, что позволяет увеличить силу тока, протекающего через тензорезистор, до 0,5 мА и тем самым повысить чувствительность измерительной схемы.

Другим преимуществом фольговых тензорезисторов является возможность изготовления решеток сложного профиля, которые в наибольшей степени удовлетворяют условиям измерений.

Прямоугольные решетки (рис. 1.1, *б*) наиболее подходят для измерения линейных деформаций, розеточные (рис. 1.1, *в*) – крутящих моментов на круглых валах, а мембранные (рис. 1.1, *г*) – для наклейки на мембраны.

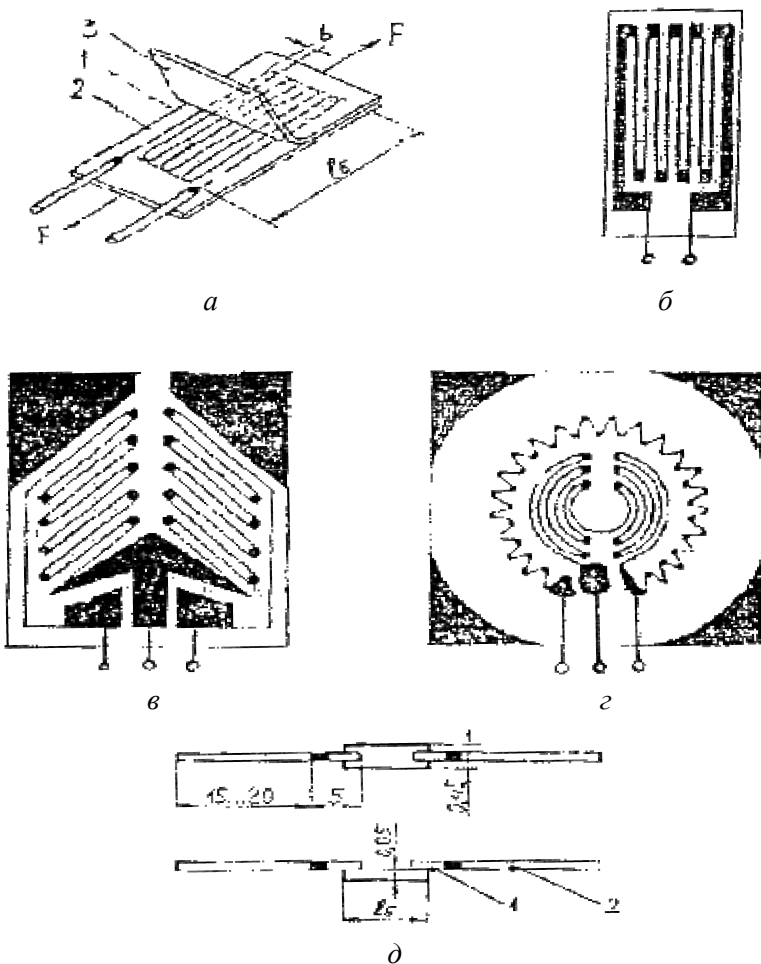


Рис. 1.1. Конструкции разных типов тензорезисторов

Примеры обозначений фольговых тензорезисторов: 2 ФКПА-10-100 X; 2 ФКПБ-5-50 Г; 2 ФКМВ-30-200 Г. Первая буква указывает тип тензорезистора (Ф – фольговый); вторая – материал решетки (К – константан); третья – тип тензорезистора (П – прямоугольный; Р – розеточный; М – мембранный); четвертая (А, Б, В, Г, Д) – принадлежность тензорезистора к подгруппе. Остальные цифры и буквы по-

казывают то же, что и в условном обозначении проволочных тензорезисторов. В обозначении мембранных тензорезисторов вместо длины базы указывается диаметр тензорезистора в миллиметрах.

Полупроводниковый тензорезистор (рис. 1.1, *д*) представляет собой тонкую полоску из полупроводникового материала с проводимостью *n*- и *p*-типа. Из полупроводникового материала в основном используют кремний и германий, отличающиеся высокой тензочувствительностью, химической инертностью, выдерживают нагрев до 500–540 °С.

Тензоэффект при растяжении полупроводника *n*-типа отрицательный, а *p*-типа – положительный. Тензорезисторы типа КТД имеют *p*-проводимость, а типа КТЭ – *n*-проводимость. Выводы таких тензорезисторов имеют два участка (рис. 1.1, *д*). Полоска 1 из золота служит для соединения с материалом полупроводника, а с помощью полоски 2 (из меди) осуществляется монтаж измерительных схем.

Коэффициент тензочувствительности указанных тензорезисторов –  $k = 120 \pm 20$ , номинальный ток –  $I = 15$  мА, диапазон рабочих температур – 160–300 °С.

Преимущества полупроводниковых тензорезисторов по сравнению с проволочными и фольговыми заключаются в том, что чувствительность их при меньших размерах в 50–60 раз превышает чувствительность проволочных, а высокий уровень выходного сигнала позволяет проводить запись без использования усилителя. К недостаткам следует отнести их малую механическую прочность и гибкость, высокую чувствительность к внешним факторам (температуре, освещению и т. п.).

На детали тензорезистор должен быть ориентирован так, чтобы нити решетки вдоль его чувствительной оси подвергались максимальному растяжению или сжатию, т. е. ось базы тензорезистора должна совпадать с осью главной деформации. Тензорезисторы с одинаковыми знаками приращения сопротивлений должны включаться в противоположные плечи моста, а с различными – в смежные.

На точность измерений существенно влияет температура детали, на которую наклеен тензорезистор. Для компенсации дополнительной температурной погрешности рабочего плеча тензомоста используют тензорезистор соседнего плеча. Этот тензорезистор наклеи-



вают на находящуюся рядом и работающую в тех же температурных условиях недеформированную деталь, но ориентируют его так, чтобы он не подвергался деформации. Если два (или четыре) смежных плеча являются рабочими, компенсация температурной погрешности происходит автоматически.

Рациональные схемы наклейки тензорезисторов показаны на рисунке 1.2.

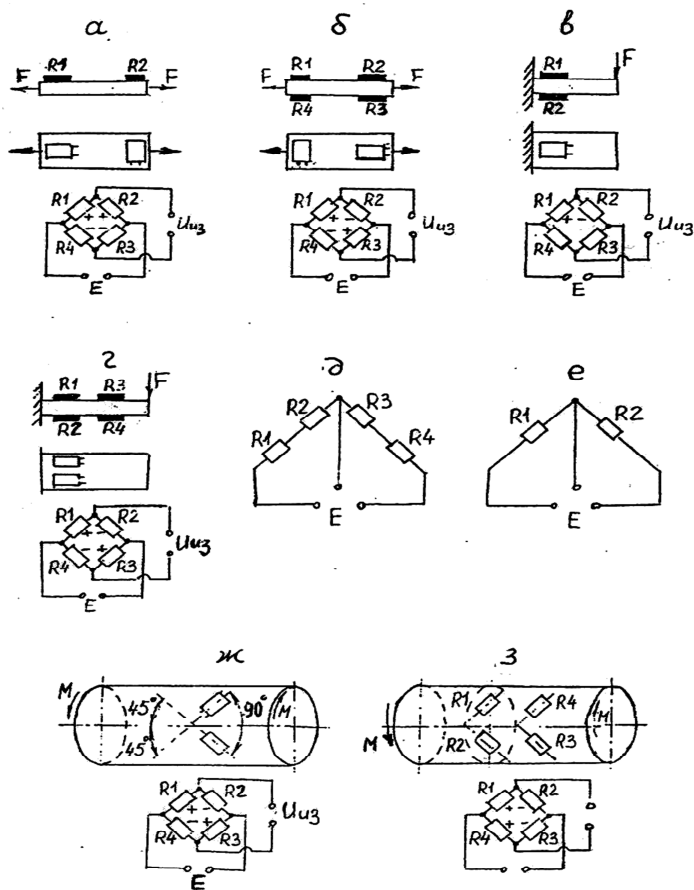


Рис. 1.2. Схемы расположения тензорезисторов на испытываемых деталях

При одном рабочем плече  $R1$  (рис. 1.2, *a*) термокомпенсационный тензорезистор  $R2$  наклеивают перпендикулярно к направлению действия растягивающей (сжимающей) силы  $F$ . Кроме температурной погрешности при таком расположении тензорезисторов компенсируются также потери тензочувствительности рабочего плеча, возникающие из-за поперечных деформаций решетки тензорезистора. Недостатком данной схемы является и минимальная чувствительность. Кроме того, в случае эксцентричного приложения нагрузки, деталь изгибается и тензорезистор  $R1$  подвергается растяжению и изгибу.

Схема на рисунке 1.2, *б* характеризуется вдвое большей чувствительностью и полной компенсацией температурной погрешности. Эта схема нечувствительна к изгибу детали, так как относительные приращения сопротивлений тензорезисторов  $R1$  и  $R2$  противоположных плеч одинаковы по значению, но имеют противоположные знаки.

В схеме на рисунке 1.2, *в* для измерения деформаций при изгибе тензорезистор  $R1$  наклеен на растягиваемые волокна детали, а  $R2$  – на сжимаемые. Схема имеет вдвое большую чувствительность, чем схема с одним рабочим плечом. В ней полностью компенсируется температурная погрешность и исключается влияние деформации растяжения-сжатия.

Схема на рисунке 1.2, *г* обладает вдвое большей чувствительностью, чем предыдущая. Она применяется, когда имеется возможность наклеить четыре тензорезистора и включить их в мостовую схему.

В тех случаях, когда аппаратура, с которой работают тензорезисторы, рассчитана на подключение полумоста, два тензорезистора подключают в полумост по схеме, приведенной на рисунке 1.2, *е*, четыре тензорезистора – на рисунке 1.2, *д*.

При измерении крутящих моментов на валах схема, показанная на рисунке 1.2, *ж*, является наиболее простой, широко применяется в практике тензометрирования. Оба тензорезистора находятся в непосредственной близости друг от друга, а их продольные оси расположены в направлениях главных деформаций. Данная схема позволяет осуществлять полную компенсацию температурной погрешности и исключает влияние осевой нагрузки. При действии на вал изгибающего момента деформации обоих тензорезисторов будут различаться по значению и знаку, что вызовет появление на выходе тензомоста сигнала. Поэтому данная схема наклейки тензорезисто-

ров пригодна только в тех случаях, когда вал не подвергается действию изгибающего момента.

На рисунке 1.2, з четыре рабочих тензорезистора наклеены по окружности вала строго симметрично друг другу, а деформации диаметрально противоположных тензорезисторов имеют одинаковые знаки. Это обуславливает в два раза большую чувствительность схемы, чем на рисунке 1.2, ж, полную компенсацию температурной погрешности, а также исключение влияния осевой силы и изгибающего момента.

