

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ГРАЖДАНСКИХ, ПРОМЫШЛЕННЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНИКИ

ТАРИРОВКА ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРА

А.В. Калмакова¹, П. Дхар¹, О.Е. Узинцев²

¹Кафедра строительных конструкций и сооружений
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

²Кафедра автоматики, информатики и систем управления
Факультет прикладной математики и математической физики
Московский государственный индустриальный университет
ул. Автозаводская, 16, Москва, Россия, 115280

Тарировка электротензометра проводится с целью установить, какому напряжению σ или относительному удлинению соответствует одно деление шкалы прибора. Удобнее выражать цену деления в относительной деформации ϵ . В статье предлагается определить фактическую цену деления шкалы автоматического измерителя деформаций (АИД-4) в комплексе с тензодатчиками конкретного типа тензорезистора на тарировочной балке. Приведен порядок вычисления среднего значения цены одного деления по напряжениям σ и по относительным деформациям ϵ .

Вместо двух магазинов сопротивлений класса точности 0,05 и метрологической службы предложено, разработано и используется в процессе работы устройство для контроля работоспособности (балансировки и калибровки).

Ключевые слова: электротензомер, деформации, напряжения, тензорезистор.

Составные части и принцип работы электротензометра

Электротензомер — единый комплекс электрических приборов, с помощью которого производится дистанционное измерение фибровых деформаций материала конструкции в заданной точке.

В его состав входят тензорезисторы (датчики величины деформации), наклеенные на деформируемые волокна исследуемой конструкции, автоматический электронный измеритель деформаций АИД-4, коммутатор для поочередного включения тензорезисторов в цепь — это автоматический 100-позиционный прецизионный переключатель АП-3, источник электропитания и соединительные кабели (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид тензометрического комплекса

Тензометрический комплекс работает по схеме уравнивающегося электрического моста Уинстона. Основными элементами этой системы являются четыре резистора, образующие плечи замкнутого контура, и переменный уравнивающий баланс моста резистор. В диагональ контура включен усилитель сигнала разбаланса моста с автоматической балансировкой и шкалой со стрелками (рис. 2).

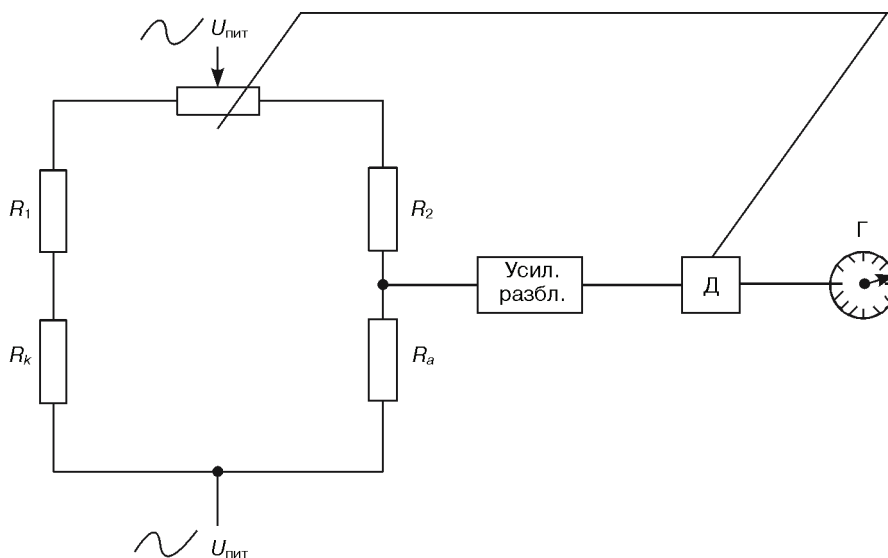


Рис. 2. Схема электрического моста Уинстона:

R_a — тензорезистор активный; R_k — тензорезистор компенсационный; Γ — шкала отсчета величины относительной деформации; R_1 и R_2 — резисторы внутреннего полумоста; D — двигатель отработки разбаланса моста

Если мост уравновешен, то в диагональной цепи ток отсутствует. Это имеет место при следующем соотношении сопротивлений резисторов:

$$R_a \cdot R_2 = R_k \cdot R_1.$$

Тензорезистор R_a , называемый активным, наклеен на деформируемые волокна в заданной точке и испытывает те же деформации. При этом изменяется величина

его омического сопротивления R_a на величину ΔR_a , в результате чего в диагональной цепи возникает ток, который приводит в действие самобалансирующуюся систему АИД-4. Величина изменения отсчетов по шкале является величиной деформации тензорезистора и соответствующих волокон.

