

Министерство образования Российской Федерации
Ухтинский государственный технический университет

Е.И. ФАНДЕЕВ, Б.А. ИВАНОВ, З.Х. ЯГУБОВ

**ПРАКТИКУМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН**

Часть 1

Учебное пособие

*Допущено учебно–методическим объединением
по образованию в области энергетики и электротехники
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям 551300, 654500 – «Электромеханика, электро-
техника и электротехнологии» и специальности 180400 – «Электропривод и
автоматика промышленных установок
и технологических комплексов»*

Ухта 2002

УДК 621.317.3 (075)
ББК 30.10 я7
Ф 21

Фандеев Е.И. и др. Практикум по измерениям электрических и неэлектрических величин. Ч.1: Учебное пособие для вузов / Е.И. Фандеев, Б.А. Иванов, З.Х. Ягубов. – Ухта: УГТУ, 2002. – 76 с.: ил.

ISBN 5-88179-273-4

Пособие представляет сборник многовариантных задач и расчётных заданий по электрическим измерениям электрических и неэлектрических величин. Предназначено для закрепления теоретических знаний по соответствующим разделам дисциплин «Метрология, стандартизация и сертификация», «Элементы систем автоматики», а также по дисциплинам «Электрические измерения и приборы» и «Технологические измерения и приборы». Даются методические рекомендации по решению задач и выполнению заданий, приводятся теоретические предпосылки и примеры решений. Материал пособия ориентирован на студентов всех форм обучения специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», а также студентов других родственных специальностей, в учебных планах которых предусмотрены дисциплины, связанные с измерением физических величин электрическими методами.

Рецензенты: Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Южно-Российского государственного технического университета. Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная и медицинская техника» ЮРГТУ Никитенко Н.Ф.
Главный метролог, начальник отдела метрологии и автоматизации производства ОАО «Лукойл НК Коми ТЭК» Храмов В.А.

© Ухтинский государственный технический университет, 2002
© Фандеев Е.И., Иванов Б.А., Ягубов З.Х., 2002

ISBN 5-88179-273-4

ВВЕДЕНИЕ

Специалистам по направлениям 551300 (бакалавриат и магистратура) и 654500 (инженерная подготовка) «Электротехника, электромеханика и электротехнология» необходимы прочные знания основ метрологии, электроизмерительной техники и принципов построения средств измерения электрических и неэлектрических величин. Эти знания студенты приобретают, изучая дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация», «Элементы систем автоматики», «Электрические измерения и приборы» и «Технологические измерения и приборы». В значительной мере это относится и к инженерам-электрикам по специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

Современный регулируемый электропривод обязательно включает в себя первичные измерительные преобразователи (датчики) скоростей, угловых и линейных перемещений, токов, напряжений и крутящих моментов, а также цифровые и аналоговые измерительные приборы (измерительные преобразователи и устройства визуализации). Автоматизацию промышленных установок невозможно осуществить без средств измерения таких параметров, как температуры рабочих органов и технологических сред, давления в гидравлических и пневматических системах, расходы транспортируемых продуктов, уровни жидкости в резервуарах и других неэлектрических величин.

Закреплению теоретических положений, получаемых на лекциях, и их использованию в практической деятельности в значительной степени способствуют лабораторные работы и практические занятия, а также выполнение индивидуальных расчетных заданий.

Настоящее учебное пособие представляет собой сборник задач и заданий, которые предназначены для аудиторных практических занятий, а также для самостоятельной работы студентов. Материал сформирован в три разде-

ла. В первом приведены задачи по измерению электрических величин, оценке погрешностей средств и результатов измерений, выбору электроизмерительных приборов и определению их нормируемых метрологических характеристик. Во втором разделе даны задачи по измерению неэлектрических величин, выбору первичных измерительных преобразователей и приборов, оценке их метрологических свойств. В третьем разделе сформулировано несколько комплексных заданий по расчету измерительных преобразователей и приборов, определению нормируемых метрологических характеристик средств измерения неэлектрических величин.

В качестве методической помощи излагаются теоретические предпосылки, необходимые для решения задач, даются пояснения и примеры решения, а для проверки расчётов приводятся ответы.

Выполненное задание должно завершаться анализом результатов, выводами и рекомендациями по повышению точности измерения соответствующих физических величин. Каждая задача и задание в пособии имеет ряд вариантов исходных данных, что повышает уровень самостоятельности выполнения студентами необходимых расчетов. Номер варианта и сроки сдачи работы на проверку устанавливаются преподавателем. Оформление выполненного задания должно быть аккуратным и полностью соответствовать требованиям действующих стандартов.

Пособие рассчитано на студентов очной и заочной форм обучения специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», но им могут пользоваться студенты и других электротехнических специальностей, в учебных планах которых предусмотрены курсы, связанные с измерением физических величин электрическими методами. При составлении сборника авторы использовали и переработали некоторые из задач, приведённых в [1–13]. Для выполнения заданий, кроме лекций, рекомендуется использовать дополнительную литературу, которая указана в библиографическом списке в конце пособия.

Авторы выражают благодарность студентам кафедр «Электрификация и автоматизация технологических процессов» и «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» соответственно Ухтинского и Южно-Российского государственных технических университетов, которые принимали участие в разработке отдельных вопросов и подготовке рукописи к изданию, а также уважаемым рецензентам, сделавшим полезные замечания по содержанию и оформлению материала.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Н	–	номер варианта
НСХ	–	номинальная статическая характеристика
ОК	–	объект контроля
ПТР	–	полупроводниковый поликристаллический терморезистор
СИ	–	средство измерения
ТП	–	термопреобразователь
ТПС	–	термопреобразователь сопротивления
ТЭП	–	термоэлектрический преобразователь
ТХК	–	термопреобразователь хромель–копелевый
ТХА	–	термопреобразователь хромель–алюмелевый
ТПП	–	термопреобразователь платинородий–платиновый
ТВР	–	термопреобразователь вольфрамрений–вольфрамрениевый
ЧЭ	–	чувствительный элемент

1. ЗАДАЧИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. Выведите формулы для расчёта сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и R_3 многопредельного шунта для расширения пределов измерения магнитоэлектрического микроамперметра (см. схему на рис. 1.1) с током полного отклонения I_A и внутренним сопротивлением R_A . Новые пределы измерения токов: I_1 , I_2 и I_3 ($I_1 < I_2 < I_3$). Рассчитайте значения сопротивлений шунтирующих резисторов R_1 , R_2 и R_3 . Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1.1. Сопротивление R_A примите равным $200\ \Omega$. Определите цену деления C и чувствительность S прибора на каждом пределе измерения.

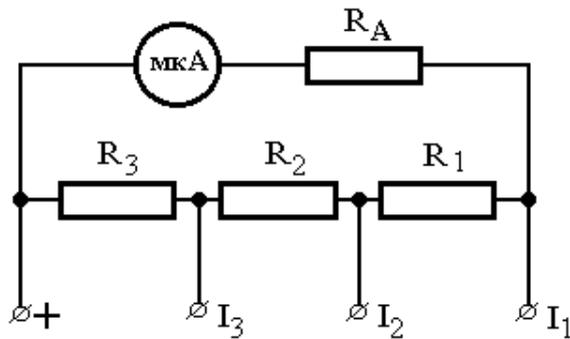


Рис. 1.1. Схема многопредельного амперметра

Таблица 1.1

П а р а м е т р	Н о м е р в а р и а н т а			
	1–5	6–10	11–15	16–20
I_A , мкА	1	10	25	50
I_1 , мкА	10	50	100	200
I_2 , мА	1	5	10	20
I_3 , А	0,5	1	2,5	5
Число делений шкалы	10	50	100	200

Формулы для расчёта имеют вид:

$$R_1 = R_A(k_2 - k_1) / k_2(k_1 - 1);$$

$$R_2 = R_A k_1 (k_3 - k_2) / k_2 k_3 (k_1 - 1);$$

$$R_3 = R_A k_1 / k_3 (k_1 - 1),$$

где k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты шунтирования, соответственно равные I_1/I_A , I_2/I_A и I_3/I_A . Ответы для 20 вариантов задачи приведены в табл. 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2

N	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , мОм	N	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , мОм
1	22	0,22	0,4	11	726	7,30	29,3
2	44	0,44	0,9	12	792	7,97	32,0
3	66	0,67	1,3	13	858	8,63	34,7
4	88	0,89	1,8	14	924	9,30	37,3
5	110	1,11	2,2	15	990	9,96	40,0
6	297	2,99	15,0	16	1056	10,6	42,7
7	347	3,48	17,5	17	1122	11,3	45,3
8	396	3,98	20,0	18	1188	12,0	48,0
9	446	4,48	22,5	19	1254	12,6	50,7
10	495	4,98	25,0	20	1320	13,3	53,3

Таблица 1.3

N	S ₁ , дел/мкА	S ₂ , дел/мА	S ₃ , дел/А	C ₁ , мкА/дел	C ₂ , мА/дел	C ₃ , А/дел
1–5	1	10	20	1	0,1	0,05
6–10	1	10	50	1	0,1	0,02
11–15	1	10	40	1	0,1	0,025
16–20	1	10	40	1	0,1	0,025

1.2. Определите сопротивления шунтирующего и добавочного резисторов, которые необходимо подключить к магнитоэлектрическому миллиамперметру с током полного отклонения I_0 , внутренним сопротивлением R_0 и числом делений шкалы α , чтобы измерять ток I и напряжение U . Вычислите

постоянные амперметра и вольтметра, а также их чувствительности. Данные для расчётов сведены в табл. 1.4.

Чтобы расширить предел измерения миллиамперметра, необходимо к его рамке подключить шунтирующий резистор, сопротивление которого рассчитывается по формуле $R_{ш} = R_0(k-1)^{-1}$, где k – коэффициент шунтирования, показывающий во сколько раз расширяется предел измерения прибора ($k = I/I_0$). Для создания на базе миллиамперметра вольтметра необходимо включить последовательно с рамкой прибора добавочный резистор с сопротивлением $R_d = R_0(m-1)$, где $m = U/(I_0 R_0)$. Ответы даны в табл. 1.5.

Таблица 1.4

N	I_0 , мА	R_0 , кОм	I, А	U, В	α , дел
1	50	3	2	600	200
2		2,8	2	600	200
3		2,6	1	400	100
4		2,4	1	400	100
5		2,2	0,5	200	50
6	100	2,1	5	500	50
7		2,0	4	500	50
8		1,9	2	400	100
9		1,8	2	400	100
10		1,7	1	400	100
11	150	1,6	6	600	150
12		1,4	6	600	150
13		1,2	3	600	150
14		1,0	3	400	100
15		0,8	1,5	400	100
16	200	0,7	5	500	100
17		0,6	4	500	100
18		0,5	2	500	100
19		0,4	1	200	50
20		0,3	0,5	200	50

Таблица 1.5

N	R _ш , Ом	R _д , кОм	C _А , А/дел	C _В , В/дел	S _А , дел/А	S _В , дел/В
1	76,9	9,0	0,01	3	100	1/3
2	71,8	9,2	0,01	3	100	1/3
3	137	5,4	0,01	4	100	0,25
4	126	5,6	0,01	4	100	0,25
5	244	1,8	0,01	4	100	0,25
6	42,9	2,9	0,10	10	10	0,10
7	51,3	3,0	0,08	10	12,5	0,10
8	100	2,1	0,02	4	50	0,25
9	94,7	2,2	0,02	4	50	0,25
10	189	2,3	0,01	4	100	0,25
11	41,0	2,4	0,04	4	25	0,25
12	35,9	2,6	0,04	4	25	0,25
13	63,2	2,8	0,02	4	50	0,25
14	52,6	1,7	0,03	4	33,3	0,25
15	88,9	1,9	0,015	4	66,7	0,25
16	29,2	1,8	0,05	5	20	0,20
17	31,6	1,9	0,04	5	25	0,20
18	55,6	2,0	0,02	5	50	0,20
19	100	0,6	0,02	4	50	0,25
20	200	0,7	0,01	4	100	0,25

1.3. Определите значения сопротивлений добавочных резисторов R_1, \dots, R_4 в цепи многопредельного магнитоэлектрического вольтметра (см. рис. 1.2), который предназначен для измерения напряжения в четырех диапазонах с верхними пределами $U_1=30$ В, $U_2=50$ В, $U_3=100$ В и $U_4=200$ В, если ток полного отклонения рамки измерительного механизма вольтметра равен $(10+N)$ мА., а сопротивление рамки $(400+10N)$ Ом. Чему равна мощность P_i ,

потребляемая вольтметром на указанных пределах? Ответы приведены в табл. 1.6 и 1.7, где принято обозначение: U_B – падение напряжения на рамке вольтметра.

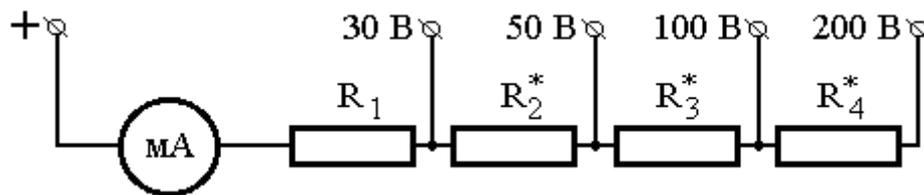


Рис. 1.2. Схема многопредельного вольтметра

Таблица 1.6

N	U_B, B	R_1	$R_2 = R_1 + R_2^*$	$R_3 = R_2 + R_3^*$	$R_4 = R_3 + R_4^*$
		Ом			
1	2	3	4	5	6
1	4,51	2317	4135	8681	17772
2	5,04	2080	3747	7913	16247
3	5,59	1878	3416	7262	14955
4	6,16	1703	3131	6703	13846
5	6,75	1550	2883	6217	12883
6	7,36	1415	2665	5790	12040
7	7,99	1295	2471	5412	11295
8	8,64	1187	2298	5076	10631
9	9,31	1089	2142	4773	10036
10	10,00	1000	2000	4500	9500
11	10,71	919	1871	4252	9014
12	11,44	844	1753	4025	8571
13	12,19	774	1644	3818	8166
14	12,96	710	1543	3627	7793
15	13,75	650	1450	3450	7450

Окончание табл. 1.6

1	2	3	4	5	6
16	14,56	594	1363	3286	7132
17	15,39	541	1282	3134	6837
18	16,24	491	1206	2991	6563
19	17,11	444	1134	2858	6307
20	18,00	400	1067	2733	6067
21	18,91	358	1003	2616	5842
22	19,84	317	943	2505	5630
23	20,79	279	885	2400	5431
24	21,76	242	831	2301	5242
25	22,75	207	779	2207	5064
26	23,76	173	729	2118	4896
27	24,79	141	681	2033	4735
28	25,84	109	636	1952	4583
29	26,91	79	592	1874	4438
30	28,00	50	550	1800	4300

Таблица 1.7

N	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	N	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
	Вт					Вт			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.33	0.55	1.10	2.20	7	0.51	0.85	1.70	3.40
2	0.36	0.60	1.20	2.40	8	0.54	0.90	1.80	3.60
3	0.39	0.65	1.30	2.60	9	0.57	0.95	1.90	3.80
4	0.42	0.70	1.40	2.80	10	0.60	1.00	2.00	4.00
5	0.45	0.75	1.50	3.00	11	0.63	1.05	2.10	4.20
6	0.48	0.80	1.60	3.20	12	0.66	1.10	2.20	4.40

Окончание табл. 1.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	0.69	1.15	2.30	4.60	22	0.96	1.60	3.20	6.40
14	0.72	1.20	2.40	4.80	23	0.99	1.65	3.30	6.60
15	0.75	1.25	2.50	5.00	24	1.02	1.70	3.40	6.80
16	0.78	1.30	2.60	5.20	25	1.05	1.75	3.50	7.00
17	0.81	1.35	2.70	5.40	26	1.08	1.80	3.60	7.20
18	0.84	1.40	2.80	5.60	27	1.11	1.85	3.70	7.40
19	0.87	1.45	2.90	5.80	28	1.14	1.90	3.80	7.60
20	0.90	1.50	3.00	6.00	29	1.17	1.95	3.90	7.80
21	0.93	1.55	3.10	6.20	30	1.20	2.00	4.00	8.00

1.4. Электромагнитные вольтметр V и амперметры A_1 и A_2 , включённые в схему (см. рис. 1.3), дали соответственно показания: $U=(50+N)$ В, $I_1=(2+0,1N)$ А и $I_2=(1+0,1N)$ А при частоте питающего напряжения f , равной 0,5 (варианты 1–15) и 0,7 (варианты 16–30) кГц. При какой частоте f^* показания амперметров будут одинаковы? Что покажет амплитудный вольтметр, включённый вместо электромагнитного вольтметра и каковы будут показания магнитоэлектрического амперметра, включённого вместо электромагнитного амперметра A_1 ?

1.5. Определите показания амперметров электромагнитной системы, измеряющих токи, формы которых приведены на рис. 1.4, а амплитудные значения этих токов одинаковы и равны $I_m=(2+0,2N)$ А. Что покажут в этом случае амперметры магнитоэлектрической и электродинамической систем? Свой ответ обоснуйте.

1.6. Определите показания электромагнитных приборов, включённых в схемы, представленные на рис. 1.5(а, б), если к входным клеммам этих схем приложено:

– синусоидальное напряжение, действующее значение которого $U=(5+N)$ В, а полные сопротивления цепей равны соответственно $\sqrt{2}e^{j45}$ и $\sqrt{2}e^{-j60}$;

– постоянное напряжение $U=(10+N)$ В.