### ***Наклеивание тензорезисторов***

Наклеивание тензорезисторов на испытываемую деталь – процесс, требующий точности и аккуратности при выполнении отдельных технологических операций. Технологический процесс наклейки тензорезисторов состоит из следующих операций:

- выбора и проверки тензорезисторов;
- подготовки поверхности детали;
- выбора клея и составления клеевой композиции;
- непосредственной наклейки тензорезисторов на деталь;
- термообработки наклеенных тензорезисторов;
- контроля качества наклейки;
- герметизации наклеенных тензорезисторов.

Тип применяемых тензорезисторов, их конфигурация, геометрические размеры и сопротивление зависят от размеров и формы испытываемой детали, вида и характера измеряемой деформации. Каждый тензорезистор из числа отобранных подвергают осмотру и проверке. Затем измеряют сопротивление тензорезисторов и группируют их по минимальному разбросу.

Наиболее ответственными операциями являются подготовка поверхности детали, на которую наклеиваются тензорезисторы, обеспечение чистоты склеиваемых поверхностей и используемых химикатов.

Поверхность детали в месте наклейки тензорезисторов шлифуют до шероховатости  $Ra = 2,5-1,25$  мкм наждачной бумагой № 8–12. Полированные поверхности также шлифуют.

Поверхности детали и тензорезисторов обезжиривают ацетоном, а затем 96 % этиловым спиртом. Подготовленную для наклейки де-

таль обычно нагревают до температуры 50–70 °С (в зависимости от применяемого клея).

Для приклеивания тензорезисторов применяют клеи: ацетоноцеллулоидный, бутварофенолформальдегидный БФ-2, эпоксидный Д86, цеакриновый;

Высокотемпературные: В-12; В-15; В-58. Лаки: финилфлексовые ВЛ-7; ВЛ-9; ВЛ-931.

Цементы: высокотемпературный, кремний-органический Ц7-165-32; термоцемент Б-56.

Сначала на детали делают разметку схемы наклейки тензорезисторов (размещают тензорезисторы на испытуемой детали таким образом, чтобы при деформации последней решетка тензорезистора растягивалась или сжималась). Технология наклейки зависит от типа детали, вида основы тензорезистора и от применяемого клея.

Убедившись, что тензорезисторы надежно приклеены к испытуемой детали, соединяют (спаивают) их контактные выводы в мостовую или полумостовую схему (рис. 1.2, *д*, *е*) для подключения к тензоусилителю или измерительному прибору.

После наклейки и соединения их выходных контактов тензорезисторы защищают от действия влаги, теплоты и механических повреждений. В качестве гидроизоляции используют различные мастики: эпоксидную смолу; клеи 88; ГМН-301 или лак 1201 с наполнителем. Гидроизоляцию наносят по мере ее высыхания слоями толщиной до 2–3 мм. Затем место наклейки закрывают фетром, забинтовывают и закрашивают краской.

Для устранения местных напряжений из-за неравномерности высыхания клея под основой тензорезистора последний подвергают «тренировочной работе», прикладывая несколько раз к детали циклическую нагрузку, значение которой изменяется от нулевого до максимального.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Определение тензорезисторов и коэффициент их чувствительности.
3. Схематическое изображение тензорезисторов разных типов.
4. Схемы расположения тензорезисторов на испытуемых деталях.

5. Порядок наклеивания тензорезисторов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое тензорезистор?
2. На чем основана работа тензорезисторов?
3. Как оценивается чувствительность тензорезисторов?
4. Что представляет собой проволочный тензорезистор?
5. Как изготавливают фольговые тензорезисторы?
6. Какими преимуществами обладают фольговые тензорезисторы по сравнению с проволочными?
7. Как устроен полупроводниковый тензорезистор?
8. Какие преимущества и недостатки присущи полупроводниковым тензорезисторам?
9. Какова последовательность процесса наклейки тензорезисторов?

## Лабораторная работа № 2

### ТАРИРОВКА ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

#### Цель работы

1. Провести тарировку тензорезистора.
2. Построить график зависимости отклонения пластины от силы тока  $h = f(I)$ .
3. Провести оценку погрешности результатов измерения.

#### Общие сведения

Тарировка – нахождение функциональной зависимости между измеряемым параметром и выходным сигналом аппаратуры.

Тарировка тензорезисторов осуществляется в комплексе с измерительно-регистрирующей аппаратурой. Она заключается в нахождении функциональной зависимости между нагрузкой, действующей на испытываемую деталь, и выходным сигналом аппаратуры.

Для этого, создавая заранее известные нагрузки на деталь, на которой наклеены тензорезисторы, и сравнивая значения этих нагрузок с интенсивностью выходного сигнала, определяют аналитически или графически их соотношения.

В зависимости от размеров, конфигурации и других особенностей исследуемой детали используют два способа тарировки тензорезисторов: непосредственный и косвенный. Для получения достоверных результатов измерений условия тарировки должны как можно меньше отличаться от условий проведения экспериментальных исследований объектов. Это означает, что схема нагружения детали, состав измерительной системы, условия ее эксплуатации как при тарировке, так и при испытаниях должны быть одинаковыми. Номера каналов, закрепленных за определенными процессами при тарировке, порядок расстановки гальванометров в магнитном блоке осциллографа не должны изменяться в процессе испытаний.

#### *Непосредственная статическая тарировка*

Суть метода состоит в том, что испытываемую деталь нагружают силами или моментами в пределах рабочего диапазона нагрузок

последовательными ступенями (не менее 5) с дальнейшей разгрузкой в том же порядке. На каждой ступени нагружения и разгрузки производят замер изменяемой величины. Для повышения точности тарировочных замеров их повторяют не менее трех раз и находят среднее значение величины.

### ***Косвенная тарировка***

В тех случаях, когда непосредственная тарировка невозможна, прибегают к методу сравнения деформации тарировочной балки с деформацией испытуемой детали. Одну часть измерительного тензомоста наклеивают на испытуемую деталь, а другую – на тарировочную балку, изготовленную из того же материала, что и деталь. При различных деформациях тарировочной балки снимают показания измерителя. Затем, разгрузив балку, нагружают испытуемую деталь и по показаниям измерителя судят о деформациях, возникающих в месте наклейки тензорезисторов.

В процессе проведения эксперимента приходится часто контролировать коэффициент усиления измерительного канала. Он может изменяться при проведении замеров под влиянием различных факторов (колебаний напряжения в питающей сети, температуры окружающей среды и т. д.).

Для анализа коэффициента усиления измерительного канала используют электрическую калибровку тензометрической аппаратуры: на вход усилителя подается напряжение, которое является эквивалентом заранее заданной деформации, воспринимаемой тензорезисторами. Это напряжение принято называть контрольным сигналом. Он может быть образован двумя способами: искусственным разбалансом тензомоста или подачей на вход усилителя напряжения от калиброванного источника. В тензоусилителях наиболее часто используется первый способ. Схема подключения тарировочного тензорезистора ( $RT$ ) показана на рисунке 2.1.

Наличие контрольного сигнала позволяет не только компенсировать возможное изменение коэффициента усиления, но и при необходимости изменять его в процессе проведения замеров.

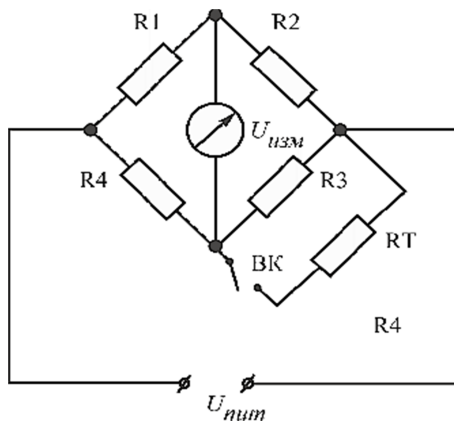


Рис. 2.1. Схема включения тарифовочного резистора

### Схема установки и методика проведения опыта

На рисунке 2.2 показана принципиальная схема установки для тарировки тензорезисторов. Установка содержит металлическую пластину, на поверхности которой наклеены тензорезисторы и соединены электрически в мостовую схему. Тензорезисторы подключены к тензоусилителю, выход которого соединен с измерительно-регистрирующим прибором (ИРП). В качестве ИРП может использоваться миллиамперметр или осциллограф.

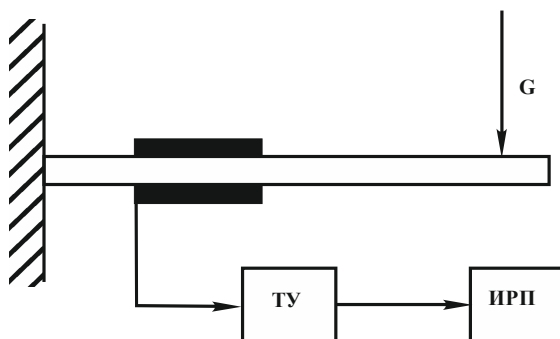


Рис. 2.2. Принципиальная схема установки для тарировки тензорезистора: ТУ – тензометрический усилитель; ИРП – измерительно-регистрирующий прибор



Нагрузка  $G$  на пластину при тарировке задается ступенчато с помощью разновесов (0,01–2 кг). При закручивании винта увеличивается изгиб пластины (5–10 ступеней нагружения). В ходе эксперимента фиксируется микрометром отклонение пластины ( $h$ , мм) и связанная с ним функционально сила тока ( $I$ , мА), которая определяется миллиамперметром.

Для повышения точности тарировочных замеров их повторяют не менее трех раз для каждой ступени нагружения и находят среднее значение величины. Результаты тарировки при нагружении (прямой ход) и разгрузке пластины (обратный ход) заносятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№	Прямой ход				Сила тока $I$ , мА	Обратный ход			
	Отклонение пластины $h$ , мм					Отклонение пластины $h$ , мм			
	1	2	3	Ср. знач.		1	2	3	Ср. знач.
1									

### ***Обработка результатов тарировки преобразователей***

Обработка результатов тарировки преобразователей сводится к нахождению функциональной зависимости между показанием электрического прибора (тока  $I$ , мА) и значением отклонения пластины ( $h$ , мм), а также к определению масштабного коэффициента  $K_m$ , наиболее точно удовлетворяющего всем опытным данным тарировки, и к оценке точности его определения [2].

Обычно зависимость  $h = f(I)$  – линейная, или может быть приведена к этому виду.

