Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
Профессионального образования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им.Р.Е.Алексеева

Кафедра «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

(Методические указания к лабораторной работе по курсу «Экспериментальная механика»)

Нижний Новгород
2008

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр
1	Цель работы	3
2	Основные расчетные зависимости	3
3	Описание лабораторной работы	8
4	Порядок выполнения работы	11
5	Представление результатов	12
	Литература	12

1 Цель лабораторной работы

1.1 Освоение методики определения чувствительности измерительных схем, составленных из тензорезисторов.
1.2 Изучение влияния на чувствительность мостовых схем вида симметрии мостовой схемы.
1.3 Изучение влияния на чувствительность мостовой схемы количества активных тензорезисторов.

2 Основные расчетные зависимости

Наиболее известной измерительной схемой, позволяющей с высокой точностью определять изменение сопротивлений, является мост Уитстона (рис.1). Он состоит из четырех последовательно соединенных сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4, источника питания и измерителя. К одной диагонали моста подключается источник питания постоянного или переменного тока, к другой – регистрирующий прибор. Мост Уитстона обычно изображается в виде ромба, стороны которого называются *плечами*. Плечо моста может состоять из одного или нескольких сопротивлений, соединенных различными способами (последовательно, параллельно, смешанно).

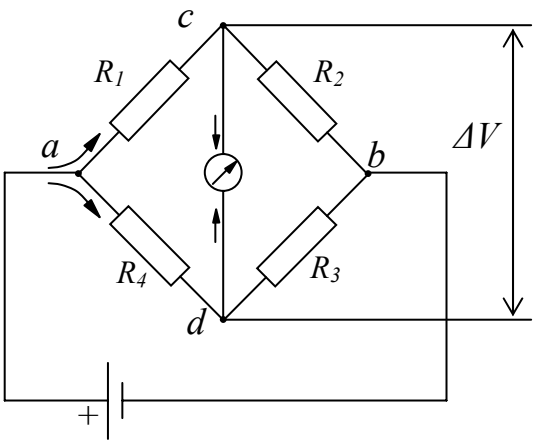


Рис.1 Мост Уитстона

Если $R_1R_3=R_2R_4$, то напряжение на выходе моста равно нулю, несмотря на наличие напряжения на входе, и мост находится в состоянии электрического равновесия (мост сбалансирован). Это важное свойство моста используется для измерения электрических сопротивлений. Если на выходе моста разность потенциалов не равна нулю и через измерительную цепь проходит ток, мост называется *неуравновешенным* или *несбалансированным*. При изменении активного сопротивления R_1 на ΔR_1 равновесие моста нарушается и через регистрирующий прибор протекает ток разбаланса I_p. Его значение зависит от степени разбаланса и напряжения питания V_n. Если сопротивление

регистрирующего прибора $R_{пр} \approx \infty$, то ток I_p практически равен нулю. Тогда выходной величиной будет напряжение разбаланса, которое определяется из соотношения

$$\Delta V = V_n \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = I_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}, \quad (1)$$

где I_0 – ток питания мостовой схемы. Оценкой качества работы мостовой схемы является ее чувствительность, которая может выражена как отношение приращения напряжения ΔV к деформации ε.

Важным является выбор типа моста. По виду симметрии плеч различают мосты:

- *несимметричные*, когда $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4$ (плечи имеют разные сопротивления);
- *симметричные относительно измерительной диагонали* (1 вид симметрии), когда $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = R_4 = R_n$ (рис.2*а*);
- *симметричные относительно питающей диагонали* (2 вид симметрии), когда $R_1 = R_4 = R$, $R_2 = R_3 = R_m$ (рис.2*б*);
- *мосты с взаимной симметрией*, или *равноплечие* мосты (3 вид симметрии), когда $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ (рис.2*в*);

В электротензометрии применяются только *симметричные* мосты.