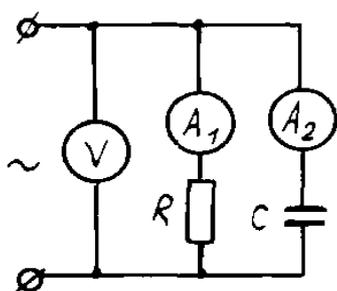


Рис. 1.3. Схема включения приборов

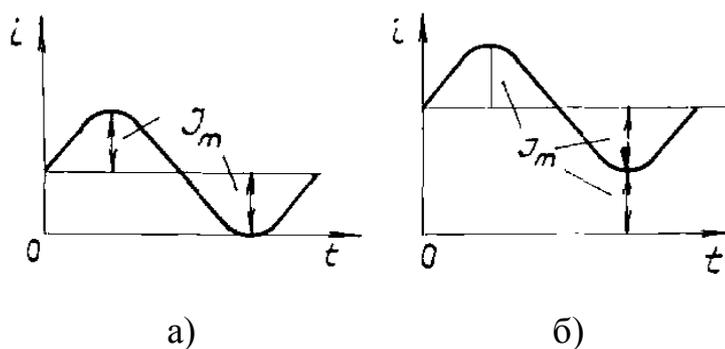


Рис. 1.4. Формы тока, протекающего через приборы

1.7. Ток в цепи имеет форму отдельных периодически повторяющихся импульсов (см. рис. 1.6), продолжительность каждого из которых составляет 0,1 мс, а период их повторения $T=20$ мс. Определите показания магнитоэлектрического и электродинамического амперметров, включённых в эту цепь, если амплитуда импульса тока $I_m=(50+2N)$ А.

1.8. Питание схемы, показанной на рис. 1.7, осуществляется синусоидальным напряжением промышленной частоты. Определите показания амперметров A_2 и A_3 , если показания амперметров A_1 , A_4 и A_5 соответственно равны $(6+0,1N)$, $(5+0,1N)$ и $(2+0,2N)$ А. Приборы каких систем можно использовать в данном случае? По каталогам проведите выбор приборов, укажите их типы, классы точности и диапазоны измерения.

1.9. Для определения параметров катушки (R и L) собрана схема, показанная на рис. 1.8. Проведены измерения напряжения U на катушке и силы тока I, протекающего по её обмотке:

а) при частоте $f_1=0$, $U_1=(60+N)$ В, $I_1=(0,5+0,1N)$ А;

б) при частоте $f_2 = 500$ Гц, $U_2 = (60 + N)$ В, $I_2 = (0,1 + 0,01N)$ А.

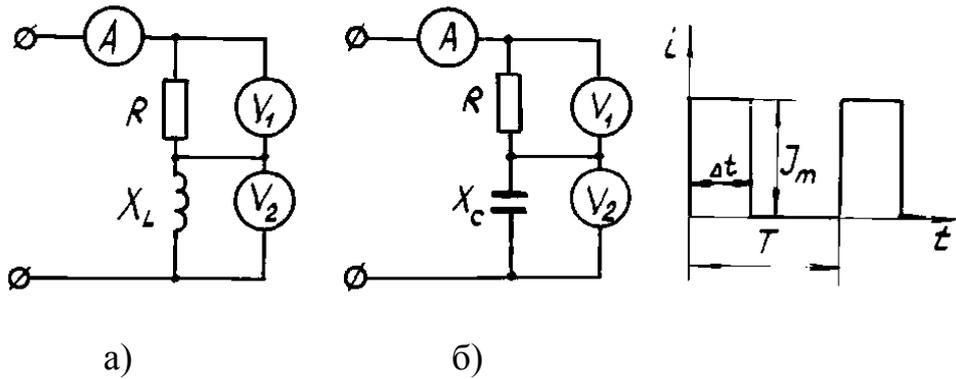


Рис. 1.5. Схемы включения приборов

Рис. 1.6. Форма тока в цепи

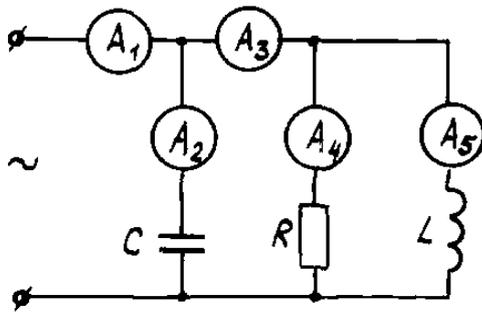


Рис. 1.7. Схема включения амперметров

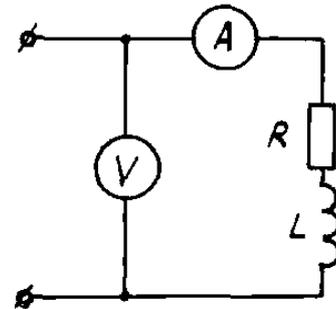


Рис. 1.8. Схема для определения параметров катушки

По результатам выполненных измерений найдите активное сопротивление R и индуктивность катушки L ; определите показания амперметра, если частота $f = 1$ кГц, а напряжение $U = 100$ В; подберите по справочникам или каталогам приборы с нужными диапазонами измерений.

При решении задач 1.4 – 1.9 примите допущение, что включение электроизмерительных приборов в цепь не изменяет её режима, т.е. сопротивления амперметров считайте равными нулю, а вольтметров – бесконечно большими. Следует учитывать также, что амперметры и вольтметры в зависимости от их системы показывают разные значения измеряемых величин:

– показания приборов магнитоэлектрической системы соответствуют среднему за период значению измеряемой величины, т.е. с их помощью измеряются постоянные составляющие тока или напряжения;

– показания приборов тепловой, электромагнитной и электродинамической систем соответствуют действующему значению измеряемой величины.

При решении задачи 1.4 необходимо, прежде всего, выразить активное и ёмкостное сопротивления через известные величины U , I_1 , I_2 и f , а затем, приравняв R и X_C (т.е. выполнив условие $I_1=I_2$) при частоте f^* , найти соотношение между частотами f и f^* , которое имеет вид $f^* = fI_1/I_2$. Ответы по 30 вариантам этой задачи сведены в табл. 1.8 (округление сделано до единиц герц).

Таблица 1.8

N	f^* , Гц	N	f^* , Гц	N	f^* , Гц	N	f^* , Гц	N	f^* , Гц
1	955	7	794	13	717	19	941	25	900
2	917	8	778	14	708	20	933	26	894
3	885	9	763	15	700	21	926	27	889
4	857	10	750	16	969	22	919	28	884
5	833	11	738	17	959	23	912	29	879
6	813	12	727	18	950	24	906	30	875

Для решения задачи 1.5 следует вычислить действующие значения измеряемых токов по формуле:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_{\sim}^2},$$

где I_0 – постоянная составляющая тока, а I_{\sim} – действующее значение переменной составляющей тока, определяемое по соотношению $I_m/\sqrt{2}$ А. Показания амперметров будут соответственно равны $I_m\sqrt{1,5}$ и $3I_m/\sqrt{2}$ А.

При решении задачи 1.6, когда питание цепи производится синусоидальным током, необходимо воспользоваться известными соотношениями:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} ;$$

$$\varphi = \arctg(X/R),$$

где R и X – активное и реактивное сопротивления соответствующей ветви.

Амперметр и вольтметры в схеме рис. 5(а) покажут соответственно $I=U/\sqrt{2}$ А и $U_1=U_2=U/\sqrt{2}$ В, а в схеме рис. 5(б) – $I=U/\sqrt{2}$ А, $U_1=0,5U$ В и $U_2=0,5\sqrt{3}U$ В. Если питание схем производится постоянным напряжением, то показания приборов следующие: в схеме рис. 5(а) – $I=U$ А, $U_1=10$ В, $U_2=0$; в схеме рис. 5(б) – $I=0$, $U_1=0$, $U_2=U$ В.

Показания магнитоэлектрического и электродинамического амперметров по задаче 1.7 соответственно равны $(0,25+0,01N)$ и $(5+0,2N)/\sqrt{2}$ А.

Решение задачи 1.8 начните с построения векторной диаграммы токов в ветвях схемы. Ответы по 30 вариантам этой задачи (округление сделано до десятых долей ампера) приведены в табл. 1.9.

При решении задачи 1.9 следует учесть, что сопротивление катушки $R=U_1/I_1$, а её индуктивность

$$L = \sqrt{Z^2 - R^2} / 2\pi f_2,$$

где $Z=U_2/I_2$.

Показания амперметра при значениях f и U , указанных в условии задачи, вычисляются по формуле:

$$I = U / \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}.$$

Ответы по 30 вариантам задачи сведены в табл. 1.10, где значения сопротивлений округлены до десятых долей ома, а индуктивности и силы тока – до единиц миллигенри и миллиампера.

Таблица 1.9

N	Показания приборов, А		N	Показания приборов, А		N	Показания приборов, А	
	A ₂	A ₃		A ₂	A ₃		A ₂	A ₃
1	5,5	5,6	11	7,8	7,4	21	10,1	9,4
2	5,8	5,7	12	8,1	7,6	22	10,3	9,6
3	6,0	5,9	13	8,3	7,8	23	10,5	9,8
4	6,2	6,1	14	8,5	8,0	24	10,8	10,1
5	6,5	6,3	15	8,7	8,2	25	11,0	10,3
6	6,7	6,4	16	9,0	8,4	26	11,2	10,5
7	6,9	6,6	17	9,2	8,6	27	11,4	10,7
8	7,1	6,8	18	9,4	8,8	28	11,7	10,9
9	7,4	7,0	19	9,6	9,0	29	11,9	11,1
10	7,6	7,2	20	9,9	9,2	30	12,1	11,3

Таблица 1.10

N	R, Ом	L, мГн	I, мА	N	R, Ом	L, мГн	I, мА
1	101,7	174	91	16	36,2	92	172
2	88,6	162	98	17	35,0	90	176
3	78,8	152	104	18	33,9	88	180
4	71,1	144	110	19	32,9	86	185
5	65,0	136	116	20	32,0	84	189
6	60,0	130	122	21	31,2	83	192
7	55,8	124	128	22	30,4	81	196
8	52,3	119	133	23	29,6	80	200
9	49,3	115	139	24	29,0	78	203
10	46,7	110	144	25	28,3	77	207
11	44,4	107	149	26	27,7	76	210
12	42,4	103	154	27	27,2	74	214
13	40,6	100	159	28	26,7	73	217
14	38,9	97	163	29	26,2	72	220
15	37,5	95	168	30	25,7	71	223

1.10. Определите показания амперметров магнитоэлектрической (мэ) и электромагнитной (эм) систем, включённых последовательно в электрическую цепь, ток в которой изменяется:

– по законам

$$i(t) = N\sqrt{2} \sin\omega t, \text{ A,}$$

$$i(t) = N + N\sqrt{6} \sin\omega t, \text{ A;}$$

– по кривым, показанным на рис. 1.9 (а,...,е).

1.11. Определите показания вольтметров магнитоэлектрической и электродинамической (эд) систем, измеряющих напряжения, которые изменяются:

– по законам

$$u(t) = 0,5N\sqrt{2} \sin\omega t, \text{ B,}$$

$$u(t) = 5N + N\sqrt{3} \sin\omega t + N\sin 3\omega t, \text{ B;}$$

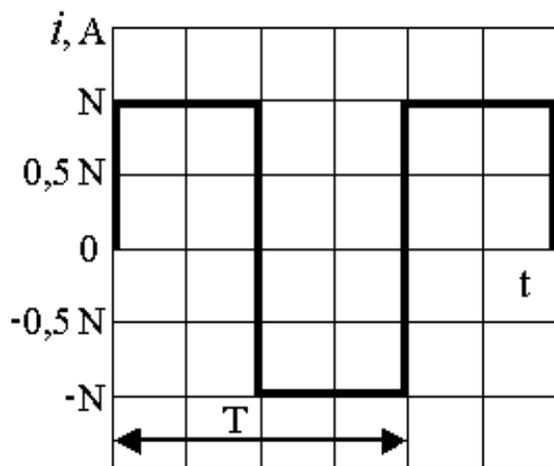
– по кривым, показанным на рис. 1.10, (а,...,е).

Показания магнитоэлектрического (электромагнитного) амперметра при измерении им токов, изменяющихся по указанным законам, будут соответственно равны 0 и N (N и 2N) А, а показания магнитоэлектрического (электродинамического) вольтметра при измерении им напряжений, изменяющихся по указанным законам, – 0 и 5N (0,5N и 3N√3) В.

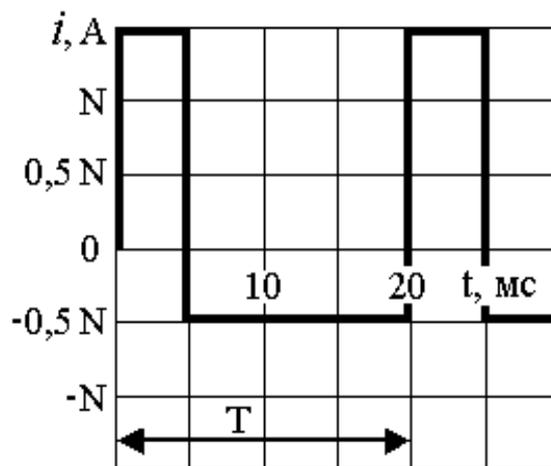
Ответы по задачам 1.10 и 1.11 (рис. 1.9 и 1.10) сведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

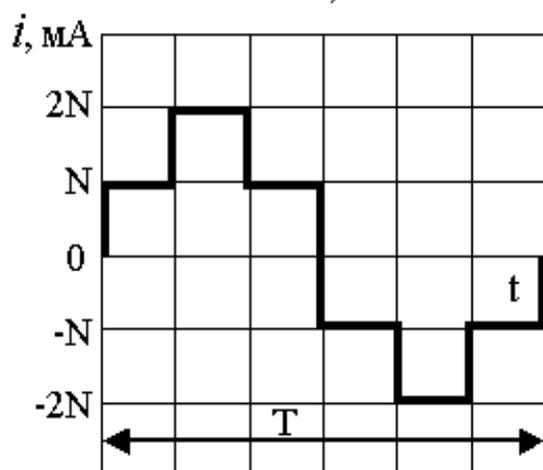
Номер рисунка	Показание приборов	Графики изменения токов и напряжений					
		а	б	в	г	д	е
1.9	$I_{мэ}, \text{ A}$	0	0	0	1,5N	N	0,4N
	$I_{эм}, \text{ A}$	N	$0,5N3^{0,5}$	$N2^{0,5}$	3N	$2N3^{-0,5}$	2N
1.10	$U_{мэ}, \text{ B}$	0	0	0,5N	4,2N	8N/7	3N
	$U_{эд}, \text{ B}$	$5N1,5^{0,5}$	$2,5N3^{-0,5}$	$N2,5^{0,5}$	$3N5,8^{0,5}$	$8N7^{-0,5}$	$2N3^{0,5}$



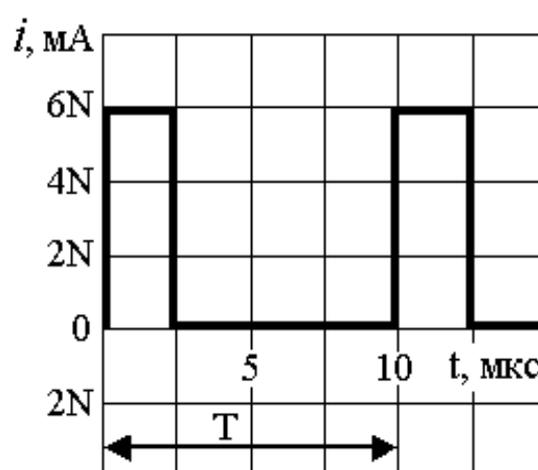
a)



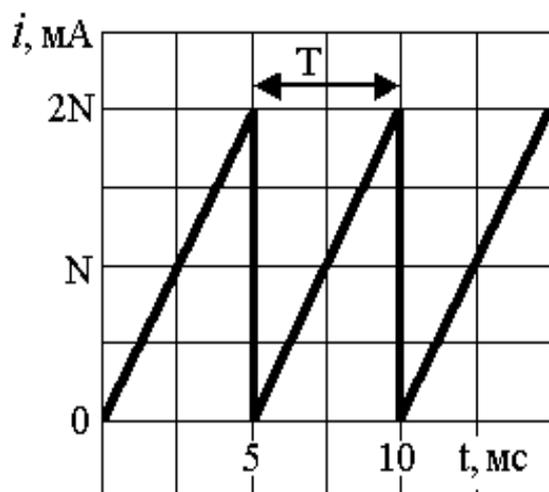
б)



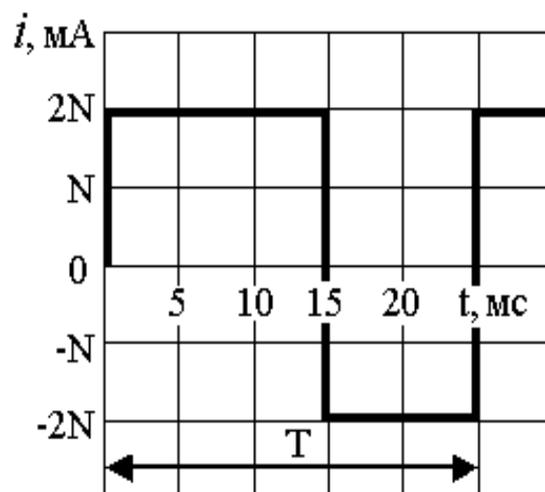
в)