Опытные данные тарировки описываются, как правило, нормальным уравнением:

$$\sum h_i I_i - K_m \sum I_i^2 = 0. \quad (2.1)$$

Обработывая опытные данные по методу наименьших квадратов, из уравнения (2.1) получают выражение для масштабного коэффициента:

$$K_M = \sum h_i I_i / \sum I_i^2. \quad (2.2)$$

При этом среднеквадратичная погрешность оценки масштабного коэффициента определяется по формуле

$$\sigma = \pm \left[ \frac{\sum (h_i - K_M I_i)^2}{(n-1) \sum I_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

где  $n$  – общее число замеров.

Приведенная относительная погрешность (в %) оценки масштабного коэффициента определяется зависимостью

$$\delta = \sigma / K_M. \quad (2.4)$$

Для вычисления суммарной погрешности результатов тарировки дополнительно находят погрешность замеров отклонения балки.

Суммарная приведенная относительная погрешность тарировки:

$$\Delta = \delta + \delta_n, \quad (2.5)$$

где  $\delta_n$  – приведенная относительная погрешность показания прибора. Она определяется как отношение цены деления прибора к максимальному значению шкалы его измерения. В данном случае в качестве измерительного прибора берется микрометр, которым измеряется отклонение балки.

Суммарная среднеквадратичная погрешность определения масштабного коэффициента вычисляется по выражению

$$\sigma_\Sigma = \pm 100 \Delta K_M. \quad (2.6)$$

Погрешность определения масштабного коэффициента учитывают при оценке точности обработки результатов испытаний.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема установки для тарировки тензорезисторов.
3. Результаты тарировки и математической обработки полученных данных.
4. Краткий анализ полученных результатов.
5. Тарировочный график.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое тарировка?
2. Как проводится непосредственная статическая тарировка тензорезисторов?
3. Как производится косвенная тарировка тензорезисторов?
4. Что такое контрольный сигнал?
5. Для чего используют контрольный сигнал?
6. Как находится приведенная относительная погрешность прибора?

## Лабораторная работа № 3

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

#### Цель работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия преобразователей неэлектрических величин в электрические.
2. Ознакомиться со схемами подключения преобразователей (датчиков) различных типов к измерительно-регистрирующей аппаратуре.
3. Изучить способы тарирования преобразователей и методику обработки тарировочных данных.

#### Общие сведения

Под преобразователем понимается устройство, предназначенное для первичного преобразования измеряемой неэлектрической величины в связанную с ней функциональную зависимость электрическую величину. Преобразователи классифицируются по различным признакам. По назначению различают преобразователи механических, тепловых, акустических, световых, химических и других величин. При испытаниях гидропневмомашин и гидропневмоприводов наибольшее распространение получили преобразователи механических величин – перемещений, скоростей, ускорений, сил, давлений, напряжений [1].

По принципу преобразования измеряемой неэлектрической величины в электрическую различают генераторные преобразователи, в которых измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в ЭДС или силу тока, и параметрические преобразователи, где неэлектрическая величина обуславливает изменение одного или нескольких параметров электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность, взаимоиндуктивность).

#### *Устройство, принцип действия преобразователей и их включение в электрические цепи*

Для измерения давления рабочей среды (жидкости или газа) часто используют диафрагменные потенциометрические датчики типа

ПЭ–10, ПЭ–15, ПЭ–25 и др. [2]. Схема включения датчика давления в измерительную цепь показана на рисунке 3.1, а. Принцип действия схемы заключается в следующем. При изменении давления  $p_{вх}$  в полости А датчика 1 изменяется соответственно положение диафрагмы 2, и происходит перемещение подвижного контакта 3 по неподвижному 4. Вследствие этого изменяется ток в цепи гальванометра 5 и миллиамперметра 6, что приводит к разбалансировке моста, а следовательно, к изменению положения луча гальванометра и стрелки измерительного прибора. Таким образом, происходит преобразование механической величины (перемещение диафрагмы) в электрическую. Последняя фиксируется с помощью измерительного или регистрирующего прибора в соответствии с изменением давления на входе датчика. Величина сигнала, поступающего на гальванометр 5, регулируется сопротивлением  $R2$ .

Для измерения угловых перемещений на практике часто используются потенциометрические датчики типа МУ-615. Схема включения датчика перемещения в измерительную цепь показана на рисунке 3.1, б. Преобразование механической величины в электрическую происходит следующим образом: при перемещении подвижного контакта 2 датчика 1, кинематически связанного с перемещающейся деталью, по неподвижному 3 происходит изменение тока в цепи гальванометра 4, что приводит к разбалансировке моста, а следовательно и к изменению положения луча гальванометра или стрелки измерительного прибора 5. Таким образом, величина углового перемещения записывается на фотобумагу осциллографа или измеряется стрелочным прибором. Аналогично можно измерить и линейное перемещение.

Для измерения угловой скорости и получения сигнала в аналоговом виде используют тахогенераторы. Схема включения тахогенератора в измерительную цепь представлена на рисунке 3.2.

Электрический сигнал от тахогенератора, ротор которого соединен с вращающейся деталью, поступает в преобразователь, а затем в измерительную цепь (к гальванометру). Величина выходного сигнала, поступающего от преобразователя в измерительную цепь, может регулироваться с помощью потенциометра  $R$ . Подключение преобразователя к измерительной цепи осуществляется выключателем ВК.



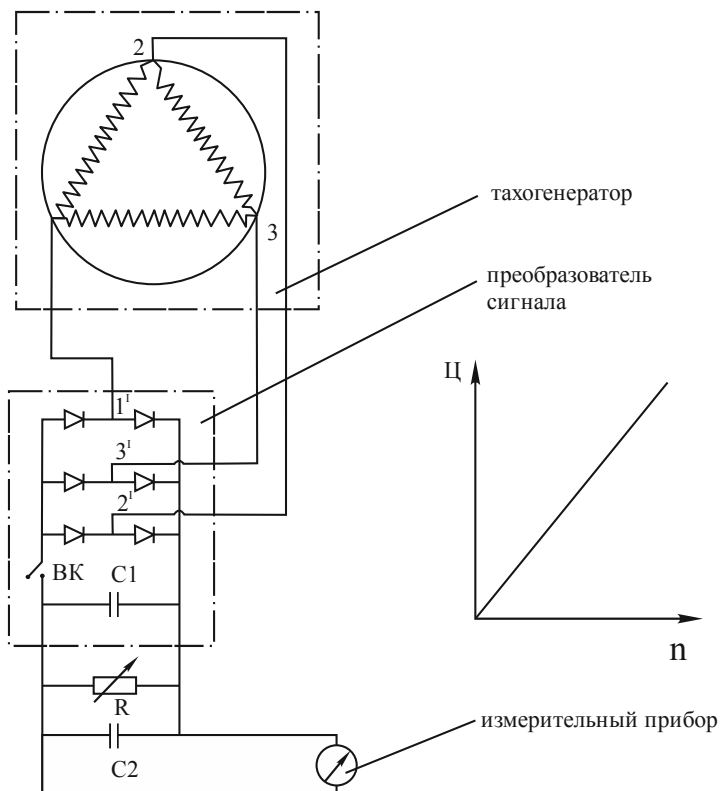


Рис. 3.2. Схема включения тахогенератора в измерительную цепь

Измерение частоты вращения производят с помощью электромагнитного (индукционного) или фотоэлектрического преобразователя (рис. 3.3), импульсный сигнал от которых поступает на частотомер или гальванометр.

На рисунке 3.3, а показана схема включения электромагнитного преобразователя в измерительную цепь. Схема содержит диск 1, жестко закрепленный на валу. Диск выполнен из диэлектрического материала и имеет металлический проводник 2. По обе стороны диска расположены магнитные контакты 3 и 4, которые являются сердечниками катушек 5. Выходы катушек подключены к источнику питания  $E$  и гальванометру 6 (или счетчику импульсов – частотомеру). При вращении диска 1 за один оборот происходит замыка-

ние контактов 3 и 4 на участке проводника 2. Таким образом, возникают импульсы электрического тока, частота следования которых пропорциональна частоте вращения. Величина сигнала, поступающего к гальванометру (частотомеру), регулируется переменным сопротивлением  $R$ .

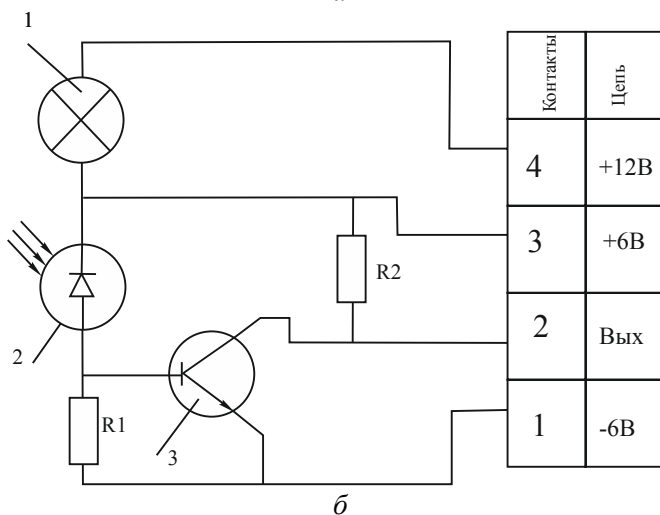
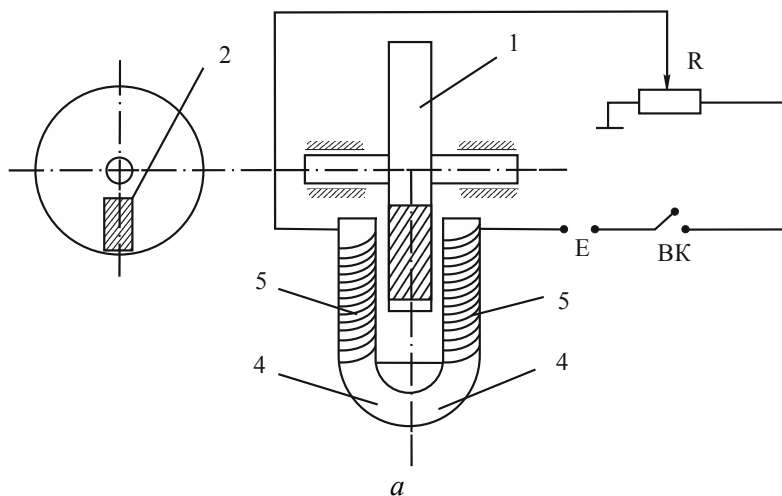


Рис. 3.3. Схемы включения электромагнитного (а) и фотоэлектрического (б) преобразователей в измерительную цепь



Фотоэлектрический преобразователь импульсов состоит из следующих основных элементов (рис. 3.3, б): источника светового потока – лампы накаливания 1; чувствительного элемента – фотодиода 2 и формирователя сигнала – транзистора 3. (Фотодиод включен в схему с внешним источником питания 6 В). В комплект преобразователя входит металлический диск (шторка с рядом отверстий для прохождения светового потока). Преобразователь располагают на кронштейне таким образом, чтобы диск находился между лампой 1 и фотодиодом 2.