Компенсационный тензорезистор R_k является температурным, уравнивает плечи моста от влияния температурных флуктуаций. Он наклеивается на заведомо не деформируемые волокна конструкции или отдельную деталь с таким же, как у конструкции, коэффициентом теплового сопротивления.

Количество активных тензорезисторов, наклеиваемых на исследуемую конструкцию, не должно превышать 99. Тензорезисторы R_a и R_k образуют внешний полумост, а R_1 и R_2 образуют внутренний полумост, R_6 является уравнивающим переменным резистором, связанным механической схемой с двигателем Д обратной связи.

Электротензометрический метод измерения деформации используется при выполнении всех лабораторных работ по различным типам строительных конструкций.

На рис. 3 представлен автоматический электронный измеритель деформаций АИД-4 [1] для полных тензорезисторных мостов и полумостов, предназначенный для статических и медленно меняющихся деформаций (механических напряжений) в элементах строительных конструкций, осуществляемых с помощью тензорезисторных датчиков, а также для измерения усилий, давлений, перемещений, прогибов и других механических параметров.

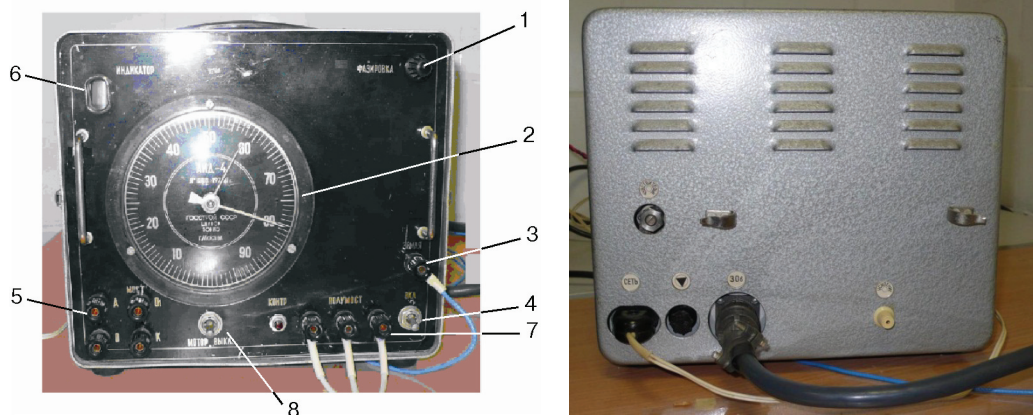


Рис. 3. Автоматический измеритель деформаций АИД-4:

1 — балансировка по фазе; 2 — шкала со стрелками; 3 — клеммы заземления; 4 — выключатель питания; 5 — клеммы для подключения проводов: А — от активных тензодатчиков, К — от компенсационного, О — общий; 6 — индикатор настройки; 7 — полумост; 8 — тумблер вкл/выкл мотора Д

Для измерения в большом числе точек АИД-4 может использоваться в комплекте с автоматическим 100-позиционным прецизионным переключателем АП-3 [2] (рис. 4), который предназначен для коммутации внешних полумостов, составленных из тензорезисторов и их поочередного соединения с электронными измерителями деформаций.



Рис. 4. Автоматический 100-позиционный прецизионный переключатель АП-3

Переключатель АП-3 содержит ламельный барабан (ЛБ), щеточный узел, два электромагнита шагового механизма, кодовый диск и кнопку КН. Ламельный барабан имеет на внешней цилиндрической поверхности два ряда ламелей: ряд активных ламелей и ряд компенсационных ламелей. В каждом ряду по 100 ламелей, которым присвоены номера от 0 до 99. Все активные ламели, кроме 99-й, выведены на вход переключателя и с помощью разъемов соединяются с активными датчиками внешних полумостов.