г)

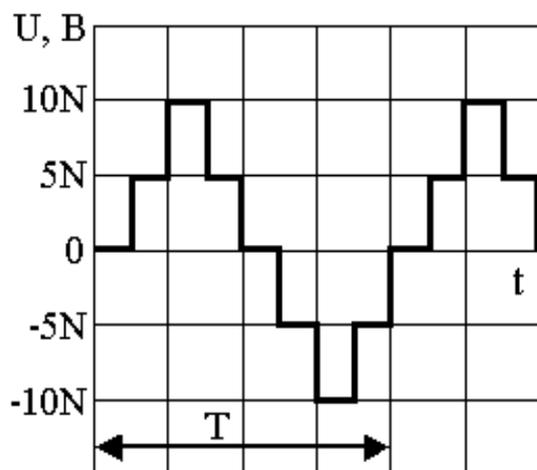


д)

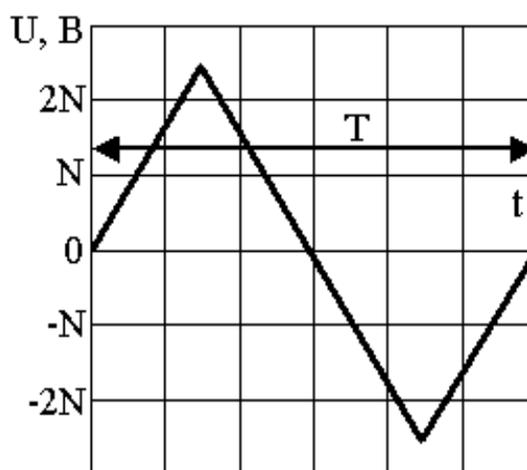


е)

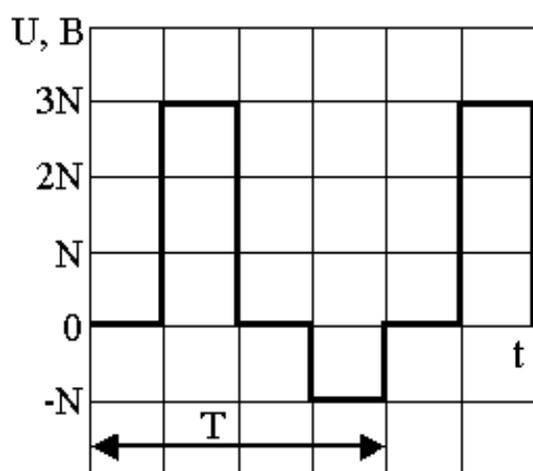
Рис. 1.9. Формы токов, протекающих по амперметрам



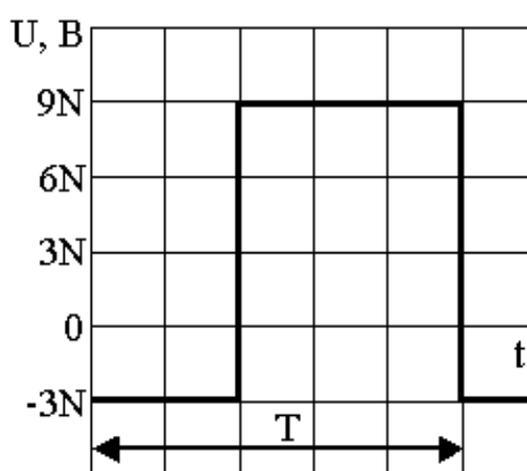
a)



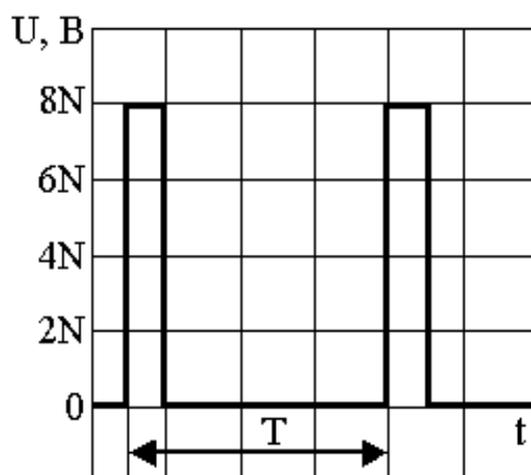
б)



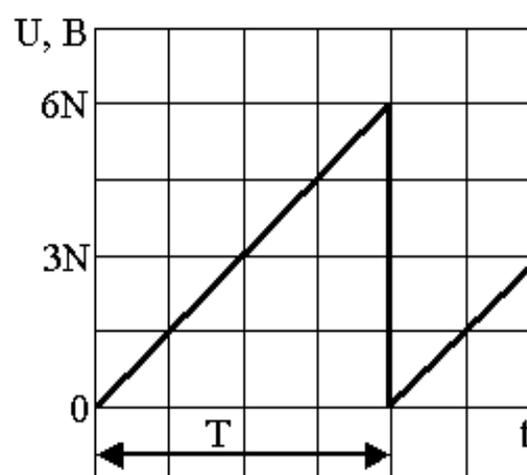
в)



г)



д)



е)

**Рис. 1.10. Формы напряжений,
измеряемых вольтметрами**

1.12. Мостовые схемы, показанные на рис. 1.11(а, б) и предназначенные для измерения индуктивностей катушек L_1 (их активные сопротивления R_1), уравновешены. Запишите условия равновесия и определите индуктивности катушек L_1 и сопротивления резисторов R_1 для исходных данных, приведенных в табл. 1.12.

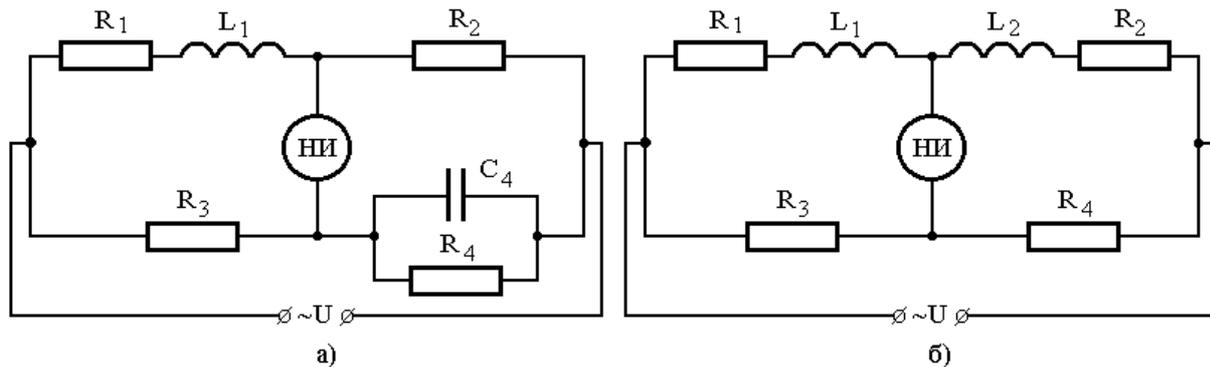


Рис. 1.11. Мостовые схемы для измерения индуктивностей и активных сопротивлений катушек

Таблица 1.12

Схема рис. 1.11	П а р а м е т р				
	R_2	R_3	R_4	C_4	L_2
	Ом			мкФ	мГн
а)	100	$10(20 + N)$	$10(50 - N)$	0,5	–
б)	12	$10 - 0,2N$	$20 - 0,5N$	–	100

Для выполнения задания необходимо составить уравнения равновесия моста переменного тока и решить их относительно искомых параметров. Теория расчёта мостовых схем изложена в литературе по электрическим измерениям, например в [14–18].

Ответы по 30 вариантам задачи для схемы рис. 1.11(а) приведены в табл. 1.13. Ответы по этим же вариантам задачи для схемы рис. 1.11(б) даны в табл. 1.14.

Таблица 1.13

N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн	N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн	N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн
1	42,9	10,5	11	79,5	15,5	21	141,4	20,5
2	45,8	11,0	12	84,2	16,0	22	150,0	21,0
3	48,9	11,5	13	89,2	16,5	23	159,3	21,5
4	52,2	12,0	14	94,6	17,0	24	169,2	22,0
5	55,6	12,5	15	100,0	17,5	25	180,0	22,5
6	59,1	13,0	16	105,9	18,0	26	191,7	23,0
7	62,8	13,5	17	112,1	18,5	27	204,3	23,5
8	66,7	14,0	18	118,8	19,0	28	218,2	24,0
9	70,6	14,5	19	125,8	19,5	29	233,3	24,5
10	75,0	15,0	20	133,0	20,0	30	250,0	25,0

Таблица 1.14

N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн	N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн	N	R ₁ , Ом	L ₁ , мГн
1	6,03	50,3	11	6,46	53,8	21	7,33	61,1
2	6,06	50,5	12	6,51	54,3	22	7,47	62,2
3	6,10	50,8	13	6,58	54,8	23	7,62	63,5
4	6,13	51,1	14	6,65	55,4	24	7,80	65,0
5	6,17	51,4	15	6,72	56,0	25	8,00	66,7
6	6,21	51,8	16	6,80	56,7	26	8,23	68,6
7	6,25	52,1	17	6,89	57,4	27	8,49	70,8
8	6,30	52,5	18	6,98	58,2	28	8,80	73,3
9	6,35	52,9	19	7,09	59,0	29	9,16	76,4
10	6,40	53,3	20	7,20	60,0	30	9,60	80,0

1.13. Мостовые схемы, показанные на рис. 1.12(а, б) и предназначенные для измерения ёмкостей C_1 конденсаторов с потерями (потери учитыва-

ются сопротивлениями R_1), уравновешены. Запишите условия равновесия и определите параметры R_1 , C_1 и $\operatorname{tg} \delta_1$, где δ_1 – угол диэлектрических потерь конденсаторов C_1 . Данные, необходимые для расчёта, сведены в табл. 1.15.

Расчёты выполните при условии, что: конденсаторы C_2 , C_3 и C_4 не имеют потерь; мостовая схема рис. 1.12(а) питается переменным напряжением с частотой 100 Гц (для чётных вариантов) и 50 Гц (для нечётных вариантов); мостовая схема, показанная на рис. 1.12(б), питается переменным напряжением с частотой 0,5 кГц.

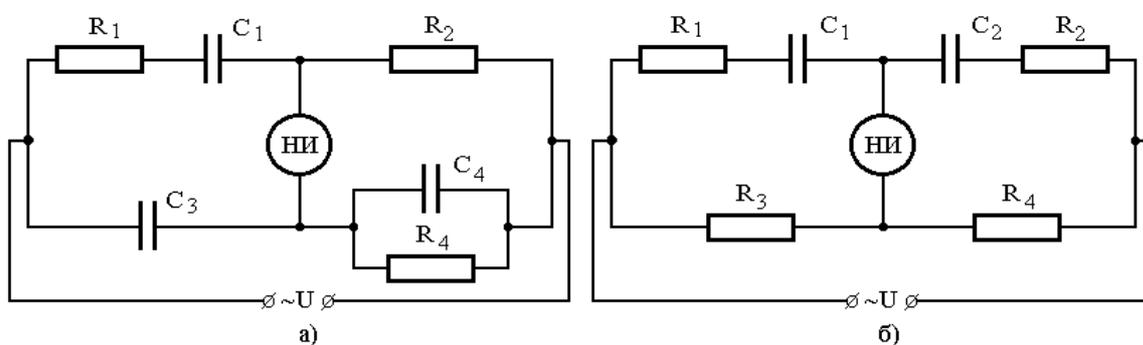


Рис. 1.12. Мостовые схемы для измерения ёмкостей конденсаторов с потерями

Как и при решении предыдущей задачи, из уравнений равновесия мостовой схемы следует выразить неизвестные параметры и рассчитать их числовые значения.

Таблица 1.15

Схема рис. 1.12	П а р а м е т р					
	R_2	R_3	R_4	C_2	C_3	C_4
	Ом			мкФ		
а)	$50 + N$	–	$10(80 + N)$	–	0,1	$0,01(5 + N)$
б)	$100 + N$	100	$200 + 5N$	0,05	–	–

Ответы для 30 вариантов задачи по схеме, показанной на рис. 1.12(а), приведены в табл. 1.16. Ответы к задаче по схеме, показанной на рис. 1.12(б), даны в табл. 1.17.

Таблица 1.16

N	R ₁ , Ом	C ₁ , мкФ	tgδ ₁ 10 ³	N	R ₁ , Ом	C ₁ , мкФ	tgδ ₁ 10 ³
1	30,6	1,59	31	16	138,6	1,45	63
2	36,4	1,58	18	17	147,4	1,45	134
3	42,4	1,57	42	18	156,4	1,44	71
4	48,6	1,56	24	19	165,6	1,43	149
5	55,0	1,55	54	20	175,0	1,43	79
6	61,6	1,54	30	21	184,6	1,42	165
7	68,4	1,53	66	22	194,4	1,42	87
8	75,4	1,52	36	23	204,4	1,41	181
9	82,6	1,51	78	24	214,6	1,41	95
10	90,0	1,50	42	25	225,0	1,40	198
11	97,6	1,49	91	26	235,6	1,39	103
12	105,4	1,48	49	27	246,4	1,39	215
13	113,4	1,48	105	28	257,4	1,38	112
14	121,6	1,47	56	29	268,6	1,38	233
15	130,0	1,46	119	30	280,6	1,38	121

Таблица 1.17

N	R ₁ , Ом	C ₁ , мкФ	tgδ ₁ 10 ³	N	R ₁ , Ом	C ₁ , мкФ	tgδ ₁ 10 ³
1	49,3	0,103	16,0	16	41,4	0,140	18,2
2	48,6	0,105	16,0	1 7	41,1	0,143	18,5
3	47,9	0,108	16,3	18	40,7	0,145	18,5
4	47,3	0,110	16,4	19	40,3	0,148	18,7
5	46,7	0,113	16,6	20	40,0	0,150	18,9
6	46,1	0,115	16,7	21	39,7	0,153	19,1
7	45,5	0,118	16,9	22	39,4	0,155	19,2
8	45,0	0,120	17,0	23	39,1	0,158	19,4
9	44,5	0,123	17,2	24	38,8	0,160	19,5
10	44,0	0,125	17,3	25	38,5	0,163	19,7
11	43,5	0,128	17,5	26	38,2	0,165	19,8
12	43,1	0,130	17,6	27	37,9	0,168	20,0
13	42,6	0,133	17,8	28	37,7	0,170	20,1

14	42,2	0,135	17,9	29	37,4	0,173	20,3
15	41,8	0,138	18,1	30	37,1	0,175	20,4

1.14. Амперметр класса точности 1,5 со шкалой 0...50 А показал 3N А (варианты 1–15), а вольтметр класса точности 1,0 со шкалой 0...100 В показал N В (варианты 16–30). Определите относительную погрешность измерения δ указанных электрических величин и запишите результат измерения для каждого прибора.

Зная класс точности прибора и номинальное значение измеряемой величины (в данном случае – верхний предел измерения), определите допускаяемую максимальную абсолютную погрешность. Относительная погрешность измерения находится как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению.

Ответы даны в табл. 1.18.

Таблица 1.18

N	$\delta, \%$	N	$\delta, \%$	N	$\delta, \%$	N	$\delta, \%$	N	$\delta, \%$
1	25,0	7	3,6	13	1,9	19	5,3	25	4,0
2	12,5	8	3,1	14	1,8	20	5,0	26	3,8
3	8,3	9	2,8	15	1,7	21	4,8	27	3,7
4	6,3	10	2,5	16	1,6	22	4,5	28	3,6
5	5,0	11	2,3	17	1,5	23	4,3	29	3,4
6	4,2	12	2,1	18	1,4	24	4,2	30	3,3

1.15. При поверке электродинамического ваттметра со шкалой 0...500 Вт в одной из её оцифрованных точек получена максимальная абсолютная погрешность $0,2(1+2N)$ Вт. Определите класс точности и чувствительность прибора (его шкала имеет 100 делений). Какой будет относительная погрешность измерения мощности, равной $10N$ Вт?

Ответы приведены в табл. 1.19, где относительные погрешности δ округлены до десятых долей %.

Таблица 1.19

N	Класс точности	δ , %	N	Класс точности	δ , %	N	Класс точности	δ , %
1	0.2	10,0	11	1.0	4,5	21	2.5	6,0
2	0.2	5,0	12	1.0	4,2	22	2.5	5,7
3	0.5	8,3	13	1.5	5,8	23	2.5	5,4
4	0.5	6,3	14	1.5	5,4	24	2.5	5,2
5	0.5	5,0	15	1.5	5,0	25	2.5	5,0
6	1.0	8,3	16	1.5	4,7	26	2.5	4,8
7	1.0	7,1	17	1.5	4,4	27	2.5	4,6
8	1.0	6,3	18	1.5	4,2	28	2.5	4,5
9	1.0	5,6	19	2.5	6,6	29	2.5	4,3
10	1.0	5,0	20	2.5	6,3	30	2.5	4,2

1.16. Косвенное измерение сопротивления резистора R_X производится потенциометрическим методом. При этом значение сопротивления рассчитывается по соотношению:

$$R_X = R_0 U_X / U_0,$$

где R_0 – сопротивление последовательно включенной с резистором R_X образцовой катушки сопротивления; U_X и U_0 – падения напряжений на R_X и R_0 , измеренные цифровым вольтметром (см. рис. 1.13). Определите сопротивление R_X и значение его допускаемого отклонения. Необходимые данные для расчета приведены в табл. 1.20.