Преобразователь работает следующим образом. Сфокусированный световой поток от лампы направляется на вращающийся диск. Пока нет отверстий сопротивление затемненного фотодиода велико и ток  $I_{\phi}$  почти равен нулю. В этом случае импульс отсутствует. При попадании светового потока на фотодиод 2 через отверстие в диске сопротивление фотодиода уменьшается и появляется ток  $I_{\phi}$ , который поступает на транзистор 3, где уменьшается и формируется в прямоугольные импульсы. Электрические импульсы с выходного преобразователя подаются на вход электронного цифрового частотомера, который регистрирует на цифровом табло число этих импульсов за фиксированный интервал времени.

Частота вращения может быть также измерена с помощью магнитоиндукционных тахометров. Схема одного из таких тахометров показана на рисунке 3.4.

Магнитоиндукционный тахометр имеет равномерную шкалу. В тахометре вращение от приводного вала 1 через конические шестерни и вал 2 передается ротору с постоянными магнитами 3, между которыми на оси 10 находится алюминиевый диск 4.

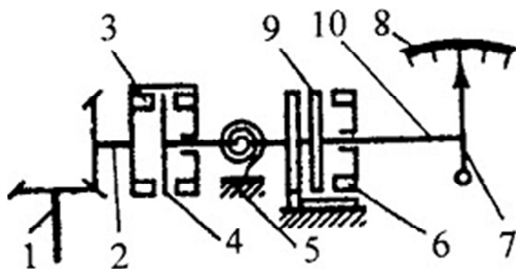


Рис. 3.4. Магнитоиндукционный тахометр

Под действием вращающегося поля магнитов в диске индуцируется электрический ток, создающий свое магнитное поле. Сила взаимодействия магнитных полей уравнивается силой действия волосковой пружины 5, один конец которой закреплен на оси 10, а другой – в корпусе прибора. Пропорционально частоте вращения приводного вала 1 изменяются действующие силы, разворот диска 4, оси 10 и жестко связанной с ней стрелки 7 вдоль шкалы 8. В прибор вмонтирован магнитоиндукционный успокоитель, состоящий из алюминиевого диска 9, закрепленного на валу 10, и неподвижной системы с постоянными магнитами 6. При движении в диске 9 индуцируется ток и создается магнитное поле, взаимодействующее с полем постоянных магнитов. А так как сила взаимодействия этих полей направлена в сторону, противоположную движению диска, то происходит торможение колебаний стрелки прибора.

Для измерения расхода рабочей среды используются преобразователи расхода турбинного типа: ТПР-7; ТПР-10; ТПР-20 и др. На рисунке 3.5 показана схема такого преобразователя расхода.

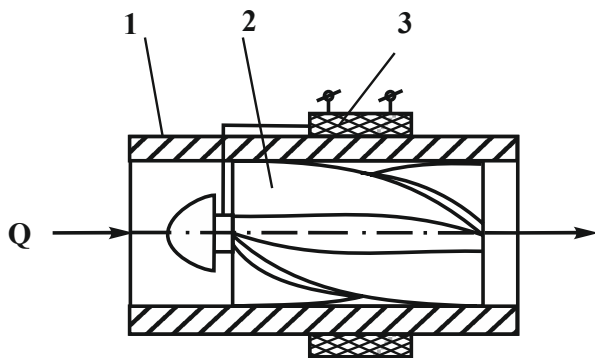


Рис. 3.5. Конструкция турбинного преобразователя расхода рабочей среды

В корпусе 1, выполненном в виде трубы, установлена турбина 2 на подшипниках. Лопасти турбины изготовлены из магнитопроводящего материала. На корпусе снаружи закреплен постоянный электромагнит 3 с электрическими обмотками.

Принцип действия электромагнитного преобразователя заключается в следующем. Под действием потока рабочей среды лопасти турбины при вращении пересекают магнитное поле и периодически

изменяют его напряженность. Вследствие этого в катушке электромагнита возникает ЭДС, импульсный сигнал которой поступает на частотомер. Показания частотомера пропорциональны объемному расходу рабочей среды.

Преобразователь расхода турбинного типа предназначен в основном для работы с электронно-счетным частотомером. Импульсный сигнал от преобразователя можно подавать на гальванометр осциллографа. Схема включения преобразователя расхода в измерительную цепь аналогична той, что изображена на рисунке 3.3, а.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схемы включения преобразователей давления, перемещения и частоты вращения в измерительные цепи.

### **Контрольные вопросы**

1. Какое устройство называется преобразователем?
2. Опишите принцип работы преобразователей давления.
3. Как работают датчики для измерения угловых перемещений?
4. Каким образом с помощью тахогенератора можно измерить угловую скорость?
5. Для чего применяется и как работает электромагнитный (индукционный) преобразователь?
6. Из каких элементов состоит фотоэлектрический преобразователь?
7. Каков принцип работы фотоэлектрического преобразователя?
8. Для чего применяются и как работают преобразователи расхода турбинного типа?

## Лабораторная работа № 4

### ТАРИРОВКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

#### Цель работы

1. Провести тарировку преобразователя давления.
2. Построить график зависимости давления жидкости от силы тока (тарировочный график)  $p = f(I)$ .
3. Провести оценку погрешности результатов измерений.

#### Общие сведения

Тарировка преобразователей давления, перемещения, частоты вращения, расхода рабочей среды и других осуществляется в комплексе с измерительно-регистрирующей аппаратурой. Она заключается в нахождении функциональной зависимости между измеряемым параметром (давлением, перемещением и др.) и выходным сигналом аппаратуры. Изменяя измеряемый параметр от минимальной до максимальной величины (в пределах рабочего диапазона) и сравнивая значения этих параметров с интенсивностью выходного сигнала измерительно-регистрирующей аппаратуры, определяют (аналитически или графически) их соотношения.

Для получения достоверных результатов измерений условия тарировки должны как можно меньше отличаться от условий проведения испытаний объектов. При этом состав измерительной системы, условия ее эксплуатации как при тарировке, так и при испытаниях должны быть одинаковыми. Номера каналов, закрепленных за определенными процессами при тарировке, не должны изменяться в процессе испытаний. Проведем тарировку датчика давления.

#### *Схема установки и методика проведения опыта*

Тарировка датчика давления производится на специальной установке (рис. 4.1).

Схема установки содержит гидравлический нагнетатель 1, поршневая полость которого соединена магистралями с датчиком давления 2 и образцовым манометром 3, а через вентиль 5 – со штоко-

вой полостью. Датчик давления 2 электрически соединен с источником постоянного тока  $E$  и через переменный резистор  $R$  – с миллиамперметром 4.

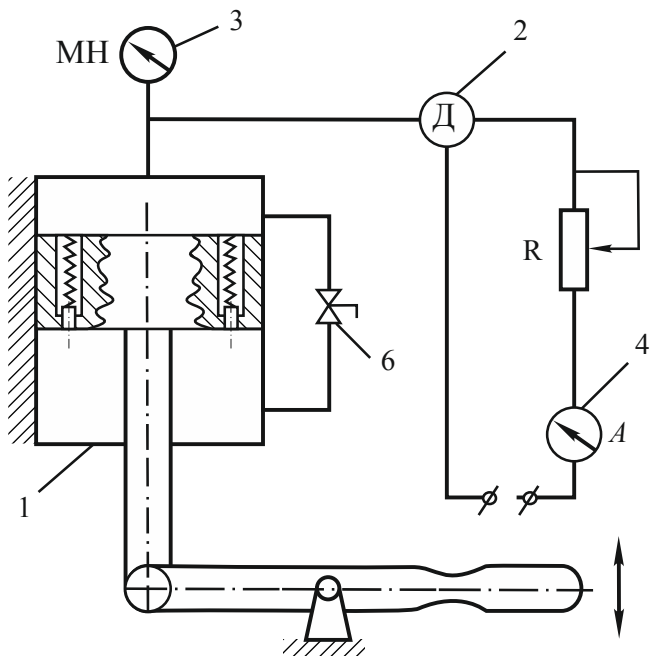


Рис. 4.1. Принципиальная схема установки для тарировки преобразователей давления

Тарировка датчика (преобразователя давления) производится как в прямом, так и в обратном направлениях, т. е. при повышении и понижении давления. Предварительно (с помощью тарировочного резистора  $R$ ) подбирают уровень выходного сигнала от преобразователя давления (датчика), соответствующего максимальному отклонению стрелки на шкале регистрирующего прибора при максимальном давлении тарировки.

Тарировка при прямом направлении осуществляется следующим образом. При закрытом вентиле 5 с помощью рукоятки нагнетателя 1 последовательными ступенями через 0,1 МПа (5–10 ступеней в зависимости от максимального уровня давления, до которого произво-

дится тарировка) повышают давление в магистрали датчика 2. При этом замеряют величину тока  $I$  и заносят в таблицу 4.1 (прямой ход).

Таблица 4.1

№	Прямой ход				Сила тока $I$ , мА	Обратный ход			
	Давление жидкости $p$ , МПа					Давление жидкости $p$ , МПа			
	1	2	3	Ср. знач.		1	2	3	Ср. знач.
1									

Тарировка датчика давления в обратном направлении производится следующим образом. При максимальном давлении, которое было достигнуто в прямой тарировке и нижнем положении рукоятки нагнетателя 1, плавно открывают вентиль 5 и последовательными ступенями через 0,1 МПа (5–10 ступеней) понижают давление в магистрали датчика 2 до нуля (до атмосферного). Результаты тарировки заносят в таблицу 4.1 (обратный ход).

Для повышения точности тарировочных замеров их повторяют не менее трех раз и находят среднее значение величины.

### ***Обработка результатов тарировки преобразователей***

Обработка результатов тарировки преобразователей сводится к нахождению функциональной зависимости между показанием электрического прибора (тока  $I$ , мА) и значением давления ( $p$ , МПа), а также к определению масштабного коэффициента  $K_m$ , наиболее точно удовлетворяющего всем опытным данным тарировки, и к оценке точности его определения.

Обычно зависимость  $p = f(I)$  – линейная, или может быть приведена к этому виду.