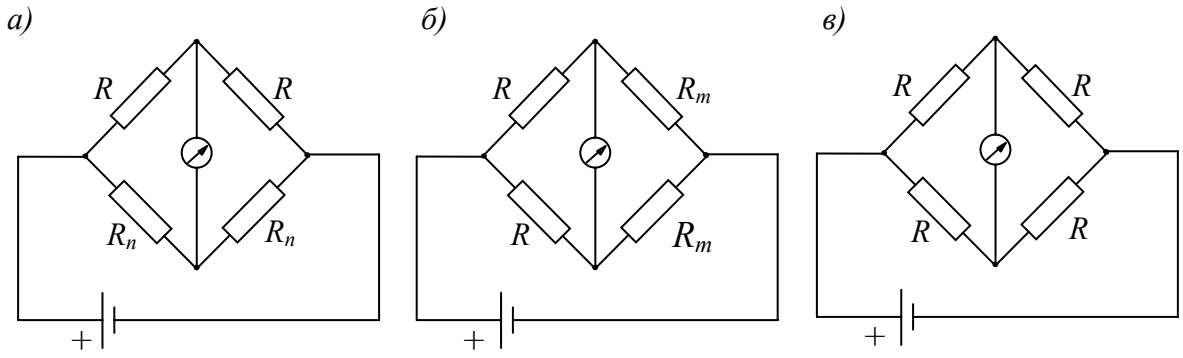


Рис. 2 Виды симметрии мостовых схем: *а* – 1 вида (симметричные относительно измерительной диагонали); *б* – 2 вида (симметричные относительно питающей диагонали); *в* – 3 вида (равноплечие мосты)

Если напряжение источника питания выбирается из условия максимально допустимого тока, чувствительность мостовой схемы зависит от числа рабочих тензорезисторов и их взаимного расположения.

При проведении тензометрических измерений наибольшее распространение получили четыре основные схемы включения тензорезисторов в мостовую схему (рис.3). Первая схема (рис.3*а*) используется в основном для измерения динамических деформаций, когда не требуется температурная компенсация, и состоит из одного активного тензорезистора R_1. Коэффициент чувствительности мостовой схемы выражается зависимостью

$$S_м = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I R_1 S, \quad (2)$$

где S – коэффициент тензочувствительности тензорезистора, I - допустимый ток через рабочий тензорезистор.

Для второй схемы (рис.3*б*) характерно наличие активного R_1 и компенсационного R_2 тензорезисторов. Компенсационный тензорезистор частично компенсирует влияние температуры. Коэффициент чувствительности схемы при $R_1 = R_2$ определяется зависимостью

$$S_м = \frac{1}{2} IR_1 S . \qquad (3)$$

Если используются активный R_1 и компенсационный R_2 тензорезисторы, подключенные по третьей схеме (рис.3*в*), то осуществляется температурная автокомпенсация. Коэффициент чувствительности в этом случае определяется по формуле (2).

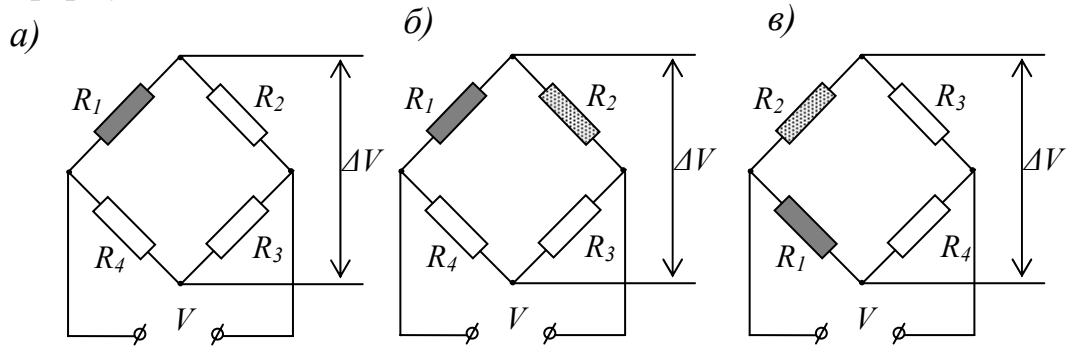


Рис.3 Основные схемы включения тензорезисторов в мостовую схему:
а – с активным тензорезистором R_1 без термокомпенсации; *б* – с активным R_1 и компенсационным R_2 тензорезисторами; *в* - с активным R_1 и компенсационным R_2 тензорезисторами, обеспечивающими автокомпенсацию.