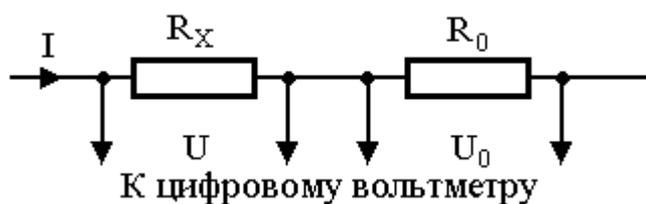


Рис. 1.13. Схема включения измеряемого резистора R_X и образцовой катушки сопротивления R_0

Таблица 1.20

N	Образцовая катушка сопротивления		U_X	U_0	Цифровой вольтметр Ц-301-1	
	R_0 , Ом	класс точности	мВ		верхний предел измерений	класс точности
1 – 15	100	0,05	2,35+0,48N	7,85–0,38N	10 мВ	0,1/0,05
16 – 30	1000	0,02	547,5+13,4N	881,6–10,5N	10 В	0,06/0,02

Рассмотрим пример оценки результата косвенного измерения сопротивления R_X , при следующих исходных данных: $U_X=819,5$ мВ, $U_0=782,6$ мВ, $R_0=1000$ Ом, класс точности катушки сопротивления 0,02, класс точности прибора 0,06/0,02, а верхнее значение диапазона его измерения $U_K=10$ В.

Для решения задачи необходимо, прежде всего, определить сопротивление R_X по соотношению:

$$R_X=R_0U_X/U_0=1000 \cdot 819,5/782,6=1047,15 \text{ Ом.}$$

Далее рассчитывается погрешность косвенного измерения ΔR_X по формуле:

$$\Delta R_X=U_0^{-1} [(U_X \Delta R_0)^2 + (R_0 \Delta U_X)^2 + (U_X R_0 \Delta U_0 U_0^{-1})^2]^{0,5},$$

вывод которой следует привести в работе.

Абсолютные погрешности при измерении прибором падений напряжений U_X и U_0 находятся по соотношениям:

$$\Delta U_X=\pm[c+d(U_K/U_X-1)]U_X/100=\pm 2,3 \text{ мВ};$$

$$\Delta U_0=\pm[c+d(U_K/U_0-1)]U_0/100=\pm 2,3 \text{ мВ},$$

а допускаяемое отклонение сопротивления образцовой катушки от его номинального значения R_0 рассчитывается по соотношению:

$$\Delta R_0 = \delta_{\text{ПР}} R_0 / 100 = 0,2 \text{ Ом},$$

где $\delta_{\text{ПР}}$ – приведенная погрешность, характеризующая класс точности катушки.

Результат измерения в данном случае запишется в виде (1047 ± 4) Ом.

Ответы по 30 вариантам задачи сведены в табл. 1.21.

Таблица 1.21

N	U_x	U_0	$(R_x \pm \Delta R_x), \text{ Ом}$	N	U_x	U_0	$(R_x \pm \Delta R_x), \text{ Ом}$
	мВ				мВ		
1	2,83	7,47	$37,88 \pm 0,10$	16	761,9	713,6	1068 ± 5
2	3,31	7,09	$46,69 \pm 0,11$	17	775,3	703,1	1103 ± 5
3	3,79	6,71	$56,48 \pm 0,13$	18	788,7	692,6	1139 ± 5
4	4,27	6,33	$67,46 \pm 0,15$	19	802,1	682,1	1176 ± 5
5	4,75	5,95	$79,83 \pm 0,17$	20	815,5	671,6	1214 ± 5
6	5,23	5,57	$93,90 \pm 0,19$	21	828,9	661,1	1254 ± 6
7	5,71	5,19	$110,02 \pm 0,23$	22	842,3	650,6	1295 ± 6
8	6,19	4,81	$128,69 \pm 0,27$	23	855,7	640,1	1337 ± 6
9	6,67	4,43	$150,6 \pm 0,3$	24	869,1	629,6	1380 ± 6
10	7,15	4,05	$176,5 \pm 0,4$	25	882,5	619,1	1425 ± 6
11	7,63	3,67	$207,9 \pm 0,5$	26	895,9	608,6	1472 ± 7
12	8,11	3,29	$246,5 \pm 0,6$	27	909,3	598,1	1520 ± 7
13	8,59	2,91	$295,2 \pm 0,7$	28	922,7	587,6	1570 ± 7
14	9,07	2,53	$358,0 \pm 1,0$	29	936,1	577,1	1622 ± 8
15	9,55	2,15	$444,2 \pm 1,4$	30	949,5	566,6	1676 ± 8

1.17. Цифровой универсальный прибор типа Ф4800 используется для измерения напряжения, силы тока и сопротивления постоянному току, а также средней частоты синусоидальных колебаний. Измеряемые прибором параметры, диапазоны измерения, конечные значения поддиапазонов и основные погрешности измерения приведены в табл. 1.22, а значения измеряемых электрических величин указаны в табл. 1.23.

Таблица 1.22

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Конечное значение поддиапазона	Класс точности c/d
Напряжение	0,001 – 1000 В	1; 10; 100; 1000 В	0,25/0,1
Сила тока	0,1 – 1000 мА	1; 10; 100 мА 1000 мА	0,25/0,1 0,5/0,2
Сопротивление	10 Ом – 1000 кОм	100 Ом; 1; 10; 100; 1000 кОм	0,25/0,1
Частота	1 – 1000 кГц	10; 100; 1000 кГц	0,02/0,01

Таблица 1.23

Напряжение	Сила тока	Сопротивление	Частота
(185,7+0,2N) мВ (37,2+0,1N) В	(7,65+0,31N) мА (0,63+0,01N) А	(5,68+0,15N) кОм (253,7+0,1N) Ом	(1060+5N) Гц (778,5+2,5N) кГц

Выберите соответствующие поддиапазоны прибора и оцените абсолютную и относительную погрешности результата измерения.

Решение задачи рекомендуется выполнять в следующей последовательности. Так как класс точности прибора для каждого диапазона измерения указан в виде дроби c/d, то предел допускаемой основной относительной погрешности найдите по формуле:

$$\delta = \pm\{c+d[(X_K/X)-1]\} \%,$$

где X и X_K – соответственно измеренное и верхнее значение поддиапазона измерения физической величины.

Зная δ , определите абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta = \delta X / 100.$$

Далее, выполнив округление, запишите результат измерения в виде $X \pm \Delta$. Размерность Δ и результата измерения такая же, как и у измеряемой физической величины.

Результаты вычислений сведите в таблицу, форма которой для варианта 30 приведена ниже (см. табл. 1.24). В графе 2 этой таблицы укажите исходные данные, полученные из табл. 1.23.

Таблица 1.24

Измеряемая величина	Показание	Погрешность		Результат
		$\delta, \%$	Δ	
Напряжение	191,7 мВ	0,672	1,3 мВ	$(191,7 \pm 1,3)$ мВ
	40,2 В	0,399	0,16 В	$(40,20 \pm 0,16)$ В
Сила тока	16,95 мА	0,740	0,12 мА	$(16,95 \pm 0,12)$ мА
	0,93 А	0,515	0,005 А	$(0,930 \pm 0,005)$ А
Сопротивление	10,18 кОм	0,132	0,12 кОм	$(10,180 \pm 0,12)$ кОм
	256,7 Ом	0,540	1,4 Ом	$(256,7 \pm 1,4)$ Ом
Частота	1210 Гц	0,093	1 Гц	(1210 ± 1) Гц
	853,5 кГц	0,022	0,18 кГц	$(853,50 \pm 0,18)$ кГц

1.18. Ветви нагрузки соединены треугольником (см. рис. 1.14). Используя совокупные измерения, определите без «разрыва» ветвей их сопротивления R_1 , R_2 и R_3 , если при прямых измерениях сопротивлений на соответствующих клеммах получено: $R_{12}=(45,5+0,5N)$ Ом, $R_{23}=(47,5+0,5N)$ Ом и $R_{13}=(58,5-0,5N)$ Ом.

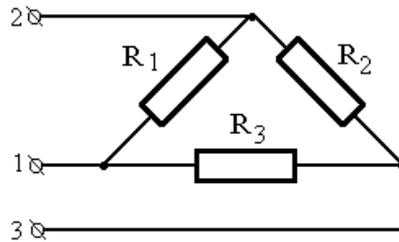


Рис. 1.14. Схема соединения резисторов

Существует несколько путей решения задачи, один из которых – метод подстановки. Составим систему уравнений:

$$R_{12} = R_1(R_2 + R_3) / (R_1 + R_2 + R_3); \quad (1.1)$$

$$R_{23} = R_2(R_1 + R_3) / (R_1 + R_2 + R_3); \quad (1.2)$$

$$R_{13} = R_3(R_1 + R_2) / (R_1 + R_2 + R_3). \quad (1.3)$$

Вычитая (1.2) из (1.1) и подставляя результат в (1.3), находим

$$R_2 = K_1 R_1, \quad (1.4)$$

а затем, вычитая (1.3) из (1.1) и подставляя результат в (1.2), находим

$$R_3 = K_2 R_1, \quad (1.5)$$

где K_1 и K_2 вычисляются по соотношениям:

$$K_1 = (R_{13} - R_{12} + R_{23}) / (R_{13} + R_{12} - R_{23});$$

$$K_2 = (R_{23} - R_{12} + R_{13}) / (R_{23} + R_{12} - R_{13}).$$

Подставляя (1.4) и (1.5) в уравнение (1.1), получаем

$$R_1 = R_{12} [1 + (K_1 + K_2)^{-1}],$$

а далее по (1.4) и (1.5) определяем сопротивления R_2 и R_3 .

Задачу можно решить и методом эквивалентных преобразований, заменив «треугольник» «звездой», как показано на рис. 1.15. В этом случае для определения сопротивлений можно использовать формулы Крамера.

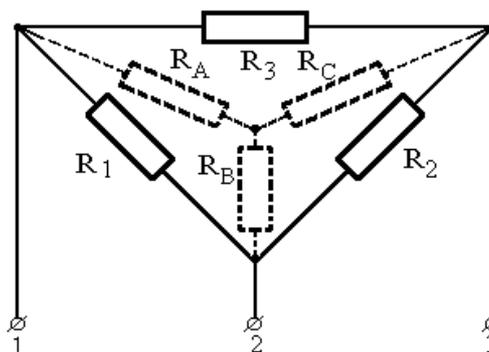


Рис. 1.15. Преобразование «треугольника» в эквивалентную «звезду»

Ответы по 30 вариантам задачи сведены в табл. 1.25.

Таблица 1.25

N	R ₁	R ₂	R ₃	N	R ₁	R ₂	R ₃
	Ом				Ом		
1	62,80	67,29	104,7	16	80,52	87,16	72,26
2	63,98	68,60	101,5	17	81,69	88,50	70,80
3	65,18	69,92	98,60	18	82,86	89,84	69,38
4	66,36	71,24	95,86	19	84,03	91,18	68,02
5	67,55	72,56	93,29	20	85,19	92,52	66,70
6	68,74	73,88	90,86	21	86,36	93,87	65,42
7	69,92	75,19	88,57	22	87,52	95,22	64,18
8	71,10	76,52	86,39	23	88,68	96,57	62,98
9	72,29	77,85	84,33	24	89,84	97,92	61,80
10	73,47	79,17	82,37	25	91,00	99,27	60,67
11	74,64	80,50	80,50	26	92,15	100,6	59,56
12	75,82	81,83	78,71	27	93,31	102,0	58,47
13	77,00	83,16	77,00	28	94,46	103,4	57,42
14	78,17	84,50	75,36	29	95,61	104,7	56,38
15	79,35	85,83	73,78	30	96,75	106,1	55,37

2. ЗАДАЧИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. При контроле температуры объекта с помощью термоэлектрического термометра свободные концы преобразователя имели температуру θ_0 , а его термо-ЭДС, измеряемая лабораторным потенциометром, оказалась равной E (табл. 2.1). Определите температуру контролируемого объекта θ .

Какую термо-ЭДС покажет потенциометр, если температура ОК уменьшится на $20\text{ }^\circ\text{C}$, а температура свободных концов ТЭП возрастёт на $8\text{ }^\circ\text{C}$ относительно соответствующих значений, указанных в табл. 2.1 для каждого варианта? Определите средние чувствительности (коэффициенты преобразования) преобразователей ТХК, ТХА, ТПП и ТВР в диапазоне температур $\theta_1 \dots \theta_2$ (табл. 2.2).

Таблица 2.1

N	Тип ТЭП	$\theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	E, мВ	N	Тип ТЭП	$\theta_0, \text{ }^\circ\text{C}$	E, мВ
1	ТХК	15	11,81	13	ТПП	30	13,03
2		20	13,63	14		35	14,13
3		25	16,90	15		40	15,38
4		30	21,89	16		45	15,41
5		35	24,39	17		50	16,13
6		40	28,78	18		55	16,44
7		20	8,66	19		20	4,35
8		25	14,72	20		25	19,75

9	ТХА	30	17,35	21	ТВР	30	27,43
10		35	32,24	22		35	30,66
11		40	37,15	23		40	31,19
12		45	41,69	24		45	31,52

Так как по условию задачи термо-ЭДС, измеренная потенциометром, уменьшена на величину $E(\theta_0, 0)$, то необходимо найти (например, по таблицам [19]) это значение (поправку). Затем определяется термо-ЭДС термометра с учётом поправки $E(\theta, 0) = E(\theta, \theta_0) + E(\theta_0, 0)$, а, зная $E(\theta, 0)$, по тем же таблицам можно найти температуру θ , соответствующую этой термо-ЭДС. Ответы приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

N	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	N	θ_1, K	θ_2, K	N	$\theta_1, ^\circ\text{F}$	$\theta_2, ^\circ\text{F}$	N	$\theta_1, ^\circ\text{R}$	$\theta_2, ^\circ\text{R}$
1	50	100	7	333	383	13	167	347	19	32	112
2	50	150	8	333	433	14	347	527	20	64	144
3	100	200	9	393	493	15	527	707	21	176	256
4	200	300	10	523	623	16	707	887	22	256	336
5	300	400	11	673	773	17	932	1112	23	336	416
6	400	500	12	773	873	18	1112	1292	24	416	496

Таблица 2.3

N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$
1	178	7	233	13	1304	19	305
2	205	8	384	14	1397	20	1263
3	249	9	451	15	1503	21	1872
4	312	10	809	16	1508	22	2195
5	345	11	936	17	1571	23	2262

6	399	12	1058	18	1600	24	2308
---	-----	----	------	----	------	----	------

Согласно условию задачи далее температура горячего спая преобразователя уменьшилась на $\Delta\theta$ и стала равной $\theta - \Delta\theta$, а температура свободных концов ТЭП возросла на $\Delta\theta_0$ и стала равной $\theta_0 + \Delta\theta_0$. Соответствующие этим температурам термо-ЭДС находятся по вышеуказанным таблицам [19]. Показание потенциометра в этом случае будет равно

$$E(\theta - \theta, \theta_0 + \Delta\theta_0) = E(\theta - \Delta\theta, 0) - E(\theta_0 + \Delta\theta_0, 0).$$

Ответы сведены в табл. 2.4.

Средняя чувствительность ТЭП в диапазоне температур $\theta_1 \dots \theta_2$ рассчитывается по формуле:

$$S = [E(\theta_2, 0) - E(\theta_1, 0)] / (\theta_2 - \theta_1).$$

При расчёте S по вариантам 7–24 необходимо учесть, что соотношения между температурами, выраженными в $^{\circ}\text{C}$, K , $^{\circ}\text{F}$ и $^{\circ}\text{R}$, имеют вид: $\theta(^{\circ}\text{C}) = \theta(\text{K}) - 273$; $\theta(^{\circ}\text{C}) = 5[\theta(^{\circ}\text{F}) - 32]/9$; $\theta(^{\circ}\text{C}) = 1,25\theta(^{\circ}\text{R})$. Ответы приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.4

N	E, мВ	N	E, мВ	N	E, мВ	N	E, мВ
1	9,72	7	7,54	13	12,74	19	3,91
2	11,51	8	13,55	14	13,84	20	19,36
3	14,72	9	16,18	15	15,09	21	26,73
4	19,64	10	31,09	16	15,11	22	29,32
5	22,13	11	36,02	17	15,84	23	30,91
6	26,48	12	40,59	18	16,15	24	31,24

Таблица 2.5

N	$S \cdot 10^2$, мВ/ $^{\circ}\text{C}$	N	$S \cdot 10^2$, мВ/ K	N	$S \cdot 10^3$, мВ/ $^{\circ}\text{F}$	N	$S \cdot 10^2$, мВ/ $^{\circ}\text{R}$
---	---	---	---------------------------------	---	---	---	---

1	7,09	7	4,14	13	4,24	19	1,79
2	7,29	8	4,10	14	4,80	20	1,88
3	7,68	9	4,02	15	5,14	21	2,07
4	8,29	10	4,14	16	5,36	22	2,12
5	8,68	11	4,25	17	5,57	23	2,13
6	8,82	12	4,26	18	5,76	24	2,12

2.2. Давление газа в трубопроводе P (нечётные варианты) измеряется деформационным (пружинным) манометром, а токовая нагрузка двигателя I (чётные варианты) – амперметром. Контролируемые неэлектрический и электрический параметры изменяются в пределах от P_H (I_H) до P_K (I_K). Шкалы приборов проградуированы в диапазоне $0 \dots P_K$ (I_K). Какой класс точности должен быть у манометра (амперметра), чтобы относительная погрешность измерения соответствующей физической величины не превысила значения $\delta = \pm(1,5 + 0,05N)\%$?