Опытные данные тарировки описываются, как правило, нормальным уравнением:

$$\sum p_i I_i - K_m \sum I_i^2 = 0. \quad (4.1)$$

Обрабатывая опытные данные по методу наименьших квадратов, из уравнения (4.1) получают выражение для масштабного коэффициента:

$$K_M = \sum p_i I_i / \sum I_i^2. \quad (4.2)$$

При этом среднеквадратичная погрешность оценки масштабного коэффициента определяется по формуле

$$\sigma = \pm \left[ \frac{\sum (p_i - K_M I_i)^2}{(n-1) \sum I_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.3)$$

где  $n$  – общее число замеров.

Приведенная относительная погрешность оценки масштабного коэффициента определяется зависимостью

$$\delta = \pm \sigma / K_M. \quad (4.4)$$

Для вычисления суммарной погрешности результатов тарировки дополнительно находят погрешность замеров давления. Суммарная приведенная относительная погрешность тарировки:

$$\Delta = \delta + \delta_n, \quad (4.5)$$

где  $\delta_n$  – приведенная относительная погрешность прибора. Она определяется как отношение цены деления манометра к максимальному значению шкалы его измерения.

Суммарная среднеквадратичная погрешность определения масштабного коэффициента (в процентах) вычисляется по выражению

$$\sigma_\Sigma = \pm 100 \Delta K_M. \quad (4.6)$$

Погрешность определения масштабного коэффициента учитывают при оценке точности обработки результатов испытаний.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема установки для тарировки преобразователя давления.
3. Результаты тарировки преобразователя давления и математической обработки полученных данных.
4. Результаты математической обработки тарировочных данных и их краткий анализ.
5. Тарировочный график  $p = f(I)$ .

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается тарировка преобразователей?
2. Как производится тарировка датчика давления?
3. С какой целью в схему включают тарировочный резистор?
4. Как находится приведенная относительная погрешность определения давления?



## Лабораторная работа № 5

### ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА (ТАХОГЕНЕРАТОРА)

#### Цель работы

1. Изучить способы измерения расхода жидких и газообразных сред.
2. Определить рабочие характеристики расходомера электрического типа.
3. Построить тарифовочный график расходомера  $Q = f(U)$ .

#### Общие сведения

Существуют различные методы измерения расхода жидких и газообразных сред. По принципу действия приборы, реализующие эти методы, подразделяются на:

а) расходомеры переменного перепада давления – приборы, основанные на измерении перепада давления на установленном внутри канала сужающемся устройстве;

б) расходомеры постоянного перепада давления (расходомеры обтекания или ротаметры) основаны на восприятии динамического напора протекающей по каналу среды чувствительным элементом прибора (поплавок, поршнем, гидродинамической трубкой), помещенным в поток;

в) электрические расходомеры – приборы, принцип действия которых основан на измерении изменяющихся в зависимости от расхода электрических параметров потока;

г) тепловые расходомеры или термоанемометры. Чувствительным элементом прибора является термонить, нагреваемая электрическим током. Мощность рассеивания тепловой энергии пропорциональна средней скорости потока;

д) ультразвуковые расходомеры. Фактическая скорость распространения ультразвука в движущейся среде равна геометрической сумме средней скорости среды и собственной скорости звука в этой

среде. Кроме того, среднюю скорость потока можно измерить оценкой сдвига фаз между ультразвуковыми колебаниями, направленными попеременно по потоку и против него;

е) расходомеры с непрерывным движением информационных устройств – приборы, чувствительный элемент которых под воздействием потока совершает вращательные или колебательные движения. К расходомерам этого типа относится турбинный расходомер.

В работе тарируется расходомер электрического типа (тахогенератор).

### *Схема установки и методика проведения опыта*

Тарировка расходомера электрического типа проводится на установке, схема которой представлена на рисунке 5.1.

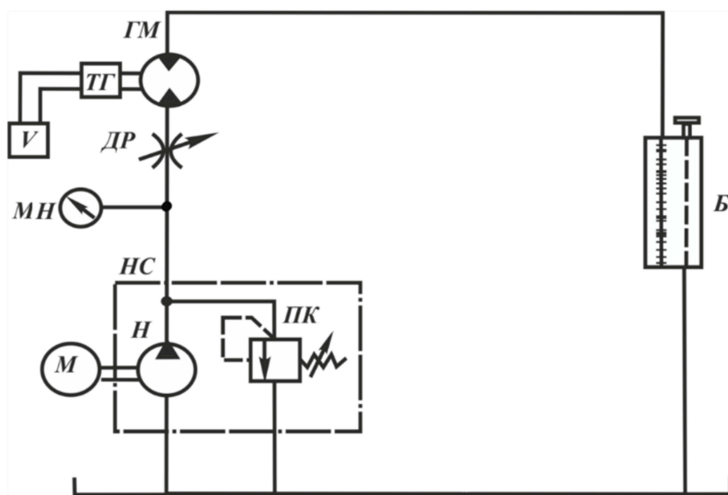


Рис. 5.1. Установка для тарировки расходомера электрического типа

Установка состоит из насосной станции (НС), включающей в себя насос (Н) и предохранительный клапан (ПК); манометра (МН); дросселя (ДР); гидромотора (ГМ); расходомера электрического типа (тахогенератора) (ТГ); мультиметра (V); мерной емкости (Б) с ручкой, открывающей сливную линию.

Жидкость от насосной станции (НС) через регулируемый дроссель (ДР) поступает в гидромотор (ГМ), вал которого соединен с тахогенератором (ТГ). Частота вращения вала в тахогенераторе преобразуется в ток определенного напряжения, фиксируемый мультиметром.

В свою очередь, от гидромотора жидкость поступает в мерную емкость (Б), по времени заполнения которой определяется расход.

### Порядок выполнения работы

1. Из комплекта оборудования подбираем необходимые элементы и собираем схему в соответствии с рисунком 5.1.

2. Подключаем мультиметр к тахогенератору, соединяя «+» выход с красным гнездом тахогенератора, а «-» выход – с черным. Запитываем тахогенератор от источника постоянного тока напряжения 24 В также соблюдая полярность.

3. Включаем установку. На предохранительном клапане насосной станции устанавливаем давление 40 атм. (4,0 МПа). Полностью открываем предохранительный клапан (КП2) и дроссель (ДР).

4. На мультиметре устанавливаем переключатель на измерение напряжения постоянного тока величиной 20 (рис. 5.2) и включаем его нажатием кнопки «0». Установка готова к снятию показаний, открываем вентилем подачу жидкости в систему.

5. Нагружающим элементом в системе является дроссель (ДР). Изменяя его открытие от максимального до минимального, меняем расход жидкости в системе и частоту вращения вала гидромотора (ГМ). Частота вращения вала в тахогенераторе преобразуется в электрический сигнал (напряжение  $U$ , В), величина которого фиксируется мультиметром и заносится в таблицу 5.1. Диапазон измерений составит от 4,0 до 0,5 В с шагом 0,5 В в прямом направлении и от 0,5 до 4 В в обратном.

6. Одновременно при определенных значениях мультиметра отмечаем время  $t$  заполнения мерной емкости Б и заносим в таблицу 5.1. Выбираем объем емкости  $W = 2 \text{ л} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Рассчитываем расход жидкости по формуле

$$Q_i = W/t, \quad (5.1)$$

где  $W$  – объем мерной емкости, м<sup>3</sup>;  
 $t$  – время заполнения емкости, с.  
 Значение  $Q_i$  также заносим в таблицу 5.1.



Рис. 5.2. Мультиметр

7. В качестве справочного значения фиксируем при всех опытах показания манометра.

8. Тарировочные коэффициенты определяются по формулам

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \sum_{i=1}^n U_i^2 - \sum_{i=1}^n U_i Q_i}{n \sum_{i=1}^n U_i^2 + (\sum_{i=1}^n U_i)^2}, \quad (5.2)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n U_i Q_i - \sum_{i=1}^n Q_i \sum_{i=1}^n U_i}{n \sum_{i=1}^n U_i^2 + (\sum_{i=1}^n U_i)^2}, \quad (5.3)$$

где  $Q_i$  – расход масла при измерении, м<sup>3</sup>/с;

$U_i$  – напряжение при  $i$ -м измерении, В;

$n$  – общее число измерений.

Числовые значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , а также значения расходов  $Q_i$  округлить до четырех значащих цифр.

9. В результате строиться тарифовочный график зависимости расхода от напряжения  $Q = f(U)$ .

Таблица 5.1

№ п/п	Давление $p$ , Па	Время заполнения бака $t$ , с	Объем мерного бака $W$ , м <sup>3</sup>	Расход $Q_i$ , м/с	Напряжение $U_i$ , В	$U_i^2$	$U_i Q_i$	Коэффициенты	
								$a$	$b$
1									
2									
3									
4									
				$\sum_{i=1}^n Q_i$	$\sum_{i=1}^n U_i$	$\sum_{i=1}^n U_i^2$	$\sum_{i=1}^n U_i Q_i$		

### **Обработка результатов тарировки**

Обработка результатов тарировки сводится к нахождению функциональной зависимости между показанием электрического прибора (напряжения  $U$ , В) и значением расхода ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с), а также к определению масштабного коэффициента  $K_M$ , наиболее точно удовлетворяющего всем опытными данным тарировки, и к оценке точности его определения.

Обычно зависимость  $Q = f(U)$  – линейная, или может быть приведена к этому виду.

Опытные данные тарировки описываются, как правило, нормальным уравнением:

$$\sum Q_i U_i - K_M \sum U_i^2 = 0. \quad (5.4)$$

Обработывая опытные данные по методу наименьших квадратов, из уравнения (4.1) получают выражение для масштабного коэффициента:

$$K_M = \sum Q_i U_i / \sum U_i^2. \quad (5.5)$$

При этом среднеквадратичная погрешность оценки масштабного коэффициента определяется по формуле

$$\sigma = \pm \left[ \frac{\sum (Q_i - K_M U_i)^2}{(n-1) \sum U_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5.6)$$

где  $n$  – общее число замеров.

Приведенная относительная погрешность оценки масштабного коэффициента определяется зависимостью

$$\delta = \pm \sigma / K_M. \quad (5.7)$$

Для вычисления суммарной погрешности результатов тарировки дополнительно находят погрешность замеров объема. Суммарная приведенная относительная погрешность тарировки:

$$\Delta = \delta + \delta_n, \quad (5.8)$$

где  $\delta_n$  – приведенная относительная погрешность определения объема. Она определяется как отношение цены деления шкалы мерного бака к максимальному значению объема его измерения.