В процессе работы возникает необходимость балансировки измерительного моста. Для этого разработано устройство для контроля работоспособности (балансировки и калибровки) (рис. 5). Для балансировки необходимо выключить тумблер «Мотор выкл.» и отключить внешний измерительный полумост, т.е. на переключателе АП-3 установить канал с неподключенными тензорезисторами. Тумблер «Изм./Настр.» на устройстве для контроля работоспособности (балансировки и калибровки) поставить в состояние «Настр.» (режим настройки), а тумблер «Калиб./Бал.» в положение «Бал.» (режим бансировки), после чего включить тумблер «Мотор выкл.» и на шкале со стрелками установить стрелки так, чтобы маленькая стрелка указывала на значение 50, а большая на значение 0.

Вследствие того, что тензометрический комплекс является измерительным, то необходимо не реже одного раза в год проводить калибровку АИД-4. Для этого нужно провести балансировку измерительного моста, затем поставить тумблер «Калиб./Бал.» в положение «Калиб.». Далее поочередным переключением тумблера «Мин./Макс.» (рис. 4) добиться разности максимального и минимального значения показаний АИД-4 равным 866, после чего зафиксировать положение потенциометра при значении 866 для исключения случайной регулировки изменения положения.

Устройство для контроля работоспособности (балансировки и калибровки) состоит из корпуса, кабелей подключения к АИД-4 и трех переключателей режимов.

Электрическая схема устройства для контроля работоспособности (балансировки и калибровки) состоит из двух прецизионных резисторов (рис. 5) величиной по 100 Ом каждый и точностью 0,02 для балансировки измерительного моста, а также двух резисторов величиной по 90 Ом с точностью 0,02 для калибровки.

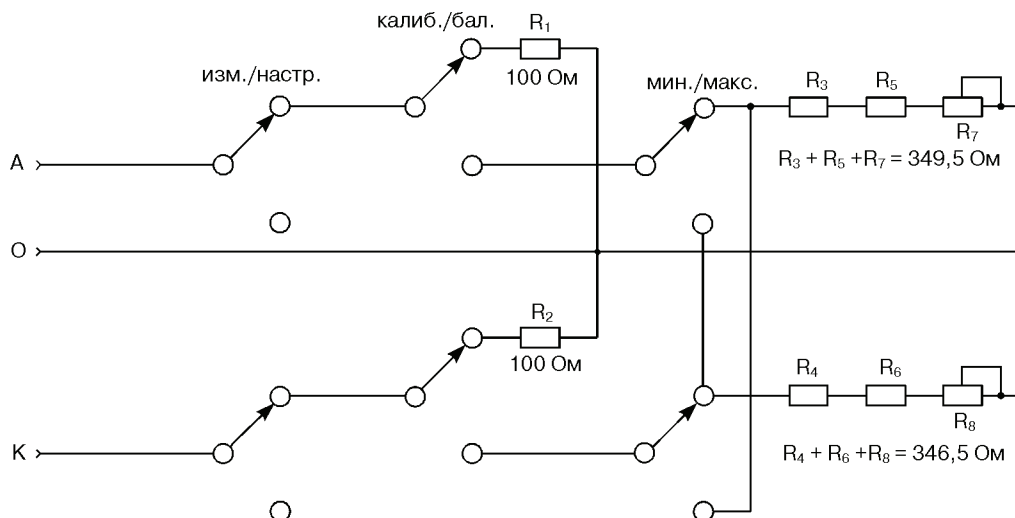


Рис. 5. Электрическая схема устройства для контроля работоспособности (балансировки и калибровки)

Тензорезисторы, их назначение и основные характеристики

Основным рабочим элементом тензорезистора является плоскопараллельная спираль или решетка из высокоомной очень тонкой проволоки или фольги, проклеенной между двумя слоями подложек из специальной конденсаторной бумаги или пленки (рис. 6).