Известно, что манометры указанного типа имеют классы точности: 0,15; 0,25; 0,4; 1,0; 1,6; 2,5; 4; 6,3 и 10, а амперметры 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Данные для расчёта сведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

В а р и а н т ы			
нечётные		чётные	
P_H , МПа	P_K , МПа	I_H , А	I_K , А
$1,5 + 0,07N$	$3 + 0,1N$	$50 + N$	$100 + N$

Рассмотрим пример решения задачи применительно к манометру. Наибольшая погрешность измерения δ_H будет при нижнем пределе измерения, т.е. при P_H . А так как

$$\delta_H = 100 \Delta_{\text{МАКС}} / P_H, \%$$

то максимальная допускаемая абсолютная погрешность

$$\Delta_{\text{МАКС}} = \delta_H P_H / 100, \text{ МПа.}$$

Следовательно, класс точности манометра надо выбрать таким, чтобы максимальная приведённая погрешность $(\delta_{\text{ПР}})_{\text{МАКС}}$ не превысила значения $\delta_H P_H / P_K$. Например, если $N=31$, то: $\delta_H = \pm 3,05 \%$, P_H и P_K соответственно равны 3,67 и 6,1 МПа, а $(\delta_{\text{ПР}})_{\text{МАКС}} = 1,83 \%$. Поэтому, необходимо выбрать манометр класса точности не хуже, чем 1,6. В данном случае погрешность измерения им давления газа в трубопроводе не превысит допустимого значения 3,05 %.

Ответы по 30 вариантам задачи сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

N	Класс	N	Класс	N	Класс	N	Класс	N	Класс
1	0,4	7	0,4	13	1,0	19	1,0	25	1,6
2	0,5	8	1,0	14	1,0	20	1,0	26	1,5
3	0,4	9	1,0	15	1,0	21	1,0	27	1,6
4	0,5	10	1,0	16	1,0	22	1,5	28	1,5
5	0,4	11	1,0	17	1,0	23	1,0	29	1,6
6	0,5	12	1,0	18	1,0	24	1,5	30	1,5

2.3. Мост постоянного тока уравновешен. Его плечи R_1 и R_4 , а также R_2 и R_3 являются противолежащими, причём сопротивление второго плеча $R_2 = 2(20+N)$ Ом, а $R_3 = R_4$. Определите измеряемое сопротивление медного термопреобразователя R_1 , включённого в первое плечо моста, и температуру контролируемого объекта, если номинальная статическая характеристика преобразователя 50М. Определите чувствительность термопреобразователя.

Для решения задачи запишите условие равновесия мостовой схемы и выразите из него искомое сопротивление R_1 . Зная последнее, из функции преобразования медного ТПС (значение температурного коэффициента сопро-

тивления меди α примите равным $4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) найдите температуру (в $^\circ\text{C}$) контролируемого объекта, в котором находится термочувствительный элемент преобразователя. Расчётная формула имеет вид:

$$\theta = (-5 + N) / 0,107.$$

Эту формулу необходимо самостоятельно вывести.

Ответы по 30 вариантам задачи приведены в табл. 2.8. Значения температур округлены до десятых долей $^\circ\text{C}$.

Таблица 2.8

N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$	N	$\theta, ^\circ\text{C}$
1	-37,4	7	18,7	13	74,8	19	130,8	25	186,9
2	-28,0	8	28,0	14	84,1	20	140,2	26	196,3
3	-18,7	9	37,4	15	93,5	21	149,5	27	205,6
4	-9,3	10	46,7	16	102,8	22	158,9	28	215,0
5	0,0	11	56,1	17	112,2	23	168,2	29	224,3
6	9,3	12	65,4	18	121,5	24	177,6	30	233,6

2.4. Для диапазона $0-120 \text{ } ^\circ\text{C}$ рассчитайте и постройте (не менее чем по 8 точкам) температурную характеристику и зависимость чувствительности от температуры полупроводникового поликристаллического терморезистора с номинальным сопротивлением R_{20} , если известно, что его сопротивление при $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ равно R_{100} . Номиналы R_{20} и R_{100} в кОм приведены в табл. 2.9.

Температурная характеристика термпреобразователя имеет вид:

$$R_\theta = R_\infty \exp(B/T),$$

где R_∞ и B – постоянные величины для данного типа терморезистора, а T – его абсолютная температура в кельвинах.

Таблица 2.9

N	R_{20}	R_{100}	N	R_{20}	R_{100}	N	R_{20}	R_{100}

1	3,89	0,85	9	43,7	5,24	17	360	24,9
2	5,29	1,06	10	58,7	6,53	18	370	25,0
3	7,18	1,33	11	78,7	8,14	19	392	25,7
4	9,74	1,68	12	105	10,1	20	429	26,6
5	13,2	2,12	13	140	12,5	21	458	27,4
6	17,9	2,66	14	186	15,5	22	483	27,8
7	24,1	3,34	15	247	19,0	23	594	31,8
8	32,5	4,19	16	325	23,3	24	669	33,8

Зная сопротивление терморезистора при двух известных температурах (20 и 100 °С), составим следующие уравнения с неизвестными R_{∞} и B :

$$R_{20}=R_{\infty} \exp(B/293);$$

$$R_{100}=R_{\infty} \exp(B/373).$$

Разделив первое уравнение на второе и выполнив несложные преобразования, получим:

$$B=1366 \ln(R_{20}/R_{100});$$

$$R_{\infty}=R_{20} \exp(-B/293).$$

Значения B и R_{∞} для всех вариантов задачи приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

N	B, К	R_{∞} , Ом	$-S_{20}$, Ом/К	N	B, К	R_{∞} , Ом	$-S_{20}$, кОм/К	N	B, К	R_{∞} , Ом	$-S_{20}$, кОм/К
1	2078	3,2	93	9	2897	2,2	1,46	17	3649	1,4	15,2
2	2196	2,9	133	10	3000	2,1	2,05	18	3681	1,3	15,9
3	2303	2,8	195	11	3100	2,0	2,84	19	3722	1,2	17,1
4	2401	2,7	273	12	3199	1,9	3,91	20	3798	1,0	18,9
5	2498	2,6	381	13	3300	1,8	5,39	21	3847	0,9	20,3
6	2604	2,5	549	14	3394	1,7	7,21	22	3900	0,8	21,9

7	2700	2,4	758	15	3504	1,6	10,2	23	3999	0,7	27,6
8	2798	2,3	1052	16	3600	1,5	13,6	24	4078	0,6	31,6

Подставив полученные значения B и R_∞ в зависимость $R_\theta = f(T)$ и задавшись несколькими значениями температур в диапазоне $0 - 120$ °C, рассчитываем ординаты указанной характеристики и строим её. Для каждой точки определяем чувствительность терморезистора

$$S_\theta = -R_\infty B T^{-2} \exp(B/T)$$

и строим зависимость $S_\theta = f(\theta)$.

Значения S для температуры 20 °C указаны в табл. 2.10.

2.5. Медный (варианты 1–10) или платиновый (варианты 11–20) термопреобразователь сопротивления при температуре θ_1 имеет сопротивление R_1 . Какое сопротивление будет у преобразователя при температурах θ_2 , θ_3 и θ_4 , если температурные коэффициенты сопротивления меди и платины равны соответственно $4,26 \cdot 10^{-3}$ и $3,85 \cdot 10^{-3}$ °C⁻¹? Какое условное обозначение имеет НСХ рассматриваемого типа термопреобразователя? Определите среднее значение коэффициента преобразования ТПС в диапазоне температур $\theta_1 \dots \theta_4$. Данные для расчёта приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

N	θ_1 , °C	R_1 , Ом	θ_2 , °C	θ_3 , °C	θ_4 , °C	N	θ_1 , °C	R_1 , Ом	θ_2 , °C	θ_3 , °C	θ_4 , °C
1	34	11,448	45	87	125	11	57	12,209	30	100	200
2	61	12,599	75	98	155	12	113	71,710	200	300	400
3	124	76,410	136	156	170	13	145	15,881	180	400	550
4	133	15,666	145	165	175	14	179	16,809	100	250	600
5	147	81,310	100	120	180	15	271	201,65	150	200	500
6	150	163,90	59	131	179	16	335	224,41	50	100	150
7	162	169,01	30	70	90	17	467	269,85	500	550	600

8	168	171,57	85	112	157	18	510	2,8422	130	257	430
9	176	174,98	90	130	150	19	675	1686,8	75	351	420
10	180	176,68	50	100	160	20	743	1791,7	176	320	565

Сопротивление медного ТПС является функцией температуры θ :

$$R_{\theta}=R_0(1+\alpha\theta),$$

где R_0 – номинальное (при 0°C) сопротивление ТПС; α – температурный коэффициент сопротивления медного провода.

Зная R_1 при температуре θ_1 , находим R_0 , а затем по той же формуле рассчитываем сопротивления R_2 , R_3 и R_4 при соответствующих температурах θ_2 , θ_3 и θ_4 . Для платинового ТПС в рассматриваемом температурном диапазоне зависимость $R=f(\theta)$ имеет вид:

$$R_{\theta}=R_0(1+A\theta+B\theta^2),$$

где $A=3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $B=-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ [20].

Значения сопротивлений округлите до сотых долей ома. Обозначение НСХ для термопреобразователя устанавливается по его номинальному сопротивлению. В данной задаче используются ТПС со следующими статическими характеристиками: 1П, 10П, 50П, 100П, 10М, 50М и 100М.

Чувствительность (коэффициент преобразования) ТПС в диапазоне $\theta_2 \dots \theta_4$ рассчитывается по формуле:

$$S=(R_4-R_2)/(\theta_4-\theta_2).$$

Результаты расчётов сведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

N	R ₂	R ₃	R ₄	S, Ом/°C	N	R ₂	R ₃	R ₄	S, Ом/°C
	Ом					Ом			
1	11,917	13,706	15,324	0,043	11	11,167	13,850	17,584	0,038

2	13,195	14,175	16,604		12	87,920	106,01	123,52	0,178
3	78,966	83,226	86,208	0,213	13	17,211	25,238	30,383	0,036
4	16,177	17,029	17,455	0,043	14	13,850	19,407	31,359	0,035
5	71,299	75,559	88,339	0,213	15	157,32	175,84	280,90	0,353
6	125,13	155,81	176,25	0,426	16	119,40	138,51	157,32	0,379
7	112,78	129,82	138,34		17	280,90	297,39	313,59	0,327
8	136,21	147,71	166,88		18	1,4982	1,9661	2,5732	0,004
9	138,34	155,38	163,90		19	644,93	1150,1	1269,5	1,812
10	121,30	142,60	169,16		20	834,93	1095,6	1511,4	1,738

2.6. Имеются медный и платиновый термопреобразователи сопротивления с НСХ, указанными в табл. 2.13, а также полупроводниковый поликристаллический термопреобразователь с параметрами R_{20} и B^* . Определите коэффициенты преобразования этих ТПС при температурах θ_1 и θ_2 : проанализируйте результаты расчёта, пользуясь справочниками (например, [19]), выберите несколько типов стандартных металлических ТПС с соответствующими НСХ и дайте их полную техническую характеристику: тип, пределы измерения, условное давление контролируемой среды, на которое рассчитана защитная арматура, материал последней, показатель тепловой инерции, длина погружаемой части, область применения и другие сведения.

Коэффициенты преобразования рассматриваемых ТПС вычисляются по формулам:

$$S_1 = R_0\alpha - \text{для медных ТПС}; \quad S_2 = R_0(A+2B\theta) - \text{для платиновых ТПС};$$

$$S_3 = -R_{20}B^* \exp[B^*(293 - T)/(293T)]/T^2 - \text{для полупроводниковых ТПС},$$

где R_{20} – номинальное сопротивление ПТР при 20°C ; T – абсолютная температура в кельвинах. Значения коэффициентов α , A и B следующие:

$$\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad B = -5,802 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}.$$

Таблица 2.13

N	НСХ	R_{20} , кОм	B^* , К	θ_1 , $^\circ\text{C}$	θ_2 , $^\circ\text{C}$
---	-----	----------------	-----------	-------------------------------	-------------------------------

1	2	3	4	5	6
1	100М,100П	7,5	3000	50	180
2		8	2800	40	170
3	50М,50П	8,5	2600	30	160
4		9	2400	60	150
5	100М,50П	10	2300	55	175
6		11	2200	65	165
7	50М,100П	12	2100	70	155
8		12,5	2000	75	140
9	100М,500П	13	1900	30	50
10		13,5	2000	35	55

Окончание табл. 2.13

1	2	3	4	5	6
11	50М,500П	14	2500	40	60
12		14,5	2700	20	45
13	гр.23, гр.21	15	1800	80	145
14		15,5	1700	85	135
15	гр.23, 100П	16	1500	90	130
16		16,5	1600	95	125
17	гр.23, 50П	17	1400	50	120
18		17,5	1300	70	115
19	50М, гр.21	18	1500	60	180
20		18,5	1800	30	175

Результаты расчёта S_1 , S_2 и S_3 для всех вариантов данной задачи приведены в табл. 2.14.

Номинальные (при 0°C) сопротивления ТПС градуировок 23 (медь) и 21 (платина) равны соответственно 53 и 46 Ом.

Таблица 2.14

N	S_1 , Ом/ $^\circ\text{C}$	S_2 , Ом/ $^\circ\text{C}$		$-S_3$, Ом/К		N	S_1 , Ом/ $^\circ\text{C}$	S_2 , Ом/ $^\circ\text{C}$		$-S_3$, Ом/К	
		θ_1	θ_2	θ_1	θ_2			θ_1	θ_2		
1	0,426	0.385	0.370	83.32	2.947	11	0,213	1.931	1.919	207.1	113.3

2		0.386	0.371	124.2	4.489	12		1.942	1.928	456.0	187.6
3	0,213	0.194	0.186	179.6	6.689	13	0,226	0.175	0.172	76.27	24.61
4		0.192	0.187	72.82	9.739	14		0.175	0.173	71.70	30.85
5	0,426	0.192	0.185	92.51	7.580	15	0,226	0.380	0.376	67.87	36.54
6		0.192	0.186	77.95	10.50	16		0.380	0.376	64.06	39.46
7	0,213	0.383	0.373	75.35	14.35	17	0,226	0.193	0.188	146.4	45.68
8		0.382	0.375	70.19	20.17	18		0.191	0.189	101.3	50.99
9	0,426	1.937	1.925	217.2	129.6	19	0,213	0.177	0.170	131.6	21.57
10		1.934	1.922	204.1	121.1	20		0.178	0.170	296.1	19.81

2.7. Рассчитайте и постройте (не менее чем по 5 точкам) зависимости тока I и чувствительности S плоскостного ёмкостного преобразователя перемещения от величины воздушного зазора δ в диапазоне $0,2 \dots 2$ мм. Оцените влияние на ток I преобразователя частоты питающего напряжения f (для чётных вариантов $U=220$ В, а для нечётных $U=127$ В). Площадь пластин ёмкостного преобразователя равна F , а диэлектрическая постоянная воздуха $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Схема включения преобразователя показана на рис. 2.1, где 1 – неподвижная пластина преобразователя; 2 – подвижная пластина, перемещение которой X изменяет величину зазора δ .

Данные для расчёта приведены в табл. 2.15.

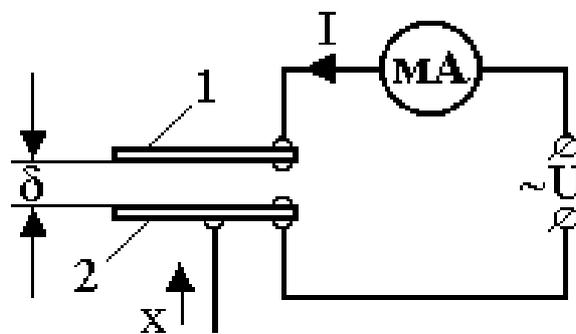


Рис. 2.1. Схема ёмкостного преобразователя перемещения

Таблица 2.15

N	F, см ²	f, кГц	N	F, см ²	f, кГц	N	F, см ²	f, кГц	N	F, см ²	f, кГц
1	250	50	6	200	150	11	150	250	16	100	350
2	240		7	190		12	140		17	90	
3	230	100	8	180	200	13	130	300	18	80	400
4	220		9	170		14	120		19	70	
5	210		10	160		15	110		20	60	

Ток, протекающий через преобразователь $I=2\pi fUC$. Так как ёмкость плоского конденсатора

$$C=\varepsilon_0 F \delta^{-1},$$

то

$$I=2\pi f U \varepsilon_0 F \delta^{-1},$$

а чувствительность преобразователя

$$S=-\varepsilon_0 F \delta^{-2}.$$

Задаваясь несколькими значениями δ в диапазоне 0,2...2 мм, находим соответствующие значения I и S и строим графики функций $I=f(\delta)$ и $S=f(\delta)$.