Суммарная среднеквадратичная погрешность определения масштабного коэффициента (в процентах) вычисляется по выражению

$$\sigma_\Sigma = \pm 100 \Delta K_M. \quad (5.9)$$

Погрешность определения масштабного коэффициента учитывают при оценке точности обработки результатов испытаний.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема установки для тарировки расходомера электрического типа (тахогенератора).
3. Результаты тарировки расходомера.
4. Результаты математической обработки тарировочных данных и их краткий анализ.
5. Тарировочный график  $Q = f(U)$ .

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные методы измерения расхода жидкостей и газов.
2. Поясните принцип действия расходомера электрического типа.
3. Из каких элементов состоит испытательная установка и как проводятся испытания?

## Лабораторная работа № 6

### ТАРИРОВКА РАСХОДОМЕРА ТУРБИННОГО ТИПА

#### Цель работы

1. Определить рабочие характеристики расходомера турбинного типа.
2. Построить тарировочный график расходомера  $Q = f(f)$ .

#### Общие сведения

Турбинные расходомеры применяются в ряде отраслей промышленности для различных задач по измерению, контролю и управлению. Они могут работать в диапазоне температур от  $-150$  °С до  $+250$  °С, а также во взрывоопасной среде, что расширяет сферу их применения.

Турбинные расходомеры используются:

- в химической промышленности (краски, лаки, растворители, разбавители);
- в нефтяной промышленности (различные нефтепродукты, бензин, промежуточные продукты переработки);
- в машиностроении и на электростанциях (рабочие жидкости на нефтяной основе, жидкие топлива, газ, вода);
- в пищевой промышленности (молоко, фруктовые соки, растительное масло, уксус и т. д.).

Турбинный расходомер по метрологическим характеристикам является наиболее приемлемым для измерения расхода минеральных масел в гидросистемах объемного типа. Он представляет собой трубопровод с чувствительным элементом – винтовой гидрометрической турбинкой.

Поток жидкости, проходящий по трубопроводу, приводит во вращение турбинку, угловая скорость которой пропорциональна скорости жидкости в трубопроводе. Вращение турбинки посредством магнитоиндукционного генератора преобразуется в электрический сигнал.



Характеристика расходомера турбинного типа определяется зависимостью частоты выходного сигнала от проходящего через преобразователь объемного расхода жидкости. Необходимо учитывать тормозящие турбинку силы трения в опорах, вязкое трение жидкости, торможение оси генератора электрических сигналов и др. Это приводит к тому, что вращение турбинки начинается только при таком расходе, когда вращающий момент на турбинке больше сил сопротивления. Поэтому реальная характеристика имеет зону нечувствительности.

$$Q = af + b, \quad (6.1)$$

где  $a$  – градуировочный коэффициент датчика, м<sup>3</sup>/с;

$b$  – смещение характеристики от начала координат, учитывающее силы сопротивления, м<sup>3</sup>/с;

$f$  – частота, Гц.

Характеристика турбинного расходомера определяется по результатам индивидуальной тарировки для определенной вязкости жидкости, так как коэффициенты  $a$ ,  $b$  изменяются в зависимости от значения вязкости рабочей жидкости. Погрешность достигает 7 %.

Турбинные расходомеры в комплексе с датчиком плотности могут применяться в системах, измеряющих протекание массы. В этом случае в измерительном контуре отдельно определяется протекающий объем и плотность, электронный блок по сигналам этих двух датчиков определяет значение массы потока.

### ***Схема установки и методика проведения опыта***

Тарировка турбинного расходомера проводится на установке, схема которой представлена на рисунке 6.1. Источником энергии жидкости служит пластинчатый насос 1. Жидкость, подаваемая насосом 1, через фильтр 2 поступает на два дросселя 3, в магистраль одного из которых подключается тарируемый расходомер 4. Дросселями 3 варьируется величина расхода жидкости, поступающей на расходомер 4. Двухпозиционный распределитель 5 направляет поток жидкости, прошедшей через расходомер, в мерный бак 8.

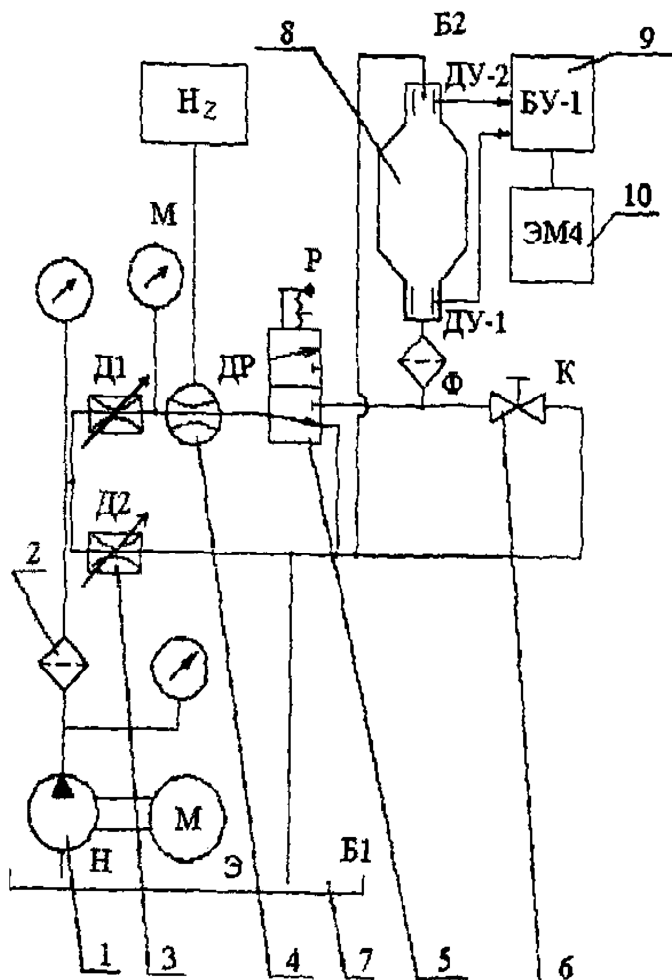


Рис. 6.1. Установка для тарировки расходомера турбинного типа

Время заполнения мерного бака определяется электромеханическими часами 10, управляемыми верхним ДУ-2 и нижним ДУ-1, емкостными датчиками уровня через блок управления 9. После проведения замера жидкость из мерного бака 8 через кран 6 сливается в гидробак 7.

Тарировка турбинных расходомеров выполняется на рабочей жидкости с известной вязкостно-температурной кривой.

Датчик тарируется на 5-ти значениях расхода. На каждом значении расхода производится не менее трех измерений. Требуемая величина расхода устанавливается дросселем  $Z$  и контролируется по частотомеру.

В процессе каждого измерения необходимо определять:

$t$  – время наполнения мерного бака, с,

$f$  – частоту электрического сигнала, поступающего с датчика, Гц.

Объем мерного бака  $V_6 = 11,418$  л.

Тарировочные коэффициенты определяются по формулам

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n f_i Q_i - \sum_{i=1}^n f_i Q_i}{n \sum_{i=1}^n f_i^2 - (\sum_{i=1}^n f_i)^2}, \quad (6.2)$$

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i - a \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad (6.3)$$

где  $Q_i = V/t$  – расход масла при измерении, м<sup>3</sup>/с;

$t_i$  – время заполнения мерного бака при  $i$ -м измерении, с;

$f_i$  – частота выходного сигнала при  $i$ -м измерении, Гц;

$n$  – общее число измерений.

Числовые значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , а также значения расходов  $Q_i$  округлить до четырех значащих цифр.

В результате строится тарировочный график зависимости расхода от частоты выходного сигнала  $Q = f(f)$ .

Суммарная погрешность вычисляется по выражению

$$\sigma_{\Sigma} = \sum ((af_i + b) - Q_i)^2. \quad (6.4)$$

Проверяется сходимость результатов  $Q_i = V/t$ , полученных опытным путем, и  $Q_i = af_i + b$ , рассчитанных с помощью тарировочных коэффициентов.

Результаты тарировки заносятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Частота $f_i$ , Гц	Время заполнения мерного бака $t_i$ , с	Расход $Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	$f_i^2$	$f_i Q_i$	Коэффициенты	
						$a$	$b$
1							
2							
3							
4							
	$\sum_{i=1}^n f_i$		$\sum_{i=1}^n Q_i$	$\sum_{i=1}^n f_i^2$	$\sum_{i=1}^n f_i Q_i$		

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема установки для тарировки расходомера турбинного типа.
3. Результаты тарировки расходомера.
4. Результаты математической обработки тарировочных данных и их краткий анализ.
5. Построить тарировочный график  $Q_i = f(f_i)$ .

### Контрольные вопросы

1. В каких областях промышленности применяются турбинные расходомеры?
2. В каком диапазоне температур может работать турбинный расходомер?
3. Поясните принцип действия расходомера турбинного типа.
4. Из каких элементов состоит испытательная установка и как проводятся испытания?

## Лабораторная работа № 7

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРМОЗНОГО КРАНА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

### Цель работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия двухсекционного тормозного крана прямого действия.
2. Экспериментально определить статическую характеристику тормозного крана прямого действия.

### Общие сведения

Тормозной кран (ТК) предназначен для управления подачей сжатого воздуха, поступающего от ресиверов к исполнительным органам тормозной системы мобильной машины.

По принципу действия тормозные краны бывают прямого и обратного действия, а также комбинированные. В кранах прямого действия при увеличении управляющего усилия, прикладываемого к нему (процесс торможения), давление в полости крана возрастает, а в кранах обратного действия – уменьшается.

Тормозные краны по числу обслуживаемых или автономных контуров привода подразделяются на одно-, двух-, трех- и многосекционные. Секции могут быть расположены последовательно, параллельно или комбинированно.

Односекционные краны используются в одноконтурных тормозных приводах мобильных машин, а также в многоконтурных для управления отдельными контурами. Двухсекционные краны предназначены для управления двухконтурным приводом одиночного транспортного средства. В этом случае тормозной привод прицепа (полуприцепа) управляется от обеих секций крана тягача. Трехсекционный кран используется для управления тормозами автопоезда. При этом двумя секциями управляются тормоза тягача, а третьей – тормоза прицепа. Комбинированные тормозные краны имеют от двух до четырех секций, причем одна из них обратного действия, которой управляются тормоза прицепа при однопроводном приводе.

Управление тормозным краном может быть непосредственным и дистанционным. Оно осуществляется механически с помощью рычагов и тяг, а также гидроприводом.

Двухсекционный тормозной кран (рис. 7.1, а) имеет две последовательно расположенные секции, плоские резиновые клапаны и поршневой следящий механизм с резиновой втулкой. Привод крана – механический, дистанционный.