Четвертую схему (рис.4) наиболее целесообразно применять в случае, когда под воздействием деформации сопротивления получают приращения ΔR_1 и ΔR_3 одного знака, а ΔR_2 и ΔR_4 – противоположного (рис.4*в*). При этом схема позволяет осуществлять температурную компенсацию, а коэффициент чувствительности при $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ определяется зависимостью

$$S_м = 2IRS . \qquad (4)$$

Наиболее широкое применение в тензоизмерениях находит метод схемной термокомпенсации, основанный на том, что два тензорезистора с одинаковыми характеристиками наклеиваются клеем на один и тот же объект в непосредственной близости друг от друга и включаются в смежные плечи симметричной мостовой схемы (рис.3б, рис.3в, рис.4). Тензорезистор, установленный (наклеенный) на недеформируемый от действия нагрузки материал, выполняет роль компенсатора температурных приращений активного тензорезистора. Так как сопротивления активного и компенсационного тензорезисторов одинаковы ($R_{акт} = R_{комп}$), то и и приращения сопротивлений от температуры будут одинаковыми ($\Delta R_{акт} = \Delta R_{комп}$). Учитывая, что на выходе моста электрический сигнал определяется алгебраической разностью приращений относительных сопротивлений смежных плеч, получаем

$$\left(\frac{\Delta R}{R_{акт}}\right)_т - \left(\frac{\Delta R}{R_{комп}}\right)_т = 0 .$$

Следовательно, одинаковые приращения сопротивлений смежных плеч, вызванные изменением температуры, не приводят к разбалансу моста. Компенсационный тензорезистор можно наклеивать также на недеформируемую пластинку из того же материала, что и объект исследования.

Для достижения полной термокомпенсации необходимо оба тензорезистора наклеивать на испытуемый объект и ориентировать их таким образом, чтобы измеряемая деформация вызывала у них противоположные по знаку приращения сопротивлений. Оба тензорезистора являются одновременно и активными и компенсационными (один относительно другого) и при идентичности их рабочих характеристик $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{T_1} - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{T_2} = 0$, то есть достигается полная компенсация температурных погрешностей.

Чувствительность моста при такой схеме увеличивается, так как оба тензорезистора участвуют в измерении деформации.

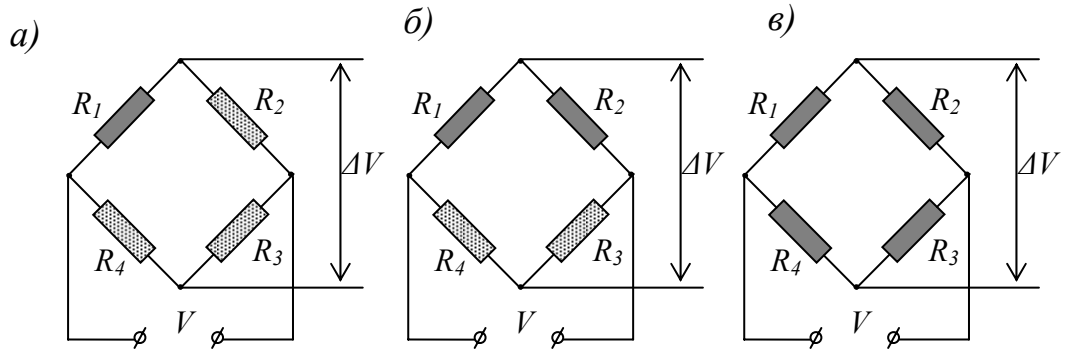


Рис.4 Схемы включения активных тензорезисторов в равноплечий мост:
а – активный R_1, компенсационные R_2, R_3, R_4 ; ***б*** – активные R_1, R_2, компенсационные R_3, R_4; ***в*** – активные R_1, R_2, R_3, R_4 (они же компенсационные).

Напряжение разбаланса ΔV в мВ при $R_{пр} \approx \infty$ равно:

для 1 вида симметрии моста (относительно измерительной диагонали)

$$\Delta V = V_n \frac{a}{4}\frac{\Delta R}{R}10^3 = \frac{I_0 Rna}{2(1+n)}\frac{\Delta R}{R}, \qquad (5)$$

при $V_n = 2\cdot 10^{-3} I_0 \frac{Rn}{1+n}$; тогда $S_м = V_n \frac{a}{4} S\cdot 10^3$ (6)