В табл. 2.16 для каждого варианта задачи приведены значения I и S , но только при одном зазоре, равном 1 мм.

Таблица 2.16

N	I, мА	-S, пФ/мм	N	I, мА	-S, пФ/мм
1	8,83	221	11	26,5	133
2	14,7	212	12	42,8	124
3	16,2	204	13	27,5	115
4	26,9	195	14	44,0	106
5	14,8	186	15	23,3	97,4

6	36,7	177	16	42,8	88,5
7	20,1	168	17	22,2	79,7
8	44,0	159	18	39,1	70,8
9	24,0	150	19	19,8	62,0
10	39,1	142	20	29,4	53,1

2.8. Определите действительную температуру объекта контроля, измеряемую радиационным пирометром, если показания пирометра θ_p , а коэффициент черноты ОК равен ε .

Рассчитайте систематическую абсолютную и систематическую относительную погрешности измерения температуры объекта контроля радиационным методом.

Данные для расчёта сведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

N	$\theta_p, ^\circ\text{C}$	ε	N	$\theta_p, ^\circ\text{C}$	ε	N	$\theta_p, ^\circ\text{C}$	ε
1	300	0,90	9	700	0,74	17	1100	0,58
2	350	0,88	10	750	0,72	18	1150	0,56
3	400	0,86	11	800	0,70	19	1200	0,54
4	450	0,84	12	850	0,68	20	1250	0,52
5	500	0,82	13	900	0,66	21	1300	0,50
6	550	0,80	14	950	0,64	22	1350	0,48
7	600	0,78	15	1000	0,62	23	1400	0,46
8	650	0,76	16	1050	0,60	24	1450	0,44

Действительная абсолютная температура объекта рассчитывается по формуле:

$$T = T_p \varepsilon^{-0,25},$$

где T_p – абсолютная радиационная температура объекта контроля в кельвинах.

Вычислив T , находим температуру контролируемого объекта θ в $^{\circ}\text{C}$, а затем определяем абсолютную Δ и относительную δ погрешности измерения по формулам:

$$\Delta = \theta_p - \theta;$$

$$\delta = 100\Delta/\theta, \%$$

Результаты расчёта для всех вариантов сведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

N	θ	$-\Delta$	$-\delta, \%$	N	θ	$-\Delta$	$-\delta, \%$
	$^{\circ}\text{C}$				$^{\circ}\text{C}$		
1	315	15	4,8	13	1028	128	12,5
2	370	20	5,5	14	1094	144	13,2
3	426	26	6,1	15	1162	162	13,9
4	482	32	6,7	16	1230	180	14,6
5	539	39	7,3	17	1300	200	15,4
6	597	47	7,9	18	1370	222	16,2
7	656	55	8,5	19	1445	245	17,0
8	716	66	9,2	20	1520	270	17,8
9	776	76	9,8	21	1598	298	18,6
10	838	88	10,5	22	1677	327	19,5
11	900	100	11,1	23	1758	358	20,4
12	964	114	11,8	24	1800	393	21,3

2.9. При постоянной температуре через каждые 15 минут с помощью двухэлектродной электролитической ячейки производились измерения кон-

центрации раствора, прокачиваемого по трубопроводу. Сопротивления преобразователя (в МОм) в моменты времени 0, 1, 2, 3 и 4 указаны в табл. 2.19. Определите концентрацию раствора в каждый момент времени и постройте график её изменения в течение часа, если известно, что постоянная ячейки равна K (она имеет размерность м^{-1}), а зависимость между концентрацией C и удельной электропроводностью χ_0 описывается соотношением:

$$\chi_0 = aC,$$

где коэффициент a для нечётных вариантов равен $1,5 \cdot 10^{-8}$, а для чётных вариантов – $1,8 \cdot 10^{-8}$ (См/м)/(мг/л).

Концентрация контролируемого раствора определяется по формуле $C = K(aR)^{-1}$. Необходимо найти C в каждый момент времени и построить график изменения концентрации в течение 1 ч.

Значения C в момент времени t_2 приведены в табл. 2.20.

Таблица 2.19

N	K	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	N	K	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
1	9,0	4,0	3,7	3,5	3,3	3,2	13	12,3	5,2	5,5	5,9	6,3	6,8
2	9,5	4,1	3,8	3,6	3,3	3,1	14	12,5	4,8	4,5	4,3	4,1	3,9
3	10,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	15	12,6	4,8	4,7	4,5	4,4	4,3
4	10,3	4,4	4,1	3,9	3,7	3,5	16	13,0	3,9	4,0	4,1	4,2	4,4
5	10,5	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	17	13,2	4,3	5,2	5,9	6,5	6,8
6	10,6	3,9	3,7	3,5	3,3	3,1	18	13,3	4,8	4,5	4,2	4,0	3,8
7	10,8	4,5	4,0	3,6	3,3	3,0	19	13,5	4,0	5,3	5,6	6,0	6,4
8	10,9	4,3	4,6	4,9	5,2	5,6	20	13,6	3,9	4,2	4,3	4,6	4,9
9	11,1	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	21	13,7	4,8	4,6	4,3	4,1	4,0
10	11,5	5,3	5,0	4,6	4,3	4,1	22	13,8	4,7	4,5	4,2	4,0	3,8
11	12,0	4,0	4,4	5,0	5,7	6,7	23	14,0	5,5	5,3	5,2	5,0	4,9

12	12,1	5,0	4,6	4,3	4,1	3,8	24	14,5	4,3	4,1	3,9	3,7	3,5
----	------	-----	-----	-----	-----	-----	----	------	-----	-----	-----	-----	-----

Таблица 2.20

N	C, мг/л	N	C, мг/л	N	C, мг/л	N	C, мг/л
1	171	7	200	13	139	19	161
2	147	8	124	14	161	20	176
3	179	9	211	15	187	21	212
4	147	10	139	16	176	22	183
5	219	11	160	17	149	23	179
6	168	12	156	18	176	24	207

2.10. Определите пределы допускаемой основной абсолютной погрешности ТПС (материалы их ЧЭ и классы допуска приведены в табл. 2.21) при измерении температур θ_1 , θ_2 и θ_3 °С. Оцените допускаемые относительные погрешности измерения указанных температур.

Таблица 2.21

N	Материал ЧЭ	Класс допуска	θ_1	θ_2	θ_3
1	2	3	4	5	6
1	Платина	A	-200	-100	-50
	Медь	C	-50	80	135
2	Платина	B	-200	-100	-50
	Медь	B	-50	100	150
3	Платина	A	-150	-70	-20
	Платина	B	20	70	150
4	Платина	A	30	300	600
	Медь	B	30	100	180
5	Медь	B	-30	120	170
	Медь	C	-50	50	150
6	Платина	B	-100	-50	100
	Медь	B	60	80	120

7	Платина	В	100	200	300
	Медь	В	-40	10	140
8	Медь	В	-20	80	130
	Медь	С	-10	110	160
9	Платина	А	100	400	650
	Платина	В	-170	-130	-40
10	Медь	В	-5	25	35
	Платина	А	-190	-180	-20
11	Платина	А	-195	-175	-155
	Платина	В	500	550	600
12	Платина	А	500	550	600
	Платина	В	-190	-180	-20

Окончание табл. 2.21

1	2	3	4	5	6
13	Медь	В	-45	-15	5
	Медь	С	-45	-15	5
14	Медь	В	18	112	180
	Медь	С	18	112	180
15	Платина	А	-198	-178	-158
	Медь	С	-25	35	75
16	Платина	В	530	580	620
	Медь	С	155	165	175
17	Платина	А	530	580	620
	Медь	В	155	165	175
18	Платина	А	90	180	220
	Платина	В	-90	-70	-40
19	Платина	А	-145	-85	-7
	Медь	С	-28	-7	15
20	Платина	В	330	370	410
	Медь	С	22	52	115

Пределы допускаемых значений основной погрешности ТПС по ГОСТ 6651–84 не должны превышать значений $\Delta\theta$, приведенных в табл. 2.22. В соответствии с заданием по формулам, указанным в этой таблице, определя-

ется допускаемая погрешность для каждого значения измеряемой температуры. Результаты расчета сведены в табл. 2.23.

Таблица 2.22

Материал ЧЭ	Класс допуска	Диапазон измеряемых температур, °С	Допускаемые отклонения от температуры θ , °С
Платина	А	от -200 до +750	0,15+0,002 θ
	В	от -200 до +1100	0,30+0,005 θ
	С	от -100 до +1100	0,60+0,008 θ
Медь	В	от -200 до +200	0,25+0,0035 θ
	С	от -200 до +200	0,50+0,0065 θ

Таблица 2.23

N	Материал ЧЭ	$\pm\Delta_1$	$\pm\Delta_2$	$\pm\Delta_3$	$\pm\delta_1$	$\pm\delta_2$	$\pm\delta_3$
		°С			%		
1	Платина	0,55	0,35	0,25	0,28	0,35	0,50
	Медь	0,83	1,02	1,38	1,66	1,28	1,02
2	Платина	1,30	0,80	0,55	0,65	0,80	1,10
	Медь	0,43	0,60	0,78	0,86	0,60	0,52
3	Платина	0,45	0,29	0,19	0,30	0,41	0,95
	Платина	0,40	0,65	1,05	2,00	0,93	0,70
4	Платина	0,21	0,75	1,35	0,70	0,25	0,23
	Медь	0,36	0,60	0,88	1,20	0,60	0,49
5	Медь	0,36	0,67	0,85	1,20	0,56	0,50
	Медь	0,83	0,83	1,48	1,66	1,66	0,99
6	Платина	0,80	0,55	0,80	0,80	1,10	0,80
	Медь	0,46	0,53	0,67	0,77	0,66	0,56
7	Платина	0,80	1,30	1,80	0,80	0,65	0,60
	Медь	0,39	0,29	0,74	0,98	2,90	0,53
8	Медь	0,32	0,53	0,71	1,60	0,66	0,55
	Медь	0,57	1,22	1,54	5,70	1,11	0,95
9	Платина	0,35	0,95	1,45	0,35	0,24	0,22
	Платина	1,15	0,95	0,50	0,68	0,73	1,25
10	Медь	0,27	0,34	0,37	5,40	1,36	1,06
	Платина	0,53	0,51	0,19	0,28	0,28	0,95
11	Платина	0,54	0,50	0,46	0,28	0,29	0,30
	Платина	2,80	3,05	3,30	0,56	0,55	0,55
12	Платина	1,15	1,25	1,35	0,23	0,23	0,23
	Платина	1,25	1,20	0,40	0,66	0,66	2,00

13	Медь	0,41	0,30	0,27	0,91	2,00	5,40
	Медь	0,79	0,60	0,53	1,76	4,00	10,6
14	Медь	0,31	0,64	0,88	1,72	0,57	0,49
	Медь	0,62	1,23	1,67	3,44	1,10	0,93
15	Платина	0,55	0,51	0,47	0,29	0,29	0,30
	Медь	0,66	0,73	0,99	2,64	2,09	1,32
16	Платина	2,95	3,20	3,40	0,56	0,55	0,55
	Медь	1,50	1,57	1,64	0,97	0,95	0,94
17	Платина	1,21	1,31	1,39	0,23	0,23	0,22
	Медь	0,79	0,83	0,86	0,51	0,50	0,49
18	Платина	0,33	0,51	0,59	0,37	0,28	0,27
	Платина	0,75	0,65	0,50	0,83	0,93	1,25
19	Платина	0,44	0,32	0,16	0,30	0,38	2,29
	Медь	0,68	0,55	0,60	2,43	7,86	4,00
20	Платина	1,95	2,15	2,35	0,59	0,58	0,57
	Медь	0,64	0,84	1,25	2,91	1,62	1,09

2.11. Рассчитайте тензопреобразователь, выполненный из константановой проволоки диаметром d и имеющим длину l и ширину h (рис. 2.2(а)), а также параметры мостовой измерительной схемы (рис. 2.2(б)), в которую включен указанный преобразователь. Данные для расчёта сведены в табл. 2.24, где размеры h , l и d указаны в мм, а сопротивление нагрузки R_H в кОм. Число активных плеч моста K для вариантов 1–8, 9–16 и 17–24 равно соответственно 1, 2 и 4.

При расчёте необходимо учесть, что удельное сопротивление константана ρ и относительная чувствительность тензопреобразователя $K_{ТП}$ соответственно равны $0,49 \cdot 10^{-3}$ Ом·мм и 2,2; удельную площадь поверхности охлаждения $S_{уд}$ примите равной $2 \text{ см}^2/\text{Вт}$ для тензопреобразователя, наклеенного на металл (нечётные варианты), и $5 \text{ см}^2/\text{Вт}$ для тензопреобразователя, наклеенного на пластмассу (чётные варианты); теплоотдающую площадь S вычислите по соотношению $2hl$; шаг петли $\Delta_{ш.п.}$ считайте равным $2d$; диаметр проволоки d для вариантов 1–8 равен 0,03 мм, а для остальных вариантов – 0,05 мм.

Методика аналогичного расчета приведена в [21].

Таблица 2.24

N	R _H	h	l	N	R _H	h	l	N	R _H	h	l		
1	2,0	6,9	10	9	2,8	7,9	20	17	3,6	9,1	30		
2	2,1	7,5		10	2,9	8,1		20	18			3,7	
3	2,2	8,1		11	3,0	8,3		20	19	3,8		9,3	
4	2,3	8,7		12	3,1	8,5		20	20	3,9			
5	2,4	9,3	15	13	3,2	8,7	25	21	4,0	9,5		35	
6	2,5	9,9		15	3,3	8,9		25	22				4,1
7	2,6	10,5		15	3,4	9,1		25	23	4,2			9,7
8	2,7	11,1		16	3,5	9,3		25	24	4,3			

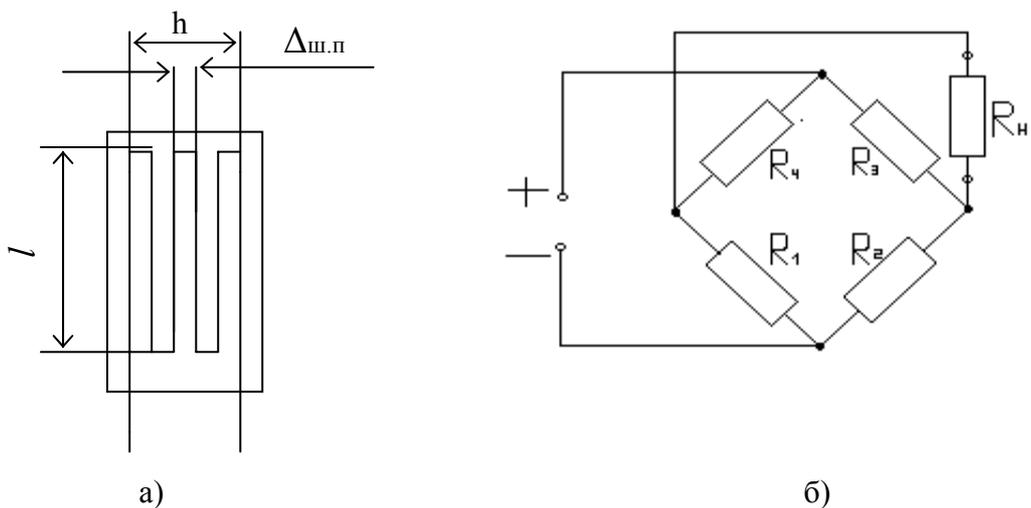


Рис. 2.2. Конструкция тензопреобразователя (а) и измерительная схема, в которую он включён (б)

В результате расчёта определите следующие параметры:

- начальное (до нагружения) сопротивление тензопреобразователя $R_{ТП}$;
- напряжение питания мостовой схемы U ;
- статическую чувствительность моста K_M ;
- мощность, потребляемую мостовой схемой.

Прежде всего, определяем число петель тензопреобразователя n по формуле:

$$n = 0,5 \left(\frac{h}{\Delta_{Ш.П.}} + 1 \right) = 0,5 \left(\frac{h}{2d} + 1 \right).$$

Зная n , вычисляем начальное сопротивление тензопреобразователя

$$R_{ТП} = R_l + R_h,$$

где

$$R_l = \frac{8\rho n l}{\pi d^2};$$

$$R_h = \frac{4\rho h}{\pi d^2}.$$

Таким образом,

$$R_{ТП} = \frac{4\rho(2nl + h)}{\pi d^2}.$$

Напряжение питания моста рассчитывается по соотношению:

$$U = \sqrt{\frac{8h l R_{ТП}}{S_{уд}}}.$$

Статическую чувствительность моста K_M находим по формуле:

$$K_M = 0,25K \frac{R_H R_l}{R_{ТП} (R_H + R_{ТП})} U K_{ТП},$$

а затем определяем мощность, потребляемую мостовой схемой,

$$P = \frac{U^2}{R_{ТП}}.$$

Результаты расчёта приведены в табл. 2.25.