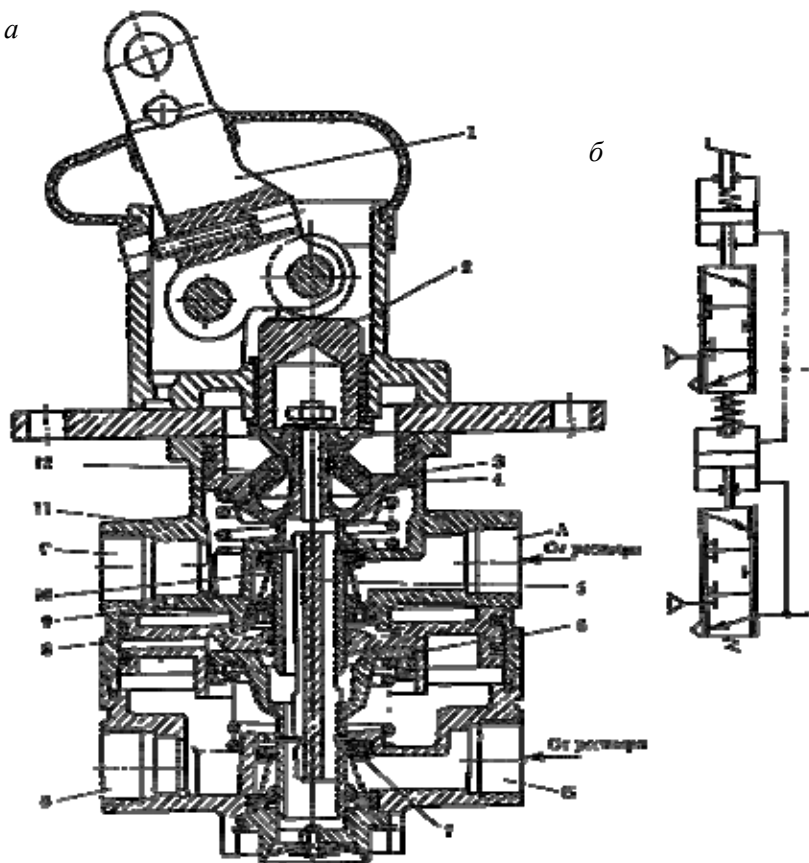


Рис. 7.1. Двухсекционный тормозной кран с последовательным расположением секций (а) и его схематическое изображение (б):

1 – рычаг; 2 – толкатель; 3 – втулка; 4, 6, 8 – поршни; 5 – шток; 7, 10 – клапаны; 9 – отверстие; 11 – корпус крана; 12 – упорный болт; А, Б, В, Г – выходы

В исходном положении (тормозная педаль отпущена) под действием пружин следящие поршни 4 и 6 занимают крайнее верхнее положение. Как одно целое с этими поршнями изготовлены выпускные седла клапанов крана, поэтому выпускные окна клапанов 10 и 7 открыты и тормозные камеры через выводы Г и В, полый шток 5 соединены с атмосферой. Под действием пружин клапаны 10 и 7 прижаты к неподвижным седлам, расположенным в корпусе крана, а выводы А и Б, к которым подводится воздух от ресиверов отдельных контуров, разобщены соответственно с выводами Г и В.

При торможении усилие от педали через рычаг 1, толкатель 2 и упругую резиновую втулку 3 передается на верхний следящий поршень 4. Подвижное седло клапана 10, перемещаясь вместе с поршнем 4, закрывает выпускное окно этого клапана и перекрывает сообщение через вывод Г тормозных камер с атмосферой, а затем отрывает клапан 10 от неподвижного седла. Сжатый воздух через вывод А, соединенный с ресивером, и открытый клапан 10 поступает в полость крана и далее к выводу Г. К последнему подключается магистраль управления тормозами передней оси транспортного средства, а также трубопровод, соединяющий эту магистраль с одной из управляющих полостей крана управления тормозами прицепа с двухпроводным приводом. Давление в верхней полости крана возрастает до тех пор, пока сила нажатия на резиновую втулку 3 в результате повышения давления в полости крана не уравновесится усилием, действующим на следящий поршень 4. В этом случае клапан 10 садится на неподвижное седло и воздух в тормозные камеры контура не поступает.

При увеличении давления в верхней полости крана воздух через отверстие 9 в корпусе 11 поступает в надпоршневую полость большого поршня 8, который совместно со следящим поршнем 6 перемещается вниз и открывает клапан 7. Сжатый воздух через вывод Б, соединенный с ресивером, поступает через клапан 7 к выводу В. К этому выводу подключается магистраль управления тормозами задней оси транспортного средства, а также трубопровод, соединяющий эту магистраль с другой управляющей полостью крана управления тормозами прицепа с двухпроводным приводом. Давлением сжатого воздуха, находящегося в пространстве под поршнями 8 и 6, уравновешивается сила, действующая на поршень 8 сверху. В нижней полости крана и в тормозных камерах задней оси уста-

навливается давление, соответствующее усилию нажатия на резиновую втулку 3. При снятии усилия с рычага 1 поршень 4 перемещается вверх, клапан 10 прижимается к неподвижному седлу, а вывод Г через выпускное окно клапана и полый шток 5 сообщается с атмосферой. Уменьшение давления в верхней полости вызывает перемещение поршня 8 вверх, в результате чего клапан 7 также садится на седло в корпусе и вывод В соединяется с атмосферой.

При повреждении первого контура (верхней секции) усилие от рычага через упорный болт 12 передается на полый шток 5, жестко связанный со следящим поршнем 6 нижней секции, и открывает клапан 7. Таким образом, вторая секция будет управляться механически. При этом сохраняется ее следящее действие, так как сила, действующая сверху на шток поршня 6, будет уравниваться усилием на поршне, возникающим в результате повышения давления в полости нижней секции. При повреждении второго контура (нижней секции) поршень 8 садится на нижний упор в корпусе 11 крана, и верхняя секция работает обычным образом.

Статической характеристикой тормозного крана считается график зависимости давления на его выходе от перемещения рычага управления (тормозной педали), т. е.  $p_{\text{вых}} = f(h)$ .

### ***Описание экспериментальной установки***

Определение статической характеристики тормозного крана прямого действия производится на экспериментальной установке (рис. 7.2, а), являющейся частью стенда для определения статических характеристик аппаратов пневматической тормозной системы.

Установка содержит воздушный баллон (БВ), магистрально подключенный через краны КР1 и КР2 управления подачей воздуха ко входу (к отдельным секциям) тормозного крана. Выход тормозного крана соединен гибкими трубопроводами через штуцеры Е и Д с контрольными баллонами БК1 и БК2. Давление в воздушном баллоне БВ, на выходе кранов КР1, КР2, а также в контрольных баллонах БК1 и БК2 замеряется соответственно манометрами МН1–МН5.

Заполнение воздушного баллона сжатым воздухом и поддержание необходимого давления (0,7–0,72 МПа) в процессе испытаний тормозного крана обеспечивается компрессорной установкой (на рис. 7.2, а не показана).



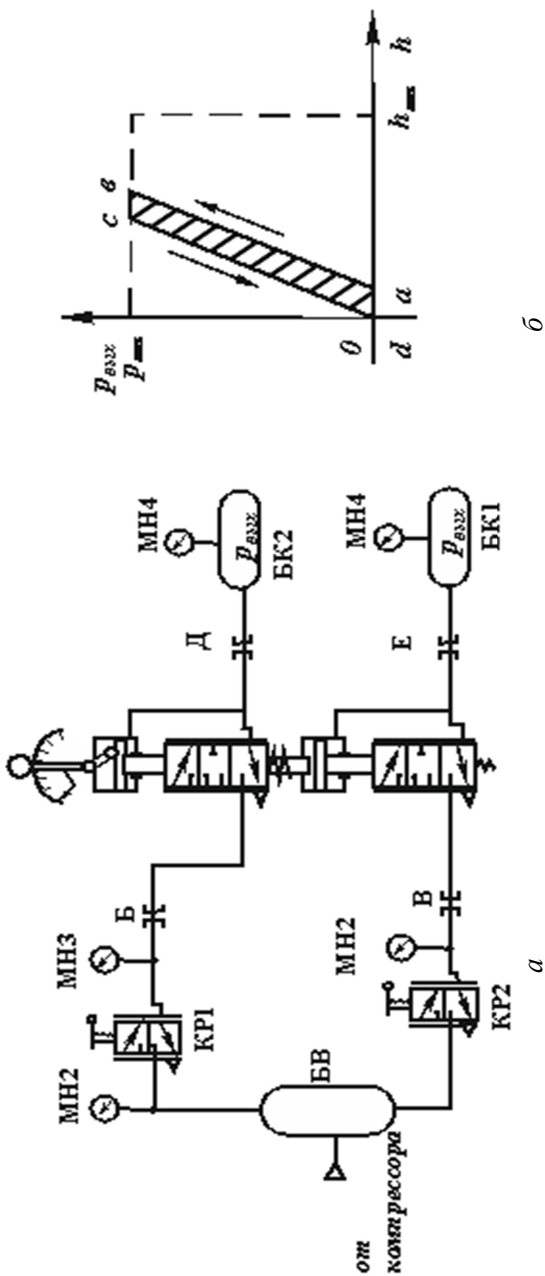


Рис. 7.2. Схема установки для испытаний тормозного крана (а) и его примерная статическая характеристика (б):  
 БВ – воздушный баллон; КР1, КР2 – краны управления подачей воздуха; МН1–МН5 – манометры;  
 Б, В, Д, Е соединительные штуцеры; ТК – тормозной кран; БК1, БК2 – контрольные баллоны

Методика испытаний заключается в опытном определении давления в контрольных баллонах БК1 и БК2, имитирующих емкость тормозных камер (цилиндров) при торможении и отгормаживании, т. е. при перемещении рычага управления тормозным краном в прямом и обратном направлениях. На основании опытных данных строится статическая характеристика тормозного крана.

### Порядок проведения испытаний

Для проведения испытаний:

1. Включают компрессорную установку, в результате происходит заполнение баллона БВ сжатым воздухом до давления 0,7–0,72 МПа, контролируемого манометром МН1.

2. Открывают краны КР1 и КР2, соединяющие воздушный баллон со входом отдельных секций тормозного крана. Давление на входе тормозного крана контролируется манометрами МН2 и МН3.

3. Медленно перемещают рычаг управления тормозным краном от нуля до максимального значения (5–6 фиксированных значений), при этом повышается давление в контрольных баллонах БК1 и БК2. Для каждого фиксированного перемещения  $h$  рычага показания манометров МН4 и МН5 заносят в таблицу 7.1 (прямой ход).