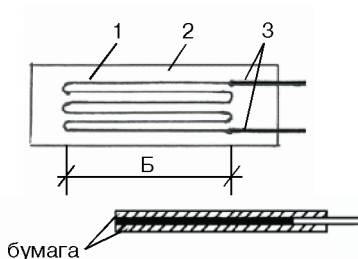


Рис. 6. Проводниковый проволочный петлевой тензорезистор:

- 1 — проволочная спираль; 2 — основа (подложка);
- 3 — контактные выпуски; Б — база тензорезистора

Проволочные тензорезисторы, используемые в тензометрическом комплексе, изготавливают на специальных навивочных станках.

Основными техническими характеристиками тензорезисторов являются следующие: база Б — длина мерного участка между концами петель спирали или решетки (см. рис. 6); сопротивление R в омах; тензочувствительность S — безразмерная величина, характеризующая степень способности разных тензорезисторов к изменению сопротивления при одинаковой деформации базы, выражается отношением

$$S = \Delta\epsilon_R / \Delta\epsilon_B,$$

где $\Delta\epsilon_R = \Delta R / R$; $\Delta\epsilon_B = \Delta B / B$ — предельная величина измеряемой деформации ϵ .

Наибольшее применение при статических испытаниях получили тензорезисторы с базой $B = 5 \div 50$ мм; $S = 1,8 \div 2,2$; $R = 100 \div 400$ Ом; $\varepsilon = 30 \cdot 10^{-5} \div 300 \cdot 10^{-5}$.

Тензорезисторы изготавливают на предприятиях точного приборостроения. Они поставляются в упаковках, на которых указаны гарантированные заводом значения основных технических характеристик данной партии изделий. При испытаниях металлических конструкций обычно используют тензорезисторы с базой 10 или 20 мм.

Тензочувствительность всех тензорезисторов, используемых в опыте, должна быть одинаковой. Это связано с тем, что масштаб шкалы автоматических измерителей деформаций зависит от их тензочувствительности. Номинальное значение одного деления шкалы соответствует $1 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц деформации активного тензорезистора. Поскольку для каждой конкретной подборки тензочувствительность датчиков может быть иная, то и цена деления шкалы (масштаб шкалы) будет иным.

Цена деления шкалы АИД-4 зависит от тензочувствительности S используемых тензорезисторов. Для сохранения номинальной цены деления шкалы АИД-4, равной $1 \cdot 10^{-5}$ единиц относительной деформации, регулятор масштаба необходимо установить в положение, соответствующее чувствительности тензорезисторов. Также с целью сохранения постоянной цены деления АИД-4, равной $1 \cdot 10^{-5}$, при использовании тензорезисторов определенной тензочувствительности производят регулировку масштаба шкалы с помощью подстроечного резистора, расположенного внутри корпуса прибора или использовать поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 3.

Тарировка электрических тензометров

Тарировка тензометрического комплекса заключается в установлении цены деления на шкале прибора АИД-4. Цена деления прибора для тензометрических измерений может устанавливаться либо в величинах относительных деформаций, либо в величинах напряжений. В последнем случае цена деления устанавливается только для определенного материала.

Для тарировки тензометров могут быть использованы различные тарировочные устройства, т.е. устройства, позволяющие воспроизводить заданные деформации или напряжения. Это возможно, например, при применении центрально растянутых стержней постоянного сечения (рис. 7 а), деформации удлинения и напряжения во всех сечениях которых одинаковы. Могут использоваться изгибаемые балки с участками «чистого изгиба» (рис. 7 б). Электрические тензометры помимо измерения деформаций волокон могут быть использованы для измерения прогибов и других перемещений, а также измерять деформации при быстро протекающих процессах (при действии динамической нагрузки). Чаще всего в качестве тарировочных устройств используются консольные балки равного сопротивления, в которых изгибающий момент и момент сопротивления изменяются по линейному закону. Главным свойством балок равного сопротивления является наличие рабочего участка, в пределах которого при данной нагрузке фибровые деформации во всех точках остаются постоянными. Иными словами, во всех случаях величины напряжений и относительных деформаций на участке установки тензо-

метров являются постоянными. Это свойство связано с геометрией балки. В плане балка имеет клинообразную форму, высота сечения h сохраняется одинаковой по всей длине (рис. 7 в). Балки изготавливают из низколегированной стали с последующим термоупрочнением.

В статье предлагается использовать тарировочную консольную балку равного сопротивления (рис. 7 в, г) с размерами: $l = 300$ мм, $b = 50$ мм, $h = 7,07$ мм.

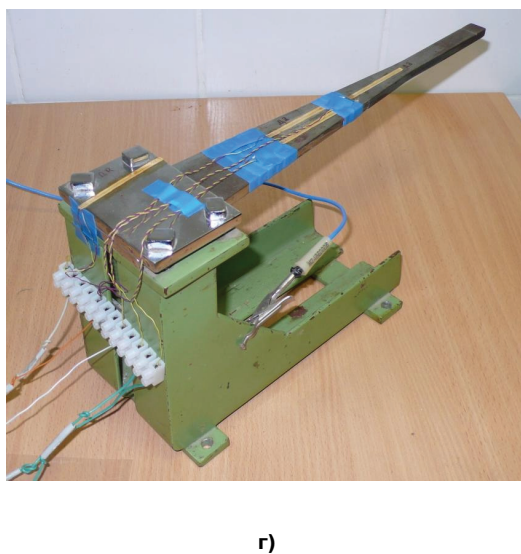
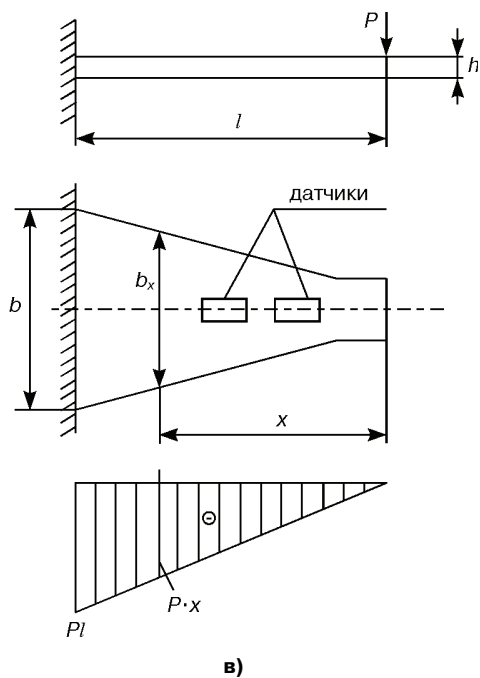
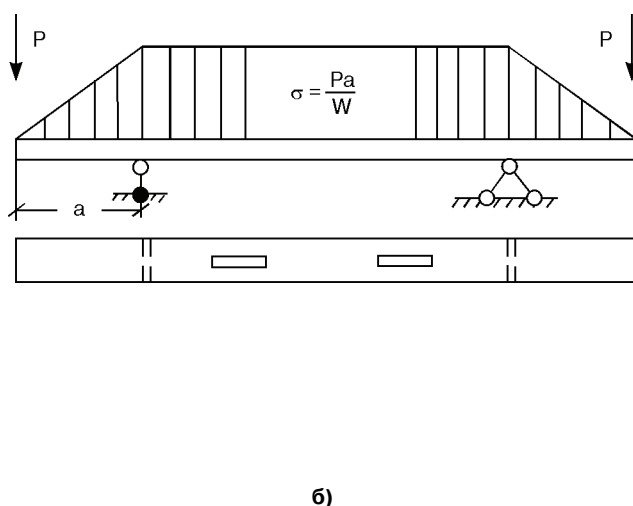
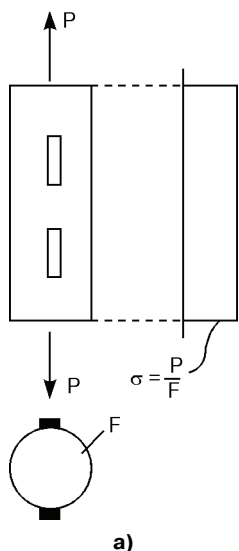


Рис. 7. Тарировочные устройства

а — с растянутым стержнем постоянного сечения; б — с изгибаемой балкой, имеющей участок «чистого изгиба»; в — с изгибаемой консольной балкой; г — консольная балка с наклеенными тензорезисторами, колодкой и проводом заземления

Изгибающий момент в произвольном сечении тарировочной балки

$$M_x = Px,$$

где P — нагрузка, приложенная к концу балки; x — расстояние от конца балки до рассматриваемого сечения.

Момент сопротивления поперечного сечения в зависимости от координаты x равен

$$W_x = b_x h^2 / 6 = Kx h^2 / 6. \quad (1)$$

Напряжение в любой точке участка наклейки тензодатчиков (установки тензометров) равно

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = \frac{Px6}{Kxh^2} = \frac{6P}{Kh^2} = \frac{6P6}{0,77^2} = 72P, \quad (2)$$

где коэффициент $K = b/l = 50/300 = 1/6$; h — толщина тарировочной балки 7,7 мм.

Теоретически величина деформаций крайних волокон такой балки, при действии сосредоточенной силы P на конец консоли выражается формулой

$$\varepsilon_T = 6Pl/E \cdot b \cdot h^2, \quad (3)$$

где E — модуль упругости стали. Модуль упругости материала тарировочной балки $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

По данным механической тензометрии деформации ε вычисляют по формуле

$$\varepsilon_M = \Delta T_{cp} \cdot C/B, \quad (4)$$

где $\Delta T_{cp} = 0,5 \cdot (\Delta T_1 + \Delta T_2)$ — среднее значение величины приращения отчетов по двум тензограммам; C — цена деления шкалы; B — база тензограма.

При $C = 0,001$ мм и $B = 50$ мм получаем

$$\varepsilon_M = \Delta T_{cp} \cdot 10^{-5}. \quad (5)$$

Электротензометрическим методом деформации вычисляют по формуле

$$\varepsilon_3 = \Delta n_{cp} \cdot K_M \cdot 10^{-5}, \quad (6)$$

где Δn_{cp} — средняя величина приращения отчетов по шкале АИД-4 для всех тарируемых тензорезисторов.

Из условия $\varepsilon_M = \varepsilon_3$ находят масштабный коэффициент

$$K_M = \Delta T_{cp} / \Delta n_{cp}. \quad (7)$$

В тех случаях, когда тарируемые тензодатчики предназначены для испытания конструкций, изготовленных из того же материала, что и материал тарировочной балки, при тарировке устанавливается цена одного деления в напряжениях.

Порядок проведения работы на тензометрическом комплексе

1. *Измерение напряжений σ* . На рабочий участок балки равного сопротивления (БРС) наклеивают несколько тарируемых тензорезисторов $B = 50$ мм, $R_a = 400$ Ом, $R_c = 400$ Ом и подключают через коммутатор АП-3 к АИД-4.

Предварительно вычисляются теоретические значения приращений напряжений $\Delta\sigma$ на каждом этапе нагружения тарируемой балки и результаты заносятся в табл. 1. Нагружение производится этапами, на каждом этапе нагрузка увеличивается на 40 кН. Снимаются начальные (нулевые) показания регистрирующего прибора, а затем снимаются отсчеты на каждом этапе нагружения и разгрузки. После каждого изменения нагрузки производится (до снятия отсчета) выдержка 30—60 с. Разница начального и конечного (при полном снятии нагрузки) отсчетов не должна превышать половины деления шкалы прибора.

Определяется цена одного деления шкалы прибора на каждом этапе нагружения и разгрузки $\sigma_i = \Delta\sigma/\Delta n$, а затем — среднее значение цены одного деления:

$$\sigma_{\text{cp}} = \frac{1}{i} \sum_1^i \sigma_i. \quad (8)$$

2. *Измерение деформаций ϵ* . Вычисляют ϵ_T по формуле (3) и ϵ_M по формуле (5), расхождение между ними не должно превышать точности прибора $0,5 \cdot 10^{-5}$.

Проверка работоспособности АИД-4. Подготовка прибора к работе

Для проверки работоспособности АИД-4 используется устройство для контроля работоспособности (балансировки и настройки).

Порядок выполнения работы:

1) заземлить прибор (клемму «Земля» соединить с линией заземления или с металлической массой исследуемой конструкции, на которой укреплены тензорезисторы);

2) включить кабель питания в сеть 220 В;

3) поставить тумблер питания «Мотор выкл.» в положение «Выкл.»;

4) включить тумблер «Вкл.» на АИД-4;

5) отключить кабель связи переключателя АП-3 с АИД-4;

6) прогреть прибор АИД-4 в течение 15—20 мин.;

7) включить тумблер устройства для контроля работоспособности (балансировки и настройки) в положение «Настр.»;

8) ручкой управления «Фазировка» на АИД-4 установить на шкале измерения значение 500 (маленькая стрелка должна указывать на значение «50», а большая стрелка на «0»);

9) порядок проведения калибровки АИД-4: на устройстве для контроля работоспособности (балансировки и настройки) включить тумблеры в режим «Настр.»

и «Калибр.» и, переключая тумблер «Макс./Мин.», добиться разности максимального значения шкалы прибора и минимального 866; если это значение не соответствует данному значению, то регулировкой потенциометра «Чувствительн.» добиться, чтобы разность была 866 (в соответствии с таблицей);

10) работа в режиме «Измерение». Тумблер «Мотор выкл.» поставить в положение «Выкл.», установить на устройстве для контроля работоспособности (балансировки и настройки) режим «Изм.», подключить кабель связи АИД-4 с АПЗ, установить на лимбе АПЗ номер измеряемого датчика;

11) включить на АИД-4 тумблер «Мотор выкл.»;

12) снять показания со шкалы АИД-4;

13) на АП-3 переключить следующий датчик и снять показания со шкалы АИД-4;

14) такие же операции провести для всех подключенных датчиков и снять показания с нужных датчиков;

15) нагрузить консольную балку эталонными грузами, снять показания с нужных датчиков;

16) при необходимости можно изменить величину нагрузки и снять показания с нужных датчиков.

Таблица

Δφ	S						
	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
0	509	481	456	433	412	394	376
1	507	479	453	431	410	392	375
2	504	476	451	429	409	390	373
3	501	473	449	427	407	388	371
4	498	471	447	425	405	387	370
5	495	468	444	423	403	385	368
6	492	466	442	421	401	383	366
7	490	463	440	419	399	382	365
8	487	461	438	416	397	380	363
9	484	458	435	414	395	378	362

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Автоматический электронный измеритель деформаций АИД-4 для тензорезисторных мостов и полумостов. Краткое техническое описание. Инструкция по эксплуатации. — М.: Госстрой СССР ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Завод опытных конструкций, изделий и оборудования, 1986.
- [2] Автоматический 100-позиционный прецизионный переключатель АП-3: Краткое техническое описание. Инструкция по эксплуатации. — М.: Госстрой СССР ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Завод опытных конструкций, изделий и оборудования, 1986.

CALIBRATION OF STRESS METER

A. Kalmakova¹, P. Dkhar¹, O. Uzintsev²

¹Department of Building Structures and Constructions
Engineering faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

²Department of Automatics, Information and Management Systems
Applied Mathematics and Mathematical Physics Faculty
Moscow State Industrial University
Avtozavodskaya str., 16, Moscow, Russia, 115280

The purpose of calibration stress meter is to determine what strain σ or elongation of the scale corresponds to one unit. It is more convenient to express the division value of the strain. The paper proposes to determine the actual price of the scale division of Automatic Meter strain (AID-4) in conjunction with a specific type of strain gage load cell calibration on the beam, and is an order of calculating the average price of a division on stresses σ and the relative deformation ϵ .

Instead of two resistance boxes and metrological service proposed, developed and used in the process control device efficiency (balancing and calibration).

Key words: stress meter, strain, stress, strain gauge.