Таблица 2.25

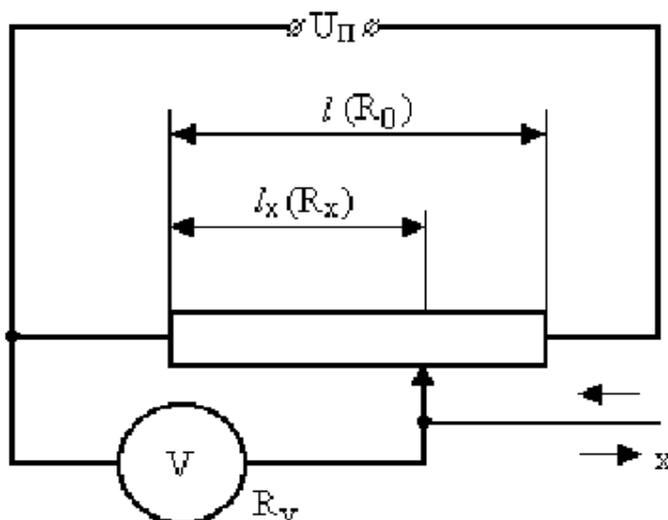
N	$R_{ТП}$, Ом	U, В	K_M , В/%отн.д.	P, Вт	N	$R_{ТП}$, Ом	U, В	K_M , В/%отн.д.	P, Вт

1	808,9	47,3	0,184	2,8	13	551,2	69,3	0,647	8,7
2	878,6	32,5	0,125	1,2	14	563,7	44,8	0,419	3,6
3	948,4	55,4	0,212	3,2	15	576,3	72,4	0,678	9,1
4	1018	37,7	0,143	1,4	16	588,8	46,8	0,439	3,7
5	1629	95,3	0,311	5,6	17	691,0	86,9	1,60	11
6	1733	64,2	0,208	2,4	18	691,0	54,9	1,02	4,4
7	1837	108	0,345	6,3	19	706,1	88,8	1,64	11
8	1942	71,9	0,229	2,7	20	706,1	56,1	1,04	4,5
9	401,3	50,4	0,482	6,3	21	840,9	106	1,92	13
10	411,3	32,7	0,313	2,6	22	840,9	66,9	1,22	5,3
11	421,3	52,9	0,508	6,6	23	858,4	108	1,97	14
12	431,4	34,3	0,329	2,7	24	858,4	68,3	1,25	5,4

3. КОМПЛЕКСНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО РАСЧЁТУ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИБОРОВ

Задание 3.1. Расчёт измерителя перемещения с реостатным преобразователем. Такие приборы часто применяются при контроле геометрических размеров, уровня, давления и других технологических параметров, которые могут быть преобразованы в перемещение.

Рассчитайте измеритель с линейным реостатным преобразователем на диапазон $0 \div l$ мм. Схема измерителя показана на рис. 3.1.



**Рис. 3.1. Принципиальная схема измерителя перемещения
с реостатным преобразователем**

В качестве измерительного прибора используется магнитоэлектрический вольтметр с внутренним сопротивлением R_V .

Исходные данные для расчёта приведены в табл. 3.1, где приняты следующие обозначения: U_{Π} – напряжение питания измерителя; b – толщина пластинчатого каркаса; $\delta_{н.доп}$ – допускаемая погрешность нелинейности.

Полное сопротивление преобразователя R_0 для вариантов 1–19 определяется по формуле $(2,1-0,1N)$ кОм, а для остальных вариантов – по формуле $0,02(29-N)$ кОм. В качестве провода, наматываемого на каркас, выбран для вариантов 1–8 – константан (удельное сопротивление $\rho = 0,5$ Ом·мм²/м), для вариантов 9–16 – нихром ($\rho=1,1$ Ом·мм²/м) и для вариантов 17–24 – марганцин ($\rho=0,46$ Ом·мм²/м). Допускаемую плотность тока в обмотке примите равной 2; 2,5 и 3 А/мм² соответственно для вариантов 1–8, 9–16 и 17–24. Сопротивление R_V для вариантов 1–19 равно 1 кОм, а для остальных – 2 кОм.

Таблица 3.1

N	U _п , В	l, мм	b, мм	-δ _{н.доп} , %	N	U _п , В	l, мм	b, мм	-δ _{н.доп} , %
1	10	20	1	5	13	40	40	2	1,2
2	10	20	1	5	14	40	40	2	1,2
3	15	20	1	5	15	45	40	2	1,2
4	15	25	1	3	16	45	60	2	1
5	20	25	1	3	17	45	100	3	1
6	20	25	1	3	18	45	120	3	1
7	25	30	1	2	19	24	120	3	1
8	25	30	1	2	20	24	120	3	1
9	30	30	2	2	21	24	120	3	0,5
10	30	35	2	1,5	22	24	150	3	0,5
11	35	35	2	1,5	23	24	150	3	0,5
12	35	35	2	1,5	24	24	150	3	0,5

При выполнении задания необходимо:

а) определить диаметр обмоточного провода d и его длину L ; число витков обмотки n и длину одного витка l_B ; высоту пластинчатого H и диаметр D_K цилиндрического каркасов преобразователя, а также ступенчатость его характеристики;

б) начертить эскизы двух конструктивных разновидностей преобразователей;

в) вывести формулу, устанавливающую связь между выходным напряжением U_V , напряжением питания $U_{п}$, относительным перемещением движка $m=R_X/R_0$ и коэффициентом нагрузки $k=R_0/R_V$ (рис. 3.1), а по ней рассчитать и построить статическую характеристику $U_V=f(m)$;

г) вывести формулу для расчёта чувствительности измерителя S и построить зависимость $S=f(m)$;

д) вывести формулу для расчёта приведённой погрешности нелинейности δ_H , провести вычисление и построить зависимость $\delta_H=f(m)$; указать максимальное значение погрешности $\delta_{H. \text{МАКС}}$;

е) определить, при каком сопротивлении вольтметра R_V^* погрешность нелинейности не превысит значения $\delta_{H. \text{ДОП}}$.

Известно несколько методик расчёта реостатных преобразователей в зависимости от их типа, схемы включения, условий эксплуатации и заданных исходных параметров [21].

В нашем случае расчёт целесообразно начать с определения диаметра d провода обмотки. Так как известны напряжение питания U_{Π} , полное сопротивление преобразователя R_0 и допустимая плотность тока, протекающего по обмотке $j_{\text{ДОП}}$, то

$$d \geq 2[U_{\Pi}/(\pi j_{\text{ДОП}} R_0)]^{0,5}.$$

Допустим, что $U_{\Pi}=100$ В, $R_0=7,5$ кОм, $j_{\text{ДОП}}=3$ А/мм². Тогда получаем $d \geq 0,075$ мм. По табл. 3.2, где диаметры голого d и изолированного d_H провода указаны в миллиметрах, выбираем ближайший больший диаметр голого провода ($d = 0,08$ мм) и в изоляции ($d_H = 0,095$ мм).

В табл. 3.2 приведён сортамент константанового провода в эмалевой изоляции марки ПЭК. Поэтому, строго говоря, таблица может использоваться только при расчёте по вариантам 1–8. Однако, будем использовать эту таблицу при вычислениях диаметров d и d_H и по другим вариантам задачи.

Таблица 3.2

d	d_H	d	d_H	d	d_H
0,06	0,075	0,12	0,140	0,18	0,205

0,07	0,085	0,13	0,150	0,19	0,215
0,08	0,095	0,14	0,160	0,20	0,225
0,09	0,105	0,15	0,170	0,25	0,280
0,10	0,120	0,16	0,185	0,31	0,340
0,11	0,130	0,17	0,195	0,35	0,385

Зная d и d_{II} , можно определить общую длину провода и число витков обмотки по формулам:

$$L=R_0q/\rho;$$

$$n=l/d_{II},$$

где q – сечение провода, равное $0,25\pi d^2$.

Если обмотка выполнена нихромовым проводом ($\rho=1,1$ Ом·мм²/м), а рабочая длина обмотки (максимальное перемещение движка) равна, например, 80 мм, то $L=34,272$ м, а $n = 842$ витка. Теперь можно найти длину одного витка l_b по соотношению $l_b=L/n$. В нашем случае $l_b=40,7$ мм.

По условию задачи необходимо определить размеры двух разновидностей каркаса – высоту H плоского (пластинчатого) и диаметр D_K цилиндрического, причём толщина b материала (текстолит или гетинакс) известна. Высоту каркаса будем определять по упрощённой формуле $H=0,5l_b-b$, а диаметр D_K вычислять по соотношению $D_K=l_b\pi^{-1}-d_{II}$. Если принять $b=1,5$ мм, то для нашего примера $H=18,9$ мм, а $D_K=12,9$ мм. Эскизы рассчитанного реостатного преобразователя показаны на рис. 3.2.

Одним из параметров, характеризующих реостатный преобразователь, является ступенчатость его статической характеристики, которую можно рассчитать по соотношениям:

$$\Delta_{CT}=U_{II}/n, \text{ В/вит};$$

$$\Delta_{CT}=100/n, \%$$

В рассматриваемом примере $\Delta_{CT} = 118,8 \text{ мВ/вит}$ (0,12 %).

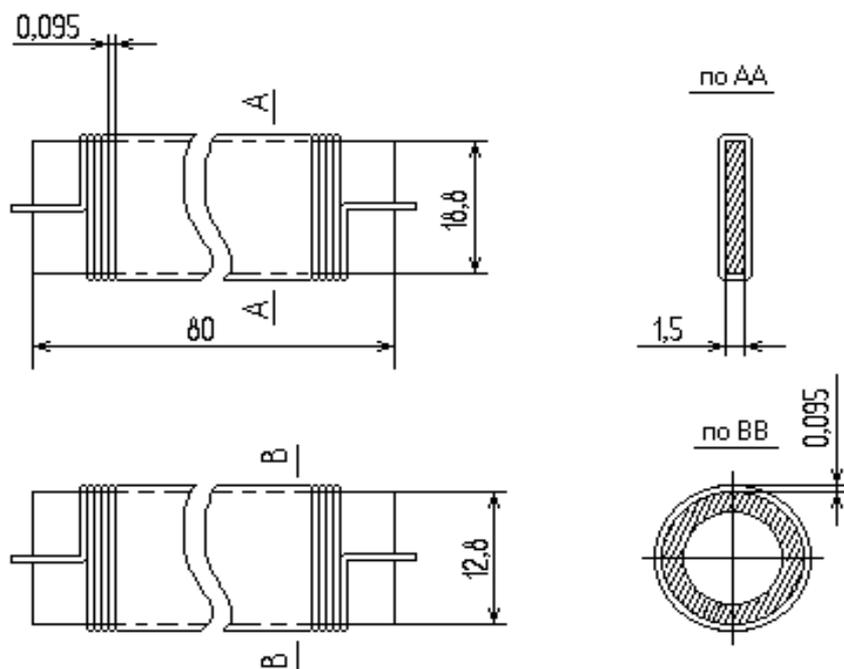


Рис. 3.2. Конструктивные разновидности реостатных преобразователей

Реостатный преобразователь включён по потенциметрической схеме (см. рис. 3.1). Считая известными сопротивления R_0 , R_V , R_X и напряжение U_{II} , можно найти токи в ветвях схемы, а затем – получить формулу для расчёта напряжения, измеряемого вольтметром:

$$U_V = m U_{II} / [1 + km(1 - m)].$$

В рассматриваемом примере $k = 2,5$. Задавая значения m от 0 до 1 с шагом 0,1, рассчитаем и построим зависимость $U_V = f(m)$.

Результаты расчёта для нашего случая сведены в табл. 3.3, а график указанной зависимости показан на рис. 3.3.

Формула для расчёта чувствительности измерителя перемещения имеет вид:

$$S = U_{II}(1 + km^2) / l[1 + km(1 - m)]^2.$$

Результаты расчёта зависимости $S=f(m)$ для рассматриваемого примера приведены в табл. 3.3 и на рис. 3.3.

Таблица 3.3

m	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$U_V, В$	0	14,3	25,0	37,5	57,1	100
$S, В/мм$	1,25	0,70	0,68	0,93	1,66	4,38
$-\delta_H, \%$	0	5,7	15,0	22,5	22,9	0

Абсолютная погрешность нелинейной статической характеристики измерителя перемещения с линейным реостатным преобразователем, обусловленная шунтирующим действием сопротивления нагрузки R_V , определяется по соотношению:

$$\Delta U_X = U_{X,V} - U_{X,\infty},$$

где $U_{X,V}$ – показания вольтметра; $U_{X,\infty}$ – напряжения, снимаемые с потенциометра при $R_V = \infty$.

По условию задачи необходимо найти приведённые погрешности нелинейности δ_H , которые равны отношению абсолютных погрешностей к максимальному напряжению, снимаемому с потенциометра, т.е.

$$\delta_H = (\Delta U_X / U_{II}) 100 \%.$$

После подстановки в это соотношение значения ΔU_X и соответствующих преобразований получим следующую расчётную формулу:

$$\delta_H = -\{km^2(1-m)/[1+km(1-m)]\} 100 \%.$$

Результаты расчёта зависимости $\delta_H=f(m)$ для рассматриваемого примера также сведены в табл. 3.3.

Как видно из данных табл. 3.3, погрешность нелинейности весьма значительна. Для её снижения следовало бы выбрать вольтметр с сопро-

тивлением, в несколько раз превышающим R_0 , т.е. обеспечить коэффициент нагрузки $k \ll 1$. В этом случае максимальная погрешность будет в точке $m=2/3$, а её численное значение может быть рассчитано по формуле:

$$\delta_H = [4k / (6k + 27)] 100 \%$$

Из этого соотношения можно по заданному значению допускаемой погрешности $\delta_{H, \text{доп}} \%$ (см. табл. 3.1) и известному R_0 найти необходимое сопротивление вольтметра:

$$R_V^* = R_0 (400 - 6\delta_{H, \text{доп}}) / (27\delta_{H, \text{доп}}).$$

Так, если погрешность $\delta_{H, \text{доп}}$ не должна превышать 1%, то, для рассматриваемого примера, сопротивление вольтметра должно быть не менее 109,4 кОм. Графическая иллюстрация результатов расчета дана на рис. 3.3.

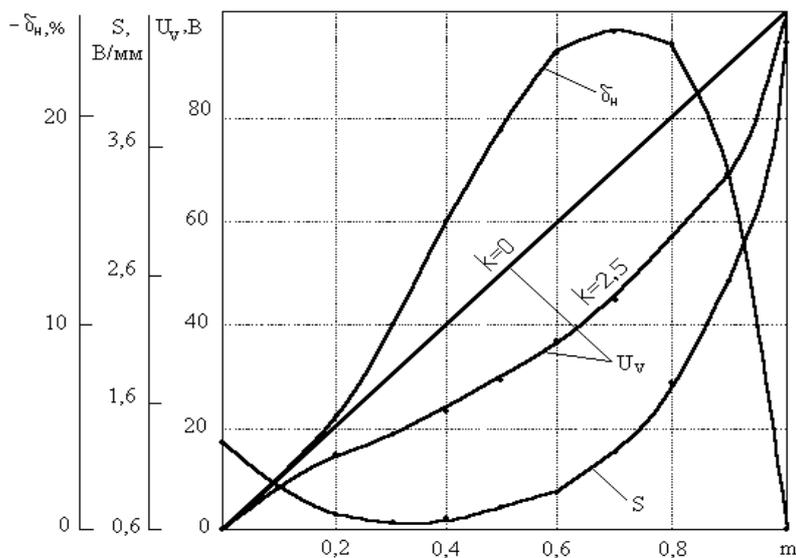


Рис. 3.3. Зависимости выходного напряжения, чувствительности и погрешности нелинейности от положения движка реостатного преобразователя

Параметры рассчитанного реостатного преобразователя, а также измерителя перемещения, сведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

d	H	D _к	l _b	L, м	n, ВИТ	Δ _{СТ.}		R _V [*] , кОм
						мм	мВ/ ВИТ	
0,08	18,9	12,9	40,7	34,3	842	118,8	0,12	109,4

Ответы на все варианты задачи приведены в табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5

N	d, мм	H, мм	D _к , мм	l _b , мм
1	0,06	20,2	13,4	42,4
2	0,06	19,1	12,8	40,3
3	0,08	42,0	27,3	86,0
4	0,08	31,5	20,6	64,9
5	0,09	41,8	27,1	85,5
7	0,11	56,7	36,6	115
8	0,12	67,6	43,5	135
9	0,11	26,8	18,2	57,6
10	0,12	20,6	14,3	45,2
11	0,13	30,0	20,2	64,0
12	0,14	33,1	22,2	70,2
13	0,16	31,8	21,3	67,6
14	0,17	39,5	26,2	83,0
15	0,20	46,2	30,5	96,4
16	0,20	50,1	32,9	104
17	0,20	56,8	37,8	120
18	0,25	66,7	44,1	139
19	0,20	21,9	15,6	49,8
20	0,034	14,3	10,9	34,6
21	0,036	12,4	9,7	30,7
22	0,038	7,8	6,8	21,5
23	0,041	6,2	5,8	18,4
24	0,045	4,7	4,8	15,4

Таблица 3.6.