Таблица 7.1

Серия опытов	Прямой ход			Обратный ход		
	Перемещение рычага $h$ , мм	Показания манометров, МПа		Перемещение рычага $h$ , мм	Показания манометров, МПа	
		МН4	МН5		МН4	МН5
1	2	3	4	5	6	7

4. При достижении максимального перемещения рычага управления тормозным краном эксперимент (прямой ход) прекращается.

5. Рычаг управления медленно возвращают в исходное (первоначальное) положение (5–6 фиксированных значений). Для каждого фиксированного перемещения  $h$  показания манометров МН4 и МН5 заносятся в таблицу 7.1 (обратный ход).

6. При возвращении рычага управления тормозным краном в исходное положение ( $h = 0$ ) эксперимент (обратный ход) прекращается.

7. По данным таблицы 7.1 строят статическую характеристику  $p_{\text{вых}} = f(h)$  тормозного крана при прямом и обратном ходе (рис. 7.2, б).

На рисунке 7.2, б показана примерная статическая характеристика тормозного крана. Линия *ab* изображает нарастание давления  $p_{\text{вых}}$  в контрольных баллонах БК1 и БК2 при увеличении перемещения *h* рычага управления тормозным краном (торможение). Линия *bc* соответствует возвращению рычага управления в исходное положение, при котором не происходит падения давления в контрольных баллонах. Это обуславливает зону нечувствительности (гистерезис) тормозного крана. Линия *cd* соответствует обратному ходу (оттормаживанию), т. е. понижению давления  $p_{\text{вых}}$  в контрольных баллонах до положения, в котором перемещение рычага управления краном равно нулю.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема испытательной установки.
3. Результаты испытаний (таблицы, графики).
4. Краткий анализ полученных результатов.

### Контрольные вопросы

1. Какие конструктивные разновидности тормозных кранов Вам известны?
2. Как устроен и работает двухсекционный тормозной кран прямого действия?
3. Какими конструктивными элементами обеспечивается следящее действие тормозного крана?
4. Как обеспечивается работоспособность тормозной системы при повреждении одного из контуров пневмопривода?
5. Что понимается под статической характеристикой тормозного крана?
6. Какое влияние оказывает гистерезис на качество работы тормозного крана?
7. Какие факторы оказывают влияние на чувствительность тормозного крана?
8. Каковы особенности статической характеристики, полученной при испытаниях тормозного крана?

## Лабораторная работа № 8

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА ДВУХСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ НА ШТОКЕ

### Цель работы

1. Собрать пневматическую схему управления пневмоцилиндром двухстороннего действия с переменной нагрузкой на штоке, используя универсальную панель лабораторного стенда FESTO.
2. Определить зависимость скорости движения выходного звена пневмоцилиндра от величины переменной нагрузки на него и выполнить необходимые расчеты.

### Содержание работы

1. Собрать пневматическую схему управления пневмоцилиндром двухстороннего действия с переменной нагрузкой на штоке, используя универсальную доску лабораторного стенда.
2. Определить зависимость скорости движения выходного звена пневмоцилиндра от величины переменной нагрузки на него и выполнить необходимые расчеты.

### *Описание конструкции и принципа действия лабораторной установки*

На рисунке 8.1 представлена пневматическая схема лабораторной установки, включающая два соосно (ось О-О) расположенных пневмоцилиндра двухстороннего действия – один исследуемый 1А и второй 2А – для создания переменного усилия нагружения на шток первого. Пневмоцилиндры имеют одинаковые размерные параметры: диаметр и ход поршня, диаметр штока.

Подключение пневмосхемы к источнику питания осуществляется через запорный вентиль В и распределительный коллектор К.

В исходном положении шток пневмоцилиндра 1А втянут, а пневмоцилиндра 2А – выдвинут, их концы соприкасаются ( $F_1 = F_2 = 0$ ).



Для настройки и поддержания заданного значения  $p_3$  в бесштоковой полости пневмоцилиндра 2А, создающего требуемое усилие нагружения, в его питающей магистрали установлен регулируемый клапан (РКП). Как только давление в бесштоковой полости пневмоцилиндра 2А превышает заданное значение, РКП переключается и давление уменьшается до заданного значения за счет сброса сжатого воздуха в атмосферу через канал 2.

Скорость выдвижения штока пневмоцилиндра 1А зависит от соотношения сил  $F_1$  и  $F_2$ , которые могут быть рассчитаны с помощью выражений

$$F_1 = p_1 S_1 - p_2 S_2, \quad (8.1)$$

$$F_2 = p_3 S_3, \quad (8.2)$$

где  $p_1, p_2$  – давление соответственно в штоковой и бесштоковой полостях нагруженного пневмоцилиндра 1А, Па;

$S_1, S_2$  – площади поршня со стороны штоковой и бесштоковой полостей исследуемого пневмоцилиндра 1А, м<sup>2</sup>,

$S_3$  – площадь поршня со стороны бесштоковой полости нагруженного пневмоцилиндра 2А, м<sup>2</sup>.

При  $F_1 = F_2$  штоки не перемещаются. При увеличении давления  $p_1$  увеличивается  $F_1$  и происходит перемещение (выдвижение) штока пневмоцилиндра 1А, вызывающее перемещение (утапливание) штока пневмоцилиндра 2А.

### Порядок проведения работ

1. Ознакомиться с элементной базой и условными обозначениями используемых для проведения лабораторной работы элементов, находящихся в контейнерах лабораторного стенда.

2. Используя набор пневмоэлементов в контейнере стенда с помощью пневматических шлангов, собрать по схеме на рисунке 8.1 лабораторную установку. С помощью электрических проводников подключить **при участии преподавателя** датчики пневмоцилиндра 1А к электросекундомеру в составе лабораторного стенда.

3. Установить с помощью РД2 по манометру М3 давление  $p_3 = 1,5$  бара и отрегулировать клапан последовательности РПК на давление сброса в атмосферу, превышающее давление  $p_3$ .

4. Установить с помощью РД1 по манометру М4 магистральное давление  $p_m = 3,0$  бара, переключить 5/2-пневмораспределитель на выдвижении штока пневмоцилиндра 1А. С помощью регулируемого дросселя установить время выдвижения штока пневмоцилиндра 1А на полную величину хода в пределах  $t = 3-6$  с, используя для этого электросекундомер, срабатывающий по командам путевых электроконтактных датчиков Д1 и Д2 в составе пневмоцилиндра 1А. Зафиксировать отрегулированное время выдвижения  $t$ , величины давления  $p_1$  и  $p_2$  по манометрам М1 и М2 в рабочих полостях пневмоцилиндра 1А при  $p_3 = 1,5$  бара,  $p_m = 3,0$  бара и занести эти величины в таблицу 8.1.

5. Последовательно изменяя с помощью РД1 по манометру М4 величину магистрального давления  $p_m = 3,5; 4,0; 4,5$  и  $5,0$  бар, измерить время  $t$  выдвижения штока, давления  $p_1, p_2$  и полученные результаты занести в таблицу 8.1.

6. Настроить РД2 по манометру М3 на давление  $p_3 = 2,0$  бара и отрегулировать РПК на сброс давления, превышающего установленное значение. Выполнить замеры аналогично пунктам 4–5 и занести полученные результаты в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

$p_3 = 1,5$ бар					$p_3 = 2,0$ бар					$p_3 = 0$ бар				
$p_3$ , бар	$p_1$ , бар	$p_2$ , бар	$t$ , с	$F_2$ , Н	$p_3$ , бар	$p_1$ , бар	$p_2$ , бар	$t$ , с	$F_2$ , Н	$p_3$ , бар	$p_1$ , бар	$p_2$ , бар	$t$ , с	$F_2$ , Н
3,0					3,0					3,0				
3,5					3,5					3,5				
4,0					4,0					4,0				
4,5					4,5					4,5				
5,0					5,0					5,0				

7. Для определения скорости перемещения штока пневмоцилиндра 1А без нагрузки необходимо отключить подачу давления к пневмоцилиндру 2А и связать его бесштоковую полость с атмосферой путем отсоединения пневмошланга. Шток пневмоцилиндра 1А освобож-

дается от нагрузки  $F_2$ . Выполнить замеры аналогично пунктам 4 и 5, занести полученные результаты в таблицу 8.1.

8. Рассчитать усилие нагружения  $F_2$  при различных величинах давления питания  $p_3$ , используя выражение (8.2). Результаты занести в таблицу 8.1.

9. Рассчитать экспериментальную скорость движения штока исследуемого пневмоцилиндра  $V_3$ , используя длину хода поршня со штоком ( $L$ ) и время его перемещения ( $t$ ) по формуле  $V_3 = L / t$ .

10. Рассчитать теоретическую скорость движения штока исследуемого пневмоцилиндра  $V_T(y)$ .

11. Построить графические зависимости  $V_3 = f(F_2)$  и  $V_T = f(F_2)$  и провести их сравнительный анализ.

### Содержание отчета

1. Название, цель и содержание исследований.
2. Описание лабораторной установки.
3. Пневматические принципиальные схемы.
4. Таблицы с результатами экспериментов, расчеты теоретических зависимостей и графические зависимости  $V_3 = f(F_2)$  и  $V_T = f(F_2)$ .
5. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. С помощью каких элементов и каким образом устанавливаются требуемые величины давления воздуха в питающей магистрали?
2. Какими уравнениями описывается равномерное движение штока пневмоцилиндра?
3. Каким образом в лабораторной установке организована нагрузка на шток исследуемого пневмоцилиндра?
4. Какие параметры элементов пневмосхемы влияют на скорость движения штока пневмоцилиндра?
5. Какую функцию выполняет в пневмосхеме регулируемый клапан последовательности и какой принцип его работы?



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, Д. Н. Механика гидро-и пневмоприводов : учебник для вузов / Д. Н. Попов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 320 с., ил.

2. Богдан, Н. В. Техническая диагностика гидросистем / Н. В. Богдан, М. И. Жилевич, Л. Г. Красневский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2000. – 120 с.

3. Желтовский, Б. Ю. Исследования и испытания гидропневмосистем машин : учебно-методическое пособие для вузов / Б. Ю. Желтовский, М. Г. Халамонский, В. С. Шевченко. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 204 с.

Учебное издание

**ФИЛИПОВА** Людмила Геннадьевна  
**МАКОВСКАЯ** Ирина Антоновна  
**СОКОЛ** Валентина Александровна и др.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ ГИДРОПНЕВМОСИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-36 01 07  
«Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин»

Редактор *Е. О. Германович*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 15.02.2024. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 2,63. Тираж 50. Заказ 821.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.