для 2 вида симметрии моста (относительно питающей диагонали)

$$\Delta V = V_n \frac{ma}{(1+m)^2}\frac{\Delta R}{R}10^3 = \frac{I_0 Rma}{2(1+m)}\frac{\Delta R}{R}, \qquad (7)$$

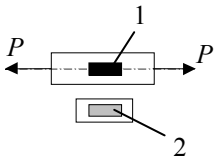
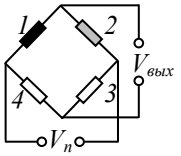
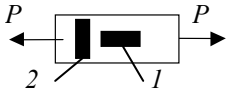
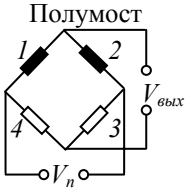
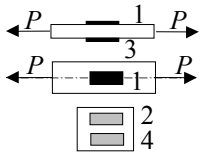
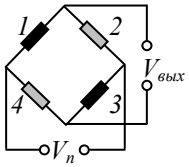
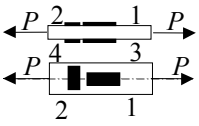
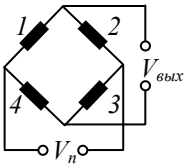
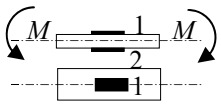
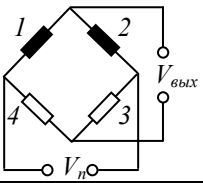
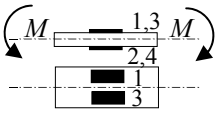
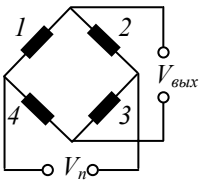
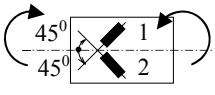
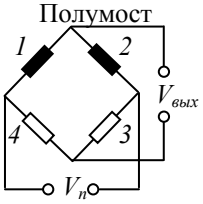
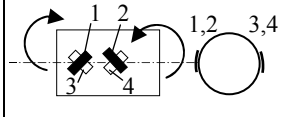
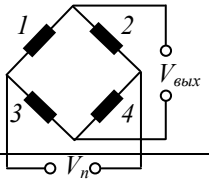
при $V = 0{,}5\cdot 10^{-3} I_0 R(1+m)$; тогда $S_м = V_n \frac{ma}{(1+m)^2} S\cdot 10^3$ (8)

для 3 вида симметрии моста (с взаимной симметрией)

$$\Delta V = V_n \frac{a}{4}\frac{\Delta R}{R}10^3 = \frac{I_0 Ra}{4}\frac{\Delta R}{R}, \qquad (9)$$

при $V = 1\cdot 10^{-3} I_0 R$; тогда $S_м = V_n \frac{a}{4} S\cdot 10^3$. (10)

Таблица 1 Варианты размещения тензорезисторов

№№ схем	Измерительная нагрузка	Расположение тензорезисторов на объекте исследования	Включение тензорезисторов в мост	Выходное электрическое напряжение моста, В	Скомпенсированные величины
1	***P*** (растяжение-сжатие)		Полумост 	$V_{вых} \approx \frac{V_n}{4}\frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{4} S$, В	Температура
2	***P*** (растяжение-сжатие)		Полумост 	$V_{вых} \approx \frac{(1+\mu)}{4} V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{4}(1+\mu) S$, В	Температура
3	***P*** (растяжение-сжатие)		Полный мост 	$V_{вых} \approx \frac{V_n}{2}\frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{2} S$, В	Температура, изгиб
4	***P*** (растяжение-сжатие)		Полный мост 	$V_{вых} \approx \frac{1+\mu}{2} V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{2}(1+\mu) S$, В	Температура, изгиб
5	**M** (изгиб)		Полумост 	$V_{вых} \approx \frac{V_n}{2}\frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{2} S$, В	Температура, растяжение-сжатие
6	**M** (изгиб)		Полный мост 	$V_{вых} \approx V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_м = V_n S$, В	Температура, растяжение-сжатие
7	$\mathbf{M_к}$ (кручение)		Полумост 	$V_{вых} \approx \frac{V_n}{2}\frac{\Delta R}{R}$ $S_м = \frac{V_n}{2} S$, В	Температура, растяжение-сжатие, изгиб
8	$\mathbf{M_к}$ (кручение)		Полный мост 	$V_{вых} \approx V_n \frac{\Delta R}{R}$ $S_м = V_n S$, В	Температура, растяжение-сжатие, изгиб

В формулах (5) – (10) обозначено V_n - напряжение питания моста в вольтах; I_0 - ток питания моста в мА; a – число активных плеч моста с равными относительными приращениями сопротивления; $m = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$; $n = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$.

Варианты размещения тензорезисторов на объекте и способы их соединения в схемы приведены в таблице 1, где обозначены:

- активные тензорезисторы;
- компенсационные тензорезисторы на пластинке.

3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.5) для изучения чувствительности схемы при различных способах включения тензорезисторов в измерительную схему представляет собой основание (9) с двумя цилиндрическими опорами (3), на которые опирается балка (1) прямоугольного поперечного сечения. К концам балки (1) приложены равные усилия, создаваемые с помощью траверсы (4), подвешенной к концам балки на шарнирно соединенных с ней стержнях (5). К середине траверсы с помощью шарнирно скрепленного с траверсой стержня (8) подвешена тарелка (6), на которую устанавливаются грузы (7) заданной массы. Прогиб балки (1) измеряется в середине балки относительно неподвижных опор (3) с помощью индикатора ИЧ-1 (10) часового типа с ценой деления шкалы 0,01 мм. На участке балки (1) между опорами (3) в продольном направлении наклеены тензорезисторы (2) (на нижнюю и верхнюю поверхности балки), а также на отдельную металлическую пластинку. Схемы расположения тезорезисторов на балке и пластине, а также их нумерация приведены на рис.6.

Электрическая схема соединений тензорезисторов к пульту аппаратуры приведена на рис.7. Питание мостовой схемы осуществляется от источника постоянного тока (4) напряжением 0…10 В, который в свою очередь питается от сети переменного тока напряжением 220 В. Провода идущие от источника постоянного тока подсоединяются к клеммам «**Б**» на пульте (1).

Тензорезисторы, наклеенные на балку и компенсационную пластинку, нумерация которых приведена на рис.6, соединяются в соответствующие мостовые схемы согласно табл.1. Для этого провода (6), идущие от тензорезисторов, подсоединяются к клеммам (3) пульта (1). Начальную балансировку моста осуществляют потенциометром (8) поворотом ручки (2) на пульте (1).

Напряжение разбаланса соответствующей мостовой схемы измеряется вольтметром (5), который подсоединяется проводами к клеммам (**Р**) пульта (1). Напряжение питания контролируется вольтметром блока питания (4).

Характеристики используемых тензорезисторов приведены в таблице 2.

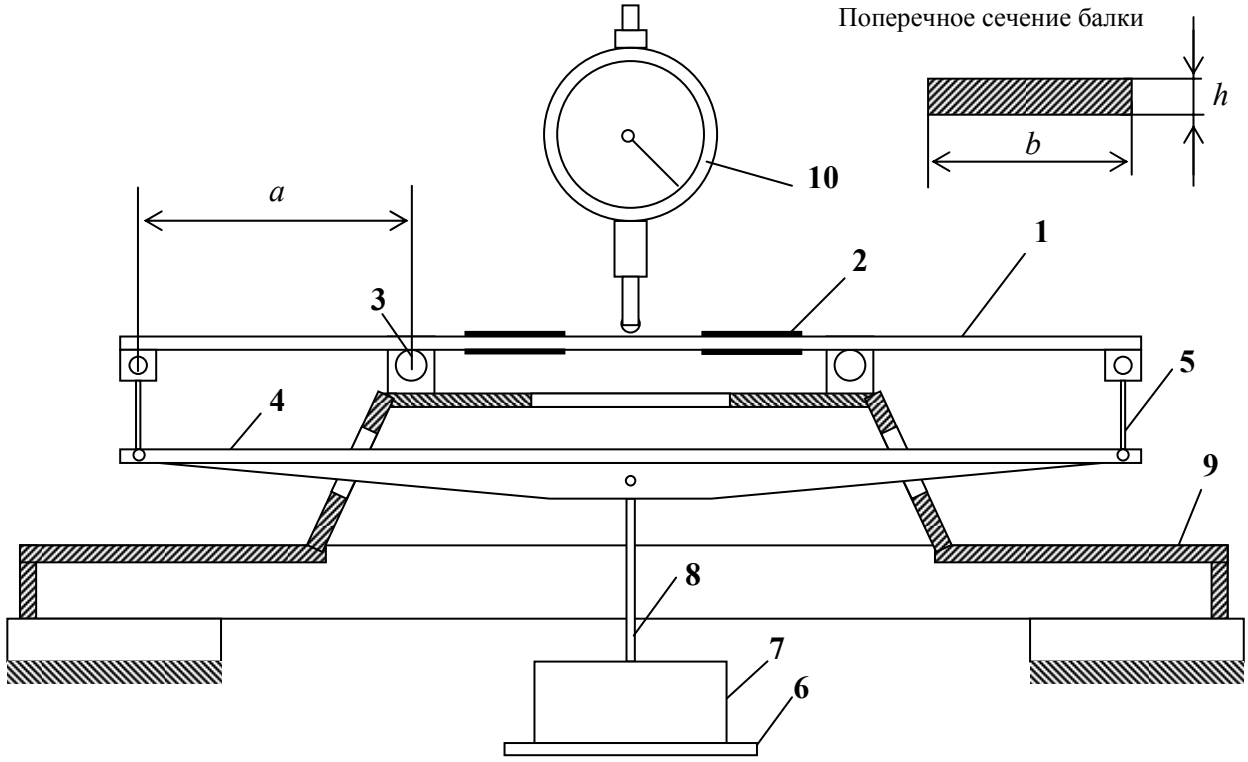
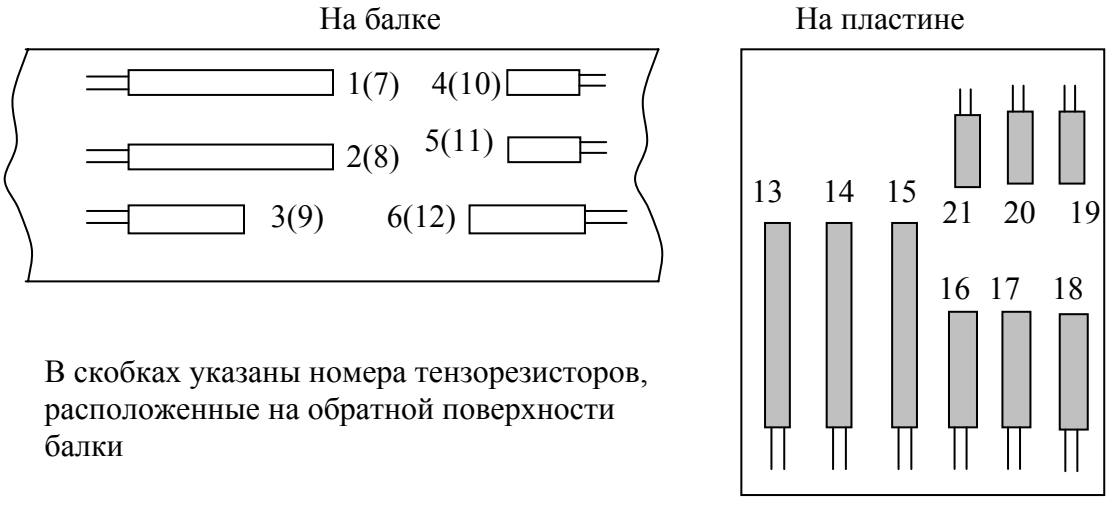


Рис.5 Схема лабораторной установки

1- балка; 2- тензорезисторы; 3- цилиндрические опоры; 4- траверса; 5- стержни-тяги; 6- тарелка для установки грузов; 7- грузы; 8- стержень тарелки; 9- основание (корпус); 10- индикатор часового типа ИЧ-1.



В скобках указаны номера тензорезисторов, расположенные на обратной поверхности балки

Рис. 6 Схема расположения тензорезисторов

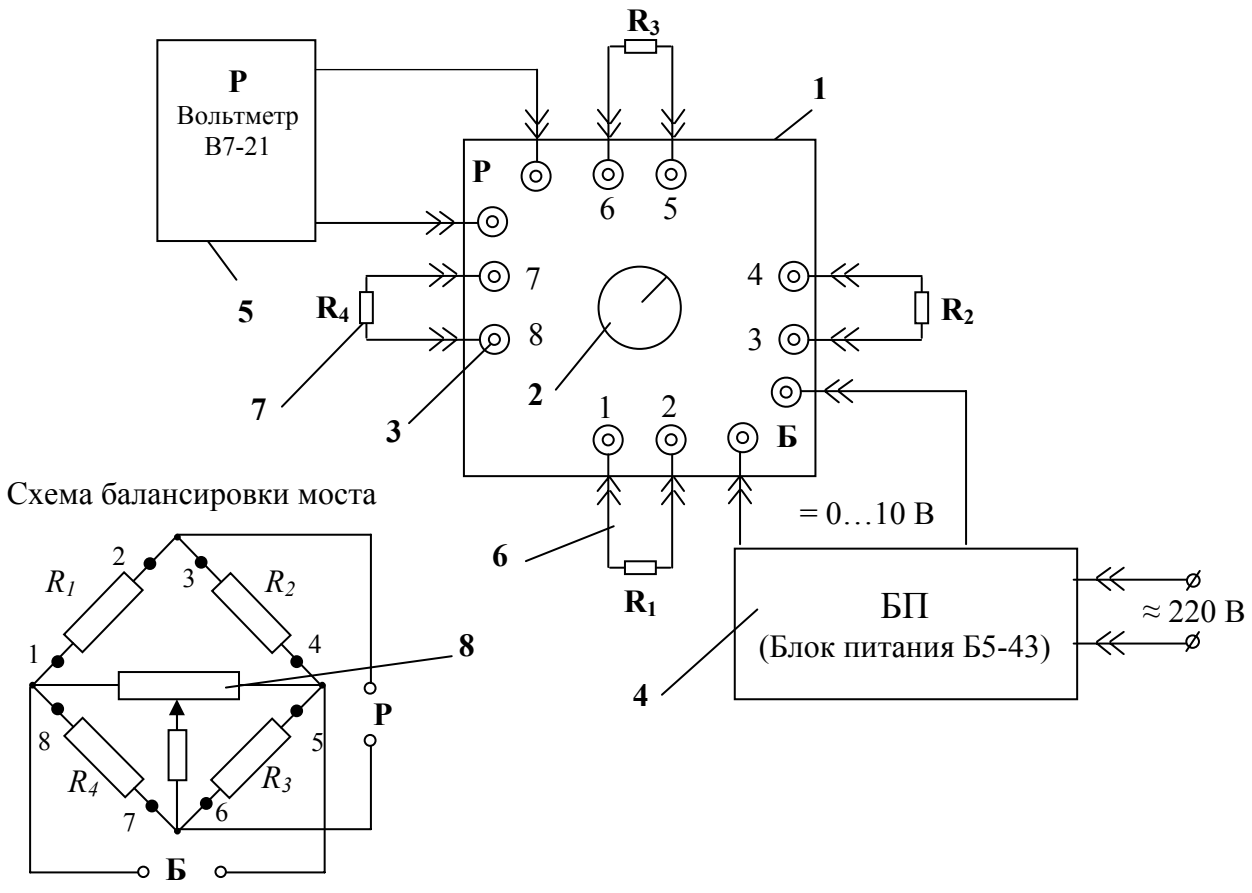


Рис.7 Электрическая блок-схема соединений аппаратуры

1-пульт для формирования мостовой схемы и ее балансировки; 2-ручка балансировки моста; 3-клеммы для подсоединения проводов; 4-блок питания; 5-регистратор (вольтметр В7-21); 6-соединительные првода; 7-подключаемые тензорезисторы; 8-балансировочный резистор.

Таблица 2 Характеристики балки и тензорезисторов

Характеристика	Обозначение	Ед. изм.	Номера тензорезисторов на рис.6		
			1,2,7,8,13,14,15	3,6,9,12,16,17,18	4,5,10,11,19,20,21
Тензорезисторы					
База	*l*	мм	23	10	5
Сопротивление	*R*	Ом	701,6	99,37±0,12	99,62±0,12
Допустимый ток	*I*	мА	22	14	22
Коэффициент тензочувствительности	*S*	-	2,01	2,10	2,04
Балка					
Расстояние до опоры	*a*	мм	200±1		
Ширина балки	*B*	мм	40,2±0,1		
Толщина балки	*h*	мм	3,73±0,2		

4 Порядок выполнения работы

4.1 Из тензорезисторов, указанных на схеме рис.6, собирается мостовая схема в соответствии с рис.7 и вариантом задания по табл.3. Вариант задания выдает преподаватель.

4.2 Проверяется работоспособность схемы путем поворота ручки (2) на пульте (1) рис.7). При повороте ручки должно изменяться напряжение разбаланса мостовой схемы, фиксируемое вольтметром (5) (рис.7).

4.3 На источнике постоянного тока (4) устанавливается необходимое напряжение питания мостовой схемы. Величина напряжения контролируется дополнительным вольтметром, не указанным на схеме рис.7.

4.4 В протокол испытаний (табл.4) записываются необходимые характеристики тензорезисторов (табл.2) и напряжение питания мостовой схемы.

4.5 Шкала индикатора (10) устанавливается на нулевую отметку при положении балки без нагрузки (рис.5).

4.6 Поворотом ручки (2) на пульте (1) балансируют мостовую схему, добиваясь нулевых показаний вольтметра (5) (рис.7).

4.7 На грузовую тарелку (6) устанавливаются грузы (7) массой 10 кг (рис.5).

4.8 Снимаются показания индикатора (10) (рис.5) и показания вольтметра (5) на рис.7 (напряжение разбаланса). Данные заносятся в протокол (табл.4).

4.9 Снимается груз. Записываются показания индикатора (10) (рис.5) и вольтметра (5) (рис.7).

Таблица 3 Варианты заданий

Вариант	№ схемы (табл.1)	Вид деформации	R_1	R_2	R_3	R_4	Способ включения ТР	Число активных ТР	База ТР, мм
			Номера подключаемых ТР на схеме						
1	1	Растяжение	1	13	14	15	Полумост	1	23
2			2	13	14	15			
3			3	16	17	18			10
4			6	16	17	18			
5			4	19	20	21			5
6			5	19	20	21			
7	1	Сжатие	7	13	14	15	Полумост	1	23
8			8	13	14	15			
9			9	16	17	18			10
10			12	16	17	18			
11			10	19	20	21			5
12			11	19	20	21			
13	3	Растяжение	1	13	2	14	Мост	2	23
14			3	16	6	17			10
15			4	19	5	20			5
16		Сжатие	7	13	8	14			23
17			9	16	12	17			10
18			10	19	11	20			5
19	5	Изгиб	1	7	13	14	Полумост	2	23
20			2	8	13	14			
21			3	9	16	17			10
22			6	12	16	17			
23			5	11	20	21			5
24			4	10	20	21			
25	6	Изгиб	1	7	2	8	Мост	4	23
26			3	9	6	12			10
27			4	10	5	11			5

4.10 Повторяют пункты 3.6-3.9 не менее трех раз.
4.11 Устанавливается следующий вариант соединения тензорезисторов и повторяются пункты 3.5-3.10.
4.12 Выполняется обработка полученных результатов, которые заносятся в таблицу 4.

5 Представление результатов

Результаты измерений представляются в виде, показанном в таблице 4. На основании полученных выполняется оценка применимости расчетных зависимостей. Дается заключение об эффективности различного соединения ТР в мостовые схемы.

Таблица 4 Первичные данные и результаты обработки

Наименование характеристик	Номер опыта i	Варианты заданий			
		(1…12)	(13…18)	(19…24)	(25…27)
Напряжение питания моста V_n, В	-				
Прогиб балки f_i, мм	1				
	2				
	3				
Прогиб балки средний f, мм	1-3				
Напряжение выхода $V_{вых\ i}$, мВ	1				
	2				
	3				
Напряжение выхода среднее $V_{вых}$, мВ	1-3				
Коэффициент тензочувствительности S	-				
Относительная деформация на наружной поверхности балки $\varepsilon = \frac{4fh}{a^2}$, где h и a приведены в табл.2	-				
Экспериментальное значение $S_м = \frac{V_{вых}}{\varepsilon}$, мВ	-				
Расчетное значение по формулам табл.1 $S_м$, мВ	-				
Расхождение результатов δ,%	-				

Литература

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие/ под общей редакцией Б.С.Касаткина.-Киев.Наукова думка. –1981.
2. Описания и паспорта приборов.

Описание составил
Доцент, к.т.н. В.Д.Вешуткин