N	L, м	n, вит	$\Delta_{ст.}$	$\Delta_{ст.}$	R_v^* , кОм
			мВ/вит	%	
1	11,310	266,667	37,50	0,375	5,481
2	10,744	266,667	37,50	0,375	5,207
3	18,096	210,526	71,25	0,475	4,933
4	17,09	263,158	57,02	0,380	8,017
5	20,358	238,095	84	0,420	7,546
6	23,562	208,333	96	0,480	7,074
7	26,609	230,769	108,3	0,433	10,060
8	29,405	214,286	116,667	0,467	9,341
9	12,338	214,286	140	0,467	8,622
10	11,310	250,0	120	0,4	10,620
11	13,994	218,75	160	0,457	9,654
12	14,458	205,882	170	0,486	8,689
13	14,623	216,216	185	0,463	9,699
14	16,193	195,122	205	0,513	8,486
15	17,136	177,778	253,125	0,563	7,274
16	22,312	214,286	210	0,467	7,296
17	42,685	357,143	126	0,280	5,837
18	49,224	352,941	127,5	0,283	4,378
19	21,342	428,571	56	0,233	2,919
20	55,319	1600	15	0,063	131,3
21	49,173	1600	15	0,063	235,3
22	43,026	2000	12	0,05	205,9
23	36,880	2000	12	0,05	176,4
24	30,733	2000	12	0,05	147,0

Задание 3.2. Расчёт неуравновешенной мостовой измерительной схемы. Мостовые схемы широко используются в средствах измерения уровня, давления, температуры, перемещения и других физических величин. Основы теории и методы расчета таких схем изложены в литературных источниках по электрическим измерениям [14–18, 22].

Проведите расчет схемы неуравновешенного моста постоянного тока, питаемого напряжением U (рис. 3.4). Измеряемое сопротивление преобразователя R_1 изменяется по линейному закону $R_1=R_{1,0}(1+\beta)$, где $R_{1,0}$ – начальное сопротивление, при котором мост находится в равновесии, а β – коэффициент, изменяющийся от 0 до 1.

Известно, что $R_{1,0}=10\text{N Ом}$ (для вариантов 1–12) и $R_{1,0}=5\text{N Ом}$ (для вариантов 13–24), а сопротивления плеч R_2 , R_3 и гальванометра R_G связаны с $R_{1,0}$ соотношениями $R_2=kR_{1,0}$, $R_3=mR_{1,0}$ и $R_G=nR_{1,0}$. Значения U , k , m , n для каждого варианта задачи приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

N	U, В	k	m	n	N	U, В	k	m	n
1	10	3,0	1,5	4,0	13	30	1,2	2,5	2,0
2	10	2,8	1,5	4,0	14	30	1,1	2,5	2,0
3	10	2,6	1,5	4,0	15	30	1,0	2,5	2,0
4	15	2,4	1,5	3,5	16	35	0,9	2,5	1,5
5	15	2,2	1,5	3,5	17	35	0,8	2,5	1,5
6	15	2,0	1,5	3,5	18	35	0,7	2,5	1,5
7	20	1,8	2,0	3,0	19	40	0,6	3,0	1,0
8	20	1,7	2,0	3,0	20	40	0,5	3,0	1,0
9	20	1,6	2,0	3,0	21	40	0,4	3,0	1,0
10	25	1,5	2,0	2,5	22	45	0,3	3,0	0,5
11	25	1,4	2,0	2,5	23	45	0,2	3,0	0,5
12	25	1,3	2,0	2,5	24	45	0,1	3,0	0,5

При выполнении задания необходимо:

а) используя один из известных методов расчета электрических цепей (законы Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов или теорему об эквивалентном генераторе), вывести формулы для вычисления тока в измерительной диагонали I_Γ и тока, протекающего по преобразователю I_1 ;

б) определить сопротивления плеч R_2, R_3, R_4 и сопротивление гальванометра R_Γ , а также рассчитать силу тока I_Γ при различных значениях β (рекомендуется изменять β с шагом $\Delta\beta=0,1$) и построить график зависимости $I_\Gamma=f(\beta)$;

в) найти максимальное ($I_{1 \text{ макс}}$) и минимальное ($I_{1 \text{ мин}}$) значения силы тока, протекающего по резистору R_1 ;

г) определить чувствительность схемы для нескольких участков кривой $I_\Gamma=f(\beta)$ и построить график зависимости $S=f(\beta)$;

д) вывести формулу для расчета значения коэффициента k' , при котором обеспечивается (при неизменных остальных параметрах) максимальная чувствительность схемы $S_{\text{макс}}$, и вычислить её значение.

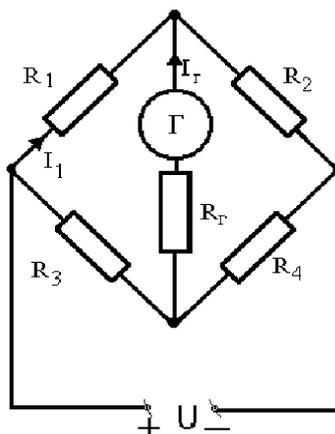


Рис. 3.4. Схема неуравновешенного моста постоянного тока

Последовательность расчёта схемы изложена ниже. Зависимость токов I_1 и I_Γ от напряжения питания U и сопротивлений резисторов схемы имеют вид:

$$I_1 = U[R_3(R_2 + R_4) + R_1(R_3 + R_4)]/M;$$

$$I_1 = U(R_1 R_4 - R_2 R_3)/M,$$

где

$$M = R_1(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2).$$

Для удобства дальнейших расчётов многочлен M целесообразно представить в виде:

$$M = a + bR_1,$$

где

$$a = R_2[R_1(R_3 + R_4) + R_3 R_4];$$

$$b = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_3 R_4.$$

Зная соотношения k , m , n между сопротивлениями, коэффициенты a и b можно выразить следующим образом:

$$a = km R_{1,0}^3 [n(1+k) + km];$$

$$b = m R_{1,0}^2 [(k+n)(1+k) + km].$$

При равновесии мостовой схемы (при $I_1 = 0$).

$$R_{1,0} R_4 = R_2 R_3.$$

Отсюда неизвестное сопротивление R_4 определяется по соотношению:

$$R_4 = R_2 R_3 / R_{1,0} = km R_{1,0}.$$

Допустим, что задано $U = 100$ В; $k = 2,5$; $m = 1$; $n = 5$ и известно, что измеряемое сопротивление первого плеча R_1 изменяется по закону:

$$R_1 = R_{1,0}(1 + \beta),$$

где $R_{1,0} = 50$ Ом, а β может принимать значения от 0 до 1 (при $\beta = 0$ мост находится в равновесии).

В этом случае: $R_2=R_4=125 \text{ Ом}$; $R_3=50 \text{ Ом}$. Зная сопротивления плеч моста и $R_1=250 \text{ Ом}$, можно найти зависимость изменения тока ΔI_Γ от изменения измеряемого сопротивления $\Delta R_1=R_{1,0}\Delta\beta$.

Коэффициент β будем изменять с шагом $\Delta\beta=0.1$. Тогда

$$\Delta I_\Gamma = U \Delta R_1 R_4 / [a + b(R_{1,0} + R_{1,0}\Delta\beta)].$$

Результаты расчёта зависимости $I_\Gamma=f(\beta)$ сведены в табл. 3.8, а графическое изображение этой нелинейной зависимости приведено на рис. 3.5.

Таблица 3.8

β	$I_\Gamma, \text{мА}$	β	$I_\Gamma, \text{мА}$
0,1	6,13	0,6	31,1
0,2	11,8	0,7	35,4
0,3	17,2	0,8	39,3
0,4	22,2	0,9	43,0
0,5	26,9	1,0	46,5

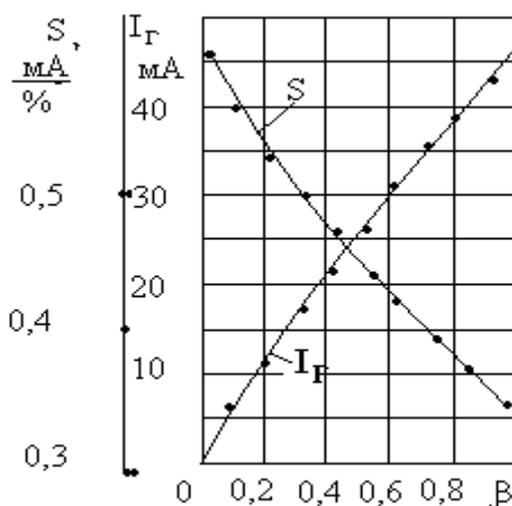


Рис. 3.5. Зависимость тока I_Γ и чувствительности мостовой схемы от β

По данным табл. 3.8 найдём среднюю относительную чувствительность мостовой схемы для каждого i -го из 10 участков кривой $I_\Gamma=f(\beta)$ по формуле:

$$S_i = (I_i - I_{i-1}) / (100 \Delta\beta / \beta_{\text{МАКС}}),$$

где I_i – значение силы тока, соответствующее β_i .

При графическом построении зависимости $S_i = f(\beta_i)$ абсциссы точек следует принять равными $\beta_i = 0,5 \Delta\beta$.

Результаты расчёта указанной зависимости для рассматриваемого примера приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

β_i	$S_i, \text{мА}/\%$	β_i	$S_i, \text{мА}/\%$
0,05	0,61	0,55	0,44
0,15	0,57	0,65	0,42
0,25	0,53	0,75	0,39
0,35	0,60	0,85	0,37
0,45	0,47	0,95	0,35

Далее найдём значение коэффициента k , при котором обеспечивается максимальная чувствительность мостовой схемы вблизи её равновесного состояния (при малом отклонении ΔI).

Выразим ток отклонения гальванометра через заданные параметры и коэффициенты:

$$\Delta I_{\Gamma} = 0.01 U \varepsilon R_{1.0}^{-1} \{ [n(1+k) + km] + [(k+n)(1+k^{-1}) + m](1+\beta) \}^{-1},$$

где ε – относительное изменение сопротивления преобразователя, т.е.

$$\varepsilon = 100 \Delta R_1 / R_{1.0}, \%$$

Отсюда

$$S = \Delta I_{\Gamma} / \varepsilon = 0.01 U [R_{1.0} f(k, n, m, \beta)]^{-1}.$$

Максимальная чувствительность $S_{\text{МАКС}}$ будет при минимуме функции $f(k, n, m, \beta)$. При заданных n , m и β минимум этой функции обеспечивается, когда

$$k' = \{[n(1+\beta)](1+n+m+\beta)^{-1}\}^{0.5}.$$

Для рассматриваемого примера, задавая небольшое отклонение ΔR_1 (например, $\beta=0,1$), получим $k'=0,88$. В этом случае максимальная чувствительность $S_{\text{МАКС}}=1,07 \text{ мА/\%}$.

Завершая расчёт, определим изменение тока, протекающего по сопротивлению преобразователя при изменении R_1 от $R_{1,0}$ до $R_{1,0}+\Delta R_1$.

Так как

$$I_{1 \text{ МАКС}} = U \{ R_{1,0}^2 m [k(1+n+m) + n] \} / (a + b R_{1,0});$$

$$I_{1 \text{ МИН}} = U \{ R_{1,0}^2 m [k(1+n+m) + n] \} / [a + b R_{1,0} (1 + \beta_{\text{МАКС}})],$$

то

$$\Delta I = I_{1 \text{ МАКС}} - I_{1 \text{ МИН}}.$$

Для рассматриваемого примера $I_{1 \text{ макс}}=0,57 \text{ А}$, $I_{1 \text{ мин}}=0,42 \text{ А}$, т.е

$$\Delta I = I_{1 \text{ макс}} - I_{1 \text{ мин}} = 0,15 \text{ А}.$$

Результаты расчёта примера сведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Сопротивление, Ом						k'	$S_{\text{МАКС}}$ мА /%	Сила тока, А	
$R_{1\text{МИН}}$	$R_{1\text{МАКС}}$	R_2	R_3	R_4	R_Γ			$I_{1 \text{ МАКС}}$	$I_{1 \text{ МИН}}$
50	100	125	50	125	250	0,88	1,07	0,57	0,42

Ответы по всем вариантам задачи даны в табл. 3.11.

Значения тока I_Γ (при $\beta=0,5$) и S (при $\beta=0,05$) приведены для контроля правильности расчёта зависимостей $I_\Gamma=f(\beta)$ и $S=f(\beta)$, соответственно.

Таблица 3.11

N	R ₄ , Ом	I _Г , мА при β=0,5	S, мА/% при β=0,05	k'	S _{МАКС} , мА/%	Сила тока, мА	
						I _{1.МАКС}	I _{1.МИН}
1	45	13,6	0,31	0,82	0,46	250	186
2	84	7,0	0,16		0,23	132	97
3	117	4,9	0,11		0,15	93	68
4	144	6,2	0,14	0,79	0,19	110	79
5	165	5,1	0,12		0,15	94	67
6	180	4,4	0,10		0,13	83	59
7	252	5,5	0,13	0,74	0,15	102	71
8	272	4,8	0,11		0,14	96	66
9	288	4,4	0,10		0,12	94	64
10	300	5,6	0,13	0,70	0,15	100	67
11	308	5,2	0,12		0,14	118	79
12	312	4,9	0,12		0,13	91	60
13	195	11,6	0,28	0,63	0,31	210	137
14	193	11,0	0,24		0,28	204	132
15	188	10,4	0,25		0,26	200	177
16	180	13,3	0,33	0,57	0,34	230	144
17	170	12,7	0,31		0,32	229	141
18	138	12,1	0,30		0,30	229	139
19	171	14,7	0,37	0,46	0,38	263	157
20	150	14,0	0,36		0,36	267	156
21	126	13,2	0,34		0,34	272	155
22	99	18,2	0,47	0,35	0,47	774	429
23	69	16,3	0,43		0,45	326	176
24	36	12,3	0,33		0,43	341	178

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фандеев Е.И. Задания по курсу «Метрология и технологические измерения» и методические указания по их выполнению. – Новочеркасск: НПИ, 1993. – 63 с.
2. Фандеев Е.И., Авдеев В.П. Методическое пособие к выполнению заданий по курсам «Метрология и технологические измерения» и «Технические средства электроавтоматики». – Новочеркасск: НПИ, 1993. – 81 с.
3. Авдеев В.П., Фандеев Е.И., Арестов Н.М. Статические и динамические характеристики технических средств и объектов автоматизации: Учебное пособие. – Новочеркасск: НАБЛА, 1995. – 141 с.
4. Фандеев Е.И. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебно-методическое пособие к решению задач и выполнению расчётных заданий. Ч.1 / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 52 с.
5. Демидова-Панфилова Р.М., Малиновский В.Н., Солодов Ю.С. Задачи и примеры расчётов по электроизмерительной технике: Учебн. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
6. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов / В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др.; Под ред. В.Г. Герасимова. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
7. Сборник задач по расчёту электрических цепей / В. Н. Башарина, Е.И. Богданов, М.С. Глазенап и др. – М.: Высш. шк., 1967. – 384 с.
8. Сборник задач с решениями по общей электротехнике / В.К. Пономаренко, А.Ф. Симонов, В.И. Константинов и др. – М.: Высш. шк., 1972. – 184 с.
9. Сборник задач по теории электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Ю.Б. Мерзютин и др. – М.: Высш. шк., 1980. – 224 с.

10. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Л.А. Бессонов, В.И. Галтеева, И.Г. Демидова и др. – М.: Высш. шк., 1975. – 487 с.
11. Сборник задач и упражнений по электрическим и электронным измерениям: Учеб. пособие для втузов / Э.Г. Атамалян, Е.Р. Аствацатурьян, О.Н. Бодряшова и др.; Под ред. Э.Г. Атамалян. – М.: Высш. шк., 1980. – 117 с.
12. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
13. Шабалин С.А. Прикладная метрология в вопросах и ответах. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 192 с.
14. Электрические измерения / В.Н. Малиновский, Р.М. Демидова-Панфёрова, Ю.Н. Евланов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 416 с.
15. Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
16. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерений электрических величин. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
17. Электрические измерения. Учебник для втузов / Под ред. А.В. Фремке, Е.М. Душина. – 5-е изд. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
18. Аналоговые электроизмерительные приборы / Е.Г. Бишард, Е.А. Киселёва, Г.П. Лебедев и др. – М.: Высш. шк., 1991. – 415 с.
19. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
20. ГОСТ 6651–84. Термопреобразователи сопротивления ГСП. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 32 с.
21. Расчёт измерительных и усилительных элементов автоматических систем. Справочное пособие // Н.М. Чумаков, А.Э. Асланян, М.Г. Вайнер и др. – Киев: Техника, 1971. – 356 с.
22. Кривоносов А.И., Новиков П.Н., Кауфман В.Н. Приложения математических методов к электрическим расчётам. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 239 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Список сокращений и обозначений	5
1. Задачи по измерению электрических величин	6
2. Задачи по измерению неэлектрических величин	33
3. Комплексные задания по расчету измерительных преобразователей и приборов	55
Библиографический список	71

Учебное издание

Фандеев Евгений Иванович
Иванов Борис Аркадьевич
Ягубов Зафар Хангусейн оглы

ПРАКТИКУМ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Часть 1

Учебное пособие

Редактор И.А. Безродных

Лицензия серия ЛР № 020827 от 29 сентября 1998
План 2002 г., позиция 44. Подписано в печать 04.03.2002 г.
Компьютерный набор. Гарнитура Times New Roman.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 250 экз. Заказ № 132.

Ухтинский государственный технический университет
169300, г.Ухта, ул. Первомайская, 13.
Отдел оперативной полиграфии УГТУ
169300, г.Ухта, ул. Октябрьская, 13.